

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Weiterentwicklung der aero-gammaspektrometrischen
Messsysteme des BfS und Anpassung der Mess- und
Auswerteverfahren an die Anforderungen des Notfallschutzes -
Vorhaben 3611S60013**

**Auftragnehmer:
TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München**

**R. Schütz
R. Mameghani
R. Stuchels
L. Hummel**

**Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit (BMUB) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.**



Bundesamt für Strahlenschutz

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUB (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

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

BfS-RESFOR-105/15

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2015080713158

Salzgitter, August 2015

Forschungsvorhaben 3611S60013

Weiterentwicklung der aero-gammaspektrometrischen Messsysteme des BfS und Anpassung der Mess- und Auswerteverfahren an die Anforderungen des Notfallschutzes

Abschlussbericht

Bericht ETS 1 – 23/2014

Juli 2014

**Erstellt im Auftrag der Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und
Reaktorsicherheit
von der TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Energie und Technologie**

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

Auftragnehmer:

TÜV SÜD Industrie Service GmbH

Westendstr. 199

80686 München

Bearbeiter:

Rainer Schütz

Raphael Mameghani

Regina Stuchels

Lothar Hummel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung.....	6
1 Einleitung	8
2 Ergebnisse der Literaturrecherche	10
2.1 Übergeordnete Literatur	10
2.2 Detektoren und Messsysteme	12
2.3 Einflüsse auf den Kalibrierfaktor	14
2.3.1 Luftkontamination	14
2.3.2 Orographie	16
2.3.3 Vegetation, Feuchte	17
2.3.4 Verteilung am Boden	18
2.4 Verfahren zur Bestimmung von Kalibrierfaktoren und zur Analyse von Messdaten	19
2.4.1 Kalibrierung der Detektoren.....	19
2.4.2 Verarbeitung der Spektren	20
3 Berechnung der Geometriefaktoren.....	26
3.1 Einleitung.....	26
3.2 Berechnungsmethode	27
3.2.1 Geometriemodell	27
3.2.2 Implementierung.....	30
3.2.3 Validierung	37
3.3 Abschwächungskoeffizienten	40
3.4 Ergebnisse	42
3.4.1 Unebenes Gelände.....	42
3.4.2 Laterale Inhomogenitäten.....	53
3.4.3 Bodenvegetation	58
3.4.4 Luftkontamination	60
4 Kalibrierung am Hubschrauber	63
4.1 Einleitung.....	63
4.2 Kalibriermethode	63
4.3 Durchführung.....	66
4.4 Ergebnisse	69
4.4.1 Datenanalyse	69
4.4.2 Berechnung der Ausbeute und Abschätzung der Unsicherheit	71
4.4.3 Darstellung der Ergebnisse	74

5	Zusammenführung von Geometriefaktoren und Kalibrierung.....	76
5.1	Validierung der Integration	76
5.2	Unterschiede zum Geometriefaktor	78
5.2.1	Ausgedehnte kontaminierte Ebene	78
5.2.2	Geneigte kontaminierte Ebene	79
5.2.3	Luftkontamination	81
6	Messflüge	82
6.1	Durchführung der Messflüge	82
6.2	Vergleich Messung und Berechnung.....	83
6.3	Abschätzung der Unsicherheit.....	85
7	Nachweisgrenze und Optimierung der Leistungsfähigkeit.....	86
7.1	Ermittlung der charakteristischen Grenzen nach DIN ISO 11929.....	86
7.1.1	Die Messgröße und deren Standardunsicherheit	87
7.1.2	Berechnung der Erkennungsgrenze	89
7.1.3	Berechnung der Nachweisgrenze	90
7.1.4	Bester Schätzwert und Vertrauensgrenzen	91
7.1.5	Beispiel zur Berechnung der charakteristischen Grenzen	92
7.2	Messzeitoptimierung bei der Suche nach radioaktiven Strahlern	94
7.2.1	Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 30 Metern Höhe	96
7.2.2	Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 60 Metern Höhe	98
7.2.3	Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 90 Metern Höhe	102
7.2.4	Messung mit dem Ge-Detektor in etwa 30 Metern Höhe.....	104
7.2.5	Optimierung der Flugbahn.....	107
8	Erkennung von Aktivitäten im Luftvolumen	109
8.1	Vorgehensweise	109
8.1.1	Zählratenverhältnis „NaI vorne“ zu „NaI hinten“	109
8.1.2	Zählratenverhältnis „NaI vorne“ zu Germaniumdetektor	110
8.1.3	Zählratenverhältnis „NaI hinten“ zu Germaniumdetektor	112
8.2	Messergebnisse für Bodenkontamination.....	114
9	Literatur	118

10	Anhänge	121
	Anhang 1: Tabellen.....	121
	Anhang 1.1: Koordinaten der Messpunkte bei der Kalibrierung	121
	Anhang 1.2: Bei der Kalibrierung verwendete Messpunkte.....	124
	Anhang 1.3: Ausbeuten für Detektor 1 bis 5	126
	Anhang 1.4: Durchgeführte Messflüge.....	141
	Anhang 1.5: Ergebnisse der Messflüge und Vergleich mit der Rechnung	143
	Anhang 1.6: Nachweisgrenzen ausgewählter Testflüge für die 662-keV- Linie von Cs-137 beim Aufspüren einer Punktquelle	147
	Anhang 1.7: Berechnete Zählraten der Detektorgruppen „Nal vorne“, „Nal hinten“ und des Germanium-Detektors	153
	Anhang 2: Abbildungen	159
	Anhang 2.1: Benutzeroberfläche des Programms	159
	Anhang 2.2: Messpunkte	160
	Anhang 2.3: Fotos der Kalibrierung.....	162
	Anhang 2.4: Gammaspektren	163
	Anhang 2.5: Darstellung der Ausbeuten	164
	Anhang 2.6: Interaktiver Peakfit	169
	Anhang 3: Betrachtung zur Symmetrie des Hubschraubers	170

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 3611S60013 „Weiterentwicklung der aero-gammaspektrometrischen Messsysteme des BfS und Anpassung der Mess- und Auswerteverfahren an die Anforderungen des Notfallschutzes“ wurden folgende Aspekte betrachtet:

Eine Literaturrecherche hat einzelne im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben wichtige Themen aufgegriffen. Dabei wurde auf die Detektoren und Messsysteme, die Einflüsse auf den Kalibrierfaktor und einzelne Verfahren zur Bestimmung von Kalibrierfaktoren und zur Analyse von Messdaten eingegangen.

Es wurde eine Vorgehensweise zur Modellierung der Geometrien für am Boden verteilte Radionuklide entwickelt und in ein Softwareprogramm umgesetzt. Damit berechnete Beispiele für ausgewählte Geometriefaktoren wurden aufgeführt.

Am im Hubschrauber eingebauten Messsystem wurde eine Kalibrierung mit den Radionukliden Cs-137 und Co-60 durchgeführt. Dabei wurden Einstrahlrichtungen von unten und oben und verschiedene Füllstände des Haupttanks des Hubschraubers berücksichtigt. Die erhaltene Kalibrierung kann bei Bedarf um weitere Nuklide erweitert werden.

Mit Hilfe des entwickelten Programms und der aus der Kalibrierung erhaltenen Daten wurden beispielhaft charakteristische Grenzen für die Messung eines Cs-137-Punktstrahlers berechnet. Das dazu verwendete Spreadsheet wird im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Verfügung gestellt. Für das Beispiel der Suche einer Cs-137-Punktquelle wurde eine optimierte Suchstrategie entwickelt und vorgestellt.

Schließlich wurde eine Methode theoretisch entwickelt und durch Daten aus Messflügen über Bodenkontaminationen validiert, mit der Kontaminationen in der Luft und am Boden aus den Messdaten der verschiedenen Detektoren selbst unterschieden werden können.

Es wurde die Anwendbarkeit der verschiedenen Methoden gezeigt. Mit dem entwickelten Softwareprogramm kann darüber hinaus eine Vielzahl von interessierenden

Szenarien betrachtet werden. Die Kalibrierdaten, die zurzeit für Cs-137 und Co-60 vorliegen, können durch zusätzliche Messungen verbessert und auf zusätzliche Energielinien ausgeweitet werden.

1 Einleitung

Mit Schreiben des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) vom 16.09.2011 hatte die TÜV SÜD Industrie Service GmbH (TÜV SÜD) den Zuschlag zur Durchführung des Forschungsvorhabens 3611S60013 „Weiterentwicklung der aero-gammaspektrometrischen Messsysteme des BfS und Anpassung der Mess- und Auswerteverfahren an die Anforderungen des Notfallschutzes“ sowie den Vertrag dazu erhalten [BfS 11]. Mit dem vorliegenden Abschlussbericht werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens vorgelegt.

Das Forschungsvorhaben behandelte Fragen der Aerogammaspektrometrie, in diesem Fall Messungen von Gammastrahlung vom Hubschrauber aus. Die Hauptanwendungen sind dabei die Ermittlung abgelagerter natürlicher bzw. anthropogener Radionuklide am Boden sowie das Auffinden radioaktiver Strahlenquellen. Dazu verwendet das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) gammaspektrometrische Messsysteme, die aus einem Germaniumdetektor und vier großvolumigen Natriumiodid(Tl)-Detektoren bestehen und die innerhalb kurzer Zeit in einen Hubschrauber vom Typ EC135 der Bundespolizei eingebaut werden können. Die Ermittlung quantitativer Ergebnisse aerogammaspektrometrischer Messungen erfordert die Berücksichtigung von Einflussgrößen, z. B. der Verteilung der Radionuklide im Boden, der Oberflächenstruktur des Geländes, ggf. der Strahlungsbeiträge aus dem Luftvolumen nach störfallbedingter Freisetzung radioaktiver Stoffe oder der komplexen Wechselwirkung der Strahlung mit dem Hubschrauber, in dem die Detektoren eingebaut sind.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, den Einfluss relevanter Parameter auf das Messergebnis durch Modellrechnungen und Kalibriermessungen zu bestimmen und für alle sich als wesentlich erweisenden Einflussgrößen Korrekturverfahren zu erstellen. Ein wesentlicher Teil des Vorhabens bestand darin, die Geometriefaktoren für verschiedenste Quellengeometrien zu berechnen und zu bewerten.

Im Arbeitspaket 1 (AP 1) wurde gemäß dem o. g. Vertrag und dem dazugehörigen Arbeitsprogramm der relevante Stand von Wissenschaft und Technik aufgearbeitet. Dazu gehörten eine Literaturrecherche und die Zusammenstellung wichtiger Untersuchungen und Ergebnisse von Arbeiten in diesem Aufgabenfeld (Kapitel 2).

Im Kapitel 2.1 sind zusammenfassende Schriftstücke und Veröffentlichungen vorgestellt, die allgemein die Themen In-situ- und Aerogammaspektrometrie zum Inhalt haben und als Einstieg in die Thematik dienen. Im Kapitel 2.2 wird ein Überblick über die auf dem Gebiet der Aerogammaspektrometrie in verschiedenen Ländern vorhandenen Detektoren und Messsysteme gegeben. Anschließend werden im Kapitel 2.3 vor allem Veröffentlichungen vorgestellt, die auf die in diesem Forschungsvorhaben im Fokus stehenden Einflüsse auf den Kalibrierfaktor eingehen, wie Luftkontamination, Geländeform und Vegetation bzw. Bodeneigenschaften. Die Veröffentlichungen, die hier und im Kapitel 2.4 zitiert werden, beschäftigen sich im Wesentlichen mit Messungen, die mit NaI-Detektoren durchgeführt wurden. Ein Überblick über die kalibriertechnischen und mathematischen Verfahren zur Bestimmung von Kalibrierfaktoren (vorhandene Algorithmen, Programme, Kalibrierungen und praktische Erfahrungen) und zur Auswertung der gewonnenen Spektren wird im Kapitel 2.4 gegeben.

Im Arbeitspaket 2 (AP 2) sollten Geometriefaktoren für eine Vielzahl von Parametern berechnet werden. Weiter wurde im AP 2, Teil 5 verlangt, Kalibriermessungen zur Bestimmung der Detektorausbeute am im Hubschrauber eingebauten Spektrometrie-Messsystem durchzuführen und die Messergebnisse graphisch darzustellen.

Zunächst wird im Kapitel 3 eine Beschreibung des entwickelten Programmes gegeben und es werden die Ausgangsdaten für die Berechnung der Geometriefaktoren und die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Im Kapitel 4 folgt eine Beschreibung der Kalibrierung an einem EC135-Hubschrauber im Hangar der Bundespolizei in Oberschleißheim und der daraus ermittelten Resultate. Die Zusammenführung von Geometriefaktoren und den aus der Kalibrierung gewonnenen Daten wird im Kapitel 5 beschrieben.

Im Rahmen des Arbeitspaketes 3 (AP 3) wurden Messflüge durchgeführt und mit den Rechnungen verglichen (Kapitel 6). Außerdem wurden spezielle Fragestellungen behandelt, wie die Berechnung von charakteristischen Grenzen, die Systemoptimierung bei der Suche nach Strahlenquellen (Kapitel 7) und die Entwicklung einer Vorgehensweise zur verbesserten Detektion von Bodenstrahlung bei einer vorhandenen Luftkontamination (Kapitel 8).

2 Ergebnisse der Literaturrecherche

2.1 Übergeordnete Literatur

In diesem Kapitel werden Schriften vorgestellt, die zusammenfassende Beschreibungen oder auch grundlegende Vorgehensweisen beinhalten.

Eine Einführung in das Thema der In-situ-Gammaspektrometrie im Allgemeinen, aber auch der Aerogammaspektrometrie stellt der ICRU Report 53 [ICRU 94] aus dem Jahr 1994 dar. Darin wird ein Überblick über den damaligen Stand der Detektoren, die für die Aufzeichnungen verwendete Technik und die Kalibriermöglichkeiten gegeben. Eine Standardmethode zur Ermittlung von Kalium-, Uranäquivalent- und Thoriumäquivalent-Konzentrationen wird näher ausgeführt. Die Äquivalente werden dabei auf der Annahme eines säkularen Gleichgewichtes und einer homogenen Aktivitätsverteilung berechnet. Darauf wird im Kapitel 2.4 näher eingegangen.

Die IAEA hat u. a. zwei technische Unterlagen, die Angaben zur Aerogammaspektrometrie enthalten, in Form von Tecdocs herausgegeben [IAEA 90, IAEA 03]. In [IAEA 03] wird neben Grundlegendem zur Radioaktivität und Messung von Gammastrahlung am Boden auch auf die Aerogammaspektrometrie vor allem zur Kartierung natürlich vorkommender, aber auch künstlich erzeugter radioaktiver Stoffe eingegangen. Konkrete Inhalte daraus werden in den folgenden Kapiteln zitiert.

Zur In-situ-Gammaspektrometrie sind ansonsten vor allem die Veröffentlichung von Beck et al [Bec 72] und die Norm DIN 25462 [DIN 00] bzw. deren Nachfolgenorm DIN ISO 18589-7 [DIN 11a] zu erwähnen. Auf [Bec 72] geht das Konzept zurück, die Aktivität auf dem Boden oder im Boden aus der Zählrate im Photopeak für die Gammastrahlung des entsprechenden Radionuklides mit Hilfe von drei Faktoren zu berechnen. Dieses Konzept wurde durch die Normen [DIN 00] und [DIN 11a] in das technische Regelwerk aufgenommen.

Der Kalibrierfaktor, d. h. der Zusammenhang zwischen Nettoimpulszählrate und Aktivitätskonzentration, setzt sich gemäß DIN 25462 folgendermaßen zusammen:

$$K_{k,V,E} = \left(\frac{N}{A}\right)_{k,V,E} = \left(\frac{N_0}{\Phi}\right)_E \cdot \left(\frac{\Phi}{A}\right)_{V,E} \cdot \left(\frac{N}{N_0}\right)_{k,V,E}$$

wobei

$\left(\frac{N_0}{\Phi}\right)_E$ die Detektorausbeute,

$\left(\frac{\Phi}{A}\right)_{V,E}$ der Geometriefaktor und

$\left(\frac{N}{N_0}\right)_{k,V,E}$ der Winkelkorrekturfaktor ist.

Der Kalibrierfaktor ist abhängig von dem verwendeten Detektorsystem (k), der Photonenenergie (E) und der Aktivitätsverteilung in der unterstellten Quellgeometrie (Verteilungsmodell V).

Die Detektorausbeutefunktion stellt den Zusammenhang zwischen N_0 im Photopeak als Funktion der Gammaenergie (E) und der Flussdichte (ϕ) ungestreuter Photonen ($[\phi] = 1 / \text{cm}^2 \text{ s}$) dar. Die Detektorausbeutefunktion wird i. A. mit punktförmigen Kalibrierstrahlern bestimmt. Die entsprechende Einheit ist cm^2 (Impulsrate im Photopeak pro Photon pro cm^2 und Sekunde). Die Detektorausbeutefunktion hängt ausschließlich vom verwendeten Detektorsystem ab.

Die Geometriefunktion ist der ungestreute Photonenfluss am Ort des Detektors in Abhängigkeit von der Aktivitätsverteilung in der Quelle (V) und der Photonenenergie (E). Die Geometriefunktion ist unabhängig vom Detektor und wird über numerische Berechnungen bestimmt. Der Geometriefaktor für eine feste Photonenenergie wird bei endlich bzw. quasi-unendlich ausgedehnten ebenen Quellen über sogenannte Exponentialintegralfunktionen berechnet, deren Integrale analytisch nicht lösbar sind.

Die Winkelkorrekturfunktion berücksichtigt die Richtungsabhängigkeit der Nachweiswahrscheinlichkeit des Kollimator-Detektor-Systems. Er ist abhängig von dem verwendeten Kollimator-Detektor-System (k) und der Winkelverteilung der am Ort des

Detektors einfallenden ungestreuten Photonen (in Abhängigkeit von V) als Funktion der Photonenenergie (E). Die Formeln zur Berechnung des Winkelkorrekturfaktors bei einer festen Photonenenergie sind der Literatur, z. B. DIN 25462, zu entnehmen. Bei stark winkelabhängigen Messsystemen – wie im vorliegenden Fall – ist die Berechnung der Winkelkorrekturfaktoren die aufwändigste Aufgabenstellung der numerischen Berechnungen, da diese sich mathematisch als Faltung der differentiellen Geometriefaktoren $\frac{\partial^2 \Phi(E)_V}{\partial \phi \cdot \partial \vartheta}$ mit den Ausbeutekorrekturfaktoren $k_{E,\phi,\vartheta}$ des Messsystems darstellen (vgl. DIN 25462 Anhang B [DIN 00]).

Aus der Multiplikation der Detektorausbeute, des Geometriefaktors und des Winkelkorrekturfaktors resultiert der Gesamtkalibrierfaktor für das richtungsabhängige Spektrometriesystem.

2.2 Detektoren und Messsysteme

Ein Überblick über die in europäischen Ländern verwendeten aerogammaspektrometrischen Messsysteme wird z. B. in den beiden Veröffentlichungen von Sanderson et al [San 97], [San 04] gegeben:

Aerogammaspektrometrische Messungen von luftgetragener Aktivität finden in einem weiten Höhenbereich statt, wobei die Kontamination des Fluggerätes beachtet werden muss. Für Messungen von Kontaminationen am Boden wird dagegen typischerweise in Höhen von 100 m bis 200 m geflogen. Die Messung von am Boden deponierten radioaktiven Stoffen liegt im Hauptfokus der europäischen Gruppen, die sich mit Aerogammaspektrometrie beschäftigen und deren Anzahl vor allem seit dem Reaktorunfall in Tschernobyl gewachsen ist. Seitdem gab es auch große Fortschritte bei der Miniaturisierung der Elektronik, der Verfügbarkeit von GPS-Systemen und in der Datenverarbeitung.

Eine beispielhafte Übersicht über die in Europa im Jahr 1997 verwendeten Messsysteme wird in [San 97] gegeben. Den damaligen Stand kann man folgendermaßen zusammenfassen. Als Fluggeräte wurden im Wesentlichen Hubschrauber (vor allem der Typen AS350 und Allouette) verwendet, in einzelnen Ländern ist auch der Einbau der Messsystems in Flugzeuge möglich.

Als Detektoren wurden Systeme mit 12 l bis 32 l NaI-Detektoren und in einigen Ländern zusätzlich ein Germaniumdetektor verwendet. Die typischen Zeiten, um die Systeme einsatzbereit zu machen, d. h. sie in den Helikopter einzubauen, reichen von ca. einer Stunde bis zu einem Tag je nach Einsatzzweck.

Die Einsatzbereiche der Messsysteme erstrecken sich auf Messungen der Bodenkontaminationen nach Unfällen, z. B. in der Vergangenheit von Cs-137 nach dem Unfall von Tschernobyl, Messungen des natürlichen Strahlungsuntergrundes, Messungen innerhalb von radioaktiven Wolken, die Suche von Quellen, Messungen von aus industrieller Nutzung resultierenden Bodenkontaminationen und die Überwachung von kerntechnischen Anlagen.

Der Sichtbereich der Detektoren wächst mit größerer Höhe schnell an, abhängig von der Gammaenergie, der winkelabhängigen Empfindlichkeit und der Tiefenverteilung der Quelle im Boden. Bei Gammastrahlung mit Energien über 500 keV stammen unter typischen Bedingungen 90 % der detektierten Strahlung aus einem Gebiet innerhalb eines Radius von ca. 4mal bis 5mal der Flughöhe. Durch die große Fläche, die bei einer z. B. eine Sekunde dauernden Messung gemessen wird und die hohe Fluggeschwindigkeit (30 m/s bis 50 m/s) ergeben sich abgescannte Flächenraten von 10 km²/h bis 100 km²/h, die mit konventionellen am Boden durchgeführten Messungen nicht erreicht werden können. Die Empfindlichkeit der Messsysteme hängt vom Detektortyp, der Messzeit und der Flughöhe ab.

In großen Übungen, wie z. B. der RESUME 2002 [NKS 03] wurden von vielen Gruppen die Fähigkeiten demonstriert, konsistente Werte für Dosisleistungen und Radionuklidkonzentrationen am Boden zu produzieren. Das Szenario war dabei eine Cs-137-Deposition nach einem Unfall. Es wird angestrebt, ein gemeinsames Datenformat zu verwenden, um die Messdaten geeignet speichern und auch austauschen zu können.

Außer den Detektoren besteht die Instrumentierung des Hubschraubers üblicherweise aus einem GPS-Navigationssystem, einem Radarhöhenmesser, einem Barometer und einem Thermometer, mit deren Messdaten eine Korrektur der Messungen auf die Höhe, die jeweilige Temperatur und den Druck durchgeführt werden kann. Nach

[IAEA 03] ist die GPS-Navigation auf ca. 5 m genau, das Radarhöhenmeter auf 2 %, wobei Messdaten jede Sekunde generiert werden.

Die Aufgaben dieses Forschungsvorhabens bezogen sich konkret auf das Messsystem des BfS. Es besteht aus vier 4-I-Nal-Detektoren und einem Germaniumdetektor mit einer Efficiency von 58 %, die in einer bestimmten Konfiguration in einem Hubschrauber vom Typ EC135 der Bundespolizei eingebaut sind. Messungen vor 2004 wurden vom BfS dagegen mit einer Allouette durchgeführt [Win 01, Win 04]. Die Kombination aus Hubschrauber und Detektoren wurde als Detektor mit komplexer Winkelabhängigkeit betrachtet.

2.3 Einflüsse auf den Kalibrierfaktor

2.3.1 Luftkontamination

Radioaktivität in der Luft hat einen störenden Einfluss auf Messungen der Bodenkontamination. Aber auch die Aufgabe, mit einem Aerogammaspektrometriesystem die Aktivität und Ausdehnung einer radioaktiven Wolke selbst zu ermitteln, ist eine Herausforderung, wie in der Veröffentlichung von Grasty et al [Gra 97] dargelegt wird. Ein finnische Flugzeug flog mit einem System mit insgesamt 25 I Nal-Detektoren an Bord am 29.04.1986 in ca. 2 km Höhe durch die radioaktive Wolke, die sich nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl in Richtung Skandinavien ausgebreitet hatte. Sie detektierten im Wesentlichen Iod- und Cäsiumisotope sowie La-140. Davon konnten auf Grund von Interferenzen nur die Linien von I-131 (364,49 keV) sowie La-140 (1596,21 keV) einzeln aufgelöst werden.

Es stellte sich heraus, dass die während des Fluges durch die Wolke aufgetretenen Kontaminationen auf dem Flugzeug die Messung der Strahlung aus der Wolke erschweren. Nach einer Stunde Flug innerhalb der Wolke waren beide Beiträge ungefähr gleich groß. Erst durch eine nachträgliche Analyse der Daten und Annahmen über den Anstieg der Kontamination konnte das Messergebnis von den Kontaminationsbeiträgen bereinigt werden. Dabei wurde angenommen, dass die Kontamination proportional zur Aktivität in der Wolke ist und während des zweistündigen Fluges keine Kontamination abgelöst wurde. Im Juli 1986 wurde das Flugzeug dann gründlich gewaschen, um die Kontaminationen zu entfernen. Ein beträchtlicher Anteil

konnte jedoch nicht entfernt werden. Im weiteren Verlauf reduzierte sich die Aktivität dann stärker als durch den radioaktiven Zerfall erklärt werden konnte, so dass daraus geschlossen wurde, dass bei weiteren Flügen durch den Luftstrom um das Flugzeug und durch seine Triebwerke die Kontamination teilweise weggeblasen worden war.

Truffert et al [Tru 09] gehen in ihrer Veröffentlichung auf die Luftkontamination mit Radon und seinen Folgeprodukten ein. Für die Messdaten aus der Aerogamma-spektrometrie gibt es drei Hauptkorrekturen der ursprünglichen Spektren: die Untergrundkorrektur, die Höhenkorrektur und das Compton-Stripping. Gemäß [Tru 09] ist dabei die wichtigste und gleichzeitig auch die schwierigste Korrektur die Untergrundkorrektur, zu der der Untergrund des Fluggerätes, die kosmische Strahlung und der Radonuntergrund beitragen. Insbesondere bei der Messung von im Boden befindlichem Uran treten die gleichen Gammalinien im Spektrum auf wie durch Radonfolgeprodukte in der Luft. Die Radonkonzentration hängt zusätzlich von den Wetterbedingungen ab und kann während eines Messfluges beträchtlich schwanken. Für die Korrektur des Radonuntergrundes werden in [Tru 09] zwei Methoden angegeben: Die Methode mit einem aufwärtsgerichteten Detektor (Upward looking detector technique) und die Methode des Linienvverhältnisses (Spectral ratio technique). Die erste Methode bedient sich eines Detektors, der gegen Einstrahlung von unten abgeschirmt ist und die Einstrahlung aus Radonfolgeprodukten von oben misst. Diese Anteile werden dann in geeigneter Weise von dem Spektrum, das vom Boden her gemessen wird, subtrahiert. Für eine genaue Kalibrierung ist dabei eine Messfläche über Wasser erforderlich, wo die Radonkonzentration derjenigen über dem zu messenden Grund entspricht, d. h. die Wasserfläche muss in der Nähe der auszumessenden Fläche liegen. Diese Methode wurde z. B. bei Messungen in Französisch-Guyana und in Frankreich in Meeresnähe eingesetzt. Bei der zweiten Methode wird der Umstand ausgenutzt, dass das Verhältnis der zwei Bi-214-Linien bei 0,609 MeV und bei 1,76 MeV in Spektren von atmosphärischem Radon größer ist als in Spektren von Uran im Boden. Dieser Vergleich ist bei vorhandenem Kernwaffentestfallout oder nach Reaktorunfällen nicht anwendbar, da auftretendes Cs-137 die Bi-214-Linie bei 0,609 MeV stört. Erfolgreich angewendet wurde die Methode z. B. bei Messungen in Gabun. Sowohl die Methode mit einem aufwärtsgerichteten Detektor als auch die des Linienvverhältnisses hat Einschränkungen, wenn das Radon nicht gleichmäßig verteilt ist, z. B. bei Schichtungen von warmen und kalten Luftmassen oder für

die spektrale Methode, wenn erhöhte Radonkonzentrationen am Boden auftreten und nicht von Uran im Boden unterschieden werden können. Gemäß [Tru 09] sollten darüber hinaus Messungen bei oder nach Regenfällen vermieden werden, wenn Schwebstoffe ausgewaschen worden sind. Feuchtigkeit im Boden ist auf Grund der gestörten Radonemanation eine weitere Unsicherheitsquelle.

Weitere Aspekte zu Einflüssen von Luftkontamination auf das Messergebnis sowie die Entwicklung und Diskussion einer Methode zur Identifikation von Radionuklidaktivitäten im Luftvolumen und zu deren Korrektur sind im Kapitel 8 dargestellt.

2.3.2 Orographie

Einen Beitrag zur Behandlung von orographischen Einflüssen auf die Messungen der Aerogammaspektrometrie liefert Schwarz in seiner Dissertation [Sch 91] und einer Veröffentlichung [Sch 92]. In einem Projekt der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission zu einer aerogammaspektrometrischen Kartierung der Schweiz wurden diese Einflüsse betrachtet, da die Schweiz einen hohen Anteil an Bergregionen aufweist. Zwei Schwierigkeiten ergeben sich aus bergigen Orographien: Zum einen kann nicht in einer konstanten Flughöhe geflogen werden, zum anderen werden die Messungen durch die Geländeform beeinflusst. Das heißt, wenn in einem flachen Gelände das überflogene Gebiet in erster Näherung als Halbraum (Raumwinkel = 2π) aufgefasst werden kann, so ist dies in tiefen Tälern (Raumwinkel $> 2\pi$) oder über Bergkuppen (Raumwinkel $< 2\pi$) nicht mehr der Fall. In tiefen Tälern wird die Zählrate im Vergleich zur Ebene ansteigen, über Bergkuppen wird sie niedriger sein. Modelle, um diese Einflüsse abzuschätzen sind in [Sch 91] und [Sch 92] angegeben.

Im einfacheren 2D-Modell wird die Erdoberfläche durch parallele, unendlich lange Streifen senkrecht zur Flugrichtung, die in diesem Fall in die Richtung des steilsten Abfalls oder Anstieges verläuft, angenähert. Die Strahlungsintensität in einem beliebigen Beobachtungspunkt kann durch Aufsummieren der Beiträge der Geländestreifen berechnet werden. Der Fall, dass eine Kontamination durch vorgelagerte Hügel verdeckt wird, kommt, bei Flughöhen von über 50 m, im Einflussbereich einer Messung von einigen Hundert Metern selten vor und deswegen kann auf eine spezielle Behandlung solcher Verdeckungen verzichtet werden [Sch 91]. Es wird an einem Beispiel mit Höhen zwischen 1200 m und 2400 m die Methode demonstriert, wobei

sowohl auf Höhendaten des schweizerischen digitalen Geländemodells zurückgegriffen und eine Flughöhe von 120 m angenommen wurde als auch die Topographie aus der Differenz von barometrischer Höhe und Radarhöhen ermittelt wurde. Die zweite Ermittlung stimmte etwas besser mit der Messung überein, da hier keine Fehler durch Artefakte bei der Lokalisierung der Messpunkte einfließen. Man sieht bei den Rechnungen genauso wie in einer tatsächlichen Messung deutlich die Erhöhung der Zählrate in den durchflogenen Senken und Tälern. Diese beträgt bis zu ca. 100 %, die Absenkung über Bergkuppen beträgt ca. 10 % bis 30 %. Ein Überflug in einem Gebiet auf einer Höhe von 400 m bis 600 m ergab topographische Effekte nur bis zu 15 % des Messergebnisses, was sich im Rahmen der anderen Messunsicherheiten bewegte [Sch 92].

Bei Flugbahnen, die mehr oder weniger parallel zu den topographischen Strukturen verlaufen, reichen die Streifen des zweidimensionalen Modells nicht mehr aus und es wird ein dreidimensionales Modell benötigt. Voraussetzung für die Modellierung der Erdoberfläche ist ein digitales Geländemodell, dessen Gittermaschen in acht Dreiecke unterteilt werden [Sch 92]. Die Resultate des dreidimensionalen Modells wiesen große Ähnlichkeit mit denen des zweidimensionalen Modells auf, da die Geländeform direkt unter dem Detektor den größten Einfluss auf das Messergebnis hatte. Falls die Flugbahnen nicht parallel zu den Bergkämmen oder Tälern liegen, sind die Unterschiede beider Modelle gering. Die zweidimensionale Methode ist deswegen nach Ansicht von Schwarz et al [Sch 92] für praktische Anwendungen ausreichend.

Bei der Annahme einer homogenen Verteilung der natürlichen Radioaktivität im Volumen kann dann das Messergebnis mit den berechneten Geländefaktoren korrigiert werden, um auf eine flache Geometrie und konstante Flughöhe umzurechnen.

2.3.3 Vegetation, Feuchte

In dem aktuellen Forschungsvorhaben stellt sich des Weiteren die Frage nach dem Einfluss der Vegetation auf die Geometriefaktoren bzw. die Ergebnisse von aerogammaspektrometrischen Messungen. In seiner Dissertation [Buc 01] hat Bucher einen Aspekt dieses Themas betrachtet, wobei speziell die Einflüsse von Wald auf die Messung der Radarhöhe untersucht wurden. Eine Reflektion des Radarsignals an Baumkronen führt zu einer geringeren gemessenen Höhe und damit für Radio-

nuklide am Boden – zusätzlich zur Abschirmung durch die Bäume – zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Werte. Dadurch werden z. B. bei einer Baumhöhe von 20 m die Werte von Kalium-40 um bis zu 30 % unterschätzt. An Hängen kommt hinzu, dass die Radarhöhe auf Grund des Flugwinkels des Hubschraubers größer ist als die Höhe über Grund. Beide Effekte können nach [Buc 01] korrigiert werden, indem nicht die Radarhöhe, sondern vom GPS gelieferte Positionen und die korrigierte barometrische Höhe verwendet werden.

Einen weiteren Einfluss auf die Messergebnisse hat der schwankende Wassergehalt im Boden [Buc 01]. Dabei wird die Bodenfeuchtigkeit nicht allein durch Porenvolumen und Niederschlagsmengen bestimmt, sondern auch durch die langfristige Temperaturentwicklung, die Vegetation und die Sonnenscheindauer. Im Beispiel einer maximal möglichen Bodenfeuchte von 0,2 g pro Gramm trockenen Bodens kann das Strahlungsfeld an der Bodenoberfläche um 10 % variieren, bei höheren maximalen Bodenfeuchten dementsprechend mehr.

2.3.4 Verteilung am Boden

Im Forschungsvorhaben liegt ein Aspekt bei der Berechnung von Geometriefaktoren auch bei der Analyse verschiedener Verteilungen (Ausdehnung, Form) am Boden. Über den relativen Beitrag von Teilflächen einer homogenen radioaktiven Bodenfläche zur detektierten Strahlung haben Grasty et al [Gra 79] schon Studien durchgeführt. Dabei wurde die prozentuale Fläche ermittelt, die beim Überflug einer kontaminierten Fläche zum Messsignal beiträgt, und mit dem Anteil bei einer Messung mit einem stationären Detektor verglichen. Für eine ebene Fläche, die homogen mit einer Aktivität belegt ist, wurde der Kalibrierfaktor im stationären Fall für kreisförmige Quellen, im Falle eines Überfluges für streifenförmige Quellen in Flugrichtung betrachtet. Dies wurde für zylinderförmige NaI-Detektoren mit den Dimensionen (Durchmesser·Dicke in Zoll) 5"·5", 9"·4" und 11,5"·4" durchgeführt, deren Winkelabhängigkeit vorher experimentell bestimmt worden war. Ein Resultat der Berechnungen war, dass die Form des Detektors einen kleineren Einfluss auf das Ansprechvermögen hatte als erwartet. Der Grund dafür ist, dass die Empfindlichkeit der zylinderförmigen Detektoren im Vergleich zu einem eher kugelförmigen Detektor erst bei größeren Winkeln stärker abnimmt, und bei diesen Winkeln auf Grund der Abschwächung der Strahlung in der Luft nur noch eine geringe Photonenflussdichte zum Er-

gebnis beiträgt. Das zweite Ergebnis war, dass ein Streifen, der einen bestimmten Prozentsatz zur gesamten gemessenen Strahlung beiträgt, beträchtlich schmaler ist als eine Kreisfläche, die zum selben Prozentsatz beiträgt. Als Beispiel seien hier die Werte für 2,62-MeV-Gammaquanten für eine Flughöhe von 120 m genannt. Bei einer stationären Messung mit dem 5"-5"-NaI-Detektor trägt ein Kreis von 428 m Durchmesser 80 % zum Signal bei, während bei einem Überflug schon ein Streifen mit einer Ausdehnung von 290 m 80 % zum Signal beiträgt. Die Ergebnisse können zur Abschätzung von Zählraten, die durch wenig ausgedehnte Quellen verursacht werden, oder zur Planung von Flugbahnen bei der Kartierung dienen. Im hier vorliegenden Forschungsvorhaben wurden die Analysen auf weitere Geometrien (Scheiben, Rechtecke verschiedener Ausdehnung) erweitert.

2.4 Verfahren zur Bestimmung von Kalibrierfaktoren und zur Analyse von Messdaten

2.4.1 Kalibrierung der Detektoren

Bei der Verwendung der Aerogammaspektrometrie zur geologischen Kartierung werden bei der Messung mit NaI-Detektoren drei Energiefenster um die stärksten Linien von Kalium (K), Uran (U) und Thorium (Th) bzw. ihrer Folgeprodukte gesetzt. Die Energien sind 1460 keV für K-40, 1764,49 keV für Bi-214 als Folgeprodukt von U-238 und 2614,53 keV für Tl-208 als Folgeprodukt von Th-232. Nach einer Korrektur in Bezug auf Totzeit, Flughöhe, Radongehalt der Luft, Untergrund, kosmische Strahlung und Comptonstreuung kann daraus dann die Bodenkonzentration dieser drei Nuklide berechnet werden. Typischerweise haben diese Konzentrationen Unsicherheiten von 10 % für K, 50 % für U und 15 % für Th. Diese Methode kann auch auf Cs-137 als anthropogenes Radionuklid erweitert werden, dessen Gammaenergie unterhalb den Fenstern für natürliche Radionuklide bei 661,66 keV liegt.

Eine Übersicht über die Kalibrierung wird in [IAEA 03] gegeben. Erforderlich zur Korrektur des Untergrundes des Hubschraubers selbst und von kosmischer Strahlung sind mehrere Flüge in Höhen von ca. 1 km bis ca. 4 km über ausgedehnten Wasserflächen. Die Einflüsse der Strahlung der o. g. drei natürlichen Nuklide und auch des Cs-137 auf die Fenster der anderen Nuklide und die Ermittlung der sogenannten „Stripping-Verhältnisse“ können mit Kalibrierplatten im Größenbereich von

Quadratmetern bestimmt werden. Die Kalibrierplatten enthalten bekannte Konzentrationen der betrachteten Nuklide, zusätzlich wird eine Untergrundplatte verwendet. Mit Flügen über Landflächen bekannter Radionuklidkonzentrationen kann der Einfluss der Flughöhe und die Sensitivität auf die einzelnen Radionuklide ermittelt werden. Damit kann auch die Umrechnung der Zählraten in Radionuklidkonzentrationen bestimmt werden. Von Tyler et al [Tyl 96] werden Probenahmestrategien beschrieben, mit denen Ergebnisse aus Bodenproben mit In-situ- und aerogammaspektrometrischen Messungen effektiv verglichen werden können. Weitere Kalibrierflüge werden über Wasser bei einer vorhandenen Radonkonzentration durchgeführt, um nach dem Abzug des Hubschrauber- und des kosmischen Untergrundes den Radoneinfluss zu erhalten.

Im Bericht [ICRU 94] werden drei Methoden zur Kalibrierung aufgeführt. Zum Einen Monte-Carlo-Methoden zur Berechnung des Photonentransportes, mit denen eine Vielzahl von Nukliden, Quellenverteilungen und Streuungen in der Umgebung berücksichtigt werden können. Es können damit auch die Spektrenformen und die Abhängigkeit von der Flughöhe studiert werden. Eine zweite Methode ist die Verwendung von analytischen Formeln, um die Photopeak-Kalibrierfaktoren mittels numerischer Integration über die mit dem Detektor abgedeckten Flächen zu berechnen. Dabei muss die Winkelabhängigkeit von großen NaI-Detektoren beachtet werden. Drittens kann mit experimentellen Methoden der Kalibrierfaktor bestimmt werden (Vergleich mit In-Situ-Messungen, Vergleich mit Bodenproben, Kalibrierplatten, Flüge über Flächen anderweitig bestimmter Aktivitätskonzentrationen).

In diesem Forschungsvorhaben wurden die vier NaI- und der Germaniumdetektor mit Punktquellen von Cs-137 und Co-60 kalibriert (vgl. Kapitel 4). Es wurden keine Veröffentlichungen gefunden, in denen eine solche Vorgehensweise und deren Resultate bisher beschrieben sind.

2.4.2 Verarbeitung der Spektren

In diesem Kapitel werden gebräuchliche Verfahren dargestellt, mit denen die gewünschten Informationen aus den gemessenen Spektren gewonnen werden. Obwohl das Forschungsvorhaben nicht die Spektrenanalyse selbst zum Inhalt hat, liefern die angeführten Beispiele einen Hintergrund zu Vorgehensweisen bei der Aerogamma-

spektrometrie. Die Untersuchungen in diesem Vorhaben bezogen sich auf die Auswirkungen von bestimmten Einflüssen und Parametern auf die Zählrate in den jeweiligen Photopeaks.

Die Einflüsse, die das Messsignal stören bzw. es verrauschen, können neben der zählstatistischen Unsicherheit u. a. folgende sein:

- Hohe Variation der Radionuklidkonzentrationen am Boden
- Radon in der Luft
- Unterschiedlicher Bewuchs und Bodenfeuchtigkeit
- Energielagendrift der Detektoren
- Winkeländerungen auf Grund der Flugbewegungen
- Kosmische Strahlung

Die nuklidspezifischen Informationen werden häufig aus den Spektren gewonnen, indem die Inhalte der Photopeaks in bestimmten „regions of interest“ (ROI) ermittelt werden und daraus nach Untergrundkorrektur, spektraler Entfaltung und mit bestimmten Kalibrierungen auf Aktivitätskonzentrationen umgerechnet wird. Die spektrale Entfaltung setzt die Kenntnis der Spektren für die vorhandenen Quellen voraus. Eine einfachere Möglichkeit ist die Verwendung von Stripping-Verhältnissen, die die Beiträge bestimmter Nuklide in jede ROI berücksichtigen. Allyson et al [All 01] untersuchten Experimente mit Kalibrierplatten (calibration pads) und Monte-Carlo-Berechnungen, um die Stripping-Verhältnisse und die Einflüsse verschiedener Parameter auf diese Verhältnisse zu bestimmen. Dabei sollten die Stripping-Verhältnisse typisch für die zu messende Quellenkonfiguration sein, die u. a. abhängig von der Flughöhe, Verteilung im Boden und Einstrahlungsrichtung ist. Die Resultate aus [All 01] zeigen, dass Änderungen der Stripping-Verhältnisse relativ klein sind, wenn sich die Auflösung der Detektoren um maximal ca. 10 % ändert. Dies gilt auch, wenn sich die Verstärkung um maximal 1 % ändert. In diesen beiden Fällen kann mit einem Satz von Verhältnissen gearbeitet werden. Weiter stellten die Autoren fest, dass die berechneten Stripping-Verhältnisse ca. 40 % unter den experimentell ermittelten lagen. Dies wird sowohl auf experimentelle Schwierigkeiten (Streuung, nicht genau passende Geometrie) als auch auf die Modellannahmen (Vierdetektorsystem wurde als ein Detektor behandelt) zurückgeführt.

Im Folgenden werden zwei Methoden dargestellt, mit denen das Rauschen aus Gammaskpektren entfernt werden kann. Beide Methoden beruhen auf der Hauptkomponentenanalyse (principal component analysis, PCA), um die wesentlichen spektralen Anteile aus den Rohdaten zu extrahieren. Die Hauptkomponenten werden dann verwendet, um die Spektren mit einem stark verringerten Rauschanteil zu rekonstruieren.

Die eine Methode wird von Hovgaard beschrieben [Hov 97] und geht davon aus, dass keine Informationen über die vorkommenden Nuklide vorhanden sind. Eine Reihe von Spektren wird in orthogonale spektrale Komponenten zerlegt, von denen einige die erwünschten Messsignale, andere im Wesentlichen das Rauschen, d. h. Untergrundeinflüsse enthalten. Diese Methode, die Spektren in einzelne Anteile zu zerlegen, wird in [Hov 97] als „Noise Adjusted Singular Value Decomposition“ (NASVD; rauschkorrigierte Einzelwertdekomposition) bezeichnet. Die Spektren werden dann aus den Komponenten mit hohen Signalanteilen rekonstruiert. In den in der Veröffentlichung betrachteten Fällen konnten demnach die Daten in 3 bis 8 wesentliche Anteile zerlegt werden. In einem Beispiel wurden Spektren nachträglich analysiert, die bei dem Absturz des nuklearbetriebenen russischen Satelliten COSMOS-954 in Nordkanada aufgenommen wurden. Dabei wurden drei Hauptkomponenten der Spektren identifiziert, die als „natürlicher Untergrund“, „Radonfolgeprodukte“ und „Reaktorfragmente“ beschrieben wurden. Wenn man die Konzentration der „Reaktorfragmente“ entlang der Flugroute auftrug, konnte die Lage der Satellitenbruchstücke identifiziert werden. Die NASVD-Methode wird darüber hinaus bei dänischen Frühwarnstationen [Aag 03] und bei der aerogammaskpektrometrischen Messung von natürlichen Radionukliden [Hov 98] verwendet.

Die NASVD-Methode wird von Dickson [Dic 04] mit einer weiteren Methode verglichen, die ihn ähnlicher Weise daraus besteht, aus einer Vielzahl von Spektren „signifikante“ Komponenten zu erhalten und aus diesen bereinigten Spektren die Radionuklidkonzentrationen zu berechnen. Diese Methode ist die „maximum noise fraction (MNF)“ Methode bzw. ihre Variante die „enhanced maximum noise fraction (eMNF)“ Methode, mit denen das Rauschen aus multi-spektralen Daten entfernt werden kann. Sie enthalten zwei lineare Transformationen, mit denen die Spektren in neue Komponenten mit abnehmendem Signal-zu-Rausch-Verhältnis sortiert werden. Vor der Rücktransformation werden die Komponenten mit hohem Rauschanteil entfernt. Die

eMNF-Methode enthält zusätzlich eine Skalierung nach der ersten Transformation, die die Berechnung des U/Th-Verhältnisses verbessert.

Als ein Resultat des Vergleiches stellte sich bei Dickson [Dic 04] heraus, dass zur Rauschreduktion so viele Spektren als möglich vorhanden sein sollten. Bezüglich der einzelnen Methoden ist die eMNF bei mehr als 1500 gemessenen Spektren sehr effektiv. Danach folgen die MNF und die NASVD, wobei bei komplexen Daten alle drei Methoden an ihre Grenzen stoßen. Es ergab sich, dass durch die Rauschreduktion unterschiedliche Radionuklidkonzentrationen besser unterscheiden werden können auf Kosten der quantitativen Genauigkeit.

In leicht veränderter Form wurde die NASVD-Methode bei der Kartierung von aus Tschernobyl stammenden Cs-137-Kontaminationen in Lettland angewendet [Aag 99]. Dabei wurde zusätzlich aus Linearkombinationen ein „reines“, synthetisches Cs-137-Spektrum erzeugt und dessen Anteil in jedem der gemessenen Spektren ermittelt. Damit konnten äquivalente Cs-137-Oberflächenkontaminationen bis in den Bereich von $0,2 \text{ kBq/m}^2$ bis $0,5 \text{ kBq/m}^2$ ermittelt werden. Die äquivalente Cs-137-Oberflächenkontamination ist die Oberflächenkontamination, die das gleiche Signal wie die aktuell vorhandene Cs-137-Konzentration in und auf dem Boden verursachen würde. Als Unsicherheiten bei der gesamten Messung wurden unterschiedliche Anteile von Radonfolgeprodukten in der Luft, auf dem Flugzeug und am Boden (nach Regen) identifiziert. Des Weiteren traten Einflüsse von schwankender Flughöhe und von einer Energielagendrift des Spektrums auf, die in [Aag 99] nicht näher quantifiziert wurden. Die Autoren kommen zum dem Schluss, dass ohne größere Einflüsse durch Radon, Höhenmessungsunsicherheiten und Drift die Unsicherheit der Cs-137-Konzentrationen zwischen 15 % und 25 % liegen dürften. Die Methode mit dem synthetischen Cs-137-Spektrum wird von den Autoren als Pseudokonzentrationsmethode bezeichnet.

Eine Möglichkeit der Datenanalyse, die das gesamte Spektrum und sogenannte Standardspektren, die aus Kalibriermessungen bestimmt wurden, nutzt, wird von Hendriks et al [Hen 01] vorgestellt. Um ein empfindliches Messsystem zur Messung von Radionukliden auf dem Meeresboden aufzubauen, wurde dort als Detektor ein Wismutgermanat(BGO-)detektor verwendet und das gesamte Spektrum anstelle nur einiger Fenster zur Auswertung herangezogen. Obwohl die BGO-Detektoren teurer

sind, eine höhere Temperaturdrift und eine geringere Auflösung haben, wurden sie hier auf Grund ihrer höheren Dichte und Kernladungszahl verwendet, die im Vergleich zu NaI-Detektoren zu einer höheren Effizienz und damit einer reduzierten Messzeit führen. Es wurde in [Hen 01] analysiert, ob die Verwendung einzelner Fenster um die Peaks oder der gesamten Spektrumsinformation, also auch einzelner Strukturen der Spektren, zu besseren Ergebnissen führt. Ein Vorteil der Verwendung des gesamten Spektrums gegenüber nur den Stripping-Verhältnissen ist, dass eine Energiedrift des Spektrums oder zusätzlich vorhandene Nuklide im Rahmen der Least-square-Anpassung der gemessenen Spektren an die ermittelten Standard-spektren auffallen würden. Außerdem verbessern weitere Gammalinien eines Nuklides, die in der Fenstermethode nicht berücksichtigt werden, die Qualität des Resultates. Messungen über ehemaligen Goldabbaugebieten in Südafrika zeigten deutlich Stellen mit erhöhten Urankonzentrationen.

In eine ähnliche Richtung geht Guillot [Gui 01], der einen neuen Algorithmus zur Analyse von Photopeaks von NaI-Spektren entwickelt hat. Zuerst werden dabei digitale Filter angewandt, um die statistischen Schwankungen zu reduzieren. Danach werden, wie bei der hochaufgelösten Gammaskopimetrie, die ersten und zweiten Ableitungen bestimmt, um die Peaks zu finden, von denen zur Validierung Nachweisgrenze und Halbwertsbreite bestimmt werden. Nach Angaben in [Gui 01] können mit dieser Vorgehensweise natürliche Radionuklide genauso gut wie über die Stripping-Methode, die mit festen Fenstern arbeitet, bestimmt werden, wobei mit der Filtermethode die Unsicherheiten etwas höher sind. Bei niedrigen Energien im Bereich bis zu 500 keV, in dem viele anthropogene Radionuklide Emissionslinien aufweisen, sind die Ergebnisse der Filtermethode aber zuverlässiger. Die Gründe dafür sind u. a., dass keine Annahmen über die Radionuklide gemacht werden müssen und die Aktivität unerwartet auftretender Radionuklide schnell abgeschätzt werden kann. Außerdem ist die Methode weniger anfällig für die Drift der Energielage, weil die Peaks jedes Mal neu berechnet werden und keine festen Fenster existieren.

Von Billings et al [Bil 99] wird ein sogenanntes „geometrisches Modell“ eingeführt, mit dem die Spektren mit Hilfe von Monte-Carlo-Rechnungen bestimmt werden können. Es wird eine Punktspreizfunktion (point spread function) aufgestellt, die zeigt, wie eine ideale Punktquelle (hier ein unendlich langer, vertikaler Stab) durch den Messprozess verschmiert wird. Dabei werden auch die geometrischen Eigenschaften

quaderförmiger Detektoren berücksichtigt und nicht wie im sogenannten „uniformen Modell“ von einer richtungsunabhängigen Detektorresponse ausgegangen. Aus der Gesamtzählrate für eine bestimmte Gammastrahlung, die unter Berücksichtigung von Eintrittswinkel, Dicke und Abschwächung im Detektor berechnet wird, wird die Zählrate im Peak über einen konstanten Faktor berechnet, der relativ unabhängig vom Eintrittswinkel ist. Ein Ergebnis der Untersuchungen ist, dass nach Berechnungen mit dem geometrischen Modell ein rechteckiger Detektor einen kleineren Sichtbereich hat als nach Berechnungen mit dem uniformen Modell. Beispielsweise wurde für eine Flughöhe von 60 m die Bodenfläche berechnet, die zu 90 % zum Messsignal beiträgt. Für Thorium ergab sich dabei mit dem uniformen Modell 10,9 ha, mit dem geometrischen Modell hingegen nur 7,6 ha. Das heißt, wenn Vermessungen nach dem uniformen Modell geplant werden, kann dies dazu führen, dass Bereiche zwischen den Flugbahnen nicht ausreichend erfasst werden. Darüber hinaus würde das uniforme Modell, bei Anwendung auf rechteckige Detektoren, einen beträchtlichen Fehler bei der Entfaltung von Spektren einführen.

3 Berechnung der Geometriefaktoren

3.1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die im Forschungsvorhaben geforderte Berechnung der Geometriefaktoren beschrieben. Gemäß DIN 25462 „In-Situ-Gammaspektrometrie zur nuklidspezifischen Umweltkontaminationsmessung“ [DIN 00] wird die gesamte Aktivität A durch

$$A = \frac{R_{n,E}}{\varepsilon_{E,V} \cdot p_E}$$

berechnet, wobei $R_{n,E}$ die Nettozählrate der Gammalinie und p_E die Emissionswahrscheinlichkeit des betrachteten Nuklids bei der Gammaenergie E ist.

Die Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{E,V}$ für das Verteilungsmodell V der Radionuklide wird in der DIN 25462 faktorisiert:

$$\varepsilon_{E,V} = \eta_{0,E} \cdot w_{E,V} \cdot G_{E,V}$$

Hierbei ist $\eta_{0,E}$ die Detektorausbeute entlang der Detektorachse (hier entlang der z-Achse senkrecht zur (x, y) -Ebene in kartesischen Koordinaten). $w_{E,V}$ ist der sogenannte Winkelkorrekturfaktor, welcher die Faltung aus dem raumwinkelabhängigen Ausbeutekorrekturfaktor $k(E, \theta, \varphi)$ (also der Detektorkalibrierfunktion in Polarkoordinaten) und dem Photonenfluss $\Phi_{E,V}$ beim Detektor ist, und $G_{E,V}$ der Geometriefaktor, welcher die vorhandene Aktivitätsverteilung entsprechend der angesetzten Radionuklidverteilung in den Photonenfluss am Detektor umrechnet (vgl. auch Kap. 2.1). Es gilt

$$\eta_{0,E} = \frac{R_{n,E}}{\Phi_{E,V}}, \quad w_{E,V} = \iint_{\vartheta, \varphi} k(E, \vartheta, \theta) \frac{1}{\Phi(E)_V} \cdot \frac{\partial^2 \Phi(E)_V}{\partial \theta \cdot \partial \varphi} \cdot d\varphi \cdot d\theta, \quad G_{E,V} = \frac{\Phi_{E,V}}{A \cdot p_E}$$

Aufgrund der Abhängigkeit vom Verteilungsmodell V ist auch bei der Berechnung von $G_{E,V}$ eine Raumwinkelintegration notwendig, weshalb wir uns, von der DIN 25462 abweichend, dafür entschieden haben, das Produkt $w_{E,V} \cdot G_{E,V}$ direkt über das Integral

$$w_{E,V} \cdot G_{E,V} = \frac{1}{A} \int_V a(\vec{q}) \cdot \frac{\exp\left(-\int_{r(t)} \mu(E, \theta, \varphi, r) dr\right)}{r^2(t)} \cdot k(E, \theta, \varphi) d^3\vec{q} dt$$

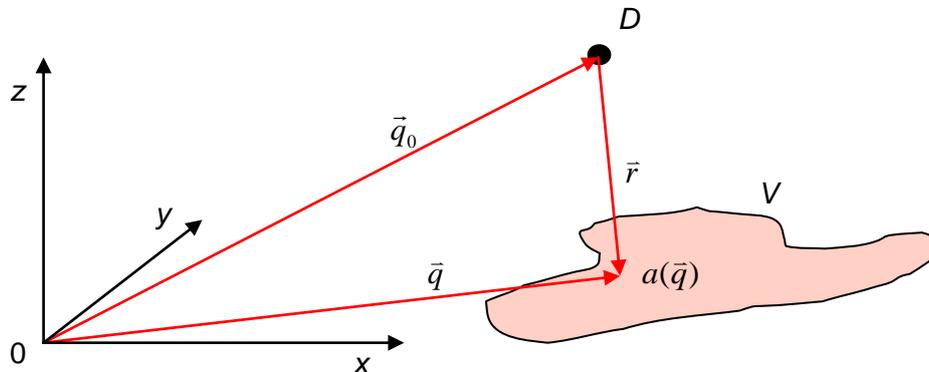


Abbildung 1: Skizze zur Integration der Aktivitätsverteilung $a(\vec{q})$ gemäß des Verteilungsmodells V . Der Vektor \vec{q}_0 gibt die Position des Detektors D an, \vec{q} tastet als Integrationsvariable V ab.

mit $\vec{r} = \vec{q} - \vec{q}_0$ und $r = |\vec{r}|$ zu berechnen, wobei $a(\vec{q})$ die Verteilung der gesamten Aktivität A gemäß dem Verteilungsmodell V beschreibt (siehe Abbildung 1). Der Exponentialterm gibt die Abschwächung aufgrund von Absorption über den Abstand r an, wobei über die einzelnen infinitesimalen Absorptionsstrecken dr mit den zugehörigen Absorptionskoeffizienten $\mu(E, \theta, \varphi, r)$ integriert werden muss. Der Term $1/r^2(t)$ berücksichtigt die zusätzliche Abschwächung aufgrund des mit wachsendem Abstand verringerten Raumwinkels. Der Integrationsparameter t ist nur in nicht-stationären Szenarien notwendig und beschreibt die Änderung der Geometrieordnung innerhalb der Messzeit. Im Folgenden wird sich dies jedoch auf die Bewegung des Detektors im fliegenden Hubschrauber beschränken.

Die Berechnung des alleinigen Geometriefaktors $G_{E,V}$, wie in diesem Vorhaben für verschiedene Strahlungsfelder verlangt, ergibt sich für den Spezialfall $k(E, \theta, \varphi) = \text{const} = 1$.

3.2 Berechnungsmethode

3.2.1 Geometriemodell

Um alle vorgegebenen Strahlungsfelder berechnen zu können, wurde eine hinreichend allgemeine Geometriebeschreibung für die Erzeugung von Verteilungsmodellen einschließlich absorbierendem Materials gewählt. Diese Parameter dieser Beschrei-

bung dienen als Eingangsdatensatz einer hierfür ebenfalls zunächst allgemein gehaltenen Rechenmethode. Dieses Vorgehen bietet, im Gegensatz zu individuellen Lösungen für spezielle Strahlenfelder, folgende Vorteile:

- Die Berechnung von weiteren Verteilungsmodellen ist alleine durch die Anpassung von Parametern möglich.
- Das Rechenverfahren muss nur einmal validiert werden.

Als nachteilig könnte eine aufgrund der Flexibilität erhöhte Rechenzeit angesehen werden, was aber mit den heutzutage verfügbaren Rechnern von uns als hinnehmbar erachtet wurde.

Es wurde entschieden, als Grundelemente Schichten mit einer jeweils von den Koordinaten (x, y) abhängigen Dicke zu wählen, welche in beliebiger Anzahl n aufeinander gestapelt werden können (vgl. Abbildung 2). Die Schichtoberfläche kann hierbei entweder absolut zur Nullhöhe $z = 0$ oder relativ zur darunterliegenden Schicht angegeben werden. Außerdem wird jeder Schicht n ein fester Absorptionskoeffizient μ_n zugewiesen, da die spätere Berechnung jeweils nur für eine Gammaenergie durchgeführt werden soll. Variationen der Gammaenergie werden folglich über die Anpassung der Absorptionskoeffizienten simuliert. Eine räumliche Variation von μ ist, durch Stapelung von entsprechenden Schichten, ebenfalls prinzipiell modellierbar.

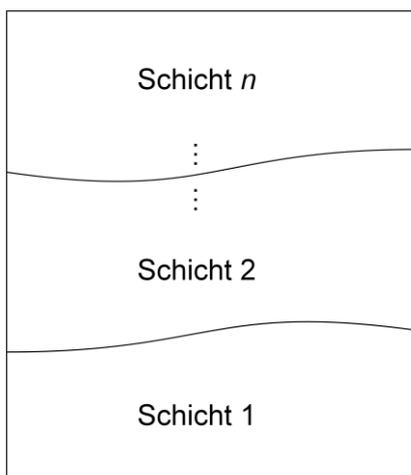


Abbildung 2: Stapelung von n Schichten zur Beschreibung komplexer Verteilungsmodelle.

Weiterhin kann für jede Schicht optional eine Kontamination als Funktion von (x, y) angegeben werden, welche zunächst als Oberflächenkontamination aufgefasst wird. Ob sich diese auf die i. A. geneigte Oberfläche selbst oder aber deren Projektion auf die (x, y) -Ebene bezieht, kann durch einen entsprechenden Parameter festgelegt werden.

Für den Fall, dass die Kontamination nicht nur an der Schichtoberfläche lokalisiert ist, sondern in die Tiefe eingedrungen ist, kann der Schicht eine weitere Funk-

tion zugeordnet werden, welche das Eindringverhalten in Abhängigkeit der Tiefe relativ zur Schichtoberfläche beschreibt. Es wird angenommen, dass diese Funktion für die gesamte Schicht gilt. Für den Wert der Volumenkontamination wird dann das Produkt aus der Oberflächenkontamination und dem Eindringverhalten gebildet.

Zur vollständigen Beschreibung des zu berechnenden Verteilungsmodells ist darüber hinaus auch noch die Position des Detektors anzugeben. Hierzu kann entweder ein Koordinatenpunkt (x, y, z) oder ein Koordinatenpaar $[(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)]$ gewählt werden, wobei im letzteren Fall eine gleichmäßige Bewegung entlang der Verbindungslinie über den Messzeitraum unterstellt wird. Die Koordinaten können entweder absolut oder relativ zu einer beliebigen Schichtoberfläche angegeben werden. Die optionale Angabe der Ausbeutekorrekturfunktion als Resultat einer Kalibrierung vervollständigt die Detektorbeschreibung.

Mit diesem Ansatz zerfällt das Integral im Exponentialterm im Ausdruck zur Berechnung von $w_{E,V} \cdot G_{E,V}$ in eine Summe über die Absorptionsbeiträge in den einzelnen Schichten und es gilt

$$w_{E,V} \cdot G_{E,V} = \frac{1}{A} \int_t \int_V a(\vec{q}) \cdot \frac{\exp\left(-\sum_i \mu_i(E) \cdot r_i(\theta, \varphi, t)\right)}{r^2(t)} \cdot k(E, \theta, \varphi) d^3 \vec{q} dt$$

mit $\vec{r} = \vec{q} - \vec{q}_0$, $r = |\vec{r}| = \sum_i |\vec{r}_i| = \sum_i r_i$ und $r_i \approx \frac{r_{i,0}}{\cos \theta}$.

Hierbei ist i die diskrete Laufvariable über die absorbierenden Schichten mit den Abschwächungskoeffizienten $\mu_i(E)$ und den Teilabständen $r_i(\theta, \varphi, t)$, vgl. Abbildung 3.

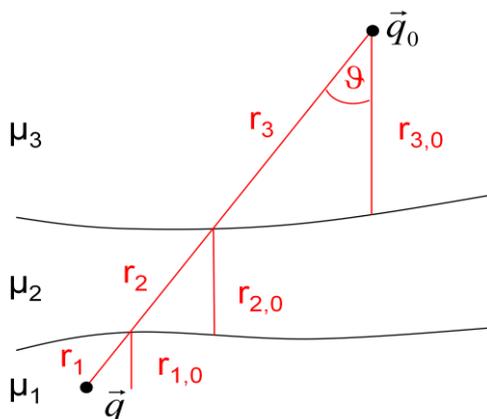


Abbildung 3: Skizze zu den bei der Berechnung von $w_{E,V} \cdot G_{E,V}$ verwendeten Variablen. Es ist \vec{q}_0 der Vektor zu dem Punkt, für den die Integration durchgeführt wird (Detektorposition), \vec{q} der Integrationsvektor, der die Kontaminationsverteilung abtastet und $\vec{r} = \vec{q} - \vec{q}_0$ der Verbindungsvektor. Dieser muss zur Berechnung der Abschwächung bei n absorbierenden Schichten in n Teilabschnitte zerlegt werden. Hier wäre $n = 3$ bei einer Kontamination in der untersten Schicht.

3.2.2 Implementierung

a) Wahl der Programmiersprache PYTHON

Die Routine zur Berechnung von $w_{E,V} \cdot G_{E,V}$ wurde von uns in der Programmiersprache PYTHON [Python] Version 2.7 implementiert. PYTHON ist als Open-Source-Programmiersprache lizenzkostenfrei verfügbar, für gängige Betriebssysteme (MS Windows, OS X, Linux) verfügbar und wird kontinuierlich gepflegt und weiterentwickelt. Hiermit erstellte Software sollte somit auch auf zukünftigen Betriebssystemen lauffähig sein.

Obwohl es sich bei PYTHON um eine Interpretersprache handelt, welche zunächst prinzipiell zu langsameren Programmen führt, haben wir uns für PYTHON entschieden, da hierfür mit NUMPY [NumPy] und SCIPY [SciPy] umfangreiche numerische und wissenschaftliche ProgrammROUTINEN existieren. Diese Erweiterungen mit intern kompiliertem, d. h. schnellem Programmcode erlauben direkte mathematische Operationen auf Datenfeldern, wodurch die hiermit erstellte Software dann in der Praxis fast wieder mit der Geschwindigkeit von vollständig kompilierten Programmen abläuft. Bei geeigneter Programmierung kann hierdurch der Geschwindigkeitsnachteil durch den Programminterpreter zum Großteil wieder aufgefangen werden. Mit dem Modul NUMEXPR [Numexpr] werden diese Berechnungen darüber hinaus auf mehreren Rechnerkernen parallel ausgeführt, was bei großen Datenfeldern zu einem weiteren Geschwindigkeitsvorteil gegenüber traditionellen Programmen auf nur einem Rechnerkern führt. Erkauft wird die schnellere parallele Rechnung mit einem erhöhten Hauptspeicherbedarf, welcher auf heutigen Rechnern aber praktisch unbedeutend ist.

Da PYTHON intern sowohl Variablen als auch Funktionen einheitlich in Form von sog. Zeigern handhabt, können Funktionen genauso wie Variablen als Parameter an andere Funktionen übergeben werden. Die Funktionen können hierbei entweder fest als Programmcode implementiert sein (z. B. Interpolationsfunktionen) oder, durch den Funktionsparser des o. g. Erweiterungsmoduls NUMEXPR, während der Laufzeit aus einer Zeichenkette (String) generiert werden.

PYTHON ermöglicht eine objektorientierte Programmierung. Hierbei können Variablen und die hierauf wirkenden Methoden in einer gemeinsamen Datenstruktur zusammengefasst werden. Der von uns erstellte Programmcode ist zwar prinzipiell objektorientiert programmiert, verbindet dies aber an manchen Stellen mit dem herkömmlichen strukturierten Ansatz. So ist die Integrationsroutine über die Aktivitätsverteilung beispielsweise selbst nur eine Funktion, erwartet als Parameter jedoch u. a. ein Objekt, welches die Geometriebeschreibung samt Methoden zu deren Definition enthält. Aufgrund der in PYTHON ohnehin verwendeten Funktionszeiger schien uns dieses Vorgehen im Falle von sonst notwendigen Objekten ohne weitere Zustandsparameter ausreichend. Selbst die fundamentale Integrationsfunktion kann auf diese Weise, wie eine gewöhnliche Variable, bei dem Programmobjekt, welches die Integration durchführt, von außerhalb gesetzt und verändert werden. Hierdurch könnte beispielsweise ein alternatives Integrationsverfahren implementiert werden, ohne dass der existierende interne Programmcode modifiziert werden müsste. Eine neue PYTHON-Funktion hierfür könnte nachträglich in die entwickelte Software einfach „eingeklinkt“ werden.

b) Datenquellen

Zur Berechnung der Geometriefaktoren werden Datenquellen benötigt, welche die Geometrieschichten und die Detektoreigenschaften beschreiben. Im Allgemeinen handelt es sich dabei um Funktionen von zwei Parametern, z. B. (x, y) oder (θ, φ) . Der Verlauf dieser Funktionen kann entweder durch mathematische Formeln oder Tabellen mit Messdaten festgelegt werden. In dem von uns geschriebenen Programm können beide Varianten einheitlich verwendet werden, indem aus den Tabellen vor der eigentlichen Berechnung Interpolationsfunktionen generiert werden. Die folgenden Stützstellen-Messdatenformate sind mit dem BfS abgestimmt worden, vgl. Abbildung 4:

- „Grid Data“ enthält im Dateikopf die Anzahl der Zeilen und Spalten einer Datenmatrix, die Koordinaten der linken, unteren Ecke sowie den konstanten Abstand zwischen den Zeilen und Spalten. Im Datenblock folgen zeilenweise die Funktionswerte.

- „XYZ“ enthält nur einen Datenblock, in welchem (x, y, z) -Koordinatentripel in beliebiger Anzahl und beliebiger Sortierung aufeinander folgen. Die Verteilung der Daten über die (x, y) -Ebene kann auch ungleichmäßig erfolgen.

Beide Dateiformate können optional auch in nach dem ZIP-Verfahren komprimierter Form importiert werden. Aufgrund der größeren Flexibilität des „XYZ“-Formats und den intern notwendigen Sortierungen sind Berechnungen mit diesem Datenformat langsamer und speicherintensiver, weswegen das „Grid Data“-Format gerade bei einer großen Menge von Messdaten bevorzugt verwendet werden sollte.

<u>Grid Data:</u>		<u>XYZ:</u>
ncols	1600	695000 5369975 438.211
nrows	1600	695025 5369975 438.169
xllcorner	695000	695050 5369975 438.197
yllcorner	5330000	695075 5369975 438.235
cellsize	25	695100 5369975 438.197
NODATA_value	-9999	...
438.2106 438.1689 ...		

Abbildung 4: Schematische Darstellung der Datenformate „Grid Data“ (links) und „XYZ“ (rechts), welche allgemein als Stützstellen-Datenquelle verwendet werden können.

Abbildung 5 zeigt eine im „Grid-Data“-Format geöffnete Datei mit orografischen Daten, auf welche zusätzlich sowohl eine (übertriebene) gleichmäßig nach rechts ansteigende Bodenvegetation als relative analytische Funktion als auch ein Luftvolumen als Absorber gelegt wurden. Darüber hinaus wurde eine ortsabhängige Oberflächenkontamination (rot dargestellt) auf die Geländeoberfläche aufgebracht.

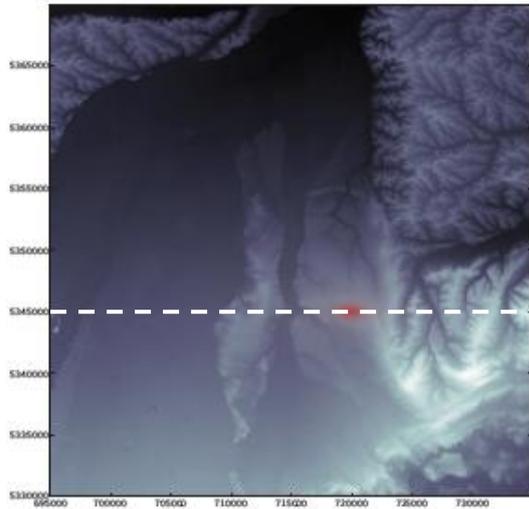
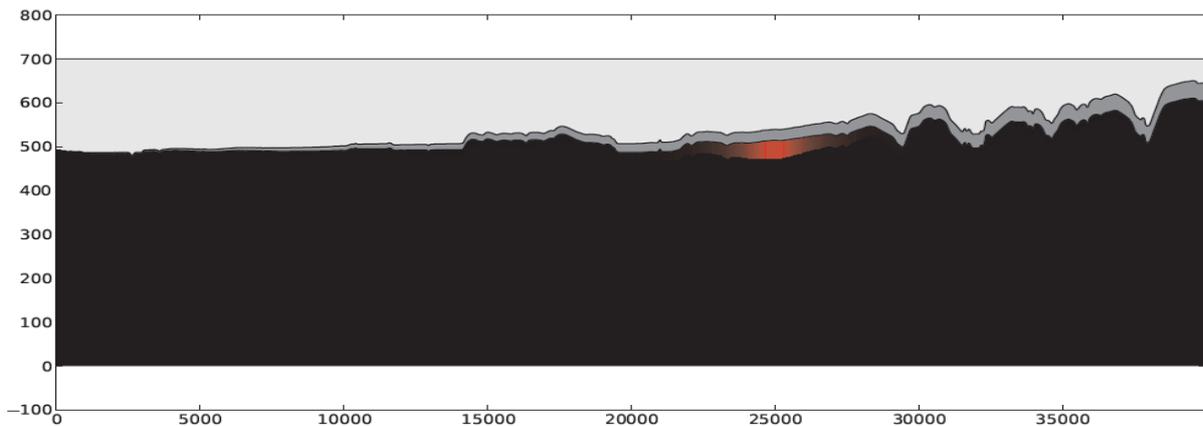


Abbildung 5:

Orografische Daten mit aufgebrachtter Oberflächenkontamination (rot) und absorbierenden Schichten (Vegetation, Luft) sowohl in der Aufsicht als auch im Schnitt entlang der gestrichelten Linie. Die Stärke der Kontamination wurde zur besseren Erkennbarkeit im Schnitt zusätzlich als Linienstärke eingetragen.



Aufgrund der Besonderheiten der (θ, φ) -Interpolation (Verzerrungen, zyklische Randbedingungen) und der in der Leistungsbeschreibung des BfS geforderten zusätzlichen Berücksichtigung eines weiteren Parameters für die Tankfüllung wurde für den Ausbeutekorrekturfaktor zusätzlich ein alternatives, eigenes Dateiformat entwickelt, welches in der Programmdokumentation beschrieben werden wird.

c) Programmstruktur

Der Aufbau des entwickelten Programms wird, vereinfacht, in Abbildung 6 skizziert. Das Hauptprogramm besteht aus folgenden Schritten: Dateneingabe, Initialisierung der Berechnung, Berechnung und Ausgabe. Während der Initialisierung werden alle eingegebenen Datenquellen geöffnet oder als Funktion erstellt und daraus die Geometriestruktur zusammengesetzt. Optional wird eine Kalibrierung verwendet, was aber zur Berechnung des reinen Geometriefaktors nicht notwendig ist. Diese Daten

werden mit einer Berechnungsmethode verknüpft und an die Berechnungsroutine übergeben, welche dann die eigentliche Integration startet und dem Hauptprogramm das Resultat übergibt.

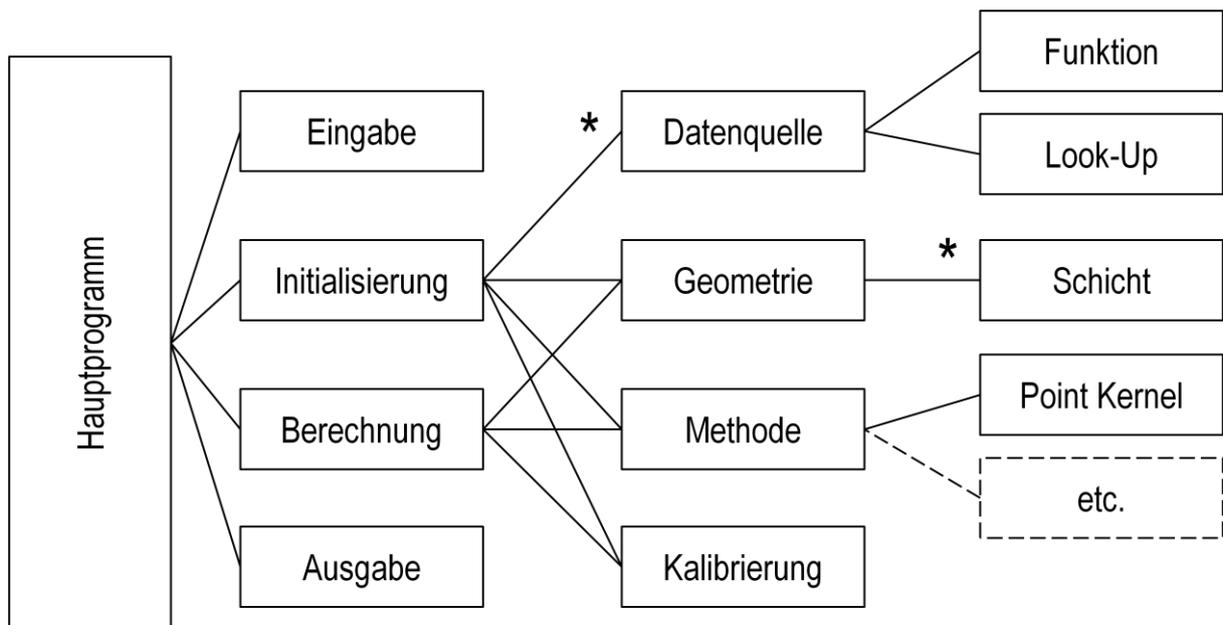


Abbildung 6: Schematischer Aufbau des entwickelten Programms. Für die mit * markierten Objekte kann eine beliebige Anzahl sogenannter Instanzen erzeugt werden. Gestrichelt eingezeichnet ist die Schnittstelle zum Einfügen alternativer Berechnungsmethoden. Realisiert wurde bisher das im Folgenden beschriebene Point-Kernel-Verfahren.

Zusätzlich zu den beschriebenen Routinen existieren weitere Programmmethoden zur Ausgabe von Debug-Informationen sowie zur Erstellung von Kontrollabbildungen. Eine grafische Benutzeroberfläche wurde ebenfalls entwickelt (Anhang 2.1). Eine detaillierte Beschreibung des Quellcodes erfolgt separat außerhalb dieses Abschlussberichts.

d) Integrationsverfahren

Zur Berechnung von $w_{E,V} \cdot G_{E,V}$ müssen, wie beschrieben, mehrere Integrale berechnet werden. Hierzu haben wir das bewährte und einfache Point-Kernel-Verfahren gewählt: die Kontaminationsverteilung wird dabei in ein Raster von Punktquellen in endlicher Anzahl umgewandelt, deren Beiträge zum gesamten Photonenfluss, unter Berücksichtigung der Absorption und des Abstandgesetzes, dann nur noch aufaddiert werden müssen. Die Integrationsgrenzen sowie die Anzahl der Unterteilungen

n_x und n_y in x- und y-Richtung, werden vorgegeben, bei einer Kontamination mit Tiefenprofil gilt gleiches auch für die z-Richtung.

Um die Rechenzeit zu begrenzen, wurde bei der Berechnung der Absorption in unserem Schichtenmodell die Annahme gemacht, dass ein Gammaquant, sobald es einmal eine Schicht verlassen hat, nicht mehr in diese eindringen wird. Der Weg ist dabei von der jeweiligen Punktquelle hin zum Detektor gerichtet. Abbildung 7 vergleicht, an einem extremen Beispiel, die Modellierung mit der gemachten Vereinfachung.

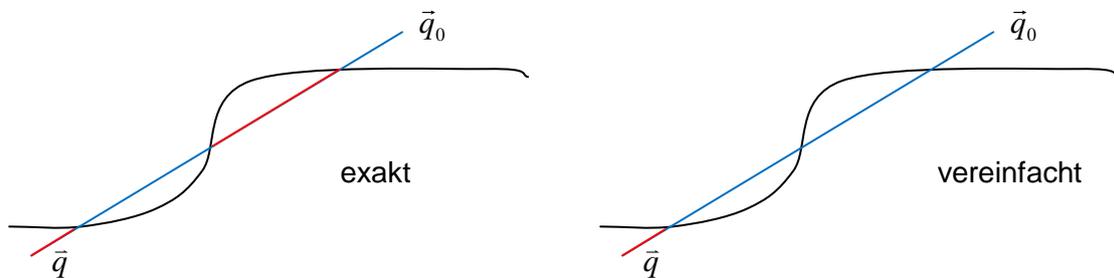


Abbildung 7: Vergleich der in einer Schicht modellierten Wegstrecken (links) mit der tatsächlich in der Näherung berechneten Wegstrecke (rechts). Der rote Abschnitt wird der unteren, der blaue Abschnitt der oberen Schicht zugeschrieben. Der Wiedereintritt in die gleiche Schicht wird aus Gründen der Rechenzeit vernachlässigt.

Um die Absorptionslänge r_i in der jeweiligen Schicht i zu berechnen, wird zunächst näherungsweise angenommen, dass deren Oberfläche ausschließlich horizontal mit der Schichtstärke $r_{i,0}$ verläuft, siehe Abbildung 8. Damit gilt, unter Berücksichtigung des zum Lot gemessenen Polarwinkels θ :

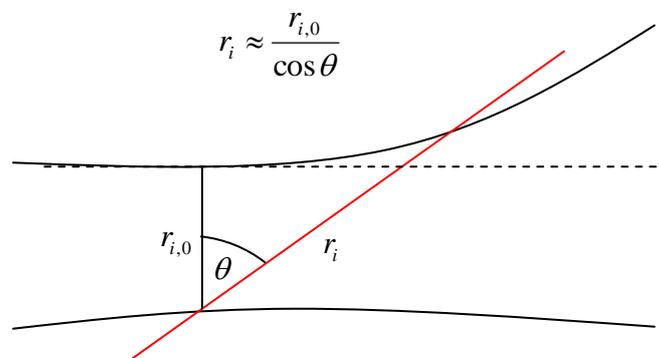


Abbildung 8: Näherung der in der Schicht i durch die Gammastrahlung zurückgelegten Strecke r_i . Wird die obere Schichtgrenze horizontal genähert (gestrichelt eingezeichnet), so gilt $r_i \approx r_{i,0} \cdot \cos \theta$.

Zur Verbesserung der Näherung bei geneigten bzw. gekrümmten Schichtoberkanten kann r_i iterativ mit einem Fixpunktverfahren verbessert werden. Implementiert wurde die „Regula Falsi“ in der sog. Illinois-Variante, welche gegenüber dem einfacheren Sekantenverfahren den Vorzug hat, auch bei nicht-stetigen Funktionen zu konvergieren. Es hat sich gezeigt, dass fünf Iterationsschritte zu einer ausreichend genauen Berechnung des Schnittpunktes der Verbindungslinie zwischen Punktquelle und Detektor einerseits und der Schichtoberfläche andererseits führen.

Bei Kontaminationen in Schichten oberhalb des Detektors wird der Schnittpunkt mit der Oberkante der darunterliegenden Schicht berechnet, ansonsten wird, abgesehen vom rückwärts laufenden Schichtindex i identisch verfahren.

Befindet sich der Detektor nicht konstant an einem Ort, sondern bewegt sich während der Messung, so wird die Integration auf einer vorgegebenen Anzahl von gleichverteilten Punkten entlang der Verbindungslinie wiederholt und das Ergebnis über die Messzeit gemittelt, was der Annahme einer konstanten Geschwindigkeit entspricht. Je nach Art der Aktivitätsverteilung und Bewegung des Hubschraubers verläuft die gesamte Integration somit in 2 bis 4 Dimensionen. Für eine schnelle Berechnung ist daher bereits im Vorfeld zu überlegen, ob nicht die Annahme eines ortsfesten Detektors bei einer reinen Oberflächenkontamination bereits ausreichend genaue Resultate liefert.

Ist vor der Integration unklar, ob die gewählten Schrittzahlen entlang der Integrationsbereiche ausreichend sind, so kann das Programm die Schrittzahlen automatisch so lange verdoppeln, bis die gewünschte numerische Präzision erreicht ist. Als Kriterium hierfür wird das Verhältnis beider Ergebnisse herangezogen.

e) Verdeckungen

Bei gekrümmten oder nicht-stetigen Oberflächen kann es vorkommen, dass die Sicht des Detektors auf eine Punktquelle der kontaminationstragenden Schicht durch diese Schicht selbst blockiert wird. Da in dem verwendeten Schichtenmodell nur die Absorption durch darüber liegende Schichten berücksichtigt wird, bleibt dieser Aspekt zunächst unberücksichtigt. Um dennoch zu einer Abschätzung der Bedeutung dieses

Effekts zu gelangen, wurde vereinfachend folgende optionale Ergänzung zur bisherigen Rechenmethode eingebaut:

Soll die Selbstabschattung einer Schicht berücksichtigt werden, so wird vor der Integration eine Schattenkarte angefertigt: hierbei wird für jede Punktquelle der Point-Kernel-Zerlegung getestet, ob auf einer Verbindungslinie zwischen der Quelle und dem Detektor eine Anzahl gleichverteilter Punkte vollständig oberhalb der Oberflächenfunktion der betrachteten Schicht liegen (andere Schichten bleiben aus Rechenzeiterwägungen unberücksichtigt). Ist dies der Fall, wird die Punktquelle auf der Karte vereinfachend als vollständig sichtbar markiert, andernfalls als vollständig unsichtbar. Bei der folgenden Integration des gesamten Gammaflusses wird dann der Fluss aus den verdeckten Punktquellen ignoriert. Bei einer Tiefenverteilung der Kontamination wird, ebenfalls vereinfachend, um Rechenzeit zu sparen, bei der Integration in z-Richtung die bereits für die Oberfläche berechnete Karte wiederverwendet.

3.2.3 Validierung

Eine vollständige Validierung der mit unserem Programm erzielbaren Ergebnisse war nicht möglich, da uns keine Standard-Software bekannt ist, welche das komplette Spektrum der von uns vorgesehenen Berechnungsmöglichkeiten abdeckt. Dennoch lassen sich für einige Spezialfälle zumindest die reinen Geometriefaktoren $G_{E,V}$ bestimmen: die DIN 25462 enthält die Geometriefunktionen für endlich und unendlich ausgedehnte Kontaminationsverteilungsmodelle und für plane, parallele Absorberschichten lassen sich Abschirmrechnungen mit der Software MicroShield [MS 08] durchführen. Zusätzlich zu diesen externen Validierungen sind auch programminterne Plausibilitätstests durchgeführt worden.

a) Validierung anhand der DIN 25462

Die DIN 25462 [DIN 00] enthält in deren Anhang B Geometriefunktionen für unendlich und endlich ausgedehnte Kontaminationsverteilungen mit exponentiellem Eindringverhalten in den Boden bzw. die kontaminierte Schicht. Absorption findet in diesen Modellen mit konstantem Schwächungskoeffizienten μ_L nur in der Luft zwischen Boden und Detektor statt. Um auch die Abschwächung im Boden implizit zu berücksichtigen, wird für diesen die sog. Relaxationsmassenflächendichte ζ verwen-

det und das exponentielle Eindringverhalten der Kontamination hierauf bezogen. Es gilt daher für die Aktivität A als Funktion der Massenflächendichte X

$$A(X) = A_0 \cdot e^{-X/\zeta} \quad \text{mit} \quad X = \int_0^z \rho_B(z) \cdot dz$$

Bei homogener Dichte ρ_B des Bodens ergibt sich aus dem Integral $X = \rho_B \cdot z$ und somit ist X in diesem Fall proportional zur Tiefe z . In den Grenzfällen $\zeta \rightarrow \infty$ ergibt sich eine (im Verhältnis zur Dichte) homogene Radionuklidverteilung $A(X) = A_0$ im Boden und bei $\lim \zeta \rightarrow 0$ mit $A(X) = A_0 \cdot \delta(X)$ eine reine Ablagerung auf der Bodenoberfläche.

Die Berechnungsformeln der DIN 25462 unterscheiden die gleichmäßige Ablagerung von Kontamination auf der Bodenoberfläche, die exponentielle sowie die homogene Verteilung im Boden, wobei jeweils die Varianten einer unendlichen und einer endlichen kreisförmigen Ausdehnung auf der Bodenoberfläche betrachtet werden.

Unsere Validierung hat gezeigt, dass bei Kontaminationen mit unendlicher Ausdehnung unsere numerischen Resultate unabhängig von der Detektorhöhe, den gewählten Absorptionskoeffizienten und dem Eindringverhalten im Rahmen der numerischen Genauigkeit mit den analytischen Ergebnissen identisch waren. Bei endlich ausgedehnten Kontaminationen, welche in den Boden eindringen, hat sich bei kleinen Detektorhöhen eine geringe Abweichung gezeigt, siehe Tabelle 1. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei unserer numerischen Integration die Integrationsgrenzen in der x-y-Ebene auf Bodenhöhe angegeben werden, aber die Formeln der DIN 25462 die Integrationsgrenze über den Polarwinkel definieren. Auch wenn sich auf der Bodenoberfläche der gleiche Kreis ergibt, so ist bei der numerischen Integration die Projektion in den Boden ein Zylinder, im Fall der analytischen Formeln ein Kegelstumpf mit (geringfügig) größerem Volumen. Dies passt zu den Daten aus Tabelle 1, wonach der Geometriefaktor, nach DIN 25462 berechnet, zu etwas größeren Werten führt, sich die Resultate bei zunehmenden Abständen jedoch approximativ annähern, da der Öffnungswinkel des Kegelstumpfes immer spitzer wird, da das kontaminierte Volumen gegen die Zylinderform konvergiert. Die auftretenden relativen Unterschiede liegen bei einer in der Praxis der Aerogammaspektrometrie unbedeutenden Größenordnung.

Höhe [m]	DIN 25462	numerisch	rel. Unterschied
1	1,594E-01	1,578E-01	1,0 %
2	5,137E-02	5,103E-02	0,7 %
5	8,855E-03	8,822E-03	0,4 %
10	2,163E-03	2,158E-03	0,3 %
20	5,030E-04	5,020E-04	0,2 %
50	6,402E-05	6,393E-05	0,2 %
100	1,092E-05	1,090E-05	0,1 %

Tabelle 1: Vergleich der nach DIN 25462 mit den numerisch durch unser Programm berechneten Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Detektorhöhe. Als kontaminiert wurde eine Kreisfläche auf dem Boden mit einem Radius $r = 1$ m bei einer konstanten Dichte $\rho_B = 1500 \text{ kg/m}^3$ und einem Absorptionskoeffizienten von $\mu_B = 9,7 \text{ m}^{-1}$ im Inneren angenommen. Es wurde eine Relaxationsmassenflächendichte $\zeta = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ gewählt. Die Luftabsorption beträgt im Beispiel $\mu_L = 7,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. Aufgrund der unterhalb der Bodenoberfläche unterschiedlich definierten Integrationsgrenzen ergeben sich geringe Differenzen für kleine Detektorhöhen.

b) Validierung mittels MicroShield

MicroShield [MS 08] ist eine Software zur Berechnung der Abschirmung durch ebene, parallele Absorberschichten, welche ebenfalls nach dem Point-Kernel-Verfahren rechnet. Setzt man eine monoenergetische Gammaquelle ein, so lässt sich aus dem von MicroShield (ohne Buildup-Faktor) berechneten Energiefluss der Fluss ungestreuter Photonen am Ort des Gammadetektors berechnen.

Bei der Validierung mit MicroShield 8.01 wurden bei rein äußerlich kontaminierten Flächen mit unterschiedlicher Formen (Quadrat, Kreis) und Ausdehnungen Messpunkte entlang ihrer Mittelsenkrechten sowie seitlich davon versetzt mit unterschiedlichen Abständen gewählt. Der an diesen Stellen berechnete Photonenfluss wurde mit den Ergebnissen unseres Programms verglichen. Es ergaben sich keine Differenzen jenseits der numerischen Genauigkeiten. Auch bei einem oder mehreren eingeschobenen Absorbern blieben die Resultate identisch.

c) Plausibilitätstest

Innerhalb unseres Programms wurde zur Konsistenzüberprüfung die gleiche Geometrie bei unterschiedlichen Rotationen um den Ort des Detektors parametrisiert. Es ergaben sich im Rahmen der Rechengenauigkeit identische Ergebnisse sofern sich

die Aktivitäten auf die Schichtoberfläche (und nicht auf deren Projektion entlang der z-Achse auf die x-y-Ebene) beziehen. Ferner musste bei den in diesem Test entstehenden geneigten Schichten für die Berechnung der Schnittpunkte der Gammaflugbahnen mit den Schichtoberflächen eine geeignete Anzahl von Iterationen, typischerweise 5, gewählt werden. Erfolgreich getestet wurde auch der Fall einer kontaminierten Fläche oder eines kontaminierten Volumens oberhalb des Detektors, bei der die Bahn der Gammaquanten rückwärts durch die Schichten berechnet werden muss.

3.3 Abschwächungskoeffizienten

Bei der Berechnung der Geometriefaktoren sollte die Abschwächung in den Materialien Erde, Bodenvegetation sowie Luft betrachtet werden. Die hierbei auftretenden Abschwächungskoeffizienten hängen von der Materialdichte, der Materialzusammensetzung sowie der Energie der Gammaquanten ab. Da die Materialdichte nur ein Proportionalitätsfaktor ist, muss nur den anderen beiden Parametern vermehrte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Gammaquanten werden aufgrund des Photoeffektes, der Comptonstreuung sowie der Paarbildung bei hohen Energien absorbiert bzw. in ihrer Energie reduziert. Die verbleibenden Quanten liegen im Gammasktrum des Detektors außerhalb der Gammalinie des Photopeaks. Die Stärke dieser Effekte ist, neben der Photonenenergie, von der Kernladungszahl der durchquerten Materie abhängig. Die streng genommen durch Rayleigh-Streuung ebenfalls wegfallenden oder hinzukommenden Gammaquanten, deren Energie unverändert bleibt und welche somit auch nach der Streuung noch im Photopeak liegen, werden aufgrund ihres geringen Beitrags vernachlässigt.

Die Berechnung der Absorptionskoeffizienten als Funktion der Gammaenergie und der Materialkomposition ist beispielsweise mit dem XCOM-Rechner auf der Internetseite des NIST [NIST] möglich. In Abstimmung mit dem BfS wurden für Erdreich, Luft und Vegetation folgende Zusammensetzungen (in Massenprozent) gewählt (siehe Tabelle 2).

Erdreich		Luft		Vegetation	
Molekül bzw. Element	Masse in %	Element	Masse in %	Element	Masse in %
SiO ₂	56	N	75,5	H	10
Al ₂ O ₃	16	O	23,2	C	30
Fe ₂ O ₃	8	Ar	1,3	O	60
H ₂ O	20				
H	2,2				
O	57,5				
Al	8,5				
Si	26,2				
Fe	5,6				

Tabelle 2: Zusammensetzung von Erdreich und Luft [Sai 95], [ICRU 94] sowie Vegetation.

Tabelle 3 enthält die hieraus mit XCOM berechneten Absorptionskoeffizienten μ in Abhängigkeit von der Gammaenergie E_γ für die zu betrachtenden Werte.

Gammaenergie E_γ [MeV]	Boden		Vegetation		Luft	
	μ/ρ [cm ² /g]	μ [1/m]	μ/ρ [cm ² /g]	μ [1/m]	μ/ρ [cm ² /g]	μ [1/m]
0,05	3,86E-01	5,79E+01	2,18E-01	2,18E+01	2,08E-01	2,50E-02
0,10	1,79E-01	2,69E+01	1,68E-01	1,68E+01	1,54E-01	1,85E-02
0,20	1,29E-01	1,93E+01	1,35E-01	1,35E+01	1,23E-01	1,48E-02
0,50	8,88E-02	1,33E+01	9,58E-02	9,58E+00	8,71E-02	1,05E-02
1,00	6,47E-02	9,70E+00	7,00E-02	7,00E+00	6,36E-02	7,66E-03
2,00	4,54E-02	6,81E+00	4,89E-02	4,89E+00	4,45E-02	5,36E-03

Tabelle 3: Spezifische Absorptionskoeffizienten μ/ρ in Abhängigkeit von der Gammaenergie. Die absoluten Absorptionskoeffizienten μ wurden unter Annahme der Materialdichten $\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$ für den Boden, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ für die Vegetation und $\rho = 1,2041 \text{ kg/m}^3$ für Luft bei 20 °C berechnet.

3.4 Ergebnisse

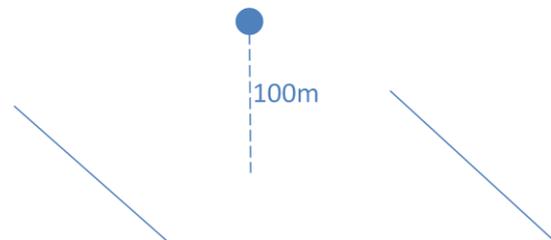
Mit dem entwickelten und validierten Programm wurden die Geometriefaktoren berechnet. Es wurde mit dem BfS vereinbart, die zu hierbei zu variierenden Parameter unabhängig voneinander zu betrachten.

3.4.1 Unebenes Gelände

Betrachtet werden sollte der Einfluss der Geländetopologie und der Tiefenverteilung der Aktivität im Boden auf den Geometriefaktor anhand von Modellen von Taleinschnitten, Kuppen und Hanglagen. Die kontaminierte Fläche sollte hierbei unendlich ausgedehnt sein. Da unser Integrationsverfahren die Angabe von endlichen Integrationsgrenzen benötigt, wurde eine quadratische Fläche mit einer Kantenlänge von der 200-fachen Flughöhe verwendet. Der Vergleich mit den analytischen Resultaten der DIN 25462 im Fall der unendlich ausgedehnten homogenen Bodenkontamination zeigte, dass diese Wahl zu hinreichend genauen Ergebnissen führt. Die Zahl der Integrationsschritte wurde automatisch bis zu einer numerischen Genauigkeit von mindestens 1 % verdoppelt. Es wurde angenommen, dass der Detektor während des Fluges an einer konstanten Stelle über dem Gelände steht, was dem Flug entlang einer Achse mit Translationssymmetrie entspricht (z. B. Flug entlang eines Bergkamms oder durch ein v-förmiges Tal). Wenn nicht anders angegeben, wurde eine Flughöhe von 100 m, ein Kontaminationsnuklid mit einer Gammalinie bei 1000 keV mit einer exponentiellen Tiefenverteilung mit der Relaxationsmassenflächendichte von $\zeta = 1 \text{ g/cm}^2$ bzw. 10 kg/m^2 und ein unter einem Winkel von 20° geneigtes Gelände angenommen.

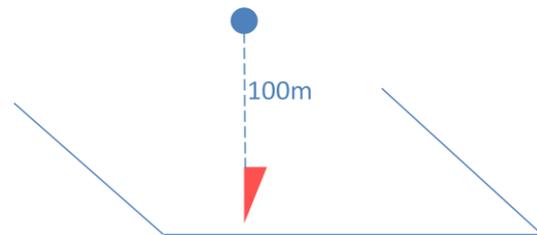
- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, ungeneigtes Gelände, Oberflächenkontamination.

Energie [keV]	Geometriefaktor
50	1,25E-02
100	2,97E-02
200	5,15E-02
500	1,01E-01
1000	1,65E-01
2000	2,60E-01



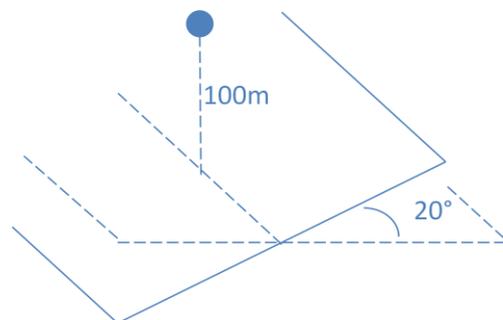
- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, ungeneigtes Gelände, Kontamination mit exponentieller Tiefenverteilung $\zeta = 10 \text{ kg/m}^2$.

Energie [keV]	Geometriefaktor
50	8,30E-03
100	2,38E-02
200	4,33E-02
500	8,83E-02
1000	1,48E-01
2000	2,37E-01



- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, um 20° geneigtes Gelände, Oberflächenkontamination.

Energie [keV]	Geometriefaktor
50	1,52E-02
100	3,49E-02
200	5,89E-02
500	1,12E-01
1000	1,80E-01
2000	2,78E-01



- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, um 20° geneigtes Gelände, Kontamination mit exponentieller Tiefenverteilung $\zeta = 10 \text{ kg/m}^2$.

Energie [keV]	Geometriefaktor
50	1,03E-02
100	2,81E-02
200	4,97E-02
500	9,74E-02
1000	1,58E-01
2000	2,44E-01

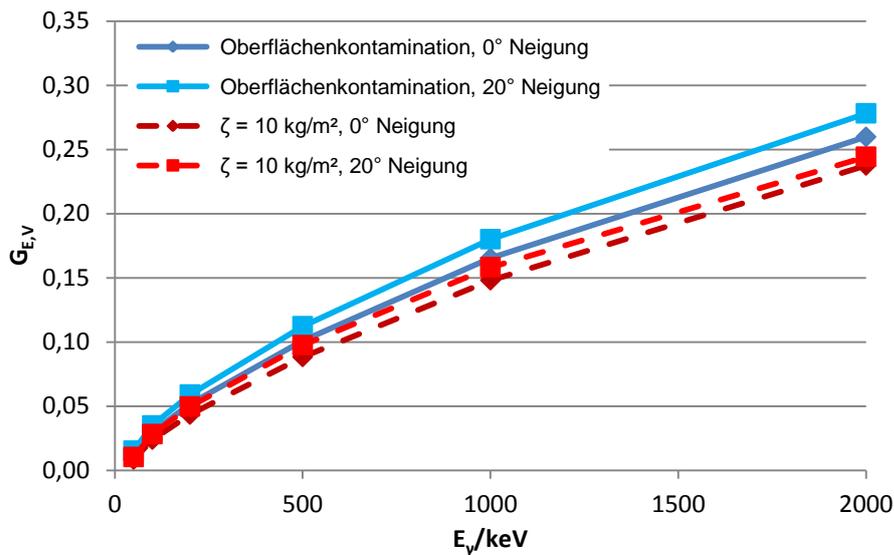
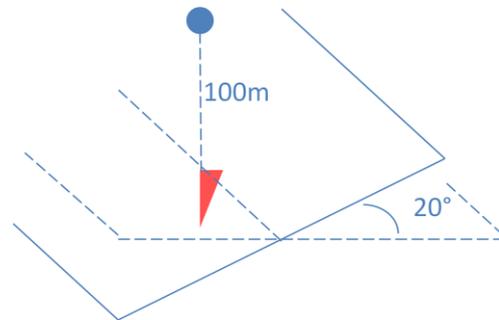
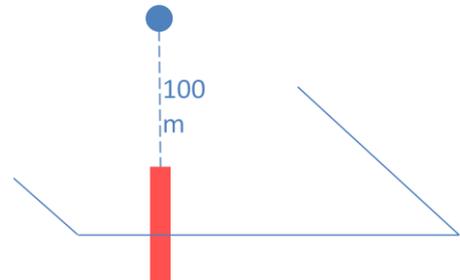


Abbildung 9: Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Energie der Gammastrahlung. Die Kontamination war dabei zum einen an der Oberfläche, zum anderen im Erdreich mit der Relaxationsmassenflächendichte von $\zeta = 1 \text{ g/cm}^2$ bzw. 10 kg/m^2 . Das Gelände wurde als ungeneigt bzw. unter einem Winkel von 20° geneigt betrachtet.

Es ist ersichtlich, dass der Geometriefaktor bei geneigtem Gelände jeweils höher ist. Aufgrund des quadratischen Abstandsgesetzes erhöht die auf der einen Seite näher liegende Kontamination den Geometriefaktor stärker als er aufgrund einer größeren Entfernung zu der Kontamination auf der anderen Seite vermindert wird.

- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, ungeneigtes Gelände, Kontamination mit homogener Tiefenverteilung.

Energie [keV]	Geometriefaktor [kg m^{-2}]
50	2,56E-01
100	1,26E+00
200	2,92E+00
500	7,77E+00
1000	1,64E+01
2000	3,39E+01



- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV, um 20° geneigtes Gelände, Kontamination mit homogener Tiefenverteilung.

Energie [keV]	Geometriefaktor [kg m^{-2}]
50	3,30E-01
100	1,55E+00
200	3,51E+00
500	9,04E+00
1000	1,85E+01
2000	3,74E+01

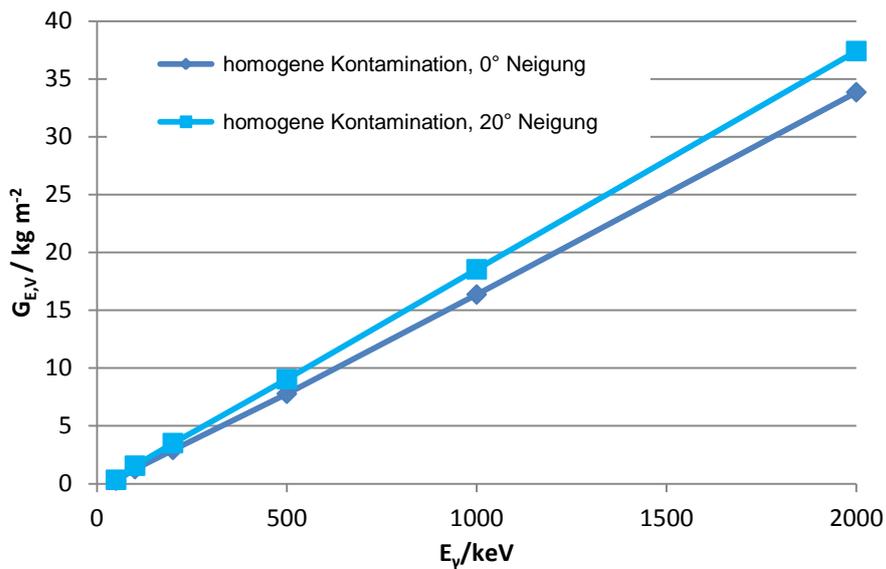
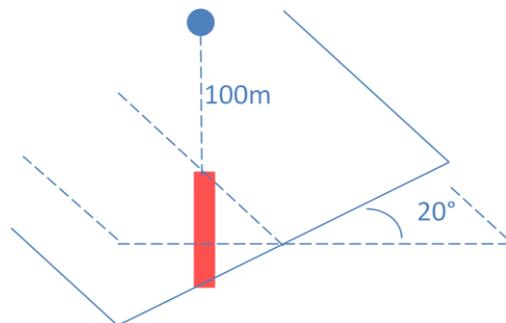


Abbildung 10: Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Energie der Gammastrahlung. Es lag eine homogene Kontamination vor. Das Gelände wurde als ungeneigt bzw. unter einem Winkel von 20° geneigt betrachtet.

- Variation der Detektorhöhe von 50 – 300 m

Höhe [m]	Geometriefaktor
50	3,20E-01
100	1,58E-01
200	4,99E-02
300	1,81E-02

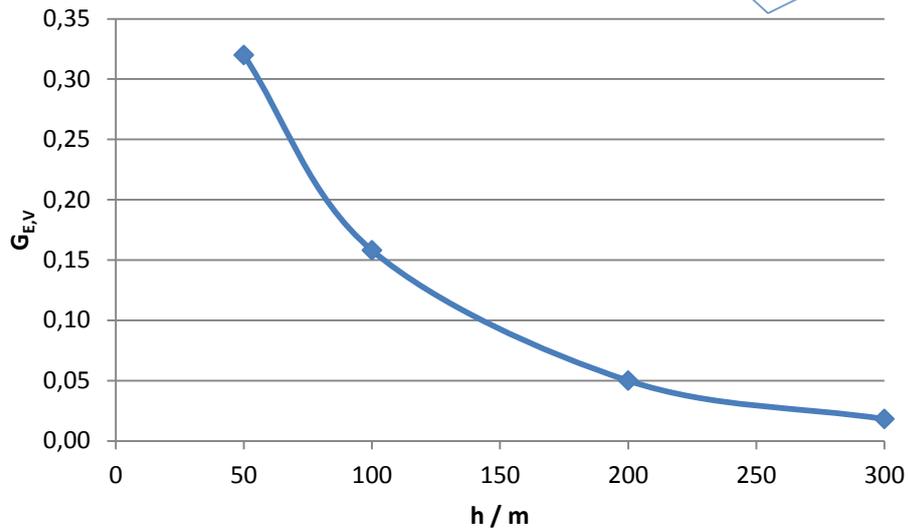
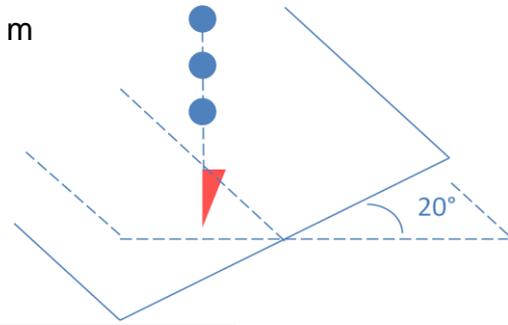


Abbildung 11: Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Detektorhöhe.

- Variation der Tiefenverteilung bzw. Relaxationsmassenflächendichte ζ

ζ [kg m ⁻²]	Geometriefaktor
0	1,80E-01
10	1,58E-01
20	1,44E-01
50	1,16E-01
100	8,72E-02
homogen	1,85E+01 kg m ⁻²

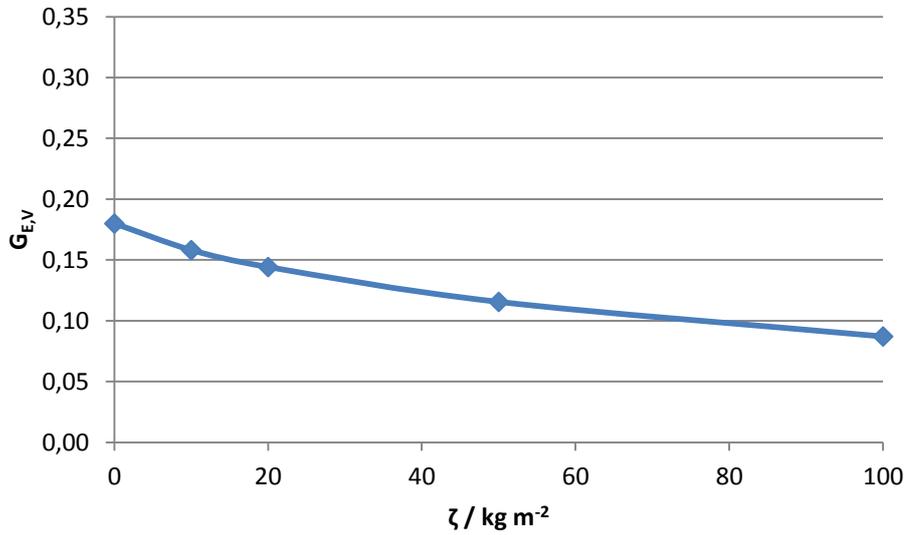
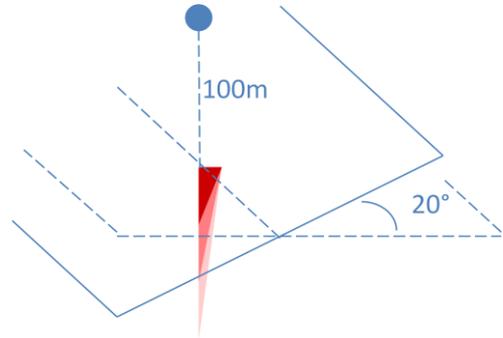


Abbildung 12: Geometriefaktoren in Abhängigkeit von der Tiefenverteilung.

- Variation des Neigungswinkels für Hang, Kuppe und Tal

Winkel [°]	G.-Faktor Hang	G.-Faktor Kuppe	G.-Faktor Tal
0	1,48E-01	1,48E-01	1,48E-01
10	1,61E-01	1,28E-01	1,74E-01
20	1,75E-01	1,13E-01	2,03E-01
30	1,90E-01	1,02E-01	2,33E-01
40	2,08E-01	9,34E-02	2,67E-01

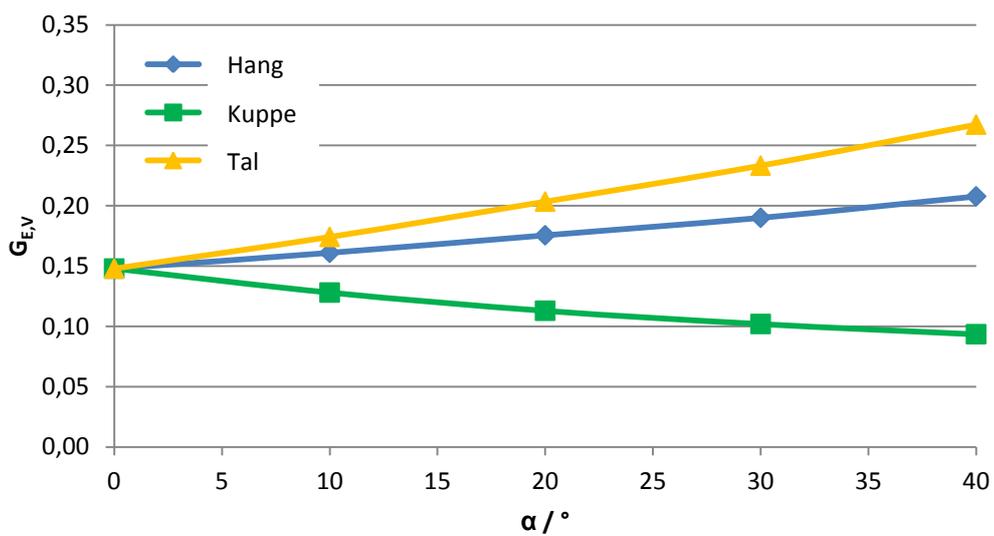
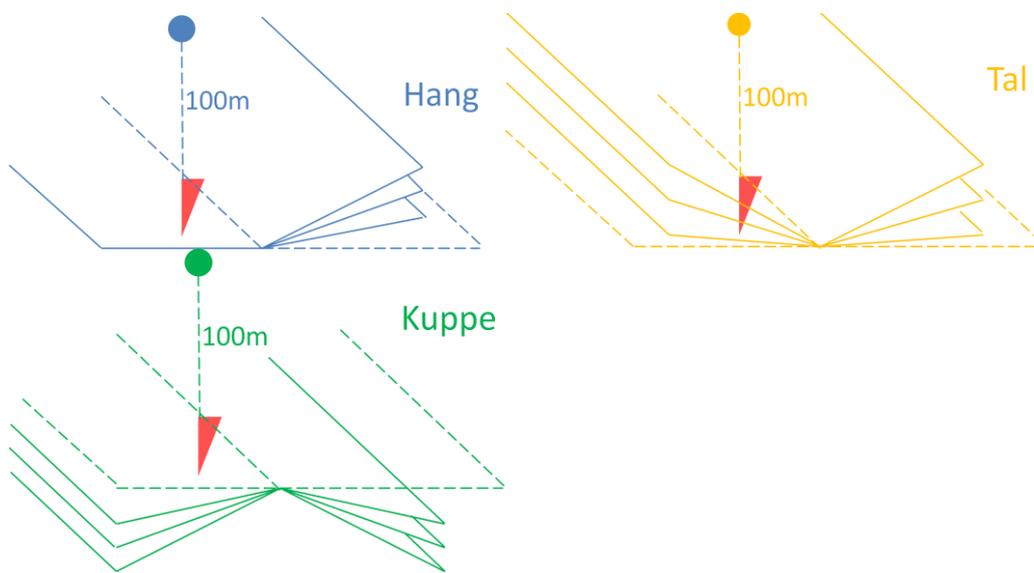
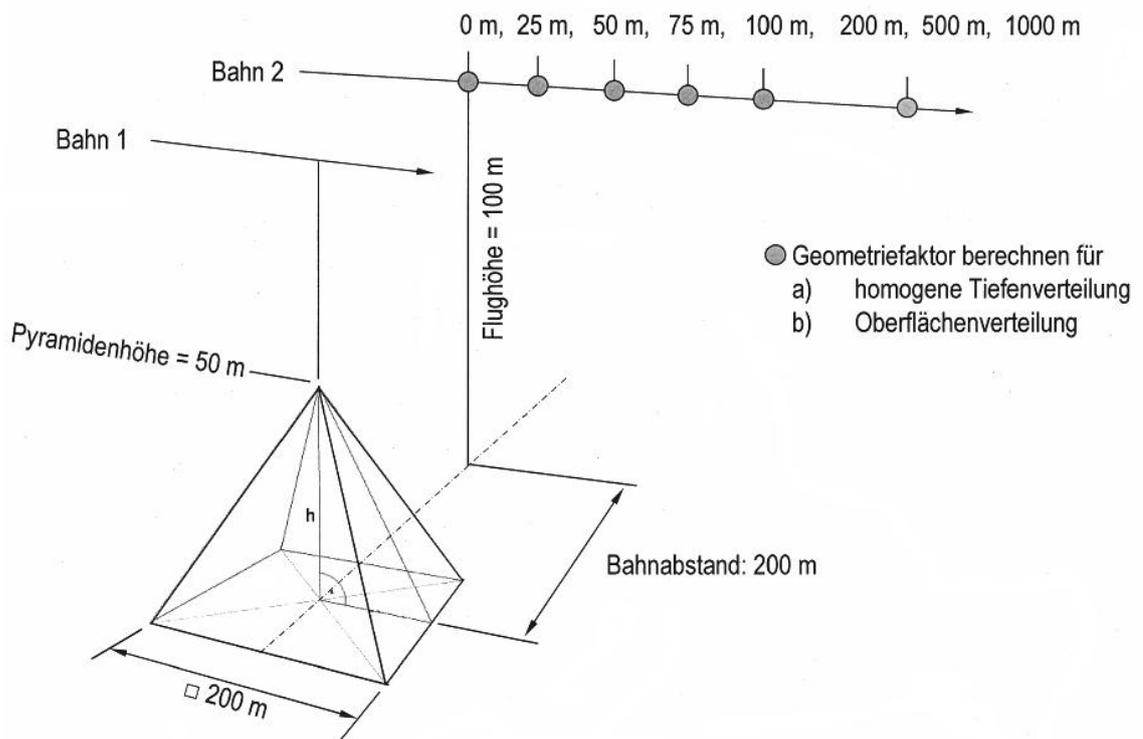


Abbildung 13: Geometriefaktoren in Abhängigkeit vom Neigungswinkel für Hang, Kuppe und Tal.

- Pyramide: Variation der Detektorposition entlang zweier Bahnen, homogene und exponentielle Tiefenverteilung sowie Oberflächenverteilung



Die Berechnungen der Geometriefaktoren wurden sowohl einmal mit als auch ohne Berücksichtigung des Verdeckungseffekts durchgeführt. Es ergaben sich lediglich relative Unterschiede von bis zu ca. 1 %.

Oberflächenverteilung, Bahn 1:

Entfernung [m]	Geometriefaktor	ohne Verdeckung
0	2,48E-01	2,48E-01
25	2,40E-01	2,40E-01
50	2,25E-01	2,25E-01
75	2,07E-01	2,07E-01
100	1,92E-01	1,93E-01
200	1,67E-01	1,69E-01
500	1,65E-01	1,65E-01
1000	1,65E-01	1,65E-01

Oberflächenverteilung, Bahn 2:

Abstand [m]	Geometriefaktor	ohne Verdeckung
0	1,67E-01	1,69E-01
25	1,67E-01	1,69E-01
50	1,67E-01	1,69E-01
75	1,67E-01	1,68E-01
100	1,66E-01	1,68E-01
200	1,65E-01	1,66E-01
500	1,65E-01	1,65E-01
1000	1,65E-01	1,65E-01

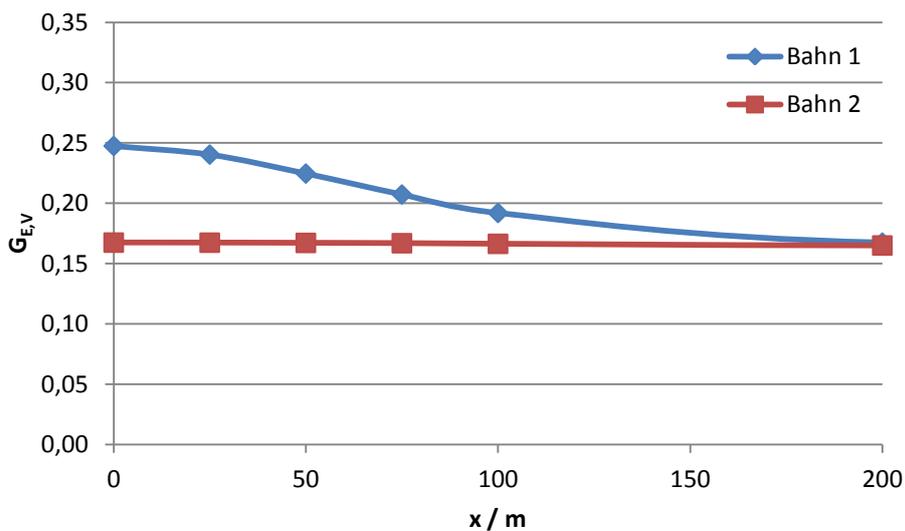


Abbildung 14: Geometriefaktoren für die Oberflächenkontamination einer Pyramide in Abhängigkeit von der Entfernung unter Berücksichtigung des Verdeckungseffekts.

Exponentielle Tiefenverteilung $\zeta = 10 \text{ kg/m}^2$, Bahn 1:

Abstand [m]	Geometriefaktor	ohne Verdeckung
0	2,19E-01	2,19E-01
25	2,12E-01	2,12E-01
50	1,98E-01	1,98E-01
75	1,82E-01	1,82E-01
100	1,70E-01	1,70E-01
200	1,50E-01	1,51E-01
500	1,48E-01	1,48E-01
1000	1,48E-01	1,48E-01

Exponentielle Tiefenverteilung $\zeta = 10 \text{ kg/m}^2$, Bahn 2:

Abstand [m]	Geometriefaktor	ohne Verdeckung
0	1,50E-01	1,51E-01
25	1,50E-01	1,50E-01
50	1,49E-01	1,50E-01
75	1,49E-01	1,50E-01
100	1,49E-01	1,50E-01
200	1,48E-01	1,48E-01
500	1,48E-01	1,48E-01
1000	1,48E-01	1,48E-01

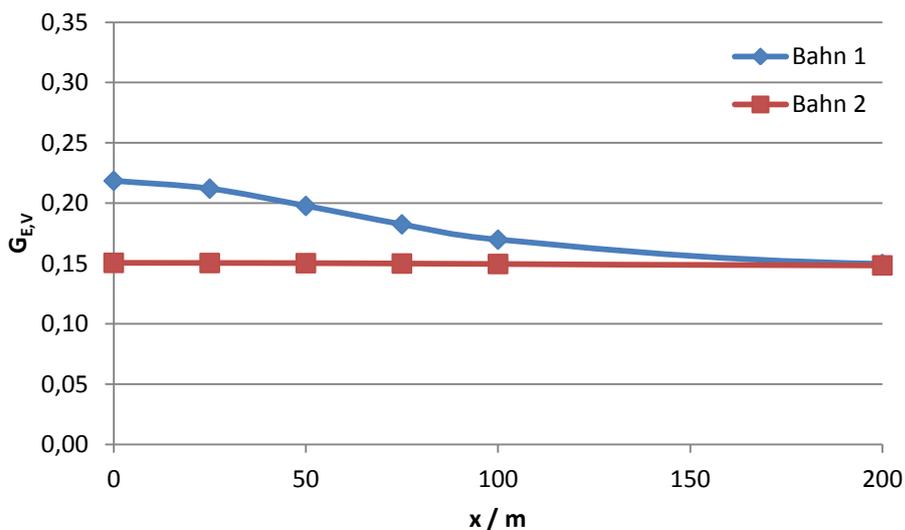


Abbildung 15: Geometriefaktoren für eine exponentielle Tiefenverteilung der Kontamination einer Pyramide in Abhängigkeit von der Entfernung unter Berücksichtigung des Verdeckungseffekts.

Homogene Tiefenverteilung, Bahn 1:

Abstand [m]	Geometriefaktor [kg m ⁻²]	ohne Verdeckung [kg m ⁻²]
0	2,07E+01	2,07E+01
25	2,06E+01	2,06E+01
50	2,00E+01	2,00E+01
75	1,95E+01	1,95E+01
100	1,88E+01	1,88E+01
200	1,68E+01	1,68E+01
500	1,64E+01	1,64E+01
1000	1,64E+01	1,64E+01

Homogene Tiefenverteilung, Bahn 2:

Abstand [m]	Geometriefaktor [kg m ⁻²]	ohne Verdeckung [kg m ⁻²]
0	1,68E+01	1,68E+01
25	1,67E+01	1,68E+01
50	1,67E+01	1,68E+01
75	1,67E+01	1,67E+01
100	1,67E+01	1,67E+01
200	1,65E+01	1,65E+01
500	1,64E+01	1,64E+01
1000	1,64E+01	1,64E+01

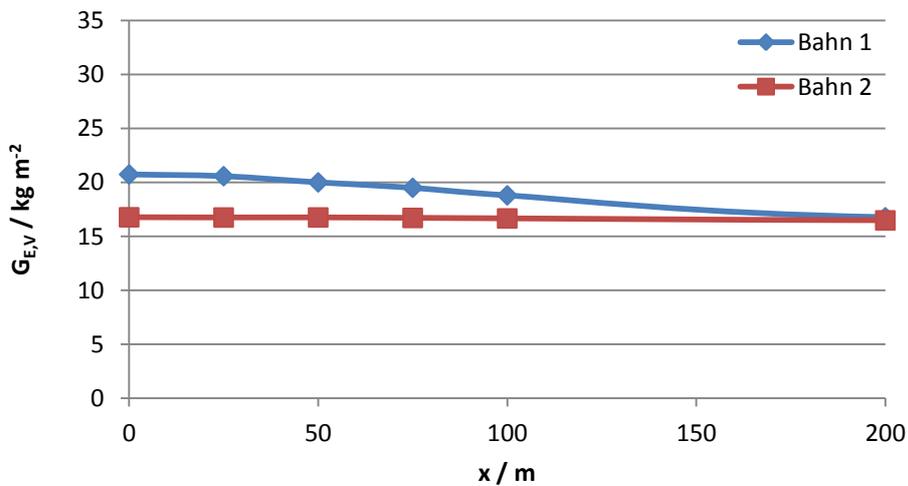


Abbildung 16: Geometriefaktoren für eine homogene Tiefenverteilung der Kontamination einer Pyramide in Abhängigkeit von der Entfernung unter Berücksichtigung des Verdeckungseffekts.

3.4.2 Laterale Inhomogenitäten

Bei der Berechnung endlich ausgedehnter Quellen wurde, wenn nicht anders angegeben, ein horizontales Gelände, eine Flughöhe von 100 m, eine Messzeit von 2 s bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h bzw. 27,78 m/s, eine Quellgröße von 10.000 m² in quadratischer Form, ein Versatz der Flugbahn von der Quadratmitte von 0 m, ein Kontaminationsnuklid mit einer Gammalinie bei 1000 keV und eine exponentielle Tiefenverteilung mit der Relaxationsmassenflächendichte von $\zeta = 1 \text{ g/cm}^2$ bzw. 10 kg/m^2 angenommen.

- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV

Energie [keV]	Geometriefaktor
50	2,92E-03
100	6,96E-03
200	1,11E-02
500	1,84E-02
1000	2,58E-02
2000	3,39E-02

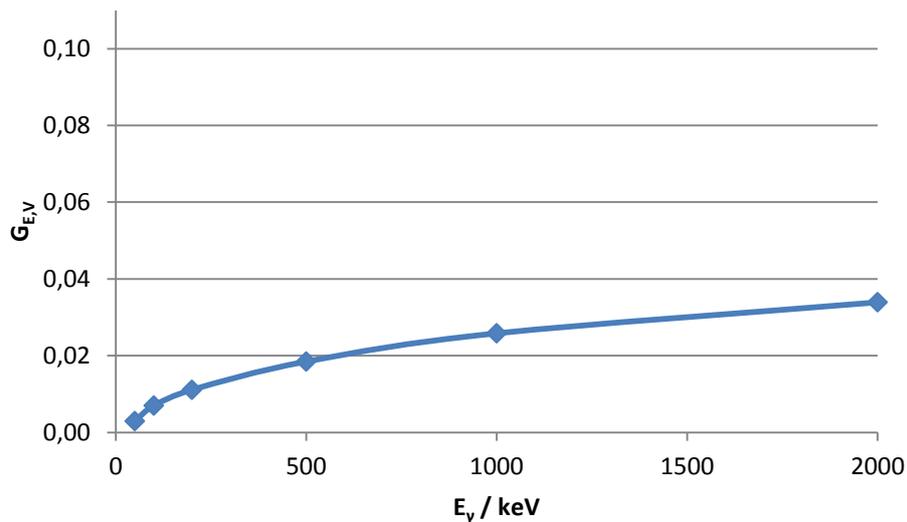
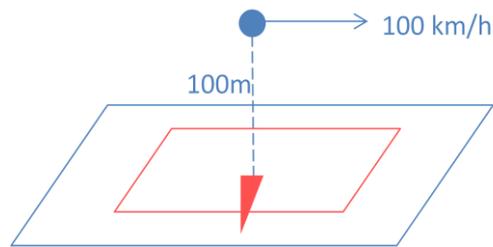


Abbildung 17: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Energie der Gammastrahlung.

- Variation der Detektorhöhe von 50 – 300 m

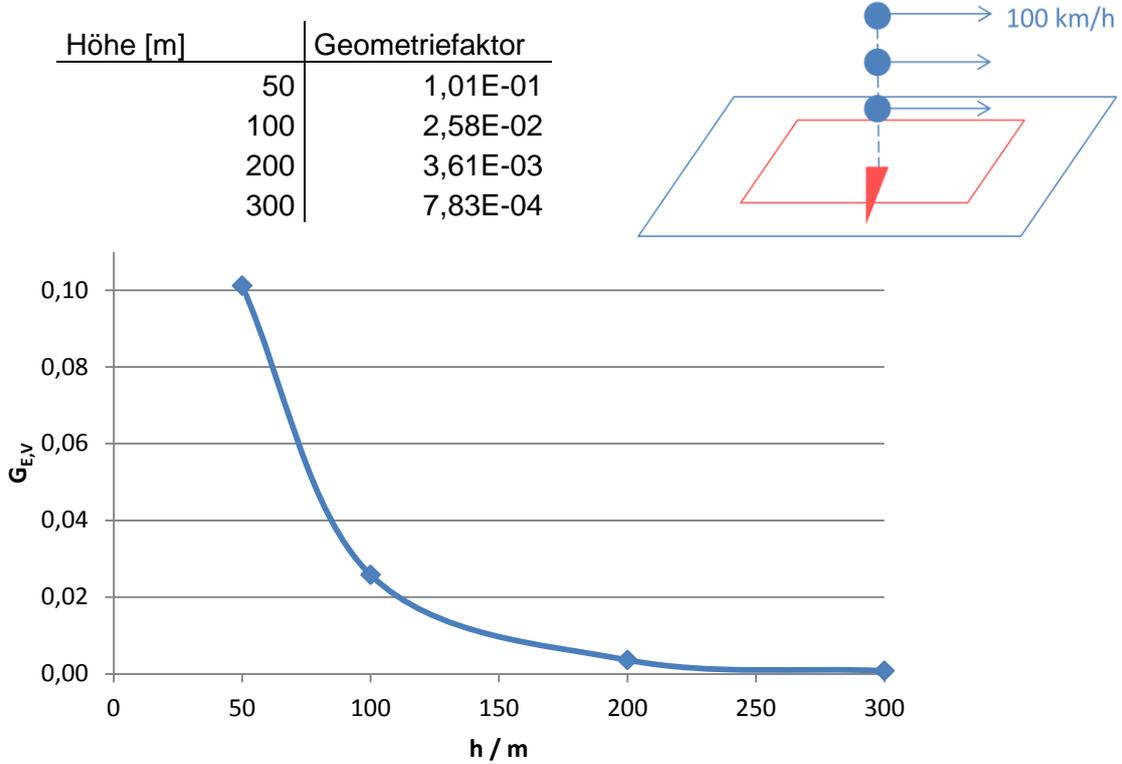
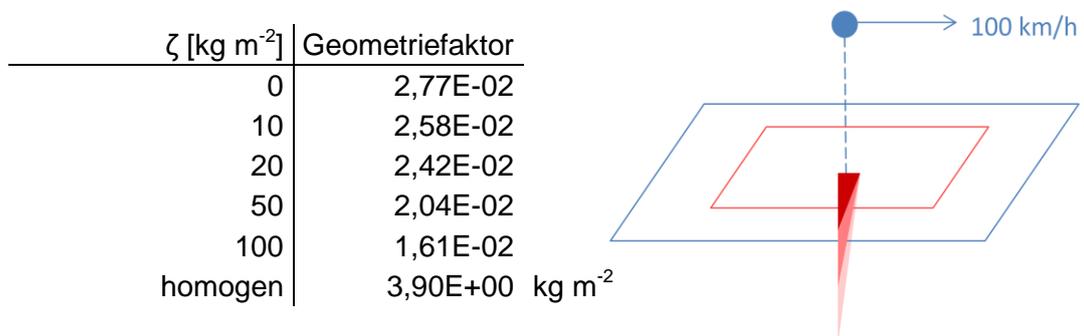


Abbildung 18: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Detektorhöhe.

- Variation der Tiefenverteilung bzw. Relaxationsmassenflächendichte ζ



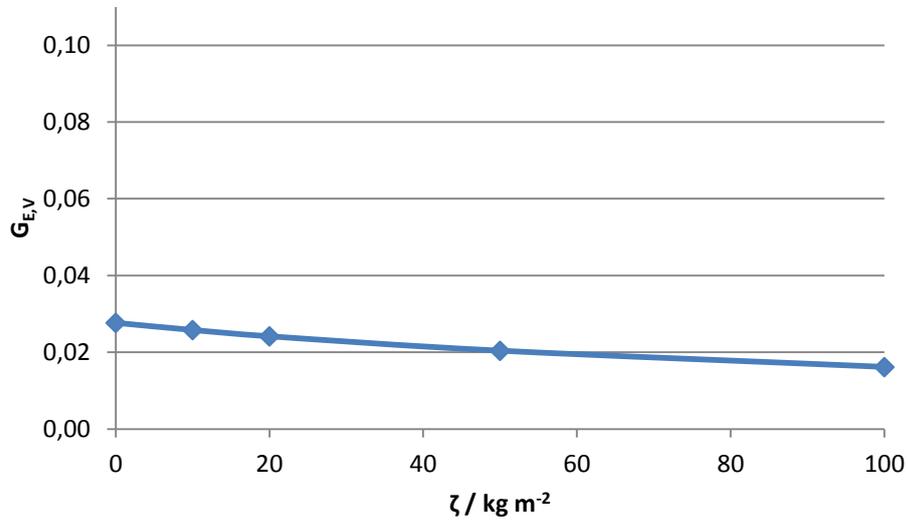


Abbildung 19: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Tiefenverteilung.

- Variation der Messdauer von 1 – 20 Sekunden

Messdauer [s]	Geometriefaktor
1	2,76E-02
2	2,58E-02
5	1,84E-02
10	1,06E-02
20	5,42E-03

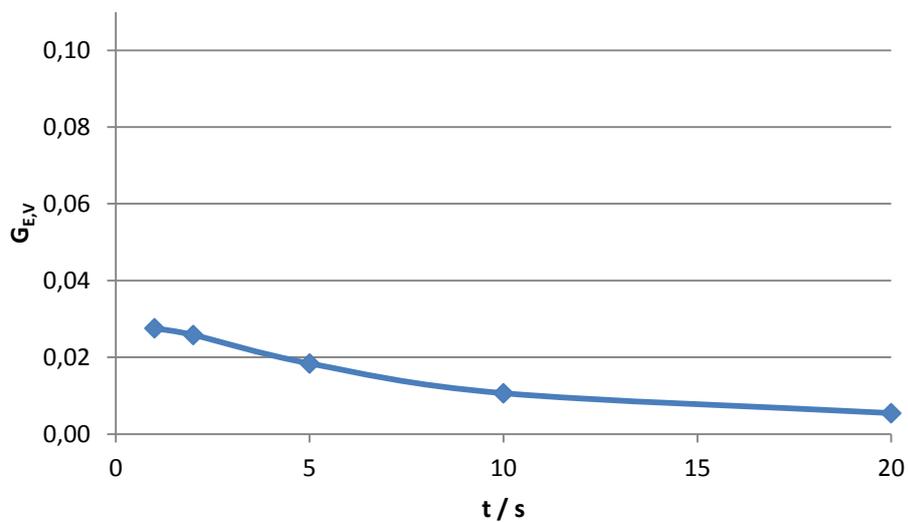
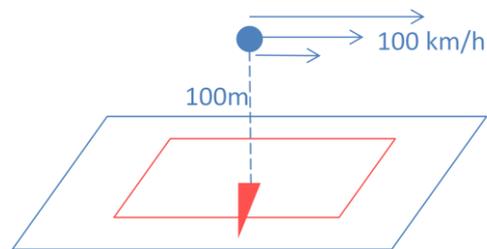


Abbildung 20: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Messdauer.

- Variation der Quellengröße von 10 – 100.000 Quadratmeter

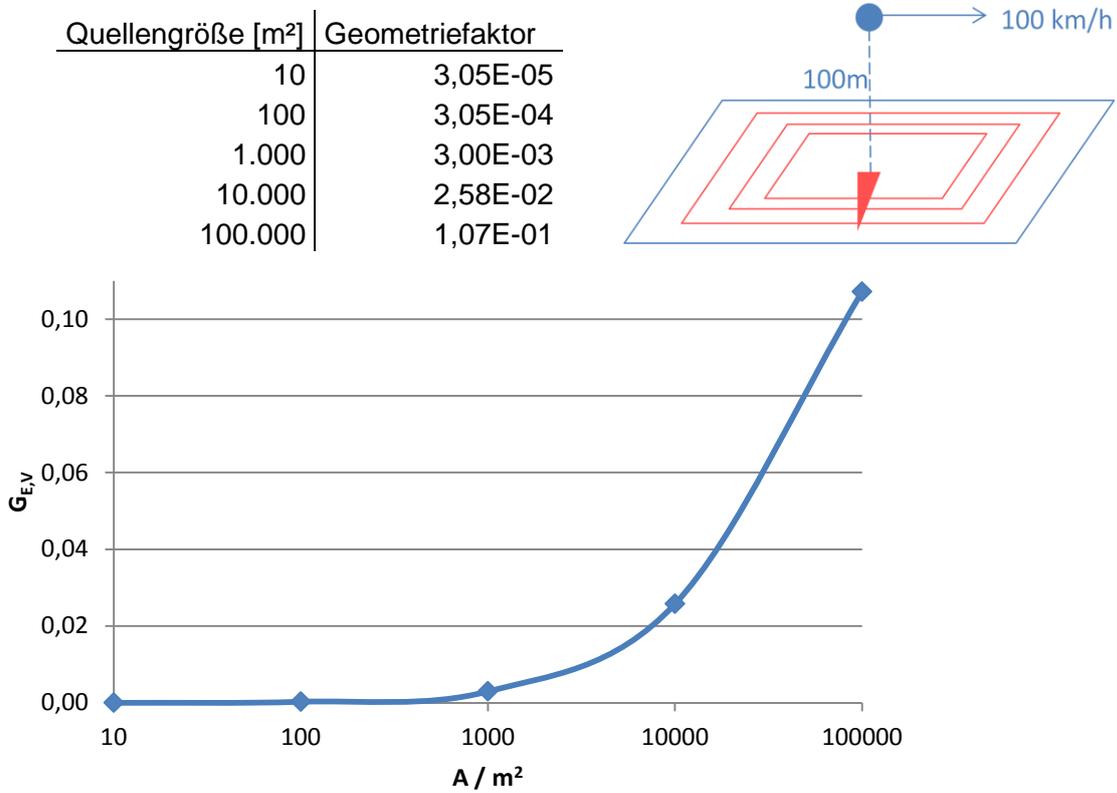
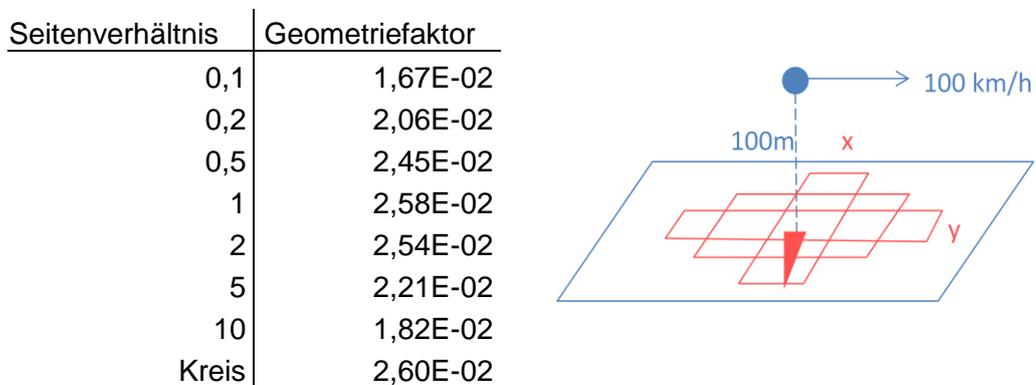


Abbildung 21: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Quellengröße.

- Variation der Quellenform (insbes. Seitenverhältnis)



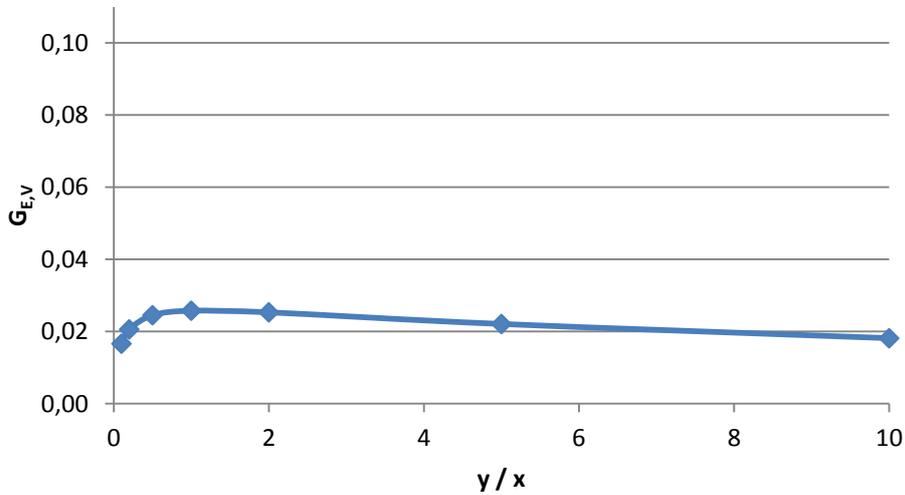


Abbildung 22: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit von der Quellenform.

- Variation des Abstandes zur Quellenmitte von 0 – 500 m

Abstand [m]	Geometriefaktor
0	2,58E-02
50	2,08E-02
100	1,17E-02
200	2,58E-03
500	4,81E-05

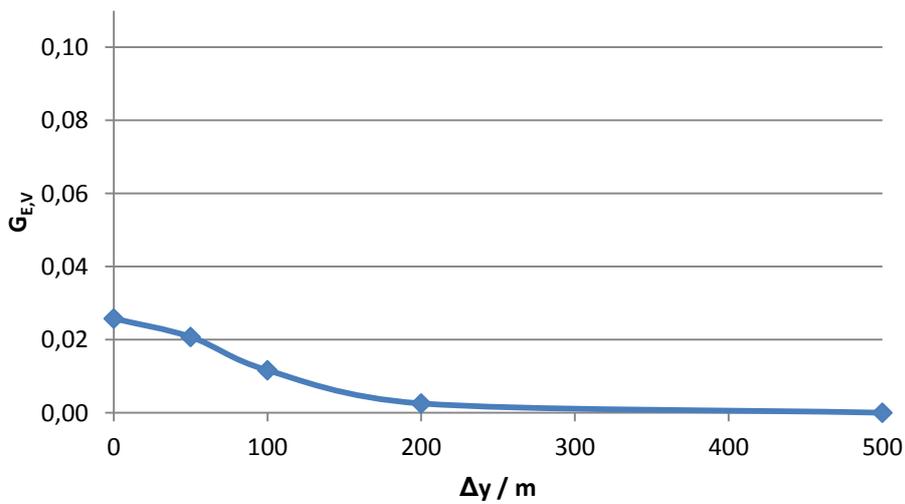
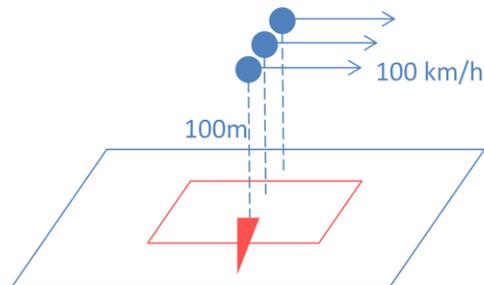


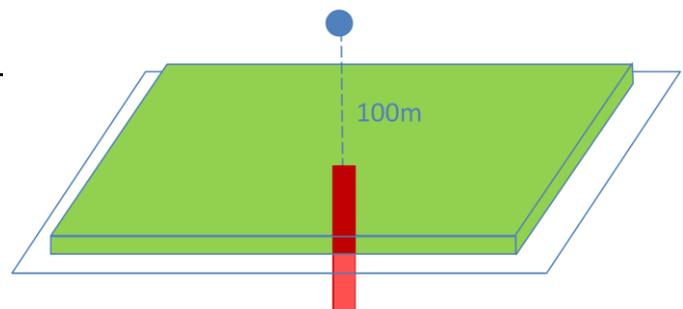
Abbildung 23: Geometriefaktoren für eine endliche Kontamination in Abhängigkeit vom Abstand zur Quellenmitte.

3.4.3 Bodenvegetation

Es sollte der Einfluss einer absorbierenden Schicht aus Bodenvegetation auf den Geometriefaktor untersucht werden. Die dazu erforderliche Massenbelegung wurde folgendermaßen abgeschätzt. Aus dem Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten [Sta 11] wurde entnommen, dass in Deutschland auf einer Fläche von 105677 km² an Bäumen 3,4E9 m³ Vorratsfestmeter mit Rinde stehen. Daraus folgt mit einer Dichte von ca. 900 kg/m³ für waldfrisches Rundholz [Hol 12] eine Masse pro Fläche von ca. 2,9 g/cm² oder 29 kg/m². Dies ist als ungefährender Mittelwert anzusehen. Gemäß der Literaturstelle [Sta 11] wurden in den Jahren 2005 bis 2011 an Weizen im Durchschnitt 74 dt/ha geerntet. Das Korn-Stroh-Verhältnis beträgt 0,8 [Lfl 11], damit ist die Gesamtmasse pro Fläche 74 dt/ha · 1,8 = 133 dt/ha oder 0,13 g/cm² oder 1,3 kg/m². Dies ist als ungefährender Mittelwert für erntereifen Weizen anzusehen. Standardmäßig wurde bei den folgenden Berechnungen eine Massenbelegung von 30 kg/m² sowie eine Gammaenergie von 1000 keV gewählt. Die horizontale Ebene soll ansonsten mit einer unendlich ausgedehnten Kontamination mit homogener Tiefenverteilung belegt sein. Der Detektor befindet sich wieder in 100 m Höhe.

- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV

Energie [keV]	Geometriefaktor [kg m ⁻²]
50	1,14E-01
100	6,55E-01
200	1,69E+00
500	5,15E+00
1000	1,19E+01
2000	2,66E+01



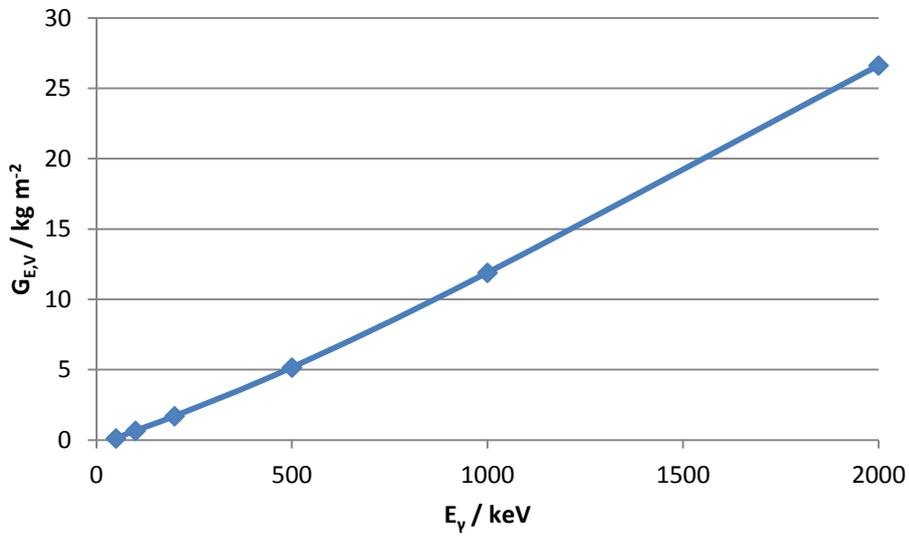
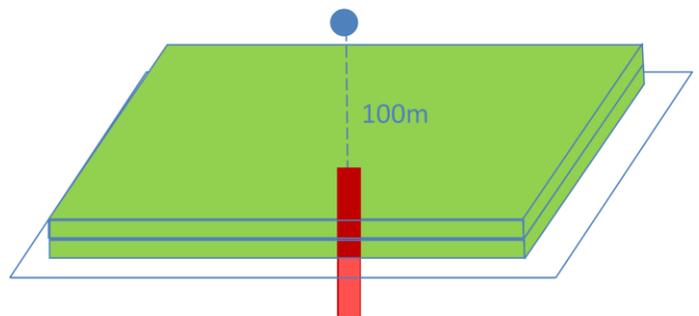


Abbildung 24: Geometriefaktoren für eine homogene Kontamination unter einer Bodenvegetation in Abhängigkeit von der Energie der Gammastrahlung.

- Variation der Massenbelegung durch Vegetation von 0 – 48 kg/m²

Belegung [kg/m ²]	Geometriefaktor [kg m ⁻²]
0,00	1,64E+01
0,75	1,62E+01
1,50	1,61E+01
3,00	1,58E+01
6,00	1,53E+01
12,00	1,44E+01
24,00	1,27E+01
30,00	1,19E+01
48,00	9,89E+00



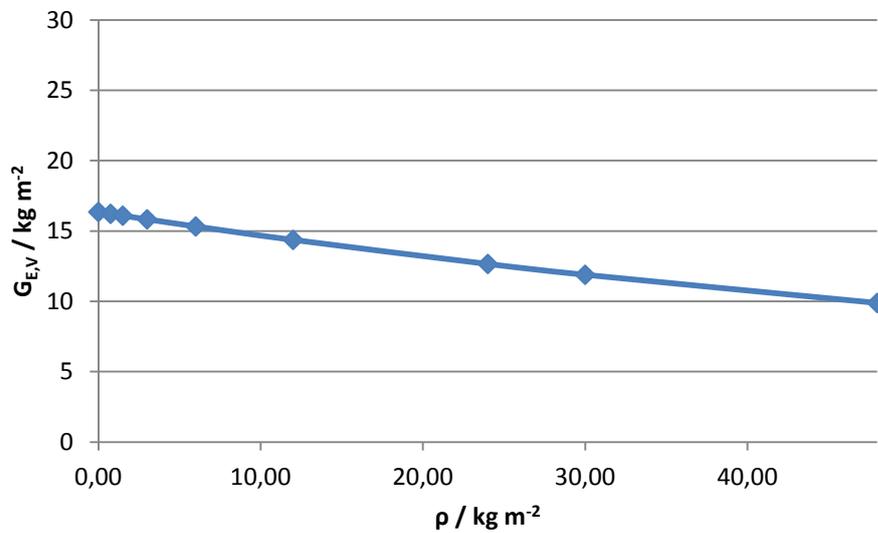


Abbildung 25: Geometriefaktoren für eine homogene Kontamination unter einer Bodenvegetation in Abhängigkeit von deren Massenbelegung.

3.4.4 Luftkontamination

Bei der Betrachtung des Einflusses einer Luftkontamination auf den Geometriefaktor wurde, wenn nicht anders genannt, eine Gammaenergie von 1000 keV, eine Detektorhöhe von 100 m sowie eine in horizontaler Richtung unendlich weit ausgedehnte Kontamination mit einer Ausdehnung vom Boden bis zu einer Höhe von 100 m angenommen.

- Variation der Gammaenergie von 50 – 2000 keV

Energie [keV]	Geometriefaktor [kg m ⁻²]
50	2,35E+01
100	3,07E+01
200	3,74E+01
500	4,91E+01
1000	6,14E+01
2000	7,72E+01

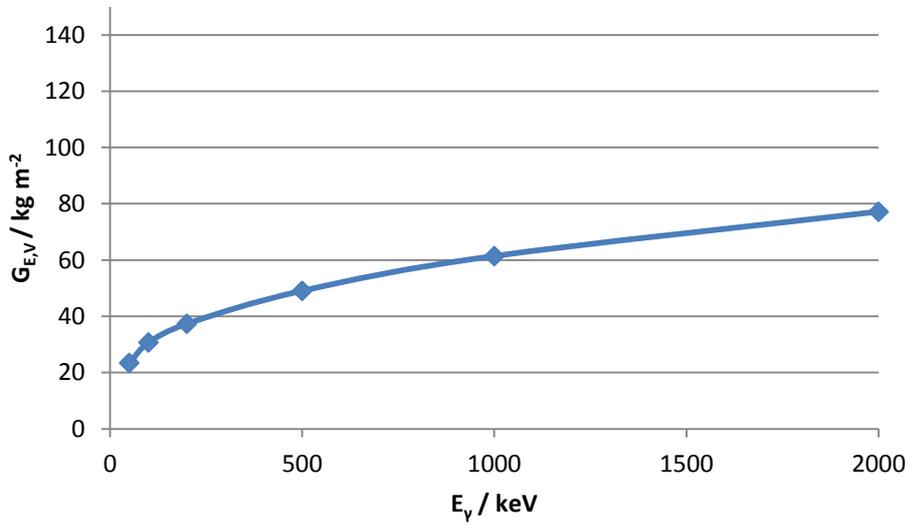
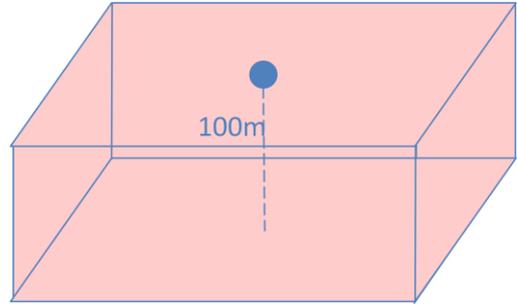


Abbildung 26: Geometriefaktoren für Luftkontamination in Abhängigkeit von der Energie der Gammastrahlung.

- Variation der Höhe der kontaminierten Luftschicht von 0 – 1000 m

Kont.- Höhe [m]	Geometriefaktor [kg m ⁻²], 100 keV	Geometriefaktor [kg m ⁻²], 1000 keV
10	4,10E-01	2,14E+00
20	9,46E-01	4,61E+00
50	3,87E+00	1,49E+01
100	3,07E+01	6,14E+01
200	6,13E+01	1,23E+02
500	6,28E+01	1,39E+02
1000	6,28E+01	1,39E+02

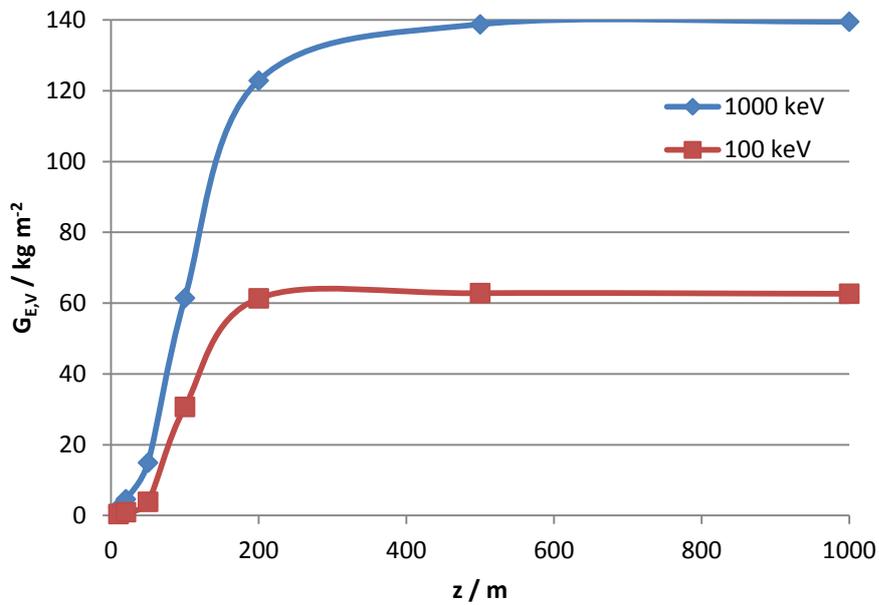
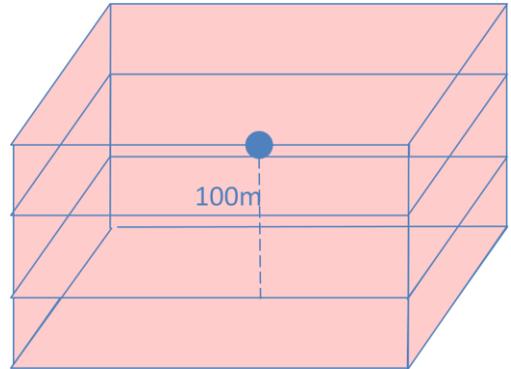


Abbildung 27: Geometriefaktoren für Luftkontamination in Abhängigkeit von der Höhe der kontaminierten Luftschicht für zwei Gammaenergien.

4 Kalibrierung am Hubschrauber

4.1 Einleitung

Eine weitere der im Projekt geforderten Leistungen war es, Kalibriermessungen zur Bestimmung der Detektorausbeute am im Hubschrauber eingebauten Spektrometrie-Messsystem durchzuführen und die Messergebnisse graphisch darzustellen. Diese Kalibrierung sollte ursprünglich mit Kalibrierquellen im Energiebereich von 60 keV bis 1400 keV (Extrapolation bis 3000 keV), im unteren Halbraum in 20-Grad-Schritten und im oberen Halbraum in 30-Grad-Schritten ermittelt werden. Da die Detektoren teilweise von den Tanks abgeschirmt werden, sollte die Kalibrierung für mindestens drei Tankfüllstände des Haupttanks durchgeführt werden.

In unserem Angebot gingen wir von einer Achsensymmetrie des Hubschraubers zu einer vertikalen Ebene längs der Flugrichtung aus, so dass die Messungen nur auf der in Flugrichtung rechten Seite durchgeführt wurden. Diese Annahme führt ungefähr zu einer Halbierung der erforderlichen Messungen. Als Kalibrierpräparate wurden ursprünglich Ba-133 und Eu-152 mit einer Aktivität von ca. 100 MBq vorgesehen. Gemessen wurde schließlich mit den vorhandenen Kalibrierpräparaten Cs-137 und Co-60.

4.2 Kalibriermethode

Es werden für die Aerogammaspektrometrie vom BfS vier NaI-Detektoren und ein Germanium-Detektor verwendet. Einige Daten dazu sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Die für die Kalibrierung zu berücksichtigenden Einstrahlrichtungen der Photonen im Kugelkoordinatensystem sind in der Abbildung 28 dargestellt. Als Ursprung O des Koordinatensystems wurde der Mittelpunkt der Kristalle der vier NaI-Detektoren und als Höhe die Mitte des NaI-Kristalls gewählt (siehe Abbildung 29). Dafür ist es erforderlich, möglichst genau die Positionierung der Kristalle in den Gehäusen und die Positionierung der Gehäuse im Hubschrauber auszumessen.

Detektor	Hersteller	Typ	Seriennummer
Germaniumdetektor (Detektor 1)	Fa. Ortec	GEM50P4-83-HE-S (58 % rel. Eff. gemessen, Durchmesser 69,7 mm, Dewar 1,2 l)	52-TP32889A
Multi-Channel Analyzer für Detektor 1	Fa. GBS Elektronik	MCA-527	1120
Nal-Detektor (Detektor 2 bis 5)	Fa. Scionix	V102AS406 / 3.5m (4"·4"·16")	647 648 649 650
Multi-Channel Analyzer für Detektor 2 bis 5	Fa. Ortec	digiBASE-E	12314670 12314671 12314672 12314673

Tabelle 4: Datenzusammenstellung zu den verwendeten Detektoren

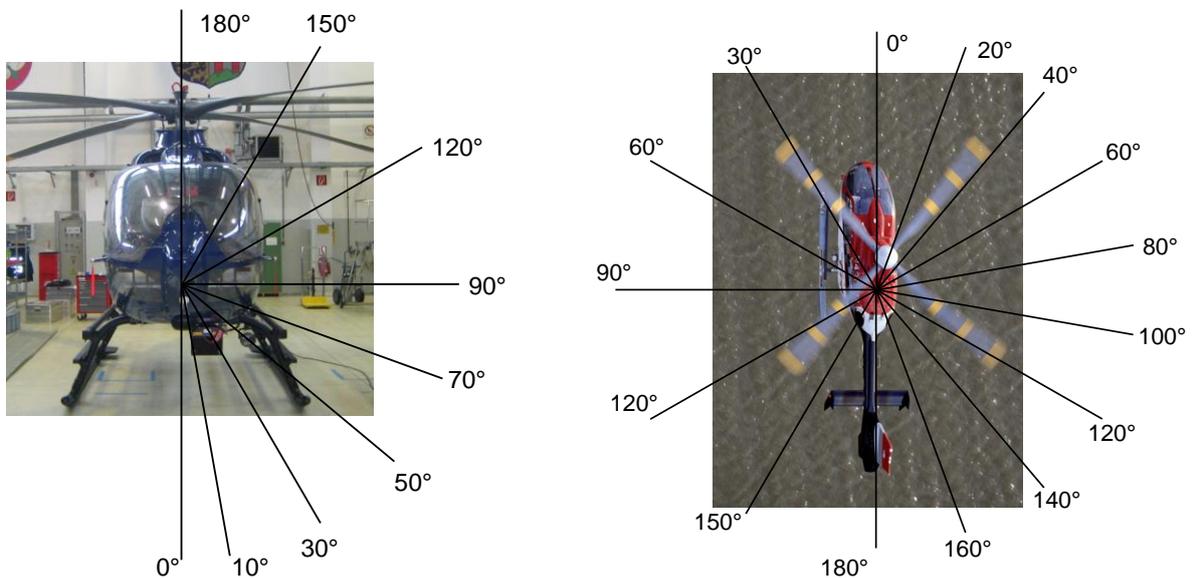


Abbildung 28: Linkes Bild: Schematische Darstellung des Polarwinkels θ . Rechtes Bild: Schematische Darstellung des Azimutwinkels φ (von oben). Die rechte Seite stellt die Winkel für den unteren Halbraum dar, die linke Seite die Winkel für den oberen Halbraum, die aus Gründen der Übersichtlichkeit nach links gespiegelt dargestellt sind.

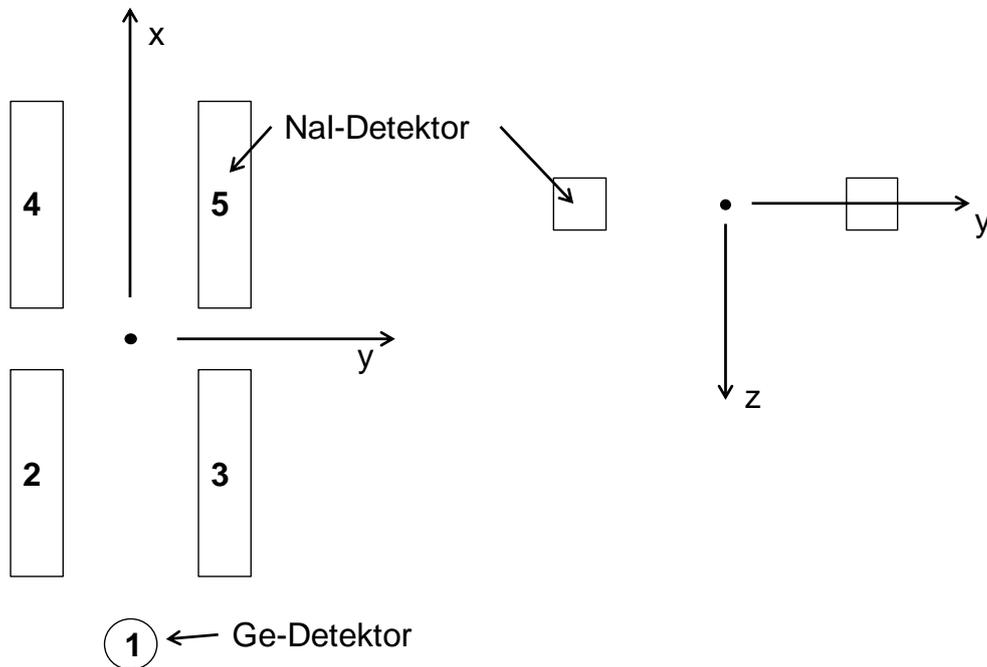


Abbildung 29: Schematische Positionierung des Koordinatenursprungs O. Im linken Bild die Ansicht der mit ihrer Nummer bezeichneten Detektoren von oben, zentriert dazwischen der Koordinatenursprung. Im rechten Bild die Ansicht der Nal-Detektoren von hinten, zentriert dazwischen der Koordinatenursprung.

Die verwendeten Messpunkte sind im Anhang 1.1 aufgeführt (Tabelle A1.1) und in Projektionen im Anhang 2.2 (Abbildung A2.1 bis A2.3) dargestellt. Dabei ist der Vektor $\vec{r} = \vec{q} - \vec{q}_0$ der in Kapitel 3 eingeführte Verbindungsvektor, hier zwischen Koordinatenursprung O und dem Ort der Quelle P, und r_{xy} ist die senkrechte Projektion von \vec{r} in die x-y-Ebene.

Die Größe r ist der Abstand des Punktes P vom Koordinatenursprung O, also die Länge des Vektors \vec{r} . In Tabelle A1.1 im Anhang ist jeweils mit dem Wert $r = 300$ cm gerechnet.

Der Azimutwinkel φ (phi) ist der Winkel zwischen der positiven x-Achse und r_{xy} , gezählt von -180° bis $+180^\circ$. Die positiven Winkel liegen auf der von oben gesehen rechten Seite des Hubschraubers.

Der Polarwinkel θ (theta) ist der Winkel zwischen der positiven z-Achse und \vec{r} , gezählt von 0° bis 180° . Die positive z-Achse zeigt vom Hubschrauber senkrecht nach unten.

4.3 Durchführung

Die Kalibriermessungen wurden vom 08. bis 11.04.2013 im Hangar der Bundespolizei in Oberschleißheim an einem Hubschrauber vom Typ EC135 durchgeführt. Im Anhang 2.3 geben Fotos einen Eindruck von der Kalibrierung. Die NaI-Detektoren blieben über den gesamten Messzeitraum im Hubschrauber eingebaut, der Germaniumdetektor wurde auf Grund des kleinen Dewarvolumens über Nacht beim BfS aufgefüllt.

Bei den Messungen wurden vom BfS zur Verfügung gestellte Kalibrierpräparate verwendet.

Nuklid	Bezeichnung	Aktivität am 09.04.2013 [Bq]
Co-60	AZ162	6,48E6
Cs-137	AV382	4,89E7

Tabelle 5: Zusammenstellung wichtiger Daten der verwendeten Prüfstrahler.

Im Rahmen der Messkampagne wurden am 09.04.2013 die beiden Kalibrierpräparate in einem Abstand von 2,94 m vom Mittelpunkt des Germaniumdetektors einige Minuten gemessen und daraus mit Hilfe einer Effizienzkurve, die vom BfS im Oktober 2012 für Punktquellen im Abstand von 1,00 m erstellt worden war, die an diesem Tag aktuellen Aktivitäten berechnet (vgl. Tabelle 5). Die Kalibrierpräparate, die vom BfS bei der Erstellung der Effizienzkurve verwendet worden waren, hatten gemäß den zugehörigen PTB-Kalibrierscheinen eine Unsicherheit von ca. 0,5 %. Die Unsicherheit des Abstandes ist ebenfalls klein, so dass die Gesamtunsicherheit der Aktivitäten der beiden Strahler im Vergleich zu anderen Unsicherheitsbeiträgen vernachlässigt werden kann.

Am ersten Tag der Kalibrierungen wurden die fünf Detektoren eingebaut und die genauen Abstände und Positionen der Detektoren (Kristalle) im eingebauten Zustand ausgemessen (vgl. Abbildung 30). Anschließend wurde die Elektronik getestet und

der Hubschrauber hochgehängt und fixiert. Danach wurde eine vorbereitete Plane mit den vorgegebenen Messpunkten ausgebreitet und die Messpositionen festgelegt. Jeden weiteren Morgen wurde der Germaniumdetektor eingebaut und die Geräte in Betrieb genommen. Abends wurden die Detektoren außer Betrieb genommen und der Germaniumdetektor ausgebaut. Der Hubschrauber stand über Nacht am Boden, die Kalibrierpräparate waren im Tresorraum der Bundespolizei eingeschlossen. Am letzten Tag wurden nach Beendigung der Messungen alle Detektoren wieder ausgebaut.

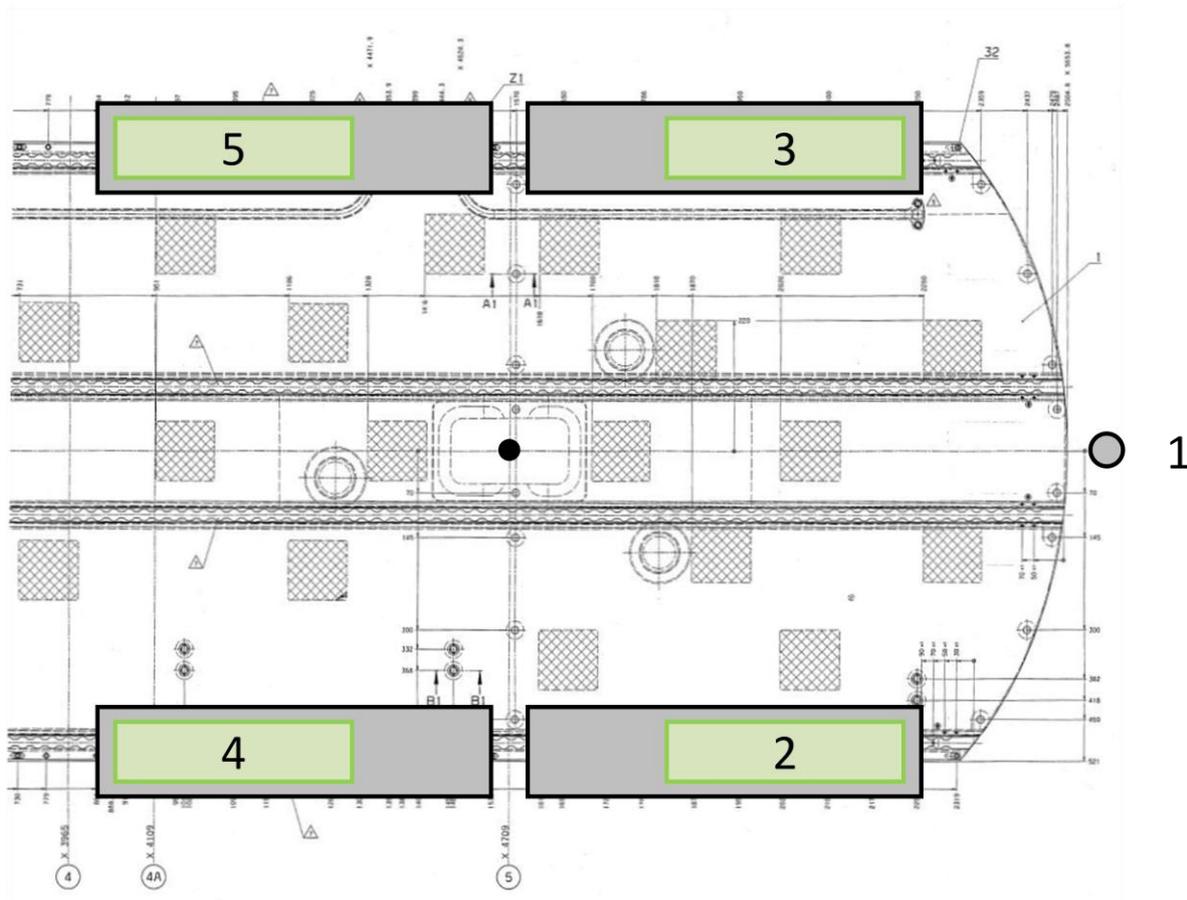


Abbildung 30: Lage der Gehäuse und der NaI-Detektoren dargestellt auf einer Zeichnung des hinteren Teils des Fußbodens des Hubschrauberinnenraumes. Die horizontal verlaufenden Strukturen sind die Schienen, in denen die Trägerplatten der NaI-Detektoren befestigt werden.

Nach den vorbereitenden Arbeiten bzw. der täglichen Inbetriebnahme wurde mit den Messungen begonnen. Dabei wurden in den in der Tabelle A1.2 im Anhang aufge-

fürten Messpositionen gemessen. Es wurden Co-60 und Cs-137 jeweils gemeinsam für eine Messzeit von ca. 5 Minuten gemessen.

Auf den Messpunkten, die auf oder oberhalb der Waagrechten ($\theta \geq 90^\circ$) liegen (Messpunkte 42 bis 66), kann unabhängig von der Tankfüllung gemessen werden. Für unterhalb der Waagrechten ($\theta < 90^\circ$) liegende Messpunkte hat die Tankfüllung einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Zählraten. Für eine komplette Tankfüllung des Haupttanks sind 460 kg Treibstoff erforderlich. Dies sind bei einer Dichte von 0,804 kg/l für den angenommenen Kerosintyp Jet A-1 ca. 572 l Kerosin. Nach Angaben der Bundespolizei am 22.05.2012 können bei den Messflügen mit der Ausrüstung zur Strahlungsmessung aus Gewichtsgründen nur ca. 300 kg (ca. 370 l) in den Haupttank getankt werden, also zwei Drittel der Menge für eine vollständige Füllung. Die drei zu berücksichtigenden Tankfüllungen sind demnach „leer“, „ein Drittel“ (150 kg), im Weiteren als „halb“ bezeichnet und „zwei Drittel“ (300 kg), im Weiteren als „voll“ bezeichnet. Bei den Kalibriermessungen waren die tatsächlichen Tankfüllungen 263 kg (327 l), 130 kg (162 l) und 0 kg (0 l).

Es wurden die ersten Messungen bei der Tankfüllung „voll“ des Haupttanks durchgeführt. Dabei wurden mit Cs-137 und Co-60 die in Tabelle A1.2 aufgeführten 21 Messpunkte berücksichtigt. Anschließend wurde der Haupttank teilweise entleert und anschließend bei der Tankfüllung „halb“ für alle 66 Messpunkte gemessen, da dies für die Flüge den mittleren Tankfüllstand darstellt. Nach einer weiteren Entleerung wurden bei der Tankfüllung „leer“ Messungen auf den in Tabelle A1.2 angegebenen 22 Messpunkten durchgeführt. Die hinten liegenden Versorgungstanks (mit 39 kg und 42 kg bzw. 49 l und 52 l Kerosin) sind bei Messflügen immer gefüllt und waren daher auch bei der Kalibrierung gefüllt. In Summe ergaben sich 109 Messungen ohne Berücksichtigung der verschiedenen Präparate und der fünf Detektoren. Am 11.04.2013 wurde zusätzlich der Untergrund über eine Zeit von ca. 75 Minuten für die Tankfüllung „leer“ gemessen. Das Entleeren des Hubschrauberhaupttanks dauerte ca. eine halbe Stunde und war zweimal erforderlich, um auf die geforderten drei Tankfüllstände zu kommen.

In der Praxis lief das Messprogramm dank der guten Unterstützung durch die Mitarbeiter der Bundespolizei ohne Verzögerungen ab, so dass die geplanten Messungen durchgeführt werden konnten. Da mit Strahlenquellen umgegangen wurde, deren

Aktivität über der Freigrenze gemäß StrlSchV lag, trugen die beteiligten Personen amtliche Dosimeter und teilweise direkt ablesbare elektronische Dosimeter. Die typischerweise akkumulierte Dosis lag bei einigen Mikrosievert am Tag.

4.4 Ergebnisse

4.4.1 Datenanalyse

Die Messungen wurden mit der Gammaskpektrometrie-Software Genie 2000, Version 3.2.2, der Firma Canberra analysiert. Für die Bestimmung der Nachweiswahrscheinlichkeiten wurden die Linien bei 661,61 keV (Cs-137) und bei 1173,23 keV und 1332,49 keV (beide Co-60) ausgewertet. Aus der gemessenen Peakfläche dieser Linien, der Messzeit, der Emissionswahrscheinlichkeiten der Linien und der Aktivität der verwendeten Kalibrierpräparate wurde die Effizienz für diese drei Linien mit dem Programm Excel berechnet. Beispielhafte Spektren sind in Anhang 2.4 dargestellt.

Für jeden Detektor wurde eine eigene Energiekalibrierung anhand der Spektren des Messpunktes 1 mit vollem Tank erstellt. Für die Energiekalibrierung wurden die Linien der Kalibriernuklide Cs-137 (661,61 keV) und Co-60 (1173,23 keV und 1332,49 keV) zu Grunde gelegt. Bei fast allen Messungen waren die Peaks so hoch, dass sie auch ohne genaue Energiekalibrierung eindeutig zugeordnet werden konnten. Für die Bestimmung der Nettofläche hat die genaue Peaklage keine Auswirkungen auf das Ergebnis. Nur bei sehr kleinen Peaks im Spektrum (z. B. Messpunkt 42 vom 10.04.2013 bei halbvollem Tank) konnte es auf Grund einer temperaturabhängigen Energiedrift der NaI-Detektoren zu Schwierigkeiten bei der Peakzuordnung kommen. Deshalb wurde für die NaI-Detektoren 2, 3 und 4 die ursprüngliche Energiekalibrierung durch eine Energiekalibrierung vom jeweiligen Tage ersetzt. Für den NaI-Detektor 5 wurde die Drift nicht korrigiert, da alle Peaks eindeutig zugeordnet werden konnten.

Für die Bestimmung der Peakflächen wurde für den Germaniumdetektor eine Analysesequenz mit folgenden Einstellungen erstellt:

Peaksuche: 2. Ableitung von Kanal 10 bis Kanal 4096
Signifikanzschwelle 2
Toleranz 1,5 keV

Peakfläche: Kanal 1 bis 4096
Kontinuum: 4 Kanäle
Kontinuum-Funktion: Step
95 % Signifikanz-Test
Benutze feste Tail-Parameter
ROIs anzeigen
Verwerfe Peaks mit Fläche ≤ 0
ROI Grenzbestimmung: Max. Anz. FWHMs zwischen Peaks: 5,00
Max. Anz. FWHMs für linke Grenze: 2,00
Max. Anz. FWHMs für rechte Grenze: 2,00

Für die Bestimmung der Peakflächen wurde für die NaI-Detektoren eine Analysensequenz mit bibliotheksgestützter Auswertung (Gamma-M) und folgenden Einstellungen erstellt:

Peaksuche: 2. Ableitung von Kanal 10 bis Kanal 1024
Nuklidbibliothek: Aerogamma.nlb
Energietoleranz 1,5 keV
Korrektur für Verstärkerdrift
Unbekannte Peaks suchen
Mehr: Fenstereinstellungen: Fläche: 1,5
Interferenz: 2,5
Überlagerung: 0,3
Korrektur für Verstärkung: Max Anz. Iter. Schritte: 10
Konvergenzkriterium: 0,005
Verwerfungskriterium anhand des Peak/UG-Verh.:
Varianz: 1
Untergrund: 1
Anz. Unterg. Terme: 2

Verwerfungskriterium anhand der NWG:

Multiplikator: 2,5

Konstante: 3

Peakfläche: Kanal 1 bis 1024

Korrektur für Verstärkerdrift

ROIs anzeigen

Mehr: Fenstereinstellungen: Fläche: 1,5

Interferenz: 2,5

Überlagerung: 0,3

Korrektur für Verstärkung: Max Anz. Iter. Schritte: 10

Konvergenzkriterium: 0,005

Verwerfungskriterium anhand des Peak/UG-Verh.:

Varianz: 1

Untergrund: 1

Anz. Unterg. Terme: 2

Verwerfungskriterium anhand der NWG:

Multiplikator: 2,5

Konstante: 3

Die Einstellungen unter „Mehr“ erfolgten wie im Handbuch für Genie 2000 beschrieben.

4.4.2 Berechnung der Ausbeute und Abschätzung der Unsicherheit

Mit der aus den Spektren gewonnenen Nettozählrate $R_{n,E,\theta,\varphi}$ des jeweiligen Energiefensters wird über folgende Formel aus der DIN 25462 die Detektorausbeute berechnet.

$$\eta_{E,\theta,\varphi} = 4\pi \cdot r^2 \frac{R_{n,E,\theta,\varphi}}{A_K p_E}$$

Dabei ist r der Abstand des Detektormittelpunktes vom Kalibrierstrahler, A_K die Aktivität des Kalibrierstrahlers und p_E die Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit pro Zerfall. Die Entfernung des Kalibrierstrahlers vom Nullpunkt war immer 300 cm. Daraus

ergeben sich Abstände der NaI-Detektoren vom Kalibrierstrahler von 2,5 m bis 3,5 m, des Germaniumdetektors, der weiter hinten am Hubschrauber befestigt ist, von 2,0 m bis 4,0 m. Die in die Auswertung einfließenden Größen sind mit Unsicherheiten behaftet. In diesem Kapitel werden diese Unsicherheiten und ihr Einfluss auf das Gesamtergebnis abgeschätzt, wobei es sich ohne weitere Angaben um die 1- σ -Unsicherheit handelt.

Die Unsicherheit bei der Bestimmung der Positionen der Detektoren im Hubschrauber, des Hubschraubers beim Hochhängen und der Strahlenquellen wurde folgendermaßen abgeschätzt. Die Entfernung der Gehäuse der NaI-Detektoren zum Mittelpunkt zwischen den vier Gehäusen, der auch der Ursprung des Koordinatensystems ist, konnte recht genau vermessen werden, so dass dafür eine Unsicherheit von 1 cm angesetzt wurde. Die Position im Hubschrauber war für die ganze Woche dann unverändert. Hier ist noch zu erwähnen, dass der Hubschrauber in einer Position befestigt wurde, bei der die Kufen waagrecht standen. Dies entspricht nach Angaben der Bundespolizei auch ungefähr der Position im Flug bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h. In dieser Position wurde der Winkel, in dem der Fußboden des Hubschraubers von vorne nach hinten leicht abfällt, zu $3,3^\circ$ ausgemessen. Dieser Versatz wurde bei der Position der Detektoren ebenfalls berücksichtigt. Der Durchstoßpunkt vom Koordinatenursprung O senkrecht nach unten bei aufgehängtem Detektor wurde mittels einer Schnittzeichnung bestimmt, da er nicht direkt ausgemessen werden konnte. Hier ist auch mit einer Unsicherheit von 1 cm zu rechnen. Der Hubschrauber selbst wurde jeden Abend am Boden abgesetzt und am nächsten Tag wieder hoch gezogen und verzurrt. Die Plastikplane, auf der die Messpunkte aufgetragen waren, wurde dann wieder unter dem festgelegten Punkt gezogen und die Höhe neu vermessen. Mit Hilfe eines Lotes wurde an zwei Punkten bestimmt, ob die Plane parallel zur Symmetrieachse des Hubschraubers lag. Eine Unsicherheit von geschätzt ca. 2 cm in jede Richtung resultiert aus der Positionierung der Plane. Ein weiterer Einfluss auf die Messposition kommt von der genauen Befestigung und Ausrichtung der Strahlenquellen in ihrer Halterung. Die beiden zylinderförmigen Strahler befanden sich zusammen in einem Schaumstoffblock und zeigten mit ihrer flachen Seite zum Ursprung. Je näher die Messpunkte am Boden lagen, desto besser konnten die Strahler positioniert werden, für weiter vom Boden entfernte Punkte dürfte die Abweichung trotz Verwendung des Lotes größer sein. Für die Abweichung wurde eine Unsicherheit von 3 cm angesetzt. Daraus ergibt sich eine Gesamtunsi-

cherheit für die Positionierung von ca. 4 cm. Die Unsicherheit der Effizienz bei einer Entfernung von im Mittel 300 cm ist bei einer Abweichung von 4 cm in Richtung des Radius ungefähr 3 %, die Winkel können eine Abweichung von ca. $0,7^\circ$ haben. Dafür stimmt dann die Effizienz, aber sie wird einem leicht verschobenen Punkt zugeordnet. Es werden die 3 % Unsicherheit auch dafür angenommen.

Ein weiterer Effekt kommt aus der nicht isotropen Abstrahlcharakteristik der beiden zylinderförmigen Strahler. Da sie bei der Messung nicht zum Mittelpunkt der Detektoren, sondern auf den Ursprung des verwendeten Koordinatensystems ausgerichtet waren, treten Winkel zwischen der Verbindung Kalibrierstrahler–Detektormittelpunkt und Kalibrierstrahler–Koordinatenursprung beim Germaniumdetektor, der asymmetrisch liegt, bis zu 19° und bei den NaI-Detektoren bis zu 13° auf. Eine Abschätzung ergab eine mögliche leichte Reduzierung des Photonenflusses durch den schrägen Durchtritt durch die Strahlerhülle. Es wurde eine Unsicherheit von 2 % für diesen Effekt abgeschätzt. Im Prinzip könnte dieser Effekt gemessen und korrigiert werden, aber auch dann ist nicht sichergestellt, dass die Strahler bei der Messung genau ausgerichtet waren und es muss eine Unsicherheit angenommen werden.

Die Kalibrierung ist für das Gesamtsystem Hubschrauber–Detektoren zu erstellen. Die Abschirmwirkung der Luft wird bei der Berechnung der Geometriefaktoren berücksichtigt und deshalb aus den Kalibrierfaktoren herausgerechnet. Für eine Luftschicht der Dicke 300 cm, wie sie bei den Kalibriermessungen zwischen Nullpunkt und Strahler vorlag, ergibt sich eine Abschwächung der Photonen mit einer Energie von 662 keV bzw. 1332 keV auf 97,3 % bzw. 98,0 %. Die ermittelten Kalibrierfaktoren wurden dementsprechend durch 0,973 bzw. 0,980 geteilt. Die Unsicherheiten auf Grund der tatsächlichen Entfernungen zwischen radioaktivem Strahler und Detektor und der Strukturen des Hubschraubers, deren Dicke von der Luftschicht abgezogen werden müsste, wurden zu ca. 1 % abgeschätzt.

Die Impulssummen in den Cs- und Co-Peaks lagen meist über ca. $1E4$ und stiegen bis auf über $1E6$ bei günstigen Geometrien. Aufgrund des hohen Untergrundes bei den Messungen mit den NaI-Detektoren wurde dafür eine statistische Unsicherheit von 10 % angesetzt.

Die Messzeit kann im Vergleich zu obigen Größen viel genauer bestimmt werden, Temperatur- und Druckschwankungen spielen eine untergeordnete Rolle und werden nicht berücksichtigt, genauso wenig wie Unsicherheiten der Emissionswahrscheinlichkeit und Halbwertszeit der Strahler sowie wie oben dargelegt der Aktivitäten der Strahler.

Insgesamt ergibt sich damit eine Unsicherheit pro Messpunkt, die auf Grund der genaueren Auswertung für den Germaniumdetektor kleiner ist als für die NaI-Detektoren. Für die Unsicherheit der Messung einer Boden- oder Luftkontamination kommen weitere Beiträge dazu. Einerseits mitteln sich Unsicherheiten bei der Integration über die Verteilung der Kontamination heraus, andererseits ist auch die Interpolation der Ausbeuten zwischen den Messpunkten mit Unsicherheiten behaftet. Dabei hängt von der jeweiligen Verteilungsfunktion der Kontamination ab, welche Messpunkte relevant sind. Die Unsicherheiten auf Grund der Interpolation und der Kalibrierung insgesamt werden im Kapitel 6.3 abgeschätzt.

4.4.3 Darstellung der Ergebnisse

Es liegen für jeden der fünf Detektoren Ausbeuten für den leeren, halb vollen und vollen Tank vor und dies jeweils für eine Cs-137- und zwei Co-60-Linien. Davon werden die 662-keV-Linie des Cs-137 und die 1332-keV-Linie des Co-60 verwendet. Dies ergibt 30 Ausbeutewerte pro Messpunkt. Auf Grund der Annahme einer Achsensymmetrie des Hubschraubers wurden die Quellen nur auf der rechten Seite des Hubschraubers, in Flugrichtung gesehen, positioniert. Für die Betrachtung, welche Effizienz eine Positionierung der Quelle auf der linken Seite eines NaI-Detektors hervorruft, wurden die Messpunkte des jeweils rechts oder links neben dem betrachteten Detektor liegenden Detektors achsensymmetrisch gespiegelt und die dafür erhaltenen Ausbeuten für die entsprechende Position der Quelle auf der linken Seite verwendet. Als Beispiel wurden, um die Ausbeuten für den Detektor 2 für eine Position der Quelle links vom Hubschrauber zu erhalten, die Ausbeuten für die entsprechenden Messpunkte des Detektors 3 verwendet. Im Anhang 3 sind eine Betrachtung zur Achsensymmetrie des Hubschraubers und eine Korrektur für einige Messpunkte beschrieben.

Bezüglich der Ausbeuten für die Messpositionen 1 bis 66 ergab sich Folgendes:

Beim Detektor 1 (Germaniumdetektor) ist die Abhängigkeit der Tankfüllung auf die Ausbeute gering, da er sich ca. einen Meter hinter den Haupttanks befindet.

Beim Detektor 2 (NaI-Detektor) liegen die Ausbeuten erwartungsgemäß so, dass mit vollem Tank die niedrigsten Werte und für halb vollen und leeren Tank jeweils höhere Ausbeuten auftreten. Der Tankeinfluss ist insgesamt nicht sehr groß, weil der Detektor 2 über dem Zusatztank liegt, dessen Inhalt üblicherweise nicht bei den Messflügen verwendet wird und der auch bei der Kalibrierung immer gefüllt war. Die geringe Abhängigkeit vom Tankfüllstand gilt auch für den Detektor 3 (NaI).

Bei den Detektoren 4 und 5 (NaI) ist der Tankeinfluss groß, weil sie direkt über dem Haupttank liegen.

Alle Ausbeutewerte auch die gespiegelten und korrigierten sind in den Tabellen A1.3 bis A1.7 im Anhang 1.3 aufgeführt. Dabei sind die Winkel angegeben, die sich jeweils vom Mittelpunkt des Detektors in Richtung Messpunkt ergeben. Die Nummer des gespiegelten Messpunktes ist dabei immer die Nummer des ursprünglichen Messpunktes plus Hundert.

Die Ausbeuten für die einzelnen Detektoren mit den Messpunkten für die 662-keV-Linie sind grafisch dargestellt in den Abbildungen A2.4 bis A2.8 im Anhang 2.5. In den Abbildungen A2.9 bis A2.11 sind die Ausbeuten für die Summe der vier NaI-Detektoren für die Tankfüllstände „voll“, „halb“ und „leer“ für die 662-keV-Linie und in der Abbildung A2.12 für den Tankfüllstand „leer“ für die 1332-keV-Linie dargestellt.

Die einfachste und beste Methode den Tankfüllstand zu korrigieren ist, die Tankfüllstände zu Beginn und zum Ende eines Messfluges zu dokumentieren und eine zeitlich gleichmäßige Abnahme der Tankfüllung anzunehmen. Die Ausbeuten können dann für die jeweiligen Tankfüllstände interpoliert werden.

5 Zusammenführung von Geometriefaktoren und Kalibrierung

Bisher sind die Berechnung der Geometriefaktoren und die Durchführung der Detektorkalibrierung unabhängig voneinander behandelt worden. In die Formel

$$A = \frac{R_{n,E}}{\varepsilon_{E,V} \cdot p_E}$$

aus Kapitel 3.1 zur Bestimmung der Gesamtaktivität A unter Verwendung der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{E,V} = \eta_{0,E} \cdot w_{E,V} \cdot G_{E,V}$

mit

$$w_{E,V} \cdot G_{E,V} = \frac{1}{A} \int_t \int_V a(\vec{q}) \cdot \frac{\exp\left(-\int_{r(t)} \mu(E, \theta, \varphi, r) dr\right)}{r^2(t)} \cdot k(E, \theta, \varphi) d^3\vec{q} dt$$

geht die Kalibrierung in Form des Produktes $\eta_{0,E} k(E, \theta, \varphi)$ ein, was nun zusätzlich zu den Termen des reinen Geometriefaktors im Integranden berücksichtigt wird.

5.1 Validierung der Integration

Um sicherzustellen, dass die Kalibrierdaten programmiertechnisch korrekt in die Integration eingehen, wurde der theoretisch nachweisbare Photonenfluss für den Fall eines im Zentrum einer kontaminierten Halbkugel sitzenden Helikopters simuliert (Abbildung 31). Diese Testgeometrie hat den Vorteil, dass der differentielle Photonenfluss $\partial^2 \Phi(E) / (\partial \theta \cdot \partial \varphi)$ vor dem Helikopter konstant ist und alleine die Kalibrierung die Winkelverteilung bestimmt. Das Cockpit des Helikopters ($\varphi = 0^\circ$) wurde nach rechts entlang der positiven x-Achse orientiert. Die erkennbaren Strukturen stimmen qualitativ mit den Darstellungen der Kalibrierdaten aus Anhang 2.5 überein. Die korrekte Zuordnung der rechten und linken Seite wurde durch künstliche Modifikation einzelner Kalibriermessungen überprüft. Die Änderungen waren auf der korrekten Seite sichtbar.

Zur quantitativen Kontrolle wurden Quasi-Punktquellen, d. h. Flächenquellen von 1 mm^2 an exemplarischen Kalibrierpositionen mit den Aktivitäten der Kalibrierpräparate für einzelne Detektoren simuliert. Die hierbei errechneten Peakflächen stimmen mit den Messungen überein, geringe Abweichungen in der Größenordnung von

0,1 % sind auf die Annahme eines konstanten Kalibrierabstandes von 3 m bei der Korrektur der Luftabsorption zurückzuführen.

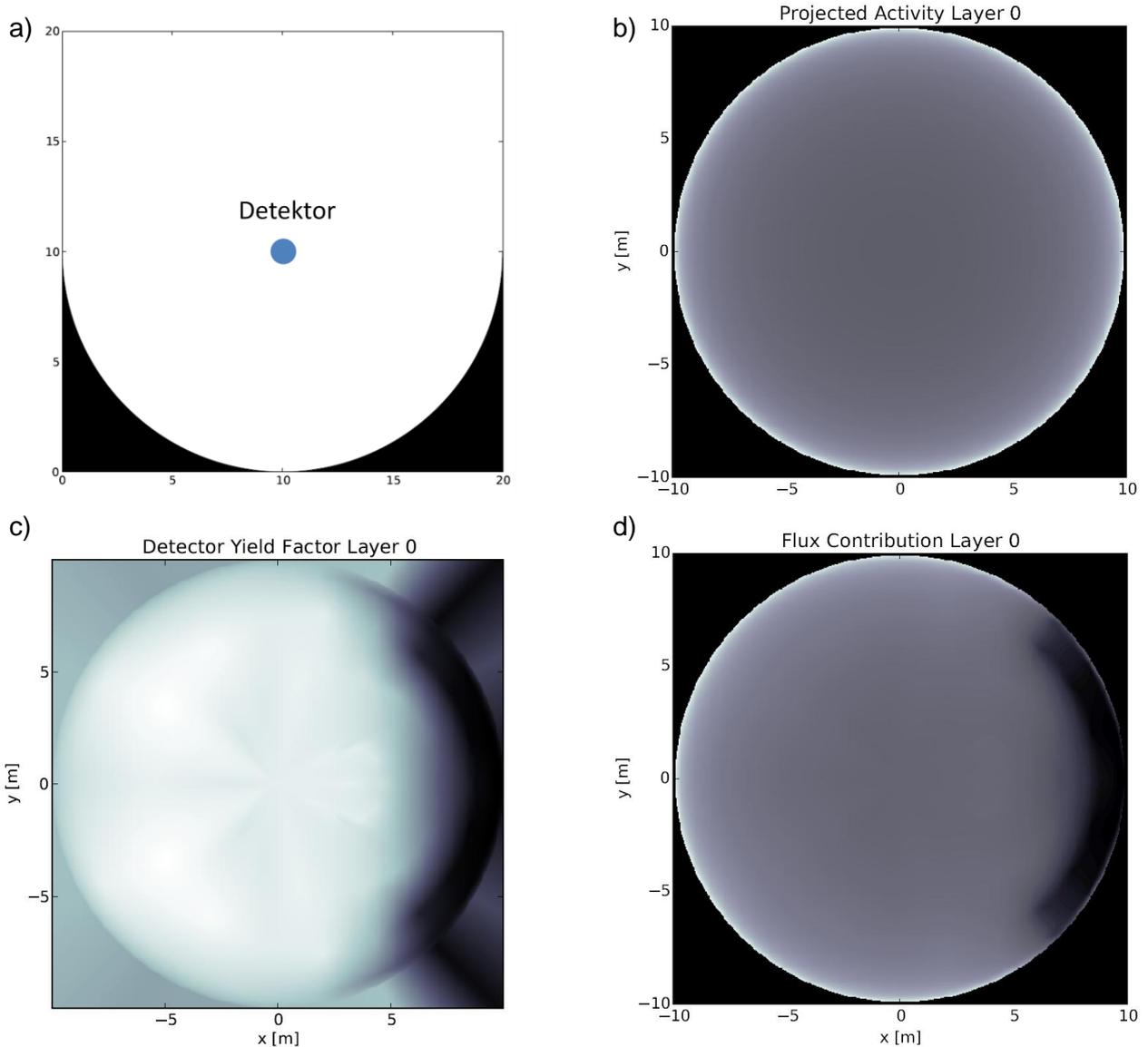


Abbildung 31:

a) Schnitt durch die simulierte Geometrie einer kontaminierten Kugelhalbschale. Der Detektor sitzt im Zentrum.

b) Aktivitätsverteilung aus der Ansicht von oben. Der helle Rand ist ein Effekt der Projektion.

c) Differentielle Detektorausbeute in Projektion auf die Geländeoberfläche für den Ge-Detektor bei 662 keV. Der dunkle Bereich entsteht durch die Abschirmung in Richtung Cockpit.

d) Differentieller Photonenfluss im Detektor als Projektion auf die Geländeoberfläche. Aufgrund des über den Raumwinkel konstanten differentiellen Photonenflusses bei der Kugelschale ergibt sich hier die Überlagerung der Abbildungen b) und c).

5.2 Unterschiede zum Geometriefaktor

Wird bei der Integration des Photonenflusses die Kalibrierung berücksichtigt, so sind Auswirkungen auf die Resultate der in Kapitel 3.4 durchgeführten Variation von Einflussparametern zu erwarten. Im Folgenden werden exemplarisch die Resultate für drei Szenarien dargestellt. Es werden die Ergebnisse für die Peakflächen des Ge-Detektors und der Summe der NaI-Detektoren mit dem reinen Geometriefaktor verglichen. Zur Vereinfachung der grafischen Interpretation sind die Resultate in den Abbildungen stets auf die Höhe von 100 m normiert, in den Wertetabellen werden jedoch die korrekten Einheiten verwendet. Die Kalibrierdaten wurden für die Energie von 1000 keV aus den Messungen bei halbvollem Tank exponentiell interpoliert, um mit Kapitel 3.4 direkt vergleichbare Resultate zu erhalten.

5.2.1 Ausgedehnte kontaminierte Ebene

Für die kontaminierte Ebene mit unendlich weit ausgedehnter Oberflächenkontamination von 1 Bq/m^2 bei einem hypothetischen Nuklid mit einer Gammalinie bei 1000 keV und 100 % Emissionswahrscheinlichkeit lassen sich bei Variation der Detektorhöhe folgende Werte berechnen:

Detektorhöhe [m]	Ge [ips]	NaI [ips]	Geo.-Faktor
1	1,25E-03	7,09E-02	2,15E+00
2	1,07E-03	5,93E-02	1,81E+00
5	8,23E-04	4,43E-02	1,36E+00
10	6,43E-04	3,34E-02	1,03E+00
20	4,67E-04	2,33E-02	7,23E-01
50	2,54E-04	1,18E-02	3,66E-01
100	1,22E-04	5,42E-03	1,65E-01
200	3,78E-05	1,60E-03	4,77E-02
500	1,99E-06	8,13E-05	2,32E-03

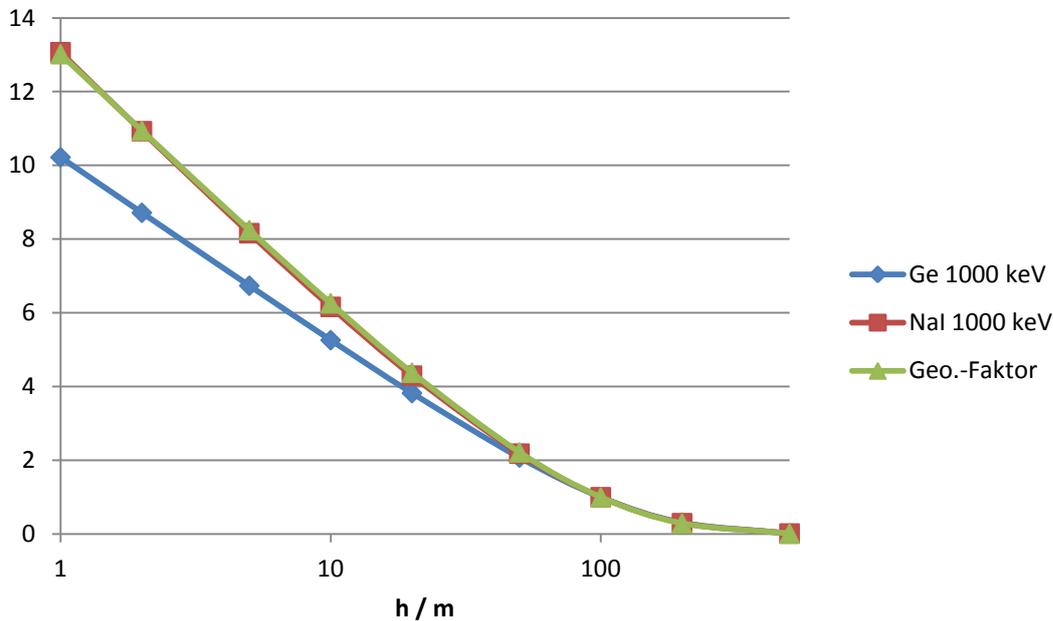


Abbildung 32: Relative Peakflächen bzw. Geometriefaktor für Oberflächenkontamination einer ungeneigten Ebene in Abhängigkeit von der Flughöhe.

Aus Abbildung 32 ist ersichtlich, dass die Abhängigkeit der Peakfläche von der Höhe des Detektors bzw. Helikopters für die NaI-Detektoren praktisch proportional zum reinen Geometriefaktor verläuft, was auf die fast homogenen Kalibrierdaten für den unteren Detektorhalbraum zurückzuführen ist (vgl. Abb. A2.9 – A2.12). Für den Ge-Detektor weichen die Resultate für Flughöhen unterhalb von 50 m vom Geometriefaktor deswegen ab, weil (aufgrund des $1/r^2$ -Faktors im Integral) bei geringerem Abstand zum Boden zunehmend Photonen aus größeren Polarwinkeln θ den Detektor erreichen und der ab etwa $\theta = 45^\circ$ stärker abgeschirmte Bereich in Richtung Cockpit ($\varphi = 0^\circ$) bedeutsam wird (vgl. Abb. A2.8).

5.2.2 Geneigte kontaminierte Ebene

Für die kontaminierte, um 20° geneigte Ebene, wieder mit unendlich weit ausgedehnter Oberflächenkontamination von 1 Bq/m^2 bei einem hypothetischen Nuklid mit einer Gammalinie bei 1000 keV und 100 % Emissionswahrscheinlichkeit ergeben sich bei Variation der Detektorhöhe die folgenden Werte:

Detektor- höhe [m]	Ge [ips]	NaI [ips]	Geo.-Faktor
1	1,37E-03	7,55E-02	2,18E+00
2	1,16E-03	6,30E-02	1,84E+00
5	8,73E-04	4,69E-02	1,39E+00
10	6,67E-04	3,53E-02	1,06E+00
20	4,71E-04	2,45E-02	7,50E-01
50	2,45E-04	1,23E-02	3,87E-01
100	1,16E-04	5,67E-03	1,80E-01
200	3,64E-05	1,73E-03	5,47E-02
500	2,20E-06	9,92E-05	3,08E-03

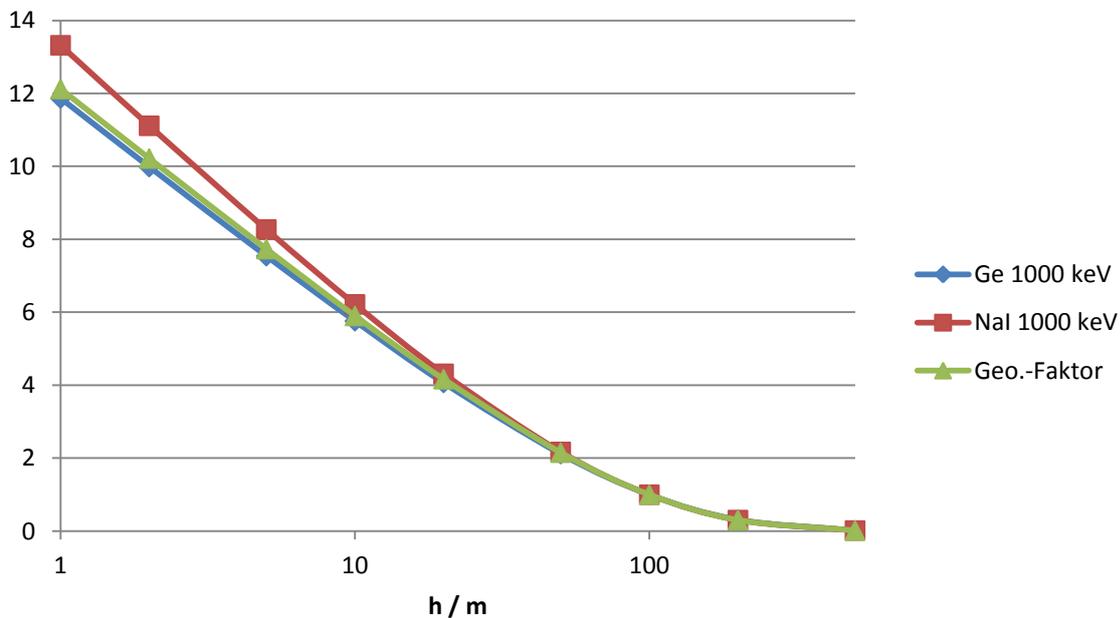


Abbildung 33: Relative Peakflächen bzw. Geometriefaktor für Oberflächenkontamination einer um 20° geneigten Ebene in Abhängigkeit von der Flughöhe.

In diesem Fall passt der Verlauf des reinen Geometriefaktors als Funktion der Detektorhöhe besser zu den Werten des Ge-Detektors (Abbildung 33), da bei geringen Flughöhen auch Photonen aus Polarwinkeln θ des oberen Detektorhalbraums zum gesamten detektierbaren Gammafluss beitragen und die NaI-Detektoren nach oben (insbesondere bei $\varphi = \pm 90^\circ$) eine höhere Nachweiswahrscheinlichkeit als nach unten haben (vgl. Abb. A2.9 – A2.12).

5.2.3 Luftkontamination

Für das kontaminierte Luftvolumen wurde eine Aktivität von 1 Bq/m^3 bei einem hypothetischen Nuklid mit einer Gammalinie bei 1000 keV und 100% Emissionswahrscheinlichkeit unterstellt, wobei nun der Detektor einen festen Abstand von 100 m zum horizontalen Boden hat und dafür die Höhe der kontaminierten Luftschicht variiert wird. Wie aus den bisherigen Resultaten zu erwarten ist, verhalten sich beide Detektoren für geringe Kontaminationshöhen analog zum Geometriefaktor (Abbildung 34). Die Kurvenverläufe spalten sich auf, sobald die Kontamination beginnt, auch den oberen Detektorhalbraum einzunehmen, für den der Ge-Detektor eine geringere, die Summe der NaI-Detektoren jedoch eine höhere integrale Nachweiswahrscheinlichkeit als für den unteren Halbraum haben.

Kont.-höhe [m]	Ge [ips]	NaI [ips]	Geo.-Faktor [kg/m ²]
10	1,57E-03	7,00E-02	2,14E+00
20	3,38E-03	1,51E-01	4,61E+00
50	1,07E-02	4,85E-01	1,49E+01
100	3,96E-02	1,98E+00	6,14E+01
200	6,96E-02	4,39E+00	1,23E+02
500	7,59E-02	5,03E+00	1,39E+02
1000	7,62E-02	5,06E+00	1,39E+02

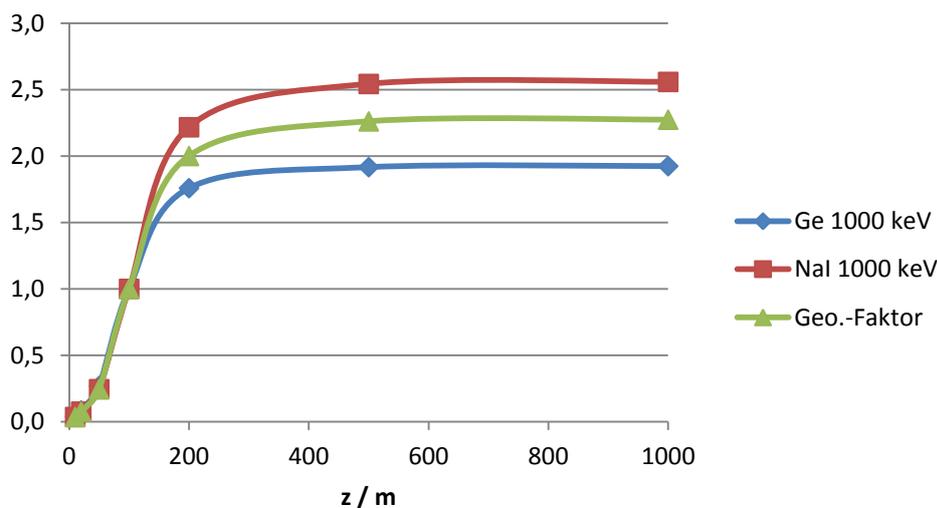


Abbildung 34: Relative Peakflächen bzw. Geometriefaktor für Luftkontamination in Abhängigkeit von der Höhe der kontaminierten Luftschicht.

6 Messflüge

6.1 Durchführung der Messflüge

Aus gut nachvollziehbaren Messflügen mit dem Hubschrauber können Messdaten gewonnen werden, mit denen die Kalibrierfaktoren verifiziert und die Unsicherheiten einzelner Einflussfaktoren genauer abgeschätzt werden können. Zur Abschätzung der Unsicherheit ist es günstig, wenn sich möglichst nur der gewünschte Einflussfaktor ändert. Deswegen wurden an zwei Tagen, dem 14.10 und dem 29.11.2013, zum großen Teil „Schwebflüge“ über einem Punkt in verschiedenen Flughöhen durchgeführt.

Bei allen Szenarien wurden die Flughöhen und von Hand die Tankfüllung zu bestimmten Zeiten erfasst. Die Temperatur betrug am 14.10.2013 ca. 15 °C, die Luftfeuchte ca. 75 %, am 29.11.2013 waren die Werte ca. 3 °C und ca. 90 %. Die Orographie ist von untergeordneter Bedeutung, da das beflogene Gebiet auf dem Gelände der Bundespolizei-Fliegerstaffel in Oberschleißheim eben ist (ca. 490 m Meereshöhe).

Es wurden am ersten Tag die bei den Kalibrierungen des Hubschraubers benutzten Quellen verwendet, am zweiten Tag dann um eine Größenordnung stärkere Quellen.

Nuklid	Bezeichnung	Verwendet am	Aktivität in Bq
Co-60	AZ162	14.10.2013	6,06E6
Cs-137	AV382	14.10.2013	4,83E7
Co-60	AV141	29.11.2013	3,99E7
Co-60	AZ166	29.11.2013	2,64E7
Cs-137	AV142	29.11.2013	5,45E8

Tabelle 6: Aktivität der verwendeten Strahlenquellen.

Die Schwebflüge erfolgten zum größten Teil über einer Wiese in Höhen zwischen 30 m und 140 m. Auf Grund des Gewichts des Mess-Equipments können statt der möglichen Betankung des Hubschraubers mit 460 kg Kerosin nur ca. 300 kg in den Haupttank gefüllt werden. Bei einem Flug wurde auch der Inhalt der Zusatz tanks

teilweise verbraucht. Die Tankfüllung bei den Messflügen und weitere Details sind im Anhang 1.4 angegeben.

Bei den Messungen mit Quellen wurden diese direkt unter dem Hubschrauber platziert. Einzelne Messungen wurden mit seitlich versetzten Quellen durchgeführt, wobei der Hubschrauber teilweise am Boden stand, teilweise auch in einer Höhe von ca. 30 m schwebte.

6.2 Vergleich Messung und Berechnung

Die gemessenen Peakflächen wurden mit Hilfe des im Kapitel 3 beschriebenen selbst entwickelten Programmes nachgerechnet. Dabei wurden die Eingangsparameter wie Flughöhe, Tankfüllung, Messzeit und Aktivität der Quelle verwendet. Der Untergrund an Cs-137 auf der Wiese wurde mangels genauerer Daten aus In-situ- oder Probenmessungen folgendermaßen gebildet. Aus zehn Messungen (vgl. Tabelle A1.9 im Anhang 1.5) wurde für eine homogene Cs-137-Kontamination von angenommenen 10 cm Boden die Aktivitäten im Boden berechnet, die die gemessenen Peakflächen erzeugen würden. Als Mittelwert aus diesen hypothetischen Aktivitäten ergab sich eine Kontamination von ca. 12 kBq/m^2 oder 120 kBq/m^3 für 0,1 m Bodentiefe, die bei allen folgenden Berechnungen als Untergrundaktivität verwendet wurde, wenn es sich um den Vergleich mit der Messung einer Cs-137-Quelle handelte. Die Unsicherheit der Messwerte wurde zu ca. 12 % abgeschätzt.

Die Auswertung der Spektren, deren Messzeit zwischen einer und zehn Minuten lag, erfolgte wie die der Spektren der Kalibriermessungen mit der Gammaskpektrometrie-Software Genie 2000, Version 3.2.2 der Fa. Canberra. Es wurden die Linien von Cs-137 bei 662 keV und von Co-60 bei 1332 keV analysiert. Für Cs-137 ergab sich auf Grund der Nähe der Linie bei 662 keV zu der Linie bei 609 keV des Bi-214 das Erfordernis bei den NaI-Detektoren mit Hilfe der Funktion „Interaktiver Peak Fit“ die zwei Linien zu analysieren. Beispiele dafür sind in Anhang 2.6 dargestellt. Aus den Berichten zu den interaktiven Peak Fits wurden für die jeweiligen Linien die Gesamtimpulse und deren Unsicherheit entnommen.

Die Zählraten wurden für die vier NaI-Detektoren zusammengefasst und mit den berechneten Ergebnissen verglichen. Dasselbe wurde mit den Ergebnissen für den

Ge-Detektor durchgeführt, sofern dafür Spektren vorhanden waren. Dies war nur bei den Messflügen am 29.11.2013 der Fall.

Der Vergleich der Messung mit der Berechnung ergab Folgendes:

Für die Schwebflüge am 14.10.2013 über einer Cs-137-Quelle in drei verschiedenen Höhen ergaben sich Abweichungen zwischen der Rechnung und Messung zwischen -19% und $+1\%$, also eine gute Übereinstimmung (Anhang 1.5, Tabelle A1.10).

Für die Messungen mit seitlich neben dem Hubschrauber liegenden Strahlenquellen (Cs-137 und Co-60) ergaben sich für die jeweils in der Richtung der Quelle liegenden zwei zusammengefassten Detektoren Abweichungen zwischen -27% und $+25\%$ (im Mittel -2%). Für die auf der gegenüberliegenden Seite liegenden Detektoren sind die Abweichungen auf Grund der zusätzlichen dazwischen liegenden Strukturen größer und liegen zwischen -33% und $+83\%$ (im Mittel $+19\%$). Fasst man alle vier Detektoren zusammen, werden die Abweichungen kleiner insbesondere für die Entfernung von 5 m (Anhang 1.5, Tabelle A1.11 und A1.12).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die gemessenen Peakflächen der Spektren aus den vier NaI-Detektoren eine gute Übereinstimmung mit den berechneten aufweisen und die Abweichungen im Bereich von ca. 20 % liegen.

Für die Messungen am zweiten Tag (29.11.2013) ergab sich ein etwas anderes Bild. Wie aus der Tabelle A1.9 (Anhang 1.5) ersichtlich ist, ergab die Auswertung der Cs-137-Untergrundlinie (662 keV) bei den Messungen mit der Co-60-Quelle (131129C bis F) hypothetische Kontaminationswerte im Boden, die konsistent mit denen des ersten Messtages sind. Die Analyse der Linien bei 1332 keV für Co-60 und bei 662 keV für Cs-137, wenn dieser Strahler verwendet wurde, ergab jedoch gemessene Zählraten, die im Mittel bei ca. der Hälfte der berechneten Werte lagen. Das Verhältnis der Zählraten schwankte gering, meist unter 10 % Standardabweichung (vgl. Anhang 1.5, Tabelle A1.13). Dieser Effekt tritt nur für einen senkrecht unter dem Hubschrauber liegenden Punktstrahler auf. Mögliche Gründe könnten die Positionierung der Strahlenquellen oder unberücksichtigte Strukturen im Hubschrauber sein.

6.3 Abschätzung der Unsicherheit

Mit Hilfe der Messflüge wurde die Unsicherheit, die sich aus den Einflüssen der Interpolation der Kalibrierfaktoren zwischen den Messpunkten und weiteren Einflüssen ergibt, abgeschätzt. Dazu wurden die im Kapitel 6.2 aufgeführten Berechnungen der Bodenkontamination herangezogen. Die Messungen fanden in verschiedenen Flughöhen und mit verschiedenen Tankfüllungen an derselben Stelle statt. Die Streuung der angenommenen homogenen Kontamination in den ersten 10 cm des Bodens stammt aus der statistischen Schwankung für die Messungen sowie den nicht genauer bekannten Typ-B-Unsicherheiten (z. B. Interpolation, Orografie, Vegetation). Da der Ort der Messung immer derselbe war, stammt wohl der größte Teil der Typ-B-Unsicherheit aus den Interpolationen der Kalibrierfaktoren. Es ergab sich bei der Betrachtung, dass für die zehn Werte (vgl. Anhang 1.5, Tabelle A1.9) die Unsicherheit aus der statistischen Schwankung bei ca. 4 % liegt, die fehlende Typ-B-Unsicherheit, um auf die Gesamtunsicherheit der 10 Messungen zu kommen, bei ca. 12 % für die Summe der vier NaI-Detektoren. Für den Ge-Detektor ergab sich, allerdings aus nur vier Messungen ein Wert der Typ-B-Unsicherheit von ca. 5 %. Für die Berechnungen im Kapitel 8.2 wurde eine Geometrieunsicherheit für die Summe aller vier NaI-Detektoren von 10 % und für einen einzelnen NaI-Detektor von 20 % angesetzt, für den Ge-Detektor eine Geometrieunsicherheit von 5 %.

7 Nachweisgrenze und Optimierung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit einer Messeinrichtung hängt von den vorhandenen Messunsicherheiten ab. In der Strahlenmesstechnik gibt es zwei verschiedene Arten von Messunsicherheiten. Zum einen die Typ-A-Unsicherheiten, welche ihre Ursache in der statistischen Natur des radioaktiven Zerfalls haben, und zum anderen die Typ-B-Unsicherheiten, welche z. B. die vorhandenen Mess- und Positionierungsgenauigkeiten widerspiegeln. So ist die Fluktuation der Zählrate bei geringer Bodenaktivität oder starker Abschirmung durch großen Abstand oder starke Absorption beispielsweise eine Unsicherheit vom Typ A, wohingegen die Unbestimmtheit der Helikopterposition, der Geländeform oder der Vegetationsstärke, aber auch die Interpolation der Kalibrierung über die begrenzte Anzahl von Stützstellen Unsicherheiten vom Typ B sind. Um am Ende mit der sogenannten Nachweisgrenze einen einzigen Wert zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit der Aerogammaspektrometrie zu erhalten, müssen alle einzelnen Unsicherheiten mathematisch zusammengefasst werden.

Im folgenden Kapitel werden daher im ersten Schritt zunächst die allgemeinen Definitionen der sogenannten charakteristischen Grenzen nach DIN ISO 11929 [DIN 11b] und die konkreten Berechnungsformeln für die Auswertung von Gammaspektren einschließlich deren Herleitung angegeben. Hierbei dient, wie bereits geschildert, insbesondere die Nachweisgrenze als Maß für die minimale hinreichend präzise messbare Aktivität. Im zweiten Schritt, der Optimierung der Leistungsfähigkeit der Aerogammaspektrometrie, gilt es daher, die Nachweisgrenze zu minimieren. Im konkreten Fall demonstrieren wir dies für das Beispiel der Messzeitoptimierung beim Überflug eines punktförmigen radioaktiven Strahlers auf ebenem Gelände.

7.1 Ermittlung der charakteristischen Grenzen nach DIN ISO 11929

Da sich die Formeln der Erkennungs- und Nachweisgrenze aus DIN 25462 [DIN 00] nur auf die reinen Nettozählraten ohne Berücksichtigung des Kalibrierfaktors beziehen und eine einfache multiplikative Umrechnung nicht dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entspricht, werden diese im Folgenden nicht verwendet. Sie ergeben sich jedoch wieder für den Grenzfall dominierender Typ-A-Unsicherheiten und somit vernachlässigbarer Unsicherheitsbeiträge vom Typ B.

Es werden im Folgenden die Definitionen der charakteristischen Grenzen nach DIN ISO 11929 kurz dargestellt und die mathematischen Formeln direkt für das Auswertungsmodell der Aerogammaspektrometrie angegeben. Einzelheiten können der Norm DIN ISO 11929 [DIN 11b] insbesondere den Kapiteln 5 und 6 sowie dem Anhang F entnommen werden. Der eigentlich normative Anhang C der DIN ISO 11929 zur Entfaltung von Gammaskpektren wird von uns (wie auch von den marktführenden gammaspektrometrischen Softwareprogrammen) nicht berücksichtigt.

7.1.1 Die Messgröße und deren Standardunsicherheit

Die Messgröße A in der Aerogammaspektrometrie ist die Aktivität am Boden, welche entweder absolut in Bq, flächenbezogen in Bq/m², volumenbezogen in Bq/m³ oder massenbezogen in Bq/kg angegeben wird. Hierzu wird die Nettozählrate $R_{n,E}$ der Gammalinie bei der Energie E mit einem entsprechenden Kalibrierfaktor $F_{E,V}$ multipliziert. Es gilt

$$A = R_{n,E} \cdot F_{E,V} = \frac{R_{n,E}}{\varepsilon_{E,V} \cdot p_E}$$

mit der Emissionswahrscheinlichkeit p_E des betrachteten Nuklids und der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{E,V}$ für das Verteilungsmodell V wie in Kapitel 3.1 beschrieben. Die Nettozählrate $R_{n,E}$ ergibt sich aus der Differenz von Bruttozählrate $R_{g,E}$ und Untergrundzählrate $R_{b,E}$, wobei der Untergrund über die beiden Bereiche der Breite $\Delta E/2$ unmittelbar rechts und links des Peaks der Breite ΔE bei der Energie E abgeschätzt wird und somit $R_{b,E} \approx R_{b,E,r} + R_{b,E,l} = R_{b,E,rl}$ gilt, siehe Abbildung 35. Außerdem wird eine Nulleffektimpulsrate $R_{0,E}$ vor der Multiplikation mit dem Kalibrierfaktor subtrahiert, welche beispielsweise bei einer Kontamination des Detektors oder Helikopters auftreten kann. Für die Bestimmung des Nulleffektes in einer Vormessung wird im Folgenden eine so große Messzeit angenommen, dass dessen zählstatistische Unsicherheit vernachlässigt werden kann. Soll zusätzlich noch eine Aktivitätsvorbelastung A_0 am Boden aus einer separaten Messung abgezogen werden (z. B. Tschernobyl-Fallout bei Cs-137), so ergibt sich folgendes Modell der Auswertung:

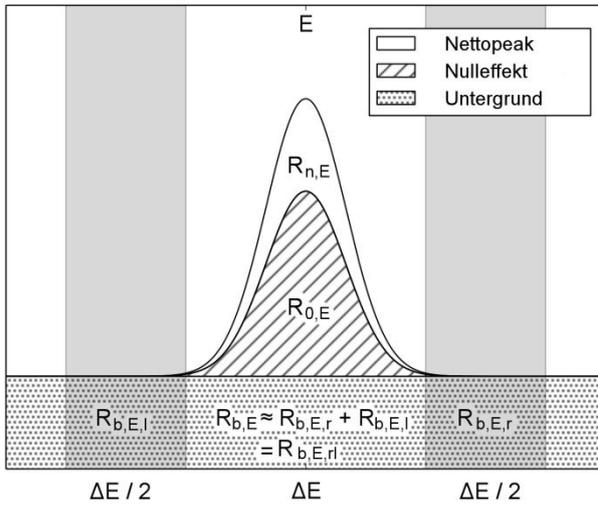


Abbildung 35: Peak bei der Gammaenergie E mit der Breite ΔE . Die Nettozählrate beträgt $R_{n,E}$ nach Abzug eines Nulleffektpeaks mit Zählrate $R_{0,E}$ und des Untergrundes $R_{b,E}$, welcher aus den Bereichen der Breiten $\Delta E/2$ rechts und links des Peaks abgeschätzt wurde.

$$A = (R_{g,E} - R_{b,E,rl} - R_{0,E}) \cdot F_{E,V} - A_0$$

Die Standardunsicherheit $u(A)$ der Messgröße A berechnet sich gemäß Gauß'scher Fehlerfortpflanzung, d. h. unter Annahme normalverteilter Größen, aus den Einzelunsicherheiten $u(x)$ der Eingangsgrößen x gemäß

$$\begin{aligned} u^2(A) &= \left(\frac{\partial A}{\partial R_{g,E}} \right)^2 u^2(R_{g,E}) + \left(\frac{\partial A}{\partial R_{b,E,rl}} \right)^2 u^2(R_{b,E,rl}) + \left(\frac{\partial A}{\partial R_{0,E}} \right)^2 u^2(R_{0,E}) + \\ &\quad \left(\frac{\partial A}{\partial F_{E,V}} \right)^2 u^2(F_{E,V}) + \left(\frac{\partial A}{\partial A_0} \right)^2 u^2(A_0) \\ &= \frac{F_{E,V}^2}{T} (R_{g,E} + R_{b,E,rl} + R_{0,E}) + (A + A_0)^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(F_{E,V}) + u^2(A_0) \end{aligned}$$

Im letzten Schritt wurde verwendet, dass die Zählraten R der Poissonverteilung unterliegen und somit $u^2(R) = R/T$ mit der Messzeit T gilt. Außerdem muss noch berücksichtigt werden, dass bei einem vorgegebenen Wert für die Messgröße A aus dem Modell der Auswertung implizit $R_{g,E} = (A + A_0) / F_{E,V} + R_{b,E,rl} + R_{0,E}$ erfüllt ist. Die Annahme einer Normalverteilung für die Größe $F_{E,V}$ ist gerechtfertigt, wenn die Unsicherheit der umgekehrt proportionalen Größe, der Nachweiswahrscheinlichkeit $\varepsilon_{E,V}$,

hinreichend klein ist. Damit ergibt sich mit $u_{\text{rel}}(F_{E,V}) = u(F_{E,V}) / F_{E,V}$ für die Standardunsicherheit $u(A)$ als Funktion der Messgröße A

$$u^2(A) = \frac{F_{E,V}^2}{T} \left(\frac{A + A_0}{F_{E,V}} + 2R_{b,E,rl} + 2R_{0,E} \right) + (A + A_0)^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(F_{E,V}) + u^2(A_0)$$

7.1.2 Berechnung der Erkennungsgrenze

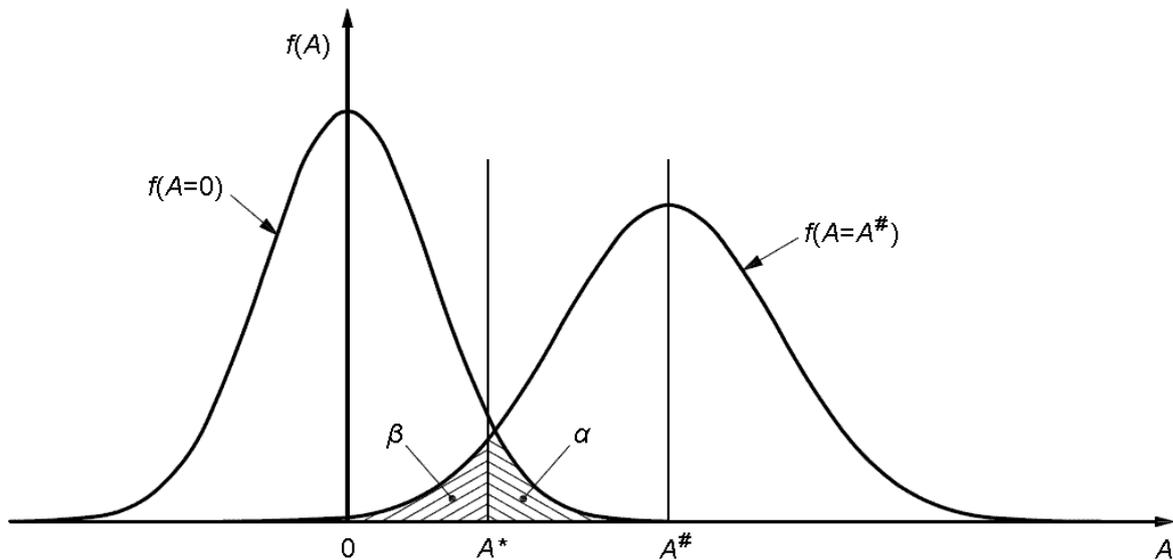


Abbildung 36: Definition von Erkennungsgrenze A^* mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α für den Fehler erster Art und Nachweisgrenze $A^\#$ mit der Irrtumswahrscheinlichkeit β für den Fehler zweiter Art (aus [DIN 11b], modifiziert).

Die Erkennungsgrenze A^* ist der Messwert der Aktivität A , bei dessen Überschreitung das Vorhandensein einer Aktivität gefolgert wird. Für den Fall, dass das Messergebnis A größer ist als die Erkennungsgrenze A^* , ist die Erkennungsgrenze so festgelegt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass der wahre Wert der Aktivität Null ist, kleiner oder gleich einem vorgegebenen Wert α ist, vgl. Abbildung 36. Die Unsicherheit für den Fall $A = 0$ muss um das Quantil der Normalverteilung $k_{1-\alpha}$ erweitert werden und es gilt somit

$$A^* = k_{1-\alpha} u(A=0) = k_{1-\alpha} \sqrt{\frac{F_{E,V}^2}{T} \left(\frac{A_0}{F_{E,V}} + 2R_{b,E,rl} + 2R_{0,E} \right) + A_0^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(F_{E,V}) + u^2(A_0)}$$

7.1.3 Berechnung der Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze $A^\#$ ist der kleinste wahre Wert für die Messgröße A , für den die Entscheidung, ob eine Aktivität nach dem Kriterium aus Abschnitt 7.1.2 vorhanden ist, mit einer Wahrscheinlichkeit β zu einem falschen Resultat führt. Die Nachweisgrenze ist damit die Größe, die unterhalb eines vorgegebenen Richtwerts liegen muss, um diesen ausreichend sicher nachzuweisen. Oder umgekehrt formuliert: wahre Aktivitäten unterhalb der Nachweisgrenze führen mit einer Wahrscheinlichkeit größer als β zu einem Messwert unterhalb der Erkennungsgrenze (vgl. Abbildung 36). In diesem Vorhaben wird für einige Beispiele die Nachweisgrenze berechnet, um das Vorgehen darzustellen, auch wenn in der Aerogammaspektrometrie keine Richtwerte existieren und daher auch mit der Erkennungsgrenze gearbeitet werden könnte. Zur Berechnung der Nachweisgrenze muss die Unsicherheit an der Nachweisgrenze $u(A = A^\#)$ um das Quantil der Normalverteilung $k_{1-\beta}$ erweitert werden:

$$A^\# = A^* + k_{1-\beta} u(A = A^\#) = k_{1-\alpha} u(A=0) + k_{1-\beta} u(A = A^\#)$$

Da die Nachweisgrenze sowohl von $A^\#$ als auch von $u(A = A^\#)$ abhängt, ergibt sich hiermit folgende implizite Gleichung für die Nachweisgrenze:

$$\begin{aligned} A^\# &= A^* + k_{1-\beta} u(A = A^\#) \\ &= k_{1-\alpha} u(A=0) + k_{1-\beta} \sqrt{\frac{F_{E,V}^2}{T} \left(\frac{A^\# + A_0}{F_{E,V}} + 2R_{b,E,rl} + 2R_{0,E} \right) + (A^\# + A_0)^2 \cdot u_{\text{rel}}^2(F_{E,V}) + u^2(A_0)} \end{aligned}$$

Da üblicherweise $\alpha = \beta$ gewählt wird und somit $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k$ gesetzt werden kann, ergibt die Auflösung der Gleichung nach der Nachweisgrenze $A^\#$

$$A^\# = \frac{2k \cdot u(A=0) + k^2 \left(\frac{F_{E,V}}{T} + 2A_0 u_{\text{rel}}^2(F_{E,V}) \right)}{1 - k^2 u_{\text{rel}}^2(F_{E,V})}$$

Die Formel für die Nachweisgrenze liefert nur für $k_{1-\beta} \cdot u_{\text{rel}}(F_{E,\nu}) < 1$ ein physikalisch sinnvolles Resultat.

7.1.4 Bester Schätzwert und Vertrauensgrenzen

Werden die Werte der Eingangsgrößen in das Modell der Auswertung für die Aktivität eingesetzt, kann sich durch statistische Fluktuationen, insbesondere bei nicht vorhandener oder kleiner Aktivität unterhalb der Erkennungsgrenze, ein negatives und damit unphysikalisches Messergebnis ergeben. Dies wird nach [DIN 11b] dadurch vermieden, dass das primäre Messergebnis in den sogenannten besten Schätzwert transformiert wird. Dazu wird von der Normalverteilung, die sich aus dem Messergebnis und dessen Unsicherheit ergibt, der im Negativen liegende Bereich abgeschnitten und die verbleibende Verteilung renormiert (Abbildung 37). Der beste Schätzwert \hat{A} des primären Messergebnisses A ist dann als der Mittelwert der verbleibenden Verteilung definiert. Er berechnet sich über die Formel

$$\hat{A} = A + \frac{u(A) \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{2u^2(A)}\right)}{\omega\sqrt{2\pi}} \quad \text{mit} \quad \omega = \Phi\left(\frac{A}{u(A)}\right)$$

wobei $\Phi(t)$ die kumulative standardisierte Normalverteilung ist, d. h. $\Phi(t) = p$ ergibt durch Umkehrung das Quantil $k_p = t$.

Um den besten Schätzwert herum und ebenfalls stets von positiven Werten sind die Vertrauensbereichsgrenzen definiert, außerhalb derer der wahre Wert der Messgröße mit einer Wahrscheinlichkeit von γ liegt. Diese werden so gewählt, dass oberhalb der oberen Vertrauensbereichsgrenze $A^>$ und unterhalb der unteren Vertrauensbereichsgrenze $A^<$ der abgeschnittenen und renormierten Verteilungsfunktion des primären Messergebnisses jeweils eine Gesamtwahrscheinlichkeit von $\gamma/2$ verbleibt, siehe Abbildung 37. Mit den Quantilen k_p und k_q und der obigen Definition von ω berechnen sich diese gemäß

$$\begin{aligned} A^< &= A - k_p \cdot u(A) \\ A^> &= A + k_q \cdot u(A) \end{aligned} \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} p &= \omega \cdot (1 - \gamma/2) \\ q &= 1 - \omega \cdot \gamma/2 \end{aligned}$$

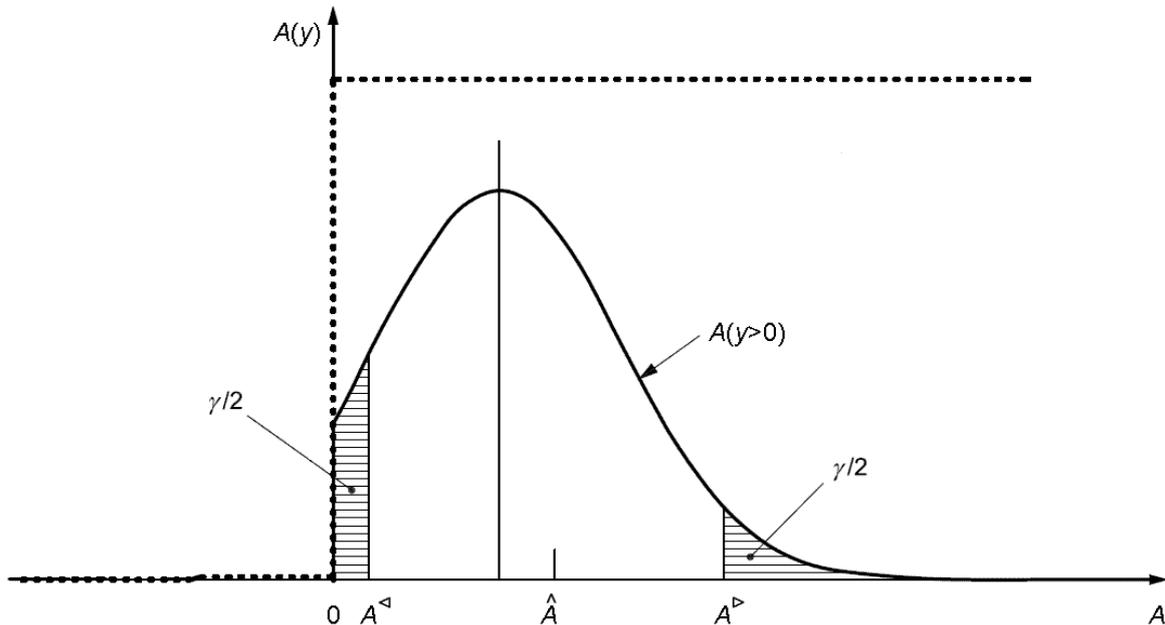


Abbildung 37: Darstellung zur Definition des Besten Schätzers und der Vertrauensbereichsgrenzen (aus DIN ISO 11929, modifiziert).

7.1.5 Beispiel zur Berechnung der charakteristischen Grenzen

Die Formeln aus den vorherigen Abschnitten 7.1.2 bis 7.1.4 wurden in einer Tabellenkalkulation umgesetzt, siehe Tabelle 7. Blau hinterlegt sind die Eingabefelder, rot die Felder mit den Resultaten. Als Beispiel wurde das Summenspektrum der vier NaI-Detektoren von Flug F131014T, Schwebflug in 60 m Höhe über einer Cs-137-Quelle aus Kapitel 6 gewählt. Für den Peakbereich ergab die Auswertung des Spektrums eine Bruttozählrate von 260 Impulsen pro Sekunde bei einer Untergrundzählrate von 182 Impulsen pro Sekunde bei einer Messzeit von 181 Sekunden. Ein Nulleffekt des Detektors musste nicht berücksichtigt werden. Der Kalibrierfaktor wurde für die Höhe von 60 m zu $1,75E+06 \text{ Bq} \cdot \text{s}$ berechnet, die relative Unsicherheit konnte für das Summenspektrum der NaI-Detektoren mit etwa 10 % abgeschätzt werden, vgl. Kapitel 6.3. Die Aktivitätsvorbelastung des Bodens von etwa 120 kBq/m^3 bei einer Eindringtiefe von 10 cm wurde zu einem Punktquellenäquivalent gemäß

$$A_0 = \frac{F_{662\text{keV,Punkt}}}{F_{662\text{keV},10\text{m}}} \cdot A_{662\text{keV},10\text{m}} = \frac{1,75E6 \text{ Bq} \cdot \text{s}}{245 \text{ Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}} \cdot 1,2E05 \frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \cdot 0,1 \text{ m} = 8,60E7 \text{ Bq}$$

umgerechnet. Es wurde außerdem vereinfachend angenommen, dass $F_{662\text{keV},10\text{cm}}$ und $F_{662\text{keV},\text{Punkt}}$ aufgrund der gleichen Helikopterposition und Kalibrierung bei deren Berechnungen vollständig korreliert sind und sich deren Unsicherheiten bei der Bildung des Quotienten damit vollständig aufheben. Die relative Unsicherheit der Vorbelastung konnte in Kapitel 6.2 mit etwa 12 % abgeschätzt werden.

	Größe	Symbol	Einheit	Wert	Abs. Unsicherheit	Typ
Eingangsparameter	Bruttoszählrate	$R_{g,E}$	1/s	260	1,20E+00	A
	Untergrundzählrate	$R_{b,E,r1}$	1/s	182	1,00E+00	A
	Nulleffektzählrate	$R_{0,E}$	1/s	0	0,00E+00	A
	Messzeit	T	s	181		
	Kalibrierfaktor	$F_{E,V}$	Bq·s	1,75E+06	1,75E+05	B
	Aktivitätsvorbelastung	A_0	Bq	8,60E+07	1,00E+07	B
Sicherheit	Irrtumswahrscheinlichkeiten	α, β		0,158		
	Verteilungsquantil	$k, k_{1-\alpha}, k_{1-\beta}$		1,00E+00		
	Irrtumswahrscheinlichkeit	γ		0,316		
	Verteilungsquantil	$k_{1-\gamma/2}$		1,00E+00		
Hilfsgrößen	Unsicherheit ohne Aktivität	$u(A=0)$	Bq	1,35E+07		
	Hilfsgröße für Schätzwert	ω		9,98E-01		
	Hilfsgröße Obergrenze	q		8,42E-01		
	Hilfsgröße Untergrenze	p		8,41E-01		
Resultate	Aktivität	A	Bq	5,05E+07	1,71E+07	A+B
	Schätzwert Aktivität	A^{\wedge}	Bq	5,06E+07	1,70E+07	A+B
	Obergrenze Vertrauensbereich	$A^>$	Bq	6,77E+07		
	Untergrenze Vertrauensbereich	$A^<$	Bq	3,34E+07		
	Erkennungsgrenze	A^*	Bq	1,35E+07		
	Nachweisgrenze	$A^{\#}$	Bq	2,90E+07		

Tabelle 7: Tabellenkalkulationsblatt zur Berechnung der charakteristischen Grenzen nach DIN ISO 11929 mit den Eingangswerten und Resultaten aus dem Summenspektrum der vier NaI-Detektoren von Flug F131014T für eine Cs-137-Quelle mit einer Aktivität von 4,83E07 Bq.

Es ergaben sich damit die in Tabelle 7 dargestellten Resultate auf einem für diese Berechnung vom BfS vorgegebenen Vertrauensniveau von $k = k_{1-\gamma/2} = 1$ bzw. mit den Irrtumswahrscheinlichkeiten $\alpha = \beta = 15,8 \%$ und $\gamma = 31,6 \%$. Eine Berechnung für veränderte Parameter ist mit Hilfe des Tabellenkalkulationsblattes auf einfache Weise möglich. Die Erkennungsgrenze und Nachweisgrenze liegen in diesem Beispiel

mit 13,5 MBq bzw. 29,0 MBq sowohl unter dem Vorbelastungsäquivalent von 86,0 MBq als auch unter der Aktivität des verwendeten Cs-137-Strahlers von 48,3 MBq. Es wurde eine Aktivität des Punktstrahlers von 50,5 MBq als primäres Messergebnis berechnet, der beste Schätzwert ist mit 50,6 MBq hierzu praktisch identisch. Der Vertrauensbereich reicht von 33,4 MBq bis 67,7 MBq und deckt somit in diesem Beispiel die bekannte Strahleraktivität von 48,3 MBq ab.

7.2 Messzeitoptimierung bei der Suche nach radioaktiven Strahlern

Mit dem im vorherigen Abschnitt eingeführten Verfahren zur Bestimmung der Nachweisgrenze können die Parameter der Aerogammamessung unter den jeweiligen Randbedingungen optimiert werden. Insbesondere sind dies die Flughöhe, Flugeschwindigkeit und Flugbahn sowie die Mess- bzw. Integrationszeit. Diese sollen typischerweise so gewählt werden, dass die Nachweisgrenze für den Einsatzzweck möglichst niedrig liegt. Eine derartige Optimierung wird nun für den Fall der Suche nach einem Cs-137-Strahler in einem bereits mit Cs-137 vorbelasteten, ebenen Gebiet ohne signifikante zusätzliche Absorption durchgeführt, da die hierfür notwendigen Eingangsgrößen aus den durchgeführten Testflügen wie eben beschrieben abgeschätzt werden konnten.

Anstatt für den Schwebeflug an einer festen Position wird der Kalibrierfaktor $F_{662 \text{ keV, Punkt}}$ nun für einen sich bewegenden Helikopter berechnet. Es wird angenommen, dass ein Vorbeiflug in konstanter Höhe h mit der Geschwindigkeit v im Abstand d von dem Punktstrahler stattfindet und dabei ein Spektrum mit einer Messzeit von t aufgenommen wird. Ferner wird der typische Fall unterstellt, dass entweder vor oder nach dem Moment der größten Annäherung an den Strahler ein Viertel der Messzeit vergangen ist, vgl. Abbildung 38. Die auf angrenzend verlaufenden Flugbahnen gemessenen Spektren wurden nicht berücksichtigt, da dadurch eine Verbesserung der Detektion eines Punktstrahlers nur für den wenig wahrscheinlichen Fall zu erwarten ist, dass dieser sich in der Mitte zwischen den beiden Flugbahnen befindet.

Die Berechnung wurde für fünf Fälle durchgeführt, für die die Untergrundzählraten $R_{b,662 \text{ keV},t}$ aus den Messflügen bestimmt werden konnten:

- Flug F131014 D in 27 m Höhe bei einem Tankfüllstand von 52 %,
Summenspektrum der 4 NaI- Detektoren, $R_{b,662 \text{ keV},rl} = 198 \text{ s}^{-1}$
- Flug F131014 F in 57 m Höhe bei einem Tankfüllstand von 37 %,
Summenspektrum der 4 NaI- Detektoren, $R_{b,662 \text{ keV},rl} = 164 \text{ s}^{-1}$
- Flug F131014 T in 60 m Höhe bei einem Tankfüllstand von 6 %,
Summenspektrum der 4 NaI- Detektoren, $R_{b,662 \text{ keV},rl} = 182 \text{ s}^{-1}$
- Flug F131014 G in 90 m Höhe bei einem Tankfüllstand von 32 %,
Summenspektrum der 4 NaI- Detektoren, $R_{b,662 \text{ keV},rl} = 141 \text{ s}^{-1}$
- Flug D131129 Q in 30 m Höhe bei einem Tankfüllstand von 15 %,
Spektrum des Ge-Detektors, $R_{b,662 \text{ keV},rl} = 0,7 \text{ s}^{-1}$

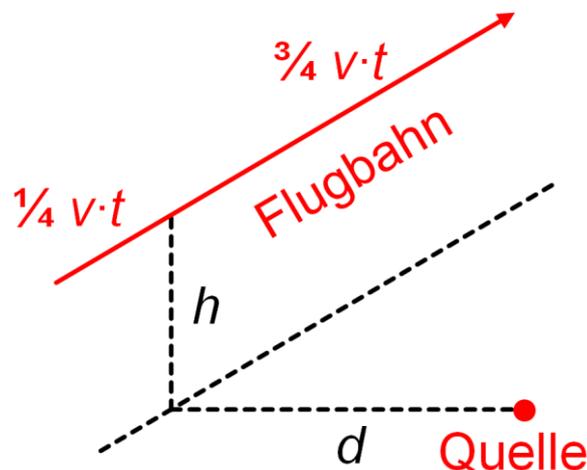


Abbildung 38: Darstellung zur Definition der Flugbahn im Abstand d mit der Flughöhe h beim Vorbeiflug an einer Punktquelle mit der Geschwindigkeit v .

Die Flüge wurden so ausgewählt, dass unterschiedliche Flughöhen, Tankfüllstände und Detektoren abgedeckt werden. Da alle Flüge über ausgedehntem, ebenem Gelände durchgeführt wurden, ist es für die Untergrundabschätzung vernachlässigbar, dass die meisten dieser Flüge reine Schwebflüge waren, der Typ-B-Einfluss von Inhomogenitäten wird über die Unsicherheit der Aktivitätsvorbelastung A_0 abgedeckt.

Für alle Rechnungen wurden ansonsten die Unsicherheiten und Parameter des vorherigen Beispiels unterstellt. Es wurden Messzeiten von 0,5 s bis 10 s und horizontale minimale Abstände zum Punktstrahler von 0 m bis 200 m sowie Fluggeschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h betrachtet. Eine Übersicht der Eingangsgrößen und die tabellarische Angabe der numerischen Resultate befinden sich in Anhang 1.6, im Folgenden werden nur deren grafische Darstellungen diskutiert.

7.2.1 Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 30 Metern Höhe

Die Nachweisgrenzen der vier NaI-Detektoren bei einer mittleren Flughöhe von 27 m sind für Abstände von 25 m bis 200 m in der Abbildung 39 für 50 km/h und Abbildung 40 für 100 km/h grafisch dargestellt. Es zeigte sich, dass bei beiden Geschwindigkeiten für direkten Überflug die optimale Messzeit, d. h. die Messzeit für die minimale Nachweisgrenze, bei ca. 2 s liegt und sich bei einem seitlichen Abstand von 200 m bis hin zu 10 s vergrößert. Für den direkten Überflug führt eine Abweichung von der optimalen Messzeit zu der stärksten relativen Verschlechterung der Nachweisgrenze, wohingegen bei einem Vorbeiflug in größerer Entfernung die Nachweisgrenze um das Minimum herum konstanter bleibt. Zwischen den minimalen Nachweisgrenzen für einen Abstand von 0 m und 200 m besteht aber ein Unterschied von über zwei Größenordnungen.

Abbildung 41 zeigt die Nachweisgrenze für die optimale Messzeit als Funktion des horizontalen Vorbeiflugabstandes für die Geschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h. Der relative Vorteil eines langsamen Fluges ist für den direkten Überflug am größten und liegt dort bei einem Faktor von 1,3 und verringert sich bei 200 m Abstand auf 1,1.

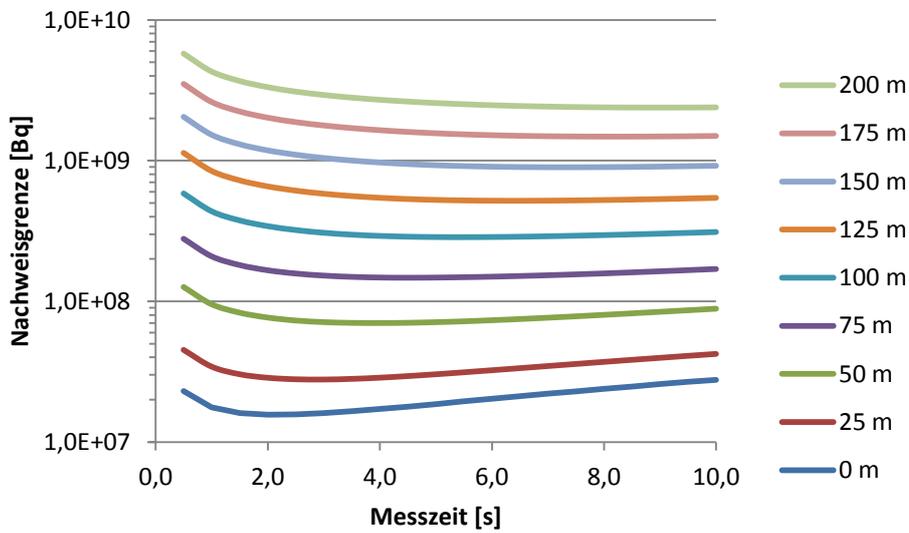


Abbildung 39: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h, einer Flughöhe von 27 m und einer Tankfüllung von 53 %.

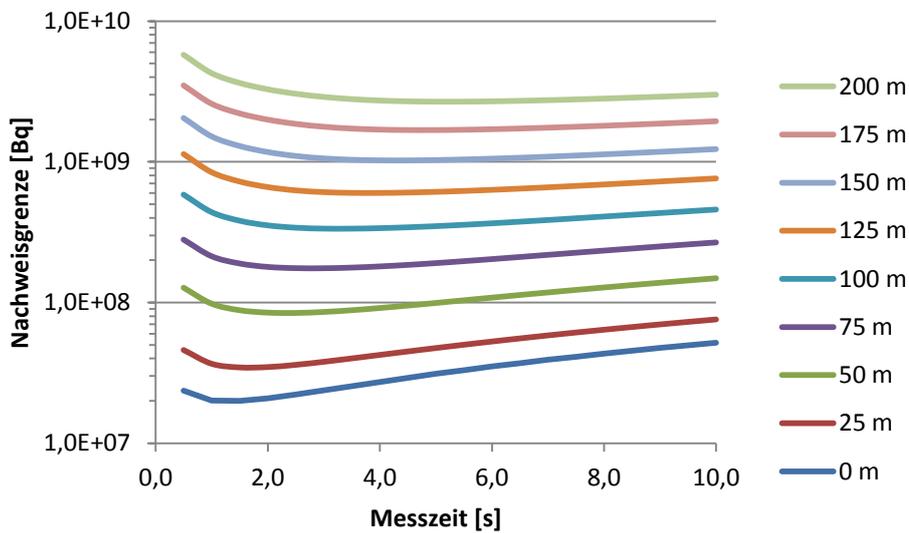


Abbildung 40: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h, einer Flughöhe von 27 m und einer Tankfüllung von 53 %.

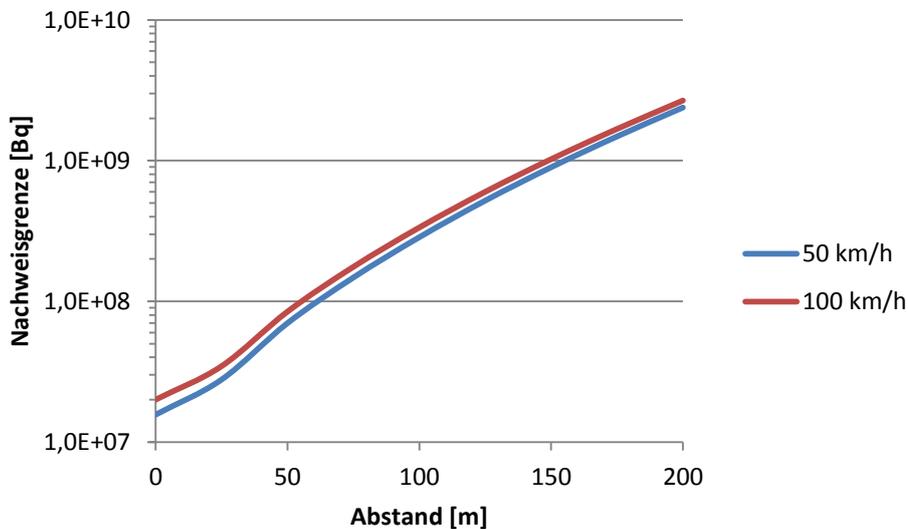


Abbildung 41: Nachweisgrenze bei optimaler Messzeit als Funktion des horizontalen Flugabstandes für eine Flughöhe von 27 m und einem Tankfüllstand von 53 %.

7.2.2 Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 60 Metern Höhe

Für eine mittlere Flughöhe von 57 m bzw. 60 m wurden die Untergrundzählraten für die Tankfüllstände von 37 % bzw. 6 % zur Berechnung der Nachweisgrenze verwendet. Es wurden wieder die Fluggeschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h sowie seitliche Abstände von 0 m bis 200 m betrachtet. Abbildungen 42 bis 45 zeigen die hierfür berechneten Nachweisgrenzen als Funktion der Messzeit. Gegenüber dem Flug in 30 m Höhe hat sich vor allem beim direkten Überflug der Punktquelle mit 50 km/h die optimale Messzeit auf 4 s erhöht. Der unterschiedliche Tankfüllstand hat zusammen mit der gering unterschiedlichen Flughöhe einen Einfluss von etwa 3 % auf die berechneten Nachweisgrenzen.

Abbildungen 46 und 47 zeigen die Nachweisgrenze für die optimale Messzeit als Funktion des horizontalen Vorbeiflugabstandes für die Geschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h, der relative Vorteil eines langsamen Fluges liegt bei direktem Überflug bei einem Faktor von 1,3 und sinkt bei einem Abstand von 200 m geringfügig auf 1,2. Aufgrund der verwendeten logarithmischen Skala sind für die beiden unterschiedlichen Tankfüllstände praktisch keine Unterschiede zu erkennen.

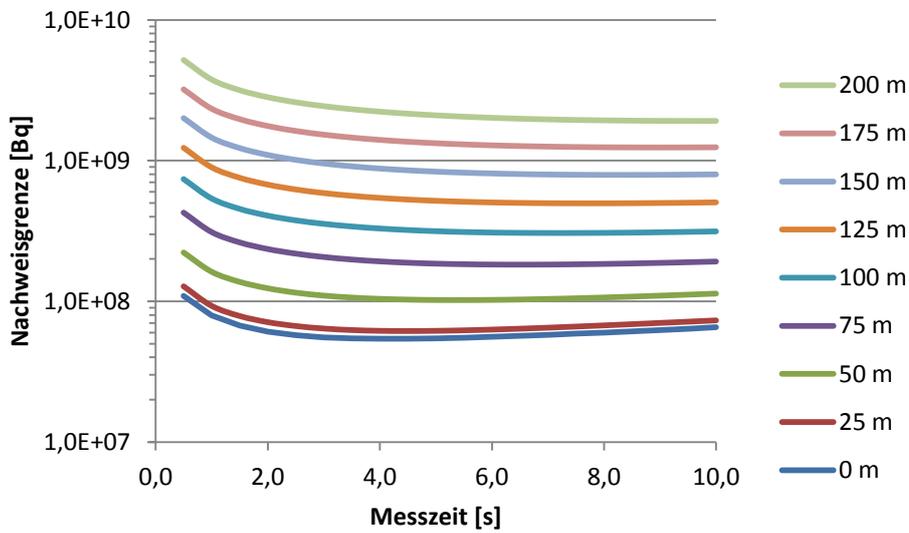


Abbildung 42: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h, einer Flughöhe von 57 m und einer Tankfüllung von 37 %.

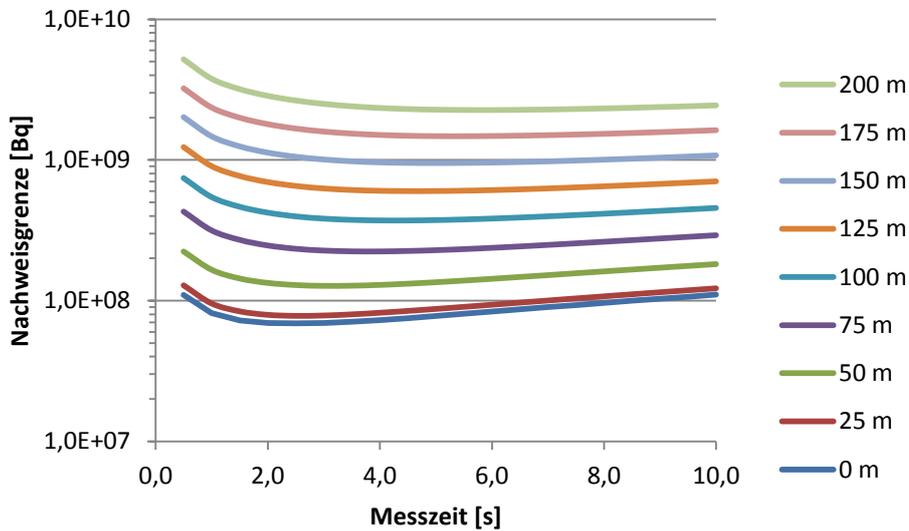


Abbildung 43: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h, einer Flughöhe von 57 m und einer Tankfüllung von 37 %.

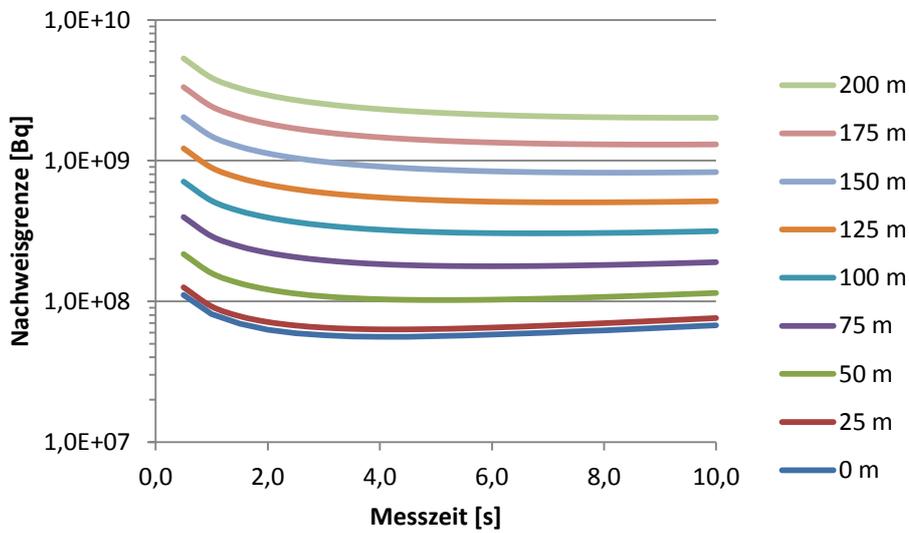


Abbildung 44: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h, einer Flughöhe von 60 m und einer Tankfüllung von 6 %.

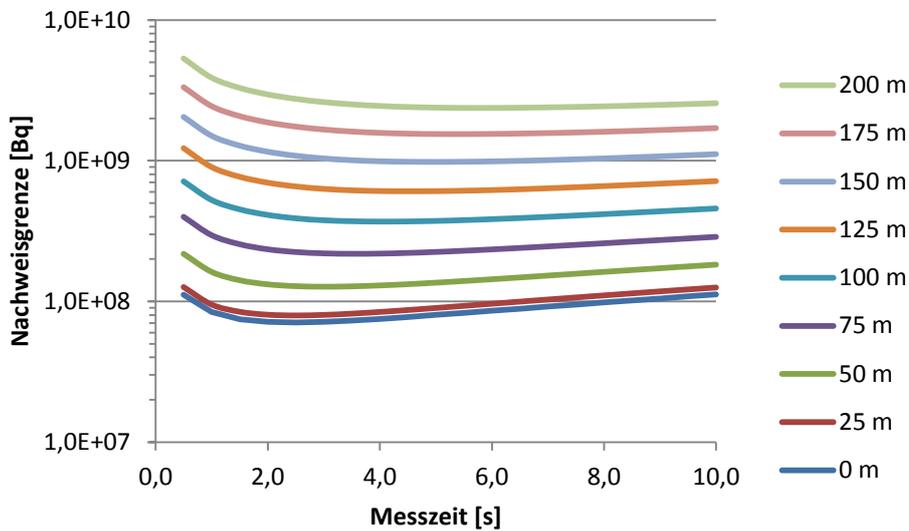


Abbildung 45: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h, einer Flughöhe von 60 m und einer Tankfüllung von 6 %.

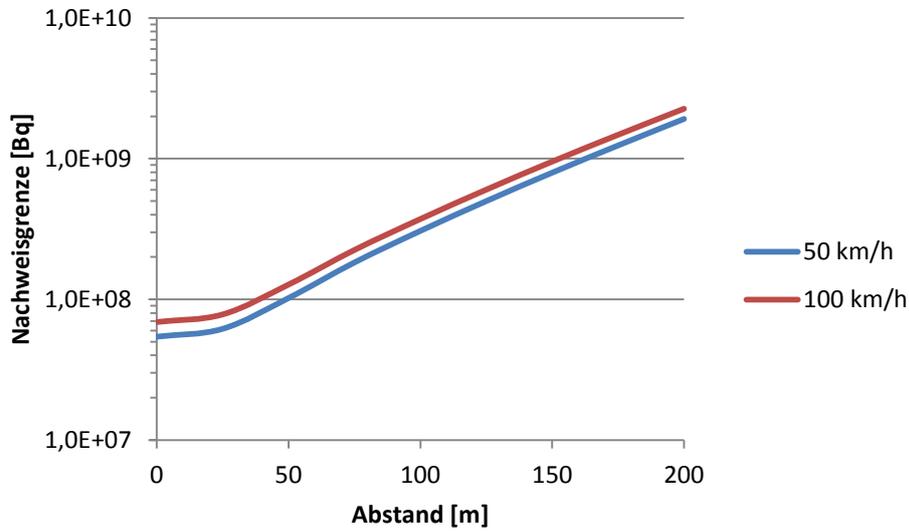


Abbildung 46: Nachweisgrenze bei optimaler Messzeit als Funktion des horizontalen Flugabstandes für eine Flughöhe von 57 m und einem Tankfüllstand von 37 %.

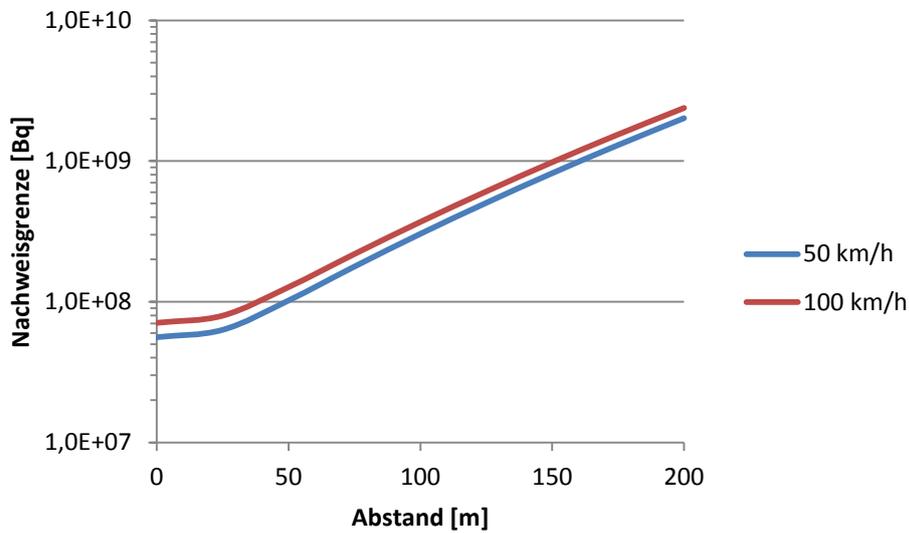


Abbildung 47: Nachweisgrenze bei optimaler Messzeit als Funktion des horizontalen Flugabstandes für eine Flughöhe von 60 m und einem Tankfüllstand von 6 %.

7.2.3 Messung mit den NaI-Detektoren in etwa 90 Metern Höhe

Für die letzte betrachtete Flughöhe von 90 m wurde die Untergrundzählrate für den Tankfüllstand von 32 % zur Berechnung der Nachweisgrenze verwendet. Unverändert wurden die Fluggeschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h sowie seitliche Abstände von 0 m bis 200 m betrachtet. Die Abbildungen 48 und 49 zeigen die hierfür berechneten Nachweisgrenzen als Funktion der Messzeit. Die optimale Messzeit bei direktem Überflug mit 50 km/h hat sich weiter bis auf 7 s erhöht, beim Flug mit 100 km/h liegt das Optimum nun bei 4 s, allerdings ist das Minimum auch weniger stark ausgeprägt und eine Abweichung hiervon hat eine geringere Auswirkung als noch bei geringeren Flughöhen. Die optimale Messzeit für den Vorbeiflug in 200 m Entfernung hat sich gegenüber den niedrigeren Flughöhen nur geringfügig erhöht.

Abbildung 50 zeigt die Nachweisgrenze für die optimale Messzeit als Funktion des horizontalen Vorbeiflugabstandes für die Geschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h, der relative Vorteil eines langsamen Fluges liegt weiterhin bei direktem Überflug bei einem Faktor von 1,3 und sinkt bei einem Abstand von 200 m geringfügig auf 1,2.

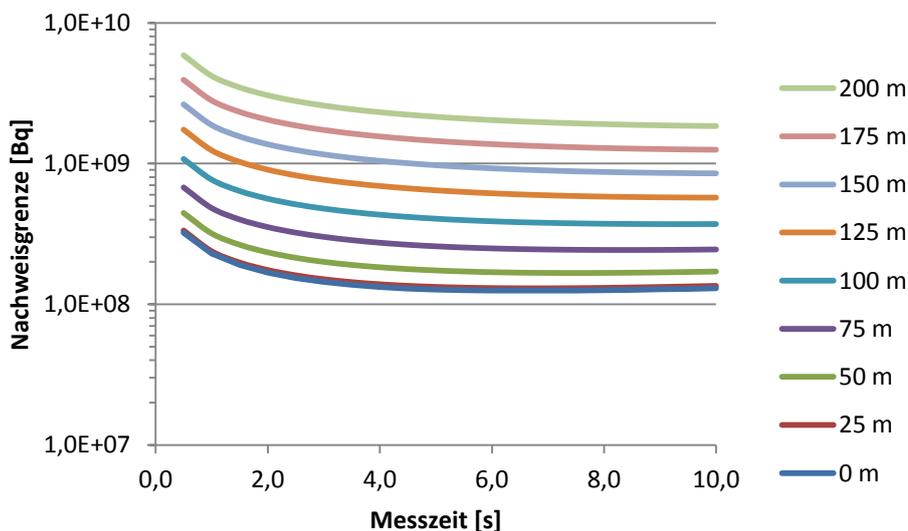


Abbildung 48: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h, einer Flughöhe von 90 m und einer Tankfüllung von 32 %.

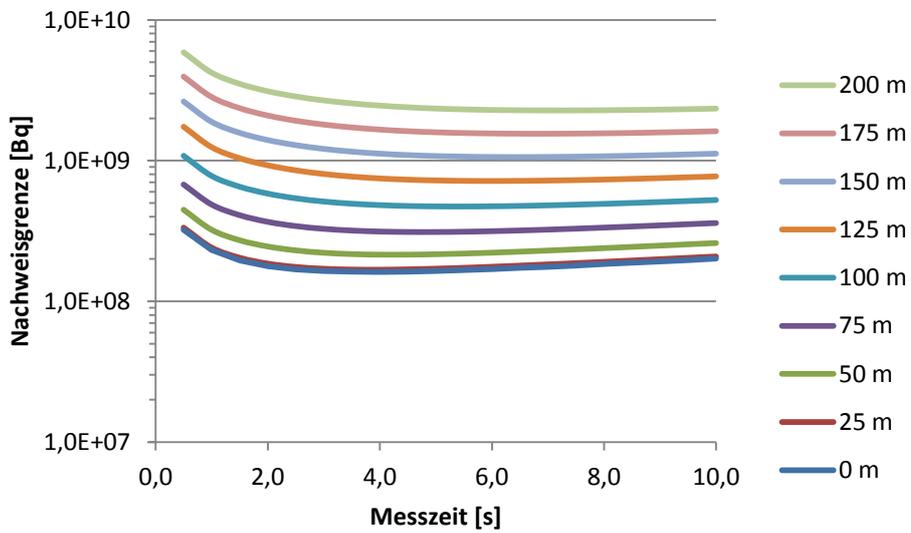


Abbildung 49: Nachweisgrenze als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h, einer Flughöhe von 90 m und einer Tankfüllung von 32 %.

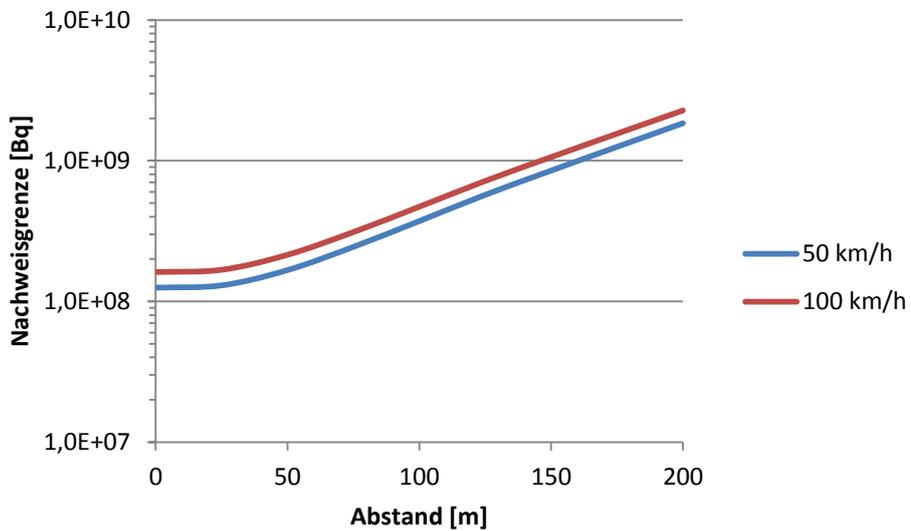


Abbildung 50: Nachweisgrenze bei optimaler Messzeit als Funktion des horizontalen Flugabstandes für eine Flughöhe von 90 m und einem Tankfüllstand von 32 %.

7.2.4 Messung mit dem Ge-Detektor in etwa 30 Metern Höhe

Aufgrund des großen Volumens der NaI-Detektoren ist für diese trotz der deutlich geringeren Energieauflösung eine niedrigere Nachweisgrenze zu erwarten. Dennoch ist es durchaus von Interesse das alleinige Nachweispotential des Germaniumdetektors zu kennen, beispielsweise um durch die Wahl einer von den NaI-Detektoren abweichenden Messzeit auch dessen Messergebnisse zu optimieren. Bei der Berechnung der Nachweisgrenzen ist allerdings zu berücksichtigen, dass aufgrund der geringeren Nachweiswahrscheinlichkeit und der deutlich schmalere Peaks die Untergrundzählrate des Ge-Detektors $R_{b,662 \text{ keV},rl}$ typischerweise bei ca. 1 s^{-1} liegt. Die Rechenmethode der DIN ISO 11929 nähert jedoch bei der Berechnung der Nachweisgrenzen die in Wirklichkeit auftretende Poissonverteilung für die Zählraten durch eine Normalverteilung mit einer Unsicherheit $u^2(R_{b,662 \text{ keV},rl}) = R_{b,662 \text{ keV},rl} / t$ an, was nur für $R_{b,662 \text{ keV},rl} \cdot t$ deutlich größer als 1 (typischerweise mindestens 10) zulässig ist. Bei den üblichen Messzeiten in der Aerogammaspektrometrie von wenigen Sekunden ergibt sich somit eine Unterschätzung der tatsächlichen Nachweisgrenzen durch die über die DIN ISO 11929 ermittelten Werte.

Eine analytische Behandlung dieses Problems ist nach unserer Kenntnis nicht möglich, korrekte numerische Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit ließen sich aber dennoch berechnen, beispielsweise mit der Monte-Carlo-Methode, welche die Eingangsgrößen entsprechend ihrer Verteilungsfunktion zeitaufwändig „auswürfelt“. Um diesen Aufwand nicht betreiben zu müssen, wurde der im Anhang F.1 der DIN ISO 11929 beschriebene Ausweg gewählt, bei nur wenigen Impulsen bei der Berechnung der Unsicherheiten stets einen zusätzlichen Impuls anzunehmen. Für die Untergrundzählrate ist dies der Übergang

$$R_{b,E,rl} \rightarrow R_{b,E,rl} + \frac{1}{t}$$

Nach dieser Ersetzung können die charakteristischen Grenzen weiterhin mit den bisherigen Formeln berechnet werden, die Resultate überschätzen die auftretenden Unsicherheiten jedoch geringfügig, insbesondere für geringe Zählraten. Dies ist jedoch konservativ und kann damit hingenommen werden.

Für den Germaniumdetektor wurde bei einer Flughöhe von 30 m der Untergrund für den Tankfüllstand von 15 % zur Berechnung der Nachweisgrenze verwendet. Wie bei den NaI-Detektoren wurden die Fluggeschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h sowie seitliche Abstände von 0 m bis 200 m betrachtet. Die Abbildungen 51 und 52 zeigen die hierfür berechneten Nachweisgrenzen als Funktion der Messzeit. Die optimale Messzeit bei direktem Überflug mit 50 km/h liegt bei 5 s, beim Flug mit 100 km/h liegt das Optimum bei 3 s, was etwa die doppelte Messzeit im Vergleich zu den NaI-Detektoren im gleichen Szenario ist. Die Nachweisgrenze des Ge-Detektors liegt trotz der um etwa den Faktor 20 geringeren Nachweiswahrscheinlichkeit aufgrund des besseren Signal zu Untergrund Verhältnisses bei etwa dem 2,5- bis 3,5-fachen des NaI-Summenspektrums.

Abbildung 53 zeigt die Nachweisgrenze für die optimale Messzeit als Funktion des horizontalen Vorbeiflugabstandes für die Geschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h, der relative Vorteil eines langsamen Fluges liegt weiterhin bei direktem Überflug bei einem Faktor von 1,3 und sinkt bei einem Abstand von 200 m geringfügig auf 1,2.

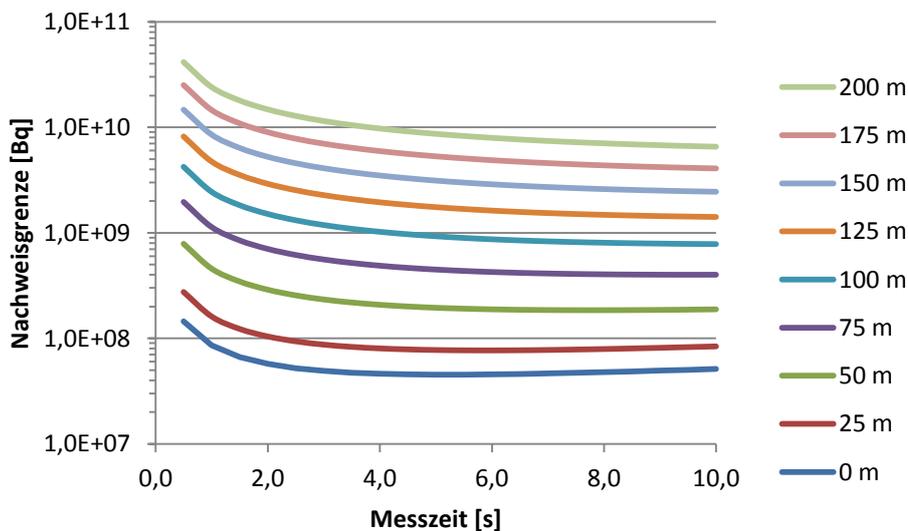


Abbildung 51: Nachweisgrenze des Germaniumdetektors als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h, einer Flughöhe von 30 m und einer Tankfüllung von 15 %.

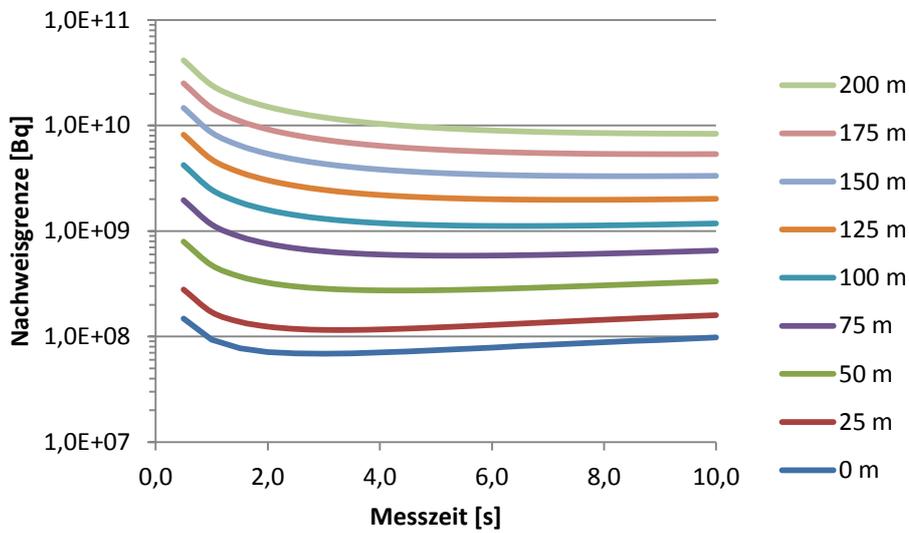


Abbildung 52: Nachweisgrenze des Germaniumdetektors als Funktion der Messzeit für einen Vorbeiflug im Abstand von 0 m bis 200 m, bei einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h, einer Flughöhe von 30 m und einer Tankfüllung von 15 %.

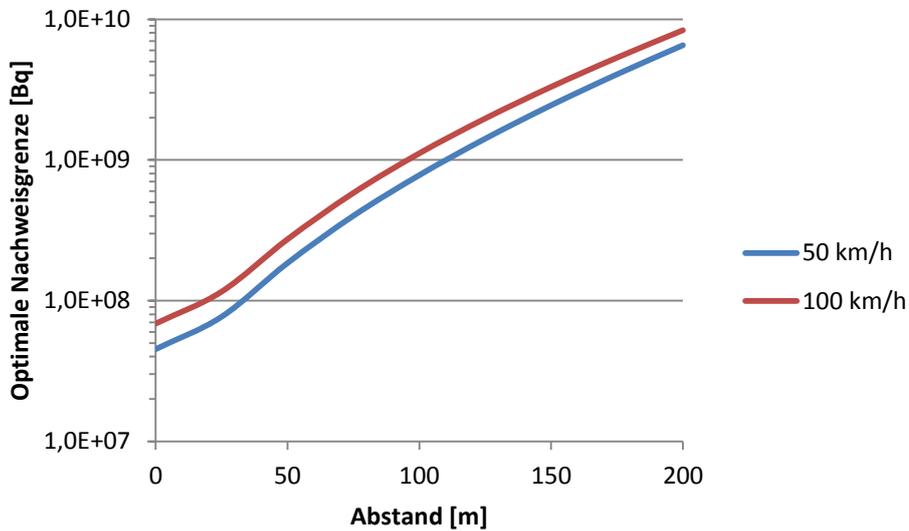


Abbildung 53: Nachweisgrenze des Germaniumdetektors bei optimaler Messzeit als Funktion des horizontalen Flugabstandes für eine Flughöhe von 30 m und einem Tankfüllstand von 32 %.

7.2.5 Optimierung der Flugbahn

Die Nachweisgrenzen der optimalen Messzeit werden nun dazu verwendet, die beste Suchstrategie zum Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle auf ebenem Gelände zu finden. Als optimal wird dabei die Flugbahn angesehen, die die kürzeste Flugzeit erfordert (und nicht beispielsweise den geringsten Kerosinverbrauch). Um eine Flugzeit angeben zu können, wird von einer abzufliegenden Fläche von beispielhaft 50 km² ausgegangen. Es wird angenommen, dass das Gelände streifenweise abgeflogen wird, keine Rückflüge wegen Tankstopps durchgeführt werden müssen und die Teilstrecken beim Bahnwechsel vernachlässigt werden können. Da nach rechts und links gemessen wird, darf der Bahnabstand für eine Nachweisgrenze den doppelten Betrag des Abstandes d bei der Nachweisgrenzenberechnung betragen. Die Flugzeit t_F berechnet sich demnach gemäß der Formel

$$t_F = \frac{50 \text{ km}^2}{2d \cdot v}$$

Rechnet man damit die obigen Kurven für die Nachweisgrenzen bei optimaler Messzeit in eine Flugzeit um, so ergibt sich Abbildung 54. Diese zeigt die erreichbare Nachweisgrenze als Funktion der Flugzeit für die Flughöhen von 30 m, 60 m und 90 m bei den beiden Geschwindigkeiten von 50 km/h und 100 km/h. Es lässt sich aber auch umgekehrt ablesen, welche Nachweisgrenze mit welcher Strategie, d. h. Kombination aus Flughöhe und -geschwindigkeit am schnellsten erreichbar ist, also am weitesten links liegt. Aus den Tabellen A1.13 und A1.14 (Anhang 1.6) und der Abbildung 54 sieht man, dass z. B. eine Aktivität von 3E7 Bq nur mit einem Flug in Höhe von 30 m Höhe bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h nachzuweisen ist, wobei die Flugzeit dann mehr als 20 h betragen würde. Bei einer nachzuweisenden Aktivität von bis zu etwa 6E8 Bq ist der Flug in 30 m Höhe bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h die beste Variante, bis etwa 2E9 Bq der Flug in 60 m Höhe bei 100 km/h und erst danach die Höhe von 90 m bei 100 km/h. Die Unterschiede für die verschiedenen Strategien sind aber so gering, dass es kaum einen Unterschied aufgrund der angesetzten Flughöhe gibt. Dies ist auch anschaulich verständlich, da bei großen Abständen die Strahlung unter ähnlichem Winkel von der Seite auf den Helikopter trifft. Eine Fluggeschwindigkeit von 50 km/h ist nur dann sinnvoll, wenn eine kleine Fläche mit möglichst hoher Nachweiswahrscheinlichkeit nach einem Punktstrahler abgesucht werden soll.

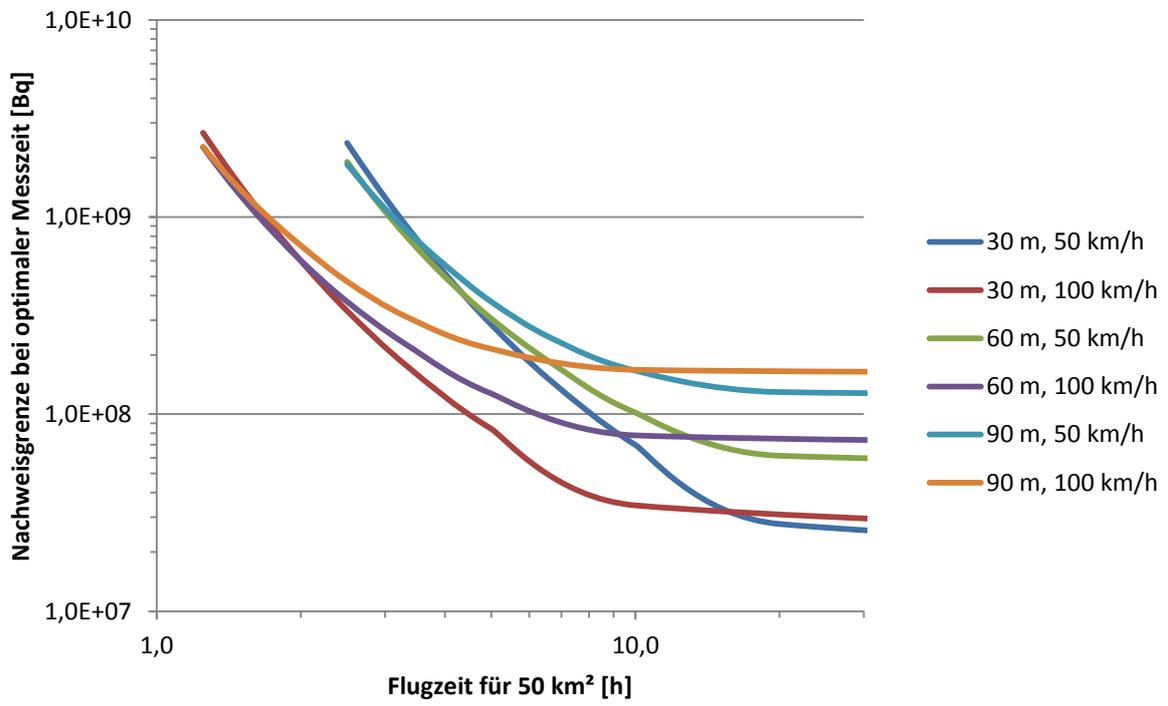


Abbildung 54: Die Nachweisgrenze bei optimaler Messzeit als Funktion der Flugzeit für eine abzusuchende Fläche von 50 km² und verschiedene Kombinationen aus Flughöhe und -geschwindigkeit.

8 Erkennung von Aktivitäten im Luftvolumen

In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit alleine aus den Flugdaten und Gamma-spektren, also ohne die Verwendung externer Messungen, eine Bodenkontamination von einer Luftkontamination anhand einer Einzelmessung unterschieden werden könnte. Für die Bodenkontamination werden die theoretischen Resultate anschließend anhand von Messdaten von Cs-137 validiert.

8.1 Vorgehensweise

Die durchgeführten Kalibrierungen in Kapitel 4 hatten gezeigt, dass sich die Winkelcharakteristiken der eingesetzten Detektoren unterscheiden. Es ist daher naheliegend zu untersuchen, ob sich diese Unterschiede durch die Bildung von Zählratenverhältnissen zur Diskriminierung verschiedener Kontaminationsszenarien verwenden lassen. Da wir uns hierbei auf die Unterscheidung zwischen ausgedehnter Bodenkontamination und ausgedehnter Luftkontamination beschränken, ist es aufgrund der hierbei vorhandenen Symmetrie sinnvoll, die Detektoren in drei Gruppen einzuteilen: den Germaniumdetektor (Detektor 1), die beiden vorderen NaI-Detektoren (Detektor 4 und 5) und die beiden hinteren NaI-Detektoren (Detektor 2 und 3), die im Folgenden als „NaI vorne“ und „NaI hinten“ bezeichnet werden.

8.1.1 Zählratenverhältnis „NaI vorne“ zu „NaI hinten“

Aufgrund der identischen NaI-Detektoren ist zunächst zu erwarten, dass bei symmetrischen Kontaminationsszenarien auf der Bodenoberfläche alle vier Detektoren vergleichbare Zählraten liefern. Dennoch ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Abschirmung von unten, im Wesentlichen durch die Tankfüllung, Unterschiede in den Zählraten. Abbildung 55 zeigt die berechneten Verläufe der Zählratenverhältnisse „NaI vorne“ zu „NaI hinten“ als Funktion der Flughöhe beim Schwebeflug für Tankfüllungen von 0 %, 50 % und 100 % und für die beiden Szenarien „homogene, weit ausgedehnte Bodenkontamination“ und „homogene, weit ausgedehnte Luftkontamination“. Der Abstand der Linien gleicher Farbe ist hierbei das Maß für die Unterscheidbarkeit der beiden Szenarien bei Vernachlässigung von Unsicherheiten. Es zeigt sich, dass vor allem bei geringen Flughöhen und geringem Tankfüllstand eine Unterscheidung schwierig bzw. bei Überschneidung der Kurven (Tankfüllung

0%, Flughöhe 30 m) sogar unmöglich ist. Der Tankfüllstand hat einen wesentlichen Einfluss und muss korrigiert werden. Die numerischen Resultate wurden in den Anhang 1.7 ausgegliedert.

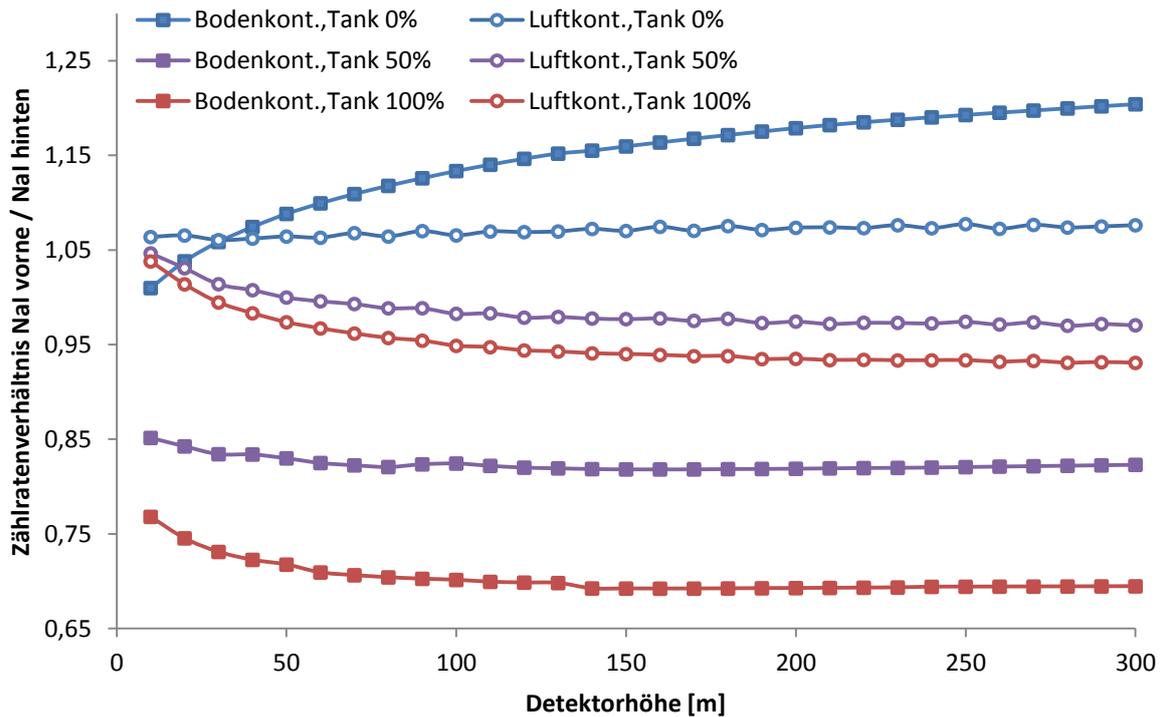


Abbildung 55: Zählratenverhältnis der NaI-Detektoren „vorne“ zu den NaI-Detektoren „hinten“ als Funktion der Flughöhe für die Szenarien Boden- und Luftkontamination bei Tankfüllständen von 0 %, 50 % und 100 %.

8.1.2 Zählratenverhältnis „Nal vorne“ zu Germaniumdetektor

Der Germaniumdetektor besitzt bei gleicher Gamma-Einstrahlung zwar eine um eine Größenordnung geringere Zählrate als ein einzelner NaI-Detektor, hebt sich in seiner azimutalen Charakteristik aber deutlich von den NaI-Detektoren ab, so dass sinnvollerweise auch hier die Zählratenverhältnisse betrachtet werden. Abbildung 56 zeigt die berechneten Verläufe der Zählratenverhältnisse „Nal vorne“ zum Germaniumdetektor, wiederum als Funktion der Flughöhe beim Schwebeflug für Tankfüllungen von 0 %, 50 % und 100 % und für die beiden Szenarien „homogene, weit ausgedehnte

Bodenkontamination“ und „homogene, weit ausgedehnte Luftkontamination“. Der Abstand der Linien gleicher Farbe ist bei Vernachlässigung von Unsicherheiten deutlich größer als bei der reinen NaI-Verhältnismessung und es kommt zu keinen Überschneidungen bei gleicher Tankfüllung, sodass bei ausreichender Zählstatistik eine Unterscheidung von Luft- und Bodenkontamination möglich sein sollte, sofern der Einfluss des Tankfüllstandes korrigiert wird (die Resultate für die Luftkontamination bei einer Tankfüllung von 100 % liegen nahe bei den Werten der Bodenkontamination bei einer Tankfüllung von 0 %). Insbesondere bei geringer Flughöhe sollte auch deren Einfluss korrigiert werden. Es ist darauf zu achten, dass aufgrund der geringeren Effizienz des Germaniumdetektors die Messzeit ausreichend lange gewählt wird. Die numerischen Resultate befinden sich in Anhang 1.7.

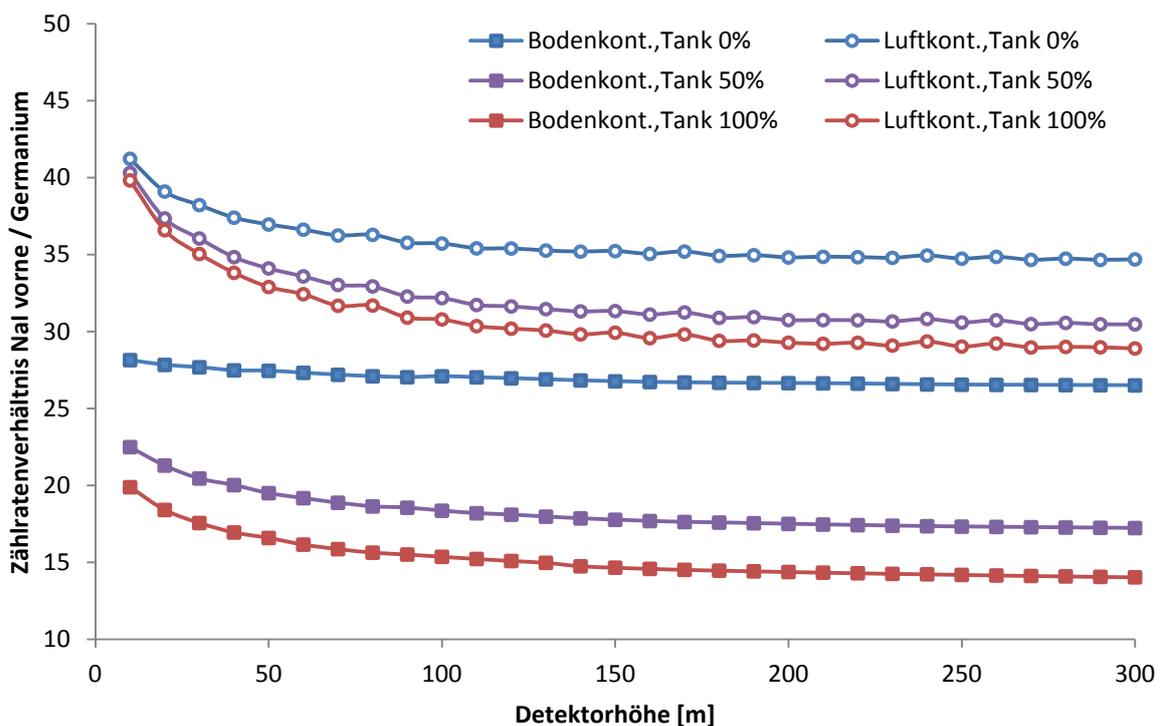


Abbildung 56: Zählratenverhältnis der NaI-Detektoren „vorne“ zum Germaniumdetektor als Funktion der Flughöhe für die Szenarien Boden- und Luftkontamination bei Tankfüllständen von 0 %, 50 % und 100 %.

8.1.3 Zählratenverhältnis „Nal hinten“ zu Germaniumdetektor

Als letztes Zählratenverhältnis bleibt das zwischen den Nal-Detektoren „hinten“ zum Germaniumdetektor. Abbildung 57 zeigt die berechneten Verläufe, wie gehabt als Funktion der Flughöhe beim Schwebeflug für Tankfüllungen von 0 %, 50 % und 100 % und für die beiden Szenarien „homogene, weit ausgedehnte Bodenkontamination“ und „homogene, weit ausgedehnte Luftkontamination“. Der Abstand der Linien gleicher Farbe ist bei Vernachlässigung von Unsicherheiten zwar etwas geringer als bei der ersten Nal-/Ge-Verhältnismessung, allerdings ergibt sich aufgrund der günstigen Lage der Detektoren hinter dem Haupttank eine deutlich geringere Abhängigkeit von dessen Füllstand. Für Flughöhen ab ca. 50 m sollte bei ausreichender Zählstatistik sogar ohne Korrekturen die Unterscheidung von Luft- und Bodenkontamination möglich sein. Die numerischen Resultate befinden sich in Anhang 1.7.

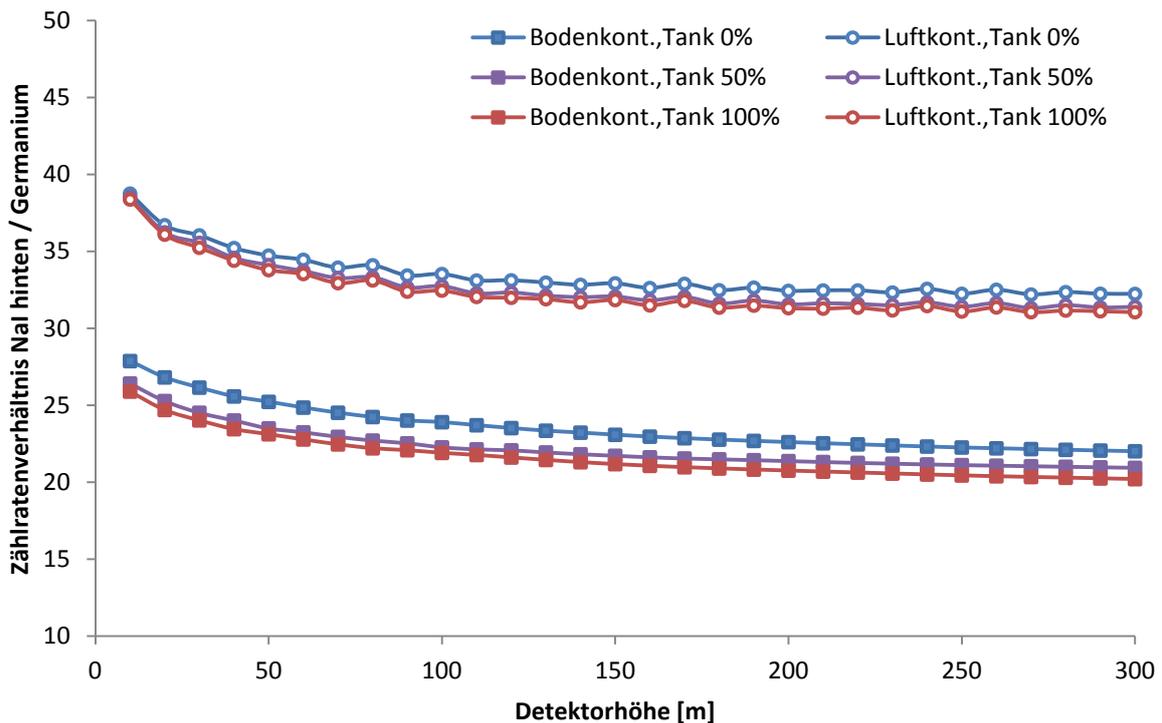


Abbildung 57: Zählratenverhältnis der Nal-Detektoren „hinten“ zum Ge-Detektor als Funktion der Flughöhe für die Szenarien Boden- und Luftkontamination bei Tankfüllständen von 0 %, 50 % und 100 %.

Folgendes Beispiel soll eine mögliche Anwendung verdeutlichen. Für eine Flughöhe von 100 m und eine Tankfüllung von 50 % sind dem Anhang 1.7, Tabellen A1.25 und A1.26, Kalibrierfaktoren für die 662-keV-Linie von $2,24E-3$ ips/(Bq/m²) (Bodenkontamination) und $1,839$ ips/(Bq/m³) (Luftkontamination) für „NaI hinten“ sowie $1,00E-4$ ips/(Bq/m²) (Bodenkontamination) und $0,056$ ips/(Bq/m³) (Luftkontamination) für den Ge-Detektor zu entnehmen. Die Zählratenverhältnisse „NaI hinten“/„Ge-Detektor“ für reine Bodenkontamination sind gerundet 22,4 und für reine Luftkontamination 32,8. Unter der Annahme einer Zählrate von genau 1 ips in der 662-keV-Linie im Ge-Detektor ergibt sich die in Abbildung 58 dargestellte Abhängigkeit der Boden- und Luftkontamination von den Zählratenverhältnissen „NaI hinten“/„Ge-Detektor“. Die gestrichelten Linien zeigen die Unsicherheit der Verhältnisbestimmung an (vgl. Tab. 8.2).

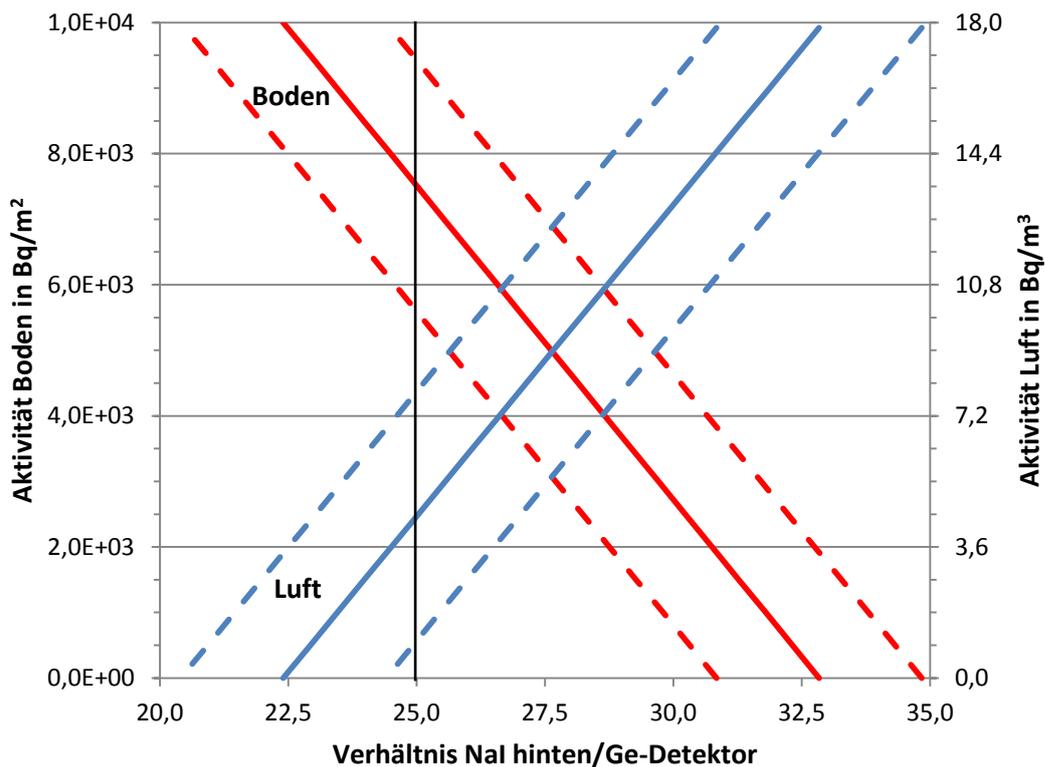


Abbildung 58: Aktivitätskonzentration am Boden bzw. in der Luft unter den Randbedingungen einer Flughöhe von 100 m, einer Tankfüllung von 50 % und einer Zählrate von 1 ips in der 662-keV-Linie in Abhängigkeit von den Zählratenverhältnissen „NaI hinten“/„Ge-Detektor“.

Wird z. B. ein Zählratenverhältnis von 25 gemessen, liegt die Bodenkontamination bei ca. $7,5 \pm 2,0$ kBq/m² und die Luftkontamination bei ca. $4,5 \pm 3,6$ Bq/m³. Eine Kontamination des Hubschraubers bzw. der Detektoren ist hier nicht berücksichtigt. Es ist ersichtlich, dass schon eine geringe Luftkontamination eine Messung der Bodenkontamination desselben Nuklids stark erschwert.

8.2 Messergebnisse für Bodenkontamination

Im Folgenden wurden aus den durchgeführten Flügen Schwebflüge ausgewählt, die ohne Cs-137-Strahler durchgeführt wurden, so dass der Cs-137-Peak aus der vorhandenen Tschernobyl-Cs-137-Bodenkontamination stammen muss. Für diese wurden die Nettopeakflächen aller fünf Detektoren sowie deren Unsicherheiten bestimmt und quadratisch nach Gauß'scher Fehlerfortpflanzung um die relative Geometrieunsicherheit von 20 % für die einzelnen NaI-Detektoren bzw. 5 % für den Ge-Detektor erweitert. Hieraus wurden zunächst die Summenkanäle 4 und 5 für die vorderen Detektoren und 2 und 3 für die hinteren Detektoren gebildet und anschließend die obigen Zählratenverhältnisse gebildet. Die Unsicherheiten wurden entsprechend propagiert und geben den 1σ -Vertrauensbereich an. Tabelle 8.1 zeigt die dabei verwendeten Eingangsgrößen und Tabelle 8.2 die erzielten Resultate. Diese werden mit den theoretischen Berechnungen für die jeweilige Flughöhe und den Tankfüllstand verglichen, indem das Rechenergebnis nach dem Ampelprinzip farbig markiert wurde. Grün bedeutet hierbei eine Übereinstimmung besser als das 1σ -Niveau, gelb eine Übereinstimmung zwischen dem 1σ und dem 2σ -Niveau und rot eine Abweichung von mehr als 2σ . Statistisch zu erwarten ist ein Anteil grüner Markierungen von ca. 68 %, gelber Markierungen von ca. 27 % und roter Markierungen von 5 %, was gut zu den Resultaten in der Tabelle passt. Die Unsicherheiten sollten folglich in ihrer Größenordnung korrekt abgeschätzt worden sein.

Bei Einbeziehung des Germaniumdetektors liegen die Messunsicherheiten damit auf einem Niveau, welches kleiner als der in Kapitel 8.1 berechnete Zählratenunterschied zwischen Luft- und Bodenkontamination ist, so dass bei ausreichender Mess- bzw. Integrationszeit (bei den Flughöhen und Kontaminationen unserer Messungen in der Größenordnung von einigen Minuten) eine Diskriminierung der beiden Kontaminationsszenarien auf Basis einer einzelnen Messung möglich sein dürfte, sofern

nicht weitere Unsicherheiten (z. B. unregelmäßige Orografie, Überwuchs durch starke Vegetation) hinzukommen.

Eine Validierung der Luftkontaminationsberechnungen konnte aus praktischen Gründen nicht durchgeführt werden, die Unsicherheiten sollten sich aber auf vergleichbarem Niveau bewegen. Ein gemischter Gammafluss in den Detektoren sowohl aus Boden- sowie aus Luftkontamination über ebenem Gelände mit geringer Vegetation dürfte sich dann bei ausreichender Zählstatistik durch die Kombination der NaI- und Ge-Detektoren mit einer absoluten Unsicherheit von etwa 40 % zuordnen lassen¹. Zusätzliche unbekannte Typ-B-Unsicherheiten wie beispielsweise die Kontamination der Detektoren bzw. des Helikopters beim Aufenthalt in kontaminierter Luft sind in dieser Abschätzung jedoch noch nicht enthalten.

¹ Beispielsweise beträgt der Abstand der Zählratenverhältnisse gleicher Farbe in Abbildung 57 in etwa 10, die Unsicherheiten in der Spalte „Hi / Ge“ in Tabelle 8.2 liegt bei 4, was einen Quotienten von 40 % ergibt.

Flug	Messzeit [s]	Detektor	Cs-137 661 keV (Nettopeakfläche in counts)	Unsicherheit aus Gammaskpektro- metriesoftw. in %	Gesamt- unsicherheit in %	Zählrate Cs-137 661 keV in cps	Tankfüll- stand
F131014 B Untergrund 90 m	537	Det2	1885	12,7	23,7	3,5	0,620
	537	Det3	1922	23,2	30,6	3,6	
	537	Det4	2386	12,8	23,7	4,4	
	537	Det5	2660	9,0	21,9	5,0	
F131014 D Untergrund 27 m	128	Det2	2885	5,3	20,7	22,6	0,525
	127	Det3	2890	5,1	20,6	22,7	
	127	Det4	2400	4,1	20,4	18,8	
	127	Det5	2250	3,8	20,4	17,7	
F131014 E Untergrund 130 m	312	Det2	912	21,4	29,3	2,9	0,464
	312	Det3	1014	25,2	32,2	3,3	
	312	Det4	1031	13,7	24,2	3,3	
	312	Det5	997	16,0	25,6	3,2	
F131014 F Untergrund 57 m	122	Det2	989	10,9	22,8	8,1	0,369
	122	Det3	1276	7,3	21,3	10,5	
	122	Det4	1350	13,6	24,2	11,1	
	122	Det5	1190	10,3	22,5	9,8	
F131014 G Untergrund 90 m	300	Det2	1705	15,6	25,4	5,7	0,316
	300	Det3	1830	7,1	21,2	6,1	
	300	Det4	1853	13,0	23,9	6,2	
	300	Det5	2064	5,3	20,7	6,9	
F131014 H Untergrund 30 m	121	Det2	2010	6,9	21,2	16,6	0,232
	121	Det3	2090	6,3	21,0	17,3	
	121	Det4	1950	4,7	20,5	16,2	
	121	Det5	2170	6,4	21,0	18,0	
F131014 J Untergrund 1,2 m	497	Det2	16400	3,0	20,2	33,0	0,171
	496	Det3	20600	1,8	20,1	41,5	
	497	Det4	19100	1,3	20,0	38,5	
	497	Det5	20800	1,1	20,0	41,9	
D131129 R Untergrund 30 m	133	Det1	244	10,4	11,5	1,8	0,076
	138	Det2	2570	4,5	20,5	18,7	
	137	Det3	3257	4,4	20,5	23,7	
	137	Det4	3870	4,3	20,5	28,2	
	137	Det5	2660	8,1	21,6	19,4	
E131129 E Untergrund 30 m	294	Det1	188	9,3	10,6	0,6	0,570
	300	Det2	2578	8,3	21,7	8,6	
	301	Det3	2405	8,4	21,7	8,0	
	300	Det4	2700	7,7	21,4	9,0	
	300	Det5	1892	12,4	23,5	6,3	
D131129 C Co-60 25 m	174	Det 1	341	6,6	8,3	2,0	1,000
	178	Det2	3314	4,4	20,5	18,6	
	177	Det3	3970	4,1	20,4	22,4	
	178	Det4	3413	5,2	20,7	19,2	
	178	Det5	2515	23,0	30,5	14,2	
D131129 D Co-60 81m	292	Det 1	222	13,4	14,3	0,8	0,951
	300	Det2	1975	9,0	21,9	6,6	
	300	Det3	1929	10,0	22,4	6,4	
	300	Det4	1512	7,9	21,5	5,0	
	300	Det5	1281	8,1	21,6	4,3	
D131129 E Co-60 52 m	175	Det 1	246	10,6	11,7	1,4	0,859
	180	Det2	2000	6,9	21,2	11,1	
	180	Det3	2030	7,1	21,2	11,3	
	180	Det4	1984	6,9	21,2	11,0	
	180	Det5	1898	28,8	35,1	10,6	
D131129 F Co-60 27 m	183	Det 1	384	10,4	11,5	2,1	0,806
	187	Det2	3432	4,8	20,6	18,3	
	187	Det3	3627	5,1	20,6	19,4	
	187	Det4	3275	5,4	20,7	17,5	
	187	Det5	3355	3,3	20,3	17,9	

Tabelle 8.1: Messzeiten, Peakflächen und Tankfüllstände der Detektoren sowie die abgeschätzten Einzelunsicherheiten bei der Auswertung des 662-keV-Peaks von Cs-137 in den Gammaskpektren der durchgeführten Flüge.

Flug	Summe vorne 4 + 5	Summe hinten 2 + 3	Art des Wertes	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
F131014 B	5046	3807	Messung	1,33		
Untergrund	±	±		±		
90 m	813	739	Unsicherheit	0,33		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,78</i>		
F131014 D	4650	5775	Messung	0,81		
Untergrund	±	±		±		
27 m	671	844	Unsicherheit	0,17		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,76</i>		
F131014 E	2028	1926	Messung	1,05		
Untergrund	±	±		±		
130 m	357	422	Unsicherheit	0,30		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,84</i>		
F131014 F	2540	2265	Messung	1,12		
Untergrund	±	±		±		
57 m	422	353	Unsicherheit	0,26		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,88</i>		
F131014 G	3917	3535	Messung	1,11		
Untergrund	±	±		±		
90 m	615	581	Unsicherheit	0,25		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,91</i>		
F131014 H	4120	4100	Messung	1,00		
Untergrund	±	±		±		
30 m	607	611	Unsicherheit	0,21		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,94</i>		
F131014 J	39900	37000	Messung	1,08		
Untergrund	±	±		±		
1,2 m	5658	5302	Unsicherheit	0,22		
			<i>Rechnung</i>	<i>0,92</i>		
D131129 R						
Untergrund	6530	5827	Messung	1,12	26,76	23,88
30 m	±	±		±	±	±
	978	850	Unsicherheit	0,23	5,06	4,44
			<i>Rechnung</i>	<i>1,02</i>	<i>26,28</i>	<i>25,82</i>
E131129 E						
Untergrund	4592	4983	Messung	0,92	24,43	26,51
30 m	±	±		±	±	±
	730	764	Unsicherheit	0,20	4,66	4,93
			<i>Rechnung</i>	<i>0,81</i>	<i>19,78</i>	<i>24,37</i>
D131129 C						
Co-60	5928	7284	Messung	0,81	17,38	21,36
25 m	±	±		±	±	±
	1042	1057	Unsicherheit	0,19	3,38	3,57
			<i>Rechnung</i>	<i>0,74</i>	<i>17,90</i>	<i>24,28</i>
D131129 D						
Co-60	2793	3904	Messung	0,72	12,58	17,59
81m	±	±		±	±	±
	427	611	Unsicherheit	0,16	2,63	3,73
			<i>Rechnung</i>	<i>0,71</i>	<i>15,62</i>	<i>22,08</i>
D131129 E						
Co-60	3882	4030	Messung	0,96	15,78	16,38
52 m	±	±		±	±	±
	787	604	Unsicherheit	0,24	3,69	3,12
			<i>Rechnung</i>	<i>0,73</i>	<i>16,80</i>	<i>22,99</i>
D131129 F						
Co-60	6630	7059	Messung	0,94	17,27	18,38
27 m	±	±		±	±	±
	961	1029	Unsicherheit	0,19	3,20	3,42
			<i>Rechnung</i>	<i>0,75</i>	<i>18,12</i>	<i>24,23</i>

Tabelle 8.2: Auswertung der Zählratenverhältnisse aus den Messdaten und Messunsicherheiten der Tabelle 8.1 für die Detektorkombinationen „Nal vorne“ zu „Nal hinten“ („Vo / Hi“), „Nal vorne“ zu Germanium („Vo / Ge“) und „Nal hinten“ zu Germanium („Hi / Ge“) und Vergleich mit der theoretischen Rechnung (kursiv). Der Übereinstimmungsgrad wurde nach dem im Ampelprinzip farblich gekennzeichnet.

9 Literatur

- [Aag 99] Aage, H. K., Korsbech, U., Bargholz, K., Hovgaard, J., A new technique for processing airborne gamma ray spectrometry data for mapping low level contaminations, *Appl. Radiat. Isot.* 51, 651–662 (1999).
- [Aag 03] Aage, H. K., Korsbech, U., Bargholz, K., Early detection of radioactive fallout by gamma spectrometry, *Radiat. Prot. Dosim.* 106(2), 155–164 (2003).
- [All 01] Allyson, J. D., Sanderson, D. C. W., Spectral deconvolution and operational use of stripping ratios in airborne radiometrics, *J. Environ. Radioactivity* 53, 351–363 (2001).
- [Bec 72] Beck, H. L., DeCampo, J., Gogolak, C., In situ Ge(Li) and NaI(Tl) gamma-ray spectrometry, Report HASL-258, U. S. Department of Energy, Environmental Measurements Laboratory, New York (1972).
- [BfS 11] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), Schreiben Zeichen AG-F 3.3-08303/3611S60013 vom 16.09.2011 mit Vertrag 3611S60013.
- [Bil 99] Billings, S., Hovgaard, J., Modeling detector response in airborne gamma-ray spectrometry, *Geophysics* 64(5), 1378–1392 (1999).
- [Buc 01] Bucher, B., Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie, Diss. ETH Nr. 13973 (2001).
- [Dic 04] Dickson, B. L., Recent advances in aerial gamma-ray surveying, *J. Environ. Radioactivity* 76, 225–236 (2004).
- [DIN 00] DIN 25462, In-situ-Gammaspektrometrie zur nuklidspezifischen Umweltkontaminationsmessung, Oktober 2000.
- [DIN 11a] DIN ISO 18589-7, Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Erdboden – Teil 7: *In-situ*-Messung von Gammastrahlung emittierenden Radionukliden, Dezember 2014.
- [DIN 11b] DIN ISO 11929, Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen, Januar 2011.
- [Gra 79] Grasty, R. L., Kosanke, K. L., Foote, R. S., Fields of view of airborne gamma-ray detectors, *Geophysics* 44(8), 1447–1457 (1979).

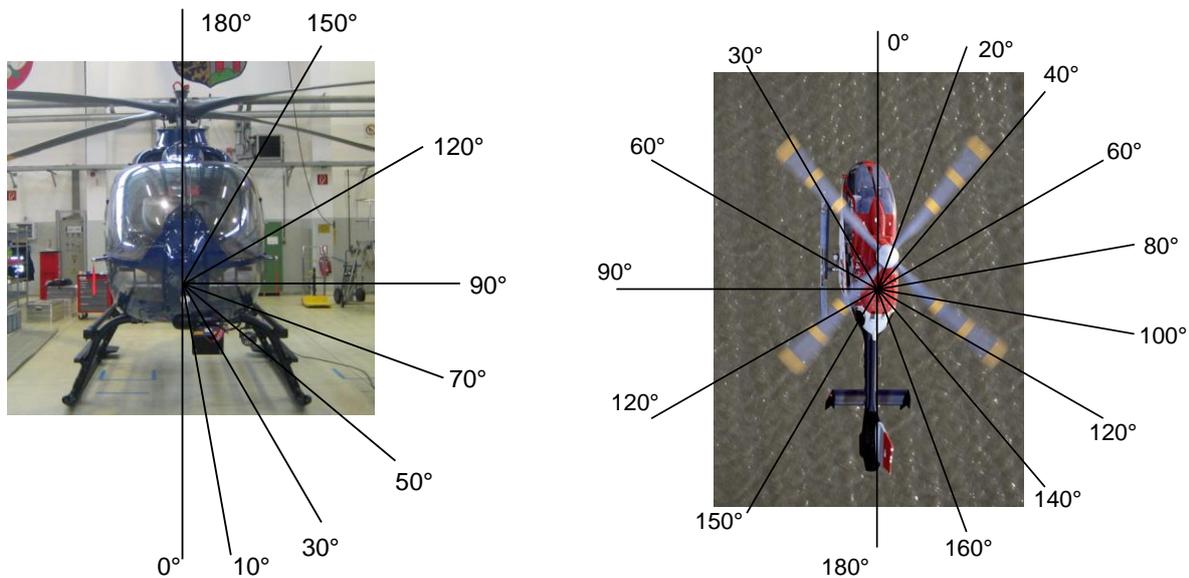
- [Gra 97] Grasty, R. L. et al, Airborne gamma ray measurements in the Chernobyl plume, *Radiat. Prot. Dosim.* 73(1–4), 225–230 (1997).
- [Gui 01] Guillot, L., Extraction of full absorption peaks in airborne gamma-spectrometry by filtering techniques coupled with a study of the derivatives. Comparison with the window method. *J. Environ. Radioactivity* 53, 381–398 (2001).
- [Hen 01] Hendriks, P. H. G. M., Limburg, J., de Mejer, R. J., Full-spectrum analysis of natural γ -ray spectra, *J. Environ. Radioactivity* 53, 365–380 (2001).
- [Hol 12] www.holzhandel.de/rohmdichte.html (Juli 2012).
- [Hov 97] Hovgaard, J., A new processing technique for airborne gamma-ray spectrometer data, In: *Proceedings Sixth Topical Meeting on Emergency Preparedness and Response*. Am. Nucl. Soc., San Francisco (1997).
- [Hov 98] Hovgaard, J., Grasty, R. L., Reducing statistical noise in airborne gamma-ray data through spectral component analysis, In: *Proceedings of Exploration 97*, edited by A. G. Gubins, p. 753–764.
- [IAEA 03] IAEA, Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data, IAEA-Tecdoc-1363 (2003).
- [IAEA 90] IAEA, The use of gamma ray data to define the natural environment, IAEA-Tecdoc-566 (1990).
- [ICRU 94] ICRU, Gamma-Ray Spectrometry in the Environment, ICRU Report 53 (1994).
- [LfL 11] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, 9. unveränderte Auflage (2011).
- [MS 08] Shield 8.01, <http://www.radiationsoftware.com/mshield.html>, Grove Software Inc., 2008.
- [NIST] National Institute of Standards and Technology, XCOM: Photon Cross Sections Database, <http://www.nist.gov/pml/data/xcom/>
- [NKS 03] Nordic nuclear safety research, ECCOMAGS: Initial results from the RESUME 2002 exercise, NKS-86, February 2003.
- [Numexpr] Numexpr: Fast numerical array expression evaluator for Python and NumPy, <https://code.google.com/p/numexpr/>
- [NumPy] NumPy library: Base N-dimensional array package for Python, <http://www.numpy.org/>

- [Python] Python programming language, official website <http://www.python.org/>
- [Sai 95] Saito, K., Jacob, P., Gamma ray fields in the air due to sources in the ground, *Radiat. Prot. Dosim.* 58(1), 29–45 (1995).
- [San 97] Sanderson, D. C. W., Ferguson, J. M., The European capability for environmental airborne gamma ray spectrometry, *Radiat. Prot. Dosim.* 73(1–4), 213–218 (1997).
- [San 04] Sanderson, D. C. W. et al, Demonstrating the European capability for airborne gamma spectrometry: results from the ECCOMAGS exercise, *Radiat. Prot. Dosim.* 109(1–2), 119–125 (2004).
- [Sch 91] Schwarz, G. F., Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Kümmerly & Frey, Bern, in: Beiträge zur Geologie der Schweiz, Nr. 23 – Diss. Nr. 9391, ETH Zürich, 1991.
- [Sch 92] Schwarz, G. F., Klingele, E. E., Rybach, L., How to handle rugged topography in airborne gamma-ray spectrometry surveys, *First Break* 10(1), 11–17 (1992).
- [SciPy] SciPy library: Fundamental library for scientific computing with Python, <http://www.scipy.org/>
- [Sta 11] Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Landwirtschaftsverlag Münster (2011).
- [Tru 09] Truffert, C. et al, Airborne gamma-ray spectrometry – How to settle Rn atmospheric correction, 11th South African Geophysical Association Biennial Technical Meeting and Exhibition, Swaziland (2009).
- [Tyl 96] Tyler, A. N., Sanderson, D. C. W., Scott, E. M., Allyson, J. D., Accounting for spatial variability and fields of view in environmental gamma ray spectrometry, *J. Environ. Radioactivity* 33(3), 213–235 (1996).
- [Win 01] Winkelmann, I., Thomas, M., Vogl, K., Aerial measurement on uranium ore mining, milling and processing areas in Germany, *J. Environ. Radioactivity* 53, 301–311 (2001).
- [Win 04] Winkelmann, I., Strobl, C., Thomas, M., Aerial measurements of artificial radionuclides in Germany in case of a nuclear accident, *J. Environ. Radioactivity* 72, 225–231 (2004).

10 Anhänge

Anhang 1: Tabellen

Anhang 1.1: Koordinaten der Messpunkte bei der Kalibrierung



Wiederholung der Abbildung 28: Linkes Bild: Schematische Darstellung des Polarwinkels θ . Rechtes Bild: Schematische Darstellung des Azimutwinkels φ (von oben). Die rechte Seite stellt die Winkel für den unteren Halbraum dar, die linke Seite die Winkel für den oberen Halbraum, die aus Gründen der Übersichtlichkeit nach links gespiegelt dargestellt sind.

Tabelle A1.1: Polarkoordinaten (mit $r = 300$ cm) und kartesische Koordinaten für die verwendeten Messpunkte (vgl. obige Abbildung).

Messpunkt	Polarwinkel θ [Grad]	Azimutwinkel φ [Grad]	x-Wert [cm]	y-Wert [cm]	z-Wert [cm]
1	0	0	0,0	0,0	300,0
2	10	0	52,1	0,0	295,4
3	10	20	49,0	17,8	295,4
4	10	40	39,9	33,5	295,4
5	10	60	26,0	45,1	295,4
6	10	80	9,0	51,3	295,4
7	10	100	-9,0	51,3	295,4
8	10	120	-26,0	45,1	295,4
9	10	140	-39,9	33,5	295,4
10	10	160	-49,0	17,8	295,4
11	10	180	-52,1	0,0	295,4

Messpunkt	Polarwinkel θ [Grad]	Azimutwinkel φ [Grad]	x-Wert [cm]	y-Wert [cm]	z-Wert [cm]
12	30	0	150,0	0,0	259,8
13	30	20	141,0	51,3	259,8
14	30	40	114,9	96,4	259,8
15	30	60	75,0	129,9	259,8
16	30	80	26,0	147,7	259,8
17	30	100	-26,0	147,7	259,8
18	30	120	-75,0	129,9	259,8
19	30	140	-114,9	96,4	259,8
20	30	160	-141,0	51,3	259,8
21	30	180	-150,0	0,0	259,8
22	50	0	229,8	0,0	192,8
23	50	20	216,0	78,6	192,8
24	50	40	176,0	147,7	192,8
25	50	60	114,9	199,0	192,8
26	50	80	39,9	226,3	192,8
27	50	100	-39,9	226,3	192,8
28	50	120	-114,9	199,0	192,8
29	50	140	-176,0	147,7	192,8
30	50	160	-216,0	78,6	192,8
31	50	180	-229,8	0,0	192,8
32	70	0	281,9	0,0	102,6
33	70	20	264,9	96,4	102,6
34	70	40	216,0	181,2	102,6
35	70	60	141,0	244,1	102,6
36	70	80	49,0	277,6	102,6
37	70	100	-49,0	277,6	102,6
38	70	120	-141,0	244,1	102,6
39	70	140	-216,0	181,2	102,6
40	70	160	-264,9	96,4	102,6
41	70	180	-281,9	0,0	102,6
42	90	0	300,0	0,0	0,0
43	90	20	281,9	102,6	0,0
44	90	40	229,8	192,8	0,0
45	90	60	150,0	259,8	0,0
46	90	80	52,1	295,4	0,0
47	90	100	-52,1	295,4	0,0
48	90	120	-150,0	259,8	0,0
49	90	140	-229,8	192,8	0,0
50	90	160	-281,9	102,6	0,0
51	90	180	-300,0	0,0	0,0
52	120	0	259,8	0,0	-150,0
53	120	30	225,0	129,9	-150,0
54	120	60	129,9	225,0	-150,0
55	120	90	0,0	259,8	-150,0
56	120	120	-129,9	225,0	-150,0
57	120	150	-225,0	129,9	-150,0

Messpunkt	Polarwinkel θ [Grad]	Azimutwinkel φ [Grad]	x-Wert [cm]	y-Wert [cm]	z-Wert [cm]
58	120	180	-259,8	0,0	-150,0
59	150	0	150,0	0,0	-259,8
60	150	30	129,9	75,0	-259,8
61	150	60	75,0	129,9	-259,8
62	150	90	0,0	150,0	-259,8
63	150	120	-75,0	129,9	-259,8
64	150	150	-129,9	75,0	-259,8
65	150	180	-150,0	0,0	-259,8
66	180	0	0,0	0,0	-300,0

Anhang 1.2: Bei der Kalibrierung verwendete Messpunkte

Tabelle A1.2: Bei unterschiedlichen Tankfüllungen auf den verschiedenen Messpunkten durchgeführte Kalibriermessungen. Der leere Tank enthielt 0 kg, der "halb volle" 130 kg, der "volle" 263 kg Treibstoff. Bei Messflügen kann aus Gewichtsgründen mit höchstens ca. 300 kg Treibstoff geflogen werden, wobei die maximale Füllung des Haupttanks 460 kg beträgt.

Messpunkt	Cs-137 und Co-60		
	Tankfüllung		
	leer	halb	voll
1	x	x	x
2	x	x	x
3	x	x	
4	x	x	x
5		x	
6	x	x	x
7		x	
8	x	x	x
9		x	
10		x	
11	x	x	x
12	x	x	x
13		x	
14	x	x	x
15		x	
16	x	x	x
17		x	
18	x	x	x
19		x	
20		x	
21	x	x	x
22	x	x	x
23		x	
24	x	x	x
25		x	
26	x	x	x
27		x	
28	x	x	x
29		x	
30		x	
31	x	x	x
32	x	x	x
33		x	
34	x	x	x
35		x	

	Cs-137 und Co-60		
Messpunkt	Tankfüllung		
	leer	halb	voll
36	x	x	x
37		x	
38	x	x	x
39		x	
40		x	
41	x	x	x
42		x	
43		x	
44		x	
45		x	
46		x	
47		x	
48		x	
49		x	
50		x	
51		x	
52		x	
53		x	
54		x	
55		x	
56		x	
57		x	
58		x	
59		x	
60		x	
61		x	
62		x	
63		x	
64		x	
65		x	
66		x	

Anhang 1.3: Ausbeuten für Detektor 1 bis 5

Tabelle A1.3: Ausbeuten für Detektor 1

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
1	19,1	0,0	1,13E+01	1,16E+01	1,16E+01	7,12E+00	7,22E+00	7,26E+00
2	28,0	0,0	1,03E+01	1,06E+01	1,05E+01	6,56E+00	6,54E+00	6,42E+00
3	27,7	6,8	1,06E+01	1,04E+01		6,72E+00	6,48E+00	
4	26,7	13,4	1,06E+01	1,10E+01	1,09E+01	6,59E+00	6,90E+00	6,68E+00
5	25,1	19,6		1,12E+01			6,83E+00	
6	22,9	25,0	1,18E+01	1,15E+01	1,16E+01	7,21E+00	6,86E+00	7,07E+00
7	20,1	29,2		1,09E+01			6,71E+00	
8	16,9	31,1	1,23E+01	1,15E+01	1,17E+01	7,54E+00	7,01E+00	7,23E+00
9	13,6	28,8		1,16E+01			7,22E+00	
10	10,8	18,9		1,15E+01			7,15E+00	
11	9,6	0,0	1,19E+01	1,15E+01	1,16E+01	7,45E+00	7,21E+00	7,12E+00
12	44,9	0,0	5,33E+00	4,87E+00	4,72E+00	3,98E+00	3,84E+00	3,73E+00
13	44,5	12,0		5,44E+00			4,05E+00	
14	43,2	24,1	6,70E+00	7,02E+00	6,47E+00	4,72E+00	4,87E+00	4,61E+00
15	41,0	36,4		9,15E+00			5,91E+00	
16	37,7	49,3	1,03E+01	1,06E+01	1,04E+01	6,43E+00	6,61E+00	6,66E+00
17	33,4	63,1		1,13E+01			6,94E+00	
18	27,8	78,7	1,16E+01	1,17E+01	1,15E+01	7,31E+00	7,15E+00	7,15E+00
19	21,2	98,3		1,12E+01			6,73E+00	
20	14,5	128,0		1,11E+01			6,79E+00	
21	11,0	180,0	1,19E+01	1,13E+01	1,18E+01	7,22E+00	6,95E+00	7,31E+00
22	60,8	0,0	1,33E+00	7,33E-01	8,12E-01	1,45E+00	8,79E-01	9,24E-01
23	60,5	13,9		2,84E-01			4,44E-01	
24	59,5	28,1	7,52E-01	5,99E-01	5,05E-01	9,91E-01	7,76E-01	7,64E-01
25	57,8	42,7		1,90E+00			1,83E+00	
26	55,3	58,1	7,98E+00	8,54E+00	8,39E+00	5,35E+00	5,66E+00	5,46E+00
27	51,8	74,9		1,14E+01			7,01E+00	
28	47,2	94,0	1,10E+01	1,14E+01	1,15E+01	6,86E+00	6,86E+00	6,98E+00
29	41,9	117,0		1,22E+01			7,42E+00	
30	37,0	145,7		1,24E+01			7,61E+00	
31	34,9	180,0	1,20E+01	1,16E+01	1,27E+01	7,40E+00	7,01E+00	7,70E+00
32	76,1	0,0	1,41E+00	2,97E-02	2,79E-02	1,49E+00	7,43E-02	7,57E-02
33	76,0	12,5		1,27E-02			4,80E-02	
34	75,5	29,8	9,94E-01	2,45E-01	2,99E-01	1,21E+00	4,46E-01	4,71E-01
35	74,6	45,3		1,12E+00			1,26E+00	
36	73,3	61,6	6,75E+00	6,06E+00	6,27E+00	4,79E+00	4,41E+00	4,42E+00
37	71,5	79,4		9,43E+00			6,11E+00	
38	69,1	99,3	1,03E+01	1,02E+01	1,02E+01	6,53E+00	6,50E+00	6,50E+00
39	66,3	122,4		1,06E+01			6,77E+00	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
40	63,6	149,5		1,16E+01			7,11E+00	
41	62,5	180,0	1,17E+01	1,07E+01	1,21E+01	7,09E+00	6,68E+00	7,34E+00
42	91,1	0,0		1,29E-01			5,03E-01	
43	91,2	15,0		2,18E+00			1,95E+00	
44	91,2	30,2		4,22E+00			3,22E+00	
45	91,3	46,0		4,60E-01			5,63E-01	
46	91,4	62,6		9,30E+00			5,97E+00	
47	91,6	80,6		8,81E+00			5,68E+00	
48	91,8	100,7		7,79E+00			5,23E+00	
49	92,0	123,8		7,62E+00			5,13E+00	
50	92,3	150,5		8,69E+00			5,53E+00	
51	92,4	180,0		8,83E+00			5,44E+00	
52	113,7	0,0		2,49E+00			2,13E+00	
53	114,3	21,7		4,85E+00			3,99E+00	
54	116,1	44,3		6,63E+00			4,49E+00	
55	119,6	68,8		8,85E+00			5,83E+00	
56	124,9	97,3		1,08E+01			6,69E+00	
57	131,4	133,7		6,63E+00			4,78E+00	
58	134,9	180,0		4,11E+00			3,38E+00	
59	136,9	0,0		7,19E-03			0,00E+00	
60	137,8	18,0		3,34E-01			5,70E-01	
61	140,8	36,4		7,15E-01			9,73E-01	
62	146,0	56,1		1,79E+00			1,64E+00	
63	153,7	78,7		4,27E+00			3,49E+00	
64	163,3	111,1		4,62E-01			6,52E-01	
65	169,6	180,0		8,06E-01			8,52E-01	
66	161,9	0,0		2,61E+00			2,33E+00	
103	27,7	-6,8	1,06E+01	1,04E+01		6,72E+00	6,48E+00	
104	26,7	-13,4	1,06E+01	1,10E+01	1,09E+01	6,59E+00	6,90E+00	6,68E+00
105	25,1	-19,6		1,12E+01			6,83E+00	
106	22,9	-25,0	1,18E+01	1,15E+01	1,16E+01	7,21E+00	6,86E+00	7,07E+00
107	20,1	-29,2		1,09E+01			6,71E+00	
108	16,9	-31,1	1,23E+01	1,15E+01	1,17E+01	7,54E+00	7,01E+00	7,23E+00
109	13,6	-28,8		1,16E+01			7,22E+00	
110	10,8	-18,9		1,15E+01			7,15E+00	
113	44,5	-12,0		5,44E+00			4,05E+00	
114	43,2	-24,1	6,70E+00	7,02E+00	6,47E+00	4,72E+00	4,87E+00	4,61E+00
115	41,0	-36,4		9,15E+00			5,91E+00	
116	37,7	-49,3	1,03E+01	1,06E+01	1,04E+01	6,43E+00	6,61E+00	6,66E+00
117	33,4	-63,1		1,13E+01			6,94E+00	
118	27,8	-78,7	1,16E+01	1,17E+01	1,15E+01	7,31E+00	7,15E+00	7,15E+00
119	21,2	-98,3		1,12E+01			6,73E+00	
120	14,5	-128,0		1,11E+01			6,79E+00	
123	60,5	-13,9		2,84E-01			4,44E-01	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
124	59,5	-28,1	7,52E-01	5,99E-01	5,05E-01	9,91E-01	7,76E-01	7,64E-01
125	57,8	-42,7		1,90E+00			1,83E+00	
126	55,3	-58,1	7,98E+00	8,54E+00	8,39E+00	5,35E+00	5,66E+00	5,46E+00
127	51,8	-74,9		1,14E+01			7,01E+00	
128	47,2	-94,0	1,10E+01	1,14E+01	1,15E+01	6,86E+00	6,86E+00	6,98E+00
129	41,9	-117,0		1,22E+01			7,42E+00	
130	37,0	-145,7		1,24E+01			7,61E+00	
133	76,0	-12,6		1,27E-02			4,80E-02	
134	75,5	-29,8	9,94E-01	2,45E-01	2,99E-01	1,21E+00	4,46E-01	4,71E-01
135	74,6	-45,3		1,12E+00			1,26E+00	
136	73,3	-61,6	6,75E+00	6,06E+00	6,27E+00	4,79E+00	4,41E+00	4,42E+00
137	71,5	-79,4		9,43E+00			6,11E+00	
138	69,1	-99,3	1,03E+01	1,02E+01	1,02E+01	6,53E+00	6,50E+00	6,50E+00
139	66,3	-122,4		1,06E+01			6,77E+00	
140	63,6	-149,6		1,16E+01			7,11E+00	
143	91,2	-15,0		2,18E+00			1,95E+00	
144	91,2	-30,2		4,22E+00			3,22E+00	
145	91,3	-46,0		4,60E-01			5,63E-01	
146	91,4	-62,6		9,30E+00			5,97E+00	
147	91,6	-80,6		8,81E+00			5,68E+00	
148	91,8	-100,7		7,79E+00			5,23E+00	
149	92,0	-123,8		7,62E+00			5,13E+00	
150	92,3	-150,5		8,69E+00			5,53E+00	
153	114,3	-21,7		4,85E+00			3,99E+00	
154	116,1	-44,3		6,63E+00			4,49E+00	
155	119,6	-68,8		8,85E+00			5,83E+00	
156	124,9	-97,3		1,08E+01			6,69E+00	
157	131,4	-133,7		6,63E+00			4,78E+00	
160	137,8	-18,0		3,34E-01			5,70E-01	
161	140,8	-36,4		7,15E-01			9,73E-01	
162	146,0	-56,1		1,79E+00			1,64E+00	
163	153,7	-78,7		4,27E+00			3,49E+00	
164	163,3	-111,1		4,62E-01			6,52E-01	

Tabelle A1.3: Ausbeuten für Detektor 1 für 662 keV und 1332 keV bei leerem, halbvollem und vollem Tank.

Tabelle A1.4: Ausbeuten für Detektor 2

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
1	13,1	47,5	6,58E+01	5,07E+01	5,05E+01	5,83E+01	4,43E+01	4,45E+01
2	20,8	27,3	5,04E+01	3,85E+01	3,93E+01	3,94E+01	3,62E+01	4,26E+01
3	21,9	35,7	4,79E+01	3,30E+01		3,90E+01	3,39E+01	
4	22,4	44,3	4,88E+01	3,20E+01	3,47E+01	4,03E+01	3,28E+01	3,64E+01
5	22,4	52,9		3,23E+01			3,37E+01	
6	21,7	61,4	5,54E+01	3,48E+01	3,72E+01	4,34E+01	3,54E+01	3,91E+01
7	20,4	69,8		3,77E+01			3,74E+01	
8	18,5	77,9	6,69E+01	4,18E+01	4,54E+01	5,03E+01	4,01E+01	4,55E+01
9	16,1	85,5		4,67E+01			4,29E+01	
10	13,2	92,0		5,21E+01			4,68E+01	
11	9,9	96,2	8,49E+01	6,00E+01	6,52E+01	5,96E+01	5,13E+01	5,90E+01
12	38,3	14,5	2,38E+01	1,68E+01	1,84E+01	2,28E+01	1,99E+01	2,39E+01
13	39,7	28,6		1,36E+01			1,80E+01	
14	40,4	42,4	1,91E+01	1,19E+01	1,23E+01	1,96E+01	1,60E+01	1,83E+01
15	40,3	56,1		1,40E+01			1,81E+01	
16	39,4	69,9	3,25E+01	1,92E+01	1,96E+01	2,86E+01	2,34E+01	2,47E+01
17	37,8	84,1		2,62E+01			2,88E+01	
18	35,4	98,9	5,70E+01	3,46E+01	3,73E+01	4,34E+01	3,51E+01	4,02E+01
19	32,3	114,9		4,54E+01			4,24E+01	
20	28,4	132,7		6,12E+01			5,18E+01	
21	24,1	153,8	1,01E+02	8,02E+01	8,21E+01	6,71E+01	6,34E+01	6,67E+01
22	55,9	10,4	2,29E+01	5,14E+00	4,71E+00	1,94E+01	8,31E+00	7,70E+00
23	57,0	26,3		5,62E+00			8,89E+00	
24	57,5	41,7	1,31E+01	5,05E+00	5,49E+00	1,32E+01	8,21E+00	8,56E+00
25	57,4	57,1		4,79E+00			7,77E+00	
26	56,8	72,7	5,85E+00	3,16E+00	5,59E+00	7,93E+00	6,30E+00	9,09E+00
27	55,6	88,6		8,54E+00			1,31E+01	
28	53,7	105,3	4,93E+01	2,62E+01	2,79E+01	3,95E+01	2,92E+01	2,97E+01
29	51,3	123,1		4,47E+01			4,23E+01	
30	48,3	142,6		8,07E+01			6,32E+01	
31	45,0	164,5	1,10E+02	9,46E+01	9,69E+01	6,95E+01	7,13E+01	7,44E+01
32	73,3	8,8	3,41E+01	3,65E+00		2,43E+01	5,20E+00	
33	73,8	22,9		5,87E+00			8,06E+00	
34	74,1	41,5	5,81E+01	3,12E+00		4,26E+01	5,67E+00	7,15E-01
35	74,1	57,6		8,05E+00			1,11E+01	
36	73,7	73,8	2,44E+01	5,69E+00	6,65E+00	2,27E+01	1,00E+01	1,04E+01
37	73,1	90,4		6,90E+00			1,09E+01	
38	72,1	107,7	5,50E+01	1,61E+01	1,78E+01	4,33E+01	2,00E+01	2,23E+01
39	70,8	126,1		7,99E+01			6,32E+01	
40	69,2	146,0		1,25E+02			9,08E+01	
41	67,5	167,8	1,01E+02	1,02E+02	1,05E+02	6,15E+01	7,24E+01	7,41E+01
42	90,4	7,8		0,00E+00			0,00E+00	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
43	90,4	25,0		7,88E+00			9,82E+00	
44	90,4	41,4		7,60E+01			4,88E+01	
45	90,4	57,7		8,82E+01			5,99E+01	
46	90,4	74,1		7,78E+01			5,19E+01	
47	90,4	90,9		9,30E+00			1,42E+01	
48	90,5	108,4		1,97E+02			1,13E+02	
49	90,5	126,9		1,26E+02			8,14E+01	
50	90,6	146,9		1,20E+02			7,57E+01	
51	90,6	168,6		8,20E+01			5,42E+01	
52	116,2	9,4		4,20E+01			3,71E+01	
53	115,1	33,7		1,42E+02			8,37E+01	
54	115,0	57,4		1,99E+02			1,14E+02	
55	115,9	81,5		2,09E+02			1,19E+02	
56	117,9	106,8		1,42E+02			8,64E+01	
57	121,0	134,6		1,49E+01			1,12E+01	
58	124,9	166,6		3,26E+01			2,71E+01	
59	142,3	14,5		9,67E+01			6,65E+01	
60	140,4	35,5		1,68E+01			1,84E+01	
61	140,3	56,1		4,41E+01			3,67E+01	
62	141,8	76,9		2,99E+01			2,78E+01	
63	145,1	98,9		3,91E+00			5,21E+00	
64	150,1	123,5		7,78E+01			5,69E+01	
65	156,3	153,8		9,25E+01			6,70E+01	
66	167,2	47,5		2,14E+01			2,09E+01	
103	19,1	19,1	5,80E+01	4,57E+01		4,86E+01	4,21E+01	
104	16,8	11,4	6,34E+01	5,33E+01	5,28E+01	5,27E+01	4,65E+01	4,63E+01
105	14,0	4,6		6,10E+01			5,15E+01	
106	10,8	-0,4	7,58E+01	6,55E+01	6,55E+01	6,03E+01	5,40E+01	5,43E+01
107	7,3	-0,6		6,56E+01			5,44E+01	
108	4,2	15,7	7,39E+01	6,44E+01	6,31E+01	5,96E+01	5,31E+01	5,26E+01
109	3,6	69,0		6,79E+01			5,40E+01	
110	6,5	94,1		6,78E+01			5,52E+01	
113	36,1	-0,1		3,14E+01			3,30E+01	
114	33,1	-15,7	1,04E+02	9,85E+01	9,63E+01	7,04E+01	7,26E+01	7,15E+01
115	29,4	-33,0		1,86E+02			1,16E+02	
116	25,2	-53,1	1,80E+02	1,79E+02	1,81E+02	1,09E+02	1,12E+02	1,17E+02
117	21,1	-78,0		1,91E+02			1,18E+02	
118	18,1	-109,8	2,07E+02	2,06E+02	2,03E+02	1,22E+02	1,24E+02	1,26E+02
119	17,7	-146,3		1,79E+02			1,14E+02	
120	20,2	-179,8		1,25E+02			8,91E+01	
123	54,2	-6,0		3,96E+01			3,65E+01	
124	51,9	-23,5	9,63E+01	1,09E+02	1,03E+02	6,63E+01	7,42E+01	7,37E+01
125	49,1	-42,5		1,31E+02			8,80E+01	
126	45,8	-63,8	1,78E+02	1,80E+02	1,82E+02	1,08E+02	1,15E+02	1,17E+02

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
127	42,7	-87,8		2,07E+02			1,29E+02	
128	40,6	-114,8	2,18E+02	2,22E+02	2,26E+02	1,26E+02	1,37E+02	1,39E+02
129	40,4	-143,2		2,01E+02			1,27E+02	
130	42,1	-170,7		1,54E+02			1,03E+02	
133	72,5	-5,7		2,71E+01			2,41E+01	
134	71,2	-26,4	9,73E+01	9,69E+01	1,01E+02	6,56E+01	6,85E+01	7,07E+01
135	69,6	-45,9		1,38E+02			8,97E+01	
136	67,9	-67,1	1,93E+02	1,83E+02	1,85E+02	1,35E+01	1,16E+02	1,18E+02
137	66,2	-90,6		2,13E+02			1,32E+02	
138	65,1	-116,0	2,25E+02	2,21E+02	2,18E+02	1,29E+02	1,38E+02	1,36E+02
139	64,9	-142,4		1,87E+02			1,19E+02	
140	65,9	-168,2		1,20E+02			8,38E+01	
143	90,5	-8,9		3,74E+00			4,14E+00	
144	90,5	-27,2		7,23E+01			5,28E+01	
145	90,5	-46,7		1,40E+02			9,15E+01	
146	90,6	-68,0		1,85E+02			1,12E+02	
147	90,6	-91,3		2,12E+02			1,22E+02	
148	90,7	-116,3		1,98E+02			1,18E+02	
149	90,7	-142,2		1,69E+02			1,05E+02	
150	90,6	-167,6		9,45E+01			6,36E+01	
153	118,4	-16,2		3,97E+01			3,18E+01	
154	121,6	-44,6		1,42E+02			8,86E+01	
155	125,5	-77,4		2,01E+02			1,14E+02	
156	128,4	-115,6		2,17E+02			1,22E+02	
157	128,0	-156,1		1,73E+02			1,06E+02	
160	145,8	-7,8		1,13E+02			7,50E+01	
161	151,1	-33,0		1,05E+02			7,47E+01	
162	157,4	-64,8		1,84E+02			1,10E+02	
163	162,3	-109,8		1,71E+02			1,03E+02	
164	161,7	-163,9		1,52E+02			9,53E+01	

Tabelle A1.4: Ausbeuten für Detektor 2 für 662 keV und 1332 keV bei leerem, halbvollem und vollem Tank.

Tabelle A1.5: Ausbeuten für Detektor 3

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
1	13,1	-47,5	1,09E+02	8,55E+01	8,51E+01	7,84E+01	6,33E+01	6,39E+01
2	20,8	-27,3	1,06E+02	7,76E+01	7,93E+01	7,12E+01	5,93E+01	5,86E+01
3	19,1	-19,1	1,20E+02	9,52E+01		7,97E+01	6,91E+01	
4	16,8	-11,4	1,38E+02	1,16E+02	1,15E+02	8,92E+01	7,89E+01	7,85E+01
5	14,0	-4,6		1,36E+02			9,04E+01	
6	10,8	0,4	1,69E+02	1,46E+02	1,46E+02	1,06E+02	9,48E+01	9,51E+01
7	7,3	0,6		1,46E+02			9,54E+01	
8	4,2	-15,7	1,64E+02	1,43E+02	1,40E+02	1,04E+02	9,31E+01	9,22E+01
9	3,6	-69,0		1,28E+02			8,44E+01	
10	6,5	-94,1		1,13E+02			7,79E+01	
11	9,9	-96,2	1,22E+02	9,50E+01	9,13E+01	8,29E+01	6,84E+01	6,78E+01
12	38,3	-14,5	7,31E+01	5,46E+01	4,82E+01	5,38E+01	4,42E+01	4,23E+01
13	36,1	0,1		9,24E+01			6,86E+01	
14	33,1	15,7	1,55E+02	1,47E+02	1,44E+02	9,51E+01	9,81E+01	9,67E+01
15	29,4	33,0		1,86E+02			1,16E+02	
16	25,2	53,1	1,80E+02	1,79E+02	1,81E+02	1,09E+02	1,12E+02	1,17E+02
17	21,1	78,0		1,91E+02			1,18E+02	
18	18,1	109,8	2,07E+02	2,06E+02	2,03E+02	1,22E+02	1,24E+02	1,26E+02
19	17,7	146,3		1,94E+02			1,21E+02	
20	20,2	179,8		1,50E+02			1,01E+02	
21	24,1	-153,8	1,14E+02	1,02E+02	9,54E+01	7,71E+01	7,56E+01	7,13E+01
22	55,9	-10,4	3,84E+01	1,24E+01	1,01E+01	3,17E+01	1,43E+01	1,26E+01
23	54,2	6,0		8,07E+01			6,09E+01	
24	51,9	23,5	9,63E+01	1,09E+02	1,03E+02	6,63E+01	7,42E+01	7,37E+01
25	49,1	42,5		1,31E+02			8,80E+01	
26	45,8	63,8	1,78E+02	1,80E+02	1,82E+02	1,08E+02	1,15E+02	1,17E+02
27	42,7	87,8		2,07E+02			1,29E+02	
28	40,6	114,8	2,18E+02	2,22E+02	2,26E+02	1,26E+02	1,37E+02	1,39E+02
29	40,4	143,2		2,01E+02			1,27E+02	
30	42,1	170,7		1,54E+02			1,03E+02	
31	45,0	-164,5	1,14E+02	1,07E+02	1,03E+02	7,77E+01	8,06E+01	7,91E+01
32	73,3	-8,8	4,45E+01	5,21E+00		3,33E+01	6,60E+00	
33	72,5	5,7		3,72E+01			3,16E+01	
34	71,2	26,4	9,73E+01	9,69E+01	1,01E+02	6,56E+01	6,85E+01	7,07E+01
35	69,6	45,9		1,38E+02			8,97E+01	
36	67,9	67,1	1,93E+02	1,83E+02	1,85E+02	1,13E+02	1,16E+02	1,18E+02
37	66,2	90,6		2,13E+02			1,32E+02	
38	65,1	116,0	2,25E+02	2,21E+02	2,18E+02	1,29E+02	1,38E+02	1,36E+02
39	64,9	142,4		1,87E+02			1,19E+02	
40	65,9	168,2		1,20E+02			8,38E+01	
41	67,5	-167,8	1,09E+02	1,09E+02	1,07E+02	7,38E+01	7,73E+01	7,65E+01
42	90,4	-7,8		0,00E+00			0,00E+00	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
43	90,5	8,9		3,74E+00			4,14E+00	
44	90,5	27,2		7,23E+01			5,28E+01	
45	90,5	46,7		1,40E+02			9,15E+01	
46	90,6	68,0		1,85E+02			1,12E+02	
47	90,6	91,3		2,12E+02			1,22E+02	
48	90,7	116,3		1,98E+02			1,18E+02	
49	90,7	142,2		1,69E+02			1,05E+02	
50	90,6	167,6		9,45E+01			6,36E+01	
51	90,6	-168,6		8,71E+01			6,13E+01	
52	116,2	-9,4		3,10E+01			2,64E+01	
53	118,4	16,2		3,97E+01			3,18E+01	
54	121,6	44,6		1,42E+02			8,86E+01	
55	125,5	77,4		2,01E+02			1,14E+02	
56	128,4	115,6		2,17E+02			1,22E+02	
57	128,0	156,1		1,73E+02			1,06E+02	
58	124,9	-166,6		5,31E+01			4,01E+01	
59	142,3	-14,5		2,54E+01			2,83E+01	
60	145,8	7,8		1,13E+02			7,50E+01	
61	151,1	33,0		1,05E+02			7,47E+01	
62	157,4	64,8		1,84E+02			1,10E+02	
63	162,3	109,8		1,71E+02			1,03E+02	
64	161,7	163,9		1,52E+02			9,53E+01	
65	156,3	-153,8		9,36E+01			6,26E+01	
66	167,2	-47,5		2,54E+01			2,11E+01	
103	21,9	-35,7	6,38E+01	4,40E+01		4,76E+01	4,13E+01	
104	22,4	-44,3	4,88E+01	3,20E+01	3,47E+01	4,03E+01	3,28E+01	3,64E+01
105	22,4	-52,9		3,23E+01			3,37E+01	
106	21,7	-61,4	5,54E+01	3,48E+01	3,72E+01	4,34E+01	3,54E+01	3,91E+01
107	20,4	-69,8		3,77E+01			3,74E+01	
108	18,5	-77,9	6,69E+01	4,18E+01	4,54E+01	5,03E+01	4,01E+01	4,55E+01
109	16,1	-85,5		4,67E+01			4,29E+01	
110	13,2	-92,0		6,20E+01			5,26E+01	
113	39,7	-28,6		1,36E+01			1,80E+01	
114	40,4	-42,4	1,91E+01	1,19E+01	1,23E+01	1,96E+01	1,60E+01	1,83E+01
115	40,3	-56,1		1,40E+01			1,81E+01	
116	39,4	-69,9	3,25E+01	1,92E+01	1,96E+01	2,86E+01	2,34E+01	2,47E+01
117	37,8	-84,1		2,62E+01			2,88E+01	
118	35,4	-98,9	5,70E+01	3,46E+01	3,73E+01	4,34E+01	3,51E+01	4,02E+01
119	32,3	-114,9		4,54E+01			4,24E+01	
120	28,4	-132,7		6,12E+01			5,18E+01	
123	57,0	-26,3		5,62E+00			8,89E+00	
124	57,5	-41,7	1,31E+01	5,05E+00	5,49E+00	1,32E+01	8,21E+00	8,56E+00
125	57,4	-57,1		4,79E+00			7,77E+00	
126	56,8	-72,7	5,85E+00	3,16E+00	5,59E+00	7,93E+00	6,30E+00	9,09E+00

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
127	55,6	-88,6		8,54E+00			1,31E+01	
128	53,7	-105,3	4,93E+01	2,62E+01	2,79E+01	3,95E+01	2,92E+01	2,97E+01
129	51,3	-123,1		4,47E+01			4,23E+01	
130	48,3	-142,6		8,07E+01			6,32E+01	
133	73,8	-22,9		5,87E+00			8,06E+00	
134	74,1	-41,5	5,81E+01	3,12E+00		4,26E+01	5,67E+00	7,15E-01
135	74,1	-57,6		8,05E+00			1,11E+01	
136	73,7	-73,8	2,44E+01	5,69E+00	6,65E+00	2,27E+01	1,00E+01	1,04E+01
137	73,1	-90,4		6,90E+00			1,09E+01	
138	72,1	-107,7	5,50E+01	1,61E+01	1,78E+01	4,33E+01	2,00E+01	2,23E+01
139	70,8	-126,1		7,99E+01			6,32E+01	
140	69,2	-146,0		1,25E+02			9,08E+01	
143	90,4	-25,0		7,88E+00			9,82E+00	
144	90,4	-41,4		7,60E+01			4,88E+01	
145	90,4	-57,7		8,82E+01			5,99E+01	
146	90,4	-74,1		7,78E+01			5,19E+01	
147	90,4	-90,9		9,30E+00			1,42E+01	
148	90,5	-108,4		1,97E+02			1,13E+02	
149	90,5	-126,9		1,26E+02			8,14E+01	
150	90,6	-146,9		1,20E+02			7,57E+01	
153	115,1	-33,7		1,42E+02			8,37E+01	
154	115,0	-57,4		1,99E+02			1,14E+02	
155	115,9	-81,5		2,09E+02			1,19E+02	
156	117,9	-106,8		1,42E+02			8,64E+01	
157	121,0	-134,6		1,49E+01			1,12E+01	
160	140,4	-35,5		1,68E+01			1,84E+01	
161	140,3	-56,1		4,41E+01			3,67E+01	
162	141,8	-76,9		2,99E+01			2,78E+01	
163	145,1	-98,9		3,91E+00			5,21E+00	
164	150,1	-123,5		7,78E+01			5,69E+01	

Tabelle A1.5: Ausbeuten für Detektor 3 für 662 keV und 1332 keV bei leerem, halbvollem und vollem Tank.

Tabelle A1.6: Ausbeuten für Detektor 4

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
1	12,8	132,5	1,80E+02	7,41E+01	3,56E+01	1,27E+02	6,47E+01	3,80E+01
2	9,7	83,8	1,95E+02	7,93E+01	3,83E+01	1,31E+02	6,85E+01	4,02E+01
3	13,0	88,0	2,05E+02	8,35E+01		1,35E+02	7,00E+01	
4	15,9	94,5	2,08E+02	8,19E+01	3,82E+01	1,37E+02	6,98E+01	4,07E+01
5	18,2	102,1		8,03E+01			6,89E+01	
6	20,1	110,2	2,05E+02	7,87E+01	3,64E+01	1,33E+02	6,71E+01	3,90E+01
7	21,3	118,6		7,80E+01			6,62E+01	
8	22,0	127,1	1,93E+02	7,36E+01	3,35E+01	1,28E+02	6,36E+01	3,60E+01
9	22,1	135,7		7,05E+01			6,18E+01	
10	21,5	144,3		6,71E+01			5,92E+01	
11	20,4	152,7	1,64E+02	6,36E+01	3,04E+01	1,14E+02	5,74E+01	3,40E+01
12	23,7	26,2	1,72E+02	8,16E+01	3,64E+01	1,15E+02	6,89E+01	3,80E+01
13	27,9	47,3		8,53E+01			7,09E+01	
14	31,7	65,1	1,92E+02	8,26E+01	3,39E+01	1,23E+02	6,93E+01	3,61E+01
15	34,9	81,1		7,58E+01			6,58E+01	
16	37,3	95,9	1,65E+02	6,19E+01	2,39E+01	1,11E+02	5,59E+01	2,78E+01
17	38,9	110,1		4,92E+01			4,64E+01	
18	39,7	123,9	1,26E+02	4,40E+01	1,66E+01	8,95E+01	4,31E+01	2,04E+01
19	39,8	137,6		5,06E+01			4,79E+01	
20	39,1	151,4		4,91E+01			4,67E+01	
21	37,7	165,5	9,48E+01	4,54E+01	1,83E+01	7,34E+01	4,36E+01	2,29E+01
22	44,2	15,5	1,43E+02	6,95E+01	2,35E+01	9,93E+01	6,16E+01	2,85E+01
23	47,5	37,4		7,31E+01			6,37E+01	
24	50,5	56,9	1,77E+02	7,13E+01	2,31E+01	1,14E+02	6,22E+01	2,72E+01
25	53,0	74,7		5,49E+01			5,12E+01	
26	54,8	91,4	1,43E+02	3,66E+01	1,08E+01	9,86E+01	3,84E+01	1,59E+01
27	56,0	107,3		1,91E+01			2,39E+01	
28	56,7	122,9	7,30E+01	3,26E+01	8,64E+00	5,83E+01	3,36E+01	1,29E+01
29	56,8	138,3		2,76E+01			3,03E+01	
30	56,3	153,7		7,74E+00			1,14E+01	
31	55,2	169,6	7,21E+00	6,61E+00	4,87E+00	9,88E+00	1,03E+01	8,43E+00
32	66,4	12,2	6,69E+01	4,49E+01	3,99E+00	5,51E+01	4,32E+01	7,86E+00
33	67,9	30,9		5,07E+01			4,63E+01	
34	69,9	53,9	1,27E+02	5,35E+01	5,71E+00	9,30E+01	4,95E+01	9,81E+00
35	71,2	72,3		1,23E+02			9,31E+01	
36	72,2	89,6	1,13E+02	1,18E+02	4,48E+01	8,43E+01	8,79E+01	4,22E+01
37	72,9	106,2		1,01E+02			7,97E+01	
38	73,2	122,4	3,69E+01	1,58E+01	1,23E+01	3,47E+01	1,94E+01	1,56E+01
39	73,3	138,5		2,03E+00			4,54E+00	
40	73,0	154,7		2,68E+00			5,13E+00	
41	72,4	171,2	8,10E+00	2,43E+00	2,63E+00	9,86E+00	4,15E+00	4,22E+00
42	89,5	10,4		3,44E-01			7,93E-01	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
43	89,4	33,1		3,18E+01			2,89E+01	
44	89,5	53,1		1,98E+02			1,31E+02	
45	89,5	71,6		1,85E+02			1,22E+02	
46	89,6	89,1		1,08E+01			1,69E+01	
47	89,6	105,9		7,00E+01			5,91E+01	
48	89,6	122,3		7,37E+01			5,62E+01	
49	89,6	138,6		9,72E+01			7,28E+01	
50	89,6	155,0		5,40E+01			4,17E+01	
51	89,6	171,6		1,51E+01			1,49E+01	
52	123,9	13,4		1,19E+02			8,40E+01	
53	120,1	45,4		1,77E+02			1,14E+02	
54	117,1	73,2		1,97E+02			1,26E+02	
55	115,1	98,5		2,33E+02			1,42E+02	
56	114,2	122,6		1,32E+02			9,41E+01	
57	114,3	146,3		6,35E+01			5,57E+01	
58	115,4	170,6		5,93E+00			4,96E+00	
59	155,9	26,2		1,57E+02			1,11E+02	
60	149,6	56,5		1,57E+02			1,07E+02	
61	144,6	81,1		8,86E+01			6,23E+01	
62	141,3	103,1		1,49E+02			9,71E+01	
63	139,7	123,9		1,38E+02			9,22E+01	
64	139,9	144,5		5,54E+01			4,65E+01	
65	141,7	165,5		4,58E+00			8,80E+00	
66	166,9	132,5		7,02E+00			7,15E+00	
103	6,3	85,9	1,84E+02	7,47E+01		1,32E+02	6,29E+01	
104	3,6	111,0	1,68E+02	8,42E+01	6,30E+01	1,22E+02	6,76E+01	5,33E+01
105	4,1	164,3		9,64E+01			7,33E+01	
106	7,2	-179,4	1,52E+02	9,83E+01	8,77E+01	1,11E+02	7,50E+01	7,05E+01
107	10,6	-179,6		9,58E+01			7,33E+01	
108	13,7	175,4	1,50E+02	8,94E+01	7,28E+01	1,08E+02	6,92E+01	6,15E+01
109	16,5	168,6		7,23E+01			5,95E+01	
110	18,7	160,9		6,18E+01			5,34E+01	
113	19,8	-0,2		1,04E+02			7,70E+01	
114	17,4	-33,7	1,31E+02	1,21E+02	1,31E+02	9,73E+01	8,69E+01	9,82E+01
115	17,7	-70,2		1,37E+02			9,67E+01	
116	20,7	-102,0	1,31E+02	1,27E+02	1,39E+02	9,84E+01	9,10E+01	1,03E+02
117	24,8	-126,9		1,34E+02			9,43E+01	
118	28,9	-147,0	1,18E+02	1,18E+02	1,23E+02	9,03E+01	8,68E+01	9,04E+01
119	32,6	-164,3		8,28E+01			6,68E+01	
120	35,5	-179,9		4,04E+01			3,81E+01	
123	41,3	-9,3		8,44E+01			6,56E+01	
124	39,6	-36,8	1,09E+02	1,20E+02	1,26E+02	8,69E+01	8,47E+01	9,49E+01
125	39,8	-65,2		1,29E+02			9,21E+01	
126	41,9	-92,2	1,53E+02	1,50E+02	1,62E+02	1,10E+02	1,04E+02	1,17E+02

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
127	45,0	-116,2		1,44E+02			1,00E+02	
128	48,3	-137,5	1,20E+02	1,15E+02	1,27E+02	9,09E+01	8,36E+01	9,73E+01
129	51,2	-156,5		9,33E+01			7,04E+01	
130	53,5	-174,0		5,21E+01			4,56E+01	
133	64,9	-8,0		5,69E+01			4,57E+01	
134	63,8	-37,6	1,22E+02	1,12E+02	1,25E+02	9,14E+01	8,26E+01	9,41E+01
135	63,9	-64,0		1,47E+02			1,01E+02	
136	65,1	-89,4	1,79E+02	1,60E+02	1,72E+02	1,21E+02	1,09E+02	1,17E+02
137	66,8	-112,9		1,55E+02			1,06E+02	
138	68,6	-134,1	1,51E+02	1,39E+02	1,40E+02	1,08E+02	9,89E+01	1,02E+02
139	70,2	-153,6		7,53E+01			5,99E+01	
140	71,5	-171,7		3,50E+01			3,14E+01	
143	89,4	-12,4		6,64E+01			5,53E+01	
144	89,3	-37,8		1,25E+02			9,39E+01	
145	89,3	-63,7		1,82E+02			1,27E+02	
146	89,4	-88,7		1,93E+02			1,34E+02	
147	89,4	-112,0		1,74E+02			1,21E+02	
148	89,5	-133,3		1,31E+02			9,63E+01	
149	89,5	-152,8		5,48E+01			4,57E+01	
150	89,5	-171,1		1,58E+01			1,66E+01	
153	127,1	-23,9		1,01E+02			7,72E+01	
154	127,4	-64,4		1,85E+02			1,27E+02	
155	124,5	-102,6		1,94E+02			1,32E+02	
156	120,7	-135,4		1,61E+02			1,16E+02	
157	117,5	-163,8		3,14E+01			3,06E+01	
160	161,4	-16,1		1,32E+02			1,03E+02	
161	161,9	-70,2		1,86E+02			1,32E+02	
162	156,9	-115,2		2,15E+02			1,48E+02	
163	150,6	-147,0		1,76E+02			1,24E+02	
164	145,3	-172,2		1,27E+02			1,01E+02	

Tabelle A1.6: Ausbeuten für Detektor 4 für 662 keV und 1332 keV bei leerem, halbvollem und vollem Tank.

Tabelle A1.7: Ausbeuten für Detektor 5

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
1	12,8	-132,5	1,82E+02	7,18E+01	3,63E+01	1,27E+02	6,00E+01	3,73E+01
2	9,7	-83,8	1,98E+02	7,70E+01	3,93E+01	1,39E+02	6,43E+01	4,06E+01
3	6,3	-85,9	1,84E+02	7,47E+01		1,32E+02	6,29E+01	
4	3,6	-111,0	1,68E+02	8,42E+01	6,30E+01	1,22E+02	6,76E+01	5,33E+01
5	4,1	-164,3		9,64E+01			7,33E+01	
6	7,2	179,4	1,52E+02	9,83E+01	8,77E+01	1,11E+02	7,50E+01	7,05E+01
7	10,6	179,6		9,58E+01			7,33E+01	
8	13,7	-175,4	1,50E+02	8,94E+01	7,28E+01	1,08E+02	6,92E+01	6,15E+01
9	16,5	-168,6		7,23E+01			5,95E+01	
10	18,7	-160,9		6,18E+01			5,34E+01	
11	20,4	-152,7	1,75E+02	6,20E+01	3,05E+01	1,22E+02	5,52E+01	3,47E+01
12	23,7	-26,2	1,71E+02	7,71E+01	3,70E+01	1,19E+02	6,33E+01	3,87E+01
13	19,8	0,2		1,04E+02			7,70E+01	
14	17,4	33,7	1,31E+02	1,21E+02	1,31E+02	9,73E+01	8,69E+01	9,82E+01
15	17,7	70,2		1,37E+02			9,67E+01	
16	20,7	102,0	1,31E+02	1,27E+02	1,39E+02	9,84E+01	9,10E+01	1,03E+02
17	24,8	126,9		1,34E+02			9,43E+01	
18	28,9	147,0	1,18E+02	1,18E+02	1,23E+02	9,03E+01	8,68E+01	9,04E+01
19	32,6	164,3		8,28E+01			6,68E+01	
20	35,5	179,9		4,04E+01			3,81E+01	
21	37,7	-165,5	1,05E+02	4,78E+01	1,99E+01	8,21E+01	4,38E+01	2,40E+01
22	44,2	-15,5	1,42E+02	6,64E+01	2,54E+01	1,04E+02	5,48E+01	2,89E+01
23	41,3	9,3		8,44E+01			6,56E+01	
24	39,6	36,8	1,09E+02	1,20E+02	1,26E+02	8,69E+01	8,47E+01	9,49E+01
25	39,8	65,2		1,29E+02			9,21E+01	
26	41,9	92,2	1,53E+02	1,50E+02	1,62E+02	1,10E+02	1,04E+02	1,17E+02
27	45,0	116,2		1,44E+02			1,00E+02	
28	48,3	137,5	1,20E+02	1,15E+02	1,27E+02	9,09E+01	8,36E+01	9,73E+01
29	51,2	156,5		9,33E+01			7,04E+01	
30	53,5	174,0		5,21E+01			4,56E+01	
31	55,2	-169,6	1,08E+01	1,29E+01	1,01E+01	1,49E+01	1,47E+01	1,53E+01
32	66,4	-12,2	9,53E+01	6,06E+01	9,64E+00	7,49E+01	4,96E+01	1,38E+01
33	64,9	8,0		5,69E+01			4,57E+01	
34	63,8	37,6	1,22E+02	1,12E+02	1,25E+02	9,14E+01	8,26E+01	9,41E+01
35	63,9	64,0		1,47E+02			1,01E+02	
36	65,1	89,4	1,79E+02	1,60E+02	1,72E+02	1,21E+02	1,09E+02	1,17E+02
37	66,8	112,9		1,55E+02			1,06E+02	
38	68,6	134,1	1,51E+02	1,39E+02	1,40E+02	1,08E+02	9,89E+01	1,02E+02
39	70,2	153,6		7,53E+01			5,99E+01	
40	71,5	171,7		3,50E+01			3,14E+01	
41	72,4	-171,2	1,07E+01	2,73E+00	2,82E+00	1,33E+01	4,79E+00	4,71E+00
42	89,5	-10,4		1,18E+00			4,86E+00	

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
43	89,4	12,4		6,64E+01			5,53E+01	
44	89,3	37,8		1,25E+02			9,39E+01	
45	89,3	63,7		1,82E+02			1,27E+02	
46	89,4	88,7		1,93E+02			1,34E+02	
47	89,4	112,0		1,74E+02			1,21E+02	
48	89,5	133,3		1,31E+02			9,63E+01	
49	89,5	152,8		5,48E+01			4,57E+01	
50	89,5	171,1		1,58E+01			1,66E+01	
51	89,6	-171,6		2,19E+01			2,16E+01	
52	123,9	-13,4		9,05E+01			6,89E+01	
53	127,1	23,9		1,01E+02			7,72E+01	
54	127,4	64,4		1,85E+02			1,27E+02	
55	124,5	102,6		1,94E+02			1,32E+02	
56	120,7	135,4		1,61E+02			1,16E+02	
57	117,5	163,8		3,14E+01			3,06E+01	
58	115,4	-170,6		1,32E+01			1,68E+01	
59	155,9	-26,2		1,97E+02			1,37E+02	
60	161,4	16,1		1,32E+02			1,03E+02	
61	161,9	70,2		1,86E+02			1,32E+02	
62	156,9	115,2		2,15E+02			1,48E+02	
63	150,6	147,0		1,76E+02			1,24E+02	
64	145,3	172,2		1,27E+02			1,01E+02	
65	141,7	-165,5		3,58E+00			7,27E+00	
66	166,9	-132,5		1,43E+01			1,50E+01	
103	13,0	-88,0	2,05E+02	8,35E+01		1,35E+02	7,00E+01	
104	15,9	-94,5	2,08E+02	8,19E+01	3,82E+01	1,37E+02	6,98E+01	4,07E+01
105	18,2	-102,1		8,03E+01			6,89E+01	
106	20,1	-110,2	2,05E+02	7,87E+01	3,64E+01	1,33E+02	6,71E+01	3,90E+01
107	21,3	-118,6		7,80E+01			6,62E+01	
108	22,0	-127,1	1,93E+02	7,36E+01	3,35E+01	1,28E+02	6,36E+01	3,60E+01
109	22,1	-135,7		7,05E+01			6,18E+01	
110	21,5	-144,3		6,71E+01			5,92E+01	
113	27,9	-47,3		8,53E+01			7,09E+01	
114	31,7	-65,1	1,92E+02	8,26E+01	3,39E+01	1,23E+02	6,93E+01	3,61E+01
115	34,9	-81,1		7,58E+01			6,58E+01	
116	37,3	-95,9	1,65E+02	6,19E+01	2,39E+01	1,11E+02	5,59E+01	2,78E+01
117	38,9	-110,1		4,92E+01			4,64E+01	
118	39,7	-123,9	1,26E+02	4,40E+01	1,66E+01	8,95E+01	4,31E+01	2,04E+01
119	39,8	-137,6		5,06E+01			4,79E+01	
120	39,1	-151,4		4,91E+01			4,67E+01	
123	47,5	-37,4		7,31E+01			6,37E+01	
124	50,5	-56,9	1,77E+02	7,13E+01	2,31E+01	1,14E+02	6,22E+01	2,72E+01
125	53,0	-74,7		5,49E+01			5,12E+01	
126	54,8	-91,4	1,43E+02	3,66E+01	1,08E+01	9,86E+01	3,84E+01	1,59E+01

Messpunkt	Polarwinkel	Azimutwinkel	Ausbeute für 662 keV in cm ²			Ausbeute für 1332 keV in cm ²		
			leer	halb	voll	leer	halb	voll
127	56,0	-107,3		1,91E+01			2,39E+01	
128	56,7	-122,9	7,30E+01	3,26E+01	8,64E+00	5,83E+01	3,36E+01	1,29E+01
129	56,8	-138,3		2,76E+01			3,03E+01	
130	56,3	-153,7		7,74E+00			1,14E+01	
133	67,9	-30,9		5,07E+01			4,63E+01	
134	69,9	-53,9	1,27E+02	5,35E+01	5,71E+00	9,30E+01	4,95E+01	9,81E+00
135	71,2	-72,3		1,23E+02			9,31E+01	
136	72,2	-89,6	1,13E+02	1,18E+02	4,48E+01	8,43E+01	8,79E+01	4,22E+01
137	72,9	-106,2		1,01E+02			7,97E+01	
138	73,2	-122,4	3,69E+01	1,58E+01	1,23E+01	3,47E+01	1,94E+01	1,56E+01
139	73,3	-138,5		2,03E+00			4,54E+00	
140	73,0	-154,7		2,68E+00			5,13E+00	
143	89,4	-33,1		3,18E+01			2,89E+01	
144	89,5	-53,1		1,98E+02			1,31E+02	
145	89,5	-71,6		1,85E+02			1,22E+02	
146	89,6	-89,1		1,08E+01			1,69E+01	
147	89,6	-105,9		7,00E+01			5,91E+01	
148	89,6	-122,3		7,37E+01			5,62E+01	
149	89,6	-138,6		9,72E+01			7,28E+01	
150	89,6	-155,0		5,40E+01			4,17E+01	
153	120,1	-45,4		1,77E+02			1,14E+02	
154	117,1	-73,2		1,97E+02			1,26E+02	
155	115,1	-98,5		2,33E+02			1,42E+02	
156	114,2	-122,6		1,32E+02			9,41E+01	
157	114,3	-146,3		6,35E+01			5,57E+01	
160	149,6	-56,5		1,57E+02			1,07E+02	
161	144,6	-81,1		8,86E+01			6,23E+01	
162	141,3	-103,1		1,49E+02			9,71E+01	
163	139,7	-123,9		1,38E+02			9,22E+01	
164	139,9	-144,5		5,54E+01			4,65E+01	

Tabelle A1.7: Ausbeuten für Detektor 5 für 662 keV und 1332 keV bei leerem, halbvollem und vollem Tank.

Anhang 1.4: Durchgeführte Messflüge

Gespeichert unter	Art des Fluges	Höhe des Koordinatenursprungs in m	Tankfüllung des Haupttanks in kg	Bewuchs	Strahler und Position
F131014B	Bahnen	90	163	Wiese	Untergrund
F131014D	Schwebflug	27	138	Wiese	Untergrund
F131014E	Schwebflug	130	122	Wiese	Untergrund
F131014F	Schwebflug	57	97	Wiese	Untergrund
F131014G	Schwebflug	90	83	Wiese	Untergrund
F131014H	Schwebflug	30	61	Wiese	Untergrund
F131014J	am Boden	1,17	45	Wiese	Untergrund
F131014M	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 20 m rechts
F131014N	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 10 m rechts
F131014O	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 5 m rechts
F131014P	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 5 m links
F131014Q	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 10 m links
F131014R	am Boden	1,17	45	Wiese	Cs-137 20 m links
F131014S	Schwebflug	30	30	Wiese	Cs-137
F131014T	Schwebflug	60	16	Wiese	Cs-137
F131014U	Schwebflug	87	0	Wiese	Cs-137
G131014D	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 5 m rechts
G131014E	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 10 m rechts
G131014F	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 20 m rechts
G131014G	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 5 m links
G131014H	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 10 m links
G131014I	am Boden	1,17	82	Wiese	Co-60 20 m links
D131129C	Schwebflug	25	268	Wiese	Co-60
D131129D	Schwebflug	81	250	Wiese	Co-60
D131129E	Schwebflug	52	226	Wiese	Co-60
D131129F	Schwebflug	27	212	Wiese	Co-60
D131129G	Schwebflug	25	196	Wiese	Co-60 ca. 40 m links
D131129H	Schwebflug	26	182	Wiese	Co-60 ca. 40 m rechts
D131129I	Überflug	30	170	Wiese	Co-60
D131129J	Schwebflug	25	140	Wiese	Cs-137
D131129K	Schwebflug	81	130	Wiese	Cs-137
D131129L	Schwebflug	54	115	Wiese	Cs-137
D131129M	Schwebflug	26	100	Wiese	Cs-137
D131129N	Überflug	30	80	Wiese	Cs-137
D131129O	Schwebflug	24	80	Wiese	Cs-137 ca. 40 m links
D131129P	Schwebflug	25	70	Wiese	Cs-137 ca. 40 m rechts
D131129Q	Bahnen	30	40	Wiese	Untergrund

Gespeichert unter	Art des Fluges	Höhe des Koordinatenursprungs in m	Tankfüllung des Haupttanks in kg	Bewuchs	Strahler und Position
D131129R	Schwebflug	30	20	Wiese	Untergrund
D131129S	Schwebflug	26	290	Wald	Cs-137
D131129T	Schwebflug	81	270	Wald	Cs-137
D131129U	Schwebflug	52	260	Wald	Cs-137
D131129V	Schwebflug	25	245	Wald	Cs-137 ca. 40 m links
E131129A	Schwebflug	27	210	Wald	Co-60
E131129B	Schwebflug	93	200	Wald	Co-60
E131129C	Schwebflug	59	180	Wald	Co-60
E131129D	Schwebflug	29	170	Wald	Co-60 ca. 40 m links
E131129E	Schwebflug	30	150	Wald	Untergrund

Tabelle A1.8: Details zu den am 14.10 und 29.11.2013 durchgeführten Messflügen.

Anhang 1.5: Ergebnisse der Messflüge und Vergleich mit der Rechnung

Messung	Messzeit in s	Tankfüllung in kg	Tankfüllung bezogen auf 263 kg	Flughöhe in m	Peakfläche aus Spektrum	Aktivität in Bq/m ²
131014D	128	138	0,525	27	10425	13574
131014E	312	122	0,464	130	3954	9994
131014F	122	97	0,369	57	4805	10473
131014G	300	83	0,316	90	7452	10643
131014H	121	61	0,232	30	8220	10789
131014J	497	45	0,171	1,17	76900	12118
131129C	178	268	1,000	25	13212	13007
131129D	300	250	0,951	81	6697	10010
131129E	180	226	0,859	52	7912	12333
131129F	187	212	0,806	27	13689	13012
					Mittelwert	11595

Tabelle A1.9: Ermittlung eines Cs-137-Untergrundes aus Flügen über einer Wiese (Summe aller vier NaI-Detektoren). Dabei wurde keine Vegetation berücksichtigt und eine homogene Kontamination der ersten 0,1 m des Erdreichs angenommen (vgl. Kap. 6.2).

Messung	Messzeit in s	Tankfüllung in kg	Tankfüllung bezogen auf 263 kg	Flughöhe in m	ber. Peakfläche für Untergr. Cs-137 12 kBq/m ² in counts	ber. Peakfläche für Punktquelle Cs-137 4,83E7 Bq in counts	berechnete Peakfläche Summe	gemessene Peakfläche in counts	Abweichung in %
131014S	123	30	0,114	30	9793	17377	27170	22100	-18,7
131014T	181	16	0,061	60	8871	4990	13861	13980	0,9
131014U	337	0	0,000	87	11336	4567	15903	15010	-5,6

Tabelle A1.10: Vergleich zwischen Messung und Rechnung für Schwebflüge über einer Cs-137-Punktquelle (Summe aller vier NaI-Detektoren).

Messung	Messzeit in s	ber. Peakfläche für Untergr. Cs-137 12 kBq/m ²	ber. Peakfläche für Punktquelle Cs-137 4,83E7 Bq in counts	berechnete Peakfläche Summe	gemessene Peakfläche in counts	Abweichung in %	Entfernung des Strahlers in m	Summe berechnet in counts	Summe gemessen in counts	Abweichung in %
131014Mr	121	9463	32745	42208	34580	-18,1	20 rechts	55654	46890	-15,7
131014MI	121	9111	4335	13446	12310	-8,4	20 rechts			
131014Nr	49	3851	57267	61118	76290	24,8	10 rechts	76403	104240	36,4
131014NI	49	3709	11576	15285	27950	82,9	10 rechts			
131014Or	58	4523	265990	270513	296420	9,6	5 rechts	355266	364630	2,6
131014OI	58	4355	80398	84753	68210	-19,5	5 rechts			
131014Pr	58	4523	80439	84962	62640	-26,3	5 links	355445	360460	1,4
131014PI	58	4355	266128	270483	297820	10,1	5 links			
131014Qr	60	4705	14142	18847	33520	77,9	10 links	93342	114880	23,1
131014Ql	60	4531	69964	74495	81360	9,2	10 links			
131014Rr	61	4801	2199	7000	10490	49,9	20 links	28235	33600	19,0
131014RI	61	4622	16613	21235	23110	8,8	20 links			

Tabelle A1.11: Vergleich zwischen Messung und Rechnung für eine seitlich neben dem stehenden Hubschrauber liegende Cs-137-Punktquelle (Tankfüllung 45 kg, bezogen auf 263 kg entspricht dies 0,171, Höhe des Koordinatenursprungs 1,17 m) mit Unterscheidung zwischen links und rechts liegenden Detektoren sowie in den letzten drei Spalten der Summe aller vier NaI-Detektoren.

Messung	Messzeit in s	ber. Peakfläche für Punktquelle Co-60 6,06E6 Bq in counts	gemessene Peak- fläche in counts	Abweichung in %	Entfernung des Strah- lers in m	Summe berechnet in counts	Summe gemessen in counts	Abweichung in %
131014Dr	73	31866	33700	5,8	5 rechts	43472	41840	-3,8
131014DI	73	11606	8140	-29,9	5 rechts			
131014Er	114	12671	12260	-3,2	10 rechts	16055	17380	8,3
131014EI	114	3384	5120	51,3	10 rechts			
131014Fr	231	6153	4540	-26,2	20 rechts	7389	5427	-26,6
131014FI	231	1236	887	-28,2	20 rechts			
131014Gr	87	13852	9350	-32,5	5 links	50736	43250	-14,8
131014GI	87	36884	33900	-8,1	5 links			
131014Hr	119	3550	4740	33,5	10 links	16609	16920	1,9
131014HI	119	13059	12180	-6,7	10 links			
131014Ir	199	1064	1882	76,9	20 links	6307	5852	-7,2
131014II	199	5243	3970	-24,3	20 links			

Tabelle A1.12: Vergleich zwischen Messung und Rechnung für eine seitlich neben dem stehenden Hubschrauber liegende Co-60-Punktquelle (Tankfüllung 82 kg, bezogen auf 263 kg entspricht dies 0,312, Höhe des Koordinatenursprungs 1,17 m) mit Unterscheidung zwischen links und rechts liegenden Detektoren sowie in den letzten drei Spalten der Summe aller vier NaI-Detektoren.

Messung	Messzeit in s	Tankfüllung in kg	Tankfüllung in %	Flughöhe in m	ber. Peakfläche für Punktquelle Co-60 6,6E7 Bq in counts	gemessen in counts	Abweichung in %
131129C	174	268	1,000	25	884	498	-43,7
131129D	292	250	0,951	81	98	43	-56,1
131129E	175	226	0,859	52	172	77	-55,2
131129F	183	212	0,806	27	789	487	-38,3
131129G	175	196	0,745	25	201	104	-48,3
131129H	177	182	0,692	26	199	140	-29,6
131129I	53	170	0,646	30	18	9	-50,0

Tabelle A1.13: Vergleich zwischen Messung und Rechnung für Schwebflüge über einer Co-60-Punktquelle (Ge-Detektor).

Anhang 1.6: Nachweisgrenzen ausgewählter Testflüge für die 662-keV-Linie von Cs-137 beim Aufspüren einer Punktquelle

Die folgenden Tabellen enthalten die den Abbildungen in Kapitel 7.2 zugrunde liegenden Rechenergebnisse für die Nachweisgrenze unter den dort beschriebenen Randbedingungen als Funktion der Messzeit und des seitlichen Abstandes zu einem Punktstrahler auf ebenem Gelände. Folgende Parameter wurden für alle Rechnungen identisch gewählt:

Aktivitätsvorbelastung des Bodens A_0 : 120 kBq/m³ bei einer Eindringtiefe von 0,1 m

Relative Unsicherheit der Aktivitätsvorbelastung $u_{\text{rel}}(A_0)$: 12 %

Relative Unsicherheit des Kalibrierfaktors $u_{\text{rel}}(F_{662 \text{ keV}})$: 10 % (NaI) bzw. 5 % (Ge)

Absorptionskoeffizient des Bodens $\mu_{\text{Boden},662 \text{ keV}}$: 9,256 E-3 / m

Absorptionskoeffizient der Luft $\mu_{\text{Luft},662 \text{ keV}}$: 11,78 / m

Die Kalibrierfaktoren für die Punktquelle bzw. die Aktivitätsvorbelastung wurden jeweils der Messanordnung und dem Tankfüllstand entsprechend berechnet, das Berechnungsskript wurde in PYTHON geschrieben und ist auf dem Datenträger mit der Berechnungssoftware vorhanden und kann leicht für andere Szenarien angepasst bzw. für eine Berechnung während des Fluges verwendet werden. Es ist keine grafische Benutzeroberfläche hierfür erstellt worden. Zur Berechnung eines Einzelwertes kann alternativ kann das in Abschnitt 7.1.5 vorgestellte Tabellenkalkulationsblatt verwendet werden, die Parameter A_0 und $F_{E,V}$ müssen analog dem dort vorgestellten Beispiel mit der Aerogammasoftware bestimmt werden.

Die folgenden Ergebnistabellen sind für $k_{1-\alpha} = k_{1-\beta} = k = 1$ bzw. Irrtumswahrscheinlichkeiten von 15,8 % berechnet worden. Für andere Werte von k können die Resultate hier in erster Näherung aufgrund der unterstellten moderaten Unsicherheiten der Kalibrierfaktoren bei ebenem Gelände einfach mit k multipliziert werden.

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	2,30E+07	4,51E+07	1,26E+08	2,78E+08	5,84E+08	1,14E+09	2,05E+09	3,51E+09	5,77E+09
1,0	1,76E+07	3,43E+07	9,51E+07	2,09E+08	4,36E+08	8,45E+08	1,52E+09	2,61E+09	4,30E+09
1,5	1,60E+07	3,03E+07	8,28E+07	1,81E+08	3,75E+08	7,24E+08	1,31E+09	2,23E+09	3,68E+09
2,0	1,57E+07	2,86E+07	7,65E+07	1,66E+08	3,42E+08	6,56E+08	1,18E+09	2,02E+09	3,32E+09
2,5	1,57E+07	2,79E+07	7,29E+07	1,58E+08	3,20E+08	6,13E+08	1,10E+09	1,88E+09	3,09E+09
3,0	1,61E+07	2,78E+07	7,10E+07	1,53E+08	3,06E+08	5,82E+08	1,04E+09	1,78E+09	2,92E+09
3,5	1,66E+07	2,81E+07	7,01E+07	1,49E+08	2,97E+08	5,60E+08	9,99E+08	1,70E+09	2,80E+09
4,0	1,72E+07	2,86E+07	6,99E+07	1,48E+08	2,91E+08	5,45E+08	9,67E+08	1,65E+09	2,70E+09
4,5	1,79E+07	2,94E+07	7,02E+07	1,47E+08	2,87E+08	5,34E+08	9,43E+08	1,60E+09	2,62E+09
5,0	1,86E+07	3,03E+07	7,09E+07	1,48E+08	2,86E+08	5,26E+08	9,25E+08	1,56E+09	2,56E+09
5,5	1,94E+07	3,13E+07	7,19E+07	1,49E+08	2,85E+08	5,22E+08	9,12E+08	1,54E+09	2,51E+09
6,0	2,03E+07	3,23E+07	7,32E+07	1,50E+08	2,86E+08	5,19E+08	9,03E+08	1,52E+09	2,47E+09
6,5	2,11E+07	3,34E+07	7,46E+07	1,52E+08	2,87E+08	5,19E+08	8,98E+08	1,50E+09	2,44E+09
7,0	2,20E+07	3,46E+07	7,63E+07	1,53E+08	2,89E+08	5,20E+08	8,95E+08	1,49E+09	2,41E+09
7,5	2,29E+07	3,58E+07	7,81E+07	1,56E+08	2,92E+08	5,22E+08	8,95E+08	1,48E+09	2,40E+09
8,0	2,39E+07	3,71E+07	7,99E+07	1,58E+08	2,95E+08	5,25E+08	8,97E+08	1,48E+09	2,39E+09
8,5	2,48E+07	3,83E+07	8,19E+07	1,61E+08	2,98E+08	5,29E+08	9,00E+08	1,48E+09	2,38E+09
9,0	2,58E+07	3,96E+07	8,40E+07	1,64E+08	3,02E+08	5,34E+08	9,04E+08	1,49E+09	2,38E+09
9,5	2,67E+07	4,09E+07	8,62E+07	1,67E+08	3,06E+08	5,39E+08	9,10E+08	1,49E+09	2,38E+09
10,0	2,77E+07	4,22E+07	8,84E+07	1,70E+08	3,10E+08	5,44E+08	9,17E+08	1,50E+09	2,38E+09

Tabelle A1.13: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 27 m, einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h und einem Tankfüllstand von 52 % (vgl. Flug F131014 D).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	2,36E+07	4,59E+07	1,27E+08	2,80E+08	5,84E+08	1,13E+09	2,04E+09	3,50E+09	5,76E+09
1,0	2,01E+07	3,66E+07	9,81E+07	2,13E+08	4,38E+08	8,42E+08	1,51E+09	2,59E+09	4,26E+09
1,5	1,99E+07	3,45E+07	8,81E+07	1,90E+08	3,81E+08	7,23E+08	1,29E+09	2,21E+09	3,63E+09
2,0	2,08E+07	3,47E+07	8,47E+07	1,79E+08	3,53E+08	6,60E+08	1,17E+09	1,99E+09	3,28E+09
2,5	2,21E+07	3,60E+07	8,43E+07	1,76E+08	3,40E+08	6,26E+08	1,10E+09	1,86E+09	3,05E+09
3,0	2,37E+07	3,78E+07	8,57E+07	1,76E+08	3,35E+08	6,08E+08	1,06E+09	1,77E+09	2,89E+09
3,5	2,55E+07	4,00E+07	8,81E+07	1,77E+08	3,34E+08	6,01E+08	1,03E+09	1,72E+09	2,79E+09
4,0	2,73E+07	4,24E+07	9,14E+07	1,81E+08	3,37E+08	6,00E+08	1,02E+09	1,69E+09	2,73E+09
4,5	2,92E+07	4,48E+07	9,51E+07	1,85E+08	3,42E+08	6,04E+08	1,02E+09	1,68E+09	2,69E+09
5,0	3,11E+07	4,74E+07	9,93E+07	1,91E+08	3,48E+08	6,11E+08	1,03E+09	1,68E+09	2,68E+09
5,5	3,30E+07	5,01E+07	1,04E+08	1,97E+08	3,56E+08	6,20E+08	1,04E+09	1,69E+09	2,68E+09
6,0	3,51E+07	5,28E+07	1,08E+08	2,04E+08	3,65E+08	6,31E+08	1,05E+09	1,70E+09	2,69E+09
6,5	3,71E+07	5,55E+07	1,13E+08	2,11E+08	3,75E+08	6,44E+08	1,07E+09	1,72E+09	2,71E+09
7,0	3,91E+07	5,83E+07	1,18E+08	2,18E+08	3,85E+08	6,58E+08	1,09E+09	1,75E+09	2,74E+09
7,5	4,12E+07	6,12E+07	1,23E+08	2,26E+08	3,96E+08	6,73E+08	1,11E+09	1,77E+09	2,78E+09
8,0	4,33E+07	6,40E+07	1,28E+08	2,34E+08	4,08E+08	6,89E+08	1,13E+09	1,80E+09	2,82E+09
8,5	4,54E+07	6,69E+07	1,33E+08	2,42E+08	4,20E+08	7,06E+08	1,15E+09	1,84E+09	2,86E+09
9,0	4,75E+07	6,98E+07	1,38E+08	2,50E+08	4,32E+08	7,24E+08	1,18E+09	1,87E+09	2,90E+09
9,5	4,96E+07	7,28E+07	1,43E+08	2,59E+08	4,44E+08	7,42E+08	1,20E+09	1,90E+09	2,95E+09
10,0	5,17E+07	7,58E+07	1,49E+08	2,67E+08	4,57E+08	7,61E+08	1,23E+09	1,94E+09	3,00E+09

Tabelle A1.14: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 27 m, einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h und einem Tankfüllstand von 52 % (vgl. Flug F131014 D).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,09E+08	1,28E+08	2,22E+08	4,27E+08	7,39E+08	1,23E+09	2,01E+09	3,21E+09	5,19E+09
1,0	7,95E+07	9,29E+07	1,62E+08	3,11E+08	5,38E+08	8,96E+08	1,46E+09	2,34E+09	3,76E+09
1,5	6,73E+07	7,87E+07	1,37E+08	2,62E+08	4,54E+08	7,55E+08	1,23E+09	1,97E+09	3,16E+09
2,0	6,09E+07	7,12E+07	1,24E+08	2,35E+08	4,06E+08	6,75E+08	1,10E+09	1,76E+09	2,82E+09
2,5	5,73E+07	6,68E+07	1,15E+08	2,18E+08	3,76E+08	6,24E+08	1,01E+09	1,62E+09	2,59E+09
3,0	5,54E+07	6,42E+07	1,10E+08	2,07E+08	3,55E+08	5,88E+08	9,55E+08	1,53E+09	2,43E+09
3,5	5,44E+07	6,26E+07	1,06E+08	1,98E+08	3,40E+08	5,63E+08	9,12E+08	1,46E+09	2,31E+09
4,0	5,42E+07	6,18E+07	1,04E+08	1,92E+08	3,29E+08	5,44E+08	8,80E+08	1,40E+09	2,22E+09
4,5	5,43E+07	6,16E+07	1,03E+08	1,88E+08	3,21E+08	5,29E+08	8,55E+08	1,36E+09	2,15E+09
5,0	5,46E+07	6,18E+07	1,02E+08	1,85E+08	3,15E+08	5,19E+08	8,37E+08	1,33E+09	2,09E+09
5,5	5,52E+07	6,23E+07	1,02E+08	1,84E+08	3,11E+08	5,11E+08	8,22E+08	1,30E+09	2,05E+09
6,0	5,59E+07	6,31E+07	1,02E+08	1,83E+08	3,08E+08	5,05E+08	8,12E+08	1,28E+09	2,01E+09
6,5	5,68E+07	6,40E+07	1,03E+08	1,82E+08	3,06E+08	5,01E+08	8,04E+08	1,27E+09	1,98E+09
7,0	5,78E+07	6,51E+07	1,04E+08	1,83E+08	3,06E+08	4,99E+08	7,98E+08	1,26E+09	1,96E+09
7,5	5,88E+07	6,63E+07	1,05E+08	1,83E+08	3,06E+08	4,98E+08	7,95E+08	1,25E+09	1,94E+09
8,0	6,00E+07	6,76E+07	1,06E+08	1,85E+08	3,06E+08	4,98E+08	7,93E+08	1,24E+09	1,93E+09
8,5	6,13E+07	6,89E+07	1,08E+08	1,86E+08	3,08E+08	4,99E+08	7,93E+08	1,24E+09	1,92E+09
9,0	6,26E+07	7,03E+07	1,10E+08	1,88E+08	3,09E+08	5,00E+08	7,94E+08	1,24E+09	1,91E+09
9,5	6,39E+07	7,18E+07	1,11E+08	1,90E+08	3,11E+08	5,03E+08	7,96E+08	1,24E+09	1,91E+09
10,0	6,53E+07	7,33E+07	1,13E+08	1,92E+08	3,14E+08	5,05E+08	8,00E+08	1,24E+09	1,91E+09

Tabelle A1.15: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 57 m, einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h und einem Tankfüllstand von 37 % (vgl. Flug F131014 F).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,10E+08	1,28E+08	2,23E+08	4,28E+08	7,42E+08	1,23E+09	2,01E+09	3,22E+09	5,19E+09
1,0	8,16E+07	9,54E+07	1,65E+08	3,15E+08	5,44E+08	9,04E+08	1,47E+09	2,36E+09	3,77E+09
1,5	7,24E+07	8,39E+07	1,43E+08	2,70E+08	4,65E+08	7,70E+08	1,25E+09	2,00E+09	3,18E+09
2,0	6,95E+07	7,93E+07	1,33E+08	2,47E+08	4,22E+08	6,97E+08	1,13E+09	1,80E+09	2,85E+09
2,5	6,89E+07	7,80E+07	1,29E+08	2,34E+08	3,97E+08	6,54E+08	1,06E+09	1,67E+09	2,64E+09
3,0	6,95E+07	7,84E+07	1,27E+08	2,27E+08	3,83E+08	6,28E+08	1,01E+09	1,59E+09	2,50E+09
3,5	7,09E+07	7,99E+07	1,27E+08	2,24E+08	3,75E+08	6,12E+08	9,80E+08	1,54E+09	2,40E+09
4,0	7,28E+07	8,20E+07	1,29E+08	2,24E+08	3,72E+08	6,04E+08	9,62E+08	1,51E+09	2,34E+09
4,5	7,52E+07	8,45E+07	1,32E+08	2,26E+08	3,72E+08	6,01E+08	9,54E+08	1,49E+09	2,30E+09
5,0	7,78E+07	8,73E+07	1,35E+08	2,29E+08	3,74E+08	6,02E+08	9,52E+08	1,48E+09	2,27E+09
5,5	8,06E+07	9,03E+07	1,39E+08	2,33E+08	3,78E+08	6,05E+08	9,54E+08	1,48E+09	2,26E+09
6,0	8,35E+07	9,34E+07	1,43E+08	2,37E+08	3,83E+08	6,11E+08	9,60E+08	1,48E+09	2,26E+09
6,5	8,66E+07	9,67E+07	1,47E+08	2,43E+08	3,90E+08	6,19E+08	9,68E+08	1,49E+09	2,27E+09
7,0	8,98E+07	1,00E+08	1,52E+08	2,49E+08	3,98E+08	6,28E+08	9,79E+08	1,50E+09	2,28E+09
7,5	9,31E+07	1,04E+08	1,56E+08	2,55E+08	4,06E+08	6,39E+08	9,91E+08	1,52E+09	2,30E+09
8,0	9,64E+07	1,07E+08	1,61E+08	2,62E+08	4,15E+08	6,50E+08	1,01E+09	1,54E+09	2,32E+09
8,5	9,98E+07	1,11E+08	1,66E+08	2,69E+08	4,25E+08	6,63E+08	1,02E+09	1,56E+09	2,35E+09
9,0	1,03E+08	1,14E+08	1,71E+08	2,76E+08	4,35E+08	6,76E+08	1,04E+09	1,58E+09	2,37E+09
9,5	1,07E+08	1,18E+08	1,76E+08	2,84E+08	4,45E+08	6,90E+08	1,06E+09	1,60E+09	2,41E+09
10,0	1,10E+08	1,22E+08	1,82E+08	2,91E+08	4,56E+08	7,05E+08	1,08E+09	1,63E+09	2,44E+09

Tabelle A1.16: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 57 m, einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h und einem Tankfüllstand von 37 % (vgl. Flug F131014 F).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,11E+08	1,26E+08	2,16E+08	3,97E+08	7,09E+08	1,22E+09	2,04E+09	3,32E+09	5,32E+09
1,0	8,11E+07	9,19E+07	1,58E+08	2,90E+08	5,18E+08	8,90E+08	1,49E+09	2,42E+09	3,88E+09
1,5	6,92E+07	7,83E+07	1,34E+08	2,46E+08	4,38E+08	7,53E+08	1,26E+09	2,04E+09	3,27E+09
2,0	6,29E+07	7,12E+07	1,21E+08	2,22E+08	3,94E+08	6,75E+08	1,13E+09	1,83E+09	2,92E+09
2,5	5,94E+07	6,72E+07	1,13E+08	2,06E+08	3,65E+08	6,25E+08	1,04E+09	1,69E+09	2,69E+09
3,0	5,74E+07	6,49E+07	1,08E+08	1,96E+08	3,46E+08	5,90E+08	9,81E+08	1,59E+09	2,53E+09
3,5	5,63E+07	6,36E+07	1,05E+08	1,89E+08	3,32E+08	5,66E+08	9,38E+08	1,52E+09	2,41E+09
4,0	5,60E+07	6,31E+07	1,03E+08	1,84E+08	3,22E+08	5,47E+08	9,06E+08	1,46E+09	2,32E+09
4,5	5,60E+07	6,31E+07	1,02E+08	1,81E+08	3,15E+08	5,34E+08	8,82E+08	1,42E+09	2,25E+09
5,0	5,64E+07	6,35E+07	1,02E+08	1,79E+08	3,10E+08	5,23E+08	8,63E+08	1,39E+09	2,19E+09
5,5	5,71E+07	6,41E+07	1,02E+08	1,78E+08	3,07E+08	5,16E+08	8,49E+08	1,36E+09	2,15E+09
6,0	5,79E+07	6,50E+07	1,03E+08	1,78E+08	3,05E+08	5,10E+08	8,38E+08	1,34E+09	2,11E+09
6,5	5,88E+07	6,60E+07	1,04E+08	1,78E+08	3,04E+08	5,07E+08	8,30E+08	1,33E+09	2,09E+09
7,0	5,99E+07	6,72E+07	1,05E+08	1,79E+08	3,04E+08	5,05E+08	8,24E+08	1,32E+09	2,06E+09
7,5	6,10E+07	6,84E+07	1,06E+08	1,80E+08	3,04E+08	5,05E+08	8,21E+08	1,31E+09	2,05E+09
8,0	6,23E+07	6,98E+07	1,07E+08	1,81E+08	3,06E+08	5,05E+08	8,20E+08	1,30E+09	2,03E+09
8,5	6,35E+07	7,13E+07	1,09E+08	1,83E+08	3,07E+08	5,06E+08	8,20E+08	1,30E+09	2,03E+09
9,0	6,49E+07	7,28E+07	1,11E+08	1,85E+08	3,09E+08	5,08E+08	8,21E+08	1,30E+09	2,02E+09
9,5	6,62E+07	7,43E+07	1,13E+08	1,87E+08	3,12E+08	5,11E+08	8,24E+08	1,30E+09	2,02E+09
10,0	6,76E+07	7,59E+07	1,15E+08	1,90E+08	3,15E+08	5,14E+08	8,27E+08	1,30E+09	2,02E+09

Tabelle A1.17: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 60 m, einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h und einem Tankfüllstand von 6 % (vgl. Flug F131014 T).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,12E+08	1,26E+08	2,18E+08	3,99E+08	7,12E+08	1,22E+09	2,05E+09	3,33E+09	5,33E+09
1,0	8,39E+07	9,50E+07	1,62E+08	2,96E+08	5,25E+08	9,00E+08	1,50E+09	2,44E+09	3,89E+09
1,5	7,47E+07	8,45E+07	1,41E+08	2,55E+08	4,50E+08	7,69E+08	1,28E+09	2,07E+09	3,30E+09
2,0	7,14E+07	8,05E+07	1,32E+08	2,35E+08	4,11E+08	6,98E+08	1,16E+09	1,87E+09	2,96E+09
2,5	7,08E+07	7,96E+07	1,28E+08	2,25E+08	3,89E+08	6,57E+08	1,08E+09	1,74E+09	2,75E+09
3,0	7,16E+07	8,03E+07	1,27E+08	2,20E+08	3,77E+08	6,31E+08	1,04E+09	1,66E+09	2,61E+09
3,5	7,31E+07	8,20E+07	1,28E+08	2,18E+08	3,71E+08	6,17E+08	1,01E+09	1,61E+09	2,52E+09
4,0	7,51E+07	8,42E+07	1,30E+08	2,19E+08	3,69E+08	6,10E+08	9,89E+08	1,57E+09	2,45E+09
4,5	7,75E+07	8,69E+07	1,32E+08	2,21E+08	3,70E+08	6,07E+08	9,81E+08	1,55E+09	2,41E+09
5,0	8,01E+07	8,99E+07	1,36E+08	2,25E+08	3,73E+08	6,09E+08	9,79E+08	1,54E+09	2,39E+09
5,5	8,28E+07	9,30E+07	1,39E+08	2,29E+08	3,77E+08	6,13E+08	9,81E+08	1,54E+09	2,38E+09
6,0	8,57E+07	9,63E+07	1,43E+08	2,34E+08	3,83E+08	6,19E+08	9,87E+08	1,55E+09	2,38E+09
6,5	8,88E+07	9,97E+07	1,48E+08	2,40E+08	3,91E+08	6,27E+08	9,96E+08	1,55E+09	2,39E+09
7,0	9,19E+07	1,03E+08	1,52E+08	2,46E+08	3,99E+08	6,37E+08	1,01E+09	1,57E+09	2,40E+09
7,5	9,50E+07	1,07E+08	1,57E+08	2,52E+08	4,07E+08	6,49E+08	1,02E+09	1,58E+09	2,42E+09
8,0	9,83E+07	1,10E+08	1,62E+08	2,59E+08	4,16E+08	6,61E+08	1,04E+09	1,60E+09	2,44E+09
8,5	1,02E+08	1,14E+08	1,67E+08	2,66E+08	4,26E+08	6,74E+08	1,05E+09	1,62E+09	2,47E+09
9,0	1,05E+08	1,18E+08	1,72E+08	2,73E+08	4,36E+08	6,87E+08	1,07E+09	1,65E+09	2,50E+09
9,5	1,08E+08	1,22E+08	1,77E+08	2,80E+08	4,46E+08	7,02E+08	1,09E+09	1,67E+09	2,53E+09
10,0	1,12E+08	1,25E+08	1,82E+08	2,88E+08	4,57E+08	7,17E+08	1,11E+09	1,70E+09	2,57E+09

Tabelle A1.18: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 60 m, einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h und einem Tankfüllstand von 6 % (vgl. Flug F131014 T).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	3,22E+08	3,35E+08	4,46E+08	6,75E+08	1,08E+09	1,74E+09	2,63E+09	3,94E+09	5,88E+09
1,0	2,29E+08	2,38E+08	3,18E+08	4,82E+08	7,70E+08	1,24E+09	1,87E+09	2,81E+09	4,19E+09
1,5	1,90E+08	1,98E+08	2,64E+08	4,00E+08	6,39E+08	1,03E+09	1,55E+09	2,33E+09	3,47E+09
2,0	1,68E+08	1,75E+08	2,34E+08	3,53E+08	5,64E+08	9,03E+08	1,37E+09	2,05E+09	3,06E+09
2,5	1,54E+08	1,60E+08	2,14E+08	3,23E+08	5,14E+08	8,22E+08	1,25E+09	1,87E+09	2,78E+09
3,0	1,44E+08	1,50E+08	2,00E+08	3,02E+08	4,79E+08	7,65E+08	1,16E+09	1,74E+09	2,58E+09
3,5	1,37E+08	1,43E+08	1,90E+08	2,86E+08	4,53E+08	7,23E+08	1,09E+09	1,64E+09	2,44E+09
4,0	1,32E+08	1,38E+08	1,83E+08	2,74E+08	4,34E+08	6,91E+08	1,04E+09	1,56E+09	2,32E+09
4,5	1,29E+08	1,35E+08	1,77E+08	2,65E+08	4,18E+08	6,65E+08	1,00E+09	1,50E+09	2,23E+09
5,0	1,27E+08	1,33E+08	1,73E+08	2,58E+08	4,06E+08	6,44E+08	9,71E+08	1,45E+09	2,15E+09
5,5	1,26E+08	1,31E+08	1,71E+08	2,53E+08	3,97E+08	6,27E+08	9,45E+08	1,41E+09	2,09E+09
6,0	1,25E+08	1,30E+08	1,69E+08	2,50E+08	3,89E+08	6,13E+08	9,23E+08	1,38E+09	2,04E+09
6,5	1,25E+08	1,30E+08	1,67E+08	2,47E+08	3,84E+08	6,02E+08	9,06E+08	1,35E+09	2,00E+09
7,0	1,25E+08	1,30E+08	1,67E+08	2,45E+08	3,79E+08	5,93E+08	8,91E+08	1,33E+09	1,96E+09
7,5	1,25E+08	1,30E+08	1,66E+08	2,44E+08	3,76E+08	5,86E+08	8,79E+08	1,31E+09	1,93E+09
8,0	1,26E+08	1,30E+08	1,67E+08	2,43E+08	3,74E+08	5,81E+08	8,70E+08	1,29E+09	1,91E+09
8,5	1,27E+08	1,31E+08	1,67E+08	2,43E+08	3,73E+08	5,77E+08	8,62E+08	1,28E+09	1,89E+09
9,0	1,27E+08	1,32E+08	1,68E+08	2,44E+08	3,72E+08	5,74E+08	8,57E+08	1,27E+09	1,87E+09
9,5	1,29E+08	1,34E+08	1,69E+08	2,44E+08	3,72E+08	5,72E+08	8,53E+08	1,26E+09	1,86E+09
10,0	1,30E+08	1,35E+08	1,70E+08	2,45E+08	3,72E+08	5,71E+08	8,50E+08	1,26E+09	1,85E+09

Tabelle A1.19: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 90 m, einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h und einem Tankfüllstand von 32 % (vgl. Flug F131014 G).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	3,22E+08	3,34E+08	4,47E+08	6,77E+08	1,08E+09	1,74E+09	2,63E+09	3,95E+09	5,89E+09
1,0	2,31E+08	2,41E+08	3,22E+08	4,87E+08	7,77E+08	1,24E+09	1,89E+09	2,83E+09	4,22E+09
1,5	1,95E+08	2,04E+08	2,71E+08	4,10E+08	6,51E+08	1,04E+09	1,57E+09	2,36E+09	3,51E+09
2,0	1,78E+08	1,86E+08	2,45E+08	3,67E+08	5,82E+08	9,27E+08	1,40E+09	2,09E+09	3,11E+09
2,5	1,68E+08	1,76E+08	2,30E+08	3,43E+08	5,38E+08	8,54E+08	1,29E+09	1,92E+09	2,85E+09
3,0	1,64E+08	1,71E+08	2,21E+08	3,28E+08	5,11E+08	8,04E+08	1,21E+09	1,80E+09	2,68E+09
3,5	1,62E+08	1,68E+08	2,16E+08	3,19E+08	4,93E+08	7,71E+08	1,16E+09	1,72E+09	2,55E+09
4,0	1,62E+08	1,68E+08	2,14E+08	3,13E+08	4,81E+08	7,48E+08	1,12E+09	1,66E+09	2,46E+09
4,5	1,63E+08	1,69E+08	2,14E+08	3,11E+08	4,75E+08	7,33E+08	1,09E+09	1,62E+09	2,39E+09
5,0	1,64E+08	1,71E+08	2,16E+08	3,11E+08	4,71E+08	7,24E+08	1,08E+09	1,59E+09	2,34E+09
5,5	1,67E+08	1,73E+08	2,18E+08	3,12E+08	4,71E+08	7,19E+08	1,07E+09	1,57E+09	2,31E+09
6,0	1,69E+08	1,76E+08	2,21E+08	3,15E+08	4,72E+08	7,17E+08	1,06E+09	1,56E+09	2,29E+09
6,5	1,73E+08	1,80E+08	2,25E+08	3,19E+08	4,75E+08	7,19E+08	1,06E+09	1,55E+09	2,27E+09
7,0	1,76E+08	1,83E+08	2,29E+08	3,23E+08	4,80E+08	7,22E+08	1,06E+09	1,55E+09	2,27E+09
7,5	1,80E+08	1,87E+08	2,34E+08	3,29E+08	4,85E+08	7,28E+08	1,07E+09	1,56E+09	2,27E+09
8,0	1,84E+08	1,91E+08	2,39E+08	3,34E+08	4,92E+08	7,34E+08	1,07E+09	1,56E+09	2,28E+09
8,5	1,88E+08	1,95E+08	2,43E+08	3,40E+08	4,99E+08	7,43E+08	1,08E+09	1,57E+09	2,29E+09
9,0	1,92E+08	1,99E+08	2,49E+08	3,47E+08	5,07E+08	7,52E+08	1,09E+09	1,59E+09	2,30E+09
9,5	1,96E+08	2,04E+08	2,54E+08	3,53E+08	5,15E+08	7,62E+08	1,11E+09	1,60E+09	2,32E+09
10,0	2,01E+08	2,08E+08	2,59E+08	3,60E+08	5,24E+08	7,73E+08	1,12E+09	1,62E+09	2,34E+09

Tabelle A1.20: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit den 4 NaI-Detektoren beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 90 m, einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h und einem Tankfüllstand von 32 % (vgl. Flug F131014 G).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,44E+08	2,74E+08	7,89E+08	1,96E+09	4,22E+09	8,17E+09	1,47E+10	2,52E+10	4,13E+10
1,0	8,57E+07	1,61E+08	4,58E+08	1,14E+09	2,44E+09	4,73E+09	8,52E+09	1,46E+10	2,40E+10
1,5	6,64E+07	1,23E+08	3,46E+08	8,49E+08	1,82E+09	3,53E+09	6,37E+09	1,09E+10	1,79E+10
2,0	5,71E+07	1,04E+08	2,89E+08	7,04E+08	1,51E+09	2,92E+09	5,25E+09	8,97E+09	1,47E+10
2,5	5,20E+07	9,37E+07	2,56E+08	6,17E+08	1,31E+09	2,54E+09	4,56E+09	7,79E+09	1,28E+10
3,0	4,90E+07	8,72E+07	2,34E+08	5,59E+08	1,18E+09	2,28E+09	4,09E+09	6,98E+09	1,14E+10
3,5	4,72E+07	8,30E+07	2,19E+08	5,18E+08	1,09E+09	2,09E+09	3,75E+09	6,39E+09	1,05E+10
4,0	4,61E+07	8,03E+07	2,08E+08	4,88E+08	1,02E+09	1,95E+09	3,49E+09	5,93E+09	9,72E+09
4,5	4,55E+07	7,85E+07	2,00E+08	4,66E+08	9,67E+08	1,84E+09	3,28E+09	5,58E+09	9,13E+09
5,0	4,52E+07	7,75E+07	1,95E+08	4,49E+08	9,26E+08	1,75E+09	3,12E+09	5,29E+09	8,65E+09
5,5	4,53E+07	7,70E+07	1,91E+08	4,36E+08	8,93E+08	1,68E+09	2,99E+09	5,06E+09	8,26E+09
6,0	4,55E+07	7,69E+07	1,88E+08	4,25E+08	8,66E+08	1,63E+09	2,88E+09	4,86E+09	7,93E+09
6,5	4,59E+07	7,71E+07	1,87E+08	4,18E+08	8,45E+08	1,58E+09	2,79E+09	4,70E+09	7,65E+09
7,0	4,65E+07	7,76E+07	1,86E+08	4,12E+08	8,28E+08	1,54E+09	2,71E+09	4,56E+09	7,41E+09
7,5	4,71E+07	7,83E+07	1,85E+08	4,08E+08	8,14E+08	1,51E+09	2,65E+09	4,44E+09	7,21E+09
8,0	4,78E+07	7,92E+07	1,85E+08	4,04E+08	8,04E+08	1,48E+09	2,59E+09	4,34E+09	7,03E+09
8,5	4,85E+07	8,02E+07	1,85E+08	4,02E+08	7,95E+08	1,46E+09	2,55E+09	4,26E+09	6,88E+09
9,0	4,94E+07	8,14E+07	1,86E+08	4,01E+08	7,88E+08	1,44E+09	2,51E+09	4,18E+09	6,75E+09
9,5	5,02E+07	8,26E+07	1,87E+08	4,01E+08	7,83E+08	1,43E+09	2,47E+09	4,12E+09	6,64E+09
10,0	5,11E+07	8,39E+07	1,88E+08	4,01E+08	7,80E+08	1,42E+09	2,45E+09	4,06E+09	6,54E+09

Tabelle A1.21: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit dem Ge-Detektor beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 30 m, einer Fluggeschwindigkeit von 50 km/h und einem Tankfüllstand von 15 % (vgl. Flug D131129 Q).

Zeit [s]	Abstand [m]								
	0	25	50	75	100	125	150	175	200
0,5	1,48E+08	2,78E+08	7,91E+08	1,96E+09	4,21E+09	8,17E+09	1,47E+10	2,52E+10	4,14E+10
1,0	9,32E+07	1,70E+08	4,72E+08	1,15E+09	2,46E+09	4,76E+09	8,57E+09	1,46E+10	2,41E+10
1,5	7,74E+07	1,38E+08	3,70E+08	8,84E+08	1,87E+09	3,60E+09	6,47E+09	1,10E+10	1,81E+10
2,0	7,13E+07	1,24E+08	3,22E+08	7,56E+08	1,58E+09	3,02E+09	5,40E+09	9,18E+09	1,50E+10
2,5	6,89E+07	1,18E+08	2,97E+08	6,83E+08	1,41E+09	2,67E+09	4,75E+09	8,06E+09	1,32E+10
3,0	6,84E+07	1,16E+08	2,83E+08	6,40E+08	1,30E+09	2,45E+09	4,33E+09	7,31E+09	1,19E+10
3,5	6,91E+07	1,15E+08	2,76E+08	6,13E+08	1,23E+09	2,29E+09	4,03E+09	6,79E+09	1,10E+10
4,0	7,04E+07	1,17E+08	2,73E+08	5,96E+08	1,18E+09	2,19E+09	3,82E+09	6,40E+09	1,04E+10
4,5	7,22E+07	1,19E+08	2,72E+08	5,87E+08	1,15E+09	2,11E+09	3,67E+09	6,12E+09	9,87E+09
5,0	7,42E+07	1,22E+08	2,74E+08	5,82E+08	1,13E+09	2,06E+09	3,55E+09	5,90E+09	9,49E+09
5,5	7,63E+07	1,25E+08	2,77E+08	5,81E+08	1,12E+09	2,02E+09	3,47E+09	5,73E+09	9,20E+09
6,0	7,86E+07	1,29E+08	2,81E+08	5,83E+08	1,11E+09	1,99E+09	3,41E+09	5,61E+09	8,97E+09
6,5	8,10E+07	1,32E+08	2,86E+08	5,87E+08	1,11E+09	1,98E+09	3,36E+09	5,52E+09	8,79E+09
7,0	8,33E+07	1,36E+08	2,92E+08	5,93E+08	1,11E+09	1,97E+09	3,33E+09	5,45E+09	8,65E+09
7,5	8,58E+07	1,40E+08	2,98E+08	6,00E+08	1,12E+09	1,97E+09	3,31E+09	5,40E+09	8,55E+09
8,0	8,82E+07	1,44E+08	3,04E+08	6,08E+08	1,13E+09	1,97E+09	3,30E+09	5,36E+09	8,47E+09
8,5	9,06E+07	1,48E+08	3,11E+08	6,17E+08	1,14E+09	1,98E+09	3,30E+09	5,34E+09	8,41E+09
9,0	9,29E+07	1,52E+08	3,18E+08	6,28E+08	1,15E+09	1,99E+09	3,31E+09	5,33E+09	8,38E+09
9,5	9,53E+07	1,55E+08	3,25E+08	6,38E+08	1,16E+09	2,00E+09	3,31E+09	5,33E+09	8,36E+09
10,0	9,76E+07	1,59E+08	3,32E+08	6,50E+08	1,18E+09	2,01E+09	3,33E+09	5,34E+09	8,35E+09

Tabelle A1.22: Nachweisgrenze in Bq für die Messung mit dem Ge-Detektor beim Aufspüren einer Cs-137-Punktquelle bei Vorbeiflug in verschiedenen Abständen mit unterschiedlichen Messzeiten bei einer Flughöhe von 30 m, einer Fluggeschwindigkeit von 100 km/h und einem Tankfüllstand von 15 % (vgl. Flug D131129 Q).

Anhang 1.7: Berechnete Zählraten der Detektorgruppen „Nal vorne“, „Nal hinten“ und des Germanium-Detektors

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,78E-02	1,77E-02	6,33E-04	1,010	28,140	27,868
20	1,25E-02	1,20E-02	4,48E-04	1,038	27,829	26,808
30	9,54E-03	9,01E-03	3,45E-04	1,058	27,674	26,145
40	7,59E-03	7,07E-03	2,76E-04	1,074	27,473	25,572
50	6,20E-03	5,70E-03	2,26E-04	1,088	27,443	25,220
60	5,14E-03	4,68E-03	1,88E-04	1,099	27,315	24,847
70	4,31E-03	3,89E-03	1,59E-04	1,109	27,187	24,513
80	3,65E-03	3,26E-03	1,35E-04	1,118	27,089	24,234
90	3,11E-03	2,76E-03	1,15E-04	1,126	27,028	24,007
100	2,67E-03	2,35E-03	9,85E-05	1,133	27,088	23,899
110	2,30E-03	2,01E-03	8,50E-05	1,140	27,021	23,700
120	1,99E-03	1,73E-03	7,37E-05	1,146	26,958	23,516
130	1,72E-03	1,50E-03	6,41E-05	1,152	26,889	23,344
140	1,50E-03	1,30E-03	5,59E-05	1,155	26,818	23,218
150	1,31E-03	1,13E-03	4,88E-05	1,159	26,761	23,081
160	1,14E-03	9,82E-04	4,28E-05	1,164	26,717	22,960
170	1,00E-03	8,57E-04	3,75E-05	1,168	26,687	22,857
180	8,78E-04	7,50E-04	3,29E-05	1,171	26,668	22,765
190	7,72E-04	6,57E-04	2,90E-05	1,175	26,655	22,682
200	6,80E-04	5,77E-04	2,55E-05	1,179	26,643	22,603
210	6,00E-04	5,07E-04	2,25E-05	1,182	26,630	22,529
220	5,29E-04	4,47E-04	1,99E-05	1,185	26,611	22,457
230	4,68E-04	3,94E-04	1,76E-05	1,188	26,586	22,386
240	4,14E-04	3,48E-04	1,56E-05	1,190	26,559	22,315
250	3,66E-04	3,07E-04	1,38E-05	1,193	26,540	22,253
260	3,25E-04	2,72E-04	1,22E-05	1,195	26,532	22,201
270	2,88E-04	2,41E-04	1,09E-05	1,197	26,523	22,151
280	2,56E-04	2,13E-04	9,65E-06	1,200	26,515	22,103
290	2,27E-04	1,89E-04	8,58E-06	1,202	26,507	22,055
300	2,02E-04	1,68E-04	7,63E-06	1,204	26,498	22,008

Tabelle A1.23: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Bodenkontamination von 1 Bq / m² bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von 9,29E-3 / m bei einem Tankfüllstand von 0 %“.

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,390	1,307	0,034	1,064	41,218	38,750
20	1,541	1,446	0,039	1,065	39,092	36,695
30	1,645	1,552	0,043	1,060	38,214	36,036
40	1,735	1,634	0,046	1,062	37,396	35,212
50	1,800	1,691	0,049	1,064	36,952	34,723
60	1,861	1,750	0,051	1,063	36,617	34,448
70	1,904	1,783	0,053	1,068	36,239	33,938
80	1,947	1,829	0,054	1,064	36,281	34,093
90	1,979	1,850	0,055	1,070	35,767	33,428
100	2,005	1,882	0,056	1,065	35,716	33,523
110	2,034	1,902	0,057	1,070	35,404	33,102
120	2,051	1,919	0,058	1,069	35,394	33,113
130	2,075	1,940	0,059	1,070	35,260	32,967
140	2,086	1,946	0,059	1,072	35,191	32,819
150	2,105	1,967	0,060	1,070	35,225	32,918
160	2,114	1,967	0,060	1,075	35,044	32,614
170	2,126	1,986	0,060	1,070	35,197	32,886
180	2,136	1,986	0,061	1,075	34,914	32,470
190	2,140	1,998	0,061	1,071	34,957	32,637
200	2,152	2,005	0,062	1,073	34,812	32,431
210	2,154	2,006	0,062	1,074	34,853	32,455
220	2,165	2,017	0,062	1,073	34,829	32,456
230	2,166	2,012	0,062	1,076	34,786	32,324
240	2,174	2,026	0,062	1,073	34,937	32,561
250	2,175	2,019	0,063	1,077	34,732	32,239
260	2,178	2,031	0,062	1,072	34,851	32,499
270	2,184	2,028	0,063	1,077	34,657	32,193
280	2,182	2,032	0,063	1,074	34,731	32,345
290	2,190	2,037	0,063	1,075	34,653	32,240
300	2,187	2,032	0,063	1,076	34,686	32,231

Tabelle A1.24: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Luftkontamination von 1 Bq / m³ bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von 9,29E-3 / m bei einem Tankfüllstand von 0 %“.

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,42E-02	1,67E-02	6,31E-04	0,851	22,488	26,412
20	9,54E-03	1,13E-02	4,48E-04	0,842	21,291	25,271
30	7,08E-03	8,49E-03	3,46E-04	0,834	20,449	24,512
40	5,57E-03	6,68E-03	2,78E-04	0,834	20,021	24,008
50	4,46E-03	5,38E-03	2,29E-04	0,830	19,498	23,495
60	3,65E-03	4,43E-03	1,91E-04	0,825	19,170	23,238
70	3,04E-03	3,69E-03	1,61E-04	0,822	18,873	22,947
80	2,55E-03	3,11E-03	1,37E-04	0,821	18,634	22,706
90	2,17E-03	2,63E-03	1,17E-04	0,824	18,550	22,525
100	1,84E-03	2,24E-03	1,00E-04	0,824	18,355	22,266
110	1,58E-03	1,92E-03	8,68E-05	0,822	18,191	22,132
120	1,36E-03	1,66E-03	7,50E-05	0,820	18,097	22,069
130	1,17E-03	1,43E-03	6,53E-05	0,819	17,968	21,932
140	1,02E-03	1,24E-03	5,70E-05	0,818	17,857	21,817
150	8,84E-04	1,08E-03	4,98E-05	0,818	17,766	21,715
160	7,71E-04	9,42E-04	4,36E-05	0,818	17,685	21,617
170	6,74E-04	8,23E-04	3,82E-05	0,818	17,622	21,539
180	5,90E-04	7,21E-04	3,36E-05	0,818	17,585	21,486
190	5,18E-04	6,32E-04	2,95E-05	0,819	17,542	21,430
200	4,55E-04	5,56E-04	2,60E-05	0,819	17,498	21,370
210	4,00E-04	4,89E-04	2,29E-05	0,819	17,457	21,309
220	3,53E-04	4,31E-04	2,03E-05	0,820	17,418	21,253
230	3,11E-04	3,80E-04	1,79E-05	0,820	17,382	21,203
240	2,75E-04	3,36E-04	1,59E-05	0,820	17,349	21,155
250	2,43E-04	2,97E-04	1,41E-05	0,821	17,323	21,110
260	2,15E-04	2,62E-04	1,25E-05	0,821	17,303	21,073
270	1,91E-04	2,32E-04	1,10E-05	0,822	17,284	21,038
280	1,69E-04	2,06E-04	9,81E-06	0,822	17,264	21,002
290	1,50E-04	1,83E-04	8,71E-06	0,823	17,245	20,967
300	1,33E-04	1,62E-04	7,75E-06	0,823	17,228	20,934

Tabelle A1.25: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Bodenkontamination von 1 Bq / m² bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von 9,29E-3 / m bei einem Tankfüllstand von 50 %“.

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,356	1,296	0,034	1,046	40,308	38,520
20	1,471	1,427	0,039	1,031	37,348	36,234
30	1,545	1,524	0,043	1,014	36,043	35,551
40	1,618	1,605	0,046	1,008	34,833	34,572
50	1,657	1,657	0,049	1,000	34,099	34,106
60	1,709	1,716	0,051	0,996	33,582	33,724
70	1,733	1,745	0,052	0,993	33,026	33,261
80	1,771	1,792	0,054	0,988	32,932	33,318
90	1,788	1,809	0,055	0,988	32,273	32,650
100	1,807	1,839	0,056	0,983	32,171	32,743
110	1,828	1,859	0,058	0,983	31,723	32,269
120	1,833	1,873	0,058	0,979	31,629	32,323
130	1,857	1,896	0,059	0,979	31,453	32,120
140	1,857	1,900	0,059	0,978	31,307	32,025
150	1,879	1,923	0,060	0,977	31,328	32,066
160	1,878	1,921	0,060	0,978	31,103	31,813
170	1,893	1,941	0,061	0,975	31,240	32,037
180	1,895	1,940	0,061	0,977	30,887	31,606
190	1,897	1,950	0,061	0,973	30,937	31,801
200	1,908	1,958	0,062	0,974	30,743	31,552
210	1,902	1,957	0,062	0,972	30,737	31,624
220	1,918	1,971	0,062	0,973	30,731	31,580
230	1,911	1,964	0,062	0,973	30,655	31,505
240	1,926	1,980	0,062	0,972	30,815	31,688
250	1,920	1,971	0,063	0,974	30,584	31,395
260	1,926	1,983	0,063	0,971	30,731	31,640
270	1,928	1,980	0,063	0,974	30,481	31,308
280	1,922	1,982	0,063	0,970	30,557	31,502
290	1,934	1,990	0,063	0,972	30,469	31,354
300	1,924	1,983	0,063	0,970	30,467	31,395

Tabelle A1.26: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Luftkontamination von 1 Bq / m³ bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von 9,29E-3 / m bei einem Tankfüllstand von 50 %“.

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,25E-02	1,62E-02	6,27E-04	0,768	19,882	25,888
20	8,18E-03	1,10E-02	4,45E-04	0,745	18,405	24,694
30	6,01E-03	8,23E-03	3,43E-04	0,731	17,556	24,018
40	4,66E-03	6,45E-03	2,75E-04	0,723	16,942	23,447
50	3,73E-03	5,20E-03	2,25E-04	0,718	16,586	23,115
60	3,03E-03	4,27E-03	1,88E-04	0,709	16,154	22,776
70	2,51E-03	3,55E-03	1,58E-04	0,706	15,861	22,456
80	2,10E-03	2,98E-03	1,34E-04	0,704	15,632	22,202
90	1,78E-03	2,53E-03	1,14E-04	0,703	15,509	22,077
100	1,51E-03	2,15E-03	9,83E-05	0,701	15,362	21,903
110	1,29E-03	1,85E-03	8,49E-05	0,699	15,220	21,764
120	1,11E-03	1,59E-03	7,35E-05	0,699	15,091	21,604
130	9,57E-04	1,37E-03	6,40E-05	0,698	14,970	21,445
140	8,23E-04	1,19E-03	5,58E-05	0,692	14,746	21,299
150	7,14E-04	1,03E-03	4,87E-05	0,692	14,656	21,173
160	6,22E-04	8,99E-04	4,27E-05	0,692	14,579	21,063
170	5,43E-04	7,85E-04	3,74E-05	0,692	14,515	20,971
180	4,75E-04	6,87E-04	3,29E-05	0,692	14,464	20,891
190	4,17E-04	6,02E-04	2,89E-05	0,693	14,418	20,819
200	3,66E-04	5,28E-04	2,55E-05	0,693	14,375	20,751
210	3,22E-04	4,65E-04	2,25E-05	0,693	14,334	20,686
220	2,83E-04	4,09E-04	1,98E-05	0,693	14,294	20,624
230	2,50E-04	3,61E-04	1,75E-05	0,693	14,256	20,560
240	2,21E-04	3,18E-04	1,55E-05	0,694	14,227	20,498
250	1,95E-04	2,81E-04	1,38E-05	0,694	14,186	20,437
260	1,73E-04	2,49E-04	1,22E-05	0,694	14,150	20,383
270	1,53E-04	2,20E-04	1,08E-05	0,694	14,119	20,335
280	1,35E-04	1,95E-04	9,61E-06	0,694	14,089	20,289
290	1,20E-04	1,73E-04	8,54E-06	0,695	14,059	20,243
300	1,07E-04	1,53E-04	7,59E-06	0,695	14,030	20,198

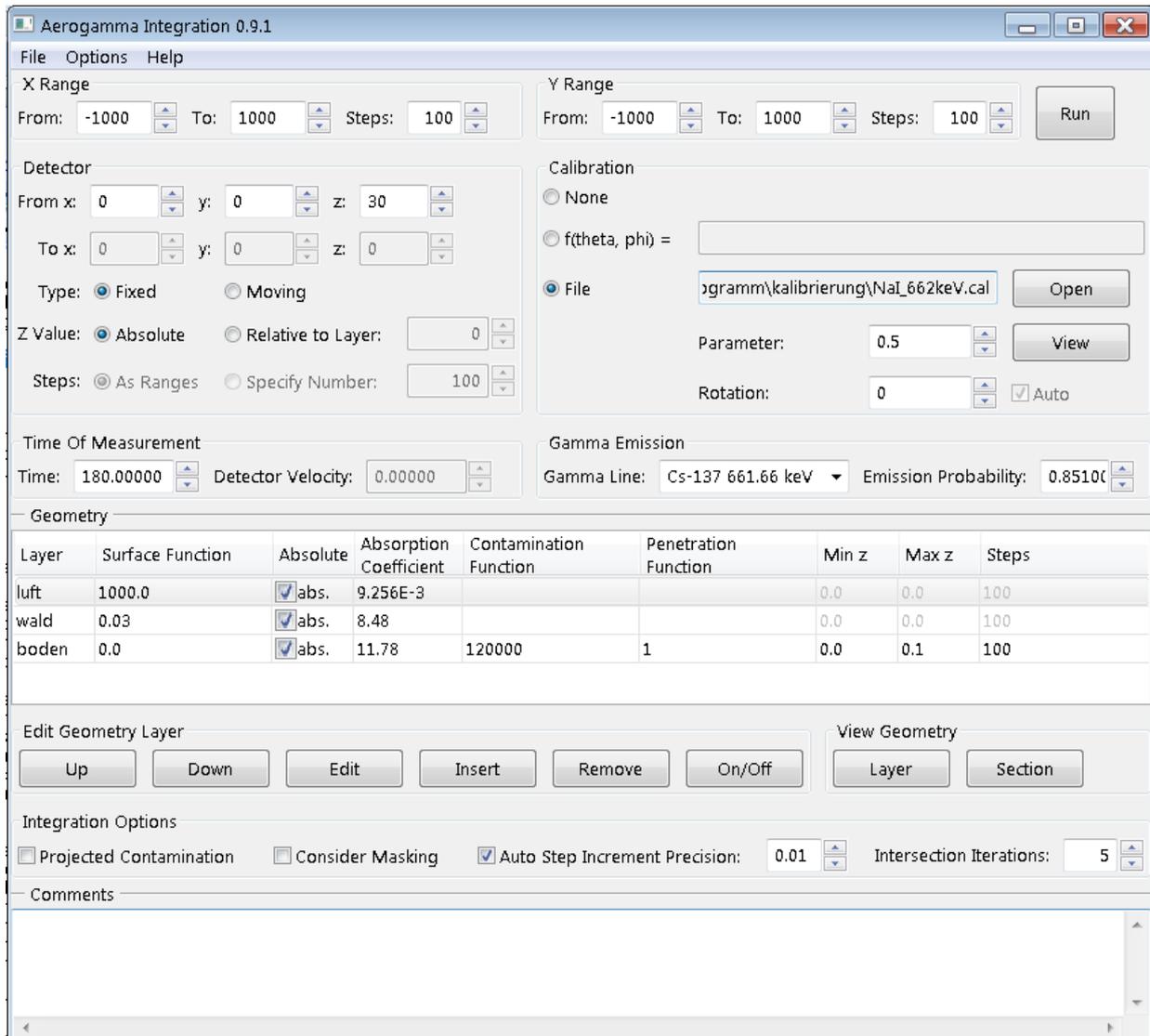
Tabelle A1.27: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Bodenkontamination von 1 Bq / m² bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von 9,29E-3 / m bei einem Tankfüllstand von 100 %“.

h [m]	Vo [ips]	Hi [ips]	Ge [ips]	Vo / Hi	Vo / Ge	Hi / Ge
10	1,339	1,290	0,034	1,038	39,818	38,364
20	1,438	1,418	0,039	1,014	36,581	36,085
30	1,502	1,511	0,043	0,995	35,037	35,231
40	1,564	1,591	0,046	0,983	33,815	34,395
50	1,595	1,639	0,049	0,974	32,890	33,780
60	1,642	1,698	0,051	0,967	32,425	33,528
70	1,658	1,724	0,052	0,962	31,674	32,935
80	1,694	1,771	0,053	0,957	31,687	33,111
90	1,704	1,786	0,055	0,954	30,900	32,385
100	1,722	1,815	0,056	0,949	30,784	32,449
110	1,738	1,835	0,057	0,947	30,351	32,040
120	1,742	1,846	0,058	0,944	30,185	31,982
130	1,763	1,870	0,059	0,943	30,065	31,892
140	1,761	1,872	0,059	0,941	29,812	31,690
150	1,782	1,896	0,060	0,940	29,926	31,836
160	1,777	1,893	0,060	0,939	29,570	31,488
170	1,794	1,913	0,060	0,938	29,808	31,785
180	1,792	1,911	0,061	0,938	29,397	31,344
190	1,794	1,920	0,061	0,935	29,420	31,474
200	1,804	1,930	0,062	0,935	29,275	31,311
210	1,798	1,926	0,062	0,934	29,203	31,280
220	1,813	1,942	0,062	0,934	29,269	31,341
230	1,804	1,933	0,062	0,933	29,087	31,166
240	1,821	1,950	0,062	0,933	29,353	31,448
250	1,812	1,941	0,062	0,933	29,021	31,089
260	1,819	1,952	0,062	0,932	29,219	31,356
270	1,819	1,950	0,063	0,933	28,965	31,052
280	1,815	1,950	0,063	0,931	29,000	31,156
290	1,825	1,959	0,063	0,931	28,974	31,108
300	1,816	1,951	0,063	0,931	28,898	31,050

Tabelle A1.28: Peakzählraten und Zählratenverhältnisse für das Szenario „Ebenes Gelände mit einer Luftkontamination von 1 Bq / m³ bei einer Gamma-Energie von 662 keV bzw. einem Absorptionskoeffizienten $\mu(662 \text{ keV})$ von $9,29\text{E-}3 / \text{m}$ bei einem Tankfüllstand von 100 %“.

Anhang 2: Abbildungen

Anhang 2.1: Benutzeroberfläche des Programms



Benutzeroberfläche des Programms zur Berechnung der Geometriefaktoren bzw. unter Verwendung der Kalibrierdaten zur Berechnung der Zählraten. Eine detaillierte Beschreibung des Quellcodes und der Bedienung des Programms erfolgt separat.

Anhang 2.2: Messpunkte

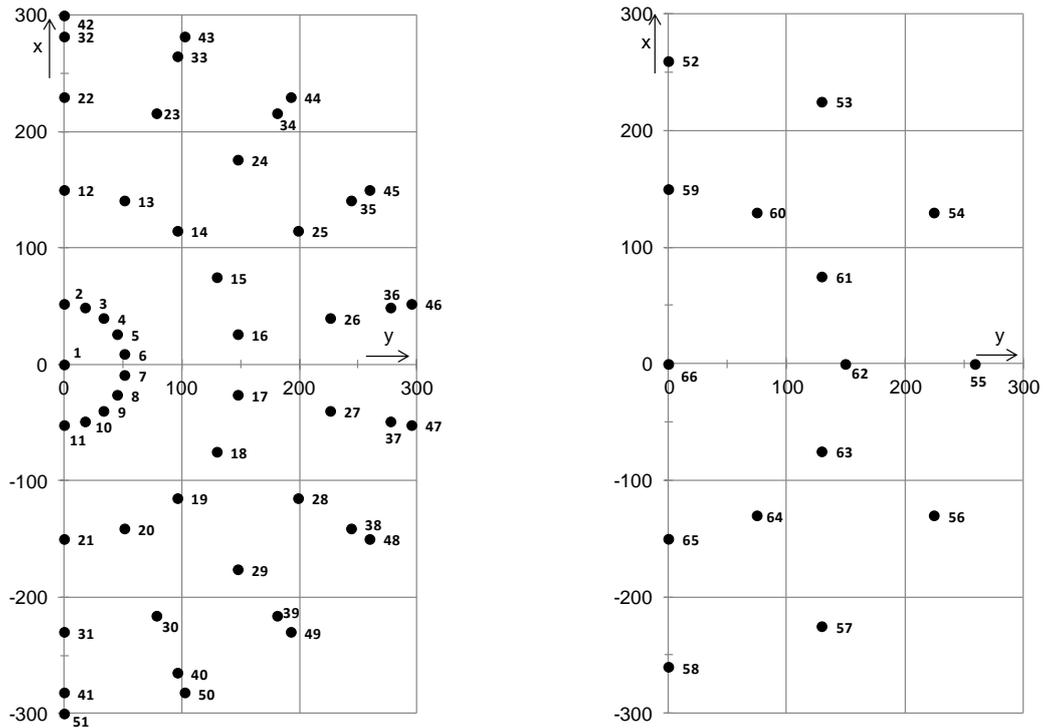


Abbildung A2.1 und A2.2: Projektion der Messpunkte für Radius $r = 300$ cm senkrecht zur x - y -Ebene nach unten auf den Boden. Das linke Bild zeigt die Messpunkte des unteren Halbraumes, das rechte Bild die des oberen Halbraumes.

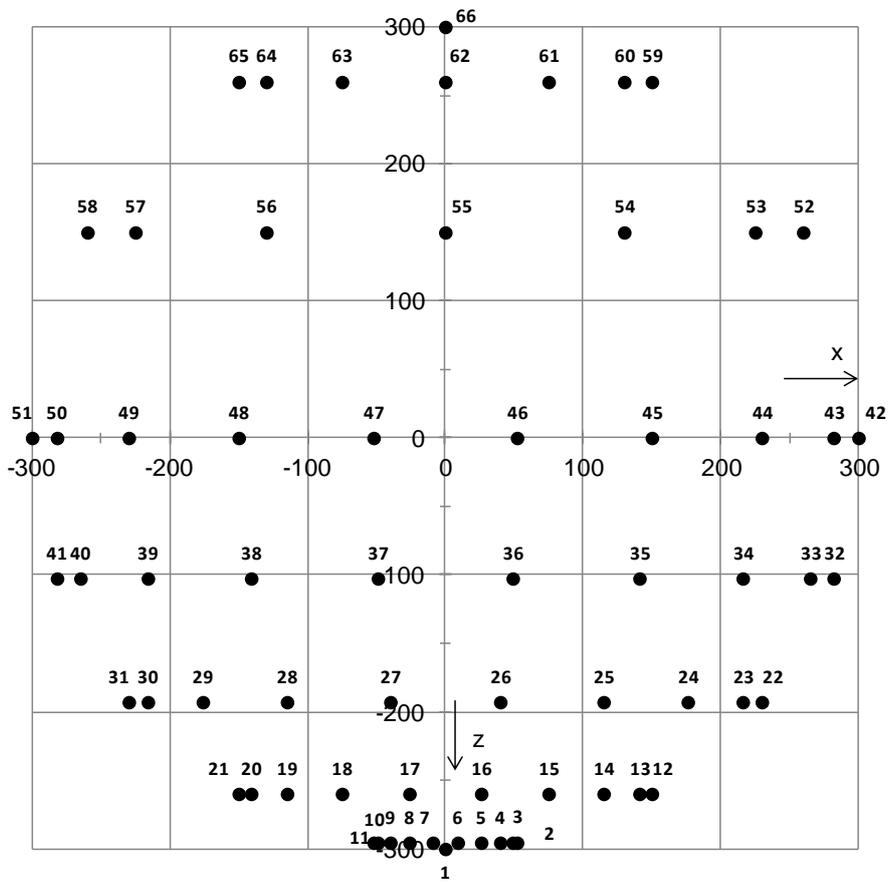
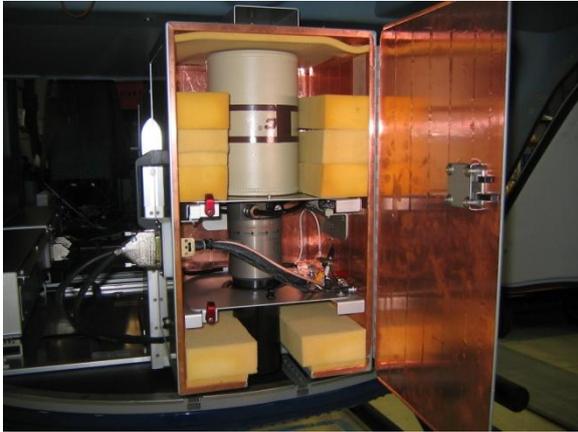


Abbildung A2.3: Projektion der Messpunkte für Radius $r = 300$ cm senkrecht zur x-z-Ebene nach links auf die Symmetrieebene des Hubschraubers. Die Flugrichtung befindet sich im Bild rechts.

Anhang 2.3: Fotos der Kalibrierung



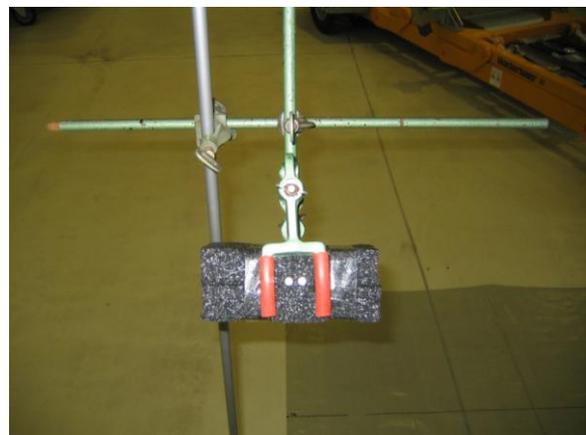
Der Germaniumdetektor (Detektor 1).



Die in ihre Gehäuse eingebauten NaI-Detektoren (links im Vordergrund Detektor 2), in der Mitte der Messrechner, rechts das Gehäuse des Germaniumdetektors.

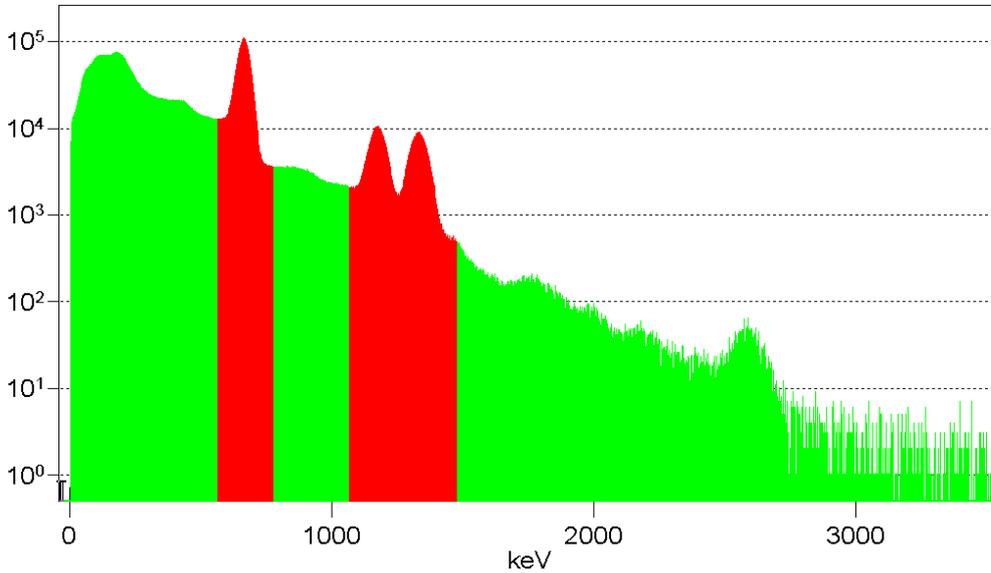
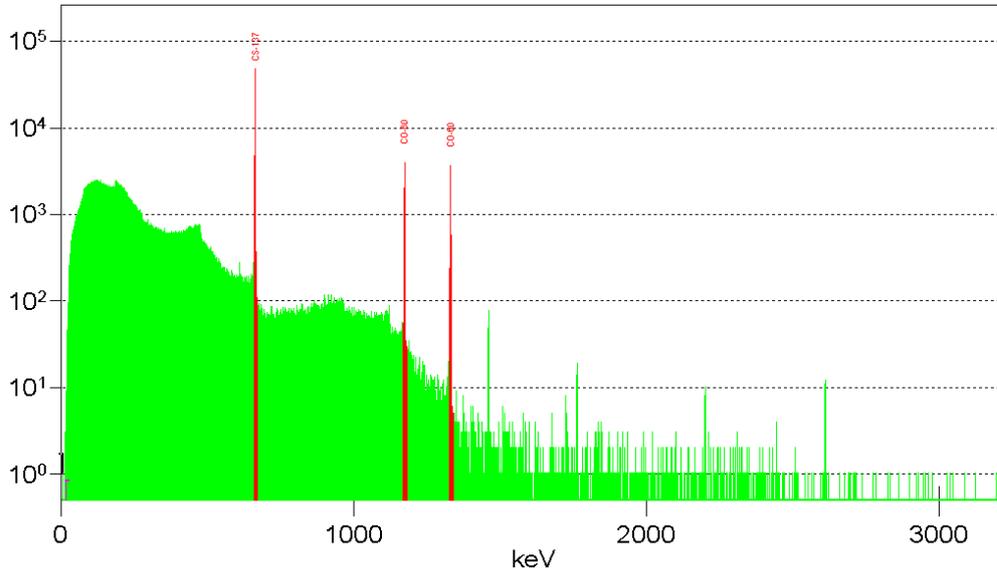


Hubschrauber EC135 am Haken hängend zur Kalibrierung von unten.



Die beiden Strahler in ihrer Halterung.

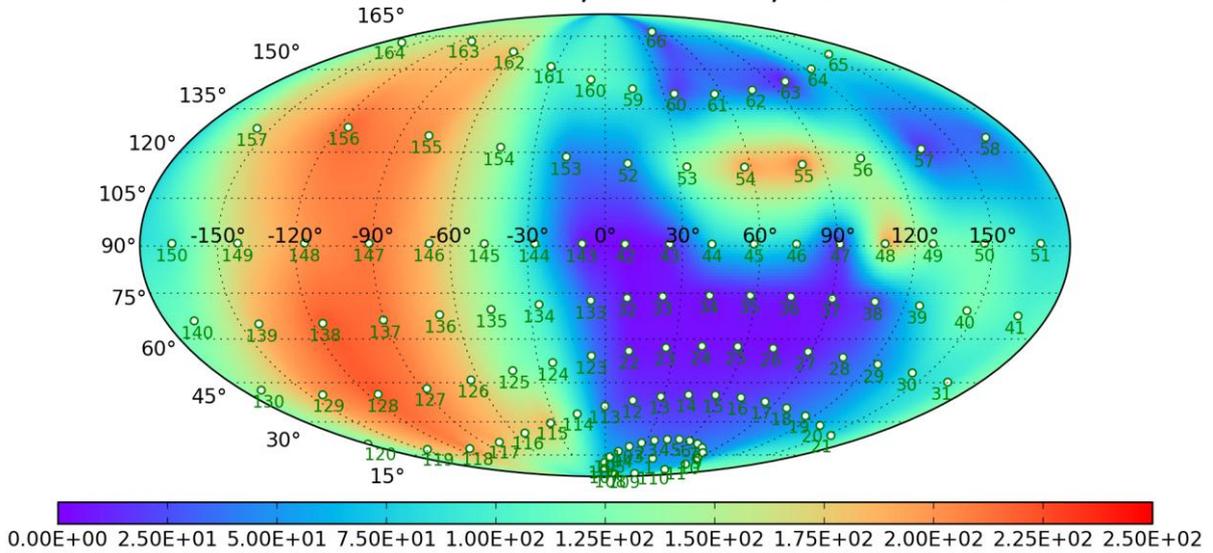
Anhang 2.4: Gammaspektren



Beispielhafte Spektren des Germaniumdetektors und des NaI-Detektors 5 für die Messposition 1 bei leerem Tank mit den markierten Linien von Cs-137 (662 keV) und Co-60 (1173 keV und 1332 keV) . Die Messzeiten (Livetime) waren 275 s und 263 s.

Anhang 2.5: Darstellung der Ausbeuten

Ausbeute Detektor 2, 662 keV, Füllstand 0.5



Ausbeute Detektor 3, 662 keV, Füllstand 0.5

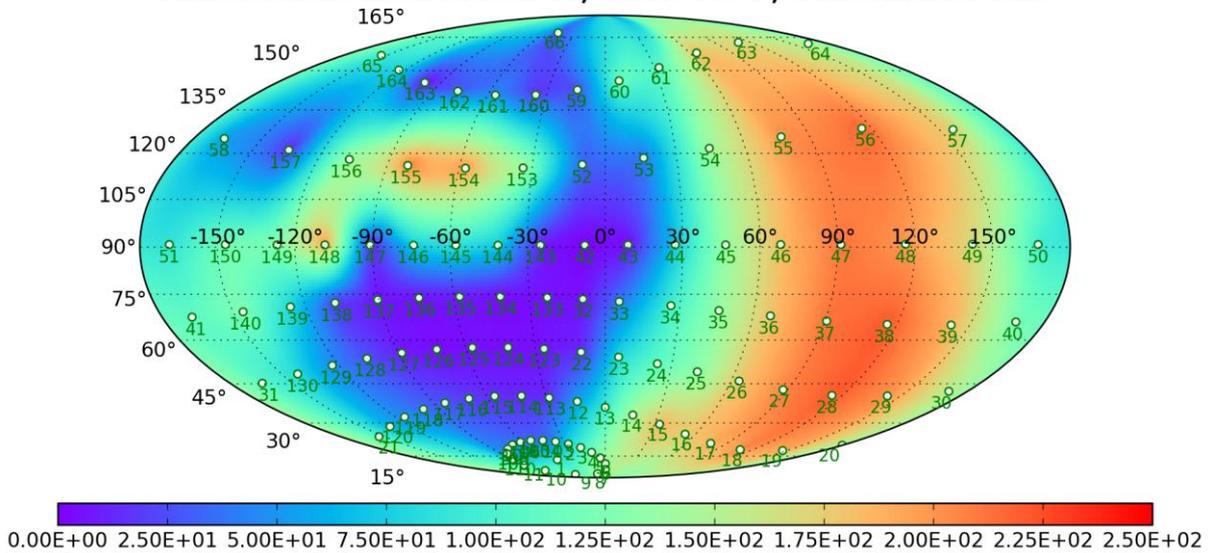
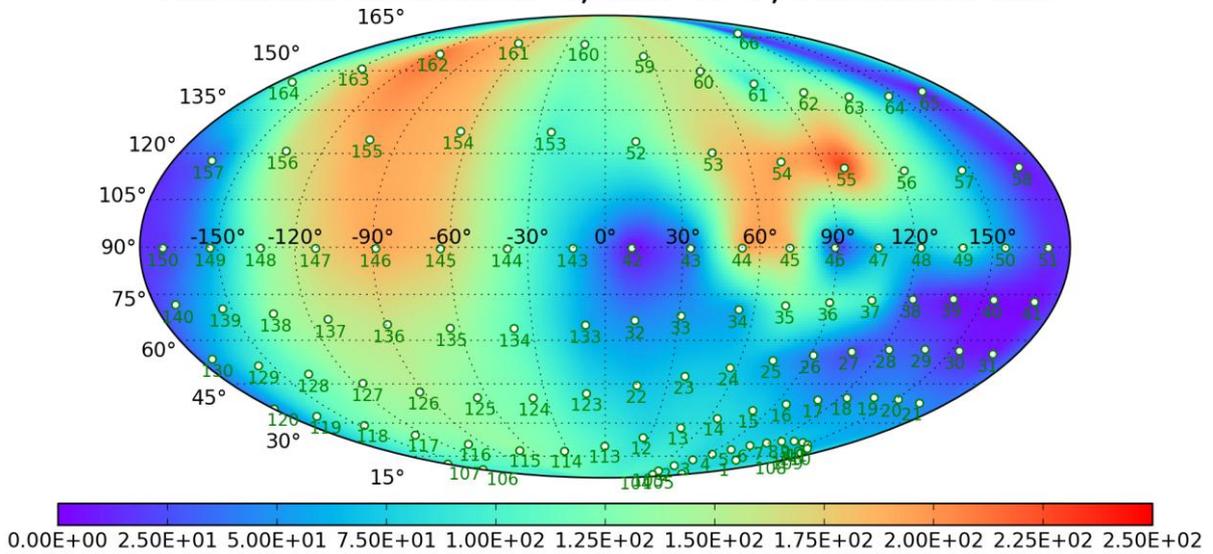


Abbildung A2.4 und A2.5: Ausbeuten in cm^2 für Detektor 2 und 3 mit den Messpunkten für die 662-keV-Linie und für den halbvollen Tank.

Ausbeute Detektor 4, 662 keV, Füllstand 0.5



Ausbeute Detektor 5, 662 keV, Füllstand 0.5

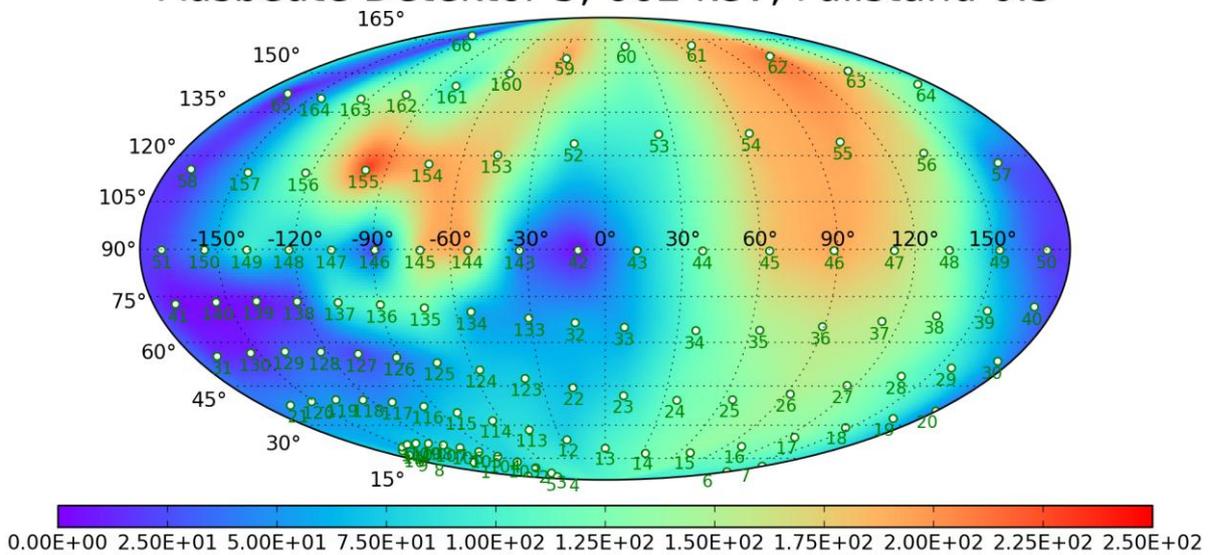


Abbildung A2.6 und A2.7: Ausbeuten in cm^2 für Detektor 4 und 5 mit den Messpunkten für die 662-keV-Linie und für den halbvollen Tank.

Ausbeute Detektor 1, 662 keV, Füllstand 0.5

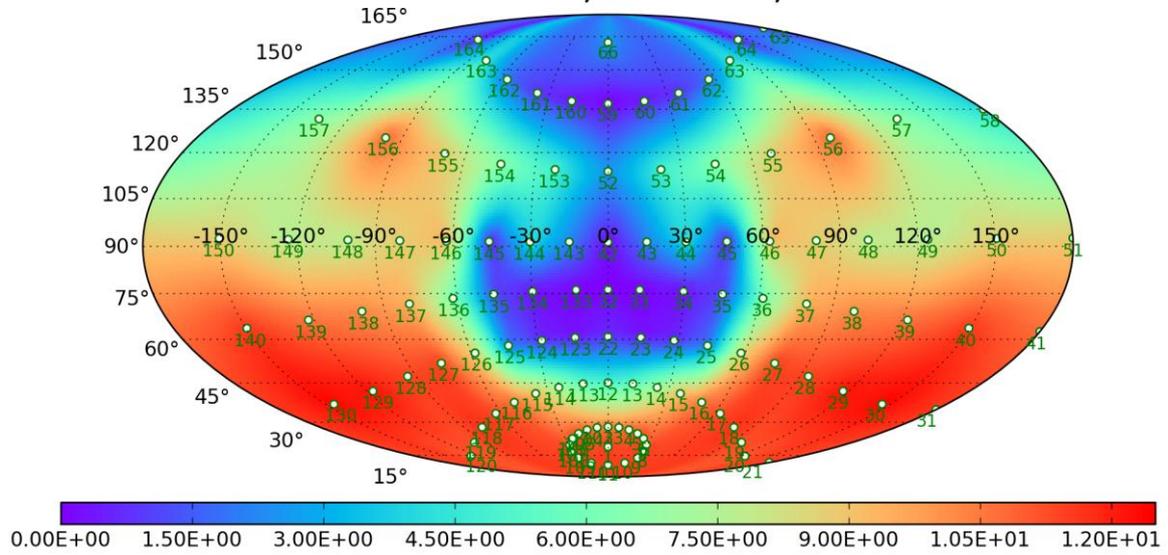
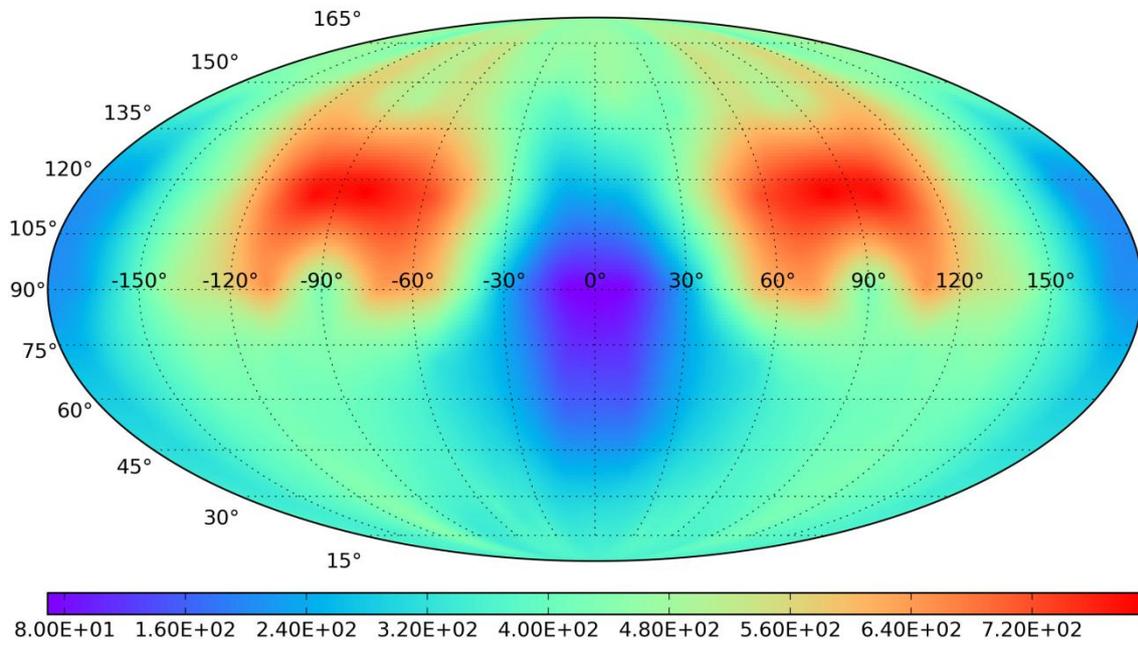


Abbildung A2.8: Ausbeuten in cm² für Detektor 1 mit den Messpunkten für die 662-keV-Linie und für den halbvollen Tank.

662 keV, Füllstand 1.0



662 keV, Füllstand 0.5

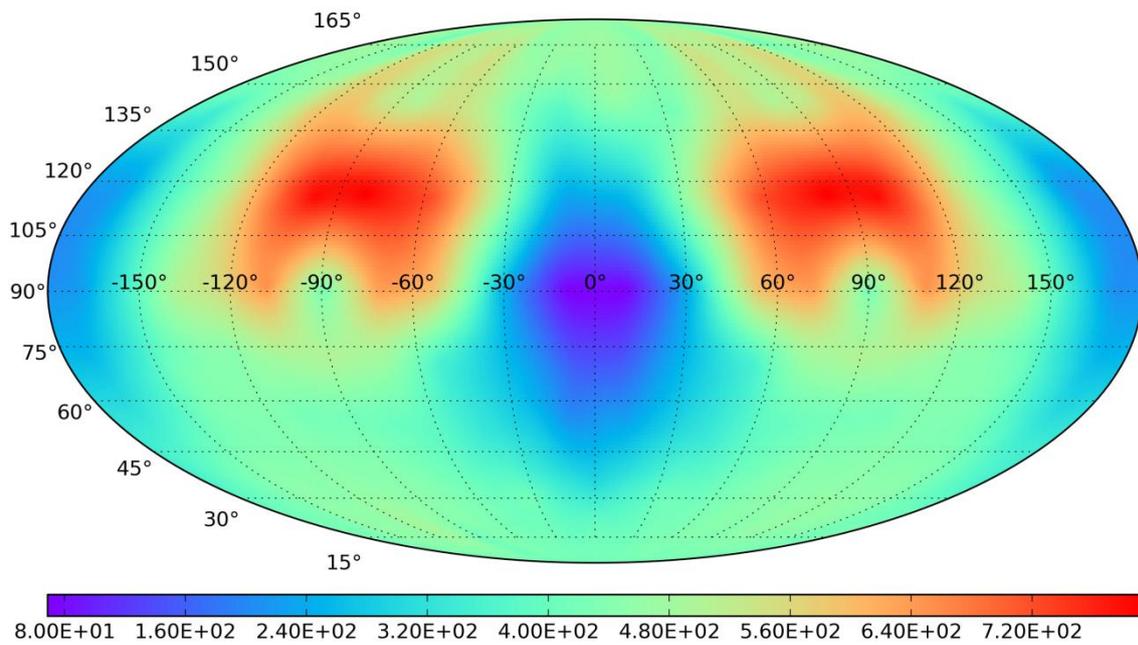
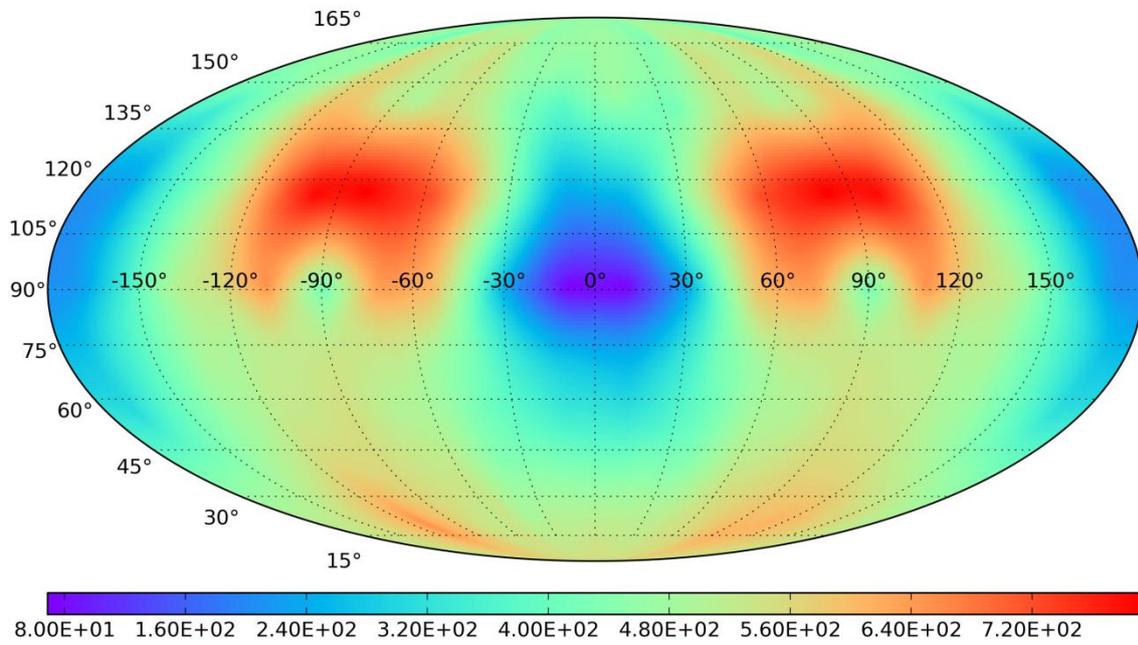


Abbildung A2.9 und A2.10: Ausbeuten in cm^2 für die Summe der vier NaI-Detektoren für die 662-keV-Linie und für den vollen und halbvollen Tank.

662 keV, Füllstand 0.0



1332 keV, Füllstand 0.0

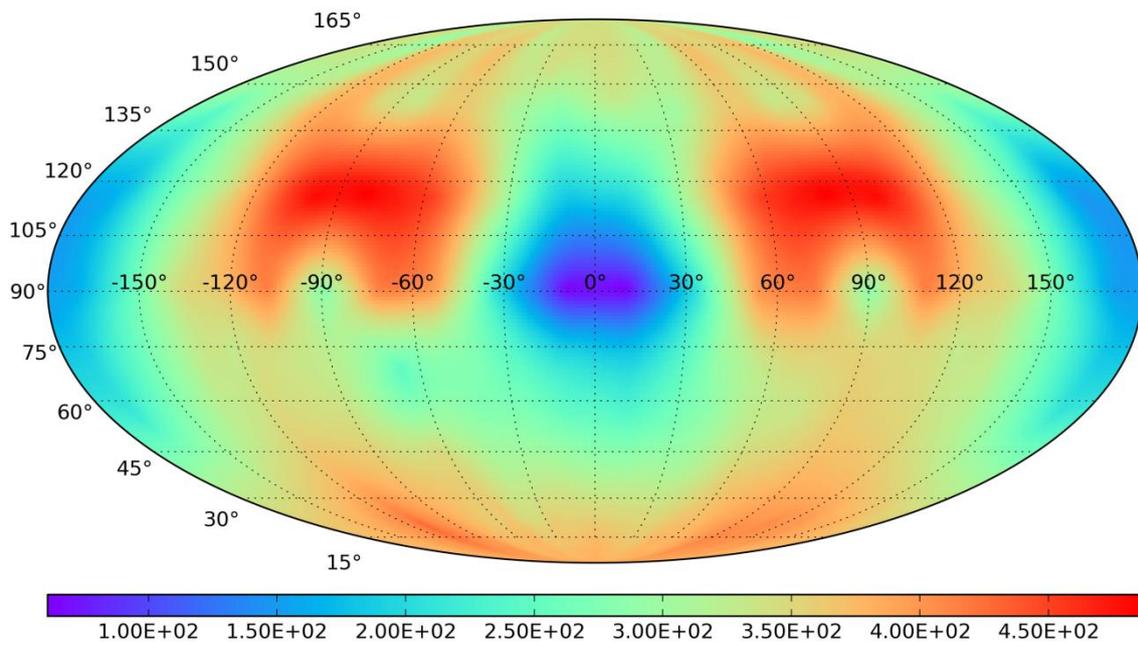
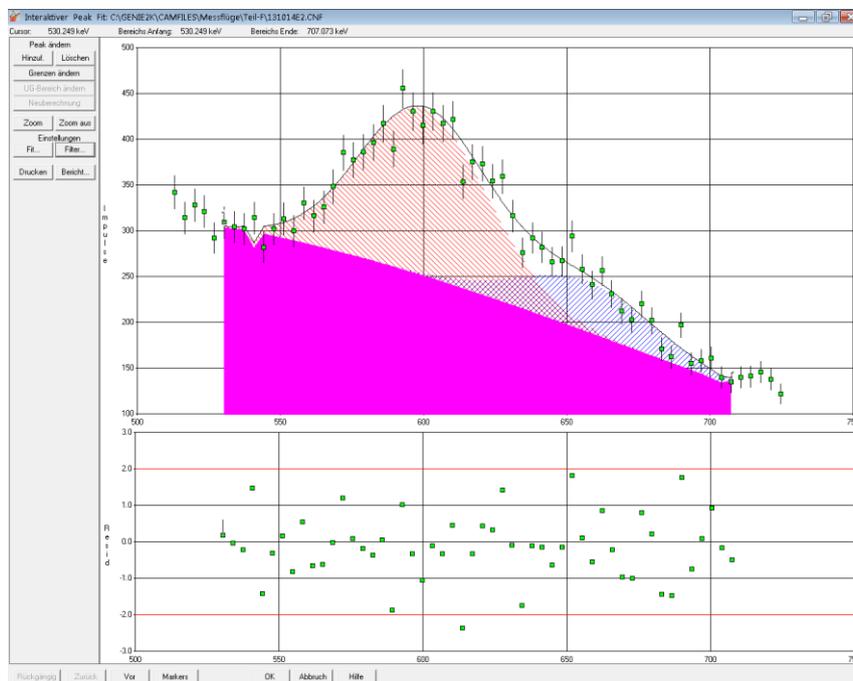
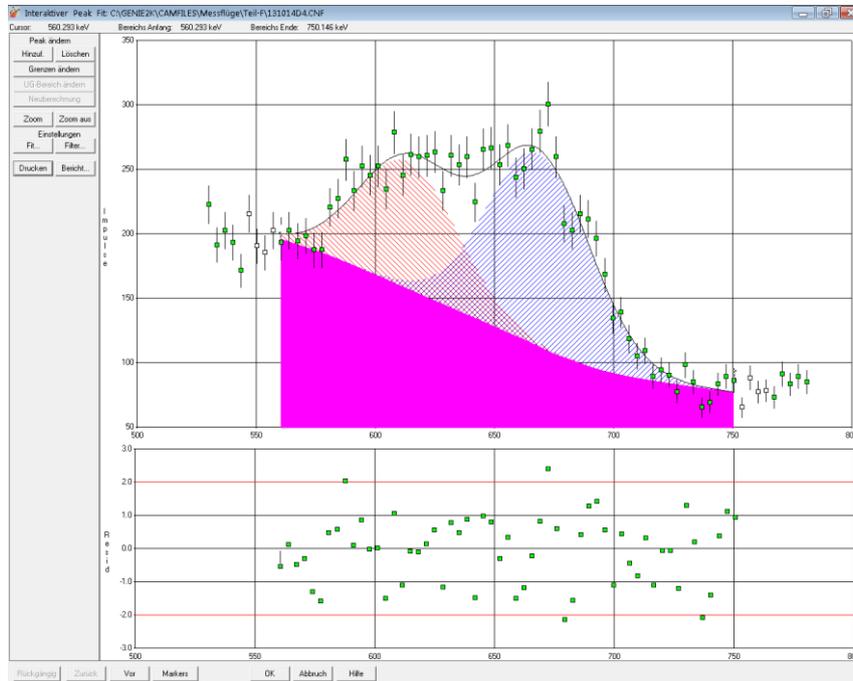


Abbildung A2.11 und A2.12: Ausbeuten in cm^2 für die Summe der vier NaI-Detektoren für die 662-keV- und die 1332-keV-Linie und für den leeren Tank.

Anhang 2.6: Interaktiver Peakfit



Beispielhafte Auswertungen mit dem „Interaktiven Peak Fit“ von Genie 2000 für die Linien bei 609 keV (Bi-214) und 662 keV (Cs-137).

Anhang 3: Betrachtung zur Symmetrie des Hubschraubers

Die Messungen am Hubschrauber erfolgten unter der Maßgabe der Achsensymmetrie nur für Strahlerpositionen auf der rechten Seite. 16 der 66 Messpunkte liegen kreisförmig um den Hubschrauber auf der Symmetrieachse. Für die Detektoren 2 und 3 sowie die Detektoren 4 und 5 wurde die Ausbeute für diese Punkte miteinander verglichen. Idealerweise stimmt sie für die einzelnen Punkte überein, was auf einen spiegelbildlich identischen Aufbau des Hubschraubers hindeuten würde. In den Abbildungen A3.1 und A3.2 ist dieser Vergleich dargestellt. Dabei wurden für die Punkte auf der Symmetrieachse (vgl. Tabelle A3.1 und Abbildung A2.1 und A2.2) die Ausbeuten, die sich für die links liegenden Detektoren (2 und 4) ergeben haben, jeweils durch die Ausbeuten, die sich für die rechts liegenden Detektoren (3 und 5) ergeben haben, geteilt. Dargestellt sind diese Verhältnisse für die 662-keV-Linie von Cs-137 und für die 1332-keV-Linie von Co-60 und für die Tankfüllstände „leer“, „halb“ und „voll“. Der angegebene Winkel ist der Winkel vom Mittelpunkt der verglichenen Detektoren zum Messpunkt auf der Symmetrieachse, wobei positive Winkel in Flugrichtung liegen. Für die Einstrahlung von unten ist eine genauere Kenntnis der Ausbeuten für die späteren Messungen am wichtigsten. Die Einstrahlung von der Seite oder von oben ist nur für Luftkontaminationen relevant. Dabei ist für die Einstrahlung von der Seite von einem symmetrischen Aufbau auszugehen, da sich hier nur die Wand des Hubschraubers befindet. Nach oben ist der Hubschrauber, wie man an Abbildung A3.1 und A3.2 sieht, nicht unbedingt symmetrisch aufgebaut, da sich hier Elektronik und das Gasturbinentriebwerk befinden, die ungleichmäßig abschirmen.

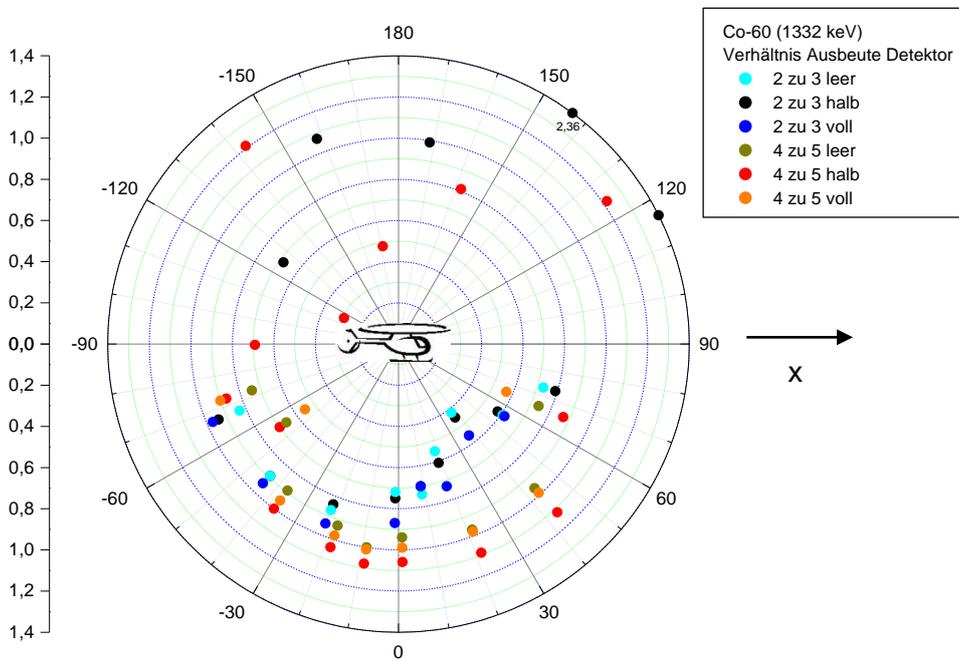
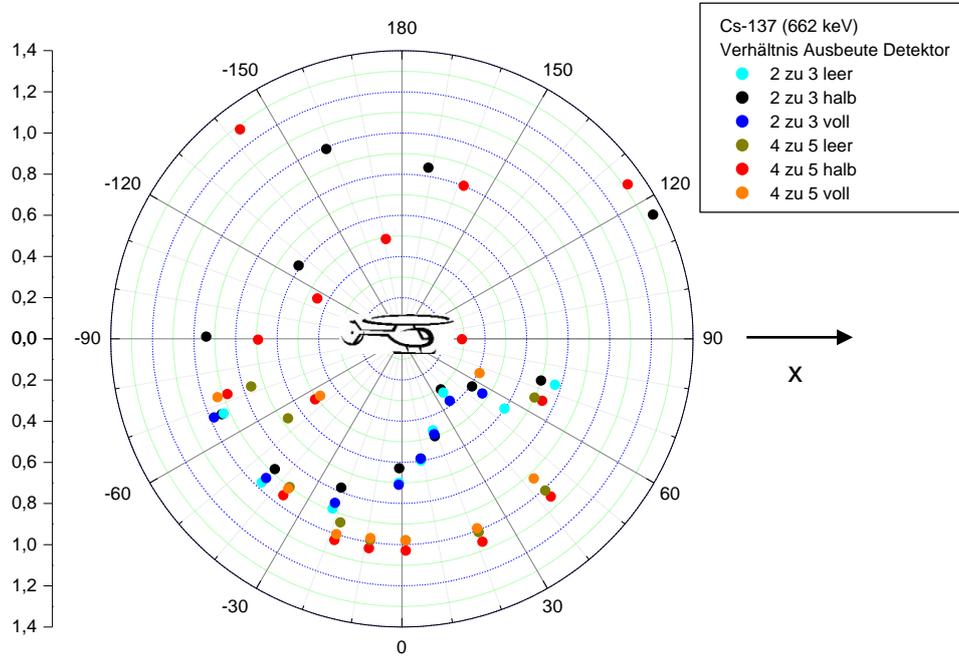


Abbildung A3.1 und A3.2: Verhältnisse der Ausbeuten der Detektoren für die Punkte auf der Symmetrieachse.

Für den unteren Halbraum erkennt man, dass dort die Ausbeuten der Detektoren 4 und 5 praktisch gleich sind und das Verhältnis ungefähr bei 1 liegt. Nur nach hinten bei ca. -55 Grad geht dieses zurück. Bei den Detektoren 2 und 3 geht das Ausbeutenverhältnis für 662 keV zwischen dem Detektor 2 und dem Detektor 3 von hinten nach vorne stetig zurück von ca. 1 bei -70 Grad auf unter 0,4 bei 40 Grad in Flugrichtung (vgl. Tabelle A3.1).

Punkt Nummer	Winkel in Abbildung 1 und 2	Verhältnis für 662 keV gemittelt	Verhältnis für 1332 keV gemittelt
41	-67,0	0,95	0,91
31	-43,9	0,93	0,91
21	-21,9	0,84	0,88
11	-1,1	0,68	0,78
1	8,9	0,60	0,71
2	18,6	0,49	0,63
12	37,4	0,34	0,48
22	55,5	0,49	0,60
32	73,1	0,73	0,76

Tabelle A3.1: Gemessene Zahlenwerte für die Verhältnisse der Ausbeuten von Detektor 2 zu Detektor 3 gemittelt über die drei Tankfüllungen „leer“, „halb“ und „voll“.

Der Grund liegt in der nicht symmetrischen Bauweise des Zusatztanks im hinteren Teil des Hubschraubers (vgl. Abbildung A3.3). Man erkennt, dass sich unter dem Detektor 3 eine Einbuchtung im Tank befindet, die bei der Einstrahlung von unten eine geringere Abschirmung bewirkt. Dadurch ist die Ausbeute für Einstrahlung von unten aus bestimmten Winkeln beim Detektor 3 höher als beim Detektor 2. Dies bedeutet (a) eine Unterschätzung der Ausbeute, wenn die Ausbeuten vom Detektor 2 auf Detektor 3 gespiegelt werden für die Punkte 3 und 10 (vgl. Abb. A2.1) und (b) eine Überschätzung der Ausbeute, wenn die Ausbeuten vom Detektor 3 auf Detektor 2 gespiegelt werden für die Punkte 3 bis 10, 13, 14, 19, 20, 23 und 33 (vgl. Abb. A2.1).

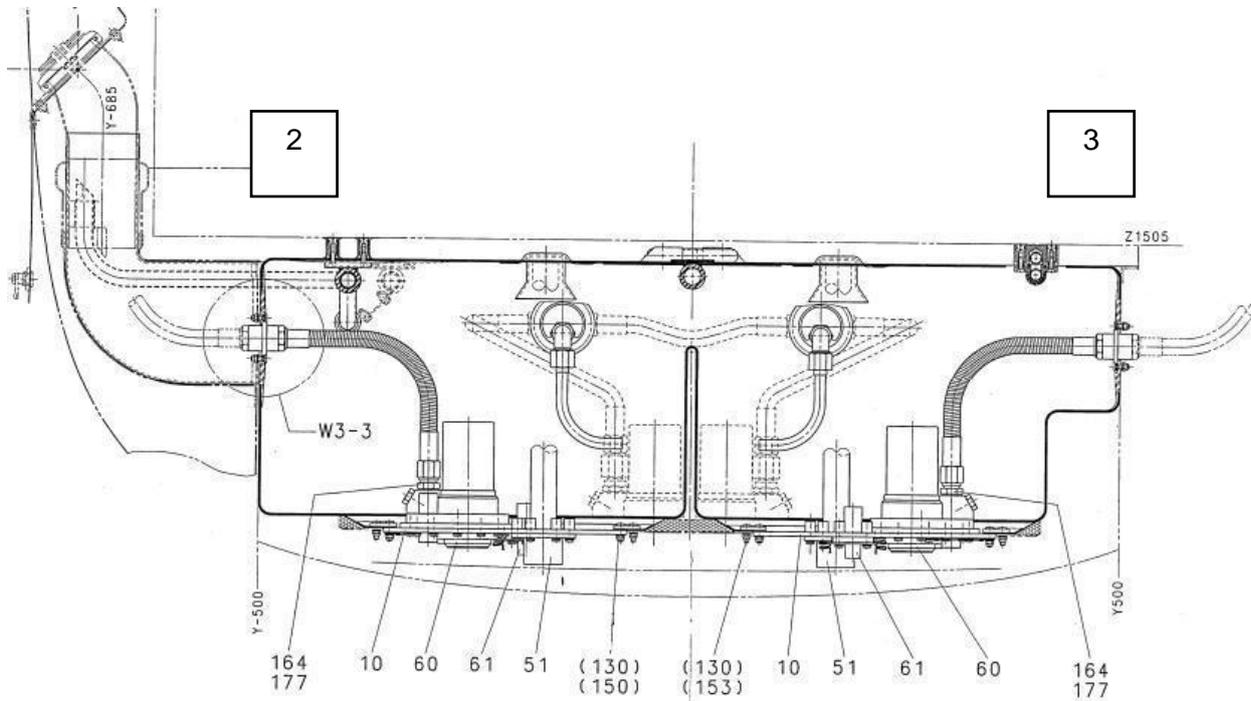


Abbildung A3.3: Ansicht des Tanks mit den Detektoren 2 und 3 von hinten.

Für die hinten gelegenen Punkte 30 und 40 ist der Effekt auf Grund des nach hinten schmal zulaufenden Tanks vernachlässigbar. Da die Ausbeuten für die Einstrahlung von unten am bedeutendsten sind, wurden dort die Unter- und Überschätzungen korrigiert.

Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen. Im Fall (a) werden als Ausgangswerte die Ausbeutenverhältnisse für die Punkte 2 und 11 verwendet und die Verhältnisse für die Punkte 3 bzw. 10 zwischen diesen Werten und dem Wert 1 interpoliert. Das Verhältnis der Ausbeuten für Punkt 2 gemittelt über alle drei Tankfüllungen ist für 662 keV 0,49. Somit wird dem Verhältnis für Punkt 3 der Wert 0,75 zugeordnet. Bei Punkt 11 ist das Verhältnis der Ausbeuten 0,68, daraus folgt für Punkt 10 0,84. Die Ausbeuten für Detektor 2 werden für diese Punkte durch diese Faktoren geteilt und dann für die gespiegelten Punkte für Detektor 3 verwendet, um die entsprechend höhere Ausbeute zu erhalten (s. Tabelle A3.2).

Im Fall (b) wird folgendermaßen vorgegangen: Es wurden mit Hilfe von MicroShield die Ausbeutenverhältnisse für Strahlerpositionen direkt unter dem Detektor abgeschätzt. Es wurden den relativ senkrecht unter dem Detektor liegenden Punkten 5, 6,

7 und 8 die errechneten Werte zugeordnet. Für die zwischen Punkt 2 und 5 sowie Punkt 8 und 11 liegenden Punkte wird die Korrektur zwischen den für Punkt 5 und 8 erhaltenen Verhältnissen und den Verhältnissen für die Punkte 2 und 11 interpoliert. Für die Punkte 13, 20, 23 und 33 wurden die gleichen Verhältnisse verwendet wie für die benachbarten Punkte 12, 21, 22 und 32. Für die Punkte 14 und 19 wurde zwischen den Werten für 13 und 20 und dem Wert 1 interpoliert. Die Ausbeuten für Detektor 3 werden für diese Punkte mit den erhaltenen Faktoren multipliziert und dann für die gespiegelten Punkte für Detektor 2 verwendet, um die entsprechend niedrigere Ausbeute zu erhalten (s. Tabelle A3.2).

Um genauere Daten zu erhalten, müssten zusätzliche Messungen am Hubschrauber auf der linken Seite durchgeführt werden.

Punkt Nummer	Korrektur im Fall (a), 662 keV	Korrektur im Fall (b), 662 keV	Korrektur im Fall (a), 1332 keV	Korrektur im Fall (b), 1332 keV
3	1/0,75	0,48	1/0,82	0,61
4		0,46		0,59
5		0,45		0,57
6		0,45		0,57
7		0,45		0,57
8		0,45		0,57
9		0,53		0,64
10	1/0,84	0,60	1/0,89	0,71
13		0,34		0,48
14		0,67		0,74
19		0,92		0,94
20		0,84		0,88
23		0,49		0,60
33		0,73		0,76

Tabelle A3.2: Korrekturfaktoren, die zu multiplizieren sind, um die korrigierten Ausbeuten für den jeweils anderen Detektor zu erhalten.

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz