

Diss. ETH Nr. 13973

METHODISCHE WEITERENTWICKLUNGEN IN DER AERORADIOMETRIE

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER NATURWISSENSCHAFTEN

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

Benno Bucher

Dipl. Natw. ETHZ
geboren am 25. Januar 1970
von Emmen, Kanton Luzern

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. L. Rybach, Referent
Dr. G. Schwarz, Korreferent
Prof. Dr. A. Green, Korreferent

2001

Vorwort

Als begeisterter Berggänger vergleiche ich eine Dissertation mit einer Himalajaexpedition, wobei mir selbstverständlich die Besteigung des Himalaja als schwieriger erscheint. Die Gemeinsamkeit dieser doch sehr unterschiedlichen Projekte besteht darin, dass jeder Kandidat oder Bergsteiger, sei es bei einer Dissertation oder bei der Besteigung des Himalaja, das Ziel nur aus eigener Kraft erreichen kann. Trotzdem sind beide für einen Erfolg ihres Vorhabens auf die Unterstützung von Führern, Trägern und Freunden angewiesen. Meinen Führern, Trägern und Freunden, ohne die diese Dissertation nie gelungen wäre, möchte ich an dieser Stelle herzlich für ihre Unterstützung danken. Ein spezielles Dankeschön geht an:

Professor Ladislaus Rybach für das Vertrauen und die stete Unterstützung als Referent sowie für das ausgezeichnete, familiäre Arbeitsklima in der Gruppe Geothermik und Radiometrie, wo ich mich immer wohl fühlte;

Dr. Georg Schwarz für die Übernahme des Korreferats, die stete Unterstützung und Hilfsbereitschaft und die fruchtbaren Ideen und Diskussionen;

Professor Alan Green für die Übernahme des Korreferats;

Christoph Bärlocher für die ausgezeichnete technische Unterstützung und die fruchtbaren Diskussionen, ohne die einige Teile dieser Arbeit nicht gelungen wären;

alle Mitglieder der Gruppe Geothermik und Radiometrie für die gute Zeit und die interessanten Diskussionen in der Kaffeepause;

Karin Aecherli für die Unterstützung und die Ablenkung in der Freizeit, die mir die nötige Erholung und Distanz am Wochenende brachten und

meine Eltern, die mir diese Ausbildung über Matura und Studium erst ermöglichten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	IV
Summary	VI
1 Einleitung	1
1.1 Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile der Aeroradiometrie	1
1.2 Entwicklung.....	2
2 Ausgangslage und Zielsetzungen	3
2.1 Ausgangslage.....	3
2.2 Problemstellung.....	3
2.3 Zielsetzungen.....	4
3 Hardwareentwicklungen	6
3.1 Einleitung	6
3.2 Global Positioning System (GPS).....	8
3.2.1 Ausgangslage.....	8
3.2.2 Differential GPS	9
3.2.3 P-Code	12
3.2.4 Diskussion.....	14
3.2.5 Fazit.....	15
3.3 Datenübertragung Messsystem-Laptop	17
3.3.1 Anforderung an Datenübertragung	17
3.3.2 Realisation	17
3.3.3 Fazit.....	18
3.4 Datenübertragung Helikopter-Bodenstation.....	19
3.4.1 Erste Tests.....	19
3.4.2 Anforderungen an Datenübermittlung	20
3.4.3 Fazit.....	20
4 Online Datenauswertung und –Kartierung	21
4.1 Ausgangslage.....	21
4.2 Zielsetzungen.....	22
4.3 Realisation	23
4.3.1 Grobkonzept	23
4.3.2 Verzeichnis- und Filestruktur.....	24
4.3.3 Hauptcontainer.....	25
4.3.4 System-Modul	27
4.3.5 Auswerte-Modul.....	28
4.3.6 Darstellungs-Modul.....	29
4.3.7 Datenexport.....	31
4.4 Praxistest und Verifikation.....	33
4.4.1 Erkennung von Anomalien.....	33
4.4.2 Quellensuche	35
4.4.3 Verifikation der Resultate	37

4.5	Fazit	38
5	Neuerungen in der Auswertemethodik	40
5.1	Einleitung	40
5.1.1	Datenreduktion	40
5.1.2	Korrekturen.....	41
5.1.3	Umrechnung in Bodenaktivitäten und Dosisleistungen	42
5.2	Dosisleistungsbestimmung mit der Spectrum Dose Index (SDI) Methode.....	44
5.2.1	Ausgangslage.....	44
5.2.2	Die SDI Methode.....	44
5.2.3	Wahl des Schwellenwertes.....	47
5.2.4	Bestimmung der Berechnungsparameter	49
5.2.5	Ergebnisse.....	53
5.2.6	Fazit.....	54
5.3	Höhenkorrektur mit DHM und Barometerhöhe	56
5.3.1	Ausgangslage.....	56
5.3.2	Zielsetzung.....	57
5.3.3	Positionsbestimmung.....	57
5.3.4	Realisation der Auswerteroutinen.....	60
5.3.5	Ergebnisse.....	61
5.3.6	Fazit.....	65
6	Geographische Informationssysteme (GIS) in der Aeroradiometrie	66
6.1	Ausgangslage.....	66
6.2	Aufbau des GIS	67
6.2.1	Zielsetzungen.....	67
6.2.2	Hard- und Softwareevaluation	68
6.2.3	Aufbau der Datenbasis	68
6.3	Möglichkeiten der Darstellung	71
6.4	Räumliche Analysen	73
6.4.1	Einfluss des Waldes auf die Radarhöhenmessung	73
6.4.2	Verteilung der externen Dosisleistung in der Schweizer Bevölkerung	73
6.4.3	Das GIS als Werkzeug zur Spektrenanalyse.....	77
6.5	Fazit	82
7	Interkalibration	85
7.1	Einleitung	85
7.1.1	Background und kosmische Streufaktoren	85
7.1.2	Bestimmung der Streufaktoren	86
7.1.3	Abschwächungskoeffizienten	87
7.1.4	Umrechnungsfaktoren	88
7.1.5	Andere Kalibrationsverfahren.....	89
7.1.6	Vergleich mit Bodenmessungen	90
7.2	Interkalibration Österreich - Schweiz.....	92
7.2.1	Messsystem Österreich.....	92
7.2.2	Kalibration des österreichischen Messsystems.....	92
7.2.3	Interkalibrationsmessung.....	95
7.2.4	Datenvergleich.....	96

7.3	Interkalibration Deutschland - Schweiz	100
7.3.1	Das deutsche Messsystem	100
7.3.2	Kalibration des deutschen Messsystems	101
7.3.3	Interkalibrationsmessung	103
7.3.4	Datenvergleich	104
7.4	Fazit	115
8	Datenanalysen und Fehlerbetrachtung	117
8.1	Einleitung	117
8.2	Künstliche Radioaktivität in der Schweiz	119
8.2.1	Kernkraftwerke und Forschungsinstitute	119
8.2.2	Industriebetrieb Studer Kabelwerke AG	124
8.2.3	Folgen des Tchernobyl-Unfalles	125
8.2.4	Fazit	125
8.3	Statistische Analyse von mehrjährigen Messungen	127
8.3.1	Fehlerbetrachtung	127
8.3.2	Ergebnisse	129
8.3.3	Diskussion der Ergebnisse	139
8.3.4	Vergleich	140
8.3.5	Natürliche Einflüsse auf das Strahlungsfeld	141
8.3.6	Fazit	144
9	Schlussfolgerungen	145
10	Ausblick	149
11	Literaturverzeichnis	151

Zusammenfassung

Neben den klassischen Anwendungen in der Rohstoffsuche und bei geologischen Kartierungen wird die Aeroradiometrie aufgrund der Geschwindigkeit und der geringen Kosten pro Flächeneinheit vermehrt auch im Strahlenschutz eingesetzt. Für eine entsprechende Einsatzbereitschaft muss das Messsystem ständig unterhalten und weiterentwickelt werden. Diese Aufgabe und die wissenschaftliche Unterstützung der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) wird im Auftrag der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen durch die Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie des Institutes für Geophysik an der ETH Zürich wahrgenommen. Im Rahmen dieses Auftrages sollen zum einen das Messsystem und die Auswertemethodik weiter ausgebaut und zum anderen die Mitarbeit der Schweiz am EU-Projekt „European Coordination of Environmental Airborne Gamma Ray Spectrometry“ (ECEAGS) ermöglicht werden.

Mit einem neuen GPS-Empfänger, der neben dem C/A-Code auch den für militärische Zwecke reservierten P-Code nutzen kann, konnte die Genauigkeit der Positionen enorm erhöht werden und liegt nun bei ± 10 m. Diese Genauigkeiten werden unabhängig vom Relief erreicht, da der Empfänger im Gegensatz zu DGPS nicht auf UKW-Signale angewiesen ist, welche die Korrekturen übertragen. Neben diesem Austausch des GPS-Empfängers konnte im Bereich der Hardware auch mit Tests gezeigt werden, dass eine Datenübertragung via Mobiltelefonie vom Helikopter zu einer Bodenstation möglich ist. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, die Messflüge und ihre Resultate an einem beliebigen Standort am Boden mitzuverfolgen.

Als Ersatz für die DOS-basierte Auswertesoftware „Gamer“ wurde eine benutzerfreundliche Software auf einer Windows-Plattform geschaffen. Diese ist einfach über Menüs zu steuern und der Benutzer wird so geführt, dass keine fehlerhaften Auswertungen mehr möglich sind. Die Auswertung enthält alle Korrekturen, die auch bei „Gamer“ verwendet werden. Während den Messflügen kann die neue Software auch online betrieben werden. Dabei werden die Messdaten vom Messsystem ausgelesen, ausgewertet und online direkt in einer Karte dargestellt. Zusammen mit anderen Überwachungswerkzeugen wird die Suche und Lokalisierung radioaktiver Quellen dadurch wesentlich vereinfacht. Durch die online Auswertung während des Messfluges wird ein enormer Zeitgewinn erreicht, liegen die Resultate doch bereits bei der Landung vor. In Kombination mit einer Datenübertragung vom Helikopter zum Boden wäre es nun möglich, an einem beliebigen Ort die Messflüge und die daraus resultierenden Resultate online auf einer Karte mitzuverfolgen.

Mit Hilfe der erreichten hohen Genauigkeit in der Positionierung konnte nun erstmals bewiesen werden, dass das Radar über Wäldern und Talflanken falsche Flughöhen über Grund liefert. Über Wäldern beträgt die mittlere Abweichung der Radarhöhe von der tatsächlichen Höhe rund 20 m. Um diese Fehler zu eliminieren wurde ein Korrekturverfahren entwickelt, bei dem die Radarhöhe durch die Barometerhöhe und ein digitales Geländemodell ersetzt werden. Durch diese Korrektur kann eine in der Vergangenheit erfolgte Unterschätzung der ^{40}K Aktivitäten um 20 % vermieden werden.

Die neue SDI-Methode zur Dosisleistungsbestimmung liefert für die Aeroradiometrie äusserst genaue Resultate. Im Mittel liegen die Unsicherheiten der Resultate unter 10 %. In den berechneten Dosisleistungen ist alle Strahlung von Radionukliden mit Gammalinien im Bereich

von 240 keV bis 3'000 keV sowie der kosmische Beitrag berücksichtigt. In der Berechnung sind auch Korrekturen für den Background des Helikopters und die unterschiedlichen Flughöhen enthalten.

Eine Pilotstudie zeigte die enormen Möglichkeiten eines Geographischen Informationssystems (GIS) in der flexiblen Darstellung und Analyse von aeroradiometrischen Daten. Sie belegte auch die für eine Archivierung nötige Voraussetzung einer Datenbank, die sowohl die Rohdaten wie auch die Kalibrationsdaten der verschiedenen Messflüge enthalten muss. Aufgrund der Erfahrungen aus der Pilotstudie wurde schliesslich ein Grobkonzept für ein GIS und die entsprechenden Datenbanken erstellt.

Die bilateralen Vergleichsflüge mit Österreich und Deutschland bestätigten die gute Kalibration des schweizerischen Messsystems. Die in der Schweiz gebräuchliche Kalibration mit Punktquellen erwies sich dabei durchaus ebenbürtig zu Kalibrationen mit Calibration Pads. Die Stabilität der Spektren, die bei den beiden ausländischen Teams leider nicht immer gegeben war, wurde als Grundvoraussetzung für zuverlässige und genaue aeroradiometrische Resultate identifiziert. Aus den bilateralen Vergleichsflügen konnten auch Ansprüche an zukünftige Interkalibrationsmessungen definiert werden. So müssen für eine wirkliche Interkalibration Position, Flughöhe über Boden, Barometer- oder GPS-Höhe, Temperatur sowie kosmische Zählrate und das ganze Spektrum aufgenommen werden, wobei die Stabilität der Spektren vorausgesetzt wird. Im gemeinsamen Messprogramm muss mit jedem Messsystem ein Steigflug und ein Messflug über einer grösseren Wasserfläche durchgeführt werden. Schliesslich sind auch möglichst viele gammaspektrometrische Bodenmessungen vorzusehen, um eine gute Vergleichsbasis für die aeroradiometrischen Daten zu erhalten.

Schliesslich belegte die Analyse von mehrjährigen Messungen in der Umgebung der Kernkraftwerke eine sehr gute Reproduzierbarkeit der aeroradiometrischen Resultate. Die Unterschiede in der Dosisleistung von Jahr zu Jahr werden hauptsächlich durch Radon und seine Tochterisotope in der Atmosphäre sowie die Bodenfeuchtigkeit verursacht. Die Schwankungen der aeroradiometrischen Ergebnisse liegen etwa im selben Bereich wie diejenigen von Bodenmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern.

Summary

Besides the usual applications in resources exploration and for geological mapping airborne gamma ray spectrometry is also used in radiation protection because of the velocity and the low costs per unit area. For operational emergency preparedness in radiation protection the helicopter-borne equipment needs a continuous maintenance and development. By mandate of the Swiss Nuclear Safety Inspectorate (HSK) the Research Group for Geothermics and Radiometrics at the Institute of Geophysics, ETH Zurich performs this task. Within the scope of this mandate the airborne radiometric equipment as well as the data acquisition and processing methodology should be further developed. On the other hand the research group should participate as the Swiss partner in the EU project "European Coordination of Environmental Airborne Gamma Ray Spectrometry" (ECEAGS).

The position accuracy could be improved towards ± 10 m using a new GPS receiver which can utilise the military P-code. This means an improvement in accuracy of five to ten times compared to the old receivers. Further tests showed that data can be transmitted from the system in the helicopter to a base station. So it is now possible to follow the airborne gamma spectrometry results anywhere on the ground during the measuring flights.

To replace the DOS based data processing software "Gamero" a new user friendly software was created. This is running on a Microsoft Windows platform on a laptop. It can be steered by menus. Also it leads the user in a way that no mistakes can be done during the data processing steps. The new software includes all the corrections in its data processing procedure which are already used in "Gamero". During the measuring flights the software works online. It reads the data from the measuring system, processes the data, and displays the results in a map. Besides the map other features of the software show measured spectra, raw and processed data. With all these tools the new software makes it easy to search for lost radioactive sources. The online data processing and mapping saves a lot of time because the results can already be presented at landing. In combination with data transfer from the helicopter to a base station it is now possible to follow the results in a map in real time at any place.

On the basis of the reached position accuracy it could be proved that the ground clearance measured by radar above forests is erroneous. The average deviation above forests is about -20 m. So a method was developed which replaces the radar height by the difference between baro altitude and a digital terrain model. This correction reduces the underestimation of the radioactivity in forests. For ^{40}K the correction makes a difference of about 20 %.

The new spectrum dose index (SDI) method leads to very accurate results for the dose rate. In the average the accuracy is better than 10 %. Furthermore the calculated dose rate contains all radiation between 240 keV and 3'000 keV and the cosmic contribution. The method has been extended to include corrections for the background of the helicopter and for varying flight altitudes.

In a pilot project the enormous potential of geographical information systems (GIS) in flexible displaying and analysis of aeroradiometric data was demonstrated in several examples. Furthermore it became obvious that a data bank is needed for the data management of a GIS. In that way a data archive can also be realised. So a rough draft for a real GIS and the corresponding data bank was designed.

The measuring flights together with the teams from Austria and Germany and the comparison of ground and airborne gamma spectrometry results proved the good calibration of the Swiss airborne radiometric system. Also it can be concluded that the calibration with point sources as it is used in Switzerland is equivalent to the calibration with pads.

As the basic condition for a comparison of aeroradiometric results the stability of spectra could be identified. Unfortunately the Austrian and German team didn't have stable spectra all over the flights. On the basis of the experiences made in the common exercises with Austria and Germany the demands for such flights in the future could be defined: A basic data set which includes position, flight altitude above ground, baro or GPS altitude, temperature, cosmic count rate and the whole spectra from 40 keV to 3'000 keV has to be taken; the measuring programme has to contain an ascending flight and an flight over a large water surface for each aeroradiometric system; a lot of ground measurements which are used for the controlling of the aeroradiometric results has to be carried out.

The good reproduction of aeroradiometric results could be proved by the analysis of the data measured over the last ten years in the surroundings of the Swiss nuclear facility sites. The differences in the results from year to year is caused by radon and its daughter isotopes in the atmosphere and by the water content of the soil. For a single point the differences over the years in the dose rate calculated from aeroradiometric data are similar to those of ground measurements with Reuter Stokes ionisation chambers.

1 Einleitung

Die radioaktive Strahlung, der wir ständig ausgesetzt sind, ist Teil unserer Umwelt. Der grösste Teil der Strahlung ist natürlichen Ursprungs. Er stammt von der kosmischen Strahlung, der natürlichen Radioaktivität des Bodens und Folgeprodukten des Edelgases Radon in der Luft. Ein kleinerer Teil stammt von künstlicher Radioaktivität, die aus Kernkraftwerken, Industrie, Spitäler und Forschungsinstituten in die Umwelt gelangt. Normalerweise ist dieser Beitrag sehr gering, kann aber bei Unfällen sehr bedeutend werden.

Aufgrund des schädigenden Einflusses radioaktiver Strahlung auf die Gesundheit des Menschen besteht ein öffentliches Interesse an der grossräumigen Überwachung der Radioaktivität. In der Schweiz erfolgt diese Überwachung durch das Bundesamt für Gesundheit (BAG). Zur Erfüllung dieser Aufgabe werden neben automatischen Messungen mit festen Messnetzen wie NADAM (Netz für automatischen Dosis-Alarm und Messung) und RADAIR (Messung der Radioaktivität in der Luft) auch Labormessungen an Stichproben von Erdboden, Gras, Wasser und Lebensmitteln durchgeführt. Für die Erfassung der externen Strahlung im Freien werden insitu gammaspektrometrische Messungen und Dosisleistungsmessungen mit Ionisationskammern durchgeführt. Im weiteren wird auch innerhalb eines speziellen Programmes die Radonproblematik in Häusern untersucht und die Bevölkerung dafür sensibilisiert. Über die Resultate des schweizerischen Überwachungsprogrammes gibt jeweils der Jahresbericht des BAG (BAG 1993-1999) eine gute Übersicht.

Einer besonderen Überwachung unterliegen die Kernkraftwerke und die anderen Kernanlagen der Schweiz. Diese Aufgabe wird durch die Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) mit einem speziellen Messnetz (MADUK: Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) wahrgenommen.

Bei radiologischen Notfallsituationen übernimmt die Nationale Alarmzentrale (NAZ) die Koordination der Messmittel, die Alarmierung der Bevölkerung sowie die Massnahmenplanung.

Das seit 1986 verfügbare Aeroradiometriesystem ergänzt die oben genannten Messmittel und bildet seit 1994 einen integralen Bestandteil der Notfallorganisation des Bundes. Im folgenden werden die Einsatzgebiete und die Entwicklung der Aeroradiometrie näher erläutert.

1.1 Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile der Aeroradiometrie

Neben den klassischen Anwendungen in der Rohstoffsuche (insbesondere für die Uranprospektion) und bei geologischen Kartierungen kann die Aeroradiometrie bei der Suche nach verlorenen, radioaktiven Quellen, zum Aufspüren von radioaktiven Altlasten sowie zur Beweissicherung bei flächenhafter Verstrahlung nach Unfällen in Kernanlagen oder mit atomaren Waffen eingesetzt werden.

Mit gammaspektrometrischen Messflügen lassen sich grosse, auch unzugängliche Gebiete schnell vermessen. Dies ist vor allem bei Notfalleinsätzen von Bedeutung.

Durch ihre Messgeometrie (Flughöhe von ca. 100 m) liefern aerogammaspektrometrische Messungen Mittelwertmessungen über eine Fläche von rund 300 m x 300 m. Bei

flächendeckenden Messungen sind ihre Resultate deshalb aussagekräftiger als punktuelle Bodenmessungen. Die Vorteile von aeroradiometrischen Untersuchungen gegenüber Bodenmessungen liegen somit in der höheren Geschwindigkeit, den geringeren Kosten pro Flächeneinheit und den repräsentativeren Aussagen (IAEA 1979).

Neben den Vorteilen bestehen bei gammaskpektrometrischen Messflügen natürlich auch Nachteile. Bei starkem Geländere relief und beim Vorhandensein von Lufthindernissen wie Hochspannungsleitungen und Transportseilbahnen kann die Sollflughöhe von 100 m nicht eingehalten werden. Damit sinkt die Datenqualität.

Schliesslich ist das räumliche Auflösungsvermögen von aerogammaskpektrometrischen Messungen durch den integrativen Charakter und die Distanz zum Boden eingeschränkt. Auch sind schwache Quellen nur schwer zu detektieren.

1.2 Entwicklung

Die Aeroradiometrie begann in der Schweiz mit einem Projekt der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission (SGPK) im Jahr 1986. Dabei wurde mit dem Ziel einer flächendeckenden Kartierung der Zentralmassive eine aerogammaskpektrometrische Messapparatur der Firma Geometrics angeschafft. Im Rahmen einer Dissertation in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie (GTR) am Institut für Geophysik der ETH Zürich (Schwarz 1991) wurde ein Korrektur- und Auswerteverfahren für aerogammaskpektrometrische Messungen, unter spezieller Berücksichtigung der schweizerischen Verhältnisse, entwickelt. Die Messungen im Rahmen des SGPK-Projektes wurden im Jahre 1991 beendet. Damit war die radiometrische Vermessung der Zentralmassive und damit eines beträchtlichen Teils der Schweizer Alpen abgeschlossen (Schwarz et al. 1992a).

Im Jahre 1989 wurden zum ersten Mal im Auftrag der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) die Umgebung der schweizerischen Kernkraftwerke in Beznau, Gös gen, Leibstadt und Mühleberg sowie der Forschungsanstalt Paul Scherrer Institut (PSI) durch die GTR aeroradiometrisch vermessen. Bis 1994 erfolgten diese Messflüge im Auftrag der HSK jährlich.

Im Winter 1991/1992 wurde nach technischen Problemen mit dem zur Verfügung stehenden Messsystem eine neue Messapparatur konstruiert (Schwarz et al. 1992b). Als wichtige Neuerung wurde ein Spektrometer mit automatischer Stabilisierung der einzelnen Spektren und das satellitengestützte Positionierungssystem GPS (Global Positioning System) eingebaut (Schwarz et al. 1997a).

Im Jahre 1994 wurde die Aeroradiometrie in die Notfallorganisation des Bundes integriert. Seither finden die jährlichen Messflüge unter der Leitung der Nationalen Alarmzentrale statt. Gleichzeitig erfolgte auch der Wechsel von privaten Helikoptern zum Super Puma der Schweizer Armee. Mit der Integration in die Notfallorganisation des Bundes wurde bei den Überwachungsflügen in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen zu einem Zweijahresrhythmus übergegangen.

2 Ausgangslage und Zielsetzungen

2.1 Ausgangslage

Um die Einsatzbereitschaft der Aeroradiometrie innerhalb der Notfallorganisation des Bundes langfristig sicherzustellen, muss das Messsystem unterhalten und weiterentwickelt werden. Diese Aufgabe und die wissenschaftliche Unterstützung der Nationalen Alarmzentrale im Bereich der Aeroradiometrie wird im Auftrag der HSK durch die GTR wahrgenommen. Im Rahmen dieses Auftrages sollen zum einen das Messsystem und die Auswertemethodik verbessert und zum anderen die Mitarbeit der Schweiz am EU-Projekt „European Coordination of Environmental Airborne Gamma Ray Spectrometry“ (ECEAGS) ermöglicht werden.

Diese Punkte bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit. Im folgenden werden die Problemstellung und die Zielsetzung des Projektes konkretisiert.

2.2 Problemstellung

Im Jahre 1996 startete das EU-Projekt ECEAGS, das die Etablierung eines Kommunikationsnetzwerkes unter den europäischen Aeroradiometrie-Teams, Aussagen über die Vergleichbarkeit der eingesetzten Messsysteme, Auswertungsalgorithmen und Daten, Absprachen über Forschungsaktivitäten und internationale Zusammenarbeit, erste Schritte zu einer Standardisierung der Auswertemethodik und eine Definition der zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsrichtung anstrebte. Obwohl die Schweiz nicht EU-Mitglied ist, konnte die GTR als Partner an diesem Projekt teilnehmen. Dies ist für die Schweiz wichtig, da die Teilnahme am Projekt einen internationalen Vergleich erlaubt.

Die Messflüge der letzten Jahre zeigten zudem verschiedene Probleme und Verbesserungsmöglichkeiten auf, welche die Messtechnik, den Einsatz bei Notfällen und die Datenarchivierung betrafen. So wiesen die vom Global Positioning System (GPS) gelieferten Positionen sprunghafte Änderungen auf. Ebenfalls bestanden Hinweise, dass die gemessenen Radarhöhen über Wald und Talflanken nicht den effektiven Höhen über Grund entsprechen und damit fehlerhafte Korrekturen angebracht werden.

Bei Notfalleinsätzen sollten die Resultate möglichst rasch, am besten online, vorliegen. Weiter müssen bei diesen Einsätzen die Auswertungen der Messdaten durch Milizsoldaten erfolgen können. Beide Anforderungen lassen sich mit dem eingesetzten Programmpaket „Gamero“, welches für wissenschaftliche Auswertungen entwickelt wurde, nicht erfüllen. Dadurch sind die Auswertemöglichkeiten bei einer Notfallsituation nicht optimal.

Zu den Einsatzgebieten der Aeroradiometrie gehört auch die Quellensuche. Mit dem derzeitigen Messsystem ist dies aufgrund der fehlenden online Auswertung jedoch schwierig.

Die heute bei den Einsätzen verwendeten Methoden zur Dosisleistungsbestimmung sind sehr grob (Total Counts Methode) oder ziemlich aufwendig (Berechnung der Dosisleistung über die Aktivitäten der verschiedenen Radionuklide). In der aufwendigeren Methode wird nur ^{137}Cs als

künstliches Radionuklid berücksichtigt. Dadurch ist diese Methode schlecht für Verstrahlungssituationen mit diversen künstlichen Radionukliden geeignet.

Über die Jahre wurde eine grosse Menge von aeroradiometrischen Messdaten registriert. Eine systematische Archivierung dieser Daten erfolgte jedoch nicht. Deshalb besteht eine potentielle Gefahr, die Daten zu verlieren, was ein enormer Verlust darstellen würde. Zudem ist der Zugriff auf ältere Daten sehr umständlich.

2.3 Zielsetzungen

Aufgrund dieser Probleme und den im Zusammenhang mit dem EU-Projekt ECEAGS angestrebten Zielen wurde ein Projektvorschlag zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen ausgearbeitet. Darin wurden für die Teilbereiche Messsystem, Datenverarbeitung, Kalibrierung, Kartierung und Standardisierung Forschungsschwerpunkte festgelegt, die im Rahmen dieser Dissertation bearbeitet werden sollen. Daraus ergeben sich folgende konkrete Zielsetzungen:

Messsystem

- Um eine bessere Lokalisierung von Anomalien zu erreichen und die Voraussetzungen für räumliche Datenanalysen zu schaffen, soll die Genauigkeit der GPS-Positionierung verbessert werden. Dabei sollen neue Technologien oder Geräte zum Einsatz kommen.
- Die Machbarkeit eines Datentransfers vom Helikopter zu einer Basisstation in Echtzeit soll geprüft und getestet werden. Bei positivem Entscheid wäre dann die Möglichkeit gegeben, die Messungen an einem beliebigen Punkt am Boden mitzuverfolgen.
- Eine vereinfachte Überwachung der Messdaten bei Notfalleinsätzen, insbesondere bei der Quellensuche, sowie eine zuverlässige, einfache und schnelle Auswertung der aeroradiometrischen Messdaten soll mit Hilfe einer online Datenauswertung und Darstellung erreicht werden.

Auswertemethodik

- Die Radarhöhen über Wäldern und Talflanken sollen auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Falls sie sich als falsch erweisen, soll eine Möglichkeit gesucht werden, sie durch andere Daten zu ersetzen und somit Artefakte zu eliminieren.
- Mit einer neuen Methode soll die Genauigkeit der bestimmten Dosisleistungen erhöht werden. Zudem sollte die Methode auch andere künstliche Radionuklide als ^{137}Cs berücksichtigen und in der ganzen Schweiz unabhängig von der Topographie eingesetzt werden können.
- Die Möglichkeiten flexibler Analysen und Darstellungen im Rahmen eines Geographischen Informationssystems (GIS) und die damit verbundenen Voraussetzungen sollen in einer Pilotstudie untersucht werden. Insbesondere sollen im Hinblick auf eine Datenarchivierung auch die Ansprüche an die Datenverwaltung innerhalb eines GIS evaluiert werden.

Kalibration

- Die Kalibration des schweizerischen Messsystems soll mit derjenigen von ausländischen Teams verglichen werden, um grundsätzliche Aussagen über die Vergleichbarkeit von aeroradiometrischen Resultaten verschiedener Messteams und die Ansprüche an eine Interkalibration zu ermöglichen sowie Grundlagen für eine zukünftige, verstärkte internationale Zusammenarbeit bei Notfalleinsätzen zu schaffen. Im Vordergrund stehen gemeinsame Messübungen mit benachbarten Ländern in bilateralem Rahmen.
- Mit gammaspektrometrischen Bodenmessungen und Dosisleistungsmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern sollen die aeroradiometrischen Daten verglichen und auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Nur so ist eine Kontrolle der Kalibration möglich.
- Um die Qualität und Genauigkeit des Messsystems sowie die Reproduzierbarkeit der Resultate beurteilen zu können, sollen Messdaten des selben Gebietes über mehrere Jahre analysiert werden.

3 Hardwareentwicklungen

3.1 Einleitung

Zur Zeit sind zwei Aeroradiometrie Messsysteme in der Schweiz verfügbar. Das eine wurde im Winter 1991/1992 gebaut, das andere wurde im Jahre 1995 aus Redundanzgründen nach der Einbindung der Aeroradiometrie in die Alarmorganisation des Bundes (1994) neu erstellt. Die beiden Messsysteme wurden am Institut für Geophysik der ETH Zürich konstruiert und sind identisch aufgebaut (Abbildung 3.1), so dass die einzelnen Komponenten zwischen den beiden Messsystemen ohne Probleme ausgetauscht werden können. Sie unterscheiden sich jedoch im Volumen des Detektors und dem Typen des GPS-Empfängers. Der eine Detektor besitzt vier Natriumjodid-Kristalle mit einem Gesamtvolumen von 16.8 Litern, der andere einen Kristall mit rund 4.2 Litern.

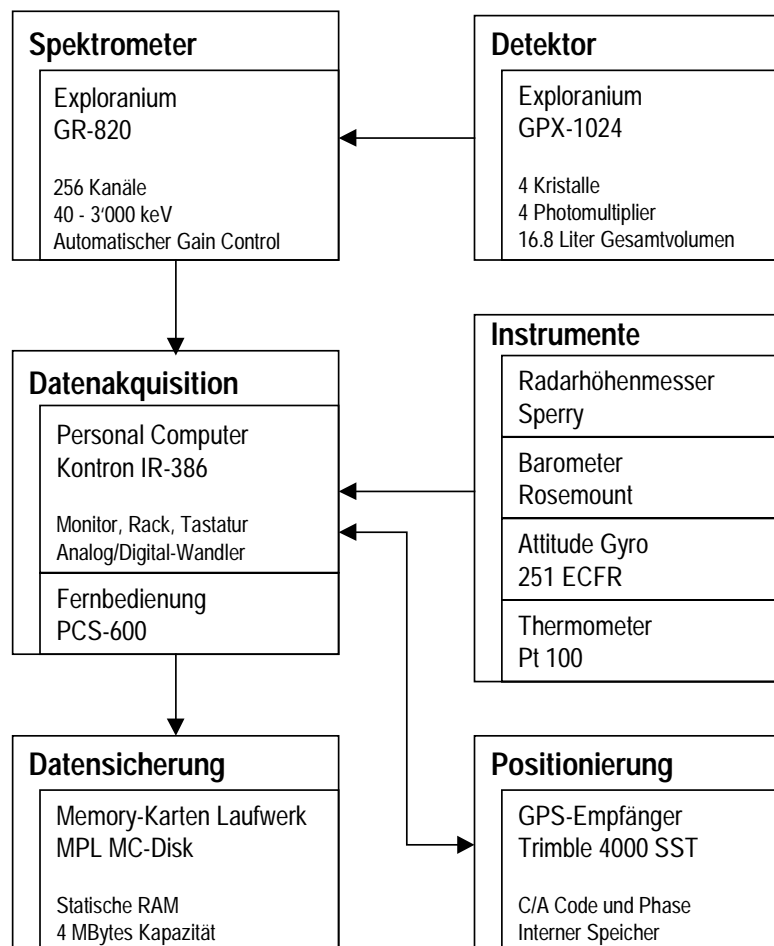


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung des Messsystems und seiner Komponenten.

Alle Komponenten mit Ausnahme des Detektors sind in einem Rack montiert. Für den Einbau in den Super Puma steht ein Einbau-Kit zur Verfügung. So ist es möglich, in 1-2 Stunden das Messsystem im Helikopter einzubauen und die Einsatzbereitschaft zu erreichen.

Die Änderungen an der GPS-Antenne des Helikopters und die angestrebte bessere Genauigkeit in der Positionierung, die für Weiterentwicklungen in der Auswertemethodik nötig war, erforderten eine Erneuerung des GPS-Positionierungssystems. Damit konnte auch eine teilweise Modernisierung des Messsystems erreicht werden.

Da in Notfallsituationen die Zeit ein wichtiger Faktor darstellt, stösst die Weiterentwicklung in der Aeroradiometrie in diese Richtung. Eine schnelle Verfügbarkeit der Messdaten und der daraus erhaltenen Resultate an dem Ort, an dem Entscheidungen über Massnahmen getroffen werden, ist entscheidend. Teilweise kann dieses Ziel über eine online Auswertung der Daten erreicht werden. Voraussetzung für eine solche online Auswertung sind jedoch auch entsprechende Entwicklungen im Hardwarebereich. So musste ein Weg für die Datenübertragung vom Messsystem auf einen Laptop gesucht und realisiert werden. Um die Daten auch möglichst in Realtime am Boden zur Verfügung zu haben, wurde nach Möglichkeiten der Datenübertragung vom Helikopter zu einer Bodenstation gesucht. Im folgenden werden nun diese Neuerungen und Entwicklungen im Hardwarebereich beschrieben.

3.2 Global Positioning System (GPS)

3.2.1 Ausgangslage

Beim Neubau des Aeroradiometrie-Messgerätes im Jahre 1992 wurde für die Positionierung ein GPS-Empfänger eingebaut. Dieser löste die Flugwegkamera ab und vereinfachte die Flugwegauswertung immens. Die Antennenposition in der Mitte des Heckrotorträgers des verwendeten Helikopters Super Puma erwies sich jedoch als nicht ideal. Durch die Rotoren und die Passagierkabine wurde ein beachtlicher Teil des Antennensichtfeldes verdeckt. Dies hatte zur Folge, dass oftmals nur wenige Satelliten empfangen werden konnten und somit die bestimmten Positionen an Genauigkeit verloren. Ebenfalls durch die Antennenabdeckung war der GPS-Empfänger oft auf sehr tiefstehende Satelliten angewiesen, deren Signale aufgrund atmosphärischer Störungen die geringere Genauigkeit aufweisen. Dies führte bei Änderungen in der Satellitenkonstellation zu Sprüngen in den Positionen von mehreren hundert Metern. In Messgebieten mit starker Topographie wurde das Phänomen durch die Abdeckung der Berge verstärkt (Abbildung 3.2). Diese Sprünge in den Koordinaten konnten teilweise nur mühsam von Hand korrigiert werden, wobei jedoch unklar blieb, welche nun die zuverlässigeren Positionen waren: diejenigen vor oder diejenigen nach der Änderung in der Satellitenkonstellation.

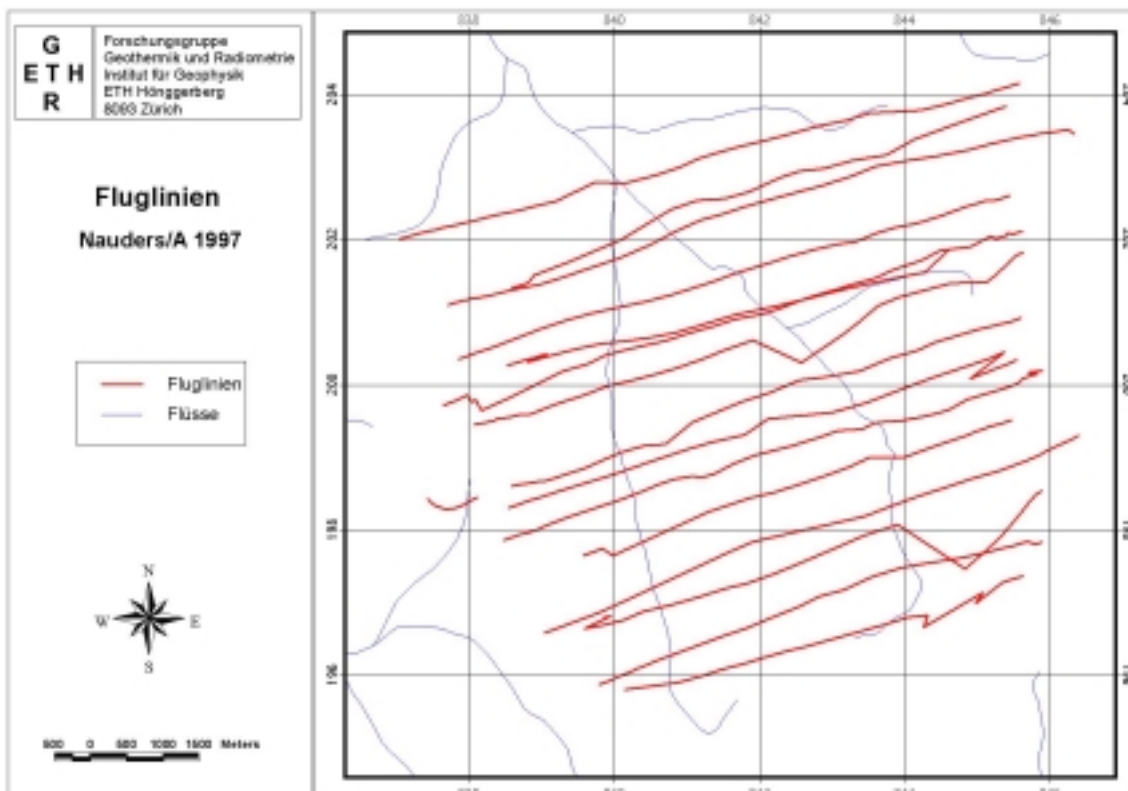


Abbildung 3.2: Unkorrigierte Fluglinien im Messgebiet Nauders/A.

Im Rahmen einer Nachrüstung der Super Puma – Flotte wurde die Antennenposition auf den Pylon verlegt und ein GPS Empfänger ins Navigationssystem des Helikopters integriert. Weiter

wurde am 1. Mai 2000 die sogenannte Selective Availability abgeschaltet. Dadurch sollte die Genauigkeit der Positionierung drastisch ansteigen, weil damit die absichtliche Verschlechterung der ausgesandten Daten wegfällt.

Aufgrund dieser Änderungen wurde beschlossen, das GPS-System des Messsystems grundlegend zu erneuern. Im Rahmen dieser Erneuerung wurden zwei Optionen untersucht:

- Differential GPS: Der Empfänger ist fähig, Korrekturdaten zu verarbeiten, die von einem zweiten Empfänger an einem Ort mit bekannter Position geliefert werden.
- P-Code GPS: Der Empfänger kann neben dem zivilen C/A-Code auch den militärischen P-Code verarbeiten.

Im folgenden werden nun diese zwei Optionen getestet, um mehr über ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Positionierung zu erfahren. Aufgrund der Ergebnisse soll dann der Entscheid über das neue GPS-System gefällt werden.

3.2.2 Differential GPS

Die Fehler der GPS Positionierung werden durch atmosphärische Störungen, die Geometrie der Satellitenkonstellation und bis Mai 2000 durch die sogenannte „Selective Availability“ (SA) verursacht. Differential GPS bietet die Möglichkeit, diese Fehler in der Positionierung zu korrigieren. Durch einen zweiten GPS-Empfänger an einem bekannten, fixen Punkt können die oben genannten Ungenauigkeiten korrigiert werden. An diesem Empfänger können aufgrund der bekannten Position die Abweichungen bestimmt und zur Korrektur der Positionen des mobilen Empfängers verwendet werden.

Für eine online Datenauswertung, wie sie bei Messflügen notwendig ist, werden die Korrekturdaten vom fixen an den mobilen GPS-Empfänger via Funkverbindung gesendet. Die Landestopographie bietet einen entsprechenden Dienst an. Dabei werden die Korrekturdaten von einer Referenzstation (Zimmerwald) über UKW als RDS (Radio Data System) Signal ausgesandt. Mit einem Decoder können nun die RDS-Signale ausgewertet und dem mobilen GPS-Empfänger zur Verfügung gestellt werden.

Erste Tests

Im Hinblick auf die Messflüge im Juni 1999 wurde der bestehende Trimble GPS-Empfänger um einen RDS-Decoder (Aztec RDS3000V3) erweitert und der differential GPS-Dienst der Landestopographie lizenziert. Der Decoder wurde zusammen mit einer UKW-Antenne im Messsystem eingebaut und vor den Messflügen am Boden getestet. Diese Tests zeigten, dass die Positionierung der UKW-Antenne im Helikopter entscheidend ist. Aufgrund der Abschirmung der Helikopterhülle wurde teilweise kein UKW-Signal empfangen und somit eine differential GPS Positionierung verunmöglicht. Durch die provisorische Montage der UKW-Antenne an einem der Fenster des Super Pumas konnte der Korrekturdatenempfang verbessert werden. Für eine zukünftige endgültige Verwendung von DGPS müsste eine bessere Position für die UKW-Antenne gefunden werden.

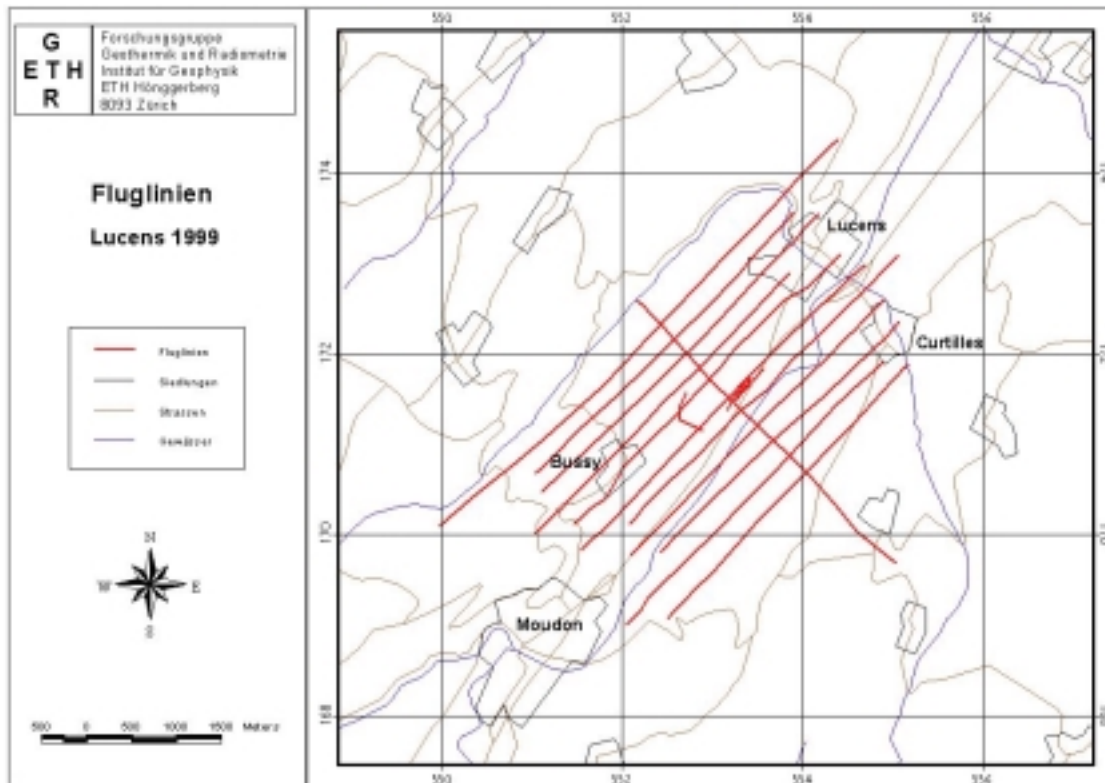


Abbildung 3.3: Fluglinien im Messgebiet Lucens mit differential GPS.

Wie sich bei den Messflügen 1999 zeigte, arbeitete das differential GPS gut und lieferte sehr genaue Positionen. Insbesondere die Ergebnisse im Mittelland bestätigten die Erwartungen. So konnten die Sprünge praktisch gänzlich ausgemerzt werden. Als Beispiel sind die Flugwege im Messgebiet des ehemaligen Versuchsreaktors Lucens angeführt (Abbildung 3.3). Anhand der genauen Positionen konnte die erhöhte Strahlung in der Nähe des ehemaligen Reaktorgebäudes eindeutig einem Nebengebäude zugeordnet werden, in dem kontaminiertes Material aus dem Reaktor gelagert wurde.

Im Tessin jedoch mussten in einem Messgebiet Sprünge hingenommen werden. Dies war vor allem darauf zurückzuführen, dass beim Wendemanöver die Verbindung zu praktisch allen Satelliten „verloren“ ging und erst nach mehreren Sekunden vom GPS-Empfänger wieder aufgebaut werden konnten. Ausserdem konnte dort kein Korrektursignal via UKW empfangen werden. Obwohl die Landestopographie den DGPS-Dienst flächendeckend anbieten will, bleibt die Frage offen, ob in Gebieten mit starker Topographie die Korrekturdaten via UKW wirklich empfangen werden können. In gebirgigem Gelände müssten deshalb gewisse Einschränkungen in Kauf genommen werden.

Novatel-Empfänger

Von den eingebauten GPS-Empfängern der Marke Trimble war nur ein Gerät DGPS tauglich. Aus Redundanzgründen sollte in beiden Messsystemen der selbe Empfänger eingebaut sein. Deshalb wurde entschieden, falls DGPS verwendet werden soll, zwei neue, DGPS fähige Empfänger zu beschaffen. Bei der folgenden Evaluation wurde ein Empfänger der Firma Novatel (Model PWRPAK-II Millenium) als aussichtsreichster Kandidat identifiziert. Dabei handelt es sich um einen L1/L2-Empfänger mit 12 Kanälen. Dieser GPS-Empfänger kann

Korrekturdaten, die von einem RDS-Decoder geliefert werden, verarbeiten und somit differentielle Positionierung betreiben. Die Tests wurden mit einem Leihgerät des Institutes für Geodäsie (ETH Zürich) durchgeführt.

Für die Datenkommunikation stehen am GPS-Empfänger zwei RS232-Schnittstellen und eine I/O-Schnittstelle zur Verfügung. Eine der beiden RS232-Schnittstellen kann so konfiguriert werden, dass sie RTCM-Korrekturdaten (RTCM: Radio Technical Committee for Marine services) für die differentielle Positionierung akzeptiert. Die andere wird für das Auslesen der Positionen verwendet.

Um die Positionsdaten dieses Empfängers auszulesen wurden die entsprechenden Routinen der Datenakquisitionsoftware angepasst und ein Testprogramm erstellt. Dann wurde während 4'000 s jede Sekunde eine Position vom GPS-Empfänger ausgelesen. In einem ersten Durchgang wurden die Ergebnisse ohne differentielle Korrekturen und mit eingeschalteter SA aufgezeichnet. Die Resultate (Abbildung 3.4) zeigen eine grosse Streuung. Die X- und Y-Koordinaten schwanken innerhalb von ± 100 m, die Höhe über Meer innerhalb von etwa ± 75 m.

Es wurden mit dem Novatel GPS-Empfänger ebenfalls Messungen bei ausgeschalteter SA (nach 1. Mai 2000) durchgeführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind, wie aus Abbildung 3.5 ersichtlich wird, viel besser (Streuung in X- und Y-Richtung von ± 30 m, in der Höhe von ± 40 m). Langzeitmessungen haben jedoch gezeigt, dass in den Positionen noch immer Schwankungen im Bereich von ± 100 m auftreten, die auf qualitativ unterschiedliche Satellitenkonstellationen zurückgeführt werden müssen. Dasselbe gilt auch für die gemessenen Höhen.

Bei einem weiteren Messdurchgang wurden dem Novatel GPS-Empfänger die Korrekturdaten für DGPS eingespielen. Die Ergebnisse (Abbildung 3.6) waren dann auch entsprechend besser. Bei den X- und Y-Koordinaten lagen die Werte innerhalb von ± 15 m und bei der Höhe innerhalb von ± 20 m.

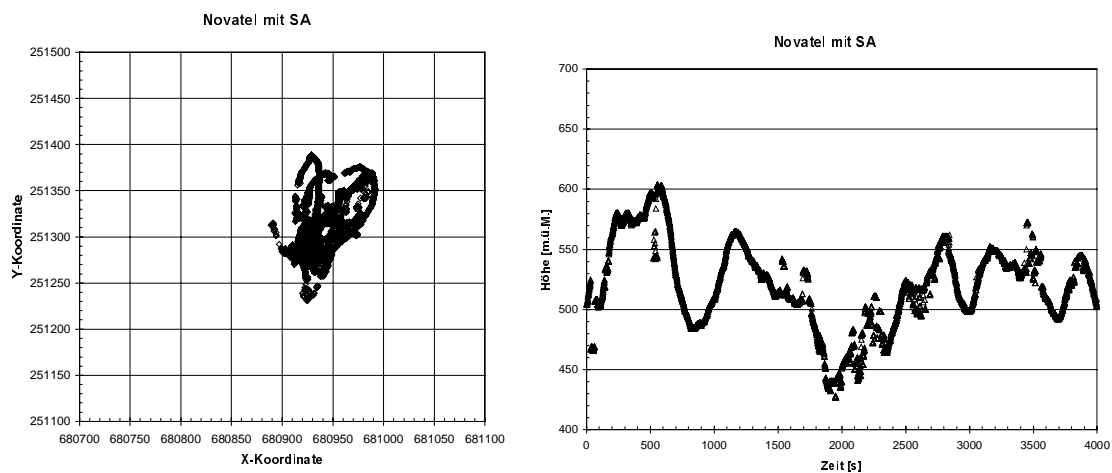


Abbildung 3.4: Positionen des Novatel GPS-Empfängers in Schweizer Landeskoordinaten. Links sind die X- und Y-Koordinaten gegeneinander aufgetragen, rechts die Höhe über Meer gegen die Zeit. Koordinaten der Antenne siehe Tabelle 3.1.

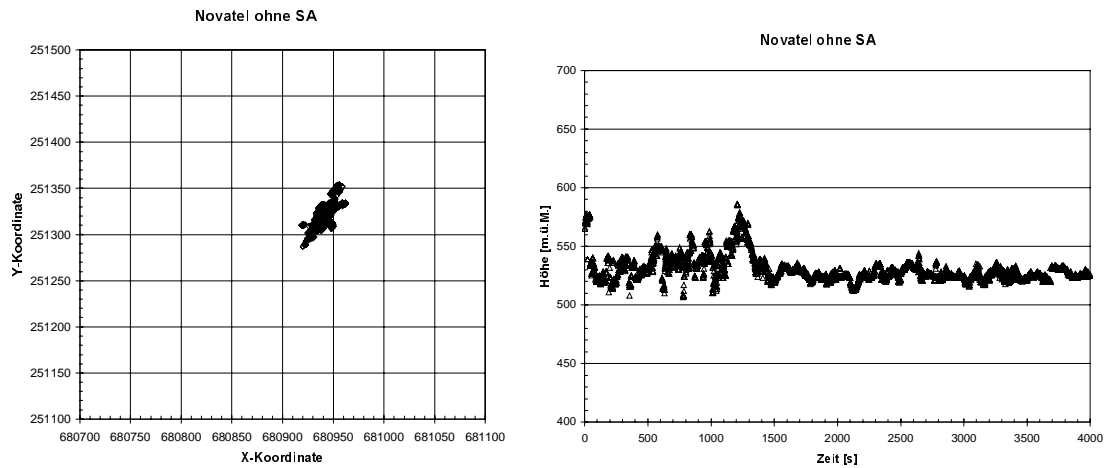


Abbildung 3.5: Messergebnisse mit dem GPS-Empfänger von Novatel ohne DGPS. Die Selective Availability war ausgeschaltet. Die Messungen liegen rund 2.5 h auseinander.

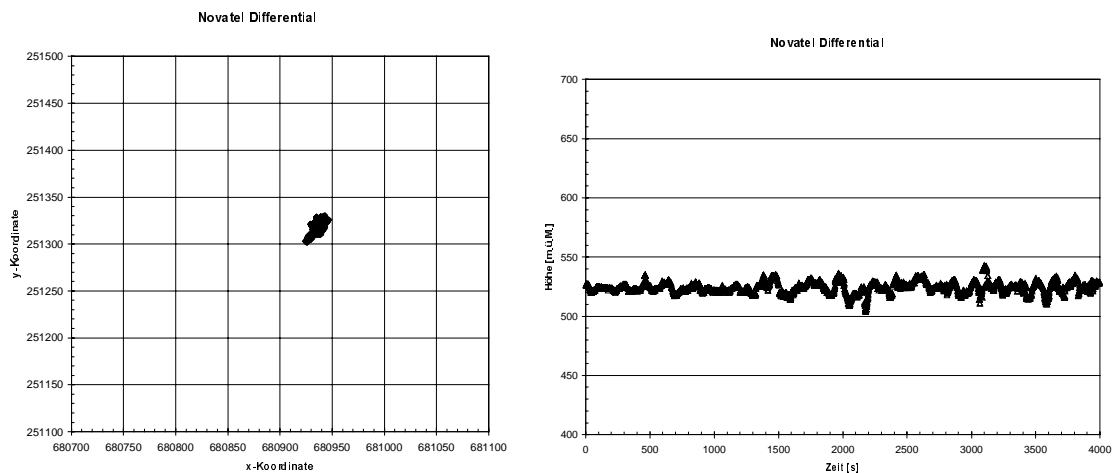


Abbildung 3.6: Positionen des Novatel GPS-Empfängers in Schweizer Landeskoordinaten mit Nutzung von Korrekturdaten. Links sind die X- und Y-Koordinaten gegeneinander aufgetragen, rechts die Höhe über Meer gegen die Zeit.

3.2.3 P-Code

Beim im Super Puma fix eingebauten GPS-Empfänger handelt es sich um einen L1/L2-Empfänger mit zehn Kanälen der Firma Sextant. Dieses Gerät hat Zugriff zum verschlüsselten P-Code (Anti-Spoofing) und erlaubt damit eine genauere Positionierung. Die Genauigkeit der bestimmten Positionen liegt im Bereich der Genauigkeit von DGPS. Der Vorteil des Sextant-Empfängers mit Nutzung des P-Codes besteht in der Unabhängigkeit von Korrektursignalen. So sollte es möglich sein, in allen Messgebieten unabhängig von der Topographie die selbe Genauigkeit für die Positionen zu erhalten.

Für Testzwecke und die Anpassung der Messsoftware wurde ein Empfänger von der Armee zur Verfügung gestellt.

Der GPS-Empfänger von Sextant gibt zehn Mal pro Sekunde einen Datenstrom von 102 Bytes auf die RS422-Schnittstelle aus. In diesen 102 Bytes sind die GPS-Zeit, GPS-Woche, Position,

Geschwindigkeiten, Fehler, Modi und Status der Satelliten und noch ein paar andere Daten enthalten. Um die Daten einlesen zu können, wurden bestehende Routinen der Messsoftware entsprechend modifiziert und ein Testprogramm erstellt.

Die Ergebnisse ohne Nutzung des P-Codes sind in Abbildung 3.7 dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Positionen sowohl in X- und Y-Richtung als auch in den Höhen stark schwanken. Dies ist insbesondere auf die Selective Availability zurückzuführen. Die Resultate liegen bei der Genauigkeit im Bereich der bisherigen GPS-Empfänger von ± 100 m.

Bei ausgeschalteter SA zeigten die gemessenen Positionen bereits ohne Nutzung des P-Codes eine deutliche Verbesserung der Genauigkeit (Abbildung 3.8). Sie liegen fast ausschliesslich innerhalb eines Quadrates von 50 m Seitenlänge. Die Schwankungen in der Höhe liegen in etwa im selben Bereich (rund ± 30 m).

Um die Leistungsfähigkeit des Sextant Empfängers wirklich beurteilen zu können, wurden auch Vergleichsmessungen mit zugeschaltetem P-Code durchgeführt. Da der Schlüssel und der dafür benötigte Chip im GPS-Empfänger als geheim eingestuft werden, mussten die entsprechenden Massnahmen ergriffen werden. Die in der Abbildung 3.9 dargestellten Daten wurden deshalb nach Vorgabe der Schweizerischen Unternehmung für Flugzeuge und Systeme (SF) leicht verzerrt dargestellt und erlauben nur noch eine qualitative Interpretation. Trotzdem ist ersichtlich, dass die Nutzung des P-Codes eine deutliche Verbesserung der Resultate bringt. Vor allem die Schwankungen in der Höhe können deutlich reduziert werden.

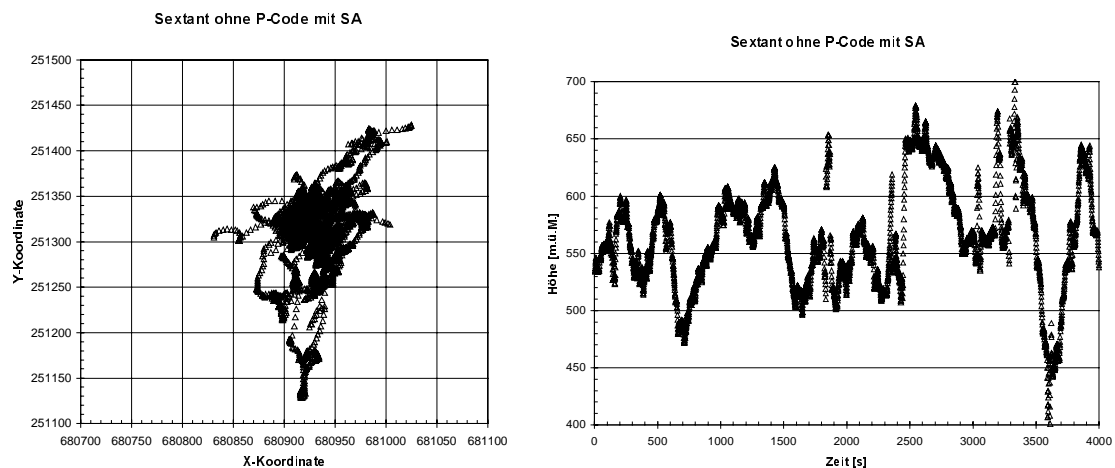


Abbildung 3.7: Positionen des Sextant GPS-Empfängers in Schweizer Landeskordinaten ohne Nutzung des P-Codes. Links sind die X- und Y-Koordinaten gegeneinander aufgetragen, rechts die Höhe über Meer gegen die Zeit.

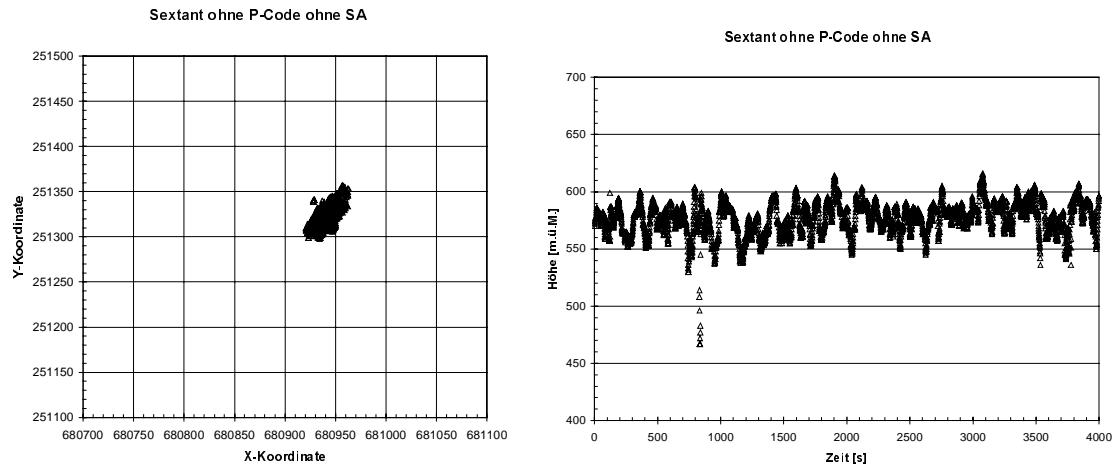


Abbildung 3.8: Positionen des Sextant GPS-Empfängers in Schweizer Landeskoordinaten ohne Nutzung des P-Codes und bei ausgeschalteter SA. Links sind die X- und Y-Koordinaten gegeneinander aufgetragen, rechts die Höhe über Meer gegen die Zeit.

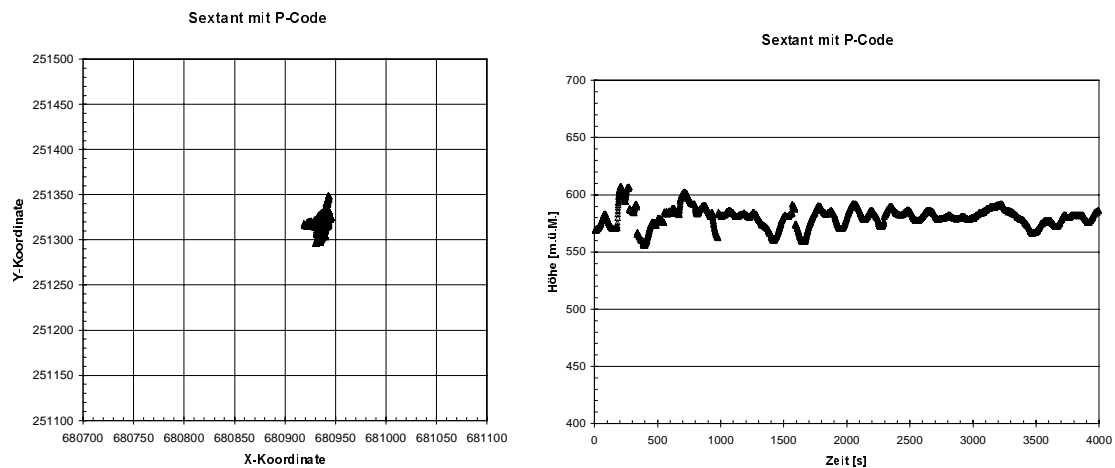


Abbildung 3.9: Positionen des Sextant GPS-Empfängers in Schweizer Landeskoordinaten mit Nutzung des P-Codes. Links sind die X- und Y-Koordinaten gegeneinander aufgetragen, rechts die Höhe über Meer gegen die Zeit. Aus Geheimhaltungsgründen sind die Daten leicht verzerrt dargestellt.

3.2.4 Diskussion

Ein Vergleich der Testresultate zeigt, dass der Novatel GPS-Empfänger im differentiellen Modus die besten Resultate liefert (siehe Tabelle 3.1). Die Schwankungen sind bei allen drei Koordinaten am geringsten. Kurz dahinter liegt der Sextant Empfänger bei Nutzung des P-Codes. Auffallend ist auch, dass die Standardabweichungen der Y-Koordinate bedeutend grösser sind als diejenigen der X-Koordinate. Beim Novatel ohne differentielle Korrektur ist sie sogar grösser als die der Höhe.

Tabelle 3.1: Vergleich der Positionen und Standardabweichungen der verschiedenen Empfänger und Arbeitsmodi. Die Koordinaten sind in Schweizer Landeskoordinaten angegeben.

GPS-Empfänger	X-Koordinate Standardabw. [m]	Y-Koordinate Standardabw. [m]	Z-Koordinate Standardabw. [m]
Sextant	23	43	47
Sextant ohne SA	6	8	14
Sextant P-Code	~ 5	~ 9	~ 8
Novatel	24	51	36
Novatel ohne SA	6	8	11
Novatel DGPS	3	4	5
Antennenpos.	X: 680924	Y: 251319	Z: 576

Wie ebenfalls aus der Tabelle 3.1 zu erkennen ist, nahm die Standardabweichung durch die Abschaltung der SA bei beiden GPS-Empfängern um mindestens den Faktor 4 ab. Die zusätzlichen Verbesserungen durch Nutzung des P-Codes oder DGPS sind nicht mehr so bedeutend für die X- und Y-Koordinaten. Für die Höhe bringt DGPS aber noch eine deutliche Verbesserung. Die Mittelwerte für die X- und Y-Koordinaten liegen praktisch alle innerhalb einiger Meter. Erwartungsgemäss unterscheiden sich die Messungen bei eingeschalteter SA ohne Nutzung zusätzlicher Signale am stärksten von den anderen.

3.2.5 Fazit

Wenn die Korrekturdaten über UKW flächendeckend empfangen werden können, ist der Novatel GPS-Empfänger in differentieller Arbeitskonfiguration aus Sicht der Genauigkeit dem Sextant-Gerät vorzuziehen. Wie jedoch bei den Messflügen 1999, bei denen differential GPS eingesetzt wurde, festgestellt werden konnte, gibt es in Gebieten mit starker Topographie und aufgrund der tiefen Flughöhen Empfangsprobleme der RDS-Signale. Dies führt dann wieder zu erheblich ungenaueren Positionen. Im Gegensatz dazu ist der Sextant GPS-Empfänger mit geladenem Schlüssel für den P-Code nicht von UKW Signalen abhängig, sondern liefert an allen Punkten die gleiche Genauigkeit. Deshalb ist der Sextant über alles gesehen die bessere Lösung. Die Nutzung des Novatel Empfängers bleibt aber als Perspektive bei einer Nutzung ausserhalb des militärischen Umfeldes bestehen. Die entsprechende angepasste Messsoftware liegt bereits vor. Es kann auch dieselbe Schnittstelle der Messapparatur wie für den Sextant GPS-Empfänger genutzt werden.

Unabhängig vom GPS-Empfänger weist die Z-Koordinate, bzw. die Höhe die grösste Standardabweichung und somit die grössten Schwankungen auf. Ungenauigkeiten von 10 m und mehr sind für eine Verwendung zur Höhenkorrektur nicht geeignet, da damit ein zu grosser Fehler eingeführt wird. Als Alternative zur GPS-Höhe bietet sich die Barometerhöhe an, die eine Genauigkeit im Meterbereich erreicht.

Auf die Messflüge des Jahres 2000 hin wurde im Messsystem ein GPS-Empfänger der Firma Sextant eingebaut. Während den Messflügen konnte das Gerät mit dem Schlüssel für den P-

Code betrieben werden. Die gelieferten Positionen waren ausgezeichnet. Die neue Position der GPS-Antenne am Helikopter wirkte sich ebenfalls sehr positiv aus. So wurden durchwegs sechs und mehr Satelliten erfasst. Sogar bei extremen Wendemanövern und Kreisflügen standen für eine Positionierung immer genügend Satelliten zur Verfügung. Die Erwartungen an den neuen Empfänger wurden somit erfüllt.

Mit den nun sehr genauen Positionen ergeben sich auch neue Möglichkeiten bei der Auswertung der Daten. So lässt sich nun bei der erreichten Genauigkeit auch das digitale Höhenmodell mit einer Maschenweite von 25 m (DHM25) des Bundesamtes für Landestopographie für die Topographiekorrektur verwenden. Auch bei Analysen der Messdaten zusammen mit anderen räumlichen Daten können nun bessere Resultate erwartet werden.

Weiter kann mit dem neuen GPS-Empfänger nun auch jede Sekunde (statt wie bisher nur alle drei Sekunden) eine Position ausgelesen und mit den anderen Daten abgespeichert werden. Dadurch wird die online Auswertung der Messdaten stark erleichtert.

3.3 Datenübertragung Messsystem-Laptop

Für die geplante online Datenauswertung musste eine Datenübertragung vom Messsystem auf einen anderen Rechner realisiert werden. Dabei sollte jedoch ein grösserer Umbau oder sogar Neubau des Messsystems vermieden werden, da dazu die nötigen Ressourcen sowohl personell wie auch finanziell nicht vorhanden waren.

3.3.1 Anforderung an Datenübertragung

Die Übertragung der Daten sollte also mit dem im Messsystem eingebauten Industrie-PC Kontron IR-386 möglich sein. Dieser ist von der Rechnerleistung und der Taktfrequenz her gesehen bereits mit der momentanen Messsoftware voll ausgelastet. Er besitzt auch keine Harddisk, womit ein umfangreicheres Betriebssystem auf dem Rechner gar nicht installiert und betrieben werden kann. Auch der Arbeitsspeicher ist für heutige Verhältnisse sehr klein, reicht aber für das verwendete Betriebssystem DOS noch aus.

Die Art der Übertragung sollte möglichst störungsarm und technisch einfach sein. Es sollten alle Daten transferiert werden, die auch auf der Memory-Karte abgespeichert werden. Dies bedingt auch, dass jede Sekunde 512 Byte übertragen werden müssen. Eine Beeinflussung des Timings in der Messsoftware muss vermieden werden, damit auch bei einer Datenübertragung vom Messsystem auf einen Zweitrechner problemlos gemessen werden kann.

3.3.2 Realisation

Aus oben angeführten Anforderungen und da eine freie RS-232 Schnittstelle am Messsystem vorhanden war, wurde eine serielle Übertragung der Daten gewählt. Eine Verbindung via RS-232 Schnittstelle birgt den Vorteil, dass eigentlich alle PCs und Laptops über eine solche Schnittstelle standardmässig verfügen. So ist kein Zukauf von weiteren Hardwarekomponenten nötig. Eine solche Verbindung ist auch ziemlich störungsarm und technisch leicht realisierbar.

Die Übertragung der Daten wurde auf Seiten des Messsystems in die Messsoftware integriert. Dazu wurden die entsprechenden Routinen erstellt. Die Messdaten werden im selben Format übertragen, wie sie auch auf der Memory-Karte abgespeichert werden. Bei der Datenübertragung handelt es sich auf Seiten des Messsystems um einen reinen Schreibprozess. Die Daten werden einfach auf der RS-232 Schnittstelle ausgegeben. Dabei ist die Ausgabe nicht davon abhängig, ob die Daten auf der anderen Seite gelesen werden oder nicht. Es erfolgt also keine bidirektionale Kommunikation zwischen den beiden Rechnern, was den Aufwand erheblich vermindert.

Auf Seiten des Laptops oder Zweitrechners erfolgt ein reiner Leseprozess. Dazu ist es aber notwendig, dass die RS-232 Schnittstelle bezüglich Übertragungsgeschwindigkeit, Anzahl Start- und Stopbit, Anzahl Databits und Protokoll mit derjenigen des Messsystems übereinstimmt. Für Testzwecke wurde ein Programm in der Programmiersprache Visual Basic geschrieben. Dieses liest die Daten von der seriellen Schnittstelle ein und legt sie in einem File

auf der Festplatte ab. Dabei werden die Daten in der selben Struktur gespeichert, wie es auch auf der Memory-Karte des Messsystems geschieht.

3.3.3 Fazit

Mit technisch einfachen Mitteln konnte eine zuverlässige Datenübertragung vom Messsystem auf einen Zweitrechner realisiert werden. Mit der gewählten Variante konnte ein Umbau oder Neubau des Messsystems verhindert werden. Die erreichte Übertragungsgeschwindigkeit reicht aus, um die anfallenden Daten in Echtzeit zu übertragen. Dabei wird die Messsoftware und somit der Ablauf der Messungen nicht beeinflusst.

Mit dieser Datenübertragung konnte eine weitere Grundlage für eine online Datenauswertung geschaffen werden. Die für Testzwecke erstellten Routinen können dabei in der online Datenauswertungssoftware wieder verwendet werden.

Mit der Übertragung aller Daten ist auch bereits eine erste Sicherung der Messdaten gegeben. Da die selbe Datenstruktur wie auf den Memory-Karten beibehalten wird, können die Daten auch mit dem Programmpaket „Gamero“ noch immer problemlos ausgewertet werden.

3.4 Datenübertragung Helikopter-Bodenstation

Die Übertragung der Messdaten vom Helikopter an eine Bodenstation würde es bei einer online Auswertung erlauben, die Messresultate an einem beliebigen Ort praktisch in Echtzeit zu verfolgen. Dies würde bei Notfalleinsätzen wertvolle Zeit einsparen, die bei der Planung und Durchführung von Massnahmen entscheidend sein kann. Vor allem bei Messgebieten, die weit von Zürich und somit dem Standort der Nationalen Alarmzentrale entfernt liegen, wären leicht 1-2 Stunden einzusparen. Neben dem Zeitgewinn liesse sich auch wertvolle Flugzeit und somit Treibstoff und Kosten einsparen.

3.4.1 Erste Tests

Für eine Datenübertragung aus der Luft zum Boden bieten sich verschiedene technische Lösungen an. Im Vordergrund standen Lösungen, die möglichst keine Anpassungen am Helikopter nötig machen. Denn dies verursacht sofort enorme Kosten. Auch sollten die technischen Lösungen auf dem Markt frei erhältlich sein und nicht zuerst entwickelt werden. Aus diesen Gründen wurde für erste Tests eine Datenübertragung mit Hilfe der Mobiltelefonie gewählt.

Die Tests wurden von Christoph Bärlocher (Institut für Geophysik, ETH Zürich) durchgeführt. Dazu wurde bei den Messflügen im Rahmen der Übung ARM97 ein Laptop mit einem GSM-Modem und einem Mobiltelefon als Sendestation mitgeführt (Abbildung 3.10).

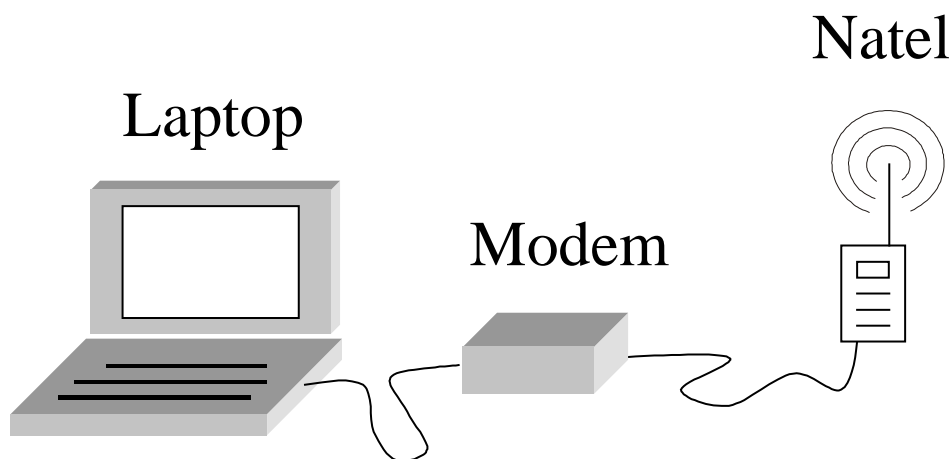


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung der Sendestation, die bei einem Messflug im Helikopter mitgeführt wurde.

Die Verbindung zum Empfangscomputer wurde über den Dial-up Dienst der ETH Zürich und anschliessend übers Internet aufgebaut. Als Verbindungsprotokoll wurde das Point-to-Point-Protokoll (PPP) verwendet.

Wie sich bei den Tests zeigte, war eine Datenübertragung zwischen den beiden Computern trotz Verbindungsunterbrüchen problemlos möglich. Vor allem beim Wenden am Ende der Fluglinien ging oftmals die Verbindung verloren. Dann musste bei der vorliegenden

Versuchsanordnung jeweils manuell die Verbindung wieder aufgebaut werden. Zum Teil waren mehrere Einwählversuche nötig.

3.4.2 Anforderungen an Datenübermittlung

Aus den ersten Tests ergaben sich die Anforderungen an eine Datenübertragung vom Helikopter zum Boden:

Obwohl die Verbindung über Mobiltelefon und Internet zwischen den beiden Rechnern problemlos funktionierte, ist aus Gründen der Verbindungssicherheit und der Abhängigkeit von Dritten eine Punkt zu Punkt Verbindung vorzuziehen. Dabei sieht die Empfangsstation schematisch gleich aus wie die Sendestation (Abbildung 3.10).

Die Software zur Datenübertragung ist auf der Senderseite so zu gestalten, dass bei einem Verbindungsunterbruch automatisch wieder versucht wird, eine Verbindung aufzubauen. Der Wählvorgang soll dabei solange wiederholt werden, bis eine Verbindung zu stande kommt.

Der Umfang der zu übermittelnden Daten ist möglichst klein zu halten, da zur Zeit die maximale Übertragungsrate für Daten bei der Mobiltelefonie 9'600 Bits/s beträgt. Um nach Verbindungsunterbrüchen wieder in einen online Takt zu kommen, muss die Menge der zu übertragenden Daten beschränkt werden.

Für die Datenübermittlung ist ein Protokoll zu wählen, das einen korrekten Transfer der Daten zwischen den beiden Rechnern ohne Verluste garantiert. Bei fehlerhafter Übermittlung sind die gleichen Daten solange zu übermitteln, bis sie korrekt an der Empfangsstation eintreffen.

3.4.3 Fazit

Die Datenübertragung mit Mobiltelefonie vom Helikopter zum Boden während des Messfluges ist, wie Tests gezeigt haben, prinzipiell möglich. Sie ist jedoch stark von der Abdeckung des Mobiltelefonnetzes abhängig.

Für die Datenübertragung via Mobiltelefon ist eine Punkt zu Punkt Verbindung vorzuziehen, da so die bestmögliche Sicherheit gewährleistet ist und die Abhängigkeit von Dritten minimiert wird.

Die Datenübertragungsrate stellt zusammen mit der Verbindungssicherheit den limitierenden Faktor bei einer online Datenübertragung dar.

Die Datenübertragung könnte auch in die geplante online Datenauswertung integriert werden. Dies würde es erlauben, die Resultate mehr oder weniger in Echtzeit am Boden mitzuverfolgen.

Der Markt in der Telekommunikation war und ist einem rasanten und ständigen Wandel unterworfen. Deshalb wurde bis anhin auf eine Realisation dieser Datenübertragung verzichtet. Vor allem die neue UMTS-Generation (UMTS: Universal Mobile Telecommunication System) verspricht eine enorme Steigerung in der Übertragungsgeschwindigkeit, was für die Übertragung der aeroradiometrischen Daten ein grosser Vorteil wäre.

4 Online Datenauswertung und –Kartierung

4.1 Ausgangslage

In der Schweiz besteht ein funktionierendes Messsystem mit einer zugehörigen Auswertesoftware, die von Schwarz (1991) entwickelt wurde. Dieses Softwarepaket „Gamero“ läuft noch auf dem Betriebssystem DOS. Weder die Betriebssystemplattform noch die Benutzerführung von „Gamero“ entsprechen dem heutigen Stand der Technik. Insbesondere fehlt eine Führung des Benutzers durch die verschiedenen Programmschritte. Dies führt zu einer grossen Fehleranfälligkeit bei der Auswertung und schränkt eine Nutzung in Notfalleinsätzen, die durch entsprechende Teile der Schweizer Armee durchgeführt werden, stark ein.

Aufgrund der Programmstruktur kann die Auswertung der Daten erst nach dem Ende des Messfluges durchgeführt werden. Dies führt zu zeitlichen Verzögerungen bis die entsprechenden Resultate vorliegen. Somit ist eine online Überwachung der Messungen kaum bis gar nicht möglich, was sich vor allem bei der Quellensuche negativ auswirkt. Bei Notfalleinsätzen ist jedoch die Zeit der entscheidende Faktor und mitentscheidend über Erfolg oder Misserfolg eines Einsatzes.

Schliesslich können zwar die Ergebnisse, die man mit „Gamero“ erhält, als Karten ausgedruckt werden, die Exportmöglichkeiten der Daten sind jedoch sehr eingeschränkt. Ein einfacher Austausch von Daten bei internationalen Messübungen oder auch Einsätzen wird dadurch erschwert.

Aus diesen Nachteilen der momentanen Auswertesoftware „Gamero“ geht der Bedarf für eine neue Software und die entsprechenden Ansprüche an sie hervor. Die neue Software soll eine online Datenauswertung während den Messflügen ermöglichen, um auch eine bessere Überwachung der gemessenen Daten zu gewährleisten. Eine online Auswertung stellt auch die Voraussetzung für eine spätere online Datenübermittlung vom Helikopter zu einer Bodenstation dar.

4.2 Zielsetzungen

Aufgrund dieser Ausgangslage, der Ansprüche für eine Miliztauglichkeit und der technischen Möglichkeiten ergeben sich die Zielsetzungen, die mit der Erneuerung erreicht werden sollen. Die neue Software soll:

- auf dem Betriebssystem Windows von Microsoft lauffähig sein, da es allgemein verbreitet ist und das verbreitetste Betriebssystem für tragbare Computer darstellt.
- ein im Windows-Umfeld gewohntes Erscheinungsbild tragen. Die Steuerung soll über Menüs entweder mit der Tastatur oder mit der Maus erfolgen.
- auf einem Laptop lauffähig und deshalb an die Leistungsfähigkeit eines tragbaren Computers angepasst sein.
- die Daten vom Messsystem laufend auslesen, die Überwachung der Rohdaten während der Messflüge ermöglichen, die Daten mit allen Korrekturen auswerten, mehrere Messflüge zusammenfassen und die Resultate in Kartenform darstellen können.
- den Export der Daten in verschiedenen Formaten ermöglichen.
- international kompatible Datenformate verwenden, objektorientiert aufgebaut und möglichst Messsystem unabhängig sein.
- Auswertefehler durch geeignete Benutzerführung verhindern und Fehler in den Daten und in den Manipulationen des Programmes abfangen.
- auf dem bestehenden Messsystem aufbauen und deshalb möglichst wenige Eingriffe erfordern.

Um Wünsche und Anforderungen der Anwender auch in Zukunft berücksichtigen zu können, soll die Software flexibel und erweiterbar aufgebaut sein.

4.3 Realisation

4.3.1 Grobkonzept

Aufgrund der Zielsetzungen wird das Konzept für die neue Software erstellt. Um die Software möglichst flexibel für andere Messsysteme und Auswertungsverfahren zu halten, wurde sie in die drei Hauptmodule System, Auswertung und Darstellung aufgeteilt (Abbildung 4.1).

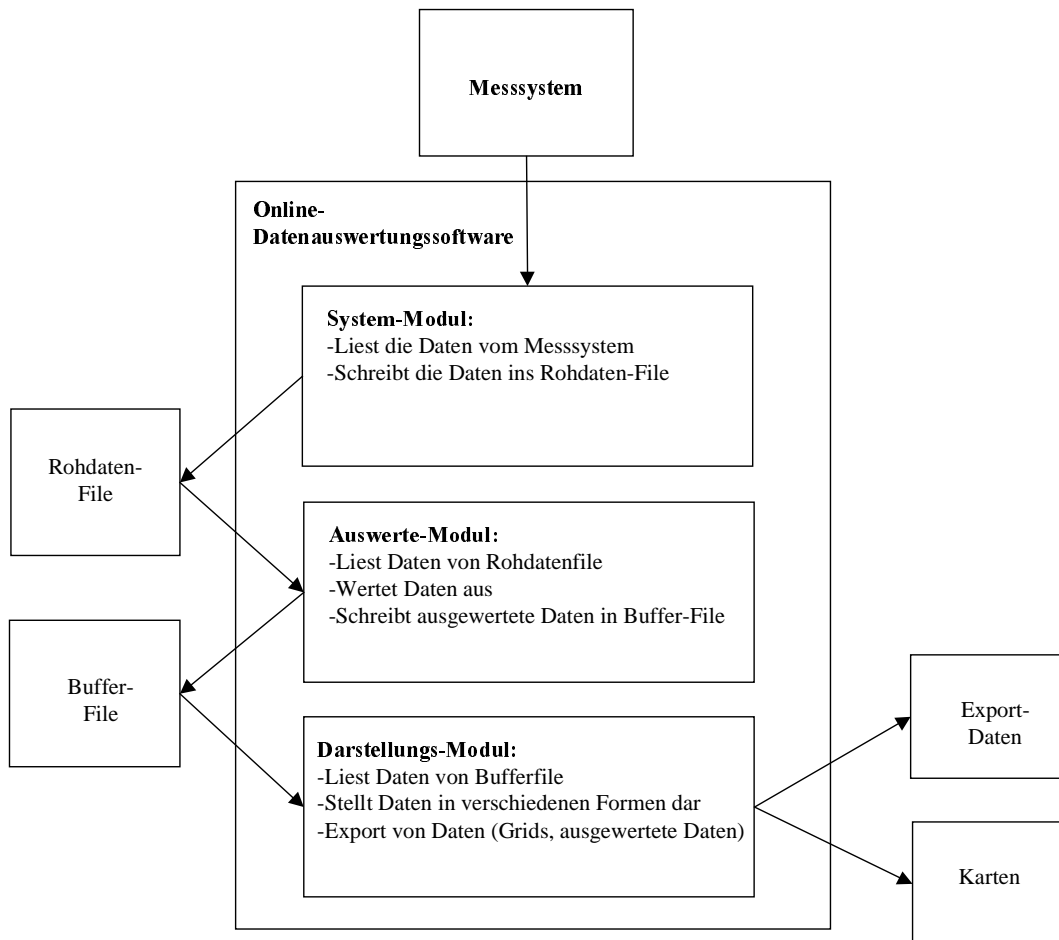


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Hauptteile, aus denen sich die neue Software zusammensetzt.

Das System-Modul ist messsystemspezifisch und liest via RS232-Verbindung (siehe auch Kapitel 3.3) die Daten vom Messsystem aus. Die Rohdaten werden in einem Rohdaten-File abgelegt. Es sollen alle Daten übermittelt werden, die auch auf die Memory-Karten des Messsystems abgespeichert werden (512 Bytes/s).

Das Auswertungs-Modul ist methodenspezifisch, d.h. es ist vom gewählten Auswertungsverfahren abhängig. Es soll die Daten vom Rohdaten-File einlesen, auswerten und die Resultate in einem Buffer-File abspeichern. Als einziger systemabhängiger Teil ist in diesem Modul die Einleseroutine der Rohdaten enthalten.

Das Darstellungsmodul ist unabhängig vom eingesetzten Messsystem und bleibt sich so für jedes System gleich. Dieser Teil der Software ist verantwortlich für die Interaktionen des Benutzers mit dem Programm, die Darstellung der Daten sowie deren Export. Von diesem Teil aus wird auch der Systemteil über klar definierte Schnittstellen gesteuert.

Das Bindeglied zwischen dem Auswerte- und dem Darstellungs-Modul bildet das Buffer-File. Es enthält sowohl die Rohdaten des Spektrums als auch die Ergebnisse der ausgewerteten Daten. Es stellt somit die Schnittstelle zwischen System- und Darstellungsteil auf Datenebene dar. Das Datenformat des Buffer-Files wurde folgendermassen definiert:

Type			
X - Koordinate	as	double	[m]
Y - Koordinate	as	double	[m]
Z - Koordinate	as	double	[m]
Speed Horizontal	as	single	[m/s]
Heading	as	single	[degrees, 360°]
Ground Clearance	as	single	[m]
Spektrum (1 to 256)	as	single	
Anzahl Variablen	as	integer	
Index (1 to 20)	as	integer	
Value (1 to 20)	as	single	
End Type			

Die Koordinaten des Punktes werden in Metern angegeben. Sie sind zwingend nötig. „Speed Horizontal“ enthält die horizontale Geschwindigkeit des Transportmittels, „Heading“ die Fortbewegungsrichtung, „Ground Clearance“ die Höhe über Grund, das Datenfeld „Spektrum (1 to 256)“ die Zählraten der einzelnen Kanäle, „Anzahl Variablen“ die Zahl der Variablen, die tatsächlich im Datenfeld „Value“ abgelegt sind und „Index“ die Nummer, die stellvertretend für den Namen der Variablen steht. Die Namen der Variablen mit der zugehörigen Einheit sind in einem ASCII-File abgelegt.

Für die Steuerung des Systemteils vom Hauptteil des Programmes aus braucht es klar definierte, für alle Messsysteme verbindliche Schnittstellen. Nur so kann der Systemteil problemlos ausgewechselt werden. Neben Variablen, die in beiden Teilen des Programmes Gültigkeit haben, gehören auch Funktionen und Routinen dazu, die den Systemteil starten, stoppen und zurücksetzen, systemspezifische Parameter setzen oder ändern und so weiter.

Neben dem Systemteil sollen auch alle anderen Teile des Programmes wenn immer möglich so aufgebaut werden, dass sie einfach ersetzt werden können, ohne dass im ganzen Sourcecode Änderungen vorgenommen werden müssen. Als Programmiersprache wird Visual Basic verwendet.

4.3.2 Verzeichnis- und Filestruktur

Für die Organisation des Programmes und der Daten ist eine klare und einfache Struktur der Verzeichnisse und Files nötig. Drei Verzeichnisse werden für die Ausführung des Programmes vorausgesetzt: das Hauptverzeichnis, Verzeichnis der Kartendaten und Verzeichnis der Surveys.

Im Hauptverzeichnis bzw. Installationsverzeichnis des Programmes befinden sich alle Dateien, die zur Ausführung des Programmes nötig sind. Dazu gehört die Datei „MGS32.ini“, in der die Pfade des Karten- und des Surveysverzeichnisses enthalten sind. Weiter beinhaltet dieses Verzeichnis Dateien, in denen Standardoptionen für die Auswertung und Darstellung der Daten festgehalten sind. Für eine einfache Bearbeitung in einem beliebigen Editor sind sie in einem ASCII-Format abgespeichert.

Das Verzeichnis der Kartendaten enthält, wie der Name schon verrät, die Daten der topographischen Karten, die im Darstellungsteil des Programmes verwendet werden. Dabei handelt es sich um Vektordaten der Landeskarte 1:200'000 des Bundesamtes für Landestopographie. Für die Verwendung innerhalb des Programmes wurde nur ein bestimmter Teil der Vektordaten ausgesucht. Dazu gehören die Daten der wichtigsten Strassen (Autobahnen und Hauptstrassen), Flüsse und Gewässer. Neben diesen topographischen Daten sind auch noch die Ortschaften mit mehr als 2000 Einwohnern abgespeichert.

Im Verzeichnis der Surveys wird für jeden Survey ein entsprechendes Verzeichnis angelegt. Darin werden im online Betrieb die Rohdatenfiles abgelegt. Zudem wird in diesem Verzeichnis bei der Auswertung der Daten auch das Bufferfile abgespeichert. Neben diesen Datenfiles enthält das Verzeichnis noch andere Dateien, in denen Informationen über den Survey, die bei der Auswertung verwendeten Optionen und die einzelnen Messflüge aufgeführt sind.

4.3.3 Hauptcontainer

Der Hauptcontainer (Abbildung 4.2) stellt den Rahmen für die übrigen Teile des Programmes dar und ist für die Steuerung des Programmes verantwortlich. Optisch enthält er die Menüs, eine Symbolleiste, eine Statusleiste und die Fenster der anderen Module. Je nach Betriebsart (online oder offline) stehen unterschiedliche Menüs zur Auswahl (Abbildung 4.3). Um Anwenderfehler zu reduzieren, stehen immer nur die Menüs zur Verfügung, die in diesem Programmzustand auch nötig oder sinnvoll sind. Damit lässt sich eine gewisse Führung des Benutzers realisieren.

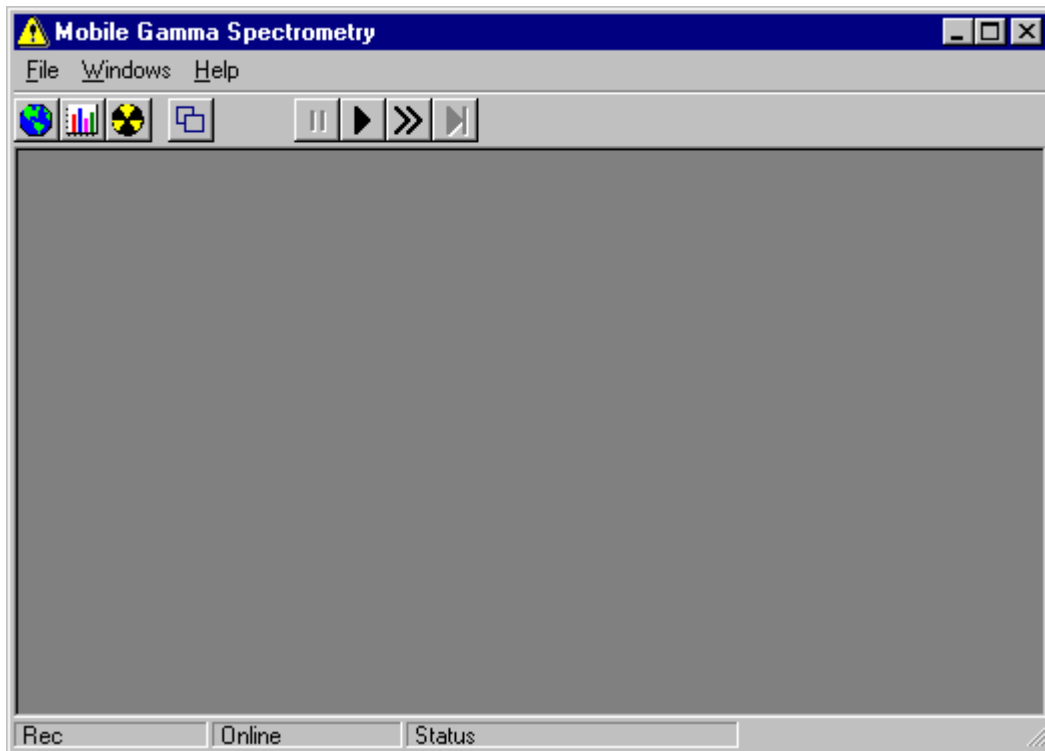


Abbildung 4.2: Hauptcontainer der online Software nach dem Starten des Programmes. Unter den Menus sind die Schaltknöpfe der Symbolleiste zu sehen. Am unteren Rand des Containers befindet sich die Statusleiste, die über die Nummer des momentanen Datenpunktes (Rec), den Betriebsmodus (online bzw. offline) und den Status des Programmes (Status) Auskunft gibt.

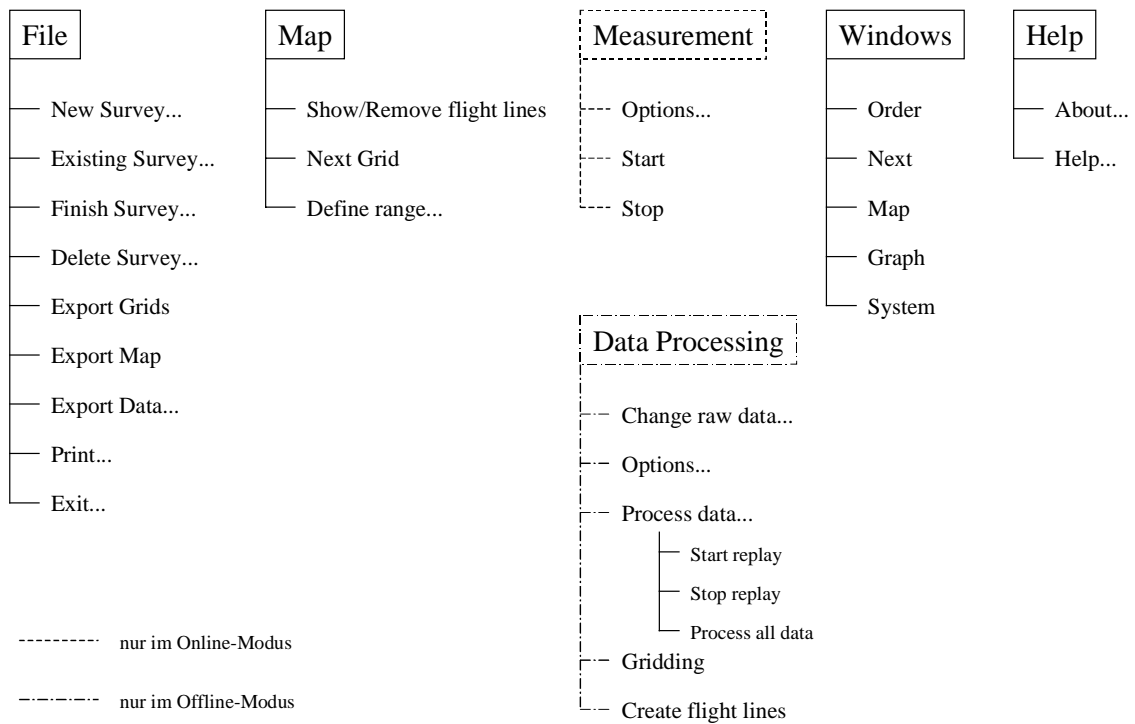


Abbildung 4.3: Die Menüstruktur der neuen Auswertungssoftware. In den Kästchen sind die Hauptmenüpunkte aufgeführt.

Die Menüstruktur ist einfach aufgebaut, um die Einsatztauglichkeit im militärischen Umfeld zu gewährleisten. So stehen maximal fünf Hauptmenüs zur Auswahl, wobei diese von der Betriebsart abhängig sind. Im online Betrieb stehen die Hauptmenüs „File“, „Map“, „Measurement“, „Windows“ und „Help“ zur Verfügung. Im offline Betrieb wird das Menü „Measurement“ durch „Data Processing“ ersetzt. Beim Starten des Programmes sind nur die Menüs „File“, „Windows“ und „Help“ zu sehen.

In der Symbolleiste des Hauptcontainers (siehe Abbildung 4.2) stehen verschiedene Knöpfe zur Verfügung, über die sich auch ein Teil der Menüs ansteuern lässt. So lassen sich die Fenster mit Hilfe dieser Knöpfe sichtbar machen oder verbergen. Auch kann die Ausgangsanordnung der Fenster über ein Symbol wieder hergestellt werden. Im weiteren gibt es noch die Steuerungsknöpfe, mit denen der Timer für das Lesen und Darstellen der Daten vom Bufferfile gestartet und auch gestoppt werden kann. Die Symbolleiste steht sowohl im online wie auch im offline Modus zur Verfügung. Ebenfalls wird die Statusleiste am unteren Rand des Hauptcontainers genutzt. Dort werden die Recordnummer des momentan dargestellten Datensatzes aus dem Bufferfile, der momentane Betriebsmodus sowie der Status des Darstellungsteils angegeben.

Da es bei den Messflügen mit Helikopter aufgrund der Vibrationen schwierig ist, das Programm per Maus zu bedienen, wurde auch eine Bedienungsmöglichkeit über die Tastatur in die Software eingebaut. Für bestimmte Menüs, wie zum Beispiel das Starten der Messung, existieren auch sogenannte Shortcuts (Tastenkombinationen).

4.3.4 System-Modul

Der Systemteil ist vor allem für den Datenaustausch mit dem Messsystem und eine erste Kontrolle der Rohdaten verantwortlich. Die für den Datentransfer vom Messsystem zum Laptop verantwortlichen Routinen lesen im online Betrieb die Daten von der RS232-Schnittstelle ein und speichern sie im selben komprimierten Format wie auf der Memory-Karte des Messsystems ab. Der Name des Rohdatenfiles wird dabei automatisch gebildet und entspricht der gebräuchlichen Namensgebung in „Gamer“. Wird im Messsystem die Memory-Karte gewechselt und ein neuer Flug gestartet, wird von der online Software ebenfalls ein neues Rohdatenfile erstellt.

Die über die RS232-Schnittstelle gelesenen Daten werden nun dekomprimiert. Das heißt, die in einem sehr komprimierten Format gespeicherten Messdaten werden wieder in einfach zu verwendende Datentypen umgeformt. Um eine erste Kontrolle der Rohdaten vornehmen und den Datenfluss vom Messsystem zum Laptop überwachen zu können, werden die Rohdaten tabellarisch und graphisch in einem Systemfenster dargestellt (Abbildung 4.4).

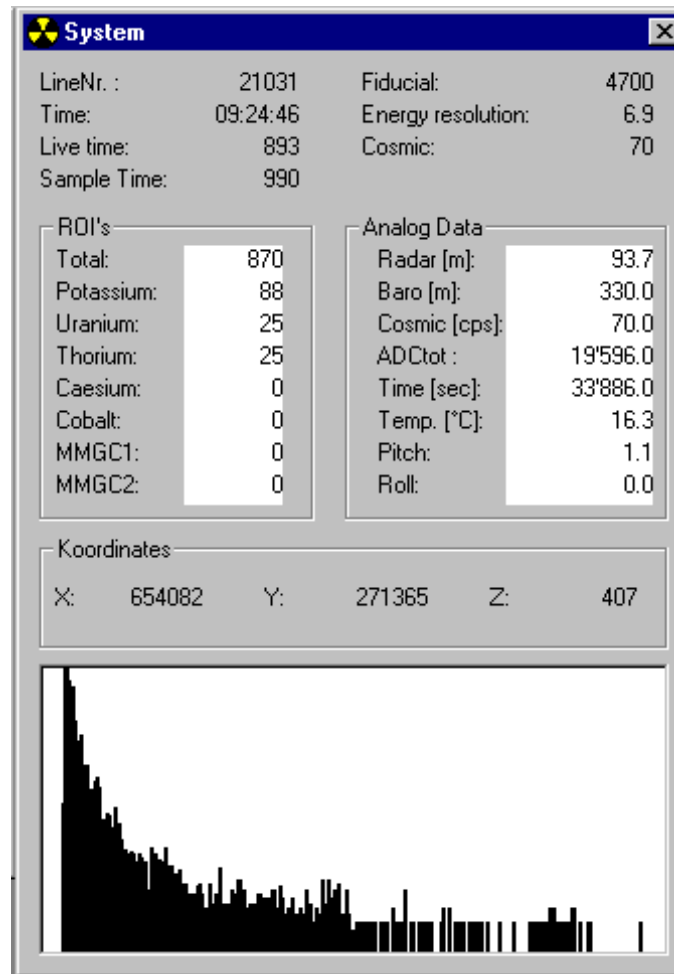


Abbildung 4.4: Darstellungsfenster des Systemteils: Darstellung der Rohdaten in tabellarischer und graphischer Form. Das Spektrum unten zeigt die Rohdaten der 256 Kanäle im Energiebereich von 40 keV bis 3'000 keV.

4.3.5 Auswerte-Modul

Nach der Dekomprimierung und Darstellung der Rohdaten beginnt die eigentliche Auswertung. Dabei wird die selbe Methodik wie im Programmpaket „Gamero“ angewandt. Da nun aber die Messdaten fortlaufend anfallen und auch gleichzeitig ausgewertet werden sollen, sind teilweise Anpassungen der Auswertung und der Korrekturen notwendig. In „Gamero“ wird der Gain, d.h. die energetische Breite der Kanäle in keV, für jede einzelne Linie bestimmt und dann nachher bei der Auswertung verwendet. Dies ist selbstverständlich bei einer online Auswertung nicht möglich. Deshalb wird nun am Anfang einer Messung ein Wert für den Gain angenommen. Während einer bestimmten Zeitspanne werden die Spektren der einzelnen Messpunkte gestapelt und dann eine Analyse des Gains durchgeführt. Der so bestimmte Gain wird dann für die Auswertung der nächsten Messpunkte verwendet, während im Hintergrund bereits wieder ein Summenspektrum für die nächste Gainanalyse gesammelt wird. Neben dem Gain wird bei dieser Analyse auch die Resolution bestimmt. Änderungen im Gain wie auch in der Resolution können auf Probleme mit den Spektren hinweisen, insbesondere auf Stabilitätsprobleme. Deshalb wird ab bestimmten Werten eine Warnmeldung auf dem Bildschirm ausgegeben und eine Meldung in ein Logfile geschrieben.

Ein ähnliches Problem stellt sich bei der Korrektur der Barometerhöhen. Die benötigten Korrekturfaktoren werden in „Gamero“ mit Hilfe einer Bodenlinie an einem Ort mit bekannter Höhe über Meer bestimmt. Wie später im Kapitel 5.3 gezeigt wird, kann auch die GPS-Höhe für die Korrektur verwendet werden. Aufgrund der guten Genauigkeit des neuen GPS-Empfängers (siehe Kapitel 3.2) wird diese Methode verwendet, da sie keine Bodenlinie benötigt und somit für den online Einsatz besser geeignet ist.

Anschliessend zur Bestimmung des Gains und zur Korrektur der Barometerhöhen werden aus den Spektren die acht Fensterwerte bestimmt (Total Counts, Kalium, Uran, Thorium, Cäsium, Kobalt, MMGC1 und MMGC2). Diese werden dann für den Background, die kosmische Strahlung, die Compton-Strahlung und die Höhe korrigiert. Zusätzlich ist auch eine Radonkorrektur und eine Topographiekorrektur möglich. Mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells wie das DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie lässt sich die Topographiekorrektur auch online durchführen. Mit dem DHM25 ist es auch möglich, anstelle der Radarhöhe die Differenz zwischen korrigierter Barometerhöhe und DHM25 für die Höhenkorrektur zu verwenden. Die dazu benötigten genauen GPS-Positionen liegen nun mit dem neuen GPS-Empfänger (Kapitel 3.2) vor. Alle für die Korrekturen verwendeten Parameter sind in einem Definitionsfile abgelegt. Diese können auch abgeändert werden. Schliesslich werden die korrigierten Daten zusammen mit der Position und dem ganzen Spektrum im Bufferfile gesichert und somit für den Darstellungsteil zur Verfügung gestellt.

4.3.6 Darstellungs-Modul

Der Darstellungsteil liest die Daten vom Bufferfile ein und stellt sie in geeigneter Form dar. Dazu verwendet er zwei Fenster. Das eine, im folgenden „Map“ genannt, enthält eine Karte, in der die Messwerte als Grid zusammen mit topographischen Daten gezeigt werden. Das andere, im folgenden „Graph“ genannt, enthält neben graphischen Darstellungen des Spektrums auch noch Profile von Werten, die aus einer Liste ausgewählt werden können.

Im online Modus (Betrieb der Software während eines Messfluges) oder beim Replay im offline Modus („Wiederabspielen“ eines Messfluges am Boden, wobei die Rohdaten von einem Rohdatenfile eingelesen werden) wird jeder Datensatz einzeln vom Bufferfile gelesen und dann dargestellt. Im Fenster „Graph“ (Abbildung 4.5) werden einerseits die Rohspektren andererseits aber auch ausgewertete Daten aufgezeichnet. Grob lässt sich der Graph in drei Bereiche aufteilen. Oben links befinden sich die sogenannten Regenbogenspektren. Dabei entspricht die x-Achse den Kanälen und die y-Achse der Zeit. Insgesamt lassen sich so gleichzeitig rund 220 Spektren darstellen. Die Zählraten der einzelnen Kanäle werden in eine Farbe umgerechnet. Dabei bedeutet Dunkelblau sehr tiefe Zählraten und Rot hohe Zählraten. Beim Umrechnungsverfahren wird versucht, Unterschiede in den Zählraten übers ganze Spektrum stark herauszuheben. Dazu werden die einzelnen Zählraten zuerst mit der Kanalnummer multipliziert. Dann werden je nach Wahl der Skala (linear, square root, logarithmic) die entsprechenden mathematischen Funktionen verwendet und das Resultat durch die Skalenbreite geteilt. So erhält man für jeden Kanal einen Wert zwischen null und eins. Diesen Werten werden dann entsprechend Farben zwischen Schwarz und reinem Rot zugeteilt. Werte, die grösser als der Maximalwert der Skala sind, werden weiss dargestellt. In der Abbildung 4.5 sind bei dieser Darstellung der Spektren vor allem die Peaks von ^{40}K und ^{208}Tl zu erkennen. Etwas

schwächer kann man auch den Peak von ^{214}Bi sehen. Unten links im „Graph“ ist jeweils das Spektrum des gegenwärtigen Datensatzes abgebildet. Auch hier kann wie bei den Regenbogenspektren zwischen drei Arten von Skalen gewählt werden. Auf der rechten Seite im Fenster sind schliesslich zwei Profile dargestellt. Die Daten, welche dort abgebildet werden, können aus einer Liste unterhalb der Profile ausgewählt werden. Sie werden gleichzeitig mit den Regenbogenspektren erneuert, wobei die entsprechenden Werte und Spektren auf der gleichen Höhe liegen. Dies wird auch durch die schwarze Linie angedeutet, welche die momentane Position bezeichnet.

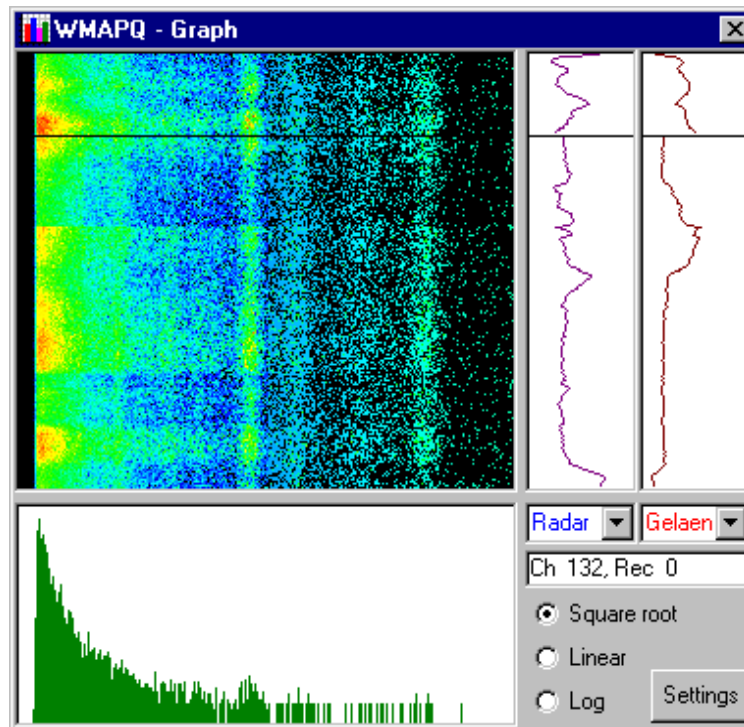


Abbildung 4.5: Fenster „Graph“ im Darstellungsteil der online Software. Das Spektrum unten zeigt die Rohdaten der 256 Kanäle im Energiebereich von 40 keV bis 3'000 keV.

Bewegt man die Maus über den Graphen werden in einer Textbox je nach Bereich zusätzliche Informationen angezeigt. Über die Schaltfläche „Settings“ lassen sich schliesslich noch die Einstellungen wie Skala und Wertebereich für die einzelnen Teilbereiche ändern.

Neben dem Fenster „Graph“ gibt es im Darstellungsteil auch noch das Fenster „Map“ (Abbildung 4.6). Dieses dient, wie der Name bereits verrät, der Darstellung in Kartenform. Für diesen Teil wurde das Programmierwerkzeug MapObjects 1.2 von ESRI verwendet. Die eingesetzten topographischen Karten wurden bereits unter Kapitel 4.3.2 beschrieben. Neben den topographischen Karten werden auch die Messdaten in der Karte dargestellt. Dazu wird eine Bitmap verwendet, die aus einem entsprechenden Grid abgeleitet wird. Es kann zwischen verschiedenen Grids gewechselt werden, wobei auch deren Skala verändert werden kann. Die Anzahl der Grids und die Werte, die sie enthalten, können frei gewählt werden. Alle Grids werden laufend auf den neuesten Stand gebracht, indem ständig die neuen Werte im Grid eingefüllt werden. Das Füllen der noch leeren Pixel erfolgt nach der in Schwarz et al. (1989) beschriebenen Methode. Die Ausdehnung des Grids kann starr festgelegt oder automatisch mit der Ausdehnung des Messgebietes wachsen gelassen werden. Ebenfalls kann ein Höhenbereich

für die Flughöhe über Grund angegeben werden, der darüber entscheidet, ob die Werte eines Messpunktes ins Grid aufgenommen werden oder nicht.

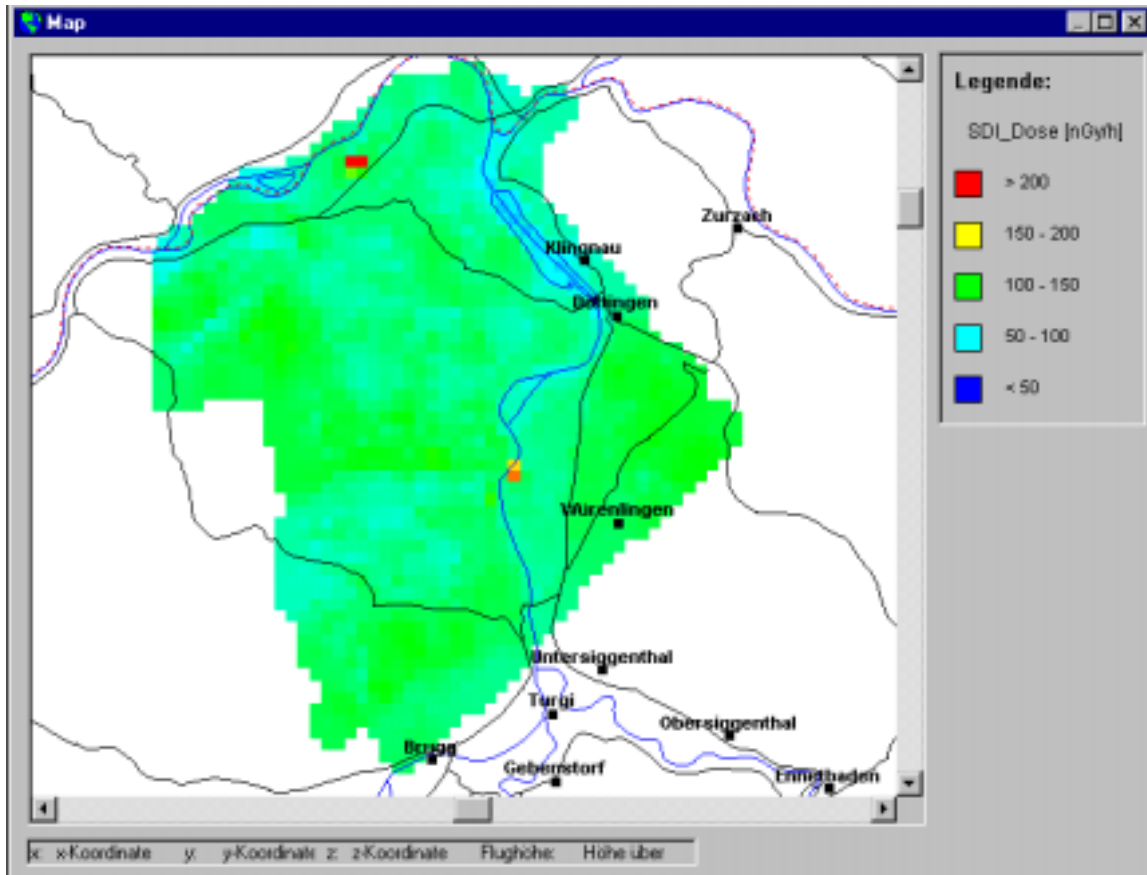


Abbildung 4.6: Fenster „Map“ im Darstellungsteil der online Software.

Im weiteren können in der Karte auch die Flugwege dargestellt werden. Im online Modus und beim Replay im offline Modus wird auch die jeweilige Position mit einem Flugzeugsymbol in der Karte markiert. Je nach Heading wird das Symbol in die entsprechende Richtung gedreht, um die momentane Flugrichtung anzuzeigen. Unter der Karte (siehe Abbildung 4.6) werden dann auch in einer Textbox die Koordinaten und die Flughöhe der momentanen Position angegeben. Auf der rechten Seite der Karte befindet sich die Legende zum momentan dargestellten Grid.

Auch die beiden Objekte im Darstellungsteil sind über klar definierte Schnittstellen mit dem Hauptcontainer verknüpft. So können bei Bedarf auch diese Teile des Programmes einfach ersetzt oder verändert werden.

4.3.7 Datenexport

Mit der neuen Software können die Daten auf verschiedene Art und Weise exportiert werden. So ist es möglich die im Fenster „Map“ dargestellte Karte mit einer entsprechenden Legende auszudrucken. Die ausgedruckte Karte enthält zur besseren Orientierung ein Koordinatennetz, das automatisch der Skala der Karte angepasst wird. Neben der Ausgabe auf den Drucker kann die selbe Darstellung auch als Bitmap in ein File exportiert werden.

Unabhängig davon können auch die erstellten Grids in einem ASCII-Format exportiert werden. Dabei wird der Wert jeder Zelle des Grids als Zahl ausgegeben. Das Format wurde so gewählt, dass es einfach in ein GIS (ArcView) importiert werden kann.

Schliesslich können auch die im Bufferfile gespeicherten Daten teilweise ausgegeben werden. Dabei stehen zwei verschiedene ASCII-Formate zur Auswahl. Beim einen handelt es sich um ein einfaches XYZ-Format, das für jeden Punkt zuerst die X- und Y-Koordinate und anschliessend die ausgewählten Werte enthält. Beim anderen Format handelt es sich um das sogenannte EURDEP-Format. Dieses wird für den internationalen Datenaustausch von Radioaktivitätsmessungen innerhalb der EU verwendet und wurde im Rahmen eines Pilotprojektes (EURDEP: European Union Radioactivity Data Exchange Platform) entwickelt. Die Schweiz war dabei auch vertreten. Unter anderem verwendet auch die Nationale Alarmzentrale (NAZ) dieses Datenformat, um fremde Daten in ihr System einzuspeisen.

Der Sourcecode der neuen online Software besteht aus mehr als 9000 Linien.

4.4 Praxistest und Verifikation

Bereits bei den Messflügen des Jahres 1999 konnte eine erste Version der Software getestet werden. Aufgrund der dabei gewonnenen Erfahrung wurde der Kartenteil, der zu Geschwindigkeitsproblemen im online Modus führte, überarbeitet. Bei den Messflügen 2000 konnte eine verbesserte Version getestet werden. Sie entsprach den eingangs in diesem Kapitel beschriebenen Spezifikationen. Die Software funktionierte einwandfrei. Bei den Messflügen zeigten sich aber noch einige kleinere Mängel. Diese betrafen hauptsächlich die Steuerung der auswählbaren Menüs sowie die Fehlerüberwachung und -verarbeitung. Seither wurden diese Mängel noch behoben, so dass nun eine gut funktionierende Software zur Verfügung steht. Im folgenden werden nun einige Beispiele von Messflügen und den entsprechenden Resultaten beschrieben. Darin ist auch ein Vergleich zwischen den ausgewerteten Daten des Programmpaketes „Gamero“ und der neuen Software enthalten.

4.4.1 Erkennung von Anomalien

Mit der neuen Software ist es nun möglich, bereits während der Messflüge die Resultate zu verfolgen. Dank der Überwachungsmöglichkeiten im Fenster „Graph“ können auftretende Anomalien erkannt und grob analysiert werden. Dies wird nun anhand eines Messfluges im Gebiet des PSI und des Kernkraftwerkes Leibstadt (KKL) erläutert.

In der Abbildung 4.7 ist das Fenster „Graph“ der neuen Auswertesoftware mit den drei Anomalien im Messgebiet KKB, KKL und PSI abgebildet. Die drei Anomalien heben sich sowohl in den Regenbogenspektren wie auch beim Profil für die Dosisleistung deutlich ab. Sie sind so auch während des Messfluges direkt zu erkennen. Die oberste Anomalie in den Regenbogenspektren stammt vom PSI West. Deutlich sind die erhöhten Zählraten unterhalb des ^{40}K Peaks zu erkennen. Diese sind mit grösster Wahrscheinlichkeit auf die Strahlung von ^{60}Co zurückzuführen. Noch stärker steigen die Zählraten unterhalb des bei 612 keV liegenden ^{214}Bi Peaks an. Dabei handelt es sich um Annihilationsstrahlung bei 511 keV, da sich im PSI West ein grosser Protonenbeschleuniger befindet (siehe auch Kapitel 8.2). Die zweite Anomalie im Graphen wurde über dem PSI Ost registriert. Eindeutig sind die stark erhöhten Zählraten unterhalb von ^{40}K zu erkennen. Das in Abbildung 4.7 enthaltene Spektrum stammt von einem Messpunkt über dem PSI Ost. Dort ist ganz klar der Doppelpeak von ^{60}Co zu sehen. Die Comptonstrahlung deckt unterhalb dieser Peaks das Spektrum praktisch vollständig zu. Der Hauptanteil dieser Anomalie wird also von ^{60}Co geliefert. Anteile von ^{137}Cs sind nicht auszuschliessen, können aber im Spektrum nicht eindeutig erkannt werden.

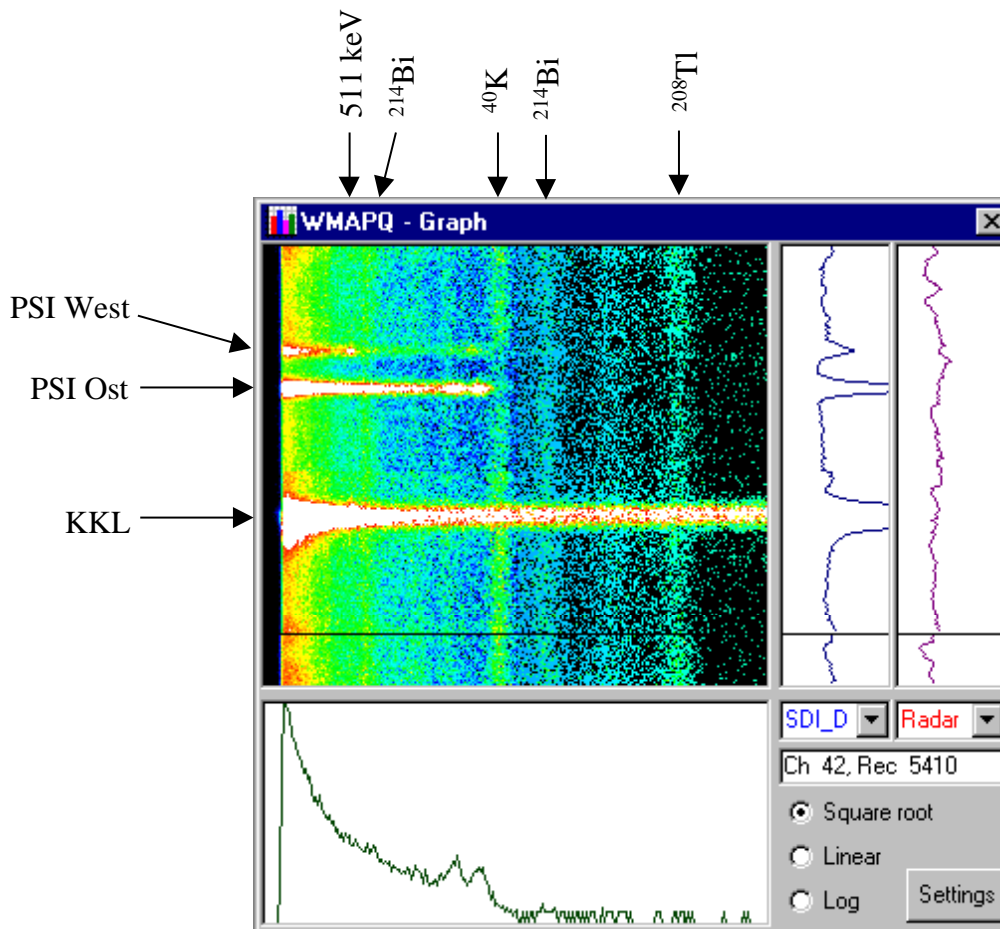


Abbildung 4.7: Darstellung der drei Anomalien im Messgebiet des Kernkraftwerkes Leibstadt und des Paul Scherrer Instituts im „Graph“ der neuen Auswertesoftware. Im Spektrum (unten) sind die Peaks von ^{60}Co sichtbar. Die Daten stammen von den Messflügen 2000.

Die letzte Anomalie schliesslich wurde auf einer Fluglinie in unmittelbarer Nähe des Kernkraftwerkes Leibstadt aufgezeichnet. Hier ist klar zu erkennen, dass die Zählraten im ganzen Spektrum stark erhöht sind. Dies ist auf Streustrahlung zurückzuführen, die von der Strahlung des Aktivierungsproduktes ^{16}N verursacht wird. Da die Photopeaks des Aktivierungsproduktes oberhalb von 3'000 keV liegen, ist nur die Streustrahlung im Spektrum zu sehen.

Bei der Anomalie über dem PSI West sind die Zählraten im Bereich der ^{60}Co Peaks rund doppelt so hoch wie in ungestörtem Gebiet. Über dem PSI Ost hingegen betragen die Zählraten im selben Bereich rund das Zehnfache. Die hohen Zählraten im ganzen Spektrum, die in der Nähe des KKL aufgezeichnet wurden, sind ebenfalls rund um den Faktor zehn erhöht. Wie erwartet sind starke Anomalien sehr gut zu erkennen. Aber auch eher schwache Anomalien, die sich durch eine rund zweifache Zählrate vom Untergrund abheben, sind leicht erkennbar. Denn bei den entsprechenden Zählraten und den dazu gehörenden statistischen Fehlern, liegen sie nur knapp über der Detektionsgrenze.

4.4.2 Quellensuche

Bei den Messflügen im Juni 2000 wurde auch die Quellensuche geübt. Bisher wurde dazu die Anzeige der Zählraten am Spektrometer verwendet. Dort musste dann ein entsprechender Anstieg der Zählraten bemerkt werden. Mit einem bestimmten Flugverfahren (Abbildung 4.8) konnte dann die Quelle lokalisiert werden. Dies bedingt jedoch eine ständige Überwachung der Zählraten am Spektrometer. Zudem ist es bei sehr schwachen Quellen nicht einfach, den Anstieg in den Zählraten von natürlichen Änderungen zu unterscheiden.

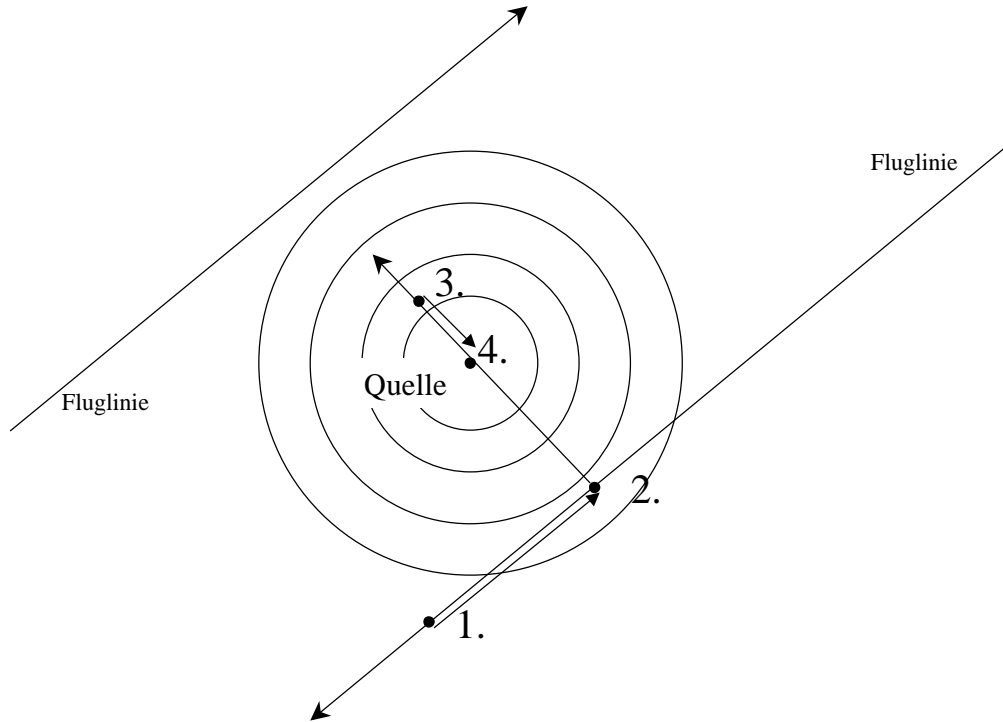


Abbildung 4.8: Quellensuchverfahren nach D. Frei (NAZ). Während des Messfluges wird ein Anstieg der Zählraten beobachtet. Fällt die Zählrate wieder ab, wird „Stopp, auf gleicher Linie zurück“ kommandiert (1.). Beim Erreichen des Maximums wird „Stopp, nach links (oder rechts)“ kommandiert. So wird das selbe Prozedere weiter durchgeführt bis man über die Punkte 3. und 4. schliesslich bei der Quelle das absolute Maximum erhält.

Ein guter Indikator für künstliche Radioaktivität ist der MMGC-Ratio (Schwarz 1991). Dabei wird die gesamte Zählrate im tieferenergetischen Bereich (400 keV bis 1'400 keV) durch die Zählrate im hochenergetischen Bereich (1'400 keV bis 3'000 keV) dividiert. Da künstliche Radionuklide hauptsächlich im tieferenergetischen Bereich γ -Strahlung aussenden, weisen erhöhte Werte des Verhältnisses auf künstliche Strahlung hin. Eine Kartierung des MMGC-Ratio eignet sich aufgrund der grossen Sensibilität sehr gut für die Quellensuche. Mit Hilfe der online Auswertung der Daten lässt sich der MMGC-Ratio während des Messfluges in einer Karte darstellen. So ist es möglich, bereits während des Fluges ohne ständige Überwachung des Spektrometers erhöhte künstliche Radioaktivität zu lokalisieren. Gleichzeitig zur Karte können die Spektren und die Profile für die verschiedensten Werte im Fenster „Graph“ laufend überwacht werden. Auf diese Art und Weise ist die grobe Lokalisierung einer Quelle viel einfacher. Um die genaue Position der Quelle zu bestimmen, kann dann wiederum das in

Abbildung 4.8 beschriebene Suchverfahren zum Einsatz kommen. In Abbildung 4.9 sind die entsprechenden Darstellungen der online Auswertesoftware zu sehen.

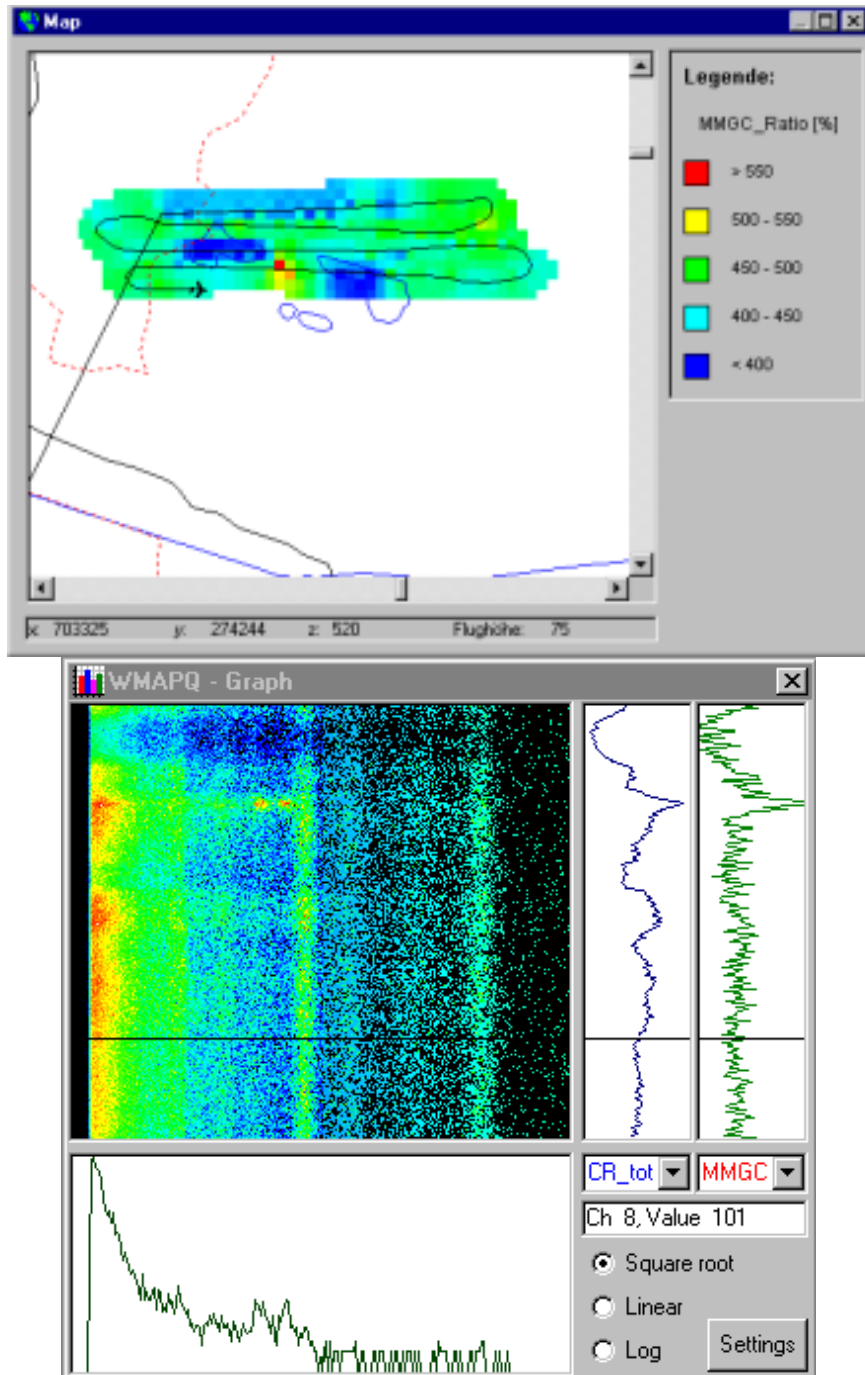


Abbildung 4.9: Darstellung der Fenster „Map“ und „Graph“ beim Quellensuchflug während den Messflügen des Jahres 2000.

In der Karte ist der MMGC-Ratio (siehe auch Kapitel 5.1) dargestellt. Deutlich sind die erhöhten Werte in roter Farbe zu erkennen. Das im „Graph“ unten gezeichnete Spektrum zeigt, dass diese Werte auf eine ^{60}Co Quelle zurückzuführen sind (Doppelpeak). Die erhöhten Werte aus der Karte sind auch in den beiden Profilen für die totale Zählrate und den MMGC-Ratio zu sehen. Auf gleicher Höhe wie in den Profilen kann auch in den Regenbogenspektren der Doppelpeak von ^{60}Co erkannt werden. In einer Übung zur Quellensuche innerhalb der

Messflüge 2000 konnte deshalb die ausgelegte ^{60}Co Quelle (190 MBq) im Flug gefunden und identifiziert werden. Mit Hilfe dieser Darstellungsarten ist es nun also neben der reinen Erkennung von künstlicher Radioaktivität auch möglich, das Radionuklid bereits während des Fluges zu identifizieren und die Position der Quelle auf einer Karte festzulegen.

4.4.3 Verifikation der Resultate

Für die Verifikation wurden die Resultate der neuen online Software mit denjenigen von „Gamero“ verglichen. Prinzipiell sollten zwischen den Resultaten, die von den beiden Programmen ausgegeben werden, keine Abweichungen bestehen. Denn in beiden Programmen wird bis auf kleine Abweichungen das selbe Auswerteverfahren angewandt. In Abbildung 4.10 sind die Ergebnisse aus der Software „Gamero“ gegen diejenigen der online Software aufgetragen. Die Resultate stimmen wie erwartet sehr gut überein. Die sehr geringen Unterschiede sind auf kleine Differenzen in der Auswertung zurückzuführen und sind nicht von Bedeutung.

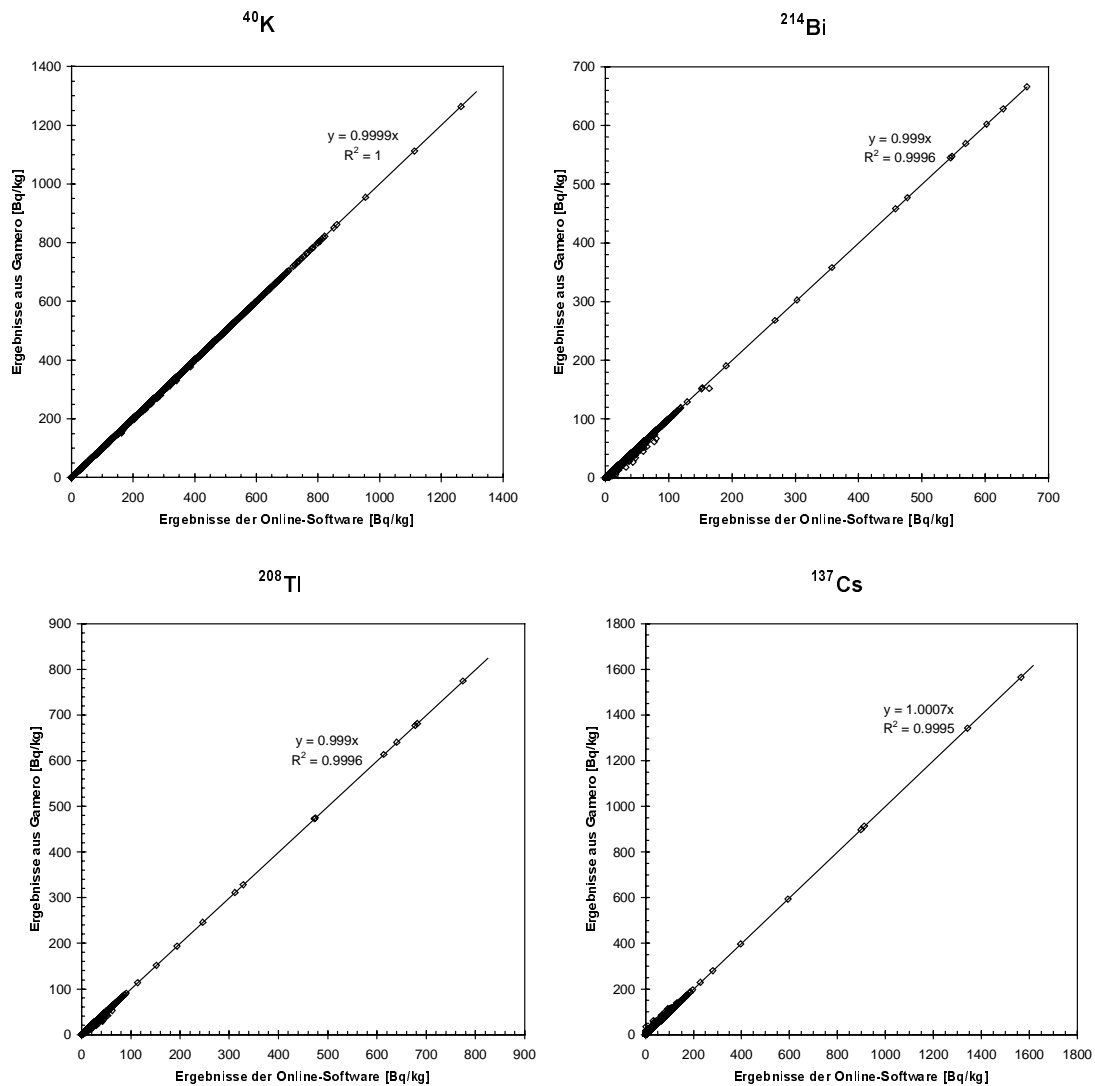


Abbildung 4.10: Vergleich der Ergebnisse, die einerseits mit dem Programmpaket „Gamero“ und andererseits mit der neuen online Auswertesoftware berechnet wurden.

4.5 Fazit

Mit der neuen Auswertesoftware liegt nun ein Programm vor, das es erlaubt, bereits während den Messflügen die Rohdaten sowie die Resultate zu überwachen und darzustellen. Dies ermöglicht eine raschere Erkennung von Anomalien und auch eine Vereinfachung bei der Quellensuche. In die Auswertung der Daten konnten verschiedene neue Erkenntnisse und Methoden integriert werden. So ist es möglich, die Radarhöhe durch die Differenz von Barometerhöhe und digitalem Höhenmodell zu ersetzen. Dies erlaubt, den Einfluss des Waldes auf die Radarmessungen und somit auf die Höhenkorrektur auszuschalten. Mit der neuen Methode zur Dosisleistungsbestimmung können sehr zuverlässige Resultate auch für Gebiete mit stärkerer Topographie bereits während des Messfluges gewonnen werden. Im weiteren ist nun auch im online Modus eine Topographiekorrektur möglich. Vorausgesetzt wird jedoch ein genügend schneller Rechner sowie ein digitales Geländemodell (DHM25).

Die neue Software erlaubt auch eine offline Auswertung der Rohdaten. Dabei können auch die verschiedensten Parameter, die für die Auswertung verwendet werden, verändert werden. Da für jedes Rohdatenfile ein entsprechender Parametersatz gewählt werden kann, können auch unterschiedliche Verhältnisse wie zum Beispiel Radonkonzentrationen in der Atmosphäre berücksichtigt werden.

Prinzipiell ist es auch möglich, Messdaten anderer Teams mit dieser Software auszuwerten, wenn die entsprechenden Kalibrationsparameter vorliegen. Die fremden Daten müssen dazu bloss in das selbe Rohdatenformat gebracht werden, das auch vom schweizerischen Messsystem verwendet wird. Bereits ausgewertete Daten anderer Messteams können für Darstellungszwecke in ein Bufferfile konvertiert werden. Dazu wird ebenfalls eine Konvertierungsroutine benötigt. Erste Erfahrungen mit österreichischen und deutschen Daten konnten innerhalb der Interkalibrationsübungen (siehe auch Kapitel 7) gesammelt und erste Umwandlungsroutinen geschrieben werden.

Im offline Modus ist es auch möglich, die Messflüge „abspielen“ zu lassen. So können auch nach dem Messflug die Daten visuell kontrolliert werden, was für Interpretationszwecke sehr wichtig sein kann.

Neben der Auswertung und Darstellung der Daten innerhalb des Programmes ist auch der Export der Daten ein wichtiger Bestandteil der Software. Die Grids verschiedener Variablen können in Kartenform auf den Drucker ausgegeben, in ein Grafikfile exportiert oder direkt als ASCII-File gespeichert werden. Das ASCII-File kann dann sehr einfach für weitere Analysen ins ArcView importiert werden. Im weiteren können auch die Ergebnisse für jeden Messpunkt in zwei verschiedenen ASCII-Formaten ausgegeben werden. Dies ermöglicht einen einfachen Datenaustausch mit anderen Teams oder Notfallorganisationen.

Die Handhabung des Programmes ist einfach, da es sehr leicht über Menüs gesteuert werden kann. Um den Benutzer zu lenken und Fehlerquellen zu minimieren, sind jeweils nur die Menüs auswählbar, die wirklich verwendet werden dürfen. Die Auswertung erfolgt in einem Schritt und im offline Betrieb für alle Rohdatenfiles gleichzeitig. Eine zweifache Anwendung einer Korrektur ist deshalb nicht möglich.

Im online Betrieb werden die Daten vom Messsystem ausgelesen und auf der Festplatte gesichert. Unmittelbar anschliessend werden die Daten ausgewertet und dargestellt. Das Fenster

„Graph“ ermöglicht durch die verschiedenen Grafiken eine sehr gute Überwachung der Messdaten während des Fluges. Hier können bereits während des Fluges Spektren und berechnete Resultate analysiert und interpretiert werden. Dies ist vor allem bei der Suche nach radioaktiven Quellen eine grosse Hilfe und wurde bereits während den Messflügen 2000 erfolgreich getestet.

Vergleiche von Resultaten der neuen Software mit Ergebnissen des Programmpaketes „Gamero“ zeigten erwartungsgemäss eine sehr gute Übereinstimmung. Die kleinen Abweichungen sind auf Unterschiede in den Auswertungsroutinen zurückzuführen. Die Ergebnisse werden dadurch jedoch nicht signifikant beeinflusst.

5 Neuerungen in der Auswertemethodik

5.1 Einleitung

Als Einführung wird hier kurz die momentan in der Schweiz angewandte Auswertemethodik beschrieben. Diese wurde von Schwarz (1991) entwickelt und schlug sich im Programmpaket „Gamero“ nieder. Grundsätzlich kann bei der Auswertung zwischen Datenreduktion, Korrekturen und den Umrechnungen unterschieden werden.

5.1.1 Datenreduktion

Bei den aeroradiometrischen Messungen wird bei jedem Messpunkt das gesamte Spektrum aufgezeichnet. Aufgrund der tiefen Zählrate N bei einem Messintervall von einer Sekunde sind die Unsicherheiten in den Zählraten der einzelnen Kanäle entsprechend hoch ($\pm N^{1/2}$). Deshalb werden sogenannte „Fensterwerte“ gebildet. Die Fenster bezeichnen Ausschnitte aus dem Spektrum, deren Grenzen durch bestimmte Energien bestimmt sind. In der Schweiz werden acht solche Fenster verwendet (Tabelle 5.1). Neben den nuklidspezifischen Fenstern gibt es auch drei Fenster, die einen grösseren Bereich des Spektrums abdecken: Total, MMGC1 und MMGC2. Während das Total Fenster praktisch das gesamte Spektrum beinhaltet, deckt der MMGC1 (MMGC: Man Made Gross Count) den unteren Teil des Spektrums ab, in dem hauptsächlich die künstlichen Radionuklide strahlen. Den oberen Teil des Spektrums, in dem vorwiegend Beiträge der natürlichen Radionuklide registriert werden, fasst der MMGC2 zusammen. Das Verhältnis von MMGC1 zu MMGC2 (MMGC-Ratio) ist ein empfindliches Instrument zur Kartierung künstlicher Radioaktivität (Hoover 1988). Alle acht Fensterwerte beinhalten die gesamte Zählrate, die im Spektrum zwischen der entsprechenden Unter- und Obergrenze liegen. Mit der Bildung dieser Fensterwerte werden die Daten aus 256 Kanälen auf acht Werte reduziert.

Tabelle 5.1: Die in der Schweiz bei der Auswertung verwendeten Energiefenster.

Bezeichnung	Isotop	Gammalinien-Energie [keV]	Untergrenze des Fensters [keV]	Obergrenze des Fensters [keV]
Total	-	-	400	3000
Kalium	⁴⁰ K	1'460	1'360	1'560
Uran	²¹⁴ Bi	1'760	1'665	1'865
Thorium	²⁰⁸ Tl	2'615	2'415	2'815
Cäsium	¹³⁷ Cs	660	600	720
Kobalt	⁶⁰ Co	-	1'100	1'400
MMGC1	-	-	400	1'400
MMGC2	-	-	1'400	3'000

5.1.2 Korrekturen

In einem ersten Schritt werden nun die gebildeten Fensterwerte für den Background des Helikopters und der Messapparatur, den atmosphärischen Background sowie für die gestreute kosmische Strahlung nach Formel 5.1 korrigiert. Der atmosphärische Background wird hauptsächlich durch das Radionuklid ^{214}Bi verursacht, das als Tochterisotop des radioaktiven Gases Radon in die Atmosphäre gelangt.

$$I_{Korr} = I_{Roh} - (I_{Back} + I_{Atmos} + S_C \cdot I_C) \quad (5.1)$$

wobei I_{Korr} den korrigierten Fensterwert, I_{Roh} den Rohfensterwert, I_{Back} den Helikopterbackground, I_{Atmos} den atmosphärischen Background, S_C den kosmischen Streufaktor und I_C die Zählrate im kosmischen Fenster darstellt.

Anschliessend werden die Fensterwerte für die gestreute Strahlung und die spektralen Fremdbeiträge korrigiert (Stripping-Korrektur). Denn durch die Streuung im Boden und im Untergrund, welche die Energie des γ -Quantes erniedrigt, beeinflusst die Strahlung von Radionukliden mit Gammalinien hoher Energie die Zählraten in den Fenstern von Radionukliden mit Gammalinien tieferer Energie. Die Berechnung der korrigierten Werte erfolgt nach der Formel 5.2. Die Streufaktoren, die für die Korrektur benötigt werden, bestimmt man in der Schweiz mit Punktquellen (Schwarz 1991).

$$\vec{I}_{Strip} = \mathbf{s} \cdot \vec{I}_{Korr} \quad (5.2)$$

wobei I_{Strip} den Vektor der für die gestreute Strahlung korrigierten Fensterwerte, I_{Korr} den Vektor der Background korrigierten Fensterwerte und \mathbf{s} die inverse Streufaktoren-Matrix darstellt.

Nach der Stripping-Korrektur erfolgt die Normalisierung der Werte auf eine Referenzhöhe nach der Formel 5.3. Normalerweise wird dabei eine Referenzhöhe von 100 m verwendet. Die Normalisierungskorrektur oder auch Höhenkorrektur trägt der Abschwächung der Gammastrahlung mit zunehmender Entfernung von der Quelle (Untergrund) Rechnung. In der Praxis wird anstelle des Integrals 2. Ordnung in Formel 5.3 häufig auch eine einfache Exponentialfunktion mit den entsprechenden Abschwächungskoeffizienten verwendet (Formel 5.4). Die Abschwächungskoeffizienten werden mit Hilfe von Steigflügen bestimmt.

$$I_{Alt} = I_{Strip} \cdot \frac{E_2(\mu_{ref} \cdot h_{ref})}{E_2(\mu \cdot h)} \quad (5.3)$$

wobei I_{Alt} den normalisierten Fensterwert, I_{Strip} den strippingkorrigierten Fensterwert, E_2 das Integral 2. Ordnung, μ_{ref} den Abschwächungskoeffizient bei der Referenzatmosphäre (0 °C, 1013.25 hPa), h_{ref} die Referenzhöhe (100 m), μ den Abschwächungskoeffizienten bei Messbedingungen und h die tatsächliche Flughöhe über Grund darstellen.

$$I_{Alt} = I_{Strip} \cdot e^{-\mu_{ref} \cdot (h_{ref} - h)} \quad (5.4)$$

Im Mittelland der Schweiz sind die Topographieeffekte meist vernachlässigbar. In den Alpen hingegen können sie einen starken Einfluss auf die gemessenen Zählraten ausüben. Über Bergkuppen wird dann eine zu tiefe Zählrate gemessen und in engen Tälern eine zu hohe. Um die Effekte der Topographie ausgleichen zu können, wird die Formel 5.5 angewandt. Dabei stellt der Korrekturfaktor N den Quotienten vom Strahlungsfeld eines Halbraumes und dem Strahlungsfeld des Geländemodells dar (Formel 5.6). Für die Berechnung dieses Quotienten wird deshalb ein Geländemodell benötigt. Dies kann entweder aus der gemessenen Barometerhöhe und Radarhöhe hergeleitet werden, oder man verwendet ein auf dem Markt erhältliches Geländemodell (zum Beispiel DHM25 des Bundesamtes für Landestopographie).

$$I_{Topo} = I_{Alt} \cdot N \quad (5.5)$$

$$N = \frac{2\pi \cdot E_2(\mu_{ref} \cdot h_{ref})}{\iint \frac{e^{-\mu_a \cdot h \cdot \sqrt{1+x^2+y^2}}}{\sqrt{1+x^2+y^2}} \cdot dx \cdot dy} \quad (5.6)$$

wobei I_{Topo} den topographiekorrigierten Fensterwert, I_{Alt} den normalisierten Fensterwert, E_2 das Integral 2. Ordnung, μ_{ref} den Abschwächungskoeffizient bei der Referenzatmosphäre (0 °C, 1013.25 hPa), h_{ref} die Referenzhöhe (100 m), μ_a den Abschwächungskoeffizienten der Luft, h die Flughöhe über Grund, x und y die höhennormierten Koordinaten darstellen.

5.1.3 Umrechnung in Bodenaktivitäten und Dosisleistungen

Nach den Korrekturen können die korrigierten Fensterwerte der Radioisotope ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl und ^{137}Cs in Bodenaktivitäten umgerechnet werden. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass es sich bei allen Radionukliden um homogene Volumenquellen handelt. Die Umrechnung der Fensterwerte in Aktivitäten erfolgt mit einer einfachen Multiplikation. Dazu werden die

nuklidspezifischen Konversionsfaktoren benötigt, die mit Hilfe von gammaspektrometrischen Bodenmessungen bestimmt werden (Schwarz et al. 1995).

Unter der Annahme, dass sich die Zerfallsreihen von ^{238}U und ^{232}Th im Gleichgewicht befinden, lassen sich aus den oben bestimmten Bodenaktivitäten auch die entsprechenden Beiträge zur Dosisleistung herleiten. Dazu werden die Bodenaktivitäten mit den nuklidspezifischen Umrechnungsfaktoren multipliziert. Die Umrechnungsfaktoren können dem ICRU Report 53 (1994) entnommen werden.

5.2 Dosisleistungsbestimmung mit der Spectrum Dose Index (SDI) Methode

5.2.1 Ausgangslage

In einem Ereignisfall soll die Aeroradiometrie als schnelles und flächendeckendes Messmittel eingesetzt werden. Um schnell Aussagen über die Strahlungssituation machen zu können, ist eine erste Bestimmung der Dosisleistung sehr wichtig. Bisher wurden zwei Verfahren zur Bestimmung der Ortsdosisleistung (ODL) eingesetzt.

- Methode A geht von der totalen Zählrate aus. Diese Zählrate wird für den Helikopterbackground korrigiert und dann mit einem einfachen Konversionsfaktor in eine Dosisleistung umgerechnet. Der Konversionsfaktor wurde bestimmt, indem aeroradiometrische Messungen mit Bodenmessungen verglichen wurden (Schwarz et al. 1995). Diese Methode weist den Nachteil auf, dass keine Höhenkorrektur durchgeführt wird. Bei guter Einhaltung der Referenzflughöhe und flachem Relief liefert diese Methode recht zuverlässige Resultate. Bei starker Topographie und schwankender Flughöhe werden die Dosisleistungen jedoch über- oder unterschätzt. Im Weiteren beinhaltet die totale Zählrate nur den Energiebereich von 400 keV bis 3'000 keV, weshalb diese Methode nur bedingt für Radionuklide mit sehr tiefenergetischer Gammastrahlung geeignet ist. Die untere Grenze von 400 keV wurde gewählt, um eine Dominanz des tiefenergetischen Compton-Anteils in den Resultaten zu verhindern.
- Methode B geht von den korrigierten und berechneten Nuklidaktivitäten aus. Diese werden dann mit Hilfe von Konversionsfaktoren (Schwarz et al. 1995) in Dosisleistungen umgerechnet und addiert. Für die Ortsdosisleistung wird schliesslich noch der berechnete Anteil der kosmischen Strahlung (Murith & Gurtner 1994) hinzugezählt. Bei dieser Berechnungsart werden die Werte also für den Background, die Streustrahlung und die Flughöhe bzw. Topographie korrigiert. Der Nachteil besteht darin, dass nur die Beiträge der natürlichen Zerfallsreihen ^{238}U , ^{232}Th und ^{40}K sowie des künstlichen Nuklides ^{137}Cs in die Ortsdosisleistung Eingang finden. Normalerweise kommen auch keine anderen Nuklide in der Umwelt vor, in einem Ereignisfall ist jedoch auch mit anderen künstlichen Radionukliden zu rechnen. Um nun aber einen zuverlässigen Wert der Dosisleistung für das ganze Spektrum und bei allen Bedingungen zu erhalten, wurde nach einer neuen Methode gesucht.

Aufgrund der erwähnten Nachteile dieser Methoden war ein Alternativverfahren gesucht, das eine zuverlässige Ortsdosisleistungsbestimmung bei Notfalleinsätzen erlaubt. In einer Literaturrecherche konnte die sogenannte Spectrum Dose Index (SDI) Methode (Sanderson & McLeod 1999) als aussichtsreiches Verfahren identifiziert werden. Diese wird nun im Folgenden etwas genauer untersucht.

5.2.2 Die SDI Methode

Der Spectrum Dose Index (SDI) ist gemäss Formel 5.7 als Summe des Produktes von Kanalnummer und Zählrate des entsprechenden Kanals über das ganze Spektrum definiert.

Damit wird dem generellen Abflachen des Gammaskpektrums mit zunehmender Energie Rechnung getragen.

$$SDI = \sum_k (ZR_k \cdot k) \quad (5.7)$$

wobei k der Kanalnummer und ZR_k der Zählrate im entsprechenden Kanal entspricht.

Das dänische Team von der Dänischen Technischen Universität korrigiert nun in einem ersten Schritt (Sanderson & McLeod 1999) den SDI für die Hintergrundstrahlung (SDI_{Back}) nach Formel 5.8. In der Hintergrundstrahlung sind der Beitrag des Helikopters und des Messgerätes sowie der Beitrag der kosmischen Strahlung enthalten. Der SDI_{Back} wird aus Messungen über mindestens 2 m tiefem Wasser und einem Abstand vom Ufer von mindestens 500 m bestimmt. In gleicher Weise wird die Methode auch vom schottischen Team des Scottish University Research and Reactor Centre (SURRC) eingesetzt.

$$SDI_{Korr} = SDI - SDI_{Back} \quad (5.8)$$

wobei SDI_{Back} den Anteil des Helikopter-Backgrounds, des Messgerätes und der kosmischen Strahlung darstellt.

In der Formel 5.8 wird die Hintergrundstrahlung als konstant angenommen. Aufgrund der Höhenabhängigkeit der kosmischen Strahlung gilt dies jedoch nur für gleiche Höhen über Meer. Da in der Schweiz aber mit grossen Höhenunterschieden gerechnet werden muss und nicht überall eine grössere Wasserfläche für Backgroundmessungen zur Verfügung steht, muss in der Backgroundkorrektur die Höhenabhängigkeit des kosmischen Anteils berücksichtigt werden. Die Höhenabhängigkeit manifestiert sich direkt in der mit zunehmender Höhe über Meer ebenfalls ansteigenden Zählrate im kosmischen Fenster.

Die Formel 5.8 wird deshalb angepasst (Formel 5.9) und die Backgroundkorrekturen in einen konstanten (SDI_{Back}) und variablen Teil (SDI_{Cosmic}) aufgetrennt.

$$SDI_{Korr} = SDI - SDI_{Back} - SDI_{Cosmic} \quad (5.9)$$

wobei SDI_{Back} den Anteil des Helikopter-Backgrounds und des Messgerätes (wie in Formel 5.8) und SDI_{Cosmic} den kosmischen Anteil am SDI darstellt.

Der SDI_{Cosmic} entspricht dem Anteil des SDI, der durch die ins Spektrum gestreute kosmische Strahlung verursacht wird. Der kosmische Anteil der Zählrate eines Kanals ergibt sich aus dem Produkt der kosmischen Zählrate und des kanalspezifischen kosmischen Streufaktors. Um den

entsprechenden Anteil des SDI zu erhalten, muss das obige Produkt noch mit der Kanalnummer multipliziert werden. Die Summe über alle Kanäle ergibt schliesslich den SDI_{Cosmic} (Formel 5.10). Dabei gilt zu beachten, dass der Summenterm in Formel 5.10 konstant ist.

$$SDI_{Cosmic} = ZR_{Cosmic} \cdot \sum_k (S_k \cdot k) \quad (5.10)$$

wobei ZR_{Cosmic} die Zählrate im kosmischen Fenster und S_k den Streufaktor im Kanal k darstellt.

Unter der Annahme einer linearen Beziehung zwischen der Zählrate im kosmischen Fenster und der gestreuten Strahlung in jedem Kanal des Spektrums (Purvance & Novak 1983) kann aus Messungen in verschiedenen, grossen Höhen über Wasser der Background ($ZR_{Back,k}$) und der kosmische Streufaktor (S_k) für jeden einzelnen Kanal k bestimmt werden. Aus den Backgroundwerten der einzelnen Kanäle lässt sich dann der SDI_{Back} nach Formel 5.11 berechnen.

$$SDI_{Back} = \sum_k (ZR_{Back,k} \cdot k) \quad (5.11)$$

wobei $ZR_{Back,k}$ den Background im Kanal k darstellt.

Der Summenterm in der Formel 5.10 zur Bestimmung des SDI_{Cosmic} lässt sich nun mit Hilfe der kosmischen Streufaktoren (S_k) berechnen (Formel 5.12).

$$f_{Cosmic} = \sum_k (S_k \cdot k) \quad (5.12)$$

wobei S_k den kosmischen Streufaktor im Kanal k darstellt.

Nun wird in einem weiteren Schritt der für den Background korrigierte SDI_{Korr} höhenkorrigiert. Dazu werden die Daten mit Hilfe einer exponentiellen Funktion auf die Referenzhöhe normiert (Formel 5.13). In einem weiteren Schritt werden die SDI Werte mit Hilfe eines Konversionsfaktors α in Dosisleistungen umgerechnet (Formel 5.14).

$$SDI_{Alt} = \exp(\mu_{air} \cdot (Flughöhe - Referenzhöhe)) \cdot SDI_{Korr} \quad (5.13)$$

wobei μ_{air} den Abschwächungskoeffizienten und SDI_{Alt} den höhenkorrigierten SDI darstellt. SDI_{Korr} ist der für Background und kosmische Strahlung korrigierte Spectrum Dose Index.

$$Dosis = \alpha \cdot SDI_{Alt} \quad (5.14)$$

wobei α den Konversionsfaktor und Dosis die Dosisleistung darstellt.

Die Dosisleistung, die mit Formel 5.14 bestimmt wird, enthält nur den terrestrischen Anteil. Um jedoch die Ortsdosisleistung zu erhalten muss zur Dosisleistung aus Formel 5.14 noch der kosmische Anteil addiert werden (Formel 5.15).

$$Dosis = Dosis_{SDI} + Dosis_{Cosmic} \quad [\text{nGy/h}] \quad (5.15)$$

wobei Dosis der Dosisleistung zusammengesetzt aus terrestrischem Anteil $Dosis_{SDI}$ (da mit Hilfe der SDI Methode bestimmt) und kosmischem Anteil $Dosis_{Cosmic}$ entspricht.

Die kosmische Dosisleistung lässt sich prinzipiell gemäss Formel 5.16 aus der Höhe über Meer berechnen (Murith & Gurtner 1994). Aus Formel 5.16 ist klar ersichtlich, dass der kosmische Anteil exponentiell mit der Höhe zunimmt. Grundsätzlich ist die kosmische Strahlung abhängig von der magnetischen Breite und nimmt vom Äquator zu den Polen hin zu (Durrance 1986). Deshalb ist die Formel 5.16 nur im Gebiet der Schweiz gültig.

$$Dosis_{Cosmic} = 37 \cdot e^{(0,38 \text{ km}^{-1} \cdot z)} \quad [\text{nGy/h}] \quad (5.16)$$

wobei z die Höhe über Meer in Kilometer darstellt.

Alternativ zur Formel 5.16 lässt sich die kosmische Dosisleistung auch über die Zählrate im kosmischen Fenster ($>3'000$ keV) bestimmen (Formel 5.17).

$$Dosis_{Cosmic} = \beta \cdot ZR_{Cosmic} \quad [\text{nGy/h}] \quad (5.17)$$

wobei ZR_{Cosmic} die Zählrate im kosmischen Fenster und β den Konversionsfaktor für die kosmische Dosisleistung darstellt.

5.2.3 Wahl des Schwellenwertes

Ein wesentlicher Unterschied in der Anwendung des SDI liegt in der unterschiedlichen Wahl der unteren Energiegrenze bei der Berechnung des SDI. Denn der tiefenergetische Bereich wird am stärksten durch die Compton-Strahlung beeinflusst. Während das Team vom Scottish Universities Research and Reactor Centre (SURRC) 40 keV als untere Energiegrenze einsetzt,

verwendet das Team von der Technischen Universität von Dänemark (DTU) einen Schwellenwert von 240 keV (Sanderson & McLeod 1999). Das Dänische Team begründet diesen höheren Schwellenwert mit einer besseren Korrelation mit den gemessenen Dosisleistungen.

Wie sich bei einem Vergleich des SDI und der totalen Zählrate (Fenster 400 – 3'000 keV), auf welcher die Methode A basiert, zeigte, spielt die untere Grenze bei einer natürlichen Strahlungssituation ohne künstliche Spaltprodukte praktisch keine Rolle. Aus Abbildung 5.1 ist ersichtlich, dass die Korrelation für alle Schwellenwerte sehr gut ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die tieferenergetische Strahlung weniger stark gewichtet wird als die hochenergetische.

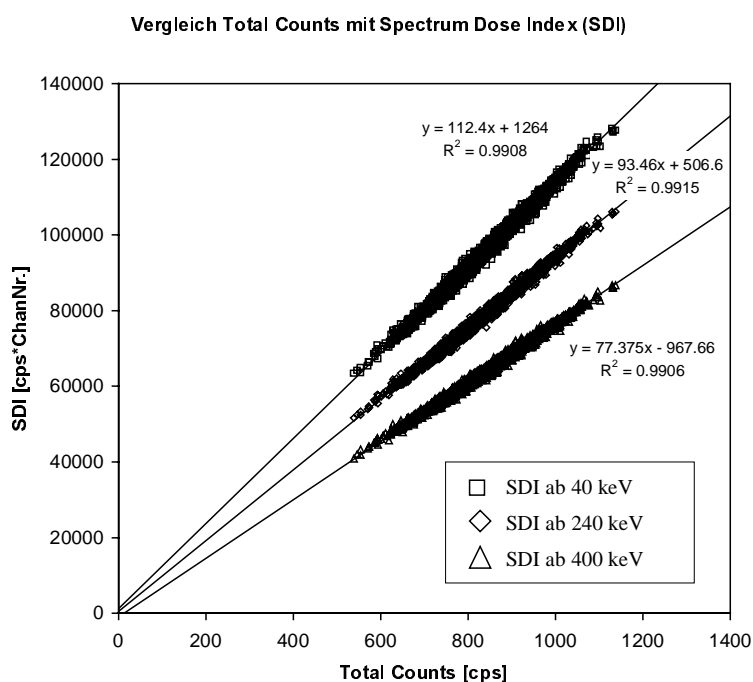


Abbildung 5.1: Vergleich der Total Counts mit dem Spectrum Dose Index (SDI) für verschiedene untere Schwellenwerte (Daten vom Survey KKG97). Für alle gewählten Schwellenwerte erhält man eine sehr gute Korrelation.

Da bei der Kernspaltung vor allem Isotope mit tieferenergetischer γ -Strahlung (<1'400 keV) entstehen, sollte aus Sicht des Strahlenschutzes der Schwellenwert möglichst tief gehalten werden. Wie sich bei gammaspektrometrischen Bodenmessungen im Tessin nach dem Reaktorunfall in Tchernobyl gezeigt hat, sind zu einem frühen Zeitpunkt vor allem die Spaltprodukte ^{131}I (Halbwertszeit: 8.02 Tage), ^{132}Te (3.26 Tage) und ^{132}I (0.095 Tage) für den Hauptanteil der Dosisleistung verantwortlich (Murith & Gurtner 1995). Die Gammahauptlinie von ^{131}I liegt bei 364.5 keV, von ^{132}Te bei 228.2 keV und von ^{132}I bei 772.6 keV. Eine untere Grenze von 400 keV, wie sie bei der Methode A für die totale Zählrate verwendet wird, ist deshalb aus Sicht des Strahlenschutzes ungeeignet. Denn damit würden gerade diejenigen Nuklide nicht miteinbezogen, die kurz nach einem Ereignis den grössten Anteil der Dosisleistung ausmachen. Im untersten Bereich des Spektrums werden jedoch die Zählraten durch die Streu- und Bremsstrahlung dominiert, die das Ergebnis der SDI-Methode verschlechtern. Die Wahl des Schwellenwertes stellt deshalb ein Kompromiss zwischen

Abdeckung des Energiebereichs und der Genauigkeit der Dosisleistungswerte dar. Deshalb wird als unterer Schwellenwert 240 keV gewählt.

5.2.4 Bestimmung der Berechnungsparameter

Für den Gebrauch der angepassten SDI Methode zur Dosisratenbestimmung müssen nun noch die Parameter wie Background, kanalspezifische kosmische Streufaktoren, Abschwächungskoeffizient und Umrechnungsfaktor bestimmt werden. Dazu werden Messdaten aus verschiedensten Messflügen sowie von Bodenmessungen benötigt. In der Tabelle 5.2 sind die verwendeten Messflüge und ihre Nutzung aufgelistet.

Tabelle 5.2: Liste der Surveys und ihre Nutzung für die Kalibration der SDI Methode.

Messgebiet	Datum	Flug-Nr.	Art des Surveys	Kalibration
Eichflüge	25.8.94	9427	Steigflug	Abschwächungskoeffizient
	23.8.94	9410	Cosmic	Background und kosmische Strahlung
KKW Gösgen	11.6.97	9709	Survey	Konversionsfaktor
		9710		
KKW Mühleberg	9.6.97	9702	Survey	Konversionsfaktor
	9.6.97	9703		
	11.6.97	9712		
	11.6.97	9713		
PSI/KKW Leibstadt	1.7.98	9808	Survey	Konversionsfaktor
Nauders/A	10.6.97	9705	Survey	Konversionsfaktor
		9706		
Magadino/TI	22.5.96	9618	Survey	Konversionsfaktor
		9619		
		9620		
Schwarzwald/BRD	23.6.99	9908	Survey	Konversionsfaktor
		9910		
		9911		
		9912		

Background und kosmischer Anteil

Für die Ermittlung der Hintergrundstrahlung (SDI_{Back}) und der kanalspezifischen kosmischen Streufaktoren wurde ein Steigflug in grosser Höhe (~ 4 km) über dem Neuenburgersee verwendet (Messflug 9410). Bei diesem Steigflug wurden in den Flughöhen von 8'000 ft, 10'000 ft, 12'000 ft und 14'000 ft während 300 s je ein Spektrum aufgenommen (Schwarz et al. 1995). Da in dieser Flughöhe über einem See die terrestrische Strahlung durch die Abschwächung in der Luft vernachlässigbar klein ist, können die gemessenen Zählraten auf die Hintergrundstrahlung des Helikopters und der Messapparatur sowie auf die kosmische Strahlung zurückgeführt werden.

Mit Hilfe der Formeln 5.11 und 5.12 lassen sich aus den Messungen in verschiedenen Höhen der $SDI_{\text{Back}} = 12'640$ und $f_{\text{Cosmic}} = 96$ bestimmen.

Abschwächungskoeffizient des SDI

Für die Höhenkorrektur des für Background und kosmischen Anteil korrigierten SDI wird ein Abschwächungskoeffizient μ_{air} benötigt. Damit wird die Absorption der Gammastrahlung in der Luft berücksichtigt (Details siehe Schwarz 1991). Der Abschwächungskoeffizient lässt sich aus Steigflügen nahe zum Untergrund bestimmen. Üblicherweise werden Flughöhen von 100 ft, 200 ft, 300 ft, 400 ft, 500 ft und 1'000 ft gewählt. Bei der Auswertung verschiedener Steigflüge, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten an verschiedenen Orten durchgeführt wurden, ergeben sich auch unterschiedliche Koeffizienten (Abbildung 5.2).

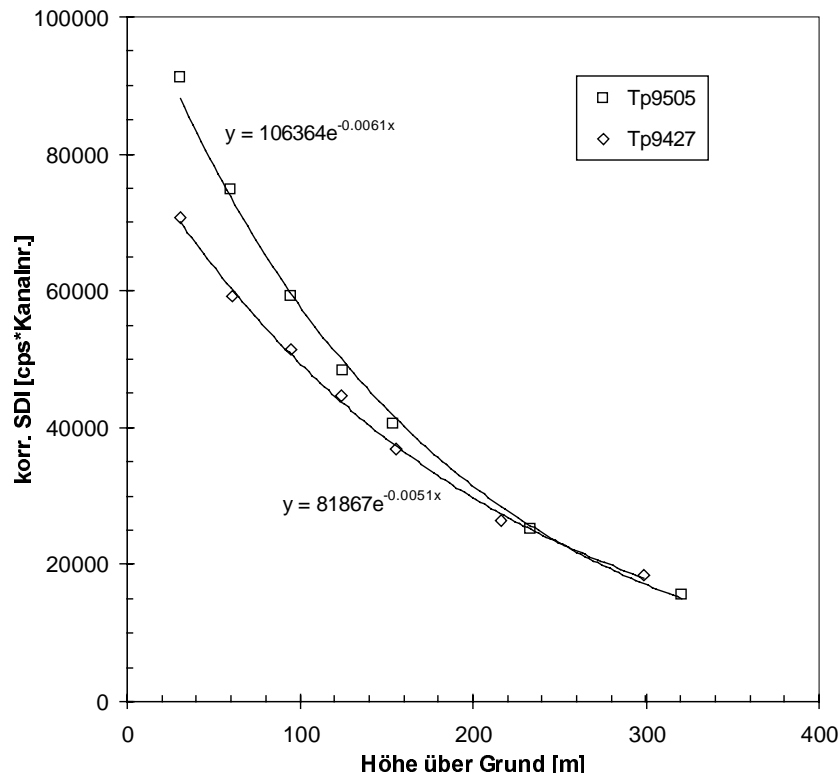


Abbildung 5.2: Auswertungen von zwei verschiedenen Steigflügen.

Da die aus der exponentiellen Regression bestimmten Koeffizienten für die Steigflüge 9427 ($0.0061 \pm 0.0001 \text{ m}^{-1}$) und 9505 ($0.0051 \pm 0.0001 \text{ m}^{-1}$) doch sehr nahe beieinander liegen, wird

für den Abschwächungskoeffizienten der Mittelwert verwendet. Demzufolge ergibt sich der Abschwächungskoeffizient zu $\mu_{\text{air}} = 0.0056 \pm 0.0002 \text{ m}^{-1}$.

Umrechnungsfaktor

Nun muss noch der Umrechnungsfaktor α vom SDI_{Alt} zur Dosisleistung (Formel 5.14) berechnet werden. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse von hochauflösenden, gammaspektrometrischen Bodenmessungen, Dosisleistungsmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern (RSS) und MADUK-Werte (MADUK: Messnetz zur automatischen Dosisleistungsüberwachung in der Umgebung der Kernkraftwerke) herangezogen. Die MADUK-Werte wurden korrigiert, da sie im Vergleich zu den Messwerten von den Reuter Stokes Ionisationskammern immer zu hoch liegen (Cartier et al., 1996). Von der totalen Dosisleistung wird der kosmische Anteil abgezogen. Trägt man den SDI ab 240 keV ohne kosmischen Beitrag und Background sowie für die Höhe korrigiert (Referenzhöhe = 100 m) gegen die terrestrische Dosisleistung auf, erhält man durch lineare Regression einen Umrechnungsfaktor von $0.00096 \pm 0.00003 \text{ nGyh}^{-1}\text{s}$ (siehe Abbildung 5.3).

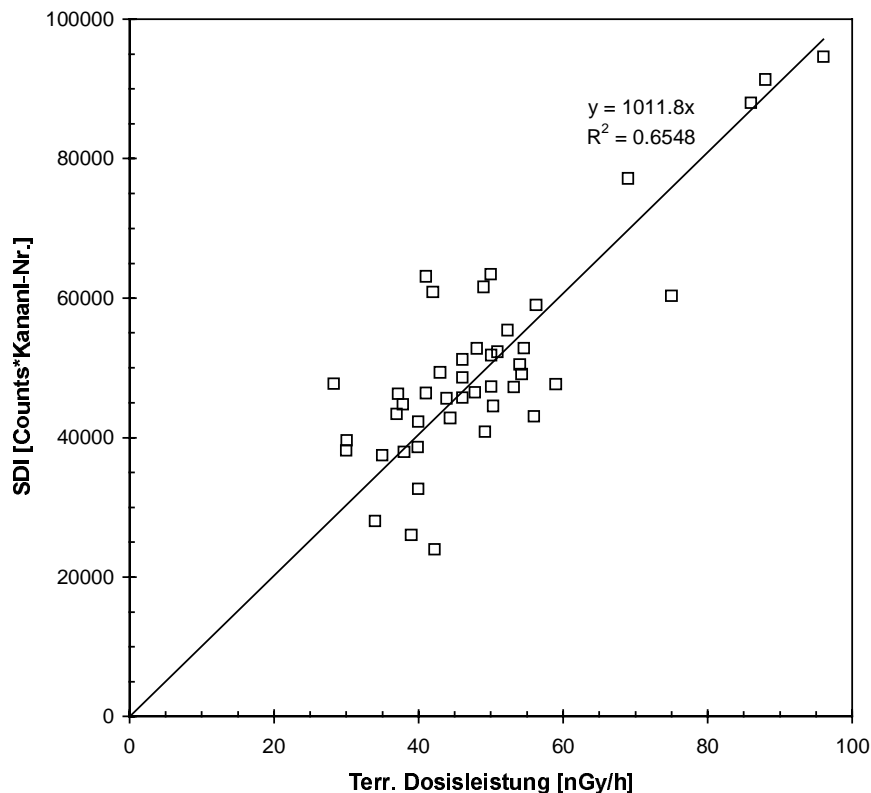


Abbildung 5.3: Kalibration der SDI Methode mit Hilfe von Bodenmessungen. Die terrestrische Dosisleistung wurde aus der Differenz der totalen Dosisleistung (RSS Messungen; MADUK-Werte) und der kosmischen Dosisleistung (aus den Resultaten der insitu Gammaspektrometrie oder mit Hilfe der Höhe berechnet) bestimmt.

Neben der terrestrischen Dosisleistung wird auch der kosmische Anteil für die Bestimmung der Ortsdosisleistung benötigt. Wie oben erwähnt, kann die kosmische Dosisleistung über die Höhe (Formel 5.16) oder über die kosmische Zählrate (Formel 5.17) berechnet werden. Da die Formel 5.16 von der magnetischen Breite abhängig ist, müsste die Formel 5.17 bevorzugt

werden. Dazu muss der Umrechnungsfaktor β bestimmt werden. Falls die kosmischen Zählraten die selbe Höhenabhängigkeit wie die Dosisleistung in Formel 5.16 aufweisen, lässt sich β direkt daraus ableiten. Deshalb soll in einem ersten Schritt die Höhenabhängigkeit der kosmischen Zählrate untersucht werden.

Die Zählraten N im kosmischen Fenster streuen stark. Dies ist hauptsächlich auf die statistischen Schwankungen zurückzuführen, die sich im Bereich von $\pm N^{1/2}$ bewegen. Ziemlich sicher beeinflussen auch andere Effekte wie ungenaue Messungen der Höhen (Barometer, GPS) oder Schwankungen im kosmischen Strahlungsfeld die Höhenabhängigkeit der kosmischen Zählraten. Die Unterschiede zum Mittelwert liegen maximal bei rund 50 %. Um für eine exponentielle Regression eine weniger grosse Datenwolke zu bekommen, wurden die Datenpunkte in Klassen mit einer Breite von 50 m eingeteilt. Für jede Klasse wurde dann der Mittelwert und das 95 % Vertrauensintervall (2σ) berechnet. Die Mittelwerte wurden dann gegen die Höhe aufgetragen (Abbildung 5.4). Anschliessend wurde eine exponentielle Regression durchgeführt. Der Exponent von $0.393 \pm 0.004 \text{ km}^{-1}$ in Abbildung 5.4 stimmt sehr gut mit dem entsprechenden Exponenten in der Formel 5.16 von 0.38 km^{-1} überein. Dies lässt den Schluss zu, dass eine direkte lineare Beziehung zwischen der Zählrate im kosmischen Fenster und der kosmischen Dosisleistung besteht. Wenn man diese beiden Werte gegeneinander aufträgt und die Regressionsgerade durch den Nullpunkt zwingt, erhält man den Umrechnungsfaktor $\beta = 0.65 \pm 0.003$ aus Formel 5.17.

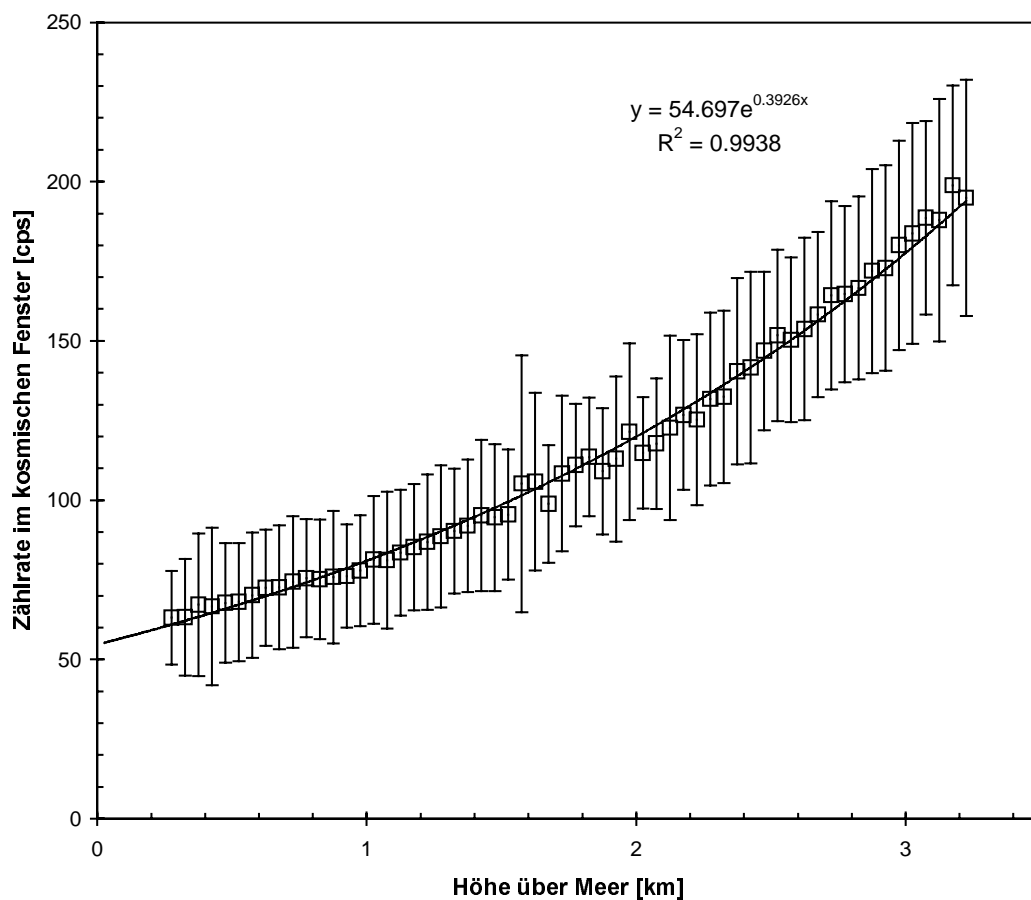


Abbildung 5.4: Höhenabhängigkeit der kosmischen Zählrate. Für die Mittelwerte der kosmischen Zählraten in den Klassen gemäss Text sind die jeweiligen 95 % Vertrauensintervalle eingezeichnet.

Somit lässt sich mit Hilfe der Formel 5.17 für jede Zählrate im kosmischen Fenster die damit verbundene Dosisleistung berechnen. Aufgrund der statistischen Schwankungen und Unsicherheiten der Zählraten wird auch die daraus berechnete kosmische Dosisleistung in gleichem Masse innerhalb eines Wertebereiches schwanken. Der Wertebereich ist dabei direkt proportional zur Unsicherheit in der Zählrate.

Aufgrund dieser doch grossen Schwankungen in der kosmischen Zählrate (Sekundenwerte), die dann ebenfalls zu grossen Unterschieden in der berechneten Dosisleistung führen, wird auf die Verwendung der kosmischen Zählrate zur Berechnung der kosmischen Dosisleistung verzichtet. Statt dessen wird der kosmische Anteil an der Dosisleistung mit Hilfe der Höhe über Meer und der Formel 5.16 bestimmt.

Nun stehen alle Parameter für die Berechnung der Ortsdosisleistung mit der angepassten SDI Methode zur Verfügung. Sie sind nochmals in der Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Schweizer Parameter für die Berechnung der Ortsdosisleistung mit der angepassten SDI Methode ab 240 keV für den Super Puma Helikopter.

Parameter	Grösse
SDI_{Back}	$12'640 \text{ s}^{-1}$
f_{Cosmic}	96
μ_{air}	$0.0056 \pm 0.0002 \text{ m}^{-1}$
Referenzhöhe	100 m
α	$0.00096 \pm 0.00003 \text{ nGyh}^{-1}\text{s}$

5.2.5 Ergebnisse

Wie aus der Abbildung 5.3 ersichtlich wird, ist der Konversionsfaktor α innerhalb einer terrestrischen Dosisleistung von 0 bis 100 nGy/h sehr gut definiert. Dies bedeutet, dass auch die Ortsdosisleistungen, welche die SDI-Methode liefert, eine gute Qualität aufweisen. Um zu sehen, wie die Resultate der angepassten SDI Methode mit den Ergebnissen der bisher eingesetzten Methoden übereinstimmen, wurden die Dosisleistungen aus Methode A (totale Zählrate) und B (Nuklidaktivitäten) mit denjenigen aus der angepassten SDI Methode im Gebiet der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt sowie der Forschungseinrichtungen am PSI verglichen (Abbildung 5.5). Die Übereinstimmung für die Methode B ist sehr gut. Die Steigung einer linearen Regression weicht dabei nur leicht von derjenigen der 45° Geraden ab. Der Unterschied beträgt rund 8 %. Der Offset vom Nullpunkt ist mit -1.75 sehr gering. Mit steigender Dosisleistung wächst auch die Differenz zwischen den beiden Methoden.

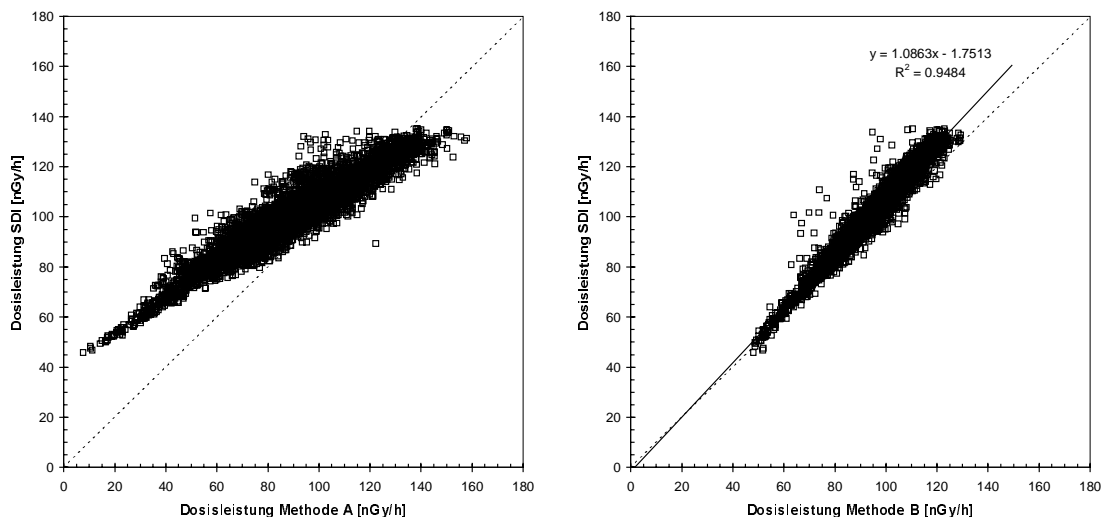


Abbildung 5.5: Vergleich der Dosisleistungen aus Methode A (links) und B (rechts) mit derjenigen aus der angepassten SDI Methode im Messgebiet KKB/KKL/PSI.

Ein grösserer Unterschied liegt bei der Methode A vor. Deutlich ist zu erkennen, dass die Dosisleistungen mit der Methode A ziemlich unterschätzt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der kosmische Anteil an der Dosisleistung in der Methode A zu wenig berücksichtigt wird. Dies führt vor allem über Wasserflächen und auch Wald zu einer Unterschätzung der Dosisleistung.

5.2.6 Fazit

Mit der SDI-Methode hat man ein Verfahren zur Dosisleistungsbestimmung, das eben so gute Resultate liefert wie die Methode B. Sie ist jedoch bedeutend einfacher anzuwenden und ist auch robuster, da praktisch der Inhalt des ganzen Spektrums verwendet wird. Im Vergleich zur Faustformel A kann mit der SDI-Methode bei vergleichbarem Rechenaufwand eine erhebliche Genauigkeitssteigerung erreicht werden. Die SDI-Methode ist deshalb das Verfahren für die Dosisleistungsbestimmung, das in Zukunft eingesetzt werden soll.

Die Grenzen der SDI-Methode zeigen sich bei der Problematik mit der Strahlung von Aktivierungsprodukten, insbesondere von ^{16}N . Da diese hauptsächlich im kosmischen Fenster einstrahlt und somit sehr hohe kosmische Zählraten verursacht, erhält der angepasste SDI eine zu starke Korrektur für die kosmische Strahlung. Dies führt dazu, dass die Dosisleistung im Bereich solcher Strahlung mit der angepassten SDI Methode generell unterschätzt wird. Dies ist jedoch auch für die Methode B zutreffend, weil auch dort eine zu grosse kosmische Korrektur zu unterschätzten Aktivitäten und somit zu tiefen Dosisleistungen führt. Dieser Effekt durch die Aktivierungsstrahlung kann dadurch verhindert werden, dass anstelle der gemessenen kosmischen Zählrate die berechnete kosmische Zählrate verwendet wird. Für die Berechnung der kosmischen Zählrate wird dabei die Formel aus der Abbildung 5.4 eingesetzt.

Die Methode A ist nur als grobe Schätzmethode zu betrachten. Ihre Resultate dürfen nicht als tatsächliche Ortsdosisleistungen genommen werden. Es ist zu berücksichtigen, dass sie nur in flachem Gelände mit konstanter Flughöhe angewandt werden darf. Dort kann sie trotzdem erste Hinweise auf erhöhte Strahlung liefern.

Die Methode B ist relativ aufwendig, müssen doch zuerst die Aktivitäten der vier Radionuklide ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl und ^{137}Cs bestimmt werden. Anschliessend müssen die Anteile der vier Radionuklide an die Dosisleistung und die kosmische Dosisleistung berechnet werden.

Da bei der Methode B nur die vier oben genannten Radionuklide berücksichtigt werden, ist sie in Verstrahlungssituationen, in der andere Nuklide vorkommen, nicht zuverlässig. Die angepasste SDI Methode liefert hingegen auch dann zuverlässige Resultate, da sie das ganze Spektrum in die Berechnung der Dosisleistung miteinbezieht. Die angepasste SDI Methode ist deshalb den anderen Methoden vorzuziehen.

5.3 Höhenkorrektur mit DHM und Barometerhöhe

5.3.1 Ausgangslage

Wie sich bei den Messflügen in den letzten Jahren gezeigt hat, erhält man in Tälern zu hohe Werte und über Wald zu tiefe Werte. Zwar ist in den Tälern das Niveau der Radioaktivität durch Anreicherung von Schwermineralien erhöht, aber oft sind auch die Radarhöhen sehr gross. Beim Wald liegt zwar eine Abschwächung durch Bäume und organisches Material vor, aber bei Cäsium würde man aufgrund der kleineren Migration in den Boden (im Vergleich zu Wiesen) leicht erhöhte Werte erwarten.

Eine Ursache für diese Effekte könnte die gemessene Radarhöhe darstellen. Denn diese stimmt nicht immer mit der effektiven Flughöhe über Grund überein. Zwei Gründe sind hauptsächlich für diesen Fehler verantwortlich: Einerseits wird das Radarsignal nicht nur vom Boden, sondern auch von Vegetation reflektiert. Über offenem Land stellt dies aufgrund der geringen Höhe des Bewuchses kein Problem dar. Über Wald jedoch kann dies zu falschen Flughöhen führen, da das Radarsignal von den Baumkronen zurückgeworfen wird. Der Fehler in der Flughöhe kann so je nach Baumgrössen 20 m und mehr betragen. Eine solche unterschätzte Flughöhe pflanzt sich dann hauptsächlich in der Höhenkorrektur fort.

Andererseits ist der Reflektionspunkt des Radarsignals von der Lage des Helikopters im Raum abhängig. Bei flachem Untergrund liegen die Radarhöhen im allgemeinen recht nahe bei den wahren Höhen. Bei geneigtem Untergrund wird die Radarhöhe generell überschätzt (Abbildung 5.6). Sobald die Topographie stärker wird, ist deshalb mit grösseren Fehlern zu rechnen. Denn durch die grössere Flugdynamik variiert auch der Lagewinkel stärker. Zusätzlich sind die Fehler auch direkt vom Neigungswinkel des Hanges abhängig. Je steiler der Hang, desto grösser kann der Fehler werden.

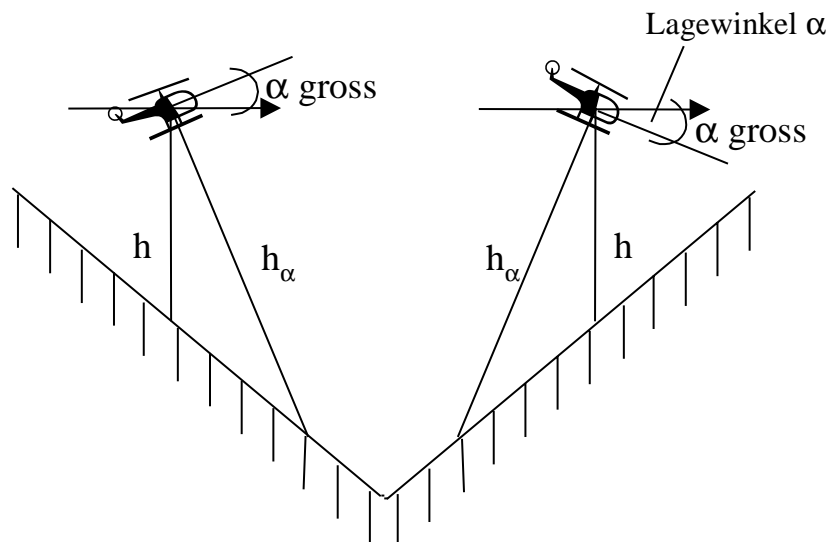


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der Veränderung in der Radarhöhe bei Änderung des Lagewinkels.

5.3.2 Zielsetzung

Da die Radarhöhe wie gesehen über Wald eine scheinbar zu niedrige Höhe und bei Topographie eine zu grosse Höhe angibt, soll auf sie verzichtet werden. Bei der Höhenkorrektur wird jedoch die Höhe über Grund benötigt. Deshalb muss eine andere Möglichkeit gesucht werden, um die Höhe über Grund zu bestimmen. Falls die genaue Position des Messsystems im dreidimensionalen Raum bekannt ist und ein digitales Geländemodell vorliegt, lässt sich daraus die Höhe über Grund bestimmen. Dabei wird die Differenz zwischen der Z-Koordinate der Helikopterposition und der Höhe des digitalen Geländemodells am entsprechenden Punkt verwendet.

5.3.3 Positionsbestimmung

Bei der Bestimmung der Höhe über Grund ohne Radarhöhe ist eine genaue Bestimmung der Helikopterposition entscheidend. Am stärksten ins Gewicht fällt dabei die Genauigkeit der Z-Koordinate. Um den Einfluss des Waldes auf die Radarhöhe nachweisen zu können, muss die Höhe eine Genauigkeit unter ± 10 m aufweisen. Für die absolute Höhe des Helikopters bieten sich zwei Möglichkeiten. Entweder man verwendet die GPS-Höhe oder die Barometerhöhe. Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, schwanken die vom GPS gelieferten Höhen im Bereich von ± 10 m. Die Barometerhöhe kann jedoch bei guter Kalibration Genauigkeiten im Meterbereich liefern. Deshalb ist die Barometerhöhe der GPS-Höhe vorzuziehen. Dies setzt jedoch eine genaue Kalibration der Barometerhöhe voraus. Die Kalibration der Barometerhöhe ist somit auch entscheidend für den Erfolg einer vom Radar unabhängigen Höhenkorrektur.

Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten für eine Kalibration der Barometerhöhe. Da am Anfang und Ende eines Fluges eine Messreihe am Boden aufgezeichnet wird, haben wir jeweils zwei Punkte, deren Höhe ziemlich exakt bekannt ist. Daraus lässt sich mit einer einfachen linearen Interpolation unter Annahme einer isothermen Atmosphäre die absolute Höhe h aller Messpunkte ableiten (Formel 5.18).

$$h(t) = h_0 + B(t) - B_0(t) \quad (5.18)$$

wobei $h(t)$ die absolute Höhe zum Zeitpunkt t , h_0 die Höhe am Punkt 0, $B(t)$ die Barometerhöhe zum Zeitpunkt t und $B_0(t)$ die Barometerhöhe am Referenzpunkt zum Zeitpunkt t darstellt.

$$B_0(t) = B_0(t_A) + \frac{B_0(t_E) - B_0(t_A)}{t_E - t_A} \cdot t \quad (5.19)$$

wobei $B_0(t)$ die Barometerhöhe am Referenzpunkt zum Zeitpunkt t , $B_0(t_A)$ die Barometerhöhe am Referenzpunkt zum Zeitpunkt t_A (Anfang) und $B_0(t_E)$ die Barometerhöhe zum Zeitpunkt t_E (Ende) darstellt.

Da die Dauer eines Messfluges höchstens dreieinhalb Stunden beträgt, ist nicht mit sehr starken atmosphärischen Druckschwankungen zu rechnen. Sicherlich darf vereinfachend eine lineare Entwicklung angenommen werden. Die Formel 5.18 beschreibt die Kalibration der Barometerhöhe für einen Punkt 0. Es ist aber durchaus möglich, die Kalibration mit Messreihen an zwei verschiedenen Punkten durchzuführen. $B_0(t_E)$ und $B_0(t_A)$ sind dann durch $B_1(t_E)-h_1$ bzw. $B_2(t_A)-h_2$ zu ersetzen, wobei die Suffixe 1 und 2 für die Punkte 1 und 2 stehen.

Wenn man die Temperaturabhängigkeit des Luftdruckes ebenfalls berücksichtigt, erhält man eine etwas kompliziertere Gleichung (Formel 5.20). Mit dieser lässt sich die Höhe aus dem barometrischen Druck mit Metergenauigkeit berechnen. Zu berücksichtigen ist, dass sowohl B_0 als auch T_0 von der Zeit nach Formel 5.19 bzw. 5.21 abhängig sind. Diese Zeitabhängigkeit kann unter der Annahme, dass sich die grossräumige Luftdrucklage während eines Fluges nicht wesentlich ändert, vernachlässigt werden. Damit wird die zeitabhängige Barometerhöhe in Formel 5.18 durch die Barometerhöhe am Referenzpunkt zum Messbeginn als Konstante ersetzt. Das selbe gilt dann auch in Formel 5.20 für die Temperatur T_0 .

$$h = h_0 + (B - B_0) \cdot \left(1 + \frac{((T_0 + T)/2) - 15 + 0.0065 \cdot ((B_0 + B)/2)}{273}\right) \quad (5.20)$$

wobei h die Höhe des Helikopters am Messpunkt, h_0 die Höhe am Referenzpunkt, B die barometrische Höhe am Messpunkt, B_0 die barometrische Höhe am Referenzpunkt, T die Temperatur am Messpunkt und T_0 die Temperatur am Referenzpunkt darstellen.

$$T_0(t) = T_0(t_A) + \frac{T_0(t_E) - T_0(t_A)}{t_E - t_A} \cdot t \quad (5.21)$$

wobei $T_0(t)$ die Temperatur am Referenzpunkt zum Zeitpunkt t , $T_0(t_A)$ die Temperatur am Referenzpunkt zum Zeitpunkt t_A (Anfang) und $T_0(t_E)$ die Temperatur zum Zeitpunkt t_E (Ende) darstellt.

Eine andere Möglichkeit die Barometerhöhe zu kalibrieren, liegt im Vergleich mit der GPS-Höhe. Denn die Fehler in den beiden Höhenbestimmungen sind von unterschiedlicher Art. Während die GPS-Höhen Schwankungen um die tatsächliche Höhe aufweisen (bei ausgeschalteter Selective Availability), zeigen die Barometerhöhen eher langweilige, systematische Unterschiede. Bei Messungen am selben Ort nähert sich der Mittelwert der GPS-Höhen immer mehr dem tatsächlichen Wert an. Die Barometerhöhen ändern sich hingegen abhängig von der atmosphärischen Druckverteilung. Geht man nun davon aus, dass sich die atmosphärische Druckverteilung nur sehr langsam verändert, unterscheidet sich die Barometerhöhe nur in einem Offset von der tatsächlichen Höhe. Dieser Offset lässt sich dann aus dem Mittelwert der Differenzen zwischen Barometer- und GPS-Höhe berechnen (Formel 5.22). Es gilt jedoch, noch die Höhendifferenz zwischen dem Messpunkt der Barometerhöhe (Passagierkabine) und demjenigen der GPS-Höhe (Spitze des Pilon) zu berücksichtigen. Sie beträgt rund 2 m und ist von der GPS-Höhe abzuziehen.

$$h(t) = B(t) + \frac{\sum (B_n - h_n^{GPS})}{n} \quad (5.22)$$

wobei n die Anzahl Messungen, $B(t)$ die unkorrigierte Barometerhöhe zur Zeit t , B_n die Barometerhöhe n und h_n^{GPS} die GPS-Höhen darstellen.

Grundsätzlich sollten für ein zuverlässiges Resultat möglichst viele Messpunkte verwendet werden. Wie sich zeigte, gibt es jedoch kurzweilige Schwankungen in den Barometerhöhen. Da der Druck zur Bestimmung der Barometerhöhe in der Passagierkabine des Helikopters gemessen wird, haben künstliche Druckschwankungen in der Kabine einen direkten Einfluss auf die Barometerhöhe. So zeigte sich zum Beispiel bei Messungen am Boden, dass bereits das Öffnen bzw. Schliessen der Türe am Helikopter Schwankungen in der Barometerhöhe von mehr als 10 m verursachen kann. Dies ist nicht weiter erstaunlich, bewirkt doch eine Änderung des Druckes um 1 mbar eine Änderung in der berechneten Barometerhöhe von rund 9 m. Ein anderer Effekt ist beim Steigen und Sinken des Helikopters zu erwarten, da die Kabine geschlossen ist und somit ein verzögerter Druckausgleich mit der Atmosphäre stattfindet. Beim Steigen wird somit die Barometerhöhe unterschätzt und beim Sinken überschätzt.

Um die optimale Anzahl n von Punkten zu eruiieren, die für eine gute Korrektur mit der Formel 5.22 nötig ist, wurden Tests mit $n = \{15, 30, 60, 120, 240, 480, 960, 1'920\}$ durchgeführt. Dabei wurde die gemessene Radarhöhe über Wiesen mit der aus korrigierter Barometerhöhe und DHM25 berechneten Höhe über Grund verglichen. Bei optimaler Korrektur und keinem systematischen Fehler in der Radarhöhe sollte die Differenz zwischen diesen beiden Höhen Null sein. Mit einer mittleren Abweichung von 1.15 m wiesen diejenigen Daten die geringste Abweichung auf, die mit $n = 15$ bzw. $n = 30$ berechnet wurden. Mit steigender Anzahl n stieg auch die mittlere Abweichung (bei $n = 1920$ 1.99 m). Die Standardabweichungen für die verschiedenen Datensätze bewegen sich zwischen 5.30 m ($n = 15$) und 5.47 m ($n = 1920$). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde $n = 15$ gewählt. Damit können, im Gegensatz zu einer direkten Verwendung der GPS-Höhen, die grössten Ungenauigkeiten doch noch etwas abgeschwächt werden.

Vergleicht man die gemessene Radarhöhe mit der Höhe über Grund, die mit Hilfe einer nach Formel 5.18 korrigierten Barometerhöhe und DHM25 bestimmt wird, erhält man für Messpunkte über Wiesen eine mittlere Differenz von -7.6 m. Macht man das selbe unter Verwendung der GPS-Korrekturmethode ergibt sich eine mittlere Differenz von 0.8 m. Somit erweist sich die GPS-Korrekturmethode als wesentlich besser. Deshalb wird diese Methode für die genaue Positionsbestimmung verwendet werden. Sie birgt auch den Vorteil, dass sie nicht auf eine Bodenlinie angewiesen ist. Somit lässt sie sich ohne weiteres auch in einer online Auswertung einbauen.

5.3.4 Realisation der Auswerteroutinen

Als Geländemodell werden auf dem Markt verschiedene Datensätze angeboten. Unter anderen besitzt auch das Bundesamt für Landestopographie solche Modelle, die sich in Auflösung und Genauigkeit unterscheiden. Das ältere Geländemodell „RIMINI“ besteht aus einem Gitternetz mit einer Maschenweite von 250 m. Es ist eher grob und weist deshalb zum Teil auch sehr grosse Fehler auf. So beträgt die mittlere Abweichung über 17 m. Im Gegensatz dazu ist das neuere Modell DHM25 einiges genauer. Es wurde aus dem Informationsgehalt der Karten 1:25'000 abgeleitet. Das Matrixmodell weist eine Maschenweite von 25 m auf. Im Mittelland liegen die Abweichungen vom wahren Höhenwert im allgemeinen zwischen 1-2 m, im Jura zwischen 2-4 m, in den Voralpen zwischen 3-5 m und in den Alpen zwischen 6-8 m. Doch auch im DHM25 gibt es Punkte in sehr steilem Gelände, wo die Abweichung bis 90 m betragen kann. Für die oben angeführte Zielsetzung kommt nur das DHM25 in Frage, da das RIMINI Modell eine zu grosse Rasterweite und zu grosse Ungenauigkeiten aufweist.

Da anstelle der Radarhöhen nun die Differenz zwischen Terrainmodell DHM25 und Barometerhöhe verwendet wird, müssen die entsprechenden Auswerteroutinen der Höhen- bzw. Topographiekorrektur softwaremässig angepasst werden. Die Hauptänderung besteht darin, dass für jeden Messpunkt die entsprechende Höhe aus dem DHM25 gelesen werden muss. Bei einer 3D-Topographiekorrektur müssen pro Messpunkt alle für die Korrektur relevanten Höhen aus dem Geländemodell verwendet werden. Die entsprechenden Routinen sollten möglichst wenig Rechenleistung benötigen, um diese Auswertemethode auch online während den Messungen einsetzen zu können.

Das Terrainmodell DHM25 ist analog zur Landeskarte 1:25'000 aufgebaut. So besteht pro Kartenblatt ein Datenfile mit den dazugehörenden Höhendaten. Einige Gebiete in den Grenzregionen der Schweiz wurden mit Hilfe der Landeskarte 1:50'000 noch ergänzt. Für die ganze Schweiz bestehen deshalb gegen 280 Datenfiles, die je nach Datenformat eine Grösse von 2-10 MByte aufweisen. Daraus wird ersichtlich, dass das Terrainmodell DHM25 eine riesige Datenmenge von mindestens 500 MByte darstellt. Deshalb ist das Laden aller Höhendaten in den Arbeitsspeicher eines Rechners unmöglich, da einerseits ein riesiger Arbeitsspeicher und andererseits für das Einlesen viel Zeit benötigt würde. Auch das Einlesen eines ganzen Kartenblattes in den Arbeitsspeicher ist nicht optimal, da dann bei einer online Auswertung während des Fluges bei einem Kartenwechsel alle Daten der neuen Karte zuerst gelesen werden müssten. Deshalb sollen nur die jeweils benötigten Daten direkt vom entsprechenden Datenfile gelesen werden. Um einen möglichst schnellen Datenzugriff zu erreichen, werden die Geländedaten in binärem Format abgespeichert. Die einzelnen Höhenwerte werden entsprechend ihrer Position im Maschennetz in ein File geschrieben. So lässt sich die Position im File leicht aus der X- und Y-Koordinate des Messpunktes, der Maschenweite und einer Ecke des Kartenblattes berechnen.

Um auch das richtige Datenfile einfach ansteuern zu können, werden die Namen der binären Datenfiles aus dem Kürzel „DHM25_“ und einer Nummer zusammengesetzt. Die Nummer entspricht nicht dem Kartenblatt, sondern der Position in einem Grid, das die ganze Schweiz abdeckt. Die Maschenweiten dieses Grids stimmen mit den Grössen der Kartenblätter überein, d.h. in X- und Y-Richtung liegen unterschiedliche Maschenweiten vor (Abbildung 5.7). Diese

Namengebung erlaubt, den gesuchten Filenamen aus der Position des Messpunktes herzuleiten. Existiert das File nicht, sind für diesen Messpunkt keine Daten im DHM25 vorhanden.

397																					
375																					
353																					
331																					
309																					
287	288	289	290																		
265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286
243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264
221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242
199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220
177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198
155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176
133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88
45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22

 Erweiterter Modellperimeter mit Ausland-Anteil

Abbildung 5.7: Grid der einzelnen Datenfileinhalte mit der entsprechenden Nummerierung für die Filenamen. In grau sind die Teile des Grids markiert, für die im DHM25 Daten vorliegen.

5.3.5 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurde aus den Messdaten des Gebietes um die Kernkraftwerke Leibstadt und Beznau sowie das Paul Scherrer Institut ein Geländemodell aus korrigierter Barometerhöhe und Radarhöhe erstellt. Ebenfalls wurde für jeden Messpunkt die Höhe aus dem DHM25 herausgelesen und ein Geländemodell mit denselben Maschenweiten (125 m) wie das erste generiert. Anschliessend wurde die Differenz zwischen den beiden Geländemodellen berechnet (Abbildung 5.8). Ein grosser Teil des Messgebietes weist Differenzen innerhalb von ± 5 m auf. Jedoch gibt es auch klar umrissene Gebiete, die deutlich höhere Differenzen bis über 40 m aufweisen. An zwei Orten sind aber auch negative Differenzen von mehr als -15 m zu erkennen. Der südlichere der beiden Orte ist identisch mit dem Standort (Schweizerische Landeskoordinaten 656'800, 265'000) eines grossen Steinbruchs der Zementindustrie. Der andere liegt genau über einer steilen Felswand.

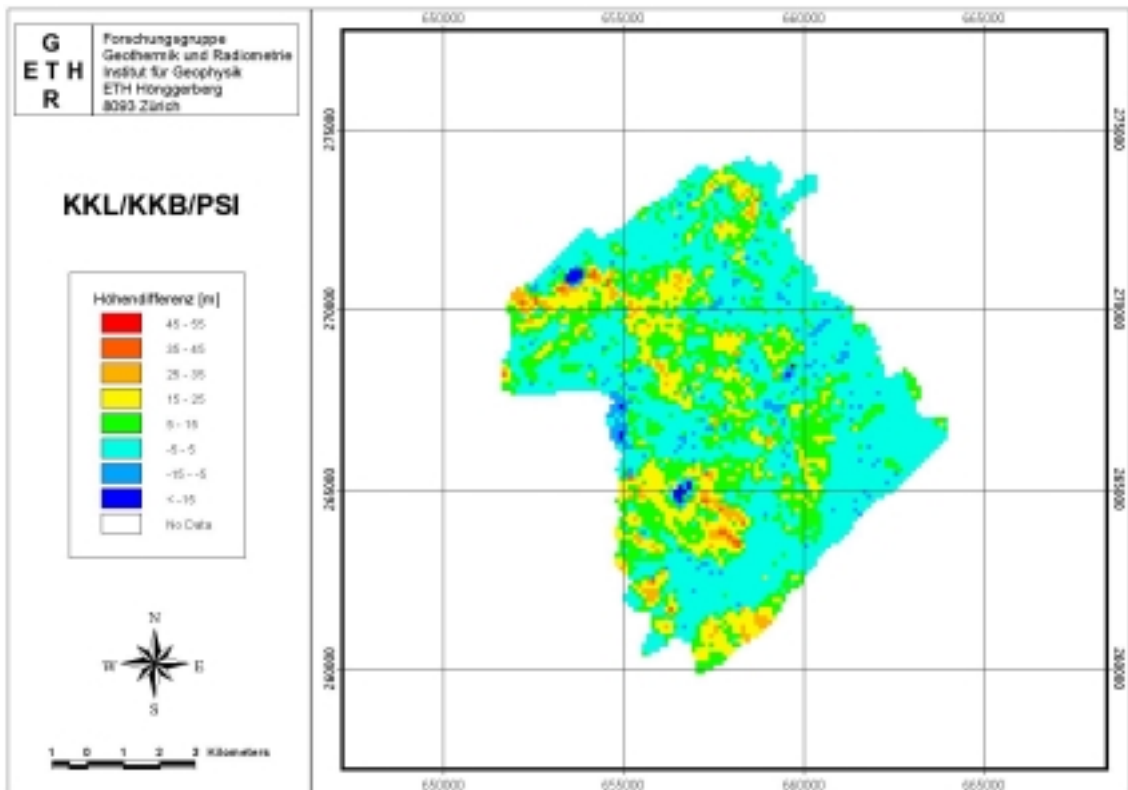


Abbildung 5.8: Karte im Messgebiet der Kernkraftwerke Leibstadt und Beznau sowie des Paul Scherrer Instituts. Die Werte entsprechen den Höhendifferenzen in Metern zwischen Geländemodell (aus Barometer- und Radarhöhe) und DHM25.

Überlagert man nun der Differenzenkarte aus Abbildung 5.8 die Waldflächen aus der Pixelkarte 1:25'000 des Bundesamtes für Landestopographie, werden alle Gebiete mit Differenzen grösser als 5 m abgedeckt (Abbildung 5.9). Dies lässt darauf schliessen, dass das Radarsignal über Wald von den Baumkronen reflektiert wird und somit nicht die Distanz zum Untergrund zurückgibt. Die Ergebnisse über Wald werden deshalb aufgrund des „falschen“ Radarsignals zusätzlich zur Abschwächung durch die Vegetation in der Auswertung unterschätzt. Berechnet man die theoretische Abweichung durch ein falsches Radarsignal bei einer Baumhöhe von 20 m im Wald, erhält man für ⁴⁰K eine Differenz von rund 20 %.

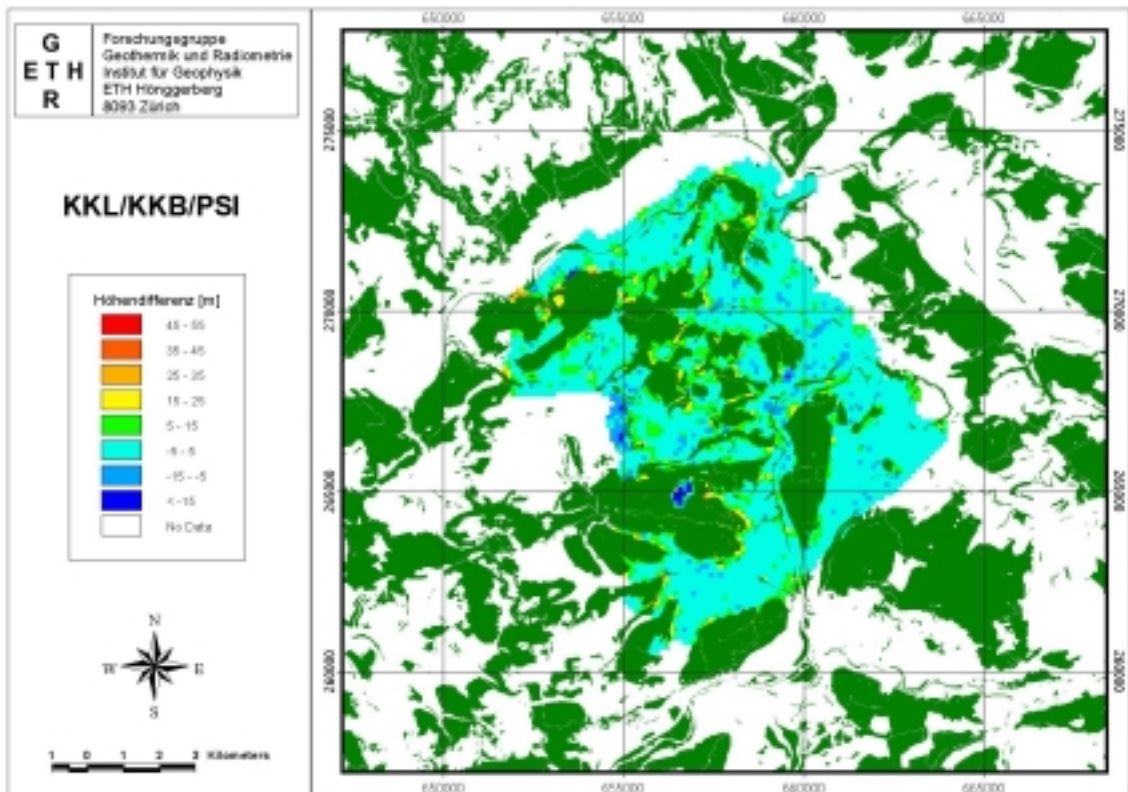


Abbildung 5.9: Karte im Messgebiet der Kernkraftwerke Leibstadt und Beznau sowie des Paul Scherrer Instituts. Die Werte entsprechen den Höhendifferenzen in Metern zwischen Geländemodell (aus Barometer- und Radarhöhe) und DHM25. Überlagert sind dunkelgrün die Waldflächen (Kartendaten: PK25 © 1998 Bundesamt für Landestopographie, DV1172).

Mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS; siehe auch Kapitel 6) lassen sich die Messpunkte über Wald und über Wiesen einfach trennen. Damit lassen sich die Verteilungen der Differenzen zwischen Geländemodell aus Barometer- und Radarhöhe und DHM25 über Wald und Wiesen herleiten (Abbildung 5.10). Die Verteilungen dieser Differenzen zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Messpunkten über Wiese und denen über Wald. Damit ist der Einfluss des Waldes auf die Radarhöhe eindeutig bewiesen.

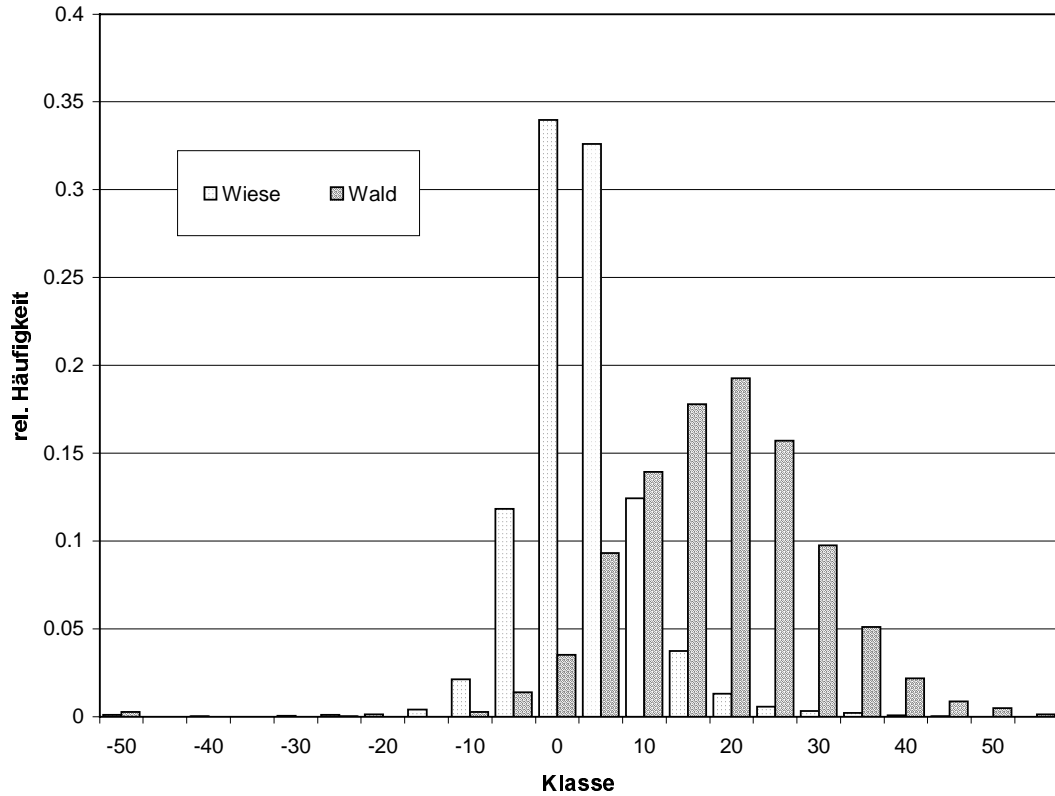


Abbildung 5.10: Verteilung der Differenzen zwischen Geländemodell aus Barometer- und Radarhöhe und DHM25 über Wiesen und Wäldern.

Da nun feststeht, dass die Radarhöhen über Wäldern falsch sind, ist es interessant zu sehen, wie sich dies auf die Resultate der aeroradiometrischen Messungen auswirkt. Zu diesem Zweck werden die Daten des selben Messgebietes einmal mit den gemessenen Radarhöhen und einmal mit den aus korrigierten Barometerhöhen und DHM25 bestimmten Höhen über Grund ausgewertet. In Abbildung 5.11 sind die prozentualen Unterschiede zwischen den beiden Ergebnissen als Karte dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die grössten Unterschiede wie zu erwarten im Bereich des Waldes vorliegen (siehe auch Abbildung 5.9). Durch die falschen Radarhöhen werden die ^{40}K Aktivitäten bis gegen 30 % unterschätzt.

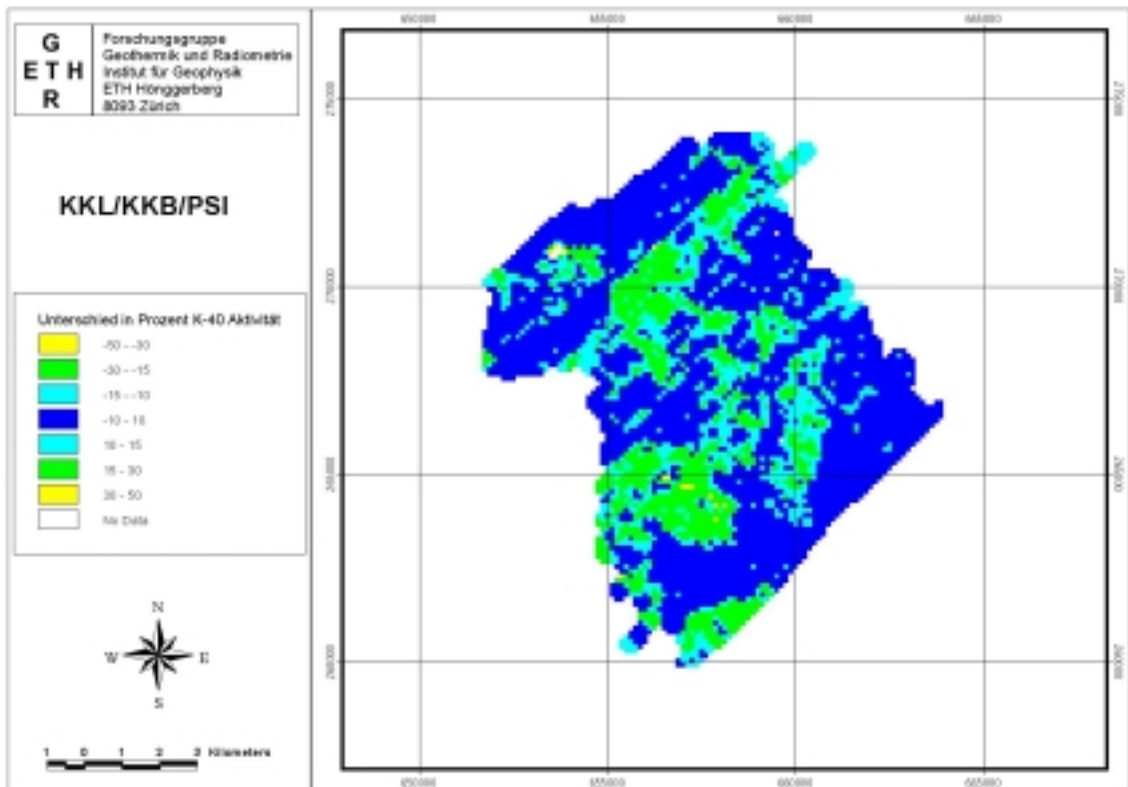


Abbildung 5.11: Prozentuale Unterschiede in der ^{40}K Aktivität, die einmal mit der Radarhöhe und einmal mit der Pseudohöhe (aus korrigierter Barometerhöhe und DHM25) bestimmt wurde.

5.3.6 Fazit

Die Vermutungen, dass die Radarhöhen über Wald falsch sind, konnten bestätigt und bewiesen werden. Diese fehlerhaften Radarhöhen führen zu zusätzlichen Fehlern in der Datenauswertung. Dies kann mit der Höhenkorrektur ohne Radarhöhe vermieden werden. Dies führt im Mittelland zu einer Verbesserung der Ergebnisse über Waldgebieten von rund 20 % für ^{40}K .

Neben dem Einfluss des Waldes verändert auch der Lagewinkel des Helikopters die Radarhöhen. Auch dieser Einfluss lässt sich mit dem Ersatz der Radarhöhe durch die Differenz von korrigierter Barometerhöhe und DHM25 korrigieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Genauigkeiten der vom GPS gelieferten Positionen und der korrigierten Barometerhöhe genügen, um eine Höhenkorrektur ohne Radar durchzuführen.

Bisher waren für die Korrektur der Barometerhöhen Messungen am Boden (Bodenlinien) mit bekannter Höhe über Meer nötig. Mit der in Kapitel 5.3.4 vorgestellten Offset-Methode, die mit Hilfe der GPS-Höhe eine Korrektur der Barometerhöhe erlaubt, müssen für eine Korrektur keine Bodenlinien mehr zwingend gemessen werden. Dies vereinfacht den Einsatz einer Höhenkorrektur mit Barometerhöhe und DHM25 anstelle der Radarhöhe in der Weise, dass sie auch einfach in einer online Auswertung eingebaut werden kann.

6 Geographische Informationssysteme (GIS) in der Aeroradiometrie

Geographische Informationssysteme (GIS) sind Computersysteme, die die Erfassung, Darstellung, Bearbeitung und Analyse von raumbezogenen Daten und deren Ausgabe auf einem Bildschirm oder Drucker ermöglichen. Ein GIS besteht aus den Komponenten Hardware, Software und Daten. Durch den Einbezug von Modellen und durch die Verknüpfung bestehender Daten lassen sich dabei auch neue Informationen ableiten. Im folgenden werden nun die Möglichkeiten eines GIS in der Aeroradiometrie näher untersucht, der Aufbau eines solchen beschrieben und einige räumliche Analysen von aeroradiometrischen Daten präsentiert.

6.1 Ausgangslage

Seit 1986 werden in der Schweiz aeroradiometrische Messungen durchgeführt. Seither ist eine Vielzahl von Messdaten angefallen. Die Daten wurden mit Hilfe eines am Institut für Geophysik der ETH Zürich entwickelten Programmes (Schwarz 1991) ausgewertet und dargestellt. Das DOS-Programm „Gamero“ wurde so konzipiert, dass die Ressourcen und Leistungen der damaligen Rechner ausreichten. Die Darstellungsmöglichkeiten waren deshalb ziemlich beschränkt. Die Messdaten und die ausgewerteten Daten wurden zusammen mit anderen digitalen Daten als Sicherheitskopien auf verschiedene CDs gebrannt. Eine systematische Archivierung der Messdaten war nicht gegeben. Ein GIS birgt nun die Möglichkeit, mit dem Aufbau einer Datenbasis auch die Datenarchivierung zu systematisieren. Im weiteren besitzt es viele Möglichkeiten verschiedenste räumliche Daten darzustellen und auszugeben. Schliesslich besitzen GIS auch Werkzeuge für die räumliche Datenanalyse. Damit ist es möglich aeroradiometrische Daten zusammen mit anderen räumlichen Daten, wie zum Beispiel der Vegetation oder Topographie, zu analysieren.

6.2 Aufbau des GIS

Der Aufbau eines GIS ist sehr aufwendig, müssen doch die verschiedensten Aspekte berücksichtigt und realisiert werden. Neben der Soft- und Hardwareevaluation und dem Aufbau einer Datenbasis zählt auch die Erarbeitung des Knowhow zu den Hauptaufwendungen. Im folgenden wird nun der Aufbau eines GIS beschrieben, das im Rahmen einer Diplomarbeit an der ETH Zürich (Bächler 1999) erstellt wurde.

6.2.1 Zielsetzungen

Die Ziele, die mit dem Aufbau eines GIS erreicht werden sollen, lassen sich grob in zwei Gruppen teilen. Die eine Gruppe enthält alle Ziele, die mit der Datenverwaltung zu tun haben, die andere alle, die sich auf die Darstellung und die räumliche Analyse der Daten beziehen.

Datenverwaltungsziele

Das Hauptziel der Datenverwaltung ist die zentrale Organisation aller relevanten Daten. Dazu gehören in unserem Fall neben den aeroradiometrischen Messdaten auch die Kalibrationsdaten sowie die Daten topographischer Karten. Die Anforderungen an die Datenverwaltung sind die folgenden:

- Strukturierte und zentrale Datenbasis aller relevanten Daten
- Keine Doppelführung der Daten
- Integration externer Daten (z.B. topographische Karten)
- Möglichkeit einer Erweiterung der Datenbasis
- Langfristige Speicherung der Daten
- Dokumentation der Daten durch Metadaten

Eine strukturierte und zentrale Datenbasis vermindert die Aufwendungen für den Unterhalt der Datenbasis. Sie ist gleichzeitig auch Voraussetzung zur Vermeidung einer Doppelführung der Daten und erleichtert ihre Archivierung und Sicherung. Um eine langfristige Speicherung der Daten zu garantieren, sollte die Datenbasis auf einem Server verwaltet und unterhalten werden. Die Speicherung auf einem Server bringt auch die Vorteile, dass rund um die Uhr von verschiedenen Rechnern aus auf die Daten zugegriffen werden kann. Da jährlich neue Daten anfallen, muss die Datenbasis laufend erweitert werden können. Um bei so vielen Daten noch die Übersicht zu behalten, muss die Datenbasis ausreichend dokumentiert werden. Mit sogenannten Metadaten werden die einzelnen Datensätze beschrieben. Der Inhalt der Metadaten soll nach dem „Content Standard for Digital Geospatial Metadata“ (Federal Geographic Data Committee 1998) gestaltet werden. Nach Möglichkeit werden die Metadaten auf dem Internet öffentlich zugänglich gemacht. Die Datenbasis soll klar strukturiert werden, wobei aber immer eine Erweiterung möglich sein sollte.

Darstellungs- und Analyseziele

In der Darstellung soll durch Kombination verschiedener Daten eine erleichterte Orientierung in den Aktivitätskarten erreicht werden. Die Erstellung und Aktualisierung von Kartenprodukten soll einfach sein. Im weiteren soll die Möglichkeit bestehen innerhalb des GIS räumliche Analysen durchzuführen. Dabei sollen aeroradiometrische Daten mit anderen räumlichen Daten wie Vegetation, Topographie, Geologie u.v.m verglichen werden. Diese zusätzlichen Daten sollen ebenfalls in der Datenbasis abgelegt werden.

6.2.2 Hard- und Softwareevaluation

Aus den obigen Zielen und Anforderungen gehen auch die Anforderungen an die Hard- und Software hervor. Die Hardware muss genügend Speicherplatz zur Verfügung stellen um die gesamte Datenbasis aufzunehmen und auch zukünftige Daten erfassen zu können. Der Speicherbedarf wird für die Aeroradiometrie in der Schweiz bei einigen Gigabytes liegen. Für eine komfortable Nutzung muss der Rechner genügend Leistung ausweisen, um grosse Mengen von Daten verarbeiten und darstellen zu können. Vorderhand wird kein Digitalisiergerät und auch kein Plotter benötigt. Da in den letzten Jahren die Leistungsfähigkeit der Personalcomputer (PC) enorm zugenommen hat, erfüllen sie heute die von einem GIS gestellten Anforderungen. Auch aus Kostengründen ist eine Lösung mit einem PC vorzuziehen, da sie ein vielfaches billiger sind als Unix-Workstations. Deshalb muss nun die GIS Software auf PCs lauffähig sein. Neben den Fähigkeiten räumliche Analysen durchführen zu können, muss eine einfache Bedienung, Import und Export von Daten, Fähigkeit zur Bearbeitung von Vektor- und Rasterdaten sowie der Export von Darstellungsprodukten als Graphiken gewährleistet sein. Neben den technischen Anforderungen ist auch hier der Preis eine mitentscheidende Frage. Aus technischer Sicht boten sich verschiedene GIS-Produkte an. Schliesslich wurden die Produkte ArcInfo und ArcView von ESRI gewählt, da die ETH Zürich eine Campuslizenz für diese Produkte besitzt und diese somit innerhalb der ETH kostenfrei erhältlich sind. Bei beiden Produkten handelt es sich um die PC-Versionen, ArcInfo 7.2 und ArcView 3.1.

6.2.3 Aufbau der Datenbasis

Nach der Wahl der Hard- und Software konnte der Aufbau der Datenbasis in Angriff genommen werden. Zuerst wurde die Struktur der Datenbasis festgelegt (Abbildung 6.1). Die Datenbasis wurde dabei nach Art der Daten aufgegliedert (Bächler 1999). Unter „Externedaten“ wurden alle Daten abgelegt, die nicht von der Aeroradiometrie stammen. Dazu gehören unter anderem alle digitalen Karten und Geländemodelle des Bundesamtes für Landestopographie sowie die statistischen Daten aus dem Geostat (Datensammlung des Bundesamtes für Statistik). Im Ordner „Kkwdaten“ werden alle aeroradiometrischen Daten der Flüge in den Gebieten der Schweizer Kernkraftwerke Beznau, Gösgen, Leibstadt und Mühleberg sowie der Forschungsanstalt Paul Scherrer Institut (PSI) abgelegt. Die „Kkwdaten“ werden zusätzlich noch nach Jahren unterteilt, um eine übersichtlichere Struktur zu erreichen. Alle aeroradiometrischen Daten von Kalibrationsflügen, zu denen vor allem die Steigflüge zählen, werden unter „Kalibrierungsdaten“ gespeichert. Die übrigen Messdaten der Aeroradiometrie, die geologische Kartierungen und Messungen von künstlicher Radioaktivität des Tschernobyl-Ereignisses zum Ziel hatten, werden unter dem Ordner „Kartierungsdaten“ abgelegt.

Neben diesen Grunddaten sind in der Datenbasis auch Teile vorgesehen, welche die bei der Analyse der Grunddaten anfallenden Daten („Analysedaten“) und deren Beschreibung („Dokumentationsdaten“) aufnehmen. Die interne Struktur dieser beiden Teile wird durch den jeweiligen Benutzer des GIS bestimmt. Im Ordner „Tools“ sind schliesslich die Programme untergebracht, die für die Konvertierung der Rohdaten sowie der Resultate aus dem Auswertungsprogramm „Gamero“ in ein GIS taugliches Format benötigt werden.

Schliesslich wird für jeden Datensatz, der in den Grunddaten abgelegt wird, eine Beschreibung im Ordner „Metadaten“ abgelegt. Diese Beschreibung gibt Auskunft über die Art des Datenfiles, die verwendete Software, den Inhalt des Datenfiles (Anzahl Punkte bzw. Ausdehnung), Thematik, das verwendete Koordinatensystem (inklusive eines Referenzpunktes), die Herkunft der Daten, Verwendungszweck und vieles andere mehr. Der mögliche Inhalt dieser Beschreibung ist in einer Dokumentation des Federal Geospatial Data Comitee (1998) festgehalten. Die daraus übernommenen Punkte sind Bächler (1999) zu entnehmen.

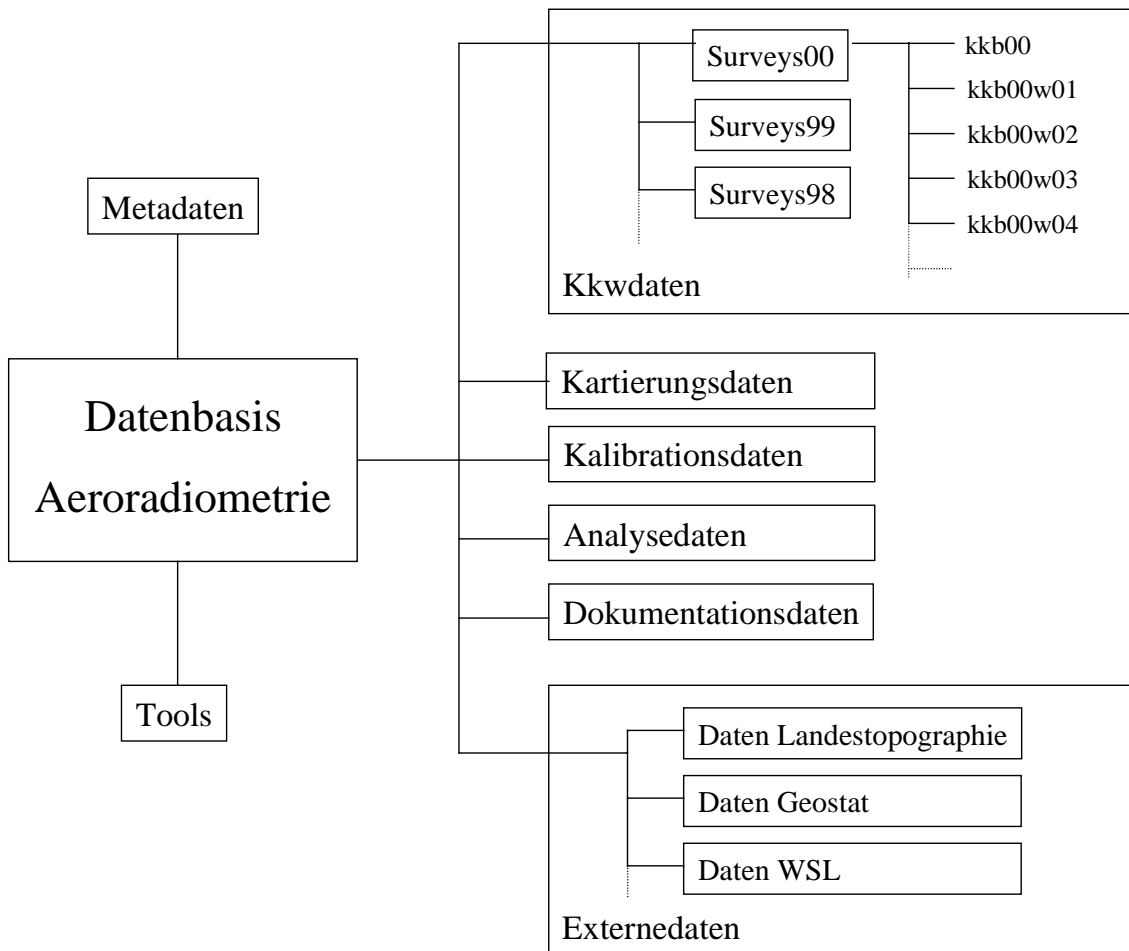


Abbildung 6.1: Skizzierte Struktur der Datenbasis Aeroradiometrie, die für das GIS verwendet wird.

Nachdem die grobe Struktur der Datenbasis festgelegt ist, stellt sich die Frage, welche Daten der verschiedenen Messflüge und Surveys relevant sind und in die Datenbasis aufgenommen werden sollen. Um eine Archivierung der Messdaten zu erreichen, sind die Rohdaten inklusive Spektren in geeigneter Form in die Datenbasis aufzunehmen. Daneben sollen auch die nach der

Auswertung erhaltenen Ergebnisse in der Datenbasis abgelegt werden, um eine schnelle und einfache Darstellung der Ergebnisse zu ermöglichen.

Grundsätzlich stehen zwei Datenmodelle zur Verfügung. Vektormodelle verwenden räumlich diskrete Objekte, die auf Punkten, Linien und Flächen aufgebaut sein können. Diesen geometrischen Elementen können thematische Eigenschaften (Attribute) zugeordnet werden. Den Vektormodellen stehen die sogenannten Tesselationsmodelle gegenüber. Bei diesen wird ein räumlicher Bereich in Teilflächen mit gleicher Thematik aufgeteilt. Meistens werden quadratische Zellen als Aufteilung gewählt (Rasterdaten), die in einer Matrix abgebildet werden können. Jedem Matrixelement, bzw. jeder Zelle, wird dann ein bestimmter Wert zugewiesen. Die räumliche Auflösung bei Rasterdaten ist durch die Zellgröße definiert.

Bei den Rohdaten handelt es sich um diskrete räumliche Objekte (Vektordaten), welche durch die Koordinaten des Messpunktes räumlich definiert sind. Angaben über Radarhöhe, Barometerhöhe, Temperatur, Pitch und Roll, kosmische Zählrate sowie das gesamte aufgenommene Spektrum entsprechen den Attributen des Objektes. Mit Hilfe eines Konvertierungsprogrammes und verschiedenen Funktionen der zur Verfügung stehenden Software werden aus den Rohdaten sogenannte Punkt-Coverages erstellt (siehe auch Bächler 1999).

Bei den ausgewerteten Daten, die in der Auswertungssoftware Gamero in Grids (Maschenweite 125 m bei Fluglinienabstand von 250 m bzw. 250 m bei 500 m) umgewandelt werden, handelt es sich um Rasterdaten. Diese Grids, die in einem binären Datenformat vorliegen, werden mit Hilfe eines Konvertierungsprogrammes in ein ASCII-Format umgewandelt und via ArcView als Grid in der Datenbasis abgelegt.

6.3 Möglichkeiten der Darstellung

Das GIS ermöglicht die gleichzeitige Darstellung verschiedenster Daten. Bisher lieferte das Programmpaket „Gamero“ Karten in Postscriptfiles. Die Grids der ausgewerteten Daten waren dabei in einem Koordinatennetz zu sehen, dessen Maschenweite gewählt werden konnte. Es war jedoch schwierig, sich innerhalb der Grids zu orientieren. Standorte von Kernanlagen mussten nachträglich von Hand eingezeichnet werden. In einem GIS lassen sich nun den Grids auch topographische Karten überlagern. So können Situationskarten mit Gebäuden und Strassen über die Grids der Resultate gelegt werden. Je nach Auflösung der Karten können sogar einzelne Gebäude erkannt werden. Dies hilft unter anderem auch bei der Interpretation von Messresultaten. In Abbildung 6.2 ist das Grid der Total Counts vom Messgebiet KKW Beznau und PSI dargestellt. Mit Hilfe der überlagerten Pixelkarte ist klar zu erkennen, dass die höchsten Werte beim PSI West und Ost gemessen wurde. Hingegen sind die Messwerte beim KKW Beznau nicht erhöht. Ein weiterer Vorteil in einem GIS sind die schnellen, interaktiven Zoommöglichkeiten. Um einen bestimmten Ausschnitt der Karte zu sehen, müssen nicht mühsam die entsprechenden Koordinaten eingegeben werden. So ist es möglich, in sehr kurzer Zeit Karten mit verschiedenen Auflösungen zu erstellen und auszugeben.

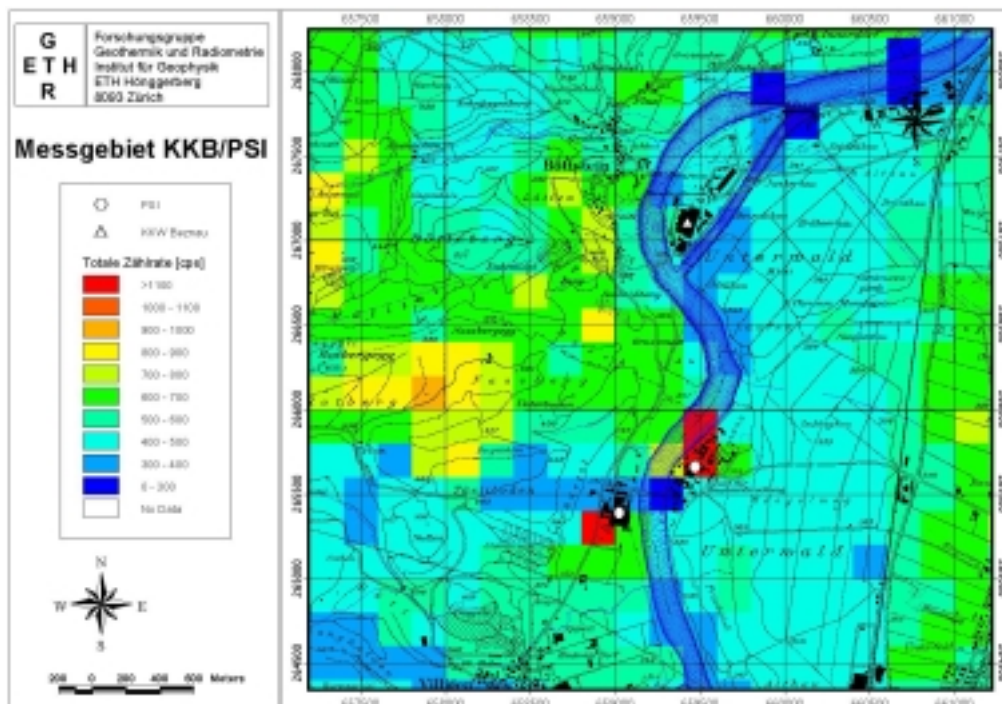


Abbildung 6.2: Ausschnitt aus dem Grid der Total Counts im Messgebiet KKW Beznau (weisses Dreieck) und PSI (weisse Kreise) vom Jahre 1998. Dem Grid (Maschenweite 125 m) sind Teile der Pixelkarte 1:25'000 überlagert (Situation und Gewässer). Kartendaten: PK25 ©1999 Bundesamt für Landestopographie (DV1172).

Die sogenannten Layout Templates bieten die Möglichkeit, Vorlagen für Kartenprodukte zu erstellen. Darin enthalten sind das Logo, die Strukturierung der ausgegebenen Karte, Windrose, Distanzbalken und Titel. Mit Hilfe von ihnen können in kürzester Zeit Kartenprodukte mit verschiedensten Inhalten erstellt, gedruckt oder exportiert werden. Im weiteren können selber

Objekte in die Karte hineingezeichnet und beschriftet werden. So können z.B. sehr einfach Übersichtskarten von Messpunkten der insitu Gammastrahlungsmessung und anderen geographischen Merkmalen kreiert werden (Abbildung 6.3). Durch die Auswahl von Vektordaten anstelle von Rasterdaten können die Karten auch einfacher und schematischer gehalten werden.

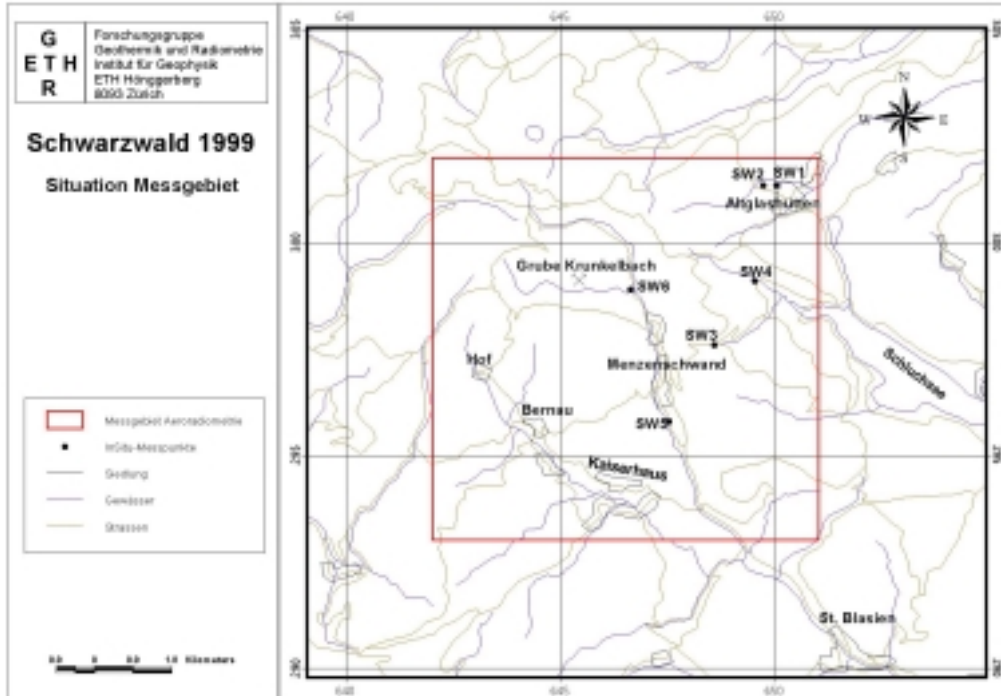


Abbildung 6.3: Beispiel eines Situationsplans aus dem GIS. Die Gewässer, Siedlungen und Strassen aus der Vektorkarte 1:200'000 geben schematisch die Geographie des Messgebietes Schwarzwald wieder. Zusätzlich sind noch die Ausdehnung des aeroradiometrischen Messgebietes, die insitu-Messpunkte (SW1 bis SW6) sowie Namen von Orten innerhalb des Messgebietes in der Karte enthalten. Kartendaten: VECTOR200 © 1999 Bundesamt für Landestopographie (DV 1429).

6.4 Räumliche Analysen

Die GIS Anwendung bietet nun auch die Möglichkeit, Daten und ihre Beziehungen zum Raum und zu anderen räumlichen Daten zu analysieren. So ist es möglich sowohl die Rohdaten als auch die Resultate räumlich zu untersuchen und neue Erkenntnisse zu sammeln. Auch können Modelle mit dem GIS auf ihre Richtigkeit untersucht werden. Im folgenden werden nun drei Beispiele für räumliche Analysen erläutert.

6.4.1 Einfluss des Waldes auf die Radarhöhenmessung

Die Radarhöhenmessungen des Helikopters werden durch verschiedene Effekte beeinflusst. Unter anderem wird vermutet, dass die Radarhöhen über Wald falsch sind, da das Radarsignal von den Baumkronen zurückgeworfen wird. Bei der Ausarbeitung und Verifikation eines Korrekturverfahrens leistete das GIS wertvolle Dienste. Die entsprechenden Beispiele und Erläuterungen sind in Kapitel 5.3 aufgeführt.

6.4.2 Verteilung der externen Dosisleistung in der Schweizer Bevölkerung

Die Verteilung der externen Dosisleistung in der Schweizer Bevölkerung ist nicht nur von der geographischen Verteilung der Dosisleistung in der Schweiz abhängig, sondern auch von der Bevölkerungsverteilung. Es ist zu erwarten, dass die mittlere Dosisleistung der Bevölkerung nicht der mittleren Dosisleistung in der Schweiz entspricht. Denn die Schweizer Bevölkerung ist nicht gleichmässig über das Land verteilt, sondern konzentriert sich hauptsächlich im Mittelland zwischen Boden- und Genfersee.

Im Rahmen der oben erwähnten Diplomarbeit (Bächler 1999) wurde die Verteilung der externen Dosisleistung in der Bevölkerung ermittelt. Dabei wurden sowohl Daten über die Verteilung der Dosisleistungen in der Schweiz als auch über die Verteilung der Bevölkerung im Land benötigt. Die Daten zur Dosisleistung können Rybach et al. (1996) entnommen werden. Sie liegen in Form eines Grids mit einer Zellgrösse von 2 km vor (Abbildung 6.4). Die Daten für die Bevölkerungsverteilung werden der Volkszählung des Jahres 1990 entnommen, die vom Bundesamt für Statistik erhoben wurde. Sie sind in den Geostat-Daten in der Datenbasis enthalten. Beim Format handelt es sich ebenfalls um ein Grid, das jedoch eine Zellgrösse von 100 m aufweist. Jeder Zelle ist die Einwohnerzahl der entsprechenden Fläche zugeordnet.

Um zwei Grids miteinander analysieren zu können, müssen sie die selbe Zellengrösse aufweisen. Da im vorliegenden Beispiel die Grids aber unterschiedliche Zellgrössen besitzen, müssen sie in einem ersten Schritt auf die selbe Zellgrösse gebracht werden. Deshalb wurde das Grid der Bevölkerungsverteilung mit Hilfe einer GIS Funktion in ein Grid mit der Zellgrösse 2 km umgewandelt (Abbildung 6.5).

Die beiden Grids können nun in ArcView sehr einfach analysiert werden. Dazu wird die Funktion „Summarize zones..“ verwendet. Diese Analysefunktion zählt nun alle Zellen eines Wertegrids zusammen, die in der selben Zone eines Zonengrids liegen. Eine Zone entspricht dabei allen Zellen, die den selben Wert besitzen. In unserem Fall dient das Dosisleistungsgrid

als Zonengrid und das Grid der Bevölkerungsverteilung als Wertgrid. Das Ergebnis dieser Analysefunktion wird in einer Tabelle ausgegeben, die auch exportiert werden kann.

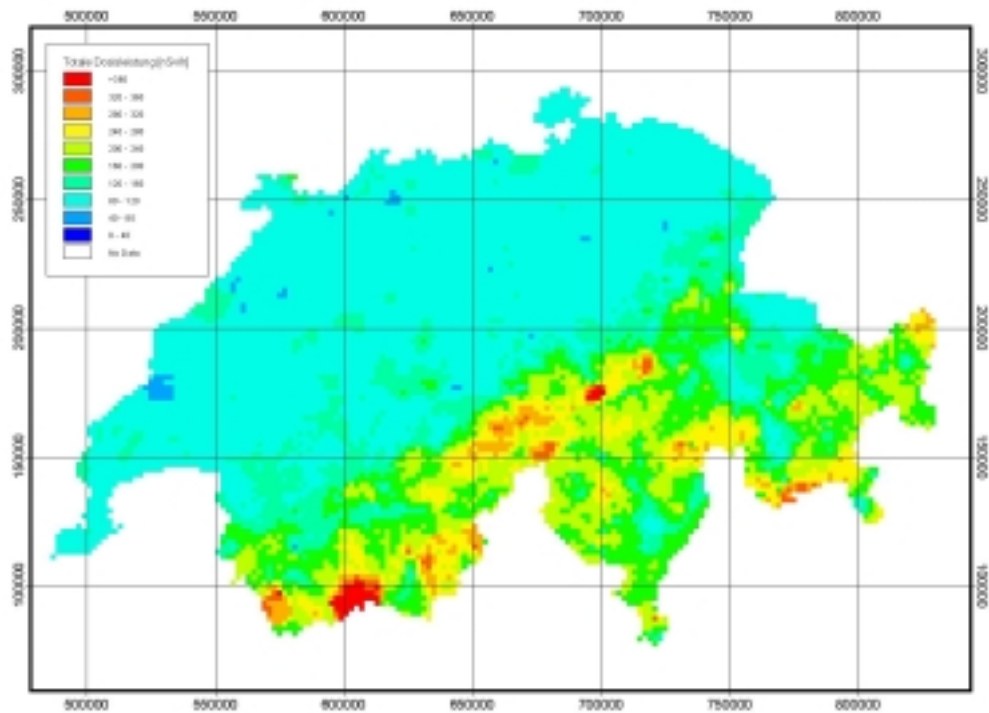


Abbildung 6.4: Verteilung der Dosisleistung im Freien in der Schweiz nach Rybach et al. (1996). Die Zellgrösse beträgt 2 km.

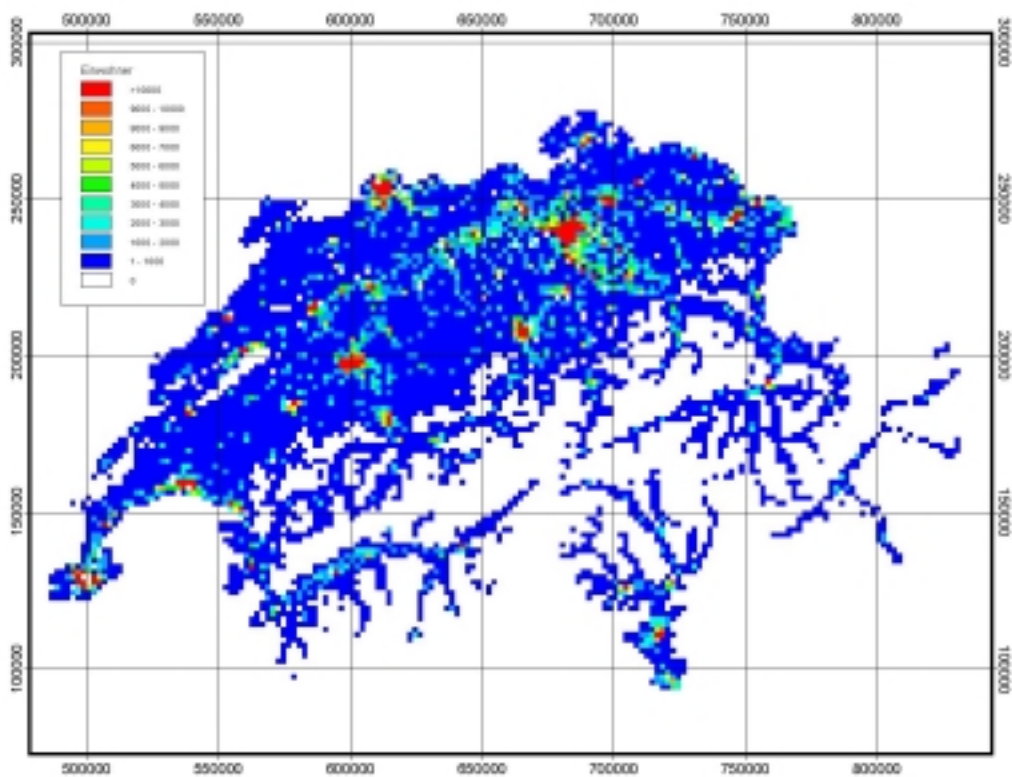


Abbildung 6.5: Bevölkerungsverteilung in der Schweiz nach der Volkszählung des Bundesamtes für Statistik des Jahres 1990 (Quelle: Geostat). Die Grösse der Zellen beträgt 2 km.

Die aus diesen Daten resultierende Verteilung der Dosisleistung in der Bevölkerung ist in der Abbildung 6.6 dargestellt. Daraus geht hervor, dass rund ein Drittel der Schweizer Bevölkerung einer externen Dosisleistung von 95-105 nSv/h ausgesetzt ist. Die Form der Verteilung ist asymmetrisch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die untere Grenze der Dosisleistungen durch die kosmische Strahlung gegeben ist. Der Beitrag der kosmischen Strahlung zur Dosisleistung ist nie Null und nimmt mit zunehmender Höhe über Meer zu.

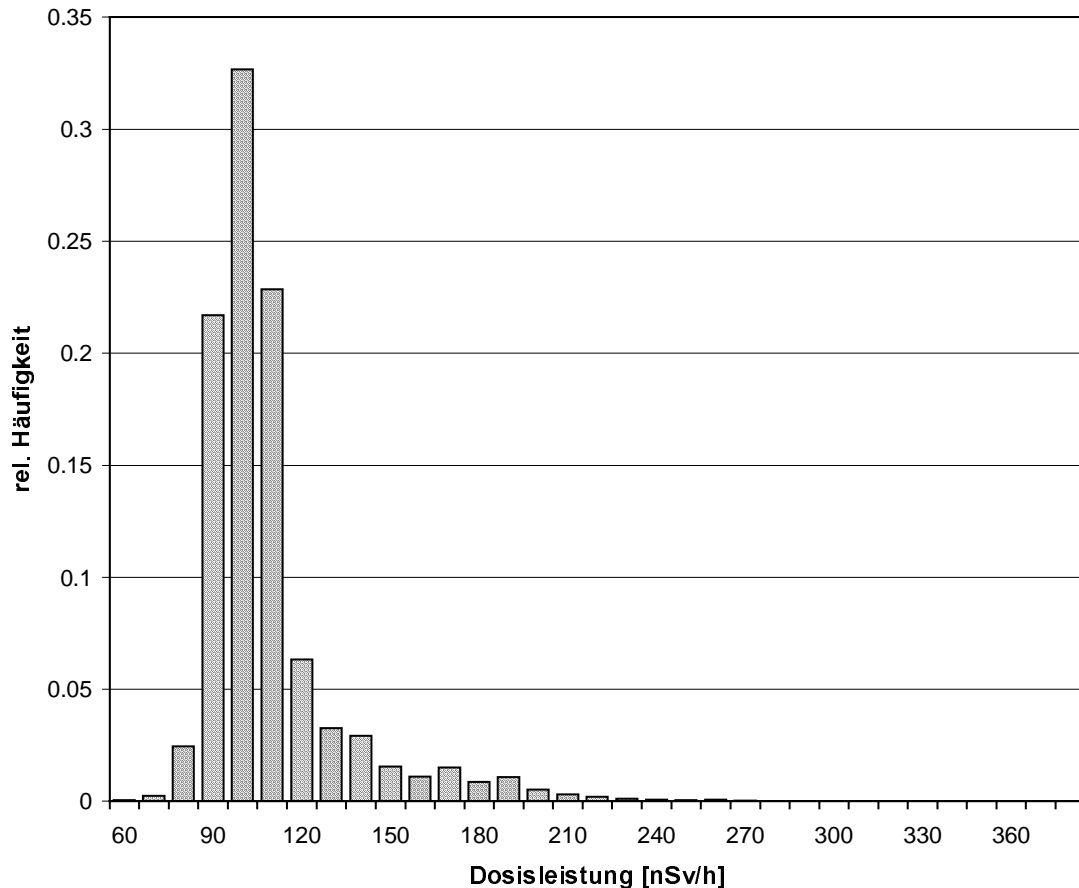


Abbildung 6.6: Verteilung der Dosisleistung in der Schweizer Bevölkerung. Die Werte auf der x-Achse geben jeweils den Mittelwert des Intervalls an, d.h. 90 steht für das Intervall [85,95].

Aus der Verteilung der Dosisleistung ergibt sich eine mittlere externe Dosisleistung für die Schweizer Bevölkerung von 109 nSv/h. Der Median liegt bei 103 nSv/h. Der Unterschied zwischen Median und Mittelwert ist ein Hinweis auf die asymmetrische Form der Verteilung, die in einer nach hohen Dosisleistungen hin auslaufenden Flanke besteht. Die relativen Häufigkeiten für Dosisleistungen über 200 nSv/h sind aber sehr gering. Die maximale Dosisleistung in bewohntem Gebiet beträgt rund 380 nSv/h (bei einer rel. Häufigkeit $< 10^{-5}$), die untere Grenze der Dosisleistungen rund 55 nSv/h.

Vergleicht man die Abbildung 6.6 mit der Verteilung der Dosisleistung ohne Berücksichtigung der Bevölkerung (Abbildung 6.7), ist ein deutlicher Unterschied in der Form der Verteilung zu erkennen. Während in der Abbildung 6.6 die Verteilung nach einer Dosisleistung von 120 nSv/h sehr schnell ausläuft, ist in Abbildung 6.7 ein zweites lokales Maximum bei rund 200 nSv/h zu

sehen. Dieses Maximum ist auf die Höhenabhängigkeit der kosmischen Strahlung zurückzuführen. Da die Schweizer Bevölkerung hauptsächlich im Mittelland und den Alpentälern lebt, ist der Anteil der Bevölkerung, die in höher gelegenen Gebieten mit entsprechend höherer kosmischer Strahlung lebt, sehr klein. Darum ist dieses lokale Maximum nur sehr schwach in der Abbildung 6.6 zu erkennen. Der Mittelwert der Dosisleistungen in der Schweiz ohne Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung beträgt 146 nSv/h. Auch hier legt der Median mit 119 nSv/h deutlich unter dem Mittelwert, was auf eine asymmetrische Form der Verteilung hinweist. Die maximale Dosisleistung in unbewohnten Gebieten beträgt rund 570 nSv/h.

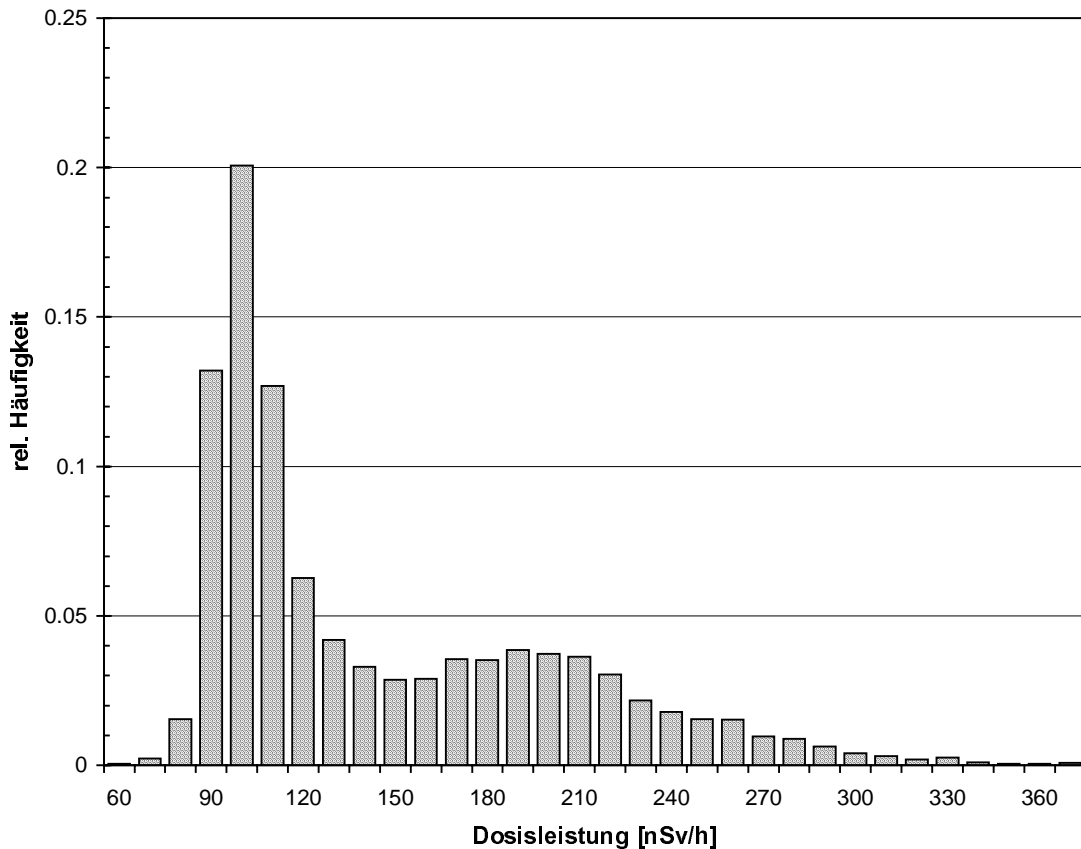


Abbildung 6.7: Verteilung der Dosisleistungen in der Schweiz ohne Berücksichtigung der Bevölkerungsverteilung. Die Werte auf der x-Achse geben jeweils den Mittelwert des Intervalls an, d.h. 90 steht für das Intervall [85,95].

Die erhaltene mittlere terrestrische plus kosmische Dosisleistung von 109 nSv/h für die Schweizer Bevölkerung bestätigt den Wert von 114 nSv/h in BAG (1999). Fünfzig Prozent der Schweizer Bevölkerung erhält eine externe Dosisleistung, die nicht grösser als 103 nSv/h ist. Rund 1.2 % der Bevölkerung ist einer externen Dosisleistung von mehr als 200 nSv/h ausgesetzt. Dies sind vor allem Menschen, die in höher gelegenen Gebieten in den Schweizer Alpen leben. Für die erhöhte Dosisleistung ist dabei hauptsächlich die kosmische Strahlung verantwortlich.

6.4.3 Das GIS als Werkzeug zur Spektrenanalyse

Manchmal interessieren neben den reinen Resultaten, die in Form von Grids vorliegen, auch die dazugehörenden Spektren. Vor allem interessieren die Spektren der Gebiete, die für irgendein Radionuklid erhöhte Werte aufweisen. Anhand der Spektren kann nämlich verifiziert werden, ob die hohen Aktivitäten in den Resultaten tatsächlich durch eine erhöhte Konzentration der entsprechenden Radionuklide verursacht wird. Ist dies nicht möglich, liegt ein Artefakt vor, der auf falsche oder überschätzte Korrekturen zurückzuführen ist. Bisher war es schwierig, beliebige Spektren auszuwählen und zu analysieren. Dazu mussten die Fiducials der entsprechenden Spektren mühsam herausgesucht werden. Um dann die entsprechenden Daten aus dem Rohdatenfile zu extrahieren, wäre ein entsprechendes Programm notwendig gewesen. Mit Hilfe des GIS ist es nun ein Leichtes, die gewünschten Messpunkte aus einer Punktcoverage auszuwählen. Die Auswahl der Punkte kann automatisch oder von Hand erfolgen. Im folgenden werden nun zwei Beispiele dargestellt, in denen mit Hilfe des GIS Spektren von Messpunkten ausgewählt wurden.

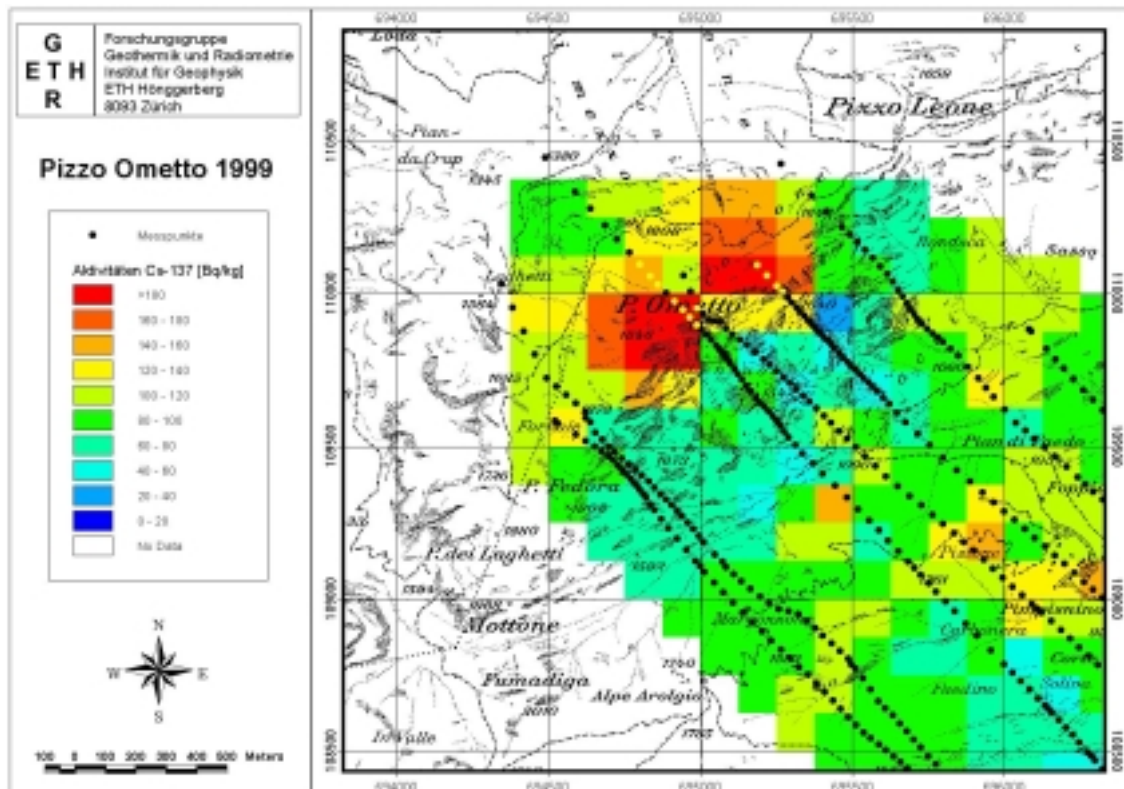


Abbildung 6.8: Auswahl der Messpunkte (schwarze Punkte), die im Bereich mit erhöhten Aktivitäten liegen (gelbe Punkte). Die Pixelgrösse in der Aktivitätskarte beträgt 125 m x 125 m. Kartendaten: PK25 © 1999 Bundesamt für Landestopographie (DV 1172).

In einem ersten Beispiel geht es um die Verifizierung von erhöhten Cäsiumaktivitäten. Ein Messflug im Jahre 1999 im Gebiet oberhalb von Brissago ergab im Bereich des Pizzo Ometto auf rund 1'800 m über Meer sehr hohe Aktivitäten von ^{137}Cs . Da das Messgebiet eine starke Topographie aufwies, bestand auch die Möglichkeit, dass die Werte aufgrund von überschätzten Höhenkorrekturen so gross wurden. Um nun zu kontrollieren, ob wirklich erhöhte Konzentrationen von ^{137}Cs für die hohen Werte verantwortlich sind, sollten die Spektren im

entsprechenden Bereich des Messgebietes untersucht werden. Dazu wurde zuerst das Grid der ^{137}Cs Aktivitäten ins ArcView importiert. Anschliessend wurde die Punktcoverage des Messgebietes Brissago, die als Attribute unter anderem auch alle Spektrendaten gespeichert hat, ebenfalls ins ArcView geladen. Nun wurden die Punkte ausgewählt, die im Bereich der erhöhten Werte am Pizzo Ometto liegen (Abbildung 6.8).

Die ausgewählten Punkte werden dann in Form einer Tabelle im ASCII-Format exportiert. Mit Hilfe eines Programms wird anschliessend das gemittelte Spektrum der Messpunkte gebildet. Das entsprechende Spektrum zeigt einen deutlichen ^{137}Cs Peak bei 662 keV (Abbildung 6.9).

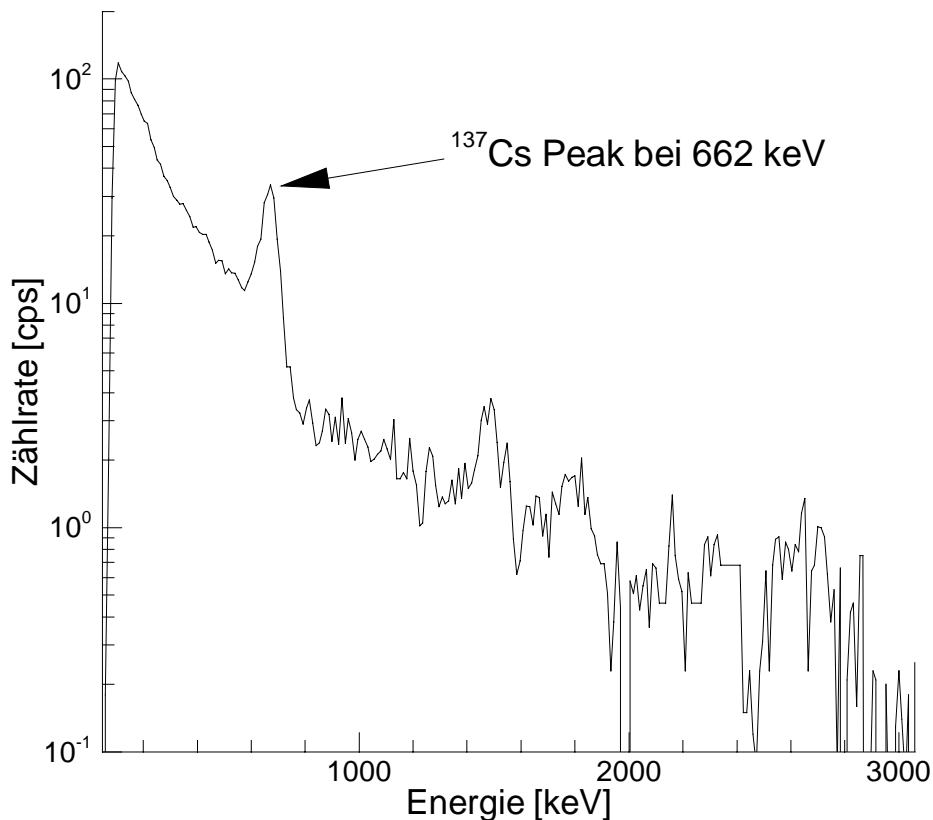


Abbildung 6.9: Gemitteltes Spektrum im Bereich der erhöhten ^{137}Cs Werte am Pizzo Ometto. Deutlich ist der ^{137}Cs Peak bei 662 keV zu erkennen.

Das Spektrum bestätigt also mit diesem ausgeprägten Peak die hohen ^{137}Cs Aktivitäten am Pizzo Ometto. Der höchste Wert im entsprechenden Grid beträgt rund 760 Bq/kg. Rechnet man diese Aktivität auf das Tchernobyl Ereignis im Jahre 1986 zurück, erhält man eine ^{137}Cs Aktivität von rund 1'020 Bq/kg. Unter der Annahme, dass sich das gesamte Cäsium in den obersten 10 cm des Bodens befindet und die Dichte rund 1.5 g/cm^3 beträgt, ergibt sich für das entsprechende Inventar an ^{137}Cs 150 kBq/m^2 . Für eine Überprüfung dieses Wertes sind Bodenmessungen oder Messungen an Bodenproben nötig, die aber aufgrund des sehr unwegsamen Gebietes schwierig sind.

In einem zweiten Beispiel wird nun das gemittelte Spektrum über Wald mit dem über Wiesen im Messgebiet der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt und des PSI verglichen. Dabei wird angenommen, dass alle Spektren im selben Abstand vom Untergrund aufgenommen wurden, d.h. sie werden nicht höhenkorrigiert. In einem ersten Schritt werden die Waldlayer der Pixelkarten 1:25'000 im entsprechenden Gebiet und die Punktcoverage der Messpunkte benötigt. Die Punkte über Wald werden automatisch über den Befehl „Select by Theme...“ ausgewählt. Anschliessend werden sie ebenfalls in Form einer Tabelle im ASCII-Format exportiert. Dasselbe geschieht auch mit den Messpunkten über Wiesen. Mit dem selben Programm wie im ersten Beispiel werden dann aus den Tabellen die gemittelten Spektren über Wald und Wiese gebildet (Abbildung 6.10). Es ist klar zu erkennen, dass das Spektrum aus den Messpunkten über Wald ein tieferes Wertenniveau aufweist als das aus den Messpunkten über Wiesen. Die Kurven der beiden Spektren verlaufen praktisch parallel. In beiden Spektren sind die Peaks der natürlichen Nuklidreihen von ^{232}Th , ^{238}U und ^{40}K zu erkennen. Neben den Hauptpeaks, die auch für die Auswertung der aeroradiometrischen Daten verwendet werden (^{40}K : 1'460 keV; ^{214}Bi : 1'760 keV; ^{208}Tl : 2'615 keV) sind auch noch andere Peaks im Spektrum zu erkennen. So sind die Peaks von ^{228}Ac aus der Thoriumreihe bei 908/966 keV (Überlappung) und im Bereich 1'590-1'640 keV, sowie von ^{214}Bi aus der Uranreihe bei 609 keV und 1'120 keV gut zu sehen.

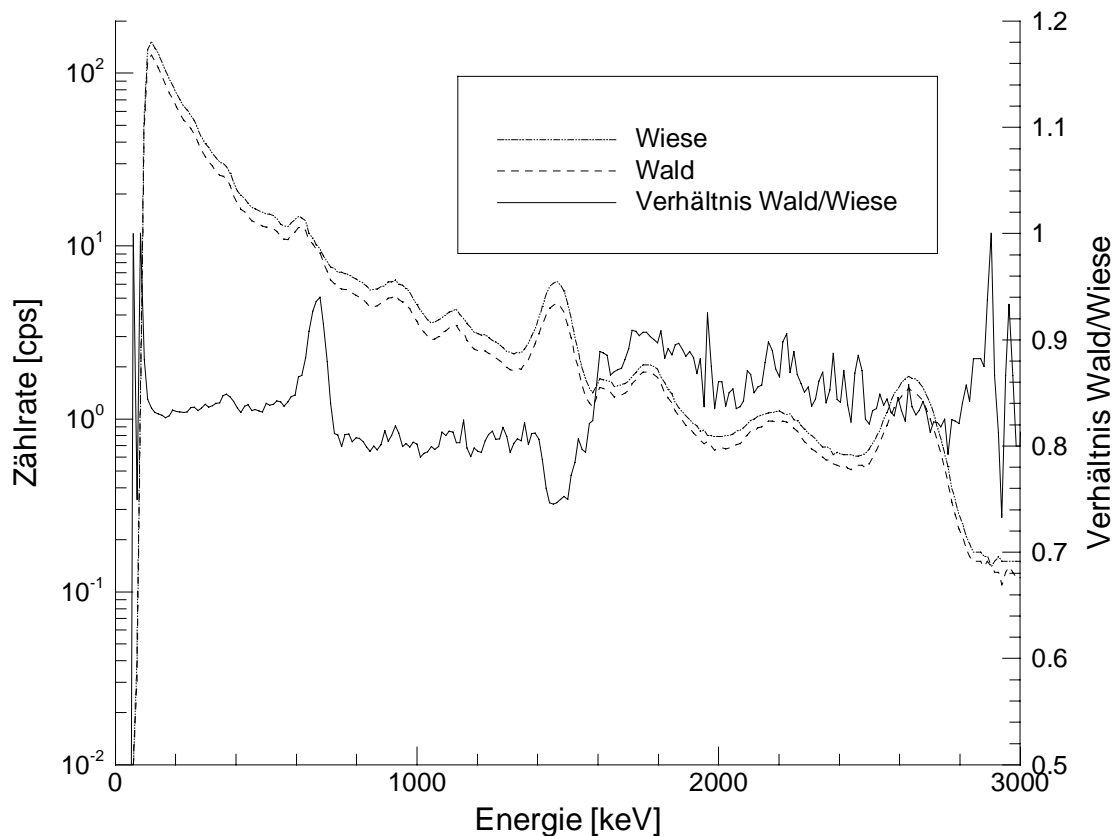


Abbildung 6.10: Gemittelte Spektren der Messpunkte über Wald und über Wiesen, sowie das Verhältnis zwischen dem Spektrum über Wald zum Spektrum über Wiesen. Die Daten stammen aus dem Messgebiet der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt und des PSI.

In Abbildung 6.10 ist auch das Verhältnis zwischen dem gemittelten Spektrum über Wald und demjenigen über Wiesen dargestellt. Das Verhältnis ist energieabhängig und liegt grösstenteils

zwischen 0.8 und 0.9. Daraus lässt sich die Abschwächung durch Wald ungefähr auf 10-20 % schätzen. Nimmt man für das Verhältnis einen mittleren Wert von 0.83, lässt sich nach Kogan (1969) die mittlere Biomassenmenge zu rund 2.5 g/cm^2 abschätzen. Bei einer Holzdichte von rund 800 kg/m^3 entspricht dies einer Schicht Biomasse von 3.1 cm Höhe. Mit Hilfe von Daten der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) lässt sich diese Höhe grob überprüfen. Dazu wurden alle im Messgebiet vorliegenden Daten über das Waldvolumen gemittelt. Man erhält dann ein mittleres Volumen von $350 \text{ m}^3/\text{ha}$. Dies entspricht einer mittleren Höhe der Biomasse von 3.5 cm, was relativ gut mit dem oben abgeschätzten Wert übereinstimmt.

In der Darstellung des Verhältnisses fallen vor allem zwei Dinge auf. Einerseits ist ein positiver Peak bei rund 660 keV zu sehen, andererseits ein negativer Peak bei 1'460 keV. Diese Energien entsprechen gerade den Gammalinien von ^{137}Cs und ^{40}K . Die Vertiefung im Bereich des ^{40}K Peaks lässt sich durch den Einsatz von Dünger auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen erklären. Durch den zusätzlichen Eintrag von Kalium wird die Zählrate über Wiesen und Äckern erhöht. Der Peak bei der Gammalinie von ^{137}Cs weist auf erhöhte Zählraten relativ zum restlichen Spektrum über Wald hin. Die Zählraten für ^{137}Cs sind über Wald also verhältnismässig grösser als über Wiesen.

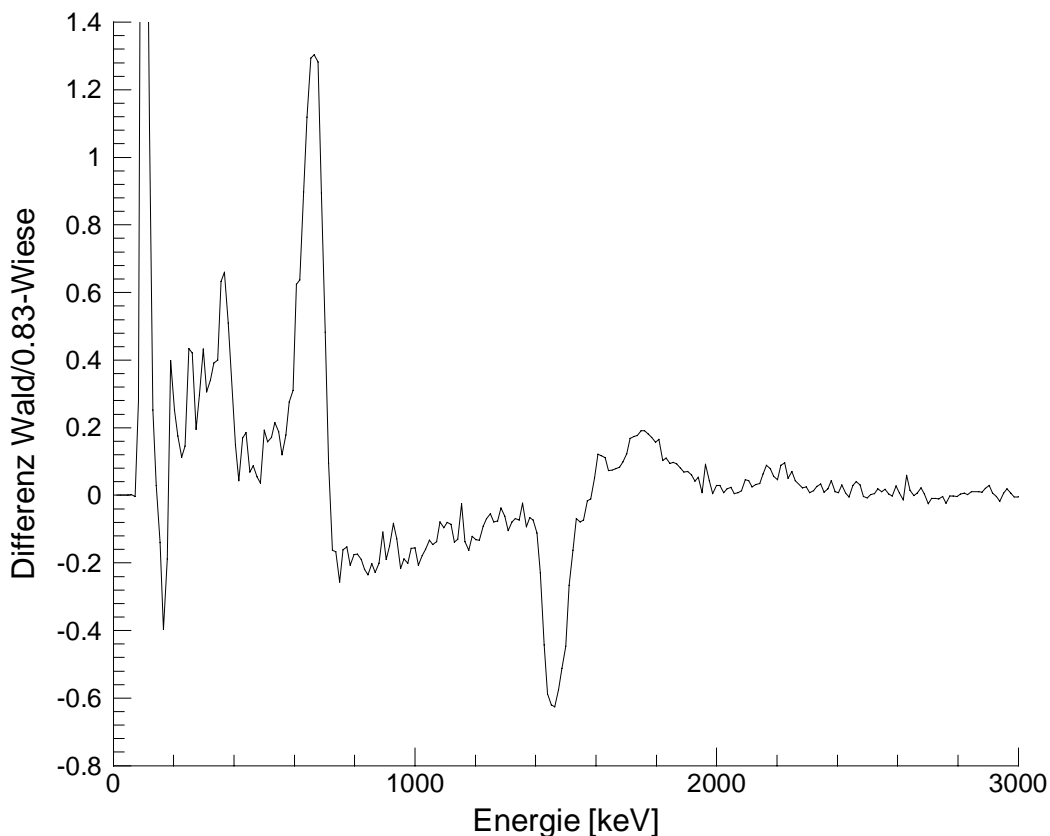


Abbildung 6.11: Differenz der gemittelten Spektren von den Messpunkten über Wald und über Wiesen, wobei das Spektrum über Wald zuerst durch das mittlere Verhältnis von 0.83 geteilt wurde.

Die in Abbildung 6.11 dargestellte Differenz der beiden Spektren, wobei das Spektrum über Wald zuerst auf das Wertenniveau des Spektrums über Wiesen gebracht wurde, zeigt nochmals

deutlich die Unterschiede in den Spektren. Die hohen Werte am unteren Ende der Energieskala stellen Artefakte dar, die durch das Abschneiden der Spektren bei rund 40 keV verursacht werden. Wiederum sind die hohen Werte bei der Gammalinie von ^{137}Cs und die tiefen Werte bei denjenigen von ^{40}K zu erkennen.

Integriert man die Fläche unter dem Peak von ^{137}Cs im Bereich von 600 keV bis 720 keV, erhält man rund 9 cps. Unter der Annahme, dass dies dem Nettounterschied in der Zählrate zwischen Wald und Wiese entspricht, liegt die Cäsiumaktivität in den Wäldern des Messgebietes KKL/KKB/PSI im Mittel um rund 20 Bq/kg höher als in Wiesen und Äckern.

Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die ^{137}Cs Aktivität in den Wäldern in den obersten Bodenschichten konzentriert ist (Riesen et al. 1995). In Wiesen und Äckern migriert ^{137}Cs viel schneller in den Untergrund und wird zusätzlich bei den Äckern durchs Pflügen mit dem übrigen Boden in den obersten 30 cm durchmischt. Dies ist auch bei den Ergebnissen von Messungen an Bodenprofilen zu erkennen. Im weiteren zeigten auch gammaspektrometrische Bodenmessungen in der Vergangenheit erhöhte Cäsiumwerte in Wäldern (Murith et al. 1990; Leupin 1990). So wurden im Gebiet KKL/KKB/PSI in Wäldern doppelt so hohe ^{137}Cs Aktivitäten gemessen wie auf Wiesen und Äckern. Ob aber allgemein ein grösseres Inventar an Cäsium in den Wäldern abgelagert wurde, kann nicht abschliessend beurteilt werden, da die vorliegende Datengrundlage zu klein ist.

6.5 Fazit

Wie sich zeigte, bestehen im GIS gute Darstellungsmöglichkeiten für die verschiedensten Daten. Auch können sehr professionelle Produkte einfach erstellt werden. Bei Routinedarstellungen können Vorlagen den Ablauf sehr beschleunigen.

Obwohl die Pflege eines GIS einen Zusatzaufwand darstellt, bieten die verbesserten Darstellungsmöglichkeiten und die systematische Archivierung genügend Vorteile, um diesen Zusatzaufwand zu rechtfertigen. Für weitergehende Analysen ist eine genügende Datenbasis an externen Daten notwendig. Die Beschaffung dieser Daten ist teilweise mit grösserem Aufwand und teilweise auch mit grossen Kosten verbunden. So konnten die digitalen Ausschnitte aus den Landeskarten vom Bundesamt für Landestopographie nur angeschafft werden, weil sie für die Nutzung innerhalb der ETH kostenlos waren.

Trotzdem lohnt sich der Aufwand, da sich mit den räumlichen Analysen in nützlicher Frist Erkenntnisse gewinnen lassen, die ohne GIS mit einem enormen Aufwand verbunden wären. Die Verknüpfung verschiedenster Datensätze erlaubt es, Aussagen über räumliche Verteilung sowie Zusammenhänge und Einflüsse von Parametern zu machen. Bei solchen Analysen sind die Ergebnisse jedoch nicht nur abhängig von der Genauigkeit der aeroradiometrischen Resultate sondern auch von der Genauigkeit aller verwendeten Daten. Die Möglichkeiten von räumlichen Analysen in der Aeroradiometrie wurden sicher noch nicht voll ausgeschöpft.

Das vorliegende GIS wurde mit dem Ziel erstellt, die Funktionalität eines GIS zu demonstrieren. Die Betriebsphase des vorliegenden Test-GIS gab einige wichtige Hinweise, die in einem weiteren Ausbau berücksichtigt werden sollen. So ist die gewählte Form der Datenbasis für die aeroradiometrischen Daten nicht geeignet. Denn es bedeutet einen grossen Aufwand alle Grids und Punktcoverages zu erstellen. Vor allem sind die Arbeitsschritte teilweise sehr umständlich. Ebenfalls wird mit der gewählten Datenbasis die Doppelführung von Daten nicht verhindert. Der Speicherbedarf ist recht gross, doch viel schwerwiegender ist die von Jahr zu Jahr zunehmende Komplexität der Filestruktur.

Aufgrund des grossen Aufwandes leidet auch die konsequente Nachführung der Metadaten. Dies ist jedoch bei der gewählten Form der Datenbasis für eine langfristige Nutzung der entscheidende Punkt.

Die angestrebten Ziele in der Datenverwaltung konnten somit nicht erreicht werden. Aus den Erkenntnissen, die mit Hilfe dieses Prototypes erhalten werden konnten, lassen sich die Anforderungen an ein GIS festlegen, das auch den Zielsetzungen entspricht. Im folgenden soll deshalb ein entsprechendes Konzept aufgezeigt werden.

Konzept für Datenmodell

Die Daten für das GIS werden in aeroradiometrische und nicht aeroradiometrische aufgeteilt. Die Datenstruktur ist konsequent so zu gestalten, dass keine Doppelführung der Daten erfolgen kann. Deshalb sollen bei den aeroradiometrischen Daten nur die Rohdaten und keine ausgewerteten Daten abgelegt werden. Die entsprechenden Daten sind in einer Datenbank zu organisieren, um eine einfache Struktur, einfache Handhabung der Daten und einfache

Sicherung (Backup) zu erreichen. Mit jedem Messpunkt müssen auch andere Hintergrundinformationen zum Messflug sowie zur Auswertung verknüpft werden (Abbildung 6.12). Aus diesen Verknüpfungen geht dann auch die Struktur der Aeroradiometriedatenbank hervor.

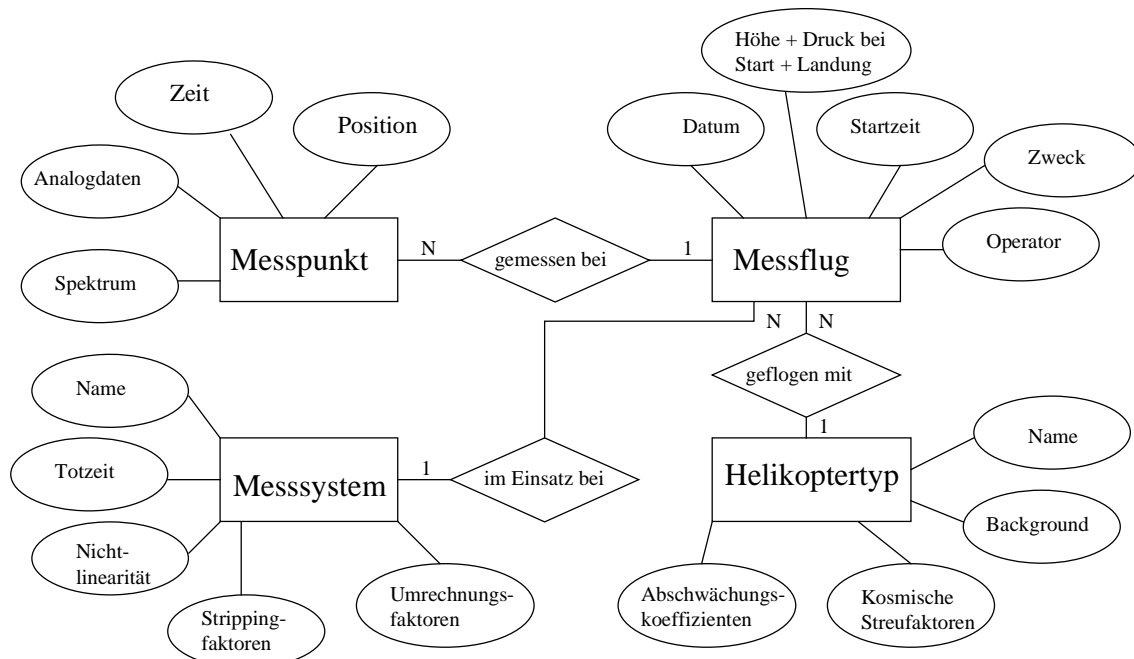


Abbildung 6.12: Entity-Relationship Diagramm für die aeroradiometrischen Rohdaten, die in die Datenbank integriert werden sollen. Eine N:1 Beziehung bedeutet, dass mehrere Mitglieder (N) der einen Entität mit einem Mitglied (1) einer anderen Entität in Beziehung stehen.

Die nicht aeroradiometrischen Daten bestehen aus digitalen Karten, digitalen Geländemodellen und anderen räumlichen und statistischen Daten. Sie sollen thematisch gegliedert ebenfalls in getrennten Datenbanken untergebracht werden.

Für die Dateneingabe, -verwaltung und -abfrage ist eine geeignete RDBMS-Software (RDBMS: Relational Database Management System) auszuwählen. Die entsprechende Software sollte auch Möglichkeiten zur Datenabfrage übers Internet beinhalten.

Da bei den Messungen grosse Mengen an Daten anfallen, ist ihre manuelle Eingabe nicht sinnvoll. Für den Datenimport in die Datenbank ist deshalb ein entsprechendes Interface zur Verfügung zu stellen.

Applikationsmodell

Die Auswahl der Daten, die Auswertung und anschliessende Darstellung im GIS basiert auf der oben beschriebenen Datenbasis. Für die Nutzung der Daten im GIS muss eine Verknüpfung der verschiedenen Datenbanken und dem GIS erstellt werden. In Abbildung 6.13 ist ein entsprechender Entwurf dargestellt.

Um die aeroradiometrischen Rohdaten der Datenbasis im GIS nutzen zu können, muss ein entsprechendes Interface geschaffen werden. Dieses Interface übernimmt die Kommunikation zum GIS wie auch zur Datenbasis. Es ist auch für die Auswertung der aeroradiometrischen Rohdaten und deren Bereitstellung für das GIS verantwortlich.

Bei der Nutzung im GIS kann zwischen einfacher Darstellung der Daten und deren weiterer, räumlicher Analyse unterschieden werden. Bei beiden Nutzungsarten kann sowohl auf die Aeroradiometriedatenbank als auch auf die Datenbank der externen Daten (digitale Karten, statistische Daten etc.) zugegriffen werden.

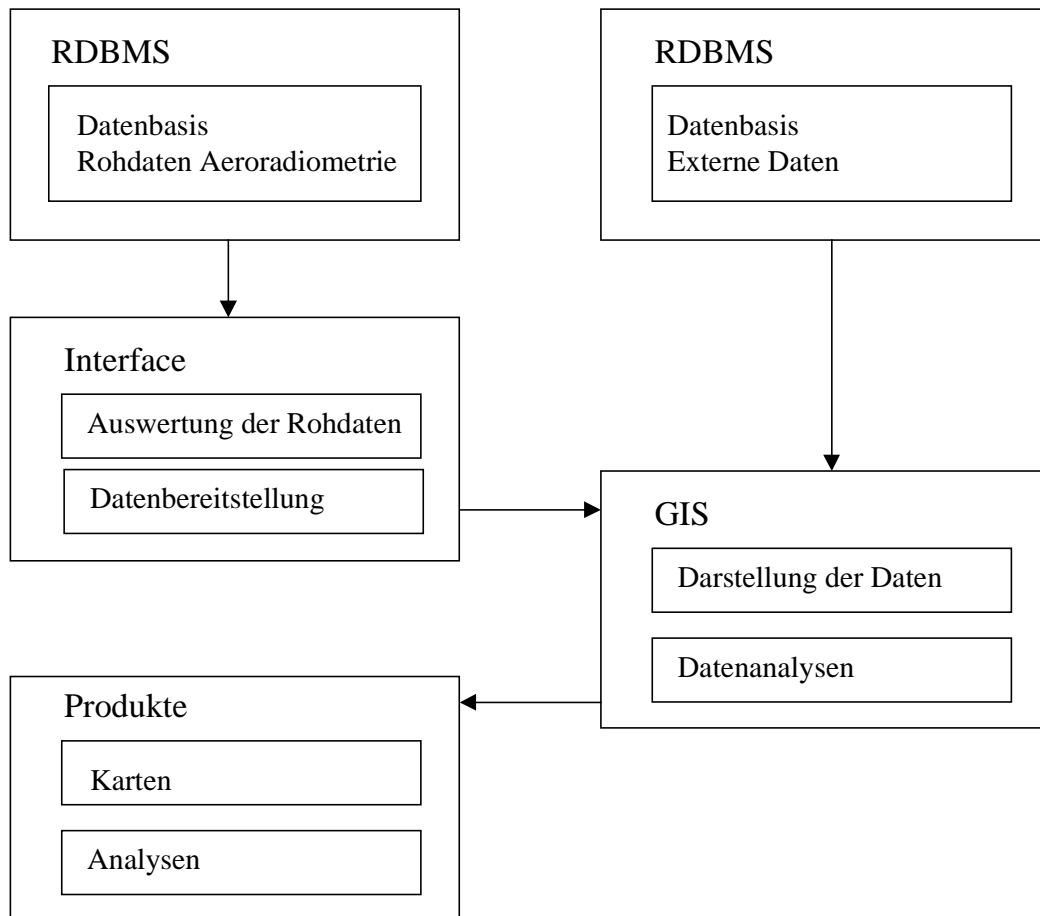


Abbildung 6.13: Entwurf für das Applikationsmodell.

Für die einfache Darstellung der Daten sind standardisierte Produkte vorzusehen, die mit Hilfe verschiedener Parameter wie Massstab, Darstellungsform (Grid oder Punkte), Art der digitalen Karten usw. gewählt werden können. Die aeroradiometrischen Daten sollen anhand der Eigenschaften des Messfluges sowie anhand der Eigenschaften der Messpunkte ausgewählt werden können.

Wenn weitere Analysen mit den Rohdaten oder den ausgewerteten Daten durchgeführt werden sollen, müssen die gewünschten Daten ebenfalls ausgewählt, wenn nötig ausgewertet und im GIS dargestellt werden. Die weitere Verarbeitung und Analyse ist dann dem Benutzer des GIS zu überlassen.

Für die Automatisierung von Produkten ist eine GIS-Software nötig, die über Scripts oder ähnliches angepasst werden kann. Dieser Anforderung entsprechen sowohl ArcInfo als auch ArcView.

7 Interkalibration

Bei grossen Ereignissen, wie zum Beispiel beim Reaktorunfall in Tchernobyl, sind sehr grosse Gebiete, ja sogar Kontinente radiologisch betroffen. Ebenfalls halten sich abstürzende Satelliten nicht an Landesgrenzen und die Trümmer können über weite Gebiete gestreut werden. In solchen Fällen ist man auf die Zusammenarbeit von verschiedenen Messteams angewiesen, um die radiologische Situation schnell eruieren zu können. Um zuverlässige Resultate zu erhalten und gemeinsam darstellen zu können, ist es nötig, dass die einzelnen Teams auch vergleichbare Ergebnisse liefern. Im Bereich der gammaspektrometrischen insitu Messungen sind internationale Standards und Vergleichsmessungen bereits gängig. Im Bereich der Aeroradiometrie hat die Zusammenarbeit unter den verschiedenen Messteams im Rahmen eines EU-Projektes begonnen. Man ist jedoch noch weit von einer Standardisierung entfernt. Im Rahmen von bilateralen Übungen konnten aber bereits mit den Nachbarländern Frankreich, Österreich und Deutschland Vergleichsmessungen durchgeführt werden. Im folgenden sollen nun die Kalibrationsverfahren und die Interkalibration der verschiedenen Messsysteme beschrieben werden.

7.1 Einleitung

Eine gute Kalibration der Detektoren ist entscheidend für den Vergleich mit anderen radiometrischen Messungen insbesondere mit aeroradiometrischen Messungen. Beim Vergleich von aeroradiometrischen Messresultaten verschiedener Messequipen und Messsysteme können Unterschiede auch auf unterschiedliche Kalibrationsverfahren oder systematische Fehler zurückzuführen sein.

Das Schweizer Aeroradiometrieteam besitzt zwei Detektoren. Detektor A besteht aus vier 4“ x 4“ x 16“ grossen prismatischen Natriumjodid (NaJ) Kristallen mit einem Gesamtvolumen von 16.8 Litern. Die Kristalle mit dem jeweils dazugehörenden Photomultiplier (PM) sind nebeneinander in ein Gehäuse verpackt. Der Detektor B besitzt nur einen 4“ x 4“ x 16“ grossen NaJ Kristall mit einem Volumen von 4 Litern. Er ist ebenfalls zusammen mit einem PM in einem Gehäuse verpackt.

Wie wir in Kapitel 5.1 gesehen haben, kommen in der Datenauswertung verschiedene Korrekturen zur Anwendung. Die entsprechenden Korrekturwerte oder –faktoren für Background-, Stripping- und Höhenkorrektur sowie für die Umrechnung in Aktivitäten müssen mit Hilfe von Kalibrationsmessungen für beide Detektoren A und B bestimmt werden. Im folgenden wird nun auf die verschiedenen Kalibrationsschritte und die entsprechenden Parameter eingegangen.

7.1.1 Background und kosmische Streufaktoren

Die für die Korrektur des Backgrounds und der kosmischen Streustrahlung benötigten Parameter werden mit Hilfe von Steigflügen in grosser Höhe (rund 4 km über Grund) über einer weiten Wasserfläche bestimmt. Beim Steigflug wird in unterschiedlichen Höhen während rund 300 Sekunden je ein Spektrum aufgenommen. Unter der Annahme eines linearen

Zusammenhangs zwischen kosmischer Zählrate (Zählrate im Energiebereich von 3 MeV bis 6 MeV) und der gestreuten kosmischen Strahlung im Spektrum von 40 keV bis 3'000 keV lassen sich der Background und die kosmischen Streufaktoren für die verschiedenen Fenster (Definition der Fenster siehe Kapitel 5.1) berechnen. Die mit dem Detektor A verwendeten Werte wurden mit Hilfe eines Steigfluges über dem Neuenburgersee im Jahre 1994 bestimmt (Schwarz et al. 1995) und sind in der Tabelle 7.1 zusammengefasst. Für den Detektor B werden die Werte von denjenigen des Detektors A abgeleitet, indem der Background aufgrund des Detektorvolumens durch vier geteilt wird. Die kosmischen Streufaktoren können übernommen werden.

Tabelle 7.1: Backgroundwerte und kosmische Streufaktoren für die in der Auswertung verwendeten Fenster.

Fenster	Isotop	Background [cps]	Kosmischer Streufaktor
Total	-	135.0	0.909
Kalium	^{40}K	11.2	0.046
Uran	^{214}Bi	6.3	0.038
Thorium	^{208}Tl	2.7	0.045
Cäsium	^{137}Cs	24.9	0.083
Kobalt	^{60}Co	15.4	0.095
MMGC1	-	116.0	0.650
MMGC2	-	24.7	0.248

7.1.2 Bestimmung der Streufaktoren

Die Bestimmung der Stripping-Faktoren erfolgt mit Hilfe von Punktquellen. Diese werden dabei in einem bestimmten Abstand vom Detektor aufgestellt. Für die Quellen ^{60}Co , ^{40}K , ^{238}U und ^{232}Th sowie den Background wird jeweils über eine bestimmte Zeit ein Spektrum aufgenommen. So lassen sich für jede Quelle die entsprechenden Netto-Zählraten in jedem Fenster (= Spektralbereiche für die erwähnten Radioisotope) bestimmen. Daraus lassen sich dann die Stripping-Faktoren für Punktquellen einfach berechnen. Um diese Faktoren für Volumenquellen verwenden zu können, werden sie aufgrund von Modellrechnungen korrigiert (Schwarz 1991).

Die Kalibrationsmessungen erfolgten am 25. Juli 2000 in der Halle 10 des Militärflugplatzes Dübendorf. Die Ergebnisse für den Detektor A stimmten gut mit früheren Messungen aus dem Jahre 1992 überein (Schwarz et al. 1992b). Die entsprechenden für Volumenquellen korrigierten Strippingfaktoren des Detektors A sind in der Tabelle 7.2 zusammengefasst. Gleichzeitig zu den Messungen mit Detektor A wurden auch Messungen mit dem Detektor B durchgeführt. Die daraus berechneten Streufaktoren stimmen im Rahmen der Genauigkeit mit denen des Detektors A überein.

Tabelle 7.2: Resultate der Streufaktorenbestimmung mit Punktquellen für den Detektor A. Diese Werte gelten innerhalb der Genauigkeiten auch für den Detektor B.

Quelle \ Fenster	Kalium		Uran		Thorium		Caesium		Kobalt	
	f _{ji}	Δf _{ji}	f _{ji}	Δf _{ji}	f _{ji}	Δf _{ji}	f _{ji}	Δf _{ji}	f _{ji}	Δf _{ji}
Kalium	1.00	-	0.72	0.10	0.46	0.05	0.00	0.00	0.23	0.04
Uran	0.00	0.00	1.00	-	0.31	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Thorium	0.00	0.00	0.06	0.02	1.00	-	0.00	0.00	0.00	0.00
Caesium	0.41	0.07	4.11	0.38	1.98	0.16	1.00	-	0.25	0.04
Kobalt	0.62	0.10	2.29	0.22	0.70	0.06	0.00	0.00	1.00	-

7.1.3 Abschwächungskoeffizienten

Mit der Höhenkorrektur trägt man der Absorption der Strahlung durch die Luft Rechnung. Für die Höhenkorrektur wird der Abschwächungskoeffizient der Luft benötigt. Da dieser energieabhängig ist, hat jedes Fenster einen spezifischen Koeffizienten.

Die Abschwächungskoeffizienten sind auch abhängig von der Funktion, die bei der Höhenkorrektur verwendet wird. Üblicherweise wird bei Messungen im Mittelland eine Exponentialfunktion verwendet, da aufgrund des schwachen Reliefs keine topographischen Effekte und keine grossen Abweichungen von der Sollflughöhe zu erwarten sind und somit eine einfache Höhenkorrektur angewandt werden kann. Bei Gebieten mit starkem Relief wird jedoch oft auch eine Topographiekorrektur eingesetzt. Dabei kommt aber als Funktion ein Integral 2. Ordnung zum Einsatz (siehe auch Kapitel 5.1), bei dem auch die entsprechenden Abschwächungskoeffizienten zur Anwendung gelangen.

Für beide Funktionen lassen sich die entsprechenden Abschwächungskoeffizienten mit Hilfe von Steigflügen in einem Höhenbereich von 30 m – 500 m über Grund berechnen. Die so berechneten Koeffizienten werden dann auf ein einheitliches Druck- und Temperaturniveau normalisiert (Normalatmosphäre: 0 °C, 1013.25 hPa). Die entsprechende Beziehung ist in der Formel 7.1 aufgeführt.

$$\mu_{ref} = \mu_{Roh} \cdot \frac{T_{mes} \cdot 1013.25}{273.15 \cdot P_{mes}} \quad (7.1)$$

wobei μ_{ref} den korrigierten Abschwächungskoeffizienten bei 0 °C und 1013.25 hPa, μ_{Roh} den Abschwächungskoeffizienten bei Messbedingungen, T_{mes} die gemessene Temperatur und P_{mes} den gemessenen Luftdruck darstellt.

In der Tabelle 7.3 sind die in den letzten Jahren verwendeten Abschwächungskoeffizienten für beide Funktionen zusammengefasst. Sie stammen von Steigflügen aus den Jahren 1994 und

1995 (Schwarz et al. 1996). Die μ_{exp} werden mit der einfachen Exponentialfunktion und die μ_{E2} mit dem Integral 2. Ordnung verwendet.

Tabelle 7.3: Abschwächungskoeffizienten für die Höhenkorrektur unter Verwendung verschiedener Funktionen (μ_{exp} : Exponentialfunktion; μ_{E2} : Integral 2. Ordnung).

Fenster	μ_{exp} [m^{-1}]	μ_{E2} [m^{-1}]
Total	0.0060	-
Kalium	0.0080	0.0042
Uran	0.0055	0.0032
Thorium	0.0060	0.0035
Cäsium	0.0100	0.0080
Kobalt	0.0080	-
MMGC1	0.0060	-
MMGC2	0.0065	-

7.1.4 Umrechnungsfaktoren

Bei der Auswertung von aeroradiometrischen Daten werden die korrigierten Zählraten der Fenster am Schluss in Bodenaktivitäten umgerechnet. Dazu werden einfache Umrechnungsfaktoren verwendet, die mit Hilfe von Modellrechnungen und Vergleichen zwischen aeroradiometrischen und gammaspektrometrischen insitu Messungen bestimmt werden (Schwarz 1991). Die Umrechnungsfaktoren sind von der Detektorempfindlichkeit abhängig. Aus den Bodenaktivitäten lassen sich ebenfalls mit Umrechnungsfaktoren die entsprechenden Anteile an der Dosisleistung in 1 m über Boden berechnen. Diese können dem ICRU-Report 53 (1994) entnommen werden. Die verwendeten Umrechnungsfaktoren wurden 1994 bestimmt (Schwarz et al. 1995) und sind in der Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Tabelle 7.4: Faktoren für die Umrechnung der korrigierten Zählraten in Bodenaktivitäten und Dosisleistungen.

Fenster	Isotop	Bodenaktivitäten [Bq/kg per cps]	Dosisleistung [nGy/h per cps]
Kalium	^{40}K	8.29	0.35
Uran	^{214}Bi	4.0	1.85
Thorium	^{208}Tl	1.67	1.01
Cäsium	^{137}Cs	2.0	0.34

Die in Tabelle 7.4 angeführten Umrechnungsfaktoren basieren auf der Annahme einer homogenen Tiefenverteilung der Radioisotope im Boden. Für die natürlichen Radionuklide wie ^{40}K , ^{214}Bi und ^{208}Tl trifft die Vorstellung einer Volumenquelle in etwa zu. Für das künstliche

Radionuklid ^{137}Cs trifft diese Annahme nicht generell zu. Dies muss bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden.

7.1.5 Andere Kalibrationsverfahren

Zum Teil werden bei den verschiedenen Aeroradiometrietams innerhalb von Europa andere Kalibrationsverfahren angewandt. Insbesondere bei der Bestimmung der Streufaktoren werden anstelle der Verwendung von Punktquellen andere Methoden eingesetzt. Diese werden nun im folgenden kurz beschrieben.

Calibration Pads

Bei den sogenannten Calibration Pads handelt es sich um ca. 1.2 x 1.2 m grosse und 0.4 m dicke Betonblöcke mit verschiedenen Beigaben von radioaktiven Isotopen. Normalerweise verwendet man 4 Pads, eines für den Background (ohne Zugabe von radioaktiven Isotopen), eines für ^{40}K , eines für ^{238}U und eines für ^{232}Th . Diese Blöcke stellen bereits Volumenquellen dar, und die Streufaktoren müssen deshalb nicht mehr korrigiert werden. Durch Einfügen von Holz- oder Plexiglasplatten zwischen dem Detektor und dem Pad lassen sich verschiedene Höhen simulieren. Damit lässt sich das Verhalten der Stripping Faktoren mit zunehmender Entfernung zur Quelle studieren (Sanderson et al. 1995). Die Resultate zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen der Entfernung (oder Gesamtdicke der Plexiglasplatten) und den Stripping Faktoren. Eine lineare Beziehung wird auch von Schwarz (1991) verwendet. Ein direkter Vergleich der Stripping Faktoren ist jedoch nur möglich, falls die Geometrie des Detektors und die Definitionen der gewählten Fenster übereinstimmen (Schwarz et al. 1992b). Für künstliche Radionuklide wie z.B. ^{137}Cs werden teilweise Platten oder Folien verwendet, die eine entsprechende Beschichtung aufweisen. So lässt sich die Wirkung eines radioaktiven Fallouts simulieren. Der Fallout stellt dann eine Oberflächenquelle dar.

Die Calibration Pads entsprechen nicht genau den tatsächlichen Verhältnissen in der Natur. So tragen sie einer möglichen Schichtung des Bodens oder unterschiedlichem Wassergehalt nicht Rechnung. Im Weiteren lässt sich aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung der Pads die weitwinklige Strahlung nicht ideal nachbilden. Dies beeinflusst die Stripping Faktoren und deren Verhalten mit zunehmender Entfernung zur Quelle. Deshalb können auch die mit Hilfe der Pads erhaltenen Korrekturfaktoren nicht vorbehaltlos zur Korrektur der aeroradiometrischen Daten eingesetzt werden.

Unter anderem werden in Europa solche Calibration Pads vom österreichischen Messteam der Geologischen Bundesanstalt (GBA) in Wien, dem deutschen Team des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und dem schottischen Team vom Scottish Universities Research and Reactor Center (SURRC) verwendet.

Kalibrationsplattformen

Unter Kalibrationsplattformen muss man sich den Calibration Pads ähnliche Betonplatten vorstellen, die lateral einiges grösser sind. In der Regel sind sie rund einen halben Meter dick und etwa 8 x 8 m gross. Aufgrund ihrer Grösse können sie problemlos befahren werden. Deshalb ist es möglich, mit im Helikopter, Flugzeug oder Auto eingebautem Messgerät die

Kalibrationsmessungen durchzuführen. Dies birgt den Vorteil, dass damit Effekte des Transportmittels gleich mitberücksichtigt werden. Die Kalibrationsplattformen stellen wie die Calibration Pads Volumenquellen dar. Die damit bestimmten Streufaktoren sind jedoch wegen der grösseren lateralen Ausdehnung direkt verwendbar. Auch hier können verschiedene Höhen simuliert werden, indem Sperrholzplatten zwischen den Detektor und die Plattform gebracht werden.

Der Bau solcher Kalibrationsplattformen ist sehr aufwendig und teuer. Deshalb stehen in Mitteleuropa auch keine zur Verfügung. Ein Set solcher Plattformen befindet sich in Borlänge, Schweden, das vom Swedish Geological Survey (SGU) genutzt wird.

Monte-Carlo Simulationen

Eine weitere Möglichkeit der Kalibration bieten Monte Carlo Simulationen. Diese eignen sich vor allem für Radionuklide, für die keine Pads bestehen oder keine hergestellt werden können. Bei Monte Carlo Simulationen werden mit Hilfe der Stochastik für bestimmte Modelle die entsprechenden Spektren im Detektor hergeleitet (Allyson 1994; Allyson & Sanderson 1998; Guillot 1996). So lassen sich nicht nur Streufaktoren für verschiedene Konzentrationsverteilungen bestimmen, sondern es ist auch möglich direkt Konversionsfaktoren für Zählraten in Aktivitäten abzuleiten. Voraussetzung ist jedoch ein gut gewähltes und kalibriertes Modell. Wenn das Modell jedoch steht, ist es sehr einfach, für die verschiedensten Nuklide Berechnungen durchzuführen. Für die Kalibration der Modelle werden normalerweise oben beschriebene Kalibrationsmethoden (Pads oder Punktquellen) verwendet.

7.1.6 Vergleich mit Bodenmessungen

Nach der Kalibration des aeroradiometrischen Equipments ist immer wieder eine Überprüfung der Resultate nötig. Nur so ist eine zuverlässige Nutzung der aeroradiometrischen Messresultate gewährleistet. Wichtig sind solche unabhängigen Überprüfungen auch im Hinblick auf Interkalibrationen unterschiedlicher Messsysteme. Als mögliche Vergleichsmessungen bieten sich Messungen an Bodenproben und hochauflösende gammaspektrometrische Bodenmessungen (insitu Gammaspektrometrie) an.

In der insitu Gammaspektrometrie kommt ein hochauflösender Halbleiterdetektor zum Einsatz. Die Messequipen der Sektion Überwachung der Radioaktivität (SUER) und der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) verwenden für ihre Messungen einen Reinstgermanium-Detektor mit einer relativen Ansprechwahrscheinlichkeit von 10 % (bezogen auf einen 3 " x 3 " NaJ-Detektor). Die Energieauflösung beträgt 0.85 keV bei 122 keV und 1.8 keV bei 1.33 MeV. Der Detektor wird mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Um den für die Kalibrierung angenommenen Bedingungen möglichst zu entsprechen, werden als Messorte möglichst ebene Flächen grosser Ausdehnung ohne Hindernisse wie Häuser oder Bäume in der Nähe gewählt. Die Messungen können im Feld auf einem Laptop ausgewertet werden. Die Kalibration und die Auswertemethodik ist in Murith (1986) beschrieben.

Ein Hauptproblem beim Vergleich solcher Messungen sind die unterschiedlichen räumlichen Dimensionen des Gebietes, das die Messresultate beeinflusst. Während die Aeroradiometrie einen Wert für ein Gebiet von rund 200 m x 200 m liefert, wird die insitu Gammaspektrometrie

hauptsächlich von einer Fläche von 10 m x 10 m beeinflusst. Die Bodenprobe gibt schliesslich punktuelle Informationen. Deshalb sind Vergleichsmessungen an Waldrändern und an Wasserflächen aufgrund der Abschirmung bei den aeroradiometrischen Messungen wenig geeignet. Im weiteren beeinflussen auch andere Parameter die Messungen, die teilweise zeitlich variieren. Als Beispiel sind hier der Wassergehalt des Bodens, der Radongehalt der Luft sowie die kosmische Strahlung zu nennen (siehe auch Kapitel 8).

Trotz all diesen zum Teil problematischen Aspekten ist ein solcher Vergleich die einzige Möglichkeit, die Kalibration zu überprüfen und zu verifizieren. Die Unterschiede in den räumlichen Dimensionen können durch geeignete Wahl der Messpunkte wettgemacht werden. In Tyler et al. (1996) ist eine solche Anordnung von vielen Messpunkten beschrieben. Dies setzt eine grosse Fläche voraus, die nicht durch starke Topographie oder ändernde Vegetation versehen ist. Eine solche Anordnung der Messpunkte war bei den Interkalibrationsmessungen mit Deutschland und Österreich aufgrund der Topographie und der limitierten Kapazität der Messequipen nicht möglich.

7.2 Interkalibration Österreich - Schweiz

Im Rahmen einer bilateralen Messübung konnte im Sommer des Jahres 1997 mit dem Aeroradiometrieteam des Nachbarlandes Österreich ein gemeinsames Gebiet befliegen werden (Bucher et al. 1998). Im folgenden werden nun die Resultate dieses Messfluges diskutiert und detailliert verglichen und analysiert.

7.2.1 Messsystem Österreich

Das österreichische Messsystem besitzt zwei NaJ-Detektorpakete (je vier Kristalle) mit einem Gesamtvolumen von 33.6 Litern, die gleichzeitig eingesetzt werden. Zusätzlich wird auch noch ein upward-looking Detektor von 4.2 Litern mitgeführt, welcher der Radonkorrektur dient. Als Spektrometer wird das System PGAM 1000 der Firma Picodas verwendet. Dabei weist jeder einzelne Kristall einen separaten Analog/Digital-Wandler sowie einen Vielkanalanalysator aus und besitzt einen eigenen Kleinrechner. Die Kleinrechner kontrollieren die Energiekalibration des jeweiligen Kristalls und verarbeiten dessen Daten. Die Spektren werden in 256 Kanälen im Energiebereich von 40 keV bis 3'000 keV ausgegeben. Zusätzlich wird die kosmische Strahlung im Energiebereich >3 MeV in einem separaten Kanal aufgezeichnet. Zur Stabilisierung des Spektrums dienen verschiedene Peaks der Thorium-Reihe (^{208}Tl). Die digitalisierten Spektren werden anschliessend an einen Datenerfassungscomputer weitergeleitet. Dieser dient zur visuellen Datenüberwachung und speichert die Spektren zusammen mit anderen Daten wie barometrischem Druck, Radarhöhe, Koordinaten usw. ab. Für die Bestimmung der Koordinaten kommt ein GPS-Gerät von Trimble zum Einsatz. Zusätzlich erfolgt ebenfalls standardmässig eine Flugaufzeichnung per Video.

Das österreichische Messsystem wird üblicherweise in einem Helikopter des österreichischen Bundesheeres vom Typ Bell 212 eingebaut. Die Detektoren befinden sich dann im Passagierraum links und rechts direkt hinter den Pilotensitzen. Neben dem aeroradiometrischen Equipment werden jeweils noch andere geophysikalische Messgeräte wie ein System für elektromagnetische Messungen und ein System für Bodenfeuchtheitsmessungen mitgeführt, die aber die radiometrischen Messungen nicht beeinflussen sollten.

7.2.2 Kalibration des österreichischen Messsystems

Die Datenauswertung des österreichischen Messteams erfolgt für die natürlichen Radionuklide nach den Standards der International Atomic Energy Agency (IAEA 1991). Sie ist ziemlich identisch mit dem in der Schweiz eingesetzten Verfahren. Etwas anders sieht es bei der Auswertung für das künstliche Radionuklid ^{137}Cs aus. Dort werden die Grenzen des interessanten Spektralbereichs (Fenster) anders gewählt. Anstelle des üblichen Fensters von 600 keV – 720 keV wird ein Fenster von 648 keV – 732 keV verwendet. Die verwendeten Fenstergrenzen sind in der Tabelle 7.5 zusammengefasst.

Tabelle 7.5: Fenstergrenzen, die vom österreichischen Messteam verwendet werden.

Bezeichnung	Isotop	Gammalinien-Energie [keV]	Untergrenze des Fensters [keV]	Obergrenze des Fensters [keV]
Total	-	-	410	2810
Kalium	^{40}K	1'460	1'370	1'570
Uran	^{214}Bi	1'760	1'660	1'860
Thorium	^{208}Tl	2'615	2'410	2'810
Cäsium	^{137}Cs	660	648	732

Die Background- und Strippingkorrektur für ^{137}Cs erfolgt nicht über die üblichen fensterspezifischen Background- und Strippingfaktoren, sondern die Höhe der Korrektur wird durch ein Trapezoid bestimmt, das durch die zwei lokalen Minima im Energiebereich von 540 keV bis 732 keV definiert wird (Oberlercher 1999).

Die Backgroundkorrekturen für den Helikopter und das Messsystem sowie die kosmischen Streufaktoren werden mit Messflügen über Wasser bestimmt (Tabelle 7.6). Im Vergleich mit den Schweizer Werten (Tabelle 7.1) sind die kosmischen Streufaktoren allesamt viel tiefer. Bei Thorium ist der österreichische Wert vier Mal kleiner, bei Kalium beträgt er rund die Hälfte. Für das Cäsiumfenster sind keine Werte angegeben, da dieses Fenster mit der oben beschriebenen Trapezmethode korrigiert wird.

Tabelle 7.6: Österreichische Backgroundwerte und kosmische Streufaktoren für die in der Auswertung verwendeten Fenster.

Fenster	Isotop	Background [cps]	Kosmischer Streufaktor
Kalium	^{40}K	13.2	0.023
Uran	^{214}Bi	6.8	0.019
Thorium	^{208}Tl	3.3	0.011

Die Streufaktoren werden mit Hilfe von Calibration Pads bestimmt (siehe auch Kapitel 7.1). In Tabelle 7.7 sind die Streufaktoren für das österreichische Messsystem aufgeführt. Vollständigkeitshalber sind auch die Streufaktoren für das ^{137}Cs Fenster aufgeführt, die bei der Standardauswertung jedoch nicht mehr verwendet werden.

Vergleicht man die Streufaktoren aus Tabelle 7.7 mit denen des Schweizer Messsystems (Tabelle 7.2), sind vor allem bei der Thoriumquelle markante Unterschiede festzustellen. Die österreichischen Streufaktoren von Thorium ins Kalium- und Uranfenster betragen nur rund 50 % der Schweizer Werte. Die Faktoren für die Uranquelle hingegen sind praktisch identisch. Aufgrund des kleineren Cäsiumfensters sind die im Vergleich mit den Schweizer Werten viel kleineren Streufaktoren zu verstehen. Aber auch hier liegt der Wert der Thoriumquelle nochmals tiefer als erwartet (~Faktor 3).

Tabelle 7.7: Mit Calibration Pads bestimmte Streufaktoren des österreichischen Messteams innerhalb der Geologischen Bundesanstalt in Wien (GBA).

Quelle \ Fenster	Kalium	Uran	Thorium	Caesium
Kalium	1.00	0.74	0.26	0.00
Uran	0.00	1.00	0.18	0.00
Thorium	0.00	0.05	1.00	0.00
Caesium	0.16	2.10	0.77	1.00

Die Abschwächungskoeffizienten, die das österreichische Messteam verwendet, sind in Tabelle 7.8 zusammen mit den schweizerischen Werten angegeben. Während die Werte für Kalium und Thorium sehr gut übereinstimmen, liegen diejenigen für Uran weiter auseinander. Dies könnte auf die später in Kapitel 7.2.4 erwähnten Stabilitätsprobleme zurückzuführen sein.

Tabelle 7.8: Abschwächungskoeffizienten der beiden Teams aus Österreich und der Schweiz.

Fenster	Abschwächungskoeffizienten [m^{-1}]	
	Team Österreich	Team Schweiz
Kalium	0.0078	0.0080
Uran	0.0071	0.0055
Thorium	0.0059	0.0060
Caesium	0.0083	0.0100

Für die Umrechnung der korrigierten Zählraten in Bodenkonzentrationen steht ein Kalibriergelände (0.7 km x 1.8 km) in Allensteig (Niederösterreich) zur Verfügung (Oberlercher 1997). Die Faktoren sind mit den schweizerischen Werten in Tabelle 7.9 zusammengefasst.

Tabelle 7.9: Umrechnungsfaktoren von Zählraten in Konzentrationen bzw. Aktivitäten der beiden Teams aus Österreich und der Schweiz.

Fenster	Umrechnungsfaktoren	
	Team Österreich [Bq/kg per cps]	Team Schweiz [Bq/kg per cps]
Kalium	6.53	8.29
Uran	1.83	4.00
Thorium	1.10	1.67
Caesium	2.50	2.00

Erstaunlich sind die doch eher hohen Umrechnungsfaktoren des österreichischen Teams. Da ihr Detektorvolumen mit 33.6 Litern gerade dem doppelten des schweizerischen entspricht, hätte man deutlich niedrigere Werte erwartet. Da die Detektoren jedoch bei den Messflügen im

Passagierraum mitgeführt werden, ist die Abschirmung durch den Rumpf des Helikopters, der die Treibstofftanks enthält, wesentlich höher als beim Super Puma der Schweiz. Denn dort wird der Detektor in einem Schacht im Rumpf des Helikopters montiert, wo die Abschirmung nach unten praktisch vernachlässigbar ist.

7.2.3 Interkalibrationsmessung

Die Interkalibrationsmessung fand am 10. Juni 1997 in einem Gebiet von rund 7 km x 7 km in den Öztaler Alpen in Österreich nahe der schweizerischen und italienischen Grenze statt. Das Messgebiet nahe der Gemeinde Nauders/A wurde von beiden Messteams mit 14 Fluglinien in einem Abstand von 500 m abgedeckt. Geplant war auch ein Messflug über dem nahe gelegenen Gepatsch-Stausee sowie ein Steigflug in geringer Höhe. Leider konnten diese zwei Vorhaben vom österreichischen Team nicht realisiert werden.

Gleichzeitig zu den Messflügen wurden im selben Gebiet durch Teams der Sektion für die Überwachung der Radioaktivität (SUER, Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz) und der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) gammaspektrometrische Bodenmessungen durchgeführt. Aufgrund des starken Reliefs waren Messungen nur im Talgrund möglich (Abbildung 7.1). Neben insitu Gammaskpektrometrie wurde auch jeweils eine Dosisleistungsmessung mit einer Reuter Stokes Ionisationskammer durchgeführt.

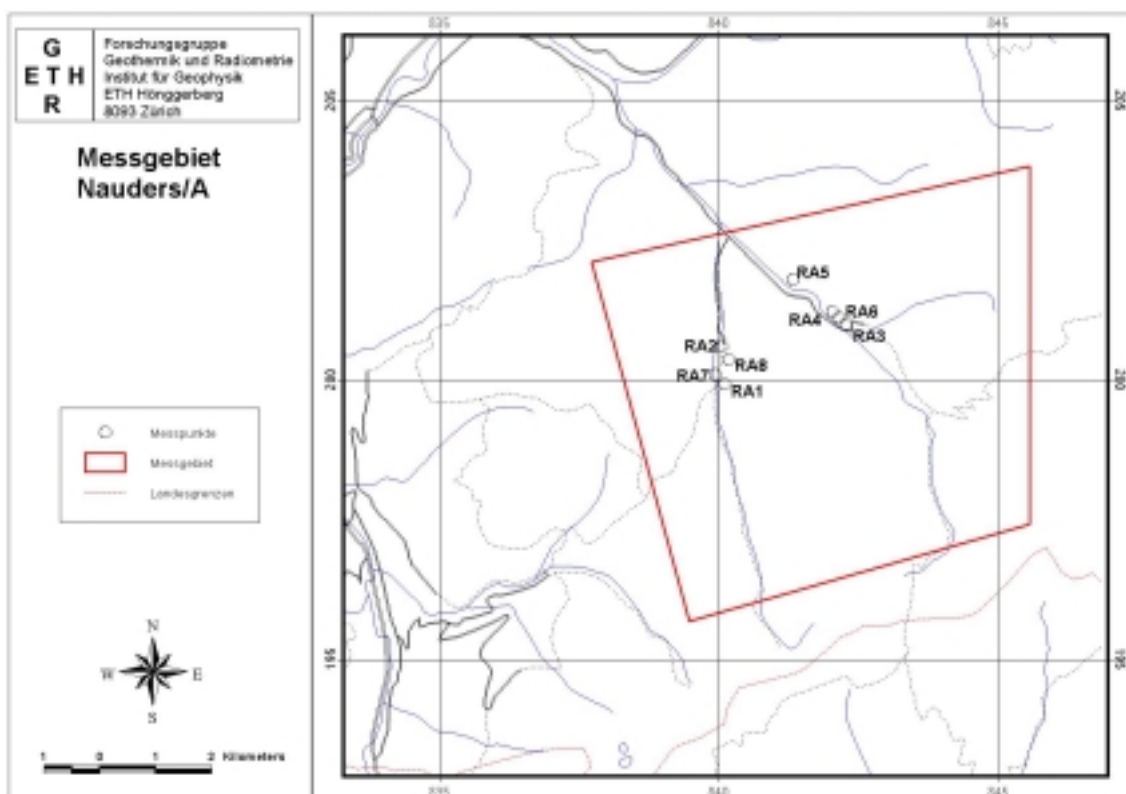


Abbildung 7.1: Situation des Messgebietes Nauders/A mit den eingezeichneten Messpunkten, wo gammaspektrometrische Bodenmessungen durchgeführt wurden. Die blauen Linien auf der Karte stellen die Gewässer dar, die schwarzen Strassen und Wege. Die unterbrochene rote Linie im Süden des Messgebietes ist die Landesgrenze zwischen Österreich und Italien. Kartendaten: VECTOR200 © 1999 Bundesamt für Landestopographie (DV1429).

Flugtechnische Probleme für beide Teams bereitete die sehr starke Topographie mit Höhen von 1'200 m bis über 3'000 m. Dies führte dann auch zu Schwierigkeiten bei der Einhaltung der Sollflughöhe von 100 m über Grund. So lagen vor allem über den engen Tälern die Flughöhen teilweise weit über 200 m. Solch grosse Flughöhen führen zu kaum vernünftig auswertbaren Spektren, da die Zählraten sehr niedrig sind und so zu grossen statistischen Fehlern führen.

7.2.4 Datenvergleich

Vom österreichischen Messteam lagen für einen Vergleich nur die ausgewerteten Daten sowie die unkorrigierten Fensterwerte vor. Neben den radiometrischen Messwerten waren in den Daten auch die Koordinaten des jeweiligen Punktes, die Flughöhen über Grund, die Barometerhöhe, die kosmische Zählrate und die Zählrate des upward-looking Detektors enthalten.

In einem ersten Schritt mussten die Koordinaten, die im österreichischen Koordinatensystem (Bundesmeldenetz) vorlagen, in Schweizer Landeskoordinaten umgewandelt werden. Dazu konnte eine Routine von G. Oberlercher (GBA) verwendet werden, mit der die österreichischen Koordinaten ins WGS84 Koordinatensystem (WGS84: World Geodetic System 1984) transformiert wurden. Anschliessend wurden diese mit vorhandenen Routinen in Schweizer Landeskoordinaten umgerechnet.

Für die folgenden Ergebnisse wurden aus den ausgewerteten Daten der beiden Teams nuklidspezifische Grids der Aktivitäten (Maschenweite von 250 m) erstellt. Aus den Grids wurde jeweils ein Datensatz mit Wertepaaren für jede Zelle des Grids gebildet. Für die statistischen Berechnungen wurden nur diejenigen Zellen verwendet, für die beide Grids einen Wert enthielten.

Aus Tabelle 7.10 ist ersichtlich, dass sich die Datensätze zum Teil massiv unterscheiden. Beim ^{238}U beträgt der Mittelwert der österreichischen Resultate mehr als das doppelte der Schweizer Ergebnisse. Der maximale Wert unterscheidet sich jedoch kaum. Besser sieht es beim ^{40}K und ^{232}Th aus. Die Mittelwerte unterscheiden sich ebenfalls deutlich, liegen jedoch nur um ca. 20 % auseinander. Die Unterschiede bei Median, Minimal- und Maximalwert sind in der selben Grössenordnung. Die Unterschiede beim ^{137}Cs sind sehr deutlich. Der Mittelwert der österreichischen Resultate ist rund doppelt so gross wie derjenige der schweizerischen Ergebnisse. Ebenfalls sind Minimal- und Maximalwert deutlich grösser. Die berechnete Korrelation von 0.388 ist ernüchternd und ist praktisch identisch mit der Korrelation der Datensätze von ^{238}U . Etwas besser sieht es bei ^{232}Th aus. Die beste Korrelation weisen die ^{40}K Datensätze auf. Die geringen Unterschiede zwischen Mittelwerten und Median zeigen auf, dass nicht viele oder praktisch keine Ausreisser in den Datensätzen vorkommen.

Tabelle 7.10: Statistische Werte für die einzelnen Datensätze.

Nuklid	Team	Mittel [Bq/kg]	Stdev. [Bq/kg]	Median [Bq/kg]	Min. [Bq/kg]	Max. [Bq/kg]	Korrel.
⁴⁰ K	A	752.4	168.1	750.2	249.4	1302.5	0.636
	CH	673.8	183.2	667.4	158.8	1173.6	
²³⁸ U	A	53.0	14.7	52.5	6.9	127.5	0.385
	CH	20.3	16.0	18.3	0.0	133.6	
²³² Th	A	19.3	4.8	19.1	5.0	37.6	0.504
	CH	24.9	7.0	24.0	6.5	53.3	
¹³⁷ Cs	A	161.1	22.6	159.4	101.4	279.3	0.388
	CH	85.6	30.4	86.2	7.7	193.6	

Für die Überprüfung der Kalibration wurden im Messgebiet, das aeroradiometrisch vermessen wurde, auch gammaspektrometrische Bodenmessungen durchgeführt. In der Abbildung 7.2 sind die aeroradiometrischen Resultate der beiden Teams gegen die Resultate der gammaspektrometrischen Bodenmessungen aufgetragen.

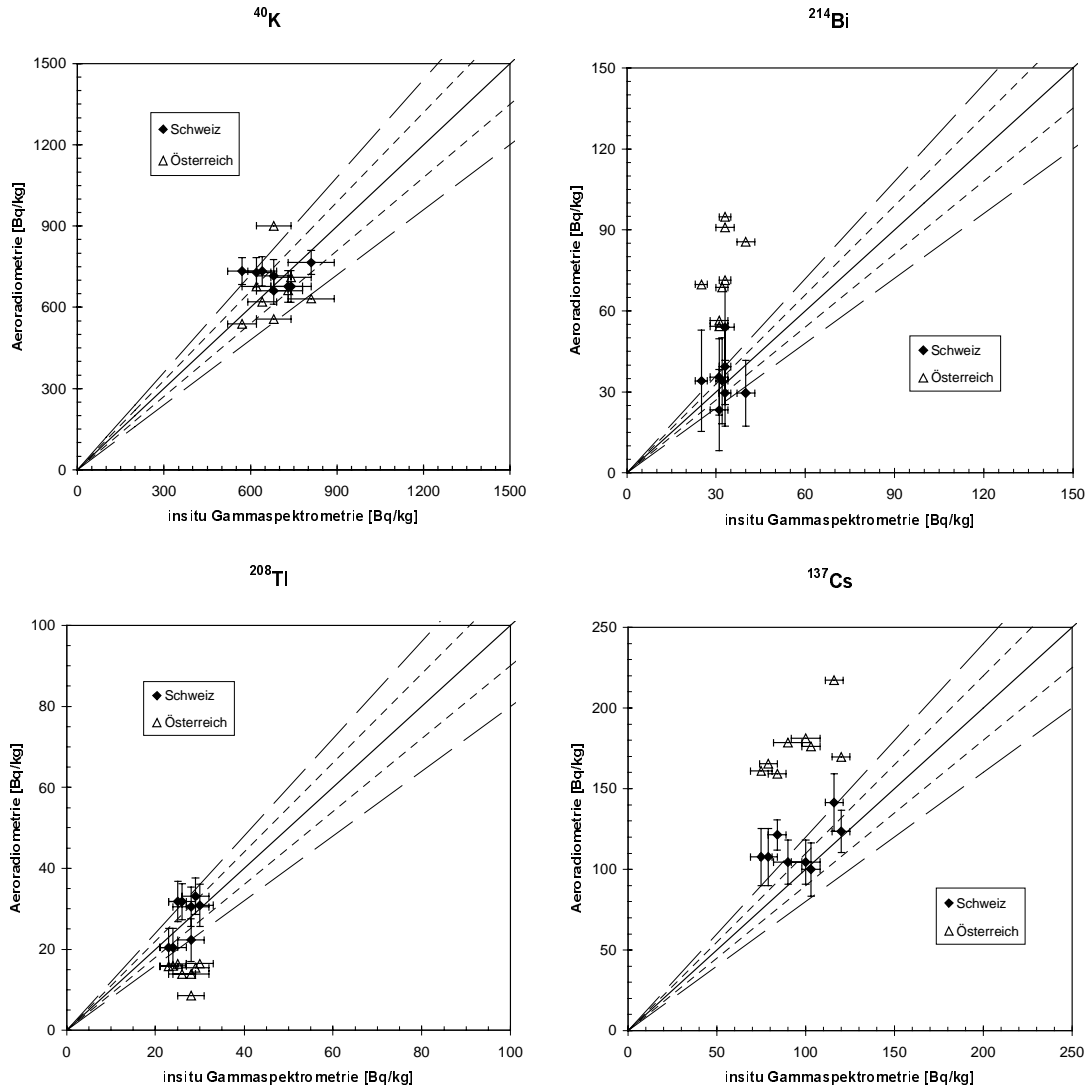


Abbildung 7.2: Vergleich der gammaspektrometrischen Bodenmessungen mit den entsprechenden Resultaten aus der Aeroradiometrie der beiden Teams aus Österreich und der Schweiz. Die durchgezogene Linie stellt die 45 °-Gerade dar, die kurz gestrichelte die 10 %-Abweichungsgerade und die lang gestrichelte die 20 %-Abweichungsgerade. Für die österreichischen Aeroradiometrieresultate werden keine Fehler angegeben, da die entsprechenden Daten nicht vorliegen.

Die Ergebnisse für ^{40}K stimmen bei beiden Aeroradiometrieteams sehr gut mit den Bodenmessungen überein. Sie liegen mit einer Ausnahme alle innerhalb der 20 %-Abweichungsgeraden. Bei den anderen Radionukliden sind jedoch grössere Abweichungen zu sehen. Während die Schweizer Werte sehr gute Übereinstimmung mit den Bodenmessungen aufweisen, weichen die österreichischen Resultate zum Teil sehr stark ab. Die grössten Abweichungen sind bei ^{214}Bi und ^{137}Cs festzustellen.

Um die Ursachen für die grossen Abweichungen einerseits zwischen den beiden Messteams und andererseits zwischen den österreichischen Aeroradiometriewerten und den Bodenmessungen zu erforschen, wurden die Rohdaten etwas genauer betrachtet. In der Abbildung 7.3 ist für beide Teams je ein gemittelttes Spektrum aus dem Messgebiet von Nauders dargestellt. Es fällt auf, dass das österreichische Spektrum bei rund 200 keV nach tieferen Energien hin abgeschnitten

ist. Die Zählraten im Spektrum des Teams Österreich (A) liegen im Energiebereich unter 1'000 keV über denen des Teams Schweiz (CH). Im oberen Bereich des Spektrums liegen die Zählraten der beiden Spektren auf dem gleichen Niveau. In diesem Teil des Spektrums fallen der doch eher breite Peak von ^{40}K , der praktisch fehlende Peak von ^{214}Bi aus der ^{238}U -Reihe bei 1'760 keV und der fehlende Peak von ^{214}Bi bei 2'190 keV auf. Die Peaks für ^{208}Tl aus der ^{232}Th -Reihe bei 2'615 keV stimmen dann bei den beiden gemittelten Spektren wieder sehr gut überein.

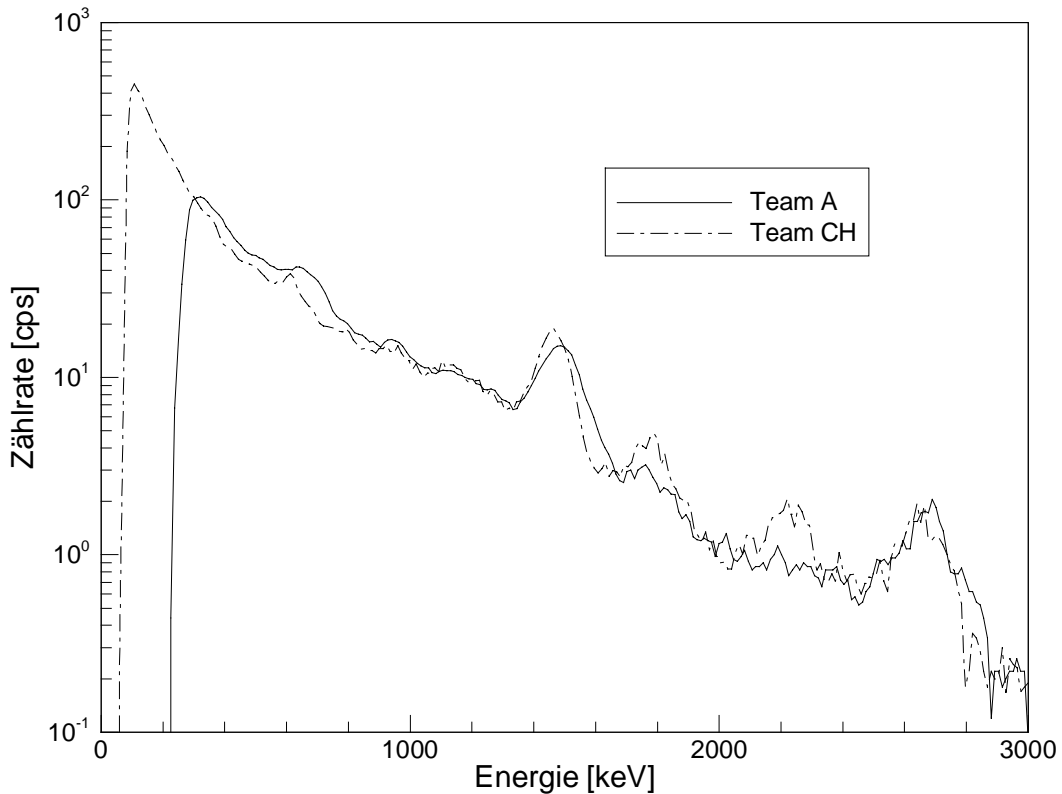


Abbildung 7.3: Summenspektren über einige Messpunkte im Messgebiet Nauders/A.

Aufgrund des doppelten Detektorvolumens beim österreichischen Messsystem wären deutlich höhere Zählraten als beim schweizerischen System zu erwarten. Das grössere Volumen wird jedoch durch die schlechtere Position der Detektoren im Passagierraum über den Tanks wieder zunichte gemacht. Die Position über den Tanks scheint auch zu etwas mehr Streustrahlung (im unteren Bereich des Spektrums) zu führen. Der breite ^{40}K Peak und die praktisch fehlenden ^{214}Bi Peaks weisen auf Stabilitätsprobleme des Spektrometers hin. Das österreichische Messteam bestätigte dann auch, Probleme mit der Stabilisierung der Spektren zu haben. Dies erklärt auch die grossen Unterschiede in den ^{238}U und ^{137}Cs Resultaten.

Neben diesen Spektrometer bezogenen Problemen zeigte eine Analyse der Flughöhen über Grund ebenfalls einen Fehlerherd auf. Denn aufgrund des starken Relief im Messgebiet und der eher geringen Leistungsfähigkeit des österreichischen Helikopters, lagen die österreichischen Flughöhen in grossen Bereichen über 300 m. Bei diesen Werten kann sich bereits ein kleiner Fehler in der Kalibration sehr stark auswirken.

7.3 Interkalibration Deutschland - Schweiz

Im Rahmen einer bilateralen Messübung konnte im Sommer des Jahres 1999 mit dem Aeroradiometrieteam des Bundesamtes für Strahlenschutz aus Deutschland ein gemeinsames Gebiet im Schwarzwald/D befliegen werden (Bucher et al. 2000). Im folgenden werden nun die Resultate dieses Messfluges diskutiert und detailliert verglichen und analysiert.

7.3.1 Das deutsche Messsystem

Das deutsche Messsystem beinhaltet sowohl einen Halbleiterdetektor (Germanium, 50 % Efficiency) als auch einen NaJ-Detektor. Auf den Halbleiterdetektor wird hier nicht näher eingegangen. Der NaJ-Detektor besteht aus drei Kristallen mit den Massen 4“ x 4“ x 16“ und je vier Litern Volumen. Die Kristalle müssen einzeln von Hand über Potentiometer kalibriert werden. Es gibt keine automatische Spektrumssatbilisation. Die Ausgangssignale der Kristalle werden gemeinsam auf einen Vielkanalanalysator der Firma Target geführt, wo sie analysiert und in die 1'024 Kanäle aufgeteilt werden. Anschliessend werden die Spektren ausgelesen und zusammen mit Radarhöhe, Position (vom GPS-Empfänger Globus 2000) und einer Reihe anderer Daten auf einer MO-Disk (MO: Magneto-optical) gespeichert. Die Spektren decken den Energiebereich von 40 keV bis 3'000 keV ab. Es wird keine kosmische Zählrate (> 3 MeV) registriert.

Üblicherweise wird das deutsche Messsystem in einen Helikopter vom Typ Allouette II des Bundesgrenzschutzes eingebaut (Abbildung 7.4). Das ganze Messsystem wird hinter dem Pilotensitz eingerichtet und von einem Operator bedient.

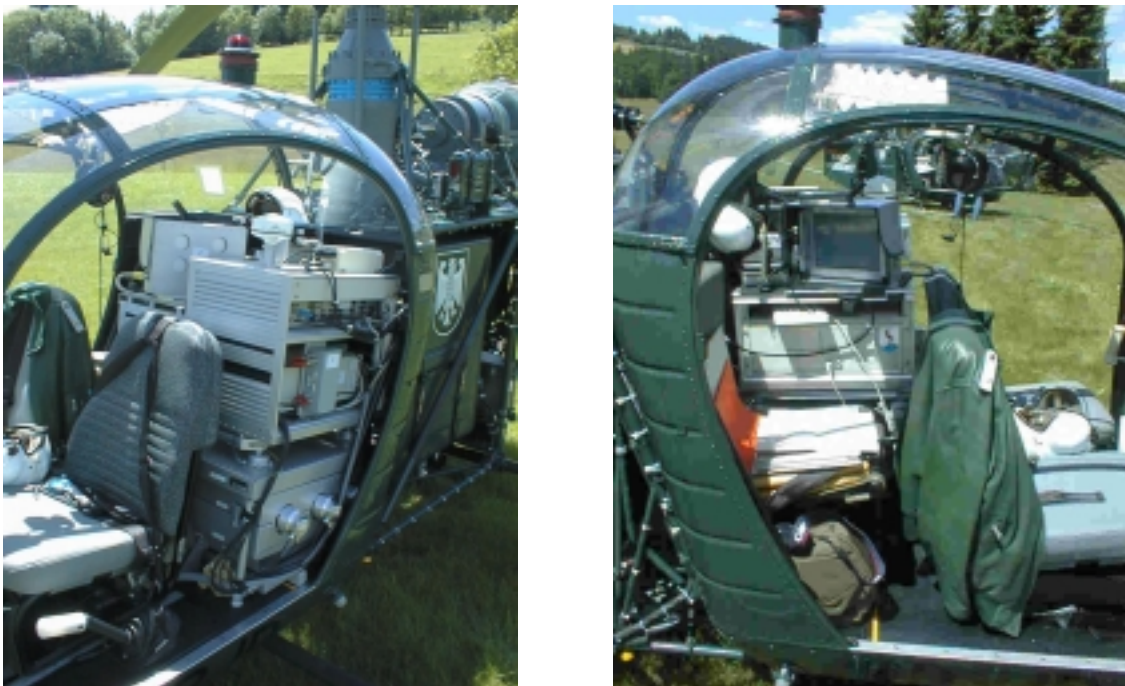


Abbildung 7.4: Das deutsche Messsystem eingebaut in den Helikopter des Bundesgrenzschutzes. Auf dem linken Bild sind unten die Ausgänge der Kristalle zu sehen.

Bei den gemeinsamen Messflügen im Rahmen der Interkalibrationsmessung kamen auf deutscher Seite zwei identische, wie oben beschriebene Messsysteme zum Einsatz. Im folgenden werden diese zwei Systeme mit Messsystem A und Messsystem B bezeichnet.

7.3.2 Kalibration des deutschen Messsystems

Für die Auswertung der Messdaten wird ebenfalls eine Fenstermethode verwendet. Die Fenster sind mit Ausnahme des Uranfensters gleich definiert wie die des Schweizer Teams. Ihre Grenzen können der Tabelle 7.11 entnommen werden. Bei der Fenstermethode besteht der erste Schritt der Datenverarbeitung in der Reduktion der Spektren auf Fensterwerte.

Tabelle 7.11: Definition der Fenster, die vom deutschen Aeroradiometrieteam verwendet werden.

Bezeichnung	Isotop	Gammalinien-Energie [keV]	Untergrenze des Fensters [keV]	Obergrenze des Fensters [keV]
Kalium	⁴⁰ K	1'460	1'360	1'560
Uran	²¹⁴ Bi	1'760	1'665	1'885
Thorium	²⁰⁸ Tl	2'615	2'415	2'815
Cäsium	¹³⁷ Cs	660	600	720
Kobalt	⁶⁰ Co	-	1'100	1'400

Diese werden dann für die Hintergrundstrahlung korrigiert. Dabei wird beim deutschen Team ein konstanter, fensterspezifischer Wert abgezogen. Es wird keine separate Korrektur für die kosmische Streustrahlung vorgenommen. Dies ist auch nicht möglich, da keine kosmischen Zählraten registriert und auch weder Barometerhöhe noch GPS-Höhe aufgezeichnet werden. Die fensterspezifischen Werte für die Backgroundkorrektur werden aus Flügen über grossen Wasserflächen bestimmt. Die Werte für die bei der Interkalibrationsmessung zum Einsatz gekommenen zwei identischen deutschen Messsysteme A und B sind in der Tabelle 7.12 zusammengefasst. Dabei fällt auf, dass die Werte für die beiden Systeme nicht übereinstimmen, obwohl es sich um identische Messsysteme handelt.

Tabelle 7.12: Fensterspezifische Backgroundkorrekturwerte für die beiden deutschen Messsysteme.

Fenster	Isotop	Background [cps]	
		Messsystem A	Messsystem B
Kalium	⁴⁰ K	12.5	16.1
Uran	²¹⁴ Bi	5.5	5.7
Thorium	²⁰⁸ Tl	4.7	5.7
Cäsium	¹³⁷ Cs	20.6	24.3

Die Form der Kristalle im deutschen Messsystem entspricht denjenigen, die auch die Kristalle des Schweizer Messteams aufweisen. Deshalb sollten auch die Streufaktoren vergleichbar sein. Vergleicht man die deutschen Streufaktoren (Tabelle 7.13) mit den korrigierten schweizerischen (Tabelle 7.2), ist zu erkennen, dass sich vor allem die Streufaktoren von Uran und Thorium ins Cäsiumfenster unterscheiden. Die deutschen Werte sind kleiner, bei Uran sogar um mehr als 30 %. Hingegen sind die Streufaktoren von Uran und Thorium ins Kaliumfenster beim deutschen Team grösser. Ansonsten stimmen die Streufaktoren der beiden Teams innerhalb der Unsicherheiten (mit Ausnahme von Kobalt ins Kaliumfenster) recht gut überein.

Tabelle 7.13: Mit Calibration Pads bestimmte Streufaktoren des deutschen Messteams vom BfS.

Quelle Fenster	Kalium	Uran	Thorium	Caesium	Kobalt
Kalium	1.00	0.99	0.57	0.00	0.12
Uran	0.00	1.00	0.33	0.00	0.00
Thorium	0.00	0.09	1.00	0.00	0.00
Caesium	0.57	2.65	1.68	1.00	0.26
Kobalt	0.69	2.15	0.83	0.00	1.00

Nach der Korrektur für die Streustrahlung erfolgt die Normalisierungskorrektur für die Flughöhe. Dabei werden vom deutschen Team zwei verschiedene Verfahren angewandt. Bei einer Sofortauswertung vor Ort wird eine einfache Exponentialfunktion verwendet. Bei einer detaillierteren Auswertung wird ein Geometriefaktor (analog zu insitu Gammaskpektrometriemessungen) als Funktion der Höhe, der Energie und des Verteilungsmodells bestimmt (Sanderson & McLeod, 1999). Für die einfache exponentiale Höhenkorrektur werden theoretische Abschwächungskoeffizienten verwendet, die nach der Formel 7.2 berechnet werden.

$$\mu_L = e^{(a_0 + a_1 \cdot \ln(E) + a_2 \cdot \ln^2(E))} \quad (7.2)$$

wobei μ_L den Abschwächungskoeffizienten der Luft und E die mittlere Energie des Fensters darstellt. Die Konstanten haben die Werte: $a_0 = -3.7012$; $a_1 = 0.141$; $a_2 = -0.0449$.

Schliesslich werden die Nettozählraten mit Hilfe von Kalibrationsfaktoren in Aktivitäten umgerechnet. Die vom deutschen Messteam verwendeten Faktoren sind in der Tabelle 7.14 zusammengefasst. Sie wurden mit Hilfe von Vergleichen zwischen aeroradiometrischen Messungen und Bodenmessungen bestimmt.

Tabelle 7.14: Nuklidspezifische Umrechnungsfaktoren von Zählraten in Aktivitäten. Zu Vergleichszwecken sind sowohl die vom deutschen Team als auch die vom schweizerischen Team verwendeten Faktoren angegeben.

Fenster	Isotop	Umrechnungsfaktoren	
		Team Deutschland [Bq/kg per cps]	Team Schweiz [Bq/kg per cps]
Kalium	⁴⁰ K	14.24	8.29
Uran	²¹⁴ Bi	6.25	4.0
Thorium	²⁰⁸ Tl	1.08	1.67
Cäsium	¹³⁷ Cs	~2.9*	2.0

*Bestimmt aus dem Umrechnungsfaktor von 288.50 Bq/m² per cps unter der Annahme, dass sich alles Cäsium in den obersten 5 cm des Bodens befindet.

Aufgrund des kleineren Detektorvolumens bei den deutschen Messsystemen sind die deutschen Umrechnungsfaktoren grösser als die schweizerischen. Die deutschen Werte in Tabelle 7.14, mit Ausnahme desjenigen für Thorium, sind jedoch noch grösser als sie aufgrund des Volumenunterschiedes sein sollten. Dies könnte auf eine stärkere Abschwächung durch den Boden des Helikopters hinweisen. Als Ausnahme ist der deutsche Umrechnungsfaktor für Thorium kleiner als der schweizerische. Dieses Verhalten steht im Widerspruch zum Verhalten der übrigen Umrechnungsfaktoren. Dies ist praktisch nur durch eine fehlerhafte Kalibration zu erklären, die in einer zu geringen Backgroundkorrektur (Background und kosmische Streustrahlung) oder einem nicht linearen Verhalten des Spektrometers liegen könnte.

7.3.3 Interkalibrationsmessung

Das gemeinsame Messgebiet Menzenschwand liegt im Schwarzwald/D, der viele granitische Einheiten aufweist. Bei Menzenschwand befindet sich die ehemalige Uranerzgrube Krunkelbach, die jedoch stillgelegt und zurückgebaut wurde. Das Messgebiet war ca. 7 km x 7 km gross und lag zwischen 800 m und 1'400 m über Meer.

Die Topographie führte nur an wenigen Punkten zu Schwierigkeiten und war weit weniger stark als im Messgebiet Nauders/A (siehe Kapitel 7.2). So konnte auch die Sollflughöhe von 100 m ziemlich gut eingehalten werden.

In Altglashütten/D befand sich der temporäre Landeplatz der beiden Messteams für die gemeinsame Übung vom 23. Juni 1999. Dort wurde dann auch von beiden Teams ein Steigflug durchgeführt. Über dem nahegelegenen Schluchsee wurde ebenfalls eine gemeinsame Messlinie geflogen. Während das schweizerische Team in parallelen Messlinien (Linienabstand 250 m) in Nord-Süd-Richtung das Messgebiet abflog, wählten die deutschen Teams in einer ersten Phase das Konturensuchverfahren. Dabei versuchen die Piloten entlang der Höhenlinien zu fliegen, um möglichst wenig rauf und runter fliegen zu müssen. Denn die eingesetzten Helikopter vom Typ Allouette II besitzen eine eher beschränkte Leistung. In einer zweiten Phase flogen sie dann ebenfalls in parallelen Linien, da der östliche Teil des Messgebietes topographisch weniger anspruchsvoll war.

Neben den aeroradiometrischen Messungen führte ein Messteam der SUER gleichzeitig gammaspektrometrische Bodenmessungen im gleichen Gebiet durch. An jedem Messpunkt wurde auch mit Hilfe einer Reuter Stokes Ionisationskammer (RSS) die externe Dosisleistung gemessen. Diese Bodenmessungen dienten vor allem der Überprüfung der aeroradiometrischen Resultate.

7.3.4 Datenvergleich

Vom deutschen Messteam lagen sowohl die ausgewerteten Daten in Form von EXCEL-Tabellen als auch die Rohdaten in einem binären Format vor. Bei den ausgewerteten Daten ist für jeden Messpunkt die Position in WGS84- und Gauss-Krüger-Koordinaten, die Flughöhe, die Dosisleistung in der Höhe von 1 m über Grund und die Aktivitäten für die Radioisotope ^{40}K , ^{214}Bi , ^{208}Tl und ^{137}Cs gegeben. Um die Resultate ortsabhängig vergleichen zu können, müssen die Koordinaten im selben Koordinatensystem dargestellt werden. Dazu sind je nachdem verschiedene Koordinatentransformationen notwendig. Solange die Messungen im Grenzbereich der Schweiz stattfinden, sind Schweizer Landeskoordinaten einsetzbar. Deshalb wurden die deutschen Daten in Schweizer Landeskoordinaten umgewandelt.

In einem ersten Schritt wurden die ausgewerteten Resultate, die als Aktivitäten vorlagen, in nuklidspezifische Grids (Maschenweite 125 m) umgewandelt. Dann wurden die Zellen der deutschen und schweizerischen Grids statistisch analysiert. Die entsprechenden Ergebnisse sind in der Tabelle 7.15 zusammengefasst. Dabei wurden die ^{137}Cs Aktivitäten des deutschen Teams, die in der Einheit Bq/m^2 vorlagen, in Volumenaktivitäten umgerechnet, wobei angenommen wurde, dass sich sämtliche Aktivität in den obersten 5 cm befindet.

Tabelle 7.15: Statistische Werte für die einzelnen Datensätze.

Nuklid	Team	Mittel [Bq/kg]	Stdev. [Bq/kg]	Median [Bq/kg]	Min. [Bq/kg]	Max. [Bq/kg]	Korrel.
^{40}K	D	846.7	292.3	884.6	1.0	1686.0	0.691
	CH	585.0	156.4	608.2	77.6	1087.8	
^{238}U	D	96.0	33.9	90.8	12.0	308.6	0.111
	CH	34.1	14.5	33.2	0.0	112.2	
^{232}Th	D	20.4	9.0	18.0	1.7	79.0	0.786
	CH	27.9	11.7	24.8	4.0	120.8	
^{137}Cs	D	81.3	42.3	70.2	9.8	311.0	0.155
	CH	41.2	13.4	40.4	0.0	115.4	
ODL ¹⁾	D	129.0	43.4	125.6	39.0	324.6	0.650
	CH	124.6	16.3	123.4	70.8	249.5	

¹⁾: ODL steht für Ortsdosisleistung [nSv/h].

Betrachtet man die Mittelwerte in Tabelle 7.15, erkennt man die deutlich höheren Werte des deutschen Messteams für ^{40}K , ^{238}U (bzw. ^{214}Bi) und ^{137}Cs . Bei Thorium liegen die deutschen

Resultate im Mittel deutlich unter den schweizerischen. Bei der Ortsdosisleistung liegen die Mittelwerte ziemlich nahe beisammen. Die Korrelationen zwischen den Datensätzen der beiden Messteams sind sehr unterschiedlich. Während für die Datensätze von Kalium, Thorium und der Dosisleistung gute Korrelationen bestehen (>0.65), sind die Werte für Uran und Cäsium sehr tief.

Zur Überprüfung der Resultate werden nun die im Messgebiet erfolgten gammaspektrometrischen Bodenmessungen hinzugezogen. In der Abbildung 7.5 sind die aeroradiometrischen Resultate gegen diejenigen der Bodenmessungen aufgetragen. Für die aeroradiometrischen Resultate des schweizerischen Teams sind auch die entsprechenden Unsicherheiten eingezeichnet. Bei den deutschen Resultaten fehlen diese, da keine Angaben über die Fehler vorlagen. Ebenfalls sind die Unsicherheiten für die Resultate der insitu Gammaspektrometrie gegeben.

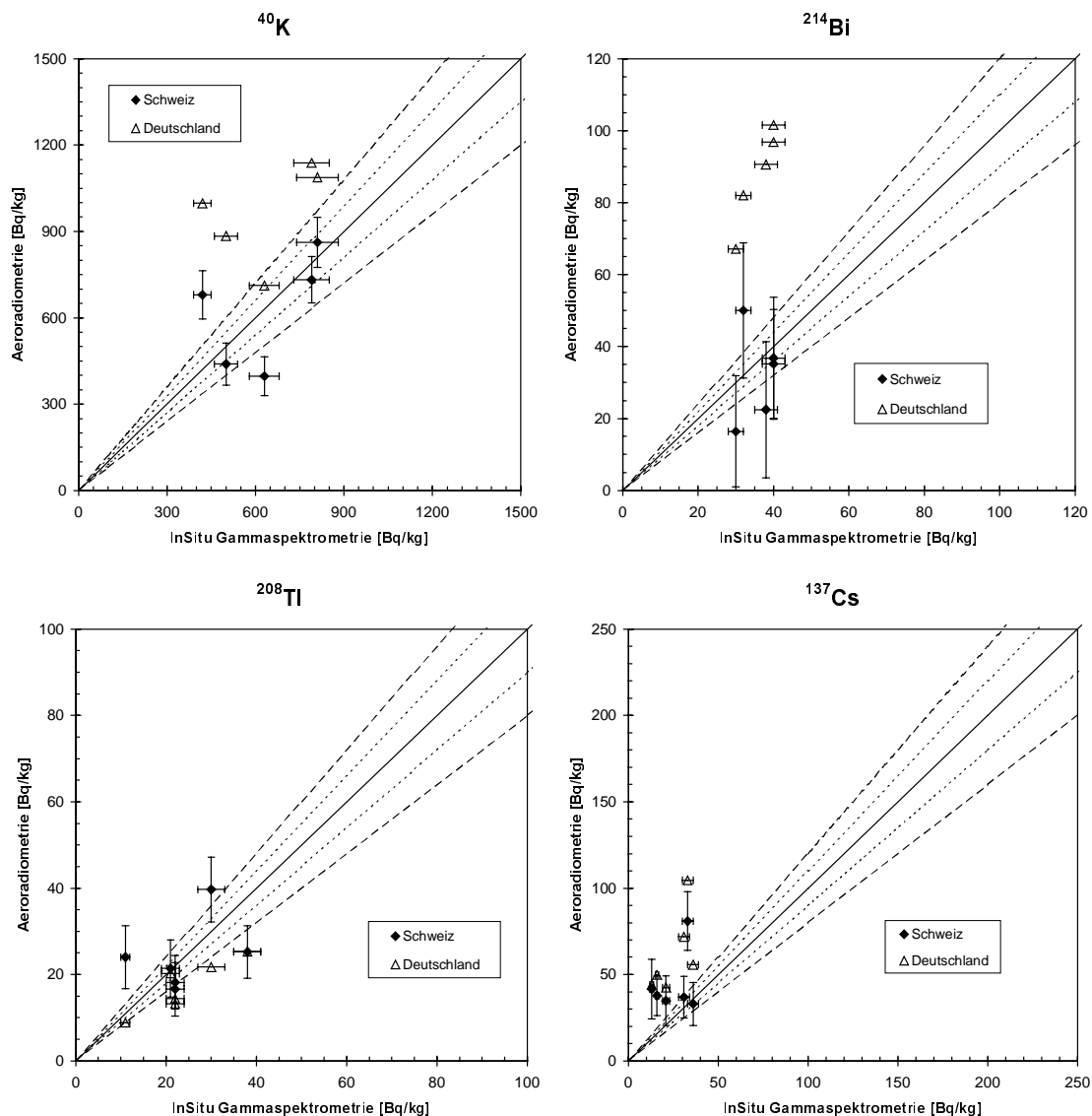


Abbildung 7.5: Vergleich der aeroradiometrischen Resultate mit denjenigen der insitu Gammaspektrometrie. Die ausgezogene Linie stellt die 45° Gerade dar. Die feingestrichelten Geraden bezeichnen die Abweichungen um 10 %, die gröber gestrichelten die Abweichungen von 20 %.

Die aeroradiometrischen Ergebnisse des Schweizer Teams (Abbildung 7.5) zeigen mit Ausnahme von ^{137}Cs innerhalb der Unsicherheiten eine gute Übereinstimmung. Bei ^{137}Cs sind die Schweizer Resultate durchgehend zu hoch. Dies lässt darauf schliessen, dass die Kalibration für ^{137}Cs nicht gut genug ist.

Die deutschen Ergebnisse zeigen in Abbildung 7.5 mit Ausnahme von Thorium keine gute Übereinstimmung. Sie liegen zum Teil massiv zu hoch. So sind zum Beispiel die Werte für ^{214}Bi rund doppelt so gross, wie sie aufgrund der Bodenmessungen sein sollten. Die deutschen Werte für Thorium liegen nahe bei den schweizerischen Resultaten, sind aber eher zu tief.

Aufgrund dieser Ergebnisse ist anzunehmen, dass beim deutschen Team ein Problem in der Kalibration des Messsystems besteht. Vergleicht man grob die deutschen und schweizerischen Ergebnisse für ^{40}K (Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7), fallen neben Gebieten, die relativ gut übereinstimmen, Regionen auf, die sich deutlich vom Rest des Messgebietes unterscheiden. Vor allem im Nordwesten des Messgebietes wiesen die deutschen Resultate deutlich tiefere Werte auf. Die Werte waren sogar innerhalb der deutschen Ergebnisse sehr tief (Abbildung 7.7). Da das entsprechende Gebiet exakt einem Messflug des deutschen Teams entsprach, konnte auch ein systematischer Fehler vorliegen.

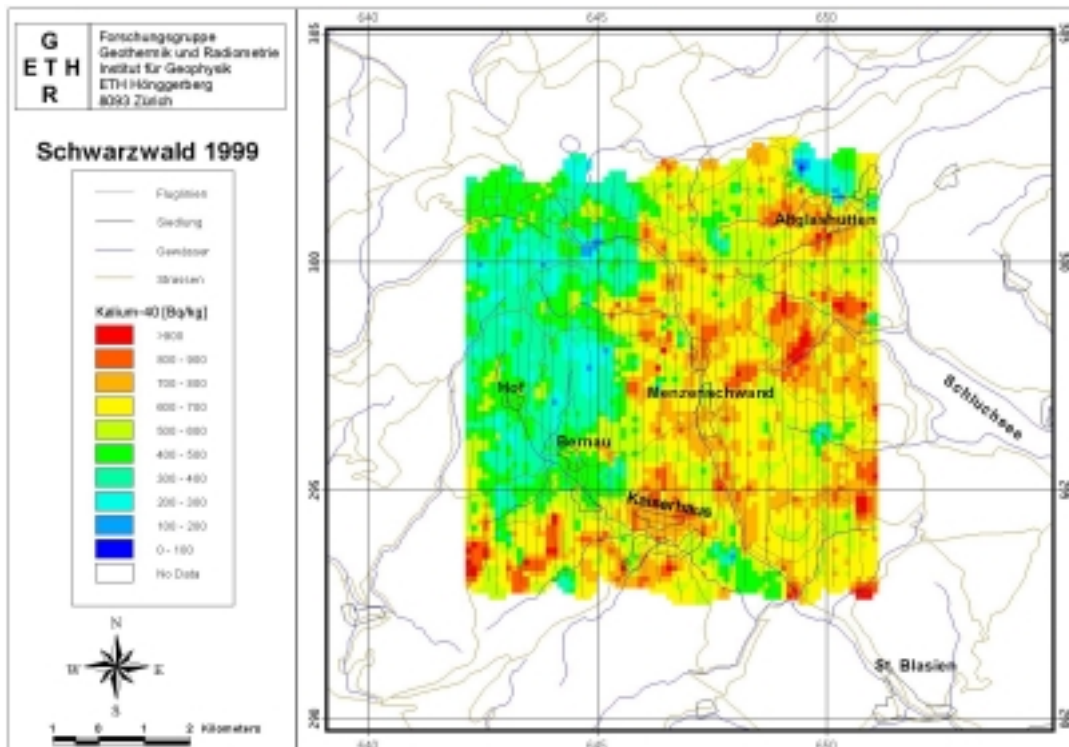


Abbildung 7.6: ^{40}K Aktivitäten im Messgebiet Menzenschwand. Ergebnisse des Messteams Schweiz. Kartendaten: VECTOR200 © 1999 Bundesamt für Landestopographie (DV1429).

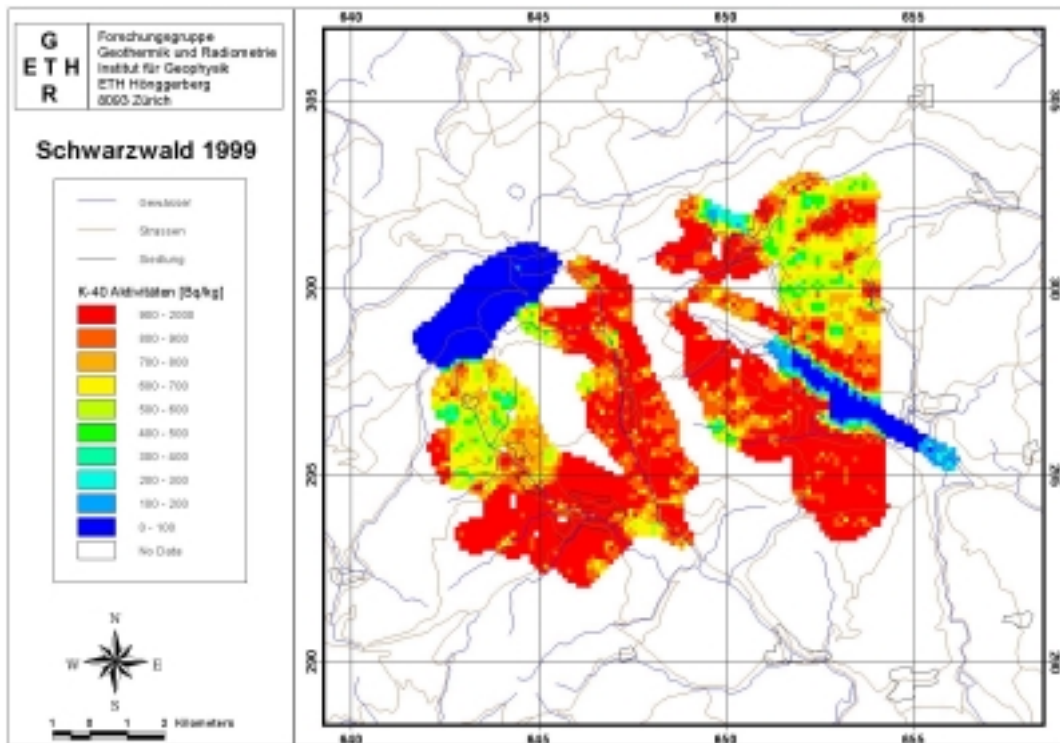


Abbildung 7.7: ^{40}K Aktivitäten im Messgebiet Menzenschwand, Team Deutschland.
Kartendaten: VECTOR200 © 1999 Bundesamt für Landestopographie (DV1429).

Deshalb wurde nun ein über alle Messpunkte innerhalb dieses Messfluges gemitteltes Spektrum unter die Lupe genommen. Das Spektrum (Abbildung 7.8) zeigt Merkmale, die auf Stabilisationsprobleme hinweisen. Der Kaliumpeak ist nicht als ein sauberer Peak zu erkennen. Es scheint vielmehr, eine Überlagerung von zwei gegeneinander verschobenen Peaks vorzuliegen. Der ^{214}Bi Peak bei 1'760 keV ist nicht und der ^{208}Tl Peak am oberen Ende des Spektrums nur schwer zu erkennen. Aus einem solchen Spektrum zuverlässige Resultate abzuleiten, ist unmöglich. Deshalb gilt es zu untersuchen, ob diese Probleme auch noch in anderen Messflügen auftauchten. Denn es ist nur sinnvoll, zuverlässige Resultate beider Teams zu vergleichen.

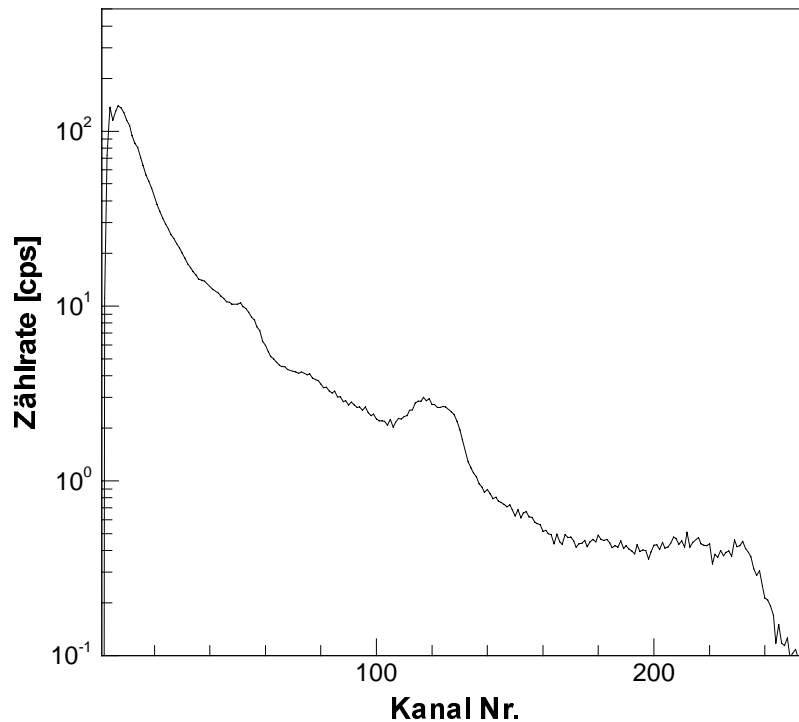


Abbildung 7.8: Summenspektrum vom Flug A9906231 des deutschen Messteams im Nordwesten des Messgebietes Menzenschwand.

Für die Analyse von Spektren eignet sich vor allem der Gain und die Resolution. Der Gain gibt die energetische Breite der Kanäle, die Resolution ein Mass für die Breite der Peaks. Bei einem stabilen Spektrum während der Messungen bleiben diese Werte in etwa konstant. Die zur Berechnung von Gain und Resolution verwendete Routine stammt aus dem Programmpaket „Gamero“, das in Schwarz (1991) beschrieben ist. Diese Routine liefert Gain und Resolution für verschiedene Peaks, falls qualitative Anforderungen an das Spektrum erfüllt sind. Zuerst wird nun jedoch die Linearität der Spektren untersucht. Denn nur wenn diese gegeben ist, sind für die verschiedenen Peaks die selben Gains zu erwarten. Zu diesem Zweck werden gemittelte Spektren der verschiedenen im Einsatz stehenden Messsysteme untersucht. Beim deutschen Team wurden zwei identische Messsysteme eingesetzt. In Abbildung 7.9 sind je ein gemitteltes Rohspektrum von den beiden deutschen und dem schweizerischen Messsystem aufgezeichnet.

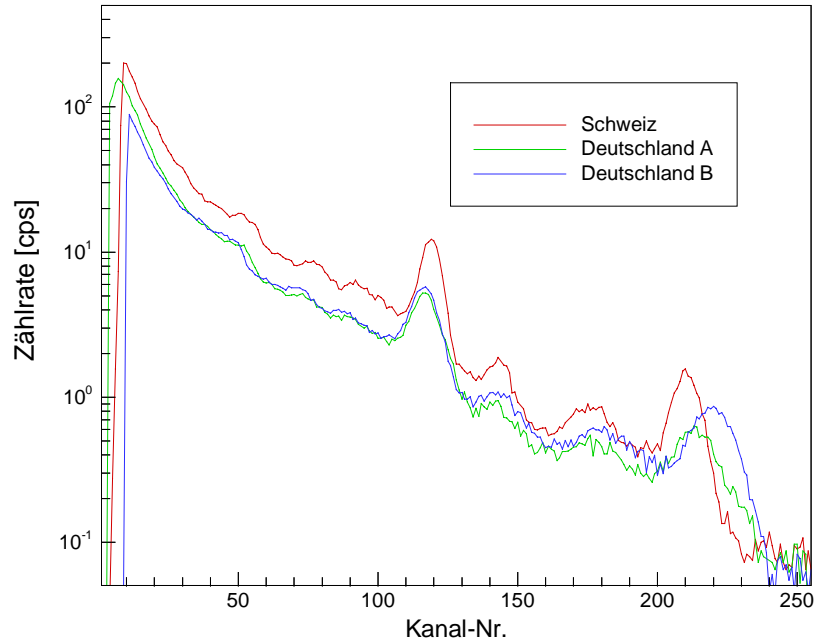


Abbildung 7.9: Gemittelte Rohspektren der bei den Messflügen im Schwarzwald im Einsatz stehenden Messsysteme. Die Spektren wurden jeweils über 400 Messpunkte gemittelt.

Deutlich ist das höhere Wertenniveau im Spektrum des Schweizer Systems zu erkennen. Dies ist hauptsächlich auf das grössere Detektorvolumen zurückzuführen. Die Peaks der deutschen Spektren sind deutlich breiter als die in den Schweizer Daten. Zum Teil sind auch die Peaks von Spektrum zu Spektrum ziemlich verschoben. Dies bedeutet, dass die Spektrometer der Messsysteme unterschiedliche, nicht lineare Beziehungen zwischen Energie und Kanalnummer aufweisen. Die entsprechenden Beziehungen für die beiden deutschen Messsysteme können grob aus den Summenspektren in Abbildung 7.9 abgeleitet werden, indem die Kanalnummern gegen die Energien der bekannten Peaks von ^{40}K (1'460 keV), ^{214}Bi (1'765 keV), ^{208}Tl (2'615 keV) und ^{137}Cs (660 keV) aufgetragen werden. Für die Koeffizienten eines Polynoms 3. Ordnung ($\text{chn} = a_0 + a_1 * E + a_2 * E^2 + a_3 * E^3$) ergeben sich für das deutsche Messsystem A: $a_0 = 0.513$, $a_1 = 7.0126\text{E-}2$, $a_2 = 8.3523\text{E-}6$, $a_3 = -1.5102\text{E-}9$; und für das Messsystem B: $a_0 = 9.3237\text{E-}2$, $a_1 = 6.849\text{E-}2$, $a_2 = 9.3569\text{E-}6$, $a_3 = -1.2963\text{E-}9$.

Nun lassen sich die Spektren der beiden deutschen Systeme für ihr nicht lineares Verhalten korrigieren und die Gains und Resolutions für die Daten der verschiedenen Messflüge berechnen. Aufgrund der Korrektur für das nicht lineare Verhalten der Spektren sollten die Gains für beide Systeme gleich sein.

In Abbildung 7.10 sind die Gains und in Abbildung 7.11 die Resolutions für die verschiedenen Flüge des deutschen Messteams abgebildet. Als Vergleich sind in Abbildung 7.12 und Abbildung 7.13 die Ergebnisse für die Schweizer Daten aus dem gleichen Messgebiet dargestellt. Während sowohl der Gain als auch die Resolution bei den deutschen Daten ziemlich schwanken, sind sie bei den Schweizer Daten fast konstant. Die Gains liegen bei beiden Teams auf dem selben Niveau. Die Resolution ist jedoch bei den schweizerischen Daten bedeutend kleiner. Dies deutet auf schärfere Peaks hin und bestätigt damit eine bessere Qualität der Spektren gegenüber den deutschen Daten.

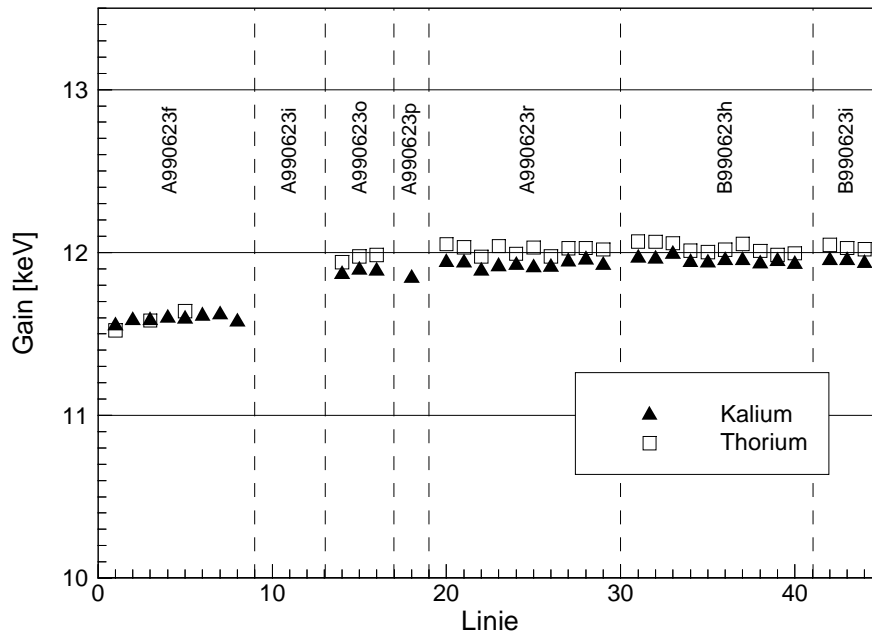


Abbildung 7.10: Gain für die verschiedenen Messflüge des deutschen Teams.

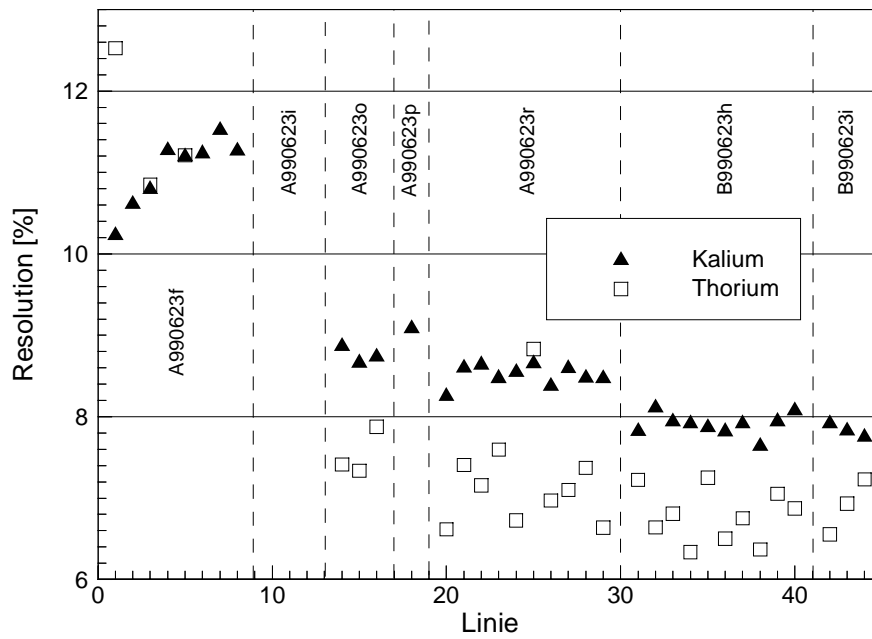


Abbildung 7.11: Resolution für die verschiedenen Messflüge des deutschen Teams.

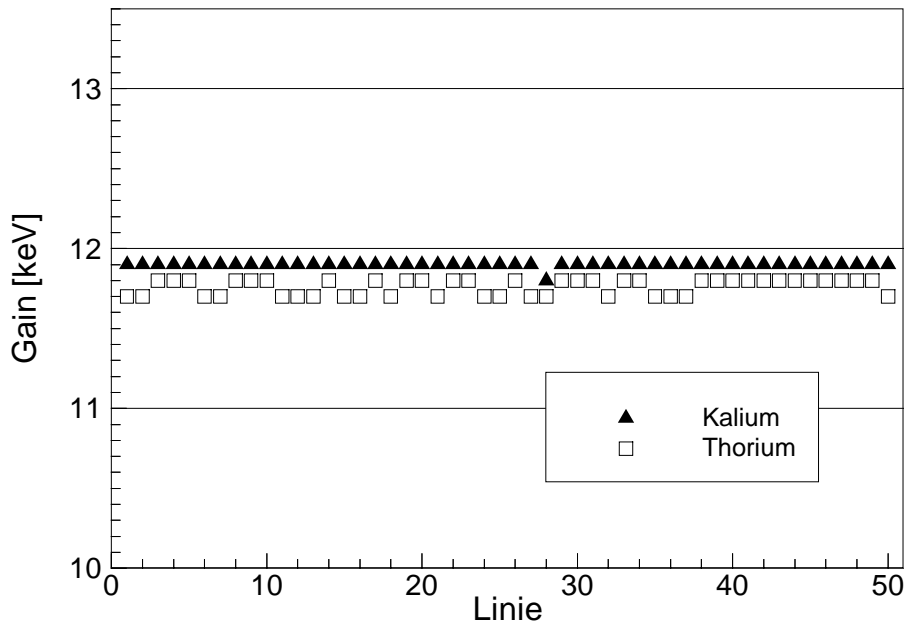


Abbildung 7.12: Werte für den Gain der schweizerischen Daten aus dem Messgebiet im Schwarzwald.

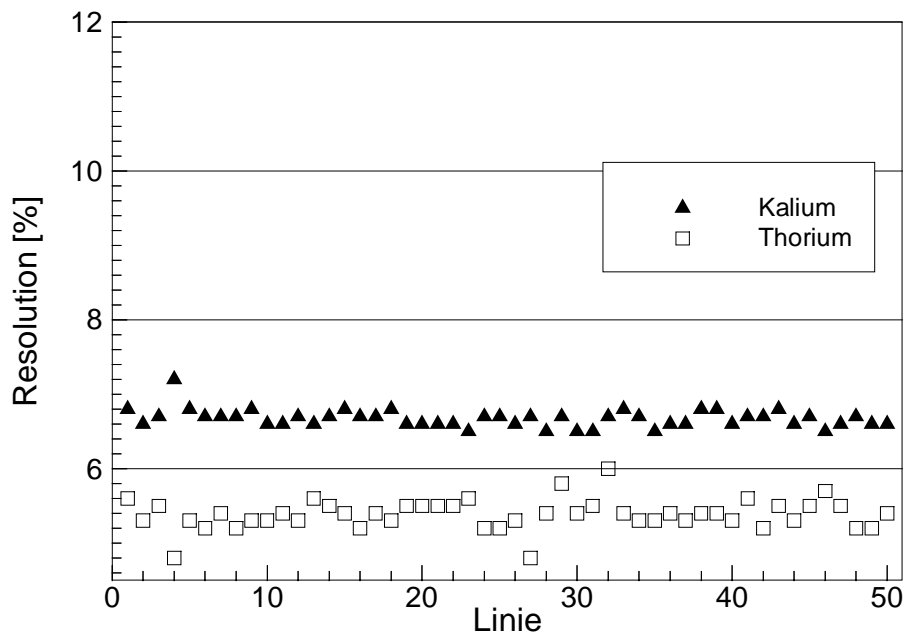


Abbildung 7.13: Werte für die Resolution der schweizerischen Daten aus dem Messgebiet im Schwarzwald.

Bei den deutschen Messflügen, die in der Bezeichnung den Buchstaben B besitzen, wurde das zweite, identische Messsystem B eingesetzt. Die Werte von Gain und Resolution für die Messflüge des Teams B sind in Ordnung. Bei den Messflügen des Teams A gibt es jedoch grössere Unterschiede. Für den Flug A990623i konnten weder Gain noch Resolution bestimmt

werden. Beim Messflug A990623f konnten die Werte für Kalium und nur teilweise für Thorium ermittelt werden. Während der Gain, obwohl versetzt zu den übrigen Werten, noch einigermaßen vernünftige Werte liefert, zeigt die Resolution stark erhöhte Werte. Die Flüge A990623o und A990623r weisen vernünftige Werte aus, die auf stabile Verhältnisse bei diesen Messungen hindeuten. Hingegen konnte für Thorium beim Flug A990623p weder der Gain noch die Resolution bestimmt werden. Die Werte für Kalium sind jedoch in Ordnung.

Für weitere Vergleiche werden nun die zur Verfügung stehenden Rohdaten des deutschen Teams verwendet. Dabei sollen die deutschen Daten in gleicher Art und Weise wie die schweizerischen ausgewertet werden. In einem ersten Schritt werden deshalb die deutschen Daten in das schweizerische Rohdatenformat umformatiert. Leider stehen nicht alle Daten, die normalerweise in den Schweizer Messdaten vorliegen, bei den deutschen Rohdaten zur Verfügung. So fehlen zum Beispiel die kosmische Zählrate, die GPS-Höhe, der barometrische Druck und die Temperatur. In einem zweiten Schritt werden die Korrekturen für die deutschen Daten bestimmt. Für den Background können die Werte aus Tabelle 7.12 verwendet werden. Da keine kosmischen Zählraten in den Rohdaten aufgezeichnet werden, muss der Beitrag der gestreuten kosmischen Strahlung im Messgebiet als konstant betrachtet werden. Dieser Beitrag ist in den Backgroundwerten (Tabelle 7.12) enthalten.

Als Streufaktoren werden die schweizerischen Werte aus der Tabelle 7.2 verwendet, da die Geometrie der Kristalle der beiden Teams übereinstimmen und die deutschen Streufaktoren ins Cäsiumfenster zu klein sind. Für die Höhenkorrektur werden die Abschwächungskoeffizienten des schweizerischen Teams aus Tabelle 7.3 eingesetzt. Um die Richtigkeit der verwendeten Korrekturwerte zu überprüfen, wird der Steigflug bei Altglashütten entsprechend ausgewertet. Dabei werden für die drei Höhen, bei denen jeweils über rund 90 Sekunden gemessen wurde, die Mittelwerte für die verschiedenen Fenster bestimmt. Anschliessend wird der Background abgezogen und die Strippingkorrektur durchgeführt. Schliesslich erfolgt noch die Höhenkorrektur auf eine Referenzhöhe von 100 m.

Die Resultate des deutschen Steigfluges sind in der Tabelle 7.16 zusammengefasst. Die korrigierten Werte für die verschiedenen Flughöhen stimmen sehr gut überein. Dies weist auf eine gute Kalibration hin, d.h. die verwendeten Korrekturfaktoren für Background, Streuung und Flughöhe sind für diesen Steigflug korrekt. Vergleicht man die korrigierten Zählraten des deutschen Teams mit denen des schweizerischen Teams (Tabelle 7.17), erkennt man, dass die deutschen Zählraten viel kleiner sind als man aufgrund des Detektorvolumens erwarten würde. Für Kalium und Thorium erhält man beim deutschen Messsystem nur die Hälfte der schweizerischen Zählraten, obwohl die schweizerischen Werte bei der Höhenkorrektur mit Ausnahme der ^{137}Cs Werte unterkorrigiert werden. Die zu tiefen deutschen Zählraten könnten ihre Ursache in der schlechten Spektrumsstabilität oder in Ausfällen eines Kristalls haben. Für den Ausfall eines Kristalls spricht der Faktor Zwei, der zwischen den deutschen und den schweizerischen Zählraten liegt, da beim Ausfall eines Kristalls das deutsche Detektorvolumen gerade die Hälfte des schweizerischen ausmachen würde. Mit Hilfe der kosmischen Zählrate liesse sich dies einfach überprüfen. Dies ist jedoch nicht möglich, weil die entsprechenden Werte in den deutschen Daten fehlen.

Aus dem Vergleich mit dem Steigflug des schweizerischen Teams (Tabelle 7.17) lassen sich auch die Umrechnungsfaktoren von Zählraten in Aktivitäten für die deutschen Daten herleiten. So ergibt sich für ^{40}K ein Faktor von 17.48 Bq/kg per cps, für ^{214}Bi ein Faktor von

6.0 Bq/kg per cps, für ^{208}Tl 3.34 Bq/kg per cps und für ^{137}Cs ein Faktor von 1.94 Bq/kg per cps. Vergleich man diese Werte mit denen aus der Tabelle 7.14, erkennt man, dass die hier bestimmten Werte für Kalium und Thorium bedeutend höher, derjenige für Uran praktische auf der selben Ebene und derjenige für Cäsium einiges tiefer liegen.

Berechnet man aus den korrigierten Zählraten des schweizerischen Steigfluges die entsprechenden Aktivitäten und mit Hilfe der SDI-Methode (siehe auch Kapitel 5.2) die Dosisleistung und vergleicht diese mit einer Bodenmessung am selben Ort, ist mit Ausnahme von ^{137}Cs eine gute Übereinstimmung zu erkennen (Tabelle 7.17).

Tabelle 7.16: Ergebnisse des Steigfluges vom deutschen Team bei der Feldberghalle in Altglashütten. Es sind jeweils die Rohdatenwerte (raw), die Ergebnisse nach der Background- und Strippingkorrektur (strip) und die Resultate nach der Höhenkorrektur auf 100 m (alt) gegeben.

Fenster Höhe	Total			^{40}K			^{214}Bi			^{208}Tl			^{137}Cs		
	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt
99.9	651	514	516	61	36	37	15	7	7	11	6	6	107	28	28
124.8	571	433	502	53	31	37	13	5	6	11	6	7	94	25	32
161.4	496	358	516	44	23	37	11	4	6	10	5	7	79	21	39
Mittelwert			511			37			6			7			33

Tabelle 7.17: Ergebnisse des Steigfluges vom schweizerischen Team bei der Feldberghalle in Altglashütten. Es sind jeweils die Rohdatenwerte (raw), die Ergebnisse nach der Background- und Strippingkorrektur (strip) und die Resultate nach der Höhenkorrektur auf 100 m (alt) gegeben. Zusätzlich sind noch die Dosisleistungen und Aktivitäten aus der Aeroradiometrie und einer Bodenmessung am selben Ort angegeben. Die aeroradiometrische Dosisleistung wurde mit Hilfe der SDI-Methode berechnet.

Fenster Höhe	Total			^{40}K			^{214}Bi			^{208}Tl			^{137}Cs		
	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt	raw	strip	alt
91.8	1158	976	849	135	102	86	26	13	11	23	18	16	186	36	29
120.1	975	790	791	108	78	78	23	10	10	20	14	14	154	30	30
153.8	801	614	726	84	58	71	18	6	7	17	11	13	126	27	36
Mittelwert			789			78			9			14			32
Aero	109 nSv/h			647 Bq/kg			36 Bq/kg			23 Bq/kg			64 Bq/kg		
Boden	100 nSv/h			630 Bq/kg			30 Bq/kg			22 Bq/kg			31 Bq/kg		

In Abbildung 7.14 ist nun der Vergleich zwischen den Aktivitäten aus den schweizerischen Daten und den korrigierten Zählraten aus den deutschen Daten dargestellt. Von den deutschen Daten wurden dabei nur diejenigen verwendet, deren Werte bei der Gain- und Resolutionanalyse in Ordnung waren. Bei ^{40}K , ^{214}Bi und ^{208}Tl ist ein klarer, linearer Trend zu erkennen. Legt man Regressionsgeraden in die Punkte, lassen sich aus den Steigungen dieser Geraden ebenfalls die Umrechnungsfaktoren für die deutschen Daten bestimmen. Für die

Ergebnisse von ^{137}Cs wurde auf eine Regressionsgerade verzichtet, da kein linearer Trend zu erkennen ist.

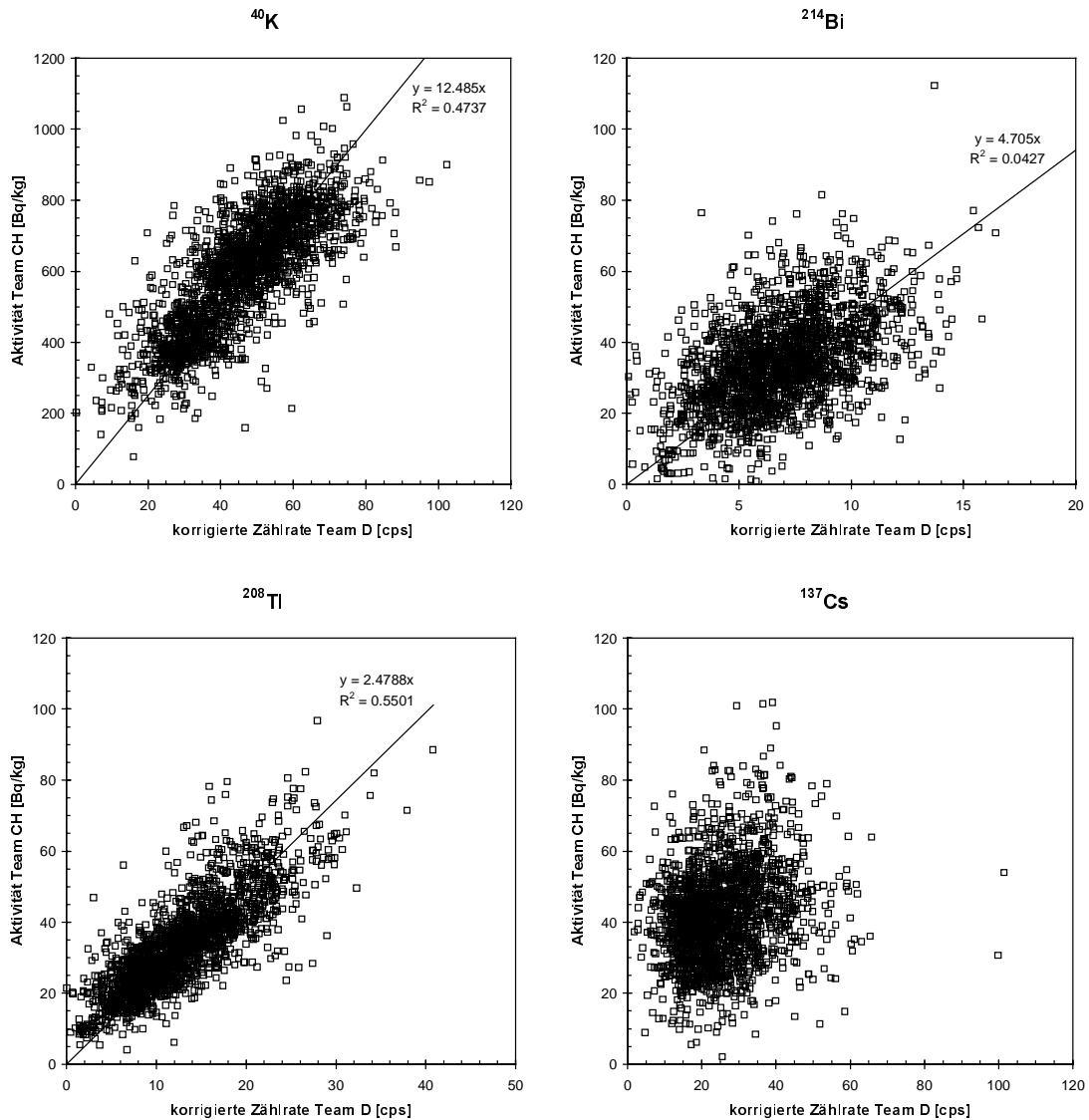


Abbildung 7.14: Vergleich der ausgewerteten schweizerischen Daten in Aktivitäten mit den korrigierten Zählraten der deutschen Messdaten, die mit den schweizerischen Routinen ausgewertet wurden. Die Unsicherheiten in den Aktivitäten des schweizerischen Messteams betragen rund 20 %, bzw. 50 % für ^{137}Cs . Für die korrigierten deutschen Zählraten dürften die Unsicherheiten aufgrund des geringeren Detektorvolumens und der damit verbundenen tieferen Zählraten eher etwas grösser sein (statistischer Fehler).

Die Umrechnungsfaktoren aus Abbildung 7.14 stimmen nicht mit denjenigen überein, die man aus dem Vergleich der Steigflüge erhält. Sie liegen bedeutend näher bei den Werten, die sie aufgrund des Detektorvolumens haben sollten. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass der deutsche Steigflug mit dem Messsystem A erfolgte und die in Abbildung 7.14 verwendeten Daten hauptsächlich vom Messsystem B stammen. Obwohl die beiden Systeme identisch aufgebaut sind, unterscheiden sie sich wie oben gesehen bereits in der Form der Spektren. Auch ist dies wiederum ein Hinweis auf einen möglichen Ausfall eines Kristalls beim deutschen Messsystem A.

7.4 Fazit

Bei den Interkalibrationsmessungen mit den Aeroradiometrieteams aus Österreich und Deutschland konnten wertvolle Erfahrungen in Organisation und Durchführung solcher gemeinsamer Messungen auch unter zum Teil erschwerten (hochalpinen) Bedingungen (Bucher et al. 1998) gesammelt werden. Wichtige Erkenntnisse konnten auch aus den Analysen und Vergleichen der Daten gewonnen werden, die von den verschiedenen Teams gemessen wurden. Obwohl die Korrelationen zwischen den verschiedenen Daten teilweise recht gut sind, treten jedoch auch grosse Unterschiede in den Resultaten auf. Die Abweichungen sind bereits auf Unterschiede in den Spektren zurückzuführen. Sowohl die österreichischen wie auch die deutschen Spektren zeigen Mängel in der Stabilität und Qualität der Rohspektren.

Die Qualität der aufgenommenen Spektren ist für die Qualität der Ergebnisse entscheidend. Auf driftende Kristalle zurückzuführende Stabilitätsprobleme verunmöglichen eine korrekte, qualitativ hochstehende Auswertung der Daten. Eine nachträgliche Verbesserung der Messdaten ist in einem solchen Fall nicht möglich. Stabilitätsprobleme in den Spektren erniedrigen die Messleistung, da schlechte Daten nicht verwendet werden können.

Wie wir vor allem beim Messflug in Nauders/A gesehen haben, erschwert eine starke Topographie die Einhaltung der Sollflughöhe. Dies senkt die Qualität der erhaltenen Messresultate. Auch beeinflusst die Topographie selbst die Messdaten, was den Vergleich der Resultate von beiden Teams zusätzlich erschwert. Deshalb sollten für zukünftige Interkalibrationsmessungen möglichst flache Gebiete gewählt werden.

Die Koordinaten in den Rohdaten sollten bei allen Messteams im selben Koordinatensystem abgespeichert werden. Aufgrund der verbreiteten Verwendung von GPS als Positionierungswerkzeug, bei dem üblicherweise die Koordinaten im WGS84 ausgegeben werden, sollte dieses Koordinatensystem zum Standard werden. Die Routinen für die Umrechnung der WGS84 Koordinaten in die entsprechenden nationalen Koordinatensysteme können dann unter den verschiedenen Teams ausgetauscht werden. Das Zusammentragen der Daten bei einem gemeinsamen Einsatz könnte so sehr vereinfacht werden. Für den Austausch der ausgewerteten Daten sollten ebenfalls WGS84 Koordinaten verwendet werden.

Es konnte gezeigt werden, dass es grundsätzlich möglich ist fremde Daten in das schweizerische Datenformat zu konvertieren und mit den schweizerischen Routinen auszuwerten. Leider fehlten bei den deutschen Messdaten Angaben über die kosmische Zählrate, die Temperatur und den Barometerdruck. Deshalb war eine Auswertung der deutschen Daten mit allen Korrekturen nicht möglich. Trotzdem konnte bei der Verwendung einer identischen Auswertung eine gute Korrelation zwischen den Ergebnissen der beiden Teams festgestellt werden.

Für eine erfolgreiche Interkalibration sind neben technischen Ansprüchen an die Messsysteme die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- Alle Daten (Rohdaten) müssen ausgetauscht werden. Es genügt nicht, Fensterdaten oder korrigierte Daten auszutauschen.
- Für jeden Detektor muss zwingend ein Messflug über Wasser durchgeführt werden.
- Für jeden Detektor muss ein Steigflug erfolgen.
- Der Spektrumsstabilisation muss besondere Beachtung geschenkt werden.

- Jedes Messsystem sollte zur Ableitung des kosmischen Beitrages über ein kosmisches Fenster (>3 MeV) verfügen.
- Zur Kontrolle und Überprüfung der aeroradiometrischen Resultate sind eine Vielzahl von Bodenmessungen (insitu Gammapektrometrie) nötig.

Nur wenn diese Punkte berücksichtigt werden, ist eine wirkliche Interkalibration möglich.

8 Datenanalysen und Fehlerbetrachtung

8.1 Einleitung

Seit dem Beginn der Aeroradiometrie im Jahre 1986 fiel eine grosse Menge an aeroradiometrischen Daten an. Während zu Beginn geologische Kartierungen im Vordergrund standen, geniessen heute Messungen zum Strahlenschutz Priorität. Seit 1989 werden die Umgebungen der schweizerischen Kernkraftwerke Beznau (KKB), Gösgen (KKG), Leibstadt (KKL) und Mühleberg (KKM) sowie diejenige des Paul Scherrer Institutes (PSI) in Würenlingen regelmässig aus der Luft gammaspektrometrisch vermessen (siehe Tabelle 8.1). Diese Messungen hatten zum Ziel, einerseits eine Vergleichsbasis für einen Ereignisfall zu erstellen (Nullmessung) und andererseits das Strahlungsfeld in den Gebieten dieser nuklearen Anlagen auf Veränderungen zu überprüfen.

Tabelle 8.1: Die Tabelle zeigt, in welchen Jahren die Umgebungen der verschiedenen Kernkraftwerke vermessen wurden. KKB: Beznau; KKG: Gösgen; KKL: Leibstadt; KKM: Mühleberg; PSI: Paul Scherrer Institut. Die Pfeile rechts der Tabelle zeigen auf, in welchem Zeitraum das neue und in welchem Zeitraum das alte Messsystem (Schwarz 1991) zum Einsatz kam. Im Jahre 1994 wurde vom Helikoptertyp Ecureuil auf den Super Puma der Schweizer Armee gewechselt.

Jahr	KKB/KKL/PSI	KKG	KKM	
1989	X	X	X	↑ Altes Messsystem
1990	X	X	X	
1991	X	X	X	
1992	X	X	X	↑ Neues Messsystem Ecureuil
1993	X	X	X	
1994	X			↑ Neues Messsystem Super Puma
1995		X	X	
1996	X			
1997		X	X	
1998	X			
1999		X	X	
2000	X			

Daneben wurden im Laufe der Jahre verschiedene weitere Quellen künstlicher radioaktiver Strahlung in der Schweiz aeroradiometrisch vermessen. Diese stammen aus Industrie, Forschungsanlagen und Gebieten mit erhöhtem Tchernobylfallout. Diese Messungen stellen ein Teilinventar der in der Schweiz messbaren künstlichen Radioaktivität dar. Im Kapitel 8.2 sind die Ergebnisse und Analysen dieser Untersuchungen zusammengestellt.

Um zuverlässige Aussagen machen zu können, ob eine Zunahme der künstlichen Radioaktivität in einem bestimmten Gebiet vorliegt, müssen die Unsicherheiten der Methode sowie die natürlichen Schwankungsbreiten durch meteorologische und andere Einflüsse bekannt sein. Die mehrjährigen Messungen in den Gebieten um die schweizerischen Kernkraftwerke können nun als Ausgangslage für die Untersuchung der Unsicherheiten in aeroradiometrischen Resultaten herangezogen werden. Da bei diesen Messungen immer das selbe Gebiet vermessen wurde, können entsprechende Zeitreihen gebildet und auch auf Trends hin untersucht werden.

Mehrjährige Messungen in den selben Gebieten lassen auch Aussagen über die Kalibration des Messsystems zu. So wären bei einer mangelhaften Kalibration grössere Änderungen von Jahr zu Jahr zu erwarten als bei einer korrekten Kalibration. Im Kapitel 8.3 werden die Resultate aus den Analysen der Mehrfachmessungen dargestellt und diskutiert.

8.2 Künstliche Radioaktivität in der Schweiz

Seit 1989 werden regelmässig die Umgebungen der schweizerischen Kernkraftwerke vermessen. Neben diesen routinemässigen Messflügen wurden auch immer wieder Gebiete von besonderem Interesse befliegen. Neben geologisch bedingten Besonderheiten im Strahlungsfeld wurde auch immer nach Einflüssen künstlicher Radioaktivität gesucht. Deshalb wurden mit Ausnahme des CERN alle nuklearen Forschungseinrichtungen der Schweiz gammaspektrometrisch vermessen. Im weiteren wurden auch Industrieanlagen untersucht, die künstliche Radionuklide als Bestrahlungsquellen einsetzen. Schliesslich wurde auch nach sogenannten Hot Spots von ^{137}Cs gesucht, die vom Fallout des Reaktorunfalls in Tschernobyl herrühren. Im folgenden werden nun die Ergebnisse der verschiedenen Messgebiete dargestellt und die Quellen der künstlichen Radioaktivität analysiert.

8.2.1 Kernkraftwerke und Forschungsinstitute

In der Schweiz werden zur Zeit vier Kernkraftwerke in Beznau/AG, Gösgen/SO, Leibstadt/AG und Mühleberg/BE betrieben. In Lucens/VD befand sich in einer Felskaverne ein Versuchsreaktor, der nach einem Unfall jedoch stillgelegt und wieder abgebaut wurde (UKL 1979). Neben diesen Kernreaktoren gibt es das Paul Scherrer Institut in Würenlingen/AG, das neben anderem auch Nuklearforschung betreibt. Direkt neben diesem Standort wird auch das Zwischenlager für radioaktive Abfälle (ZWILAG) betrieben.

Die in der Schweiz betriebenen Kernkraftwerke verwenden unterschiedliche Reaktoren. Während in Leibstadt und Mühleberg Siedewasserreaktoren eingesetzt werden, kommen in Gösgen und Beznau Druckwasserreaktoren zum Einsatz. Der für die aeroradiometrischen Messungen relevante Unterschied bei den Reaktorentypen liegt in der Führung des primären Kreislaufes. Während bei den Druckwasserreaktoren der Primärkreislauf das Containment nie verlässt, wird beim Siedewasserreaktor der Primärkreislauf direkt ins Maschinenhaus auf die Turbinen geführt. Dabei gelangt auch das Aktivierungsprodukt ^{16}N ins im Vergleich zum Containment weniger abgeschirmte Maschinenhaus. Die hochenergetische Strahlung, die beim Zerfall des Aktivierungsproduktes bei zwei Gammalinien von 6.13 MeV und 7.11 MeV freigesetzt wird, kann deshalb bei den Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktoren aeroradiometrisch detektiert werden (Rybach et al. in Druck). Die Streustrahlung, die beim Zerfall des Aktivierungsproduktes ^{16}N entsteht, deckt das ganze Spektrum ab, so dass die übrigen Peaks von natürlichen und künstlichen Radionukliden nicht mehr erkannt werden können (Abbildung 8.1). Wird ein Siedewasserreaktor abgeschaltet, verschwindet die Strahlung des Aktivierungsproduktes in Kürze (Halbwertszeit $T_{1/2} = 7.3 \text{ s}$).

Kernkraftwerk Beznau (KKB)

Das Kernkraftwerk Beznau besitzt zwei Druckwasserreaktoren. Die Streustrahlung des Aktivierungsproduktes ^{16}N ist deshalb aeroradiometrisch nicht detektierbar. Beim Beginn der aeroradiometrischen Überwachungsflüge in der Umgebung des Werkes wurden trotzdem im unmittelbaren Bereich des Werkes leicht erhöhte Zählraten gemessen (Schwarz et al. 1989). Diese waren auf radioaktive Abfälle zurückzuführen, die auf dem Werkareal zwischengelagert

wurden. Bei der Auswertung der aeroradiometrischen Messungen konnte das Radionuklid ^{60}Co identifiziert werden (Schwarz et al. 1989). Auch in den folgenden Jahren 1990 und 1991 wurden noch erhöhte Kobalt Aktivitäten unmittelbar beim KKW Beznau gemessen (Schwarz et al. 1990-1991). Ab dem Jahr 1992 konnte im Gebiet des Werkes Beznau keine künstliche Radioaktivität mehr festgestellt werden, die nicht auf die Atombombentests und den Reaktorunfall in Tchernobyl zurückgeführt werden könnten (Schwarz et al. 1992-1997b; Bucher et al. 1998-2000).

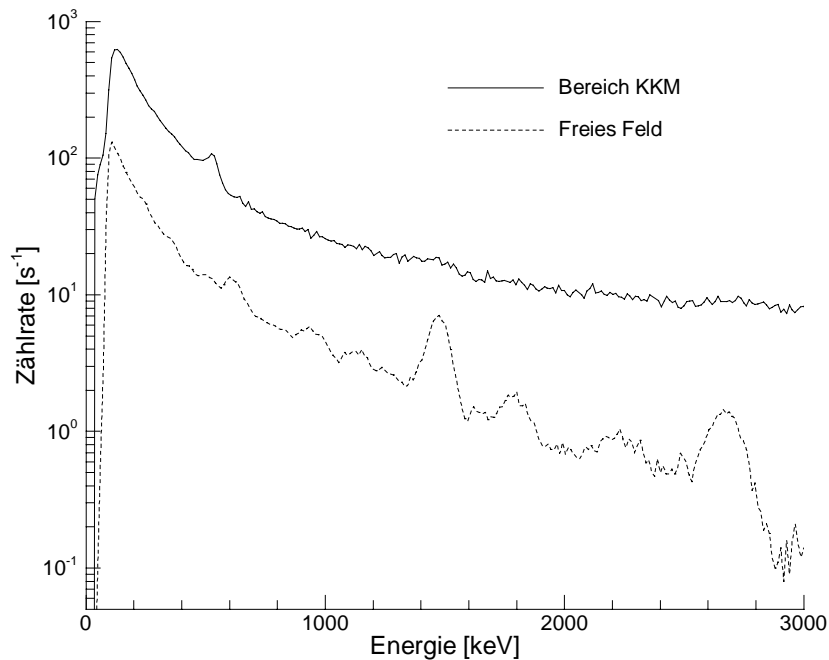


Abbildung 8.1: Gemittelte Spektren über dem Kernkraftwerk Mühleberg im Einflussbereich der Strahlung des Aktivierungsproduktes ^{16}N und auf freiem Feld. Die Daten stammen von den Messungen des Jahres 1999. Der kleine Peak bei rund 511 keV (Ruheenergie des Elektrons) im Spektrum aus dem unmittelbaren Bereich des KKM wird durch die Annihilationsstrahlung verursacht.

Kernkraftwerk Leibstadt (KKL)

Da das KKL einen Siedewasserreaktor besitzt, kann es, wenn es in Betrieb ist, aus der Luft anhand der Strahlung des Aktivierungsproduktes ^{16}N gammaspektrometrisch detektiert werden. Wie oben bereits gesehen, sind in diesem Fall im Spektrum keine anderen Peaks von natürlichen oder künstlichen Radionukliden zu sehen. Ob andere künstliche Radioaktivität in unmittelbarer Nähe des Werkes vorhanden ist, kann nur bei Messungen mit abgestelltem Reaktor überprüft werden. Im Jahre 1990 war dies der Fall. Die Messresultate zeigten auch hier eine leichte Erhöhung der Aktivität auf dem Werkareal, die auf ^{60}Co zurückgeführt werden konnte (Schwarz et al. 1990). Bei der Messung im Jahre 1993 war der Reaktor wiederum nicht in Betrieb. Auch zu diesem Zeitpunkt konnte ebenfalls eine leicht erhöhte Aktivität festgestellt werden (Schwarz et al. 1993). Seither war der Reaktor bei allen aeroradiometrischen Messungen in Betrieb.

Kernkraftwerk Gösgen (KKG)

Das Kernkraftwerk Gösgen ist mit einem Druckwasserreaktor ausgestattet. Wie sich in all den Jahren seit 1989 gezeigt hat, ist das Werk aeroradiometrisch nicht zu detektieren. Es konnten bei keiner aeroradiometrischen Messung erhöhte Aktivitäten im unmittelbaren Bereich des Werkes entdeckt werden.

Kernkraftwerk Mühleberg (KKM)

Wie das Kernkraftwerk Leibstadt besitzt auch das Kernkraftwerk Mühleberg einen Siedewasserreaktor. Deshalb kann auch hier mit Hilfe der Aeroradiometrie nur bei Stillstand des Reaktors das Werksareal auf künstliche Radionuklide untersucht werden. In den Jahren 1989, 1990, 1992 und 1993 war der Reaktor während den aeroradiometrischen Messungen abgestellt. Bei all diesen Flügen wurden erhöhte Aktivitäten im Bereich des Werkes festgestellt (Schwarz et al. 1989-1993). Auch hier konnte das künstliche Radionuklid ^{60}Co identifiziert werden. Bei den Messflügen ab dem Jahre 1995 war der Reaktor jeweils in Betrieb. Deshalb wurde nur noch die Strahlung des Aktivierungsproduktes ^{16}N detektiert, die das ganze Spektrum zudeckt (Schwarz et al. 1996; Bucher et al. 1998-2000).

Paul Scherrer Institut (PSI)

Das Paul Scherrer Institut besteht aus zwei Teilen, die durch die Aare getrennt sind. Bei allen aeroradiometrischen Messungen seit 1989 in diesem Gebiet konnten das PSI West und das PSI Ost aus der Luft anhand der erhöhten Strahlung detektiert werden (Schwarz et al. 1989). Wie in Abbildung 8.2 zu erkennen ist, stammte 1989 die erhöhte Strahlung hauptsächlich von erhöhten ^{60}Co Aktivitäten (Doppelpeak bei 1.17 MeV und 1.33 MeV). Ein kleinerer Anteil stammte auch von erhöhten ^{137}Cs Aktivitäten. Die erhöhten Aktivitäten waren auf radioaktive Abfälle und Komponenten zurückzuführen, die auf dem Areal der beiden PSI gelagert wurden.

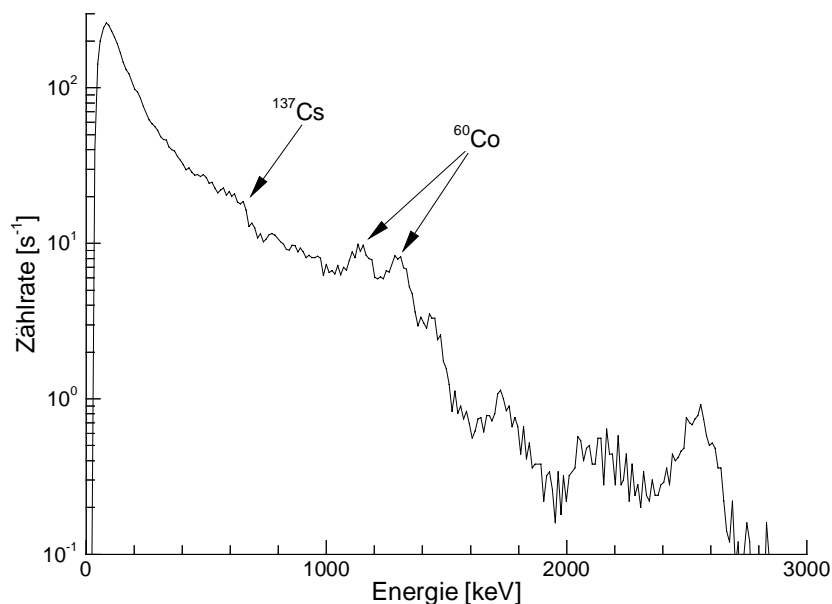


Abbildung 8.2: Gemitteltes Spektrum über dem Bereich der beiden PSI. Die Daten stammen von den Messflügen im Jahre 1989.

Auch in den folgenden Jahren zeigte sich ein ähnliches Bild. Neben künstlichen Radionukliden führen auch Teilchenbeschleuniger, wie sie am PSI zum Einsatz kommen, zu erhöhter Strahlung. Dies ist auch im gemittelten Spektrum aus Messdaten des Jahres 2000 deutlich zu sehen, das in Abbildung 8.3 dargestellt ist. Dort ist im Spektrum über dem PSI West deutlich ein Peak bei 511 keV zu erkennen. Diese Energie entspricht der Ruheenergie des Elektrons und stammt von der Annihilationsstrahlung, die bei der Verschmelzung eines Positrons mit einem Elektron entsteht. Bei der Bestrahlung von schweren Nukliden mit einem Protonenstrahl entstehen als Spallationsprodukte sogenannte Positronenstrahler (β^+ -Strahlung). Ein solcher Protonenbeschleuniger wird am PSI West betrieben und ist auch für den ausgeprägten Annihilationspeak im Spektrum verantwortlich. Ebenfalls ein Spallationsprodukt ist das ^7Be , dessen Gammalinie bei 477.6 keV jedoch im Spektrum nicht identifiziert werden kann. Im PSI West befindet sich auch die neue Swiss Light Source (SLS), welche einen riesigen Elektronenbeschleuniger enthält. Sie war jedoch bei den aeroradiometrischen Messungen des Jahres 2000 noch nicht in Betrieb. Neben der Annihilationsstrahlung erkennt man auch beim Spektrum des PSI West noch die Gammalinien des ^{60}Co . Diese Peaks sind im Spektrum aus dem Gebiet des PSI Ost noch viel deutlicher zu sehen. Die Zählraten sind dort auch bedeutend höher. Die Streustrahlung unterhalb der ^{60}Co Peaks deckt das Spektrum ziemlich zu. Trotzdem kann man im Bereich des ^{137}Cs Peaks bei 669 keV noch einen kleinen Anstieg in der Zählrate erkennen, der auf erhöhte ^{137}Cs Aktivitäten innerhalb des Areals von PSI Ost hinweist.

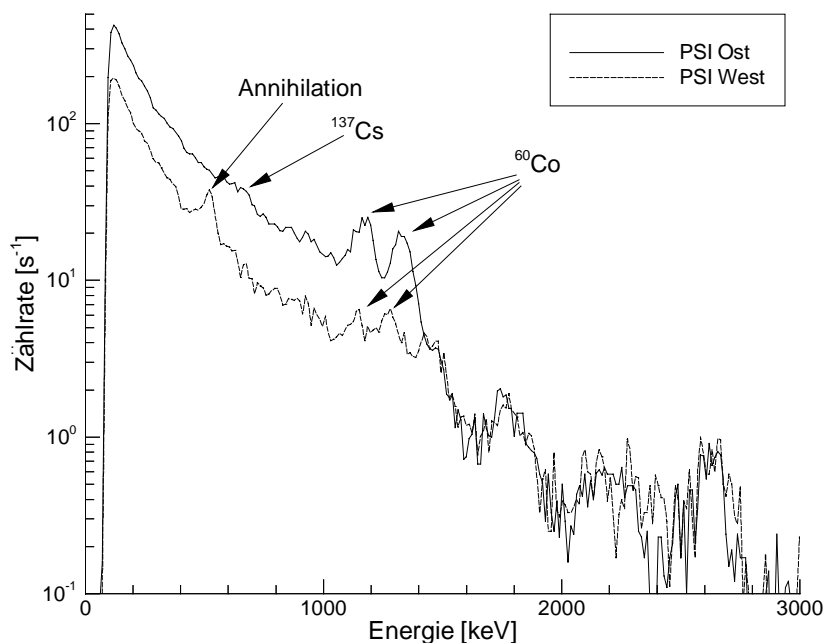


Abbildung 8.3: Gemitteltes Spektrum über dem PSI Ost und PSI West. Die Daten stammen von den Messflügen aus dem Jahr 2000.

Es wird interessant sein, wie sich die Strahlungssituation bei den beiden PSI weiterentwickelt. Denn bei den nächsten Messflügen werden sowohl die Swiss Light Source wie auch das Zwischenlager für radioaktive Abfälle (ZWILAG) ihren Betrieb aufgenommen haben. Die SLS wird sich wohl hauptsächlich mit hochenergetischer Strahlung bemerkbar machen, während beim ZWILAG wohl die Strahlung von ^{60}Co und ^{137}Cs dominieren wird. Grundsätzlich ist mit einer Zunahme der Strahlung im Bereich der beiden PSI zu rechnen.

Versuchsreaktor Lucens/VD

Der Versuchsreaktor in Lucens wurde in den Jahren 1962-1966 in einer Felskaverne gebaut. Bereits nach kurzer Betriebsdauer ereignete sich am 21. Januar 1969 ein Zwischenfall, bei dem es zur teilweisen Schmelze eines Brennelementes kam. Dies führte schliesslich zur Abgabe von radioaktiven Spaltprodukten in die Reaktorkaverne (UKL 1979). Nach weitreichenden Untersuchungen und der Demontage von Anlageteilen wurde die Kaverne daraufhin verschlossen und der Standort aufgegeben. Heute befinden sich noch einige Gebäude vor dem ehemaligen Eingang zur Kaverne.

Im Jahre 1999 wurde im Rahmen der Übung ARM99 das Gebiet um die Kaverne des Versuchsreaktors aeroradiometrisch vermessen (Bucher et al. 2000). Dabei wurden bis auf das Areal des Versuchskraftwerkes nur natürliche Strahlungsquellen detektiert. Innerhalb des Areals des Werkes wurden über einem Nebengebäude beim Eingang zum ehemaligen Reaktor erhöhte Strahlungswerte registriert. Bei der Analyse der entsprechenden Spektren zeigte sich, dass diese Erhöhung auf die Aktivitäten von ^{137}Cs und ^{60}Co zurückzuführen waren (Abbildung 8.4). Der Peak von ^{137}Cs ist im gemittelten Spektrum sehr gut zu erkennen. Ebenfalls ist der Doppelppeak von ^{60}Co zu sehen, der jedoch bedeutend schwächer ist. Beim Material, das die erhöhten Zählraten verursacht, handelt es sich um dort gelagerte, verstrahlte Anlageteile aus dem ehemaligen Versuchsreaktor. Diese waren nach dem Unfall im Jahre 1969 demontiert worden. Nach Betriebsaufnahme im ZWILAG werden diese Abfälle dorthin transportiert und eingelagert.

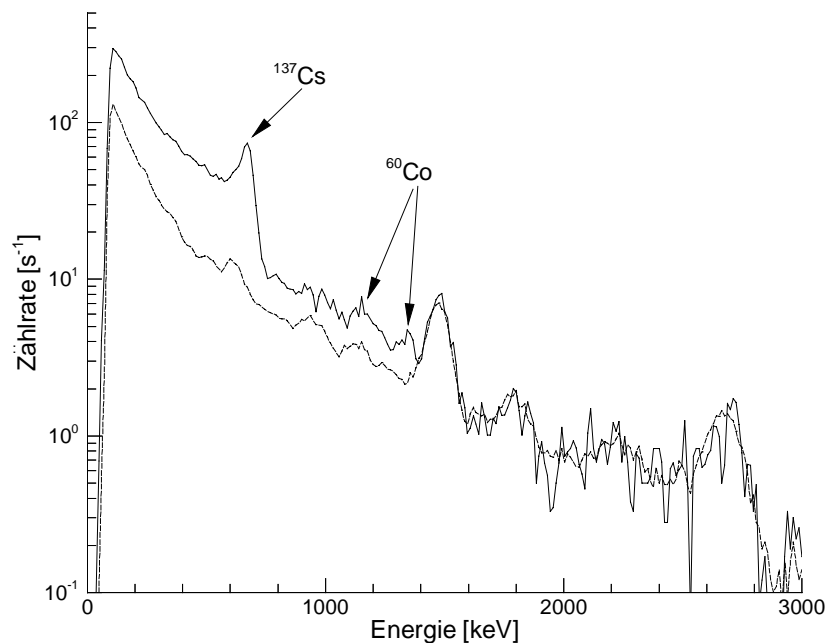


Abbildung 8.4: Gemittelte Spektren im Messgebiet Lucens/VD. Die ausgezogene Linie entspricht dem gemittelten Spektrum im unmittelbaren Bereich des Gebäudes, in dem die radioaktiven Abfälle gelagert werden. Die gestrichelte Linie entspricht einem gemittelten Spektrum aus dem selben Messgebiet ausserhalb des Einflussbereiches der von den radioaktiven Abfällen stammenden Strahlung.

8.2.2 Industriebetrieb Studer Kabelwerke AG

Die Studer Kabelwerke AG in Däniken/SO produziert elektrische Leitungskabel. Zur Härtung der Kunststoffe werden in diesem Zusammenhang Beschleuniger und ^{60}Co Quellen eingesetzt. Bei den Messflügen im Jahre 1993 in der Umgebung des Kernkraftwerkes Gösgen wurde bei den Gebäuden der Studer Kabelwerke erstmals erhöhte Zählraten registriert (Schwarz et al. 1993). Die erhöhten Zählraten waren dabei auf niedrigerenergetische Streustrahlung zurückzuführen. Auch in den Jahren 1995 und 1997 wurden bei den entsprechenden Messungen erhöhte Zählraten gemessen (Schwarz et al. 1996; Bucher et al. 1998). Bei den Messflügen im Jahre 1997 wurde dann das Gebäude, in dem die Bestrahlungen durchgeführt werden, detailliert aeroradiometrisch vermessen. Bei der Analyse der Spektren konnten keine Peaks von künstlichen Radionukliden erkannt werden (Abbildung 8.5). Vielmehr sind unterhalb des ^{40}K Peaks erhöhte Zählraten festzustellen, die durch Streustrahlung verursacht werden. Deshalb können in diesem Bereich auch keine anderen Peaks mehr gesehen werden. Die Streustrahlung wird durch die starke Abschirmung erzeugt, die um die verschiedenen Bestrahlungsanlagen erstellt wurden. Die stärkste im Einsatz stehende Quelle weist auf dem Dach des Gebäudes eine Dosisleistung von $1.8\ \mu\text{Sv/h}$ auf (Frei 1997).

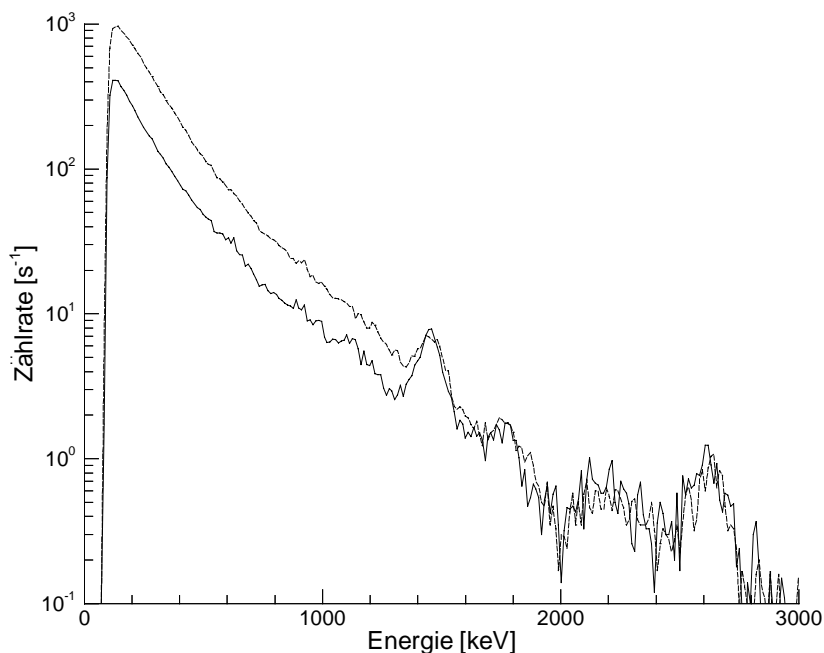


Abbildung 8.5: Gemittelte Spektren von aeroradiometrischen Messdaten über dem Gebäude der Studer Kabelwerke AG in Däniken/SO aus den Jahren 1995 und 1997. Es sind keine Peaks von künstlichen Radionukliden zu erkennen. Das Wertenniveau unterhalb des ^{40}K Peaks ist jedoch bei beiden Spektren deutlich erhöht.

Bei den Messungen im Jahre 1999 konnten die Quellen nicht mehr detektiert werden, weil im Jahre 1999 im Bereich des Industriebetriebes nur Fluglinien im Abstand von 500 m geflogen wurden. Somit führte keine Fluglinie direkt über das Gebäude und deshalb konnten aufgrund der guten seitlichen Abschirmung keine erhöhten Werte gemessen werden.

8.2.3 Folgen des Tchernobyl-Unfalles

In Folge des Reaktorunfalles in Tchernobyl im Mai 1986 zog eine radioaktive Wolke über grosse Teile Europas. Am stärksten ausserhalb Russlands war Schweden betroffen. Die abgelagerten Aktivitäten in Mitteleuropa waren hingegen tiefer. Eine entscheidende Rolle spielten die meteorologischen Verhältnisse. In den Gebieten, wo es zum Zeitpunkt des Wolkendurchzugs regnete, wurde bedeutend mehr radioaktiver Fallout deponiert als in den anderen Gebieten. So gab es auch innerhalb der Schweiz grosse regionale Unterschiede. Neben der Region Bodensee erhielt das Tessin aufgrund einer Föhnlage mit Niederschlägen die höchsten Aktivitäten. Während in den ersten Tagen und Wochen nach der Deposition die eher kurzlebigen künstlichen Radionuklide wie ^{131}I , ^{132}Te und ^{132}I den Hauptanteil an der künstlichen Dosisleistung ausmachten, war bereits nach einem Jahr ^{137}Cs praktisch allein für die künstliche Radioaktivität in diesem Gebiet verantwortlich. Auch heute kann im Tessin noch immer eine erhöhte ^{137}Cs Aktivität im Vergleich mit der übrigen Schweiz gemessen werden. Dies wurde auch durch verschiedene aeroradiometrische Messungen in der Magadinoebene (Schwarz et al. 1997b), im Centovalli (Bucher et al. 1999 und 2000), oberhalb von Brissago, bei Breganzona und Caslano (Bucher et al. 2000) bestätigt.

Beim Messflug oberhalb von Brissago im Jahre 1999 wurde ein ^{137}Cs Hot Spot (siehe auch Kapitel 6) entdeckt. Rechnet man die gemessene Aktivität auf das Jahr 1986 zurück, erhält man eine deponierte Aktivität von 150 kBq/m^2 (Bucher et al. 2000). Diese Aktivität liegt im selben Bereich, wie sie im schwedischen Gävle gemessen wurde. Dort wurden die höchsten ^{137}Cs Aktivitäten von ganz Schweden registriert. Solche Hot Spots, wie sie am Pizzo Ometto oberhalb von Brissago gemessen wurden, sind nur durch Transportprozesse und damit verbundene Aufkonzentration möglich. Da die Deposition an der Bodenoberfläche erfolgt, werden glatte Flächen ohne Bodenschicht und Bewuchs am schnellsten abgewaschen und das deponierte Material wegtransportiert. Deshalb ist vor allem an den Grenzen von nacktem Fels zu bewachsenem Boden am ehesten mit Hot Spots zu rechnen. Neben dem Wasser spielt in den Bergen auch der Schnee eine bedeutende Rolle als Transportmittel.

8.2.4 Fazit

Bis auf das Europäische Zentrum für Teilchenforschung (CERN) wurden in der Schweiz die Umgebung aller Kernkraftwerke und nuklearer Forschungseinrichtungen aeroradiometrisch vermessen (die Vermessung des CERN Areals ist für das Jahr 2001 vorgesehen). Dabei konnten verschiedene Quellen künstlicher Radioaktivität festgestellt werden. Während das Kernkraftwerk Gösgen als einziges nie aus der Luft detektiert werden konnte, war bei allen anderen Kernkraftwerken mindestens einmal künstliche Radioaktivität nachgewiesen worden. Das Kernkraftwerk Beznau wies anfänglich erhöhte, durch dort gelagerten radioaktiven Abfall verursachte ^{60}Co Aktivitäten auf, die aber bis zu den Messungen im Jahre 1993 verschwanden. Auch bei den Kernkraftwerken Leibstadt und Mühleberg wurde auf dem Werkareal erhöhte ^{60}Co Aktivität registriert. Da in den letzten Jahren die Siedewasserreaktoren bei den Messungen immer in Betrieb waren, konnte aufgrund der Streustrahlung vom Aktivierungsprodukt ^{16}N nicht festgestellt werden, ob diese erhöhten Aktivitäten immer noch bestehen. Die beiden PSI Areale konnten bei allen Messflügen seit 1989 anhand erhöhter Strahlung aus der Luft detektiert werden. Bei den identifizierten Nukliden handelt es sich um ^{137}Cs und ^{60}Co . Ausserhalb der

umzäunten Areale der Kernanlagen konnte keine künstliche Radioaktivität festgestellt werden, die nicht auf den Fallout der Bombentests oder des Tchernobyl-Ereignisses zurückgeführt werden kann.

Die einzige industrielle Anlage, die bei aeroradiometrischen Messungen 1995 und 1997 aus der Luft detektiert wurde, verwendet zur Härtung von Kunststoffen Beschleuniger und ^{60}Co Quellen. Aufgrund veränderter Flugparameter (grösserer Fluglinienabstand) konnten die Quellen 1999 aeroradiometrisch nicht mehr detektiert werden.

Die durch den Reaktorunfall in Tchernobyl verursachte künstliche Radioaktivität ist im Tessin am höchsten. Durch meteorologische Einflüsse und Transportprozesse kann es zu Aufkonzentration kommen. Diese kann örtlich zu sehr hohen ^{137}Cs Aktivitäten führen.

8.3 Statistische Analyse von mehrjährigen Messungen

8.3.1 Fehlerbetrachtung

Radiometrische Messungen sind prinzipbedingt mit relativ grossen Fehlern behaftet. Dieses Problem stellt sich in der Aeroradiometrie aufgrund der zahlreich anzubringenden Korrekturen noch in verschärfter Weise. Die über zehn Jahre durchgeführten Messungen in der Umgebung der Kernkraftwerke bieten eine hervorragende Grundlage die Fehler am praktischen Beispiel genauer zu untersuchen, die Reproduzierbarkeit der Messungen aufzuzeigen und allfällige Langzeittrends zu identifizieren.

Die folgenden Untersuchungen werden am Beispiel der über die SDI-Methode berechneten Ortsdosisleistungen durchgeführt. Dies weil die Ortsdosisleistung sämtliche Beiträge der einzelnen Radioisotope summiert und im Vergleich zu Einzelfenstern eine bessere Zählstatistik aufweist.

Der Gesamtfehler der Ortsdosisleistung ergibt sich aus den statistischen Schwankungen der Zählraten in den Spektralkanälen und den durch die Korrekturen zusätzlich eingeführten Fehlern. Aufgrund der Fehlerrechnung ergibt sich für eine Einzelmessung der Fehler nach Formel 8.1.

$$\Delta D = \sum \left(\frac{\partial(SDI)}{\partial p_i} \cdot \Delta p_i \right) \quad (8.1)$$

wobei ΔD der Unsicherheit der berechneten Dosisleistung, SDI der Funktion zur Berechnung der Dosisleistung, p_i dem i-ten Parameter der Funktion SDI und Δp_i der Unsicherheit des i-ten Parameters entspricht.

Die Unsicherheiten der einzelnen Parameter lassen sich entweder aus dem statistischen Fehler berechnen (z.B. für Spectrum Dose Index) oder können direkt von der Bestimmung der Parameter in Kapitel 5 übernommen werden.

In Abbildung 8.6 ist als Beispiel die Karte der prozentualen Unsicherheiten im Messgebiet KKB/KKL/PSI für den Messflug des Jahres 2000 dargestellt, die mit Hilfe der Formel 8.1 hergeleitet wurden. Die Unsicherheiten schwanken grösstenteil zwischen 4 % und 14 %. Als Mittelwert ergibt sich für diesen Datensatz rund 7 %.

Von Jahr zu Jahr können also an jedem Punkt Schwankungen in dieser Grössenordnung auftreten, ohne dass ein anderer Effekt die Messresultate beeinflussen muss. Um nun diese Einzelfehler von systematischen Restfehlern und Langzeittrends zu unterscheiden, wurde das folgende Vorgehen gewählt.

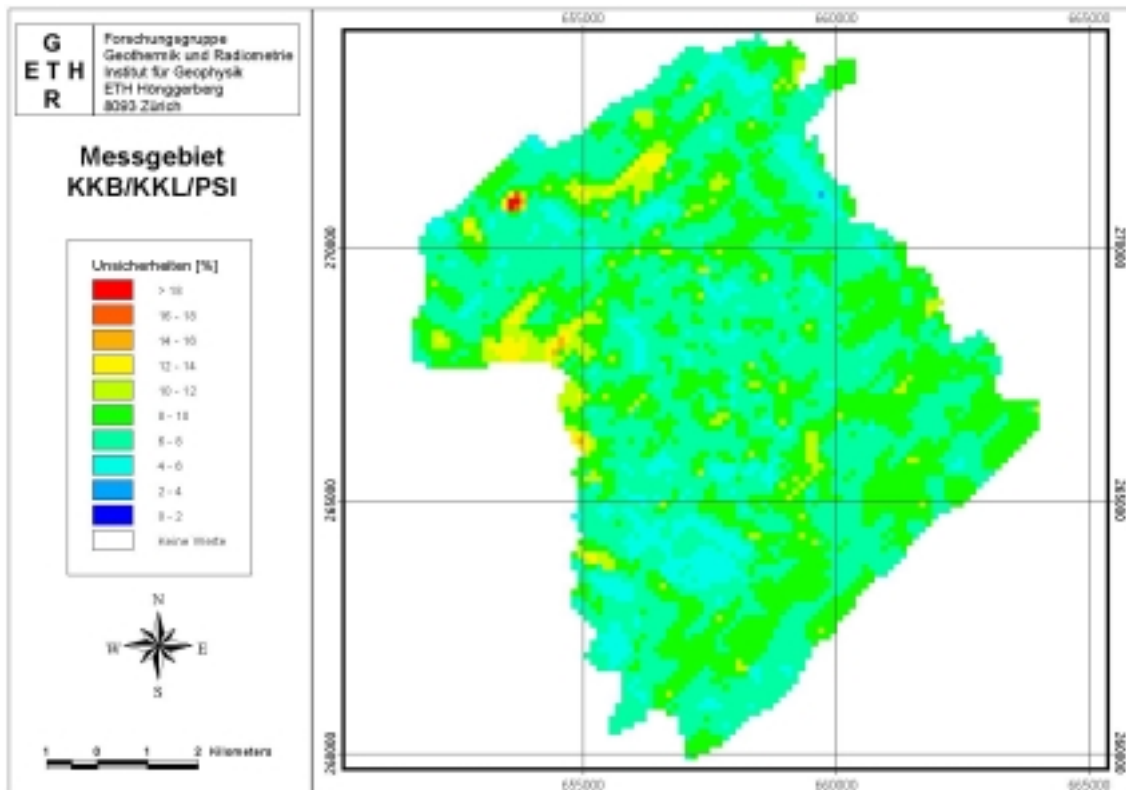


Abbildung 8.6: Unsicherheiten für die mit Hilfe der SDI Methode berechneten Dosisleistungen des Messfluges 2000 im Messgebiet KKB/KKL/PSI. Die hohen Werte an einem Punkt im Nordwesten des Messgebietes ist auf die dort gemessene, grosse Radarhöhe zurückzuführen, die sich bei der Fehlerrechnung über die Unsicherheit im Abschwächungskoeffizienten stark bemerkbar macht.

In einem ersten Schritt wurde für jedes Jahr und jedes der drei Messgebiete Gösgen (KKG), Mühleberg (KKM) und Beznau/Leibstadt/PSI (KKB/KKL/PSI) je eine Karte der Ortsdosisleistung mit Hilfe der SDI Methode (siehe auch Kapitel 5.2) erstellt. Dann wurde für jedes Messgebiet eine Mittelwerts- und Standardabweichungskarte der Ortsdosisleistungswerte berechnet.

Für die weitere Analyse wurde nun für jedes Jahr und jeden Kartenpunkt die prozentualen Abweichungen vom entsprechenden Mittelwert bestimmt. Die prozentualen Abweichungen werden dann über das ganze Messgebiet gemittelt und die zugehörige Standardabweichung berechnet. So erhält man für jedes Jahr, in dem Messdaten vorliegen, eine mittlere prozentuale Abweichung von der Mittelwertkarte. Damit für diese Vergleiche keine Einflüsse der stark variierenden ^{16}N -Strahlung und der anderen künstlichen Strahlungsquellen bestehen, werden die Werte der KKW-Standorte und der PSI-Areale maskiert.

Im weiteren wurde für jedes Jahr ein Streudiagramm gegen die Mittelwertkarte erstellt (siehe als Beispiel Abbildung 8.7). Wie aus dem Beispiel ersichtlich ist, weisen diese Streudiagramme typischerweise einen ausgeprägten linearen Zusammenhang auf. Die Offsets und Steigungen der Regressionsanalysen geben deshalb weitere Aufschlüsse über das zeitliche Verhalten.

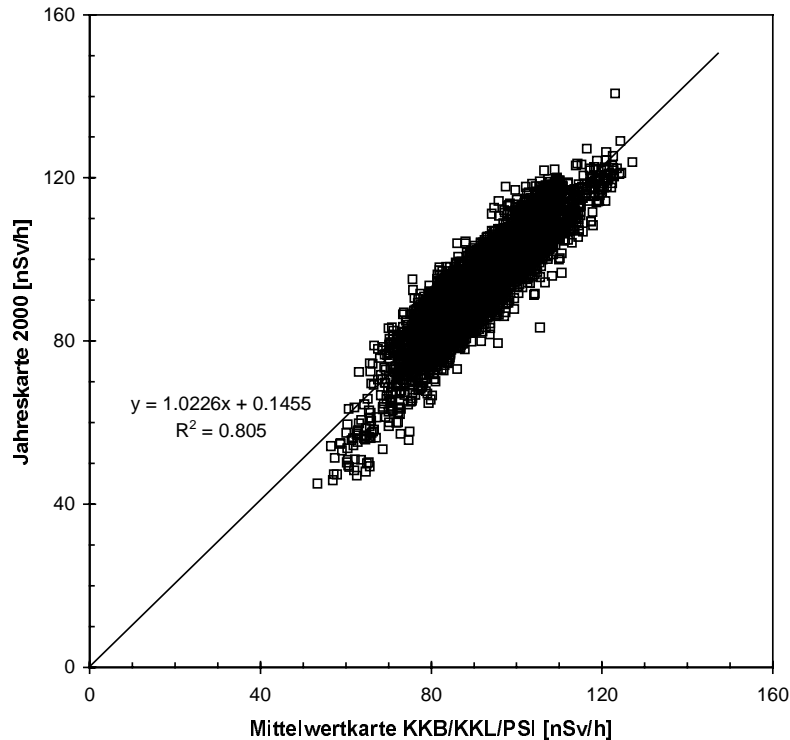


Abbildung 8.7: Streudiagramm der Jahreskarte 2000 gegen die Mittelwertkarte aus dem Messgebiet KKB/KKL/PSI, wobei die KKW-Standorte und die beiden PSI-Areale maskiert wurden.

8.3.2 Ergebnisse

Messgebiet KKB/KKL/PSI

In der Abbildung 8.8 ist die Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung für das Messgebiet KKB/KKL/PSI dargestellt. Deutlich sind die drei roten Punkte auszumachen, die den Standorten des Kernkraftwerkes Leibstadt (im Norden) und der beiden PSI entspricht. Das Kernkraftwerk Beznau ist auf dieser Karte nicht zu erkennen.

Neben diesen erhöhten Werten, die durch künstliche Radioaktivität verursacht und näher im Kapitel 8.2 diskutiert wurden, sind auch Strukturen zu erkennen, die durch Vegetation (Wald) und Gewässer verursacht werden. Deutlich sind die tieferen Werte über Wälder (siehe auch Kapitel 5.3) und Flüssen zu erkennen. Im weiteren wird das Strahlungsfeld natürlich durch die Gesteinszusammensetzung beeinflusst. Abgesehen von einer Glättung ist die Mittelwertkarte den einzelnen Jahreskarten sehr ähnlich.

Der Mittelwert für die Ortsdosisleistung ausserhalb der Kernanlagenstandorte beträgt rund 92 nSv/h, wobei der Minimalwert bei 53 nSv/h und der Maximalwert bei 127 nSv/h liegen. Die tiefsten Werte werden selbstverständlich über der Aare, insbesondere über dem Klingnauer Stausee gemessen, da dort die terrestrische Strahlung praktisch ganz durch das Wasser abgeschirmt wird.

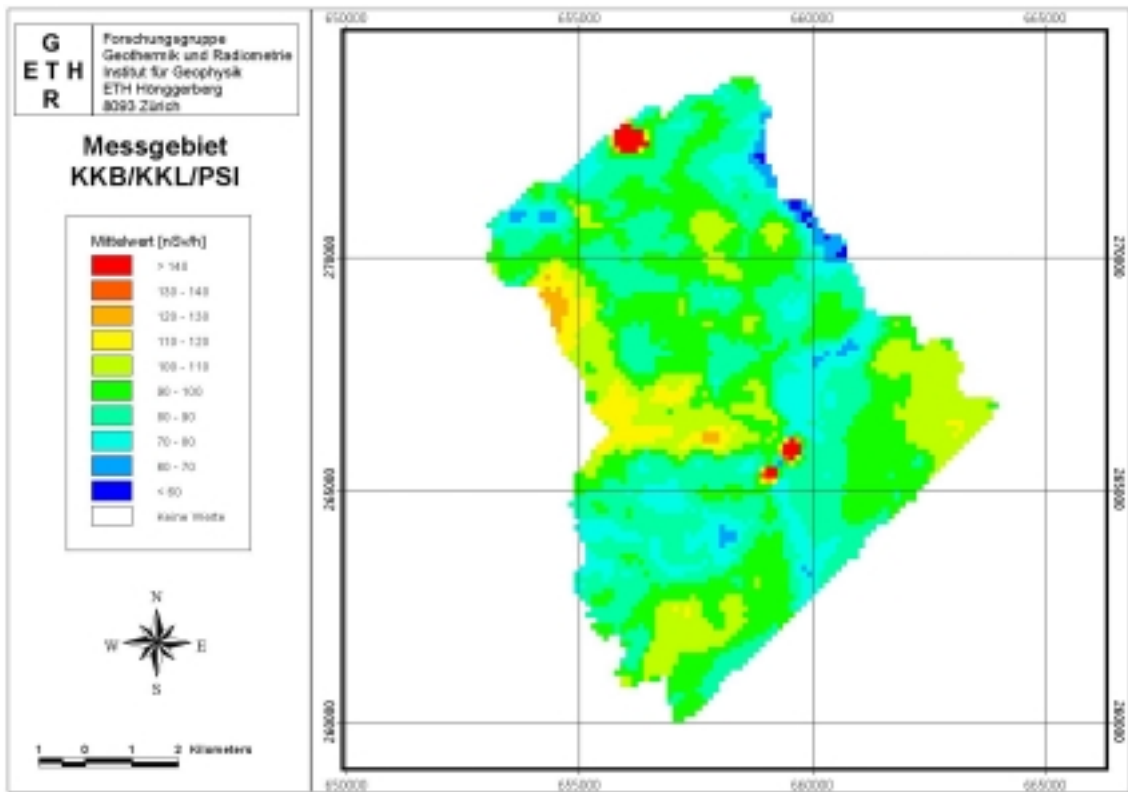


Abbildung 8.8: Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung im Messgebiet KKB/KKL/PSI. Deutlich sind neben dem KKL und den beiden PSI (Ost und West) auch Merkmale zu erkennen, die durch Vegetation (Wald) und Gewässer (Aare) verursacht werden.

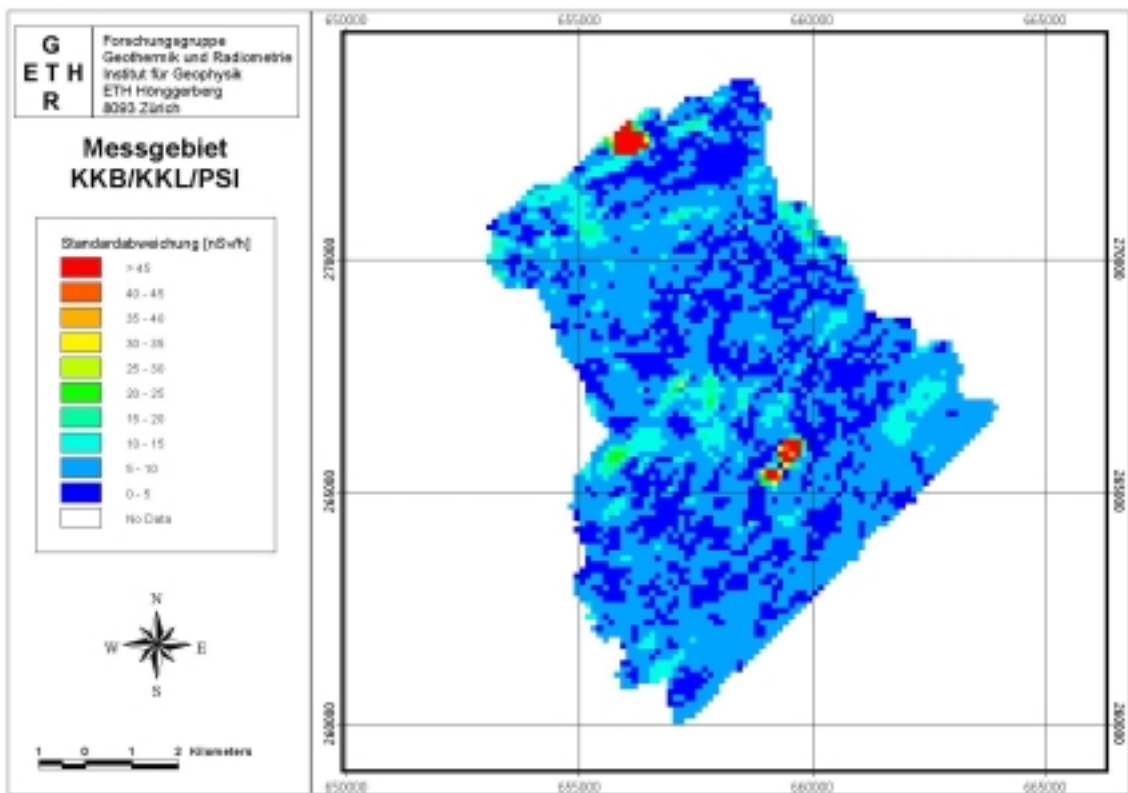


Abbildung 8.9: Standardabweichungen der Ortsdosisleistungen aus den Jahren 1992 bis 2000 im Messgebiet KKB/KKL/PSI.

Die Karte der Standardabweichungen (Abbildung 8.9) zeigt ausserhalb der Kernanlagenstandorte ein stochastisches Muster mit einem Mittelwert von rund 7 nSv/h (Minimum: 1 nSv/h; Maximum: 26 nSv/h). Wiederum sind deutlich die Standorte des Kernkraftwerks Leibstadt und der beiden PSI zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass einerseits der Strahlungspegel bei den verschiedenen Kernanlagen aufgrund des Betriebszustandes schwanken kann und andererseits die gemessene Zählrate davon abhängt, wie nahe man an der Quelle vorbeifliegt. Im übrigen Messgebiet liegen die Standardabweichungen hauptsächlich zwischen 0 und 10 nSv/h. Dies entspricht einer Schwankung von rund $\pm 10\%$.

Bildet man nun die mittlere prozentuale Abweichung von der Mittelwertkarte für jedes einzelne Messjahr und trägt diese gegen die Zeit auf, erhält man für das Messgebiet KKB/KKL/PSI die in Abbildung 8.10 dargestellten Resultate. Die mittleren Abweichungen schwanken um 0%. Die maximale mittlere Abweichung liegt unter 10%. Das Jahr 1993 weist die höchste Abweichung vom Mittelwert aus, wobei aber der Unterschied zu den übrigen Datensätzen nicht gross ist. Ebenfalls besitzt der Datensatz des Jahres 1993 die mit Abstand grösste Standardabweichung. Es ist kein Trend in eine bestimmte Richtung zu sehen.

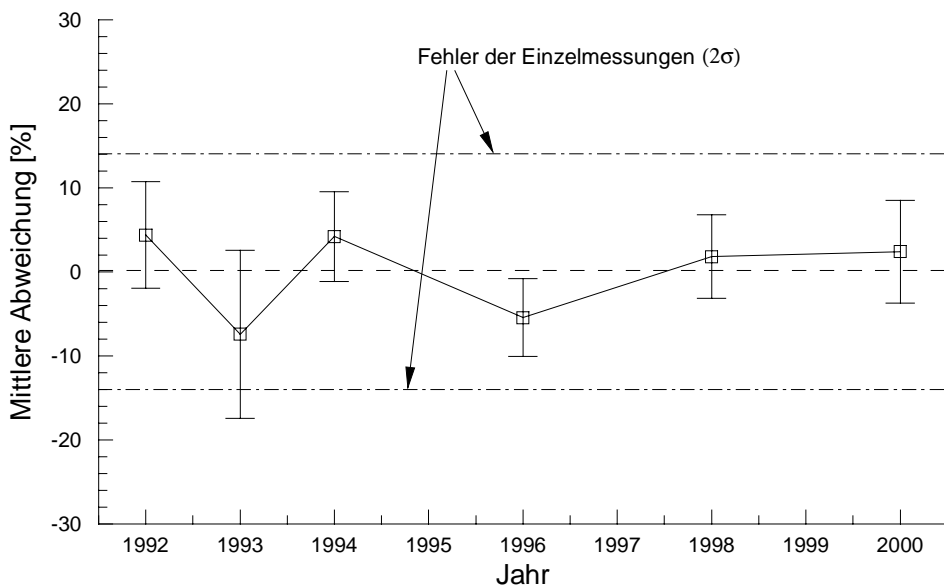


Abbildung 8.10: Mittlere prozentuale Abweichung vom Mittelwert für die Ergebnisse der einzelnen Jahre im Messgebiet KKB/KKL/PSI. Die Fehlerbalken entsprechen der einfachen Standardabweichung (1σ). Die Fehlergrenzen der Einzelmessungen ergeben sich aus einem mittleren Fehler der Einzelmessungen von 7%.

Wie sich zeigte, stört die grosse Streuung im Datensatz des Jahres 1993 derart, dass man bei einer Regression zur Mittelwertkarte extreme Werte (Steigung: 0.67; Offset: 23.4) erhält. Trägt man die entsprechende Gerade in das Streudiagramm ein, ist sie optisch nicht nachvollziehbar. Deshalb wurde bei der Regression die Steigung auf Eins fixiert. Für den Offset erhält man dann den Wert -7.12 (Abbildung 8.11).

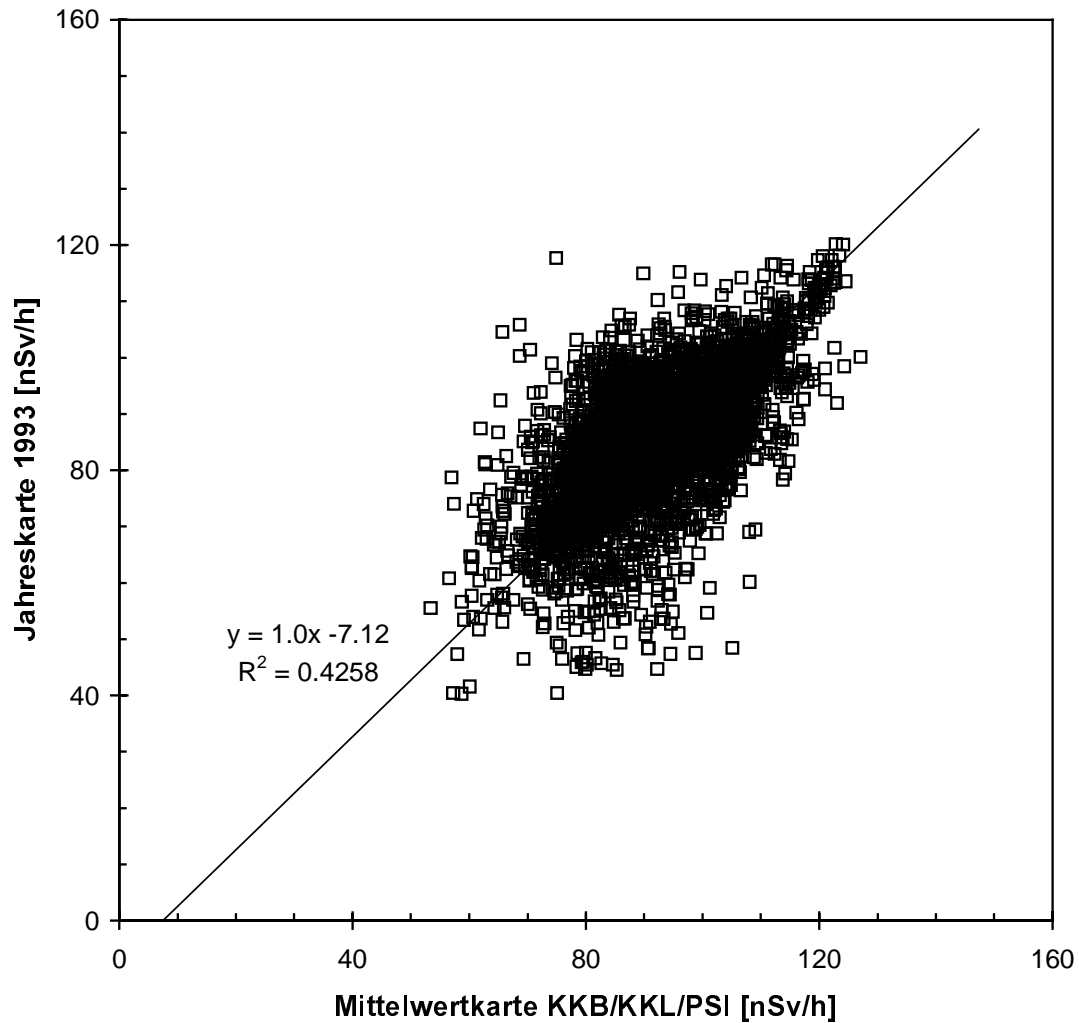


Abbildung 8.11: Streudiagramm der Jahreskarte 1993 gegen die Mittelwertkarte. Für die eingezeichnete lineare Regression wurde die Steigung auf den Wert 1.0 fixiert.

In Abbildung 8.12 sind Steigung und Offset der Regressionsgeraden sowie die Korrelation der Streudiagramme für die verschiedenen Datensätze dargestellt. Wie leicht zu erkennen ist, weisen mit Ausnahme des Ausreissers bei der Korrelation im Jahr 1993 alle Datensätze ziemlich konstante Werte auf. Die Steigungen der Regressionsgeraden liegen überall nahe bei Eins. Auch die Korrelation zwischen den einzelnen Datensätzen und der Mittelwertkarte ist bis auf das Jahr 1993 sehr gut und liegt um 0.9. Die Offsets korrelieren sehr gut mit den mittleren Abweichungen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Abweichungen durch eine von Jahr zu Jahr verschiedene aber über das ganze Messgebiet konstante Wertverschiebung erklärt werden kann.

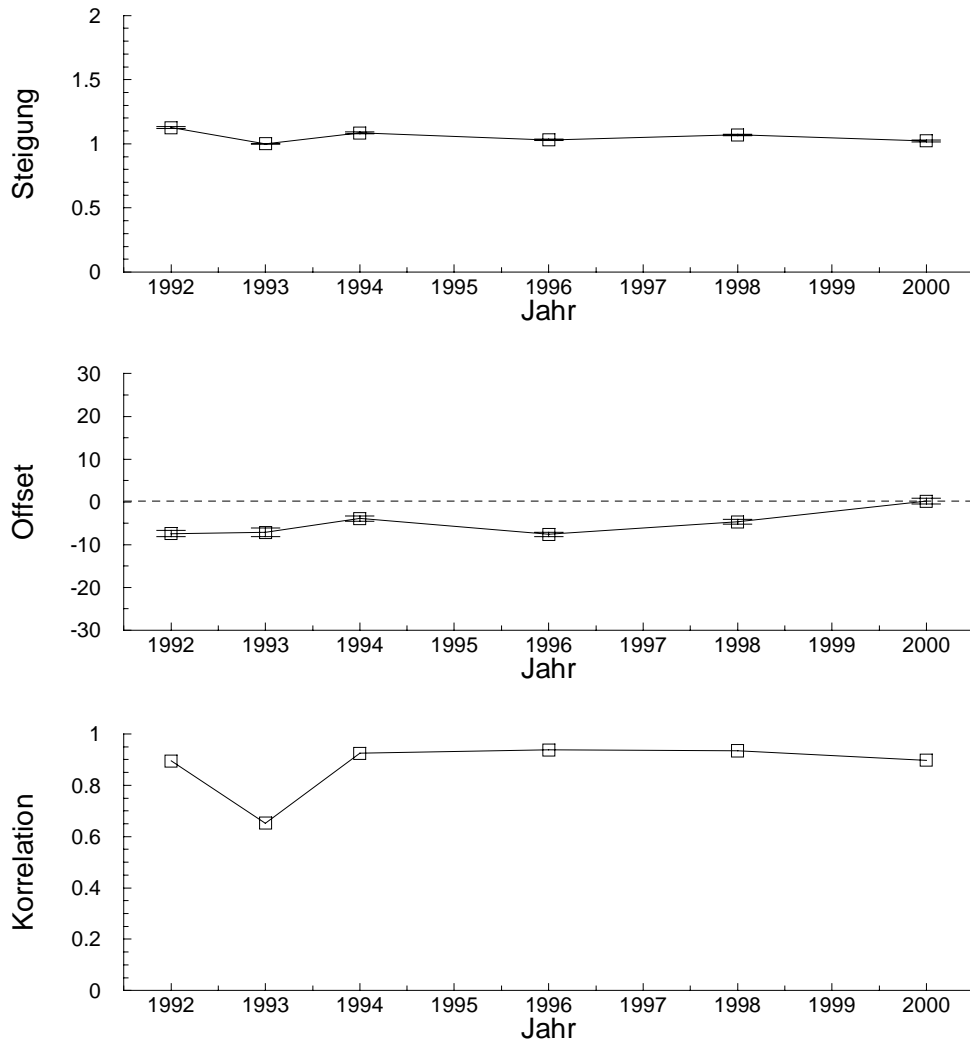


Abbildung 8.12: Steigungen und Offsets der Regressionsgeraden sowie Korrelation zwischen den jährlichen Grids und der Mittelwertkarte im Messgebiet KKB/KKL/PSI.

Messgebiet KKG

Das selbe wie für das Messgebiet KKB/KKL/PSI lässt sich nun auch für die Messdaten im Gebiet des Kernkraftwerkes Gösgen durchführen. In Abbildung 8.13 ist die über die Jahre 1992, 1993, 1995, 1997 und 1999 gemittelte Karte der Ortsdosisleistung dargestellt. Der Mittelwert dieser Karte liegt bei 89 nSv/h, wobei alle Werte zwischen 67 nSv/h und 109 nSv/h liegen. Auch hier sind wiederum Strukturen zu erkennen, die auf Effekte von Wäldern und Gewässern zurückzuführen sind. Deutlich ist der Verlauf der Aare an den tiefsten Werten zu erkennen. Im Messgebiet KKG sind im Gegensatz zum Gebiet KKB/KKL/PSI keine Anomalien zu erkennen, die auf künstliche Radioaktivität schliessen lassen.

Die in Abbildung 8.14 dargestellten Standardabweichungen für die Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung zeigt grösstenteils Werte zwischen 0 nSv/h und 10 nSv/h. In dieser Karte sind keine Strukturen zu erkennen, die auf bestimmte Einflüsse schliessen lassen.

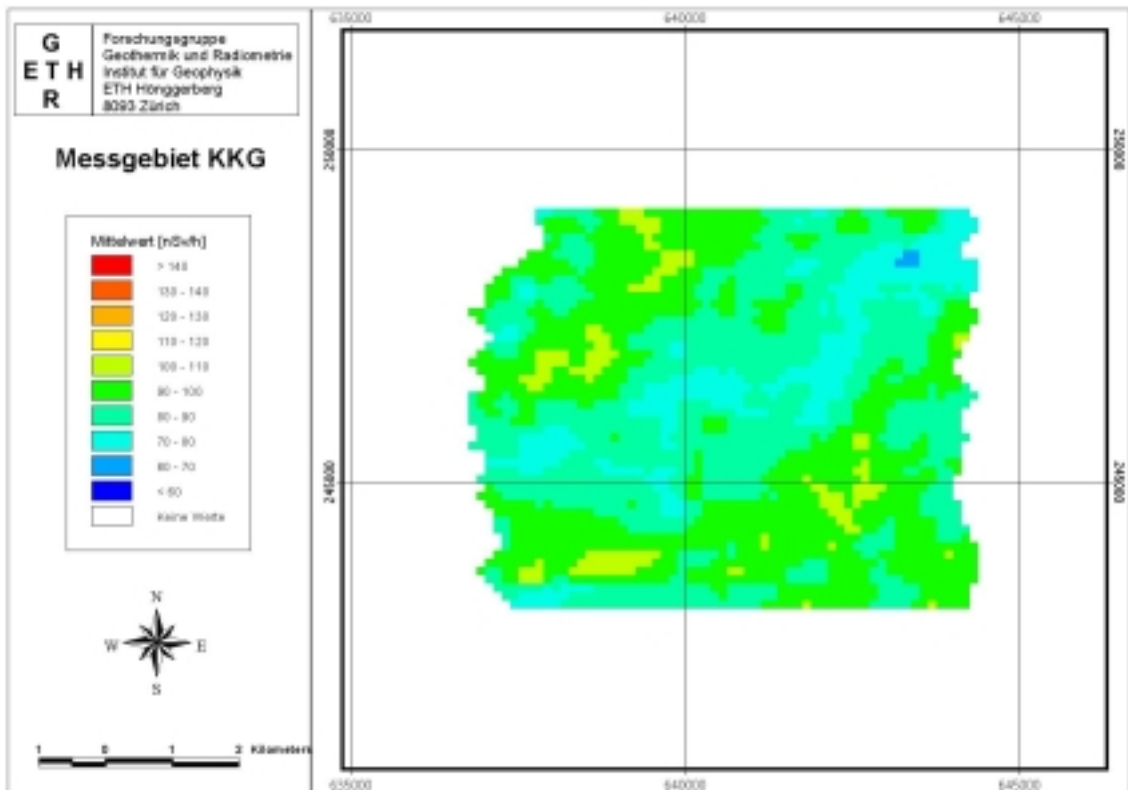


Abbildung 8.13: Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung im Messgebiet KKG.

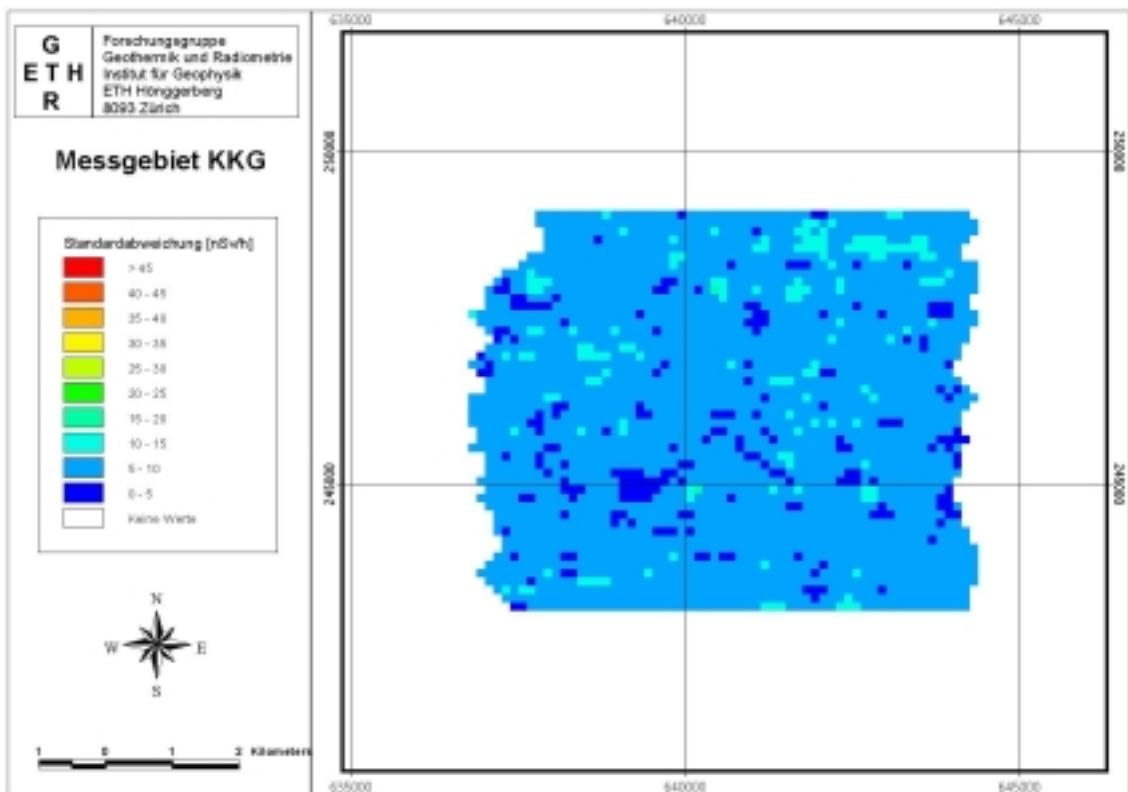


Abbildung 8.14: Standardabweichungen der gemittelten Ortsdosisleistung im Messgebiet KKG.

Zeichnet man nun die mittlere prozentuale Abweichung der einzelnen Datensätze von der Mittelwertkarte über die Zeit auf (siehe Abbildung 8.15), erkennt man einen deutlichen Peak im

Jahre 1997. Die mittlere Abweichung beträgt für dieses Jahr knapp 14 %. Die Ergebnisse der anderen Jahre liegen innerhalb des Wertebereiches von 0 % bis -10 % allesamt unter dem Mittelwert. Die Standardabweichungen sind bei allen Datensätzen etwa gleich gross.

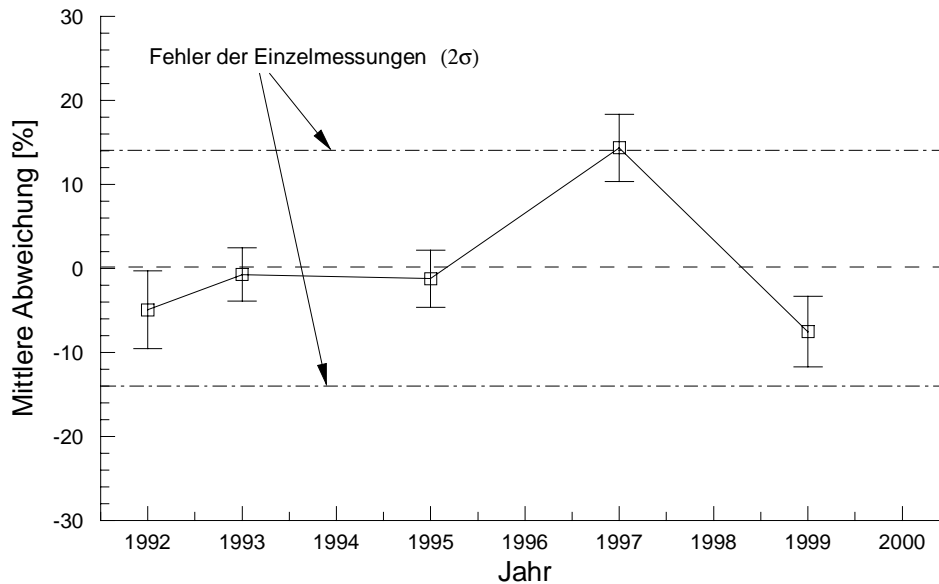


Abbildung 8.15: Mittlere prozentuale Abweichung der jährlichen Resultate von der Mittelwertkarte im Messgebiet KKG. Die Fehlerbalken entsprechen der einfachen Standardabweichung (1σ). Die Fehlergrenzen der Einzelmessungen ergeben sich aus einem mittleren Fehler der Einzelmessungen von 7 %.

In Abbildung 8.16 sind für das Messgebiet KKG die Steigungen und Offsets der Regressionsgeraden sowie die Korrelation zwischen Datensätzen der unterschiedlichen Jahre und der Mittelwertkarte über die Zeit aufgetragen. Die Steigungen der Regressionsgeraden schwanken um den Wert Eins und weisen keinen augenfälligen Trend auf. Etwas anders sieht es bei den Offsets aus. Für das Jahr 1992 ergibt sich dort mit rund -10 der tiefste Wert. Das Jahr 1997 weist den höchsten Offset aus, wobei aber die Differenz zu den übrigen Werten geringer ist. Die Offsets korrelieren mit den mittleren Abweichungen.

Die Korrelation zwischen den Datensätzen einzelner Jahre und der Mittelwertkarte ist für alle Jahre sehr gut. Die Werte schwanken um 0.9. Auch für die Jahre, die bei den Steigungen und Offsets der Regressionsgeraden grössere Abweichungen aufweisen, zeigt die Korrelation kein abweichendes Verhalten.

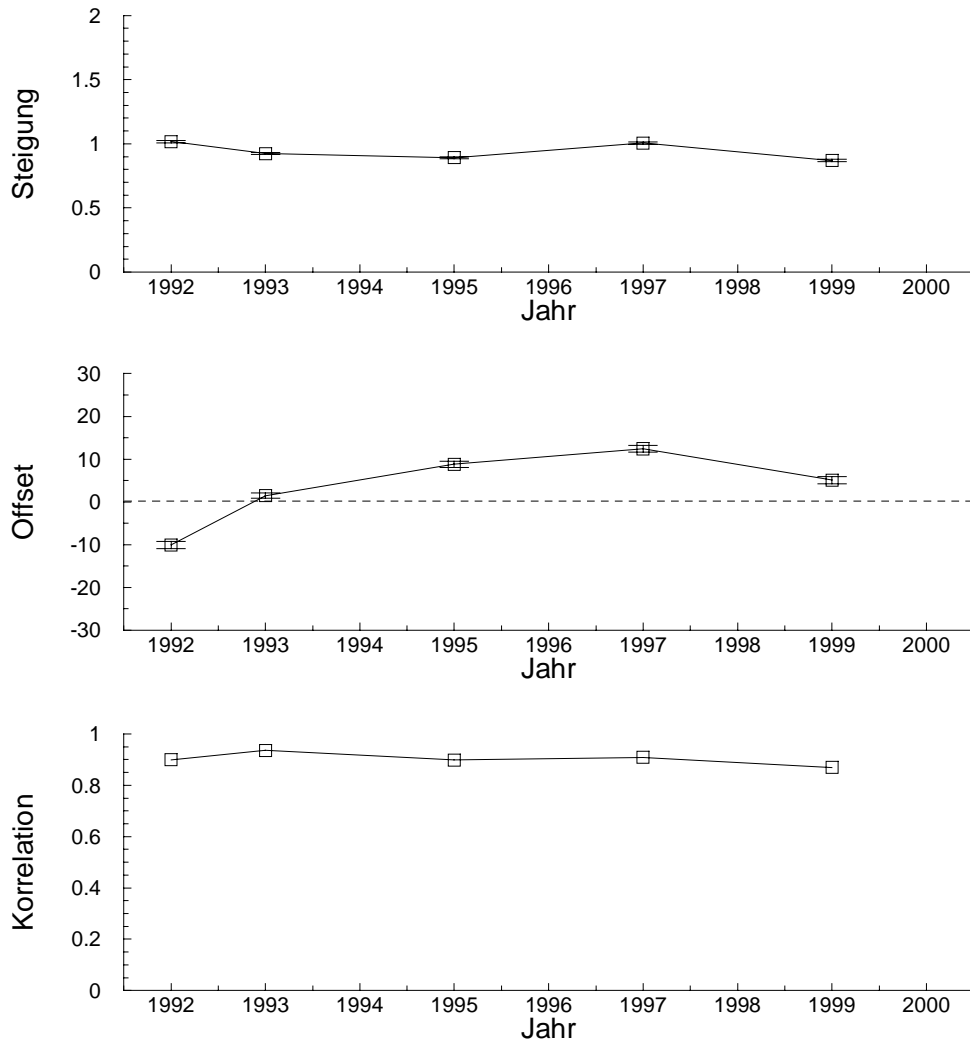


Abbildung 8.16: Steigungen und Offsets der Regressionsgeraden sowie Korrelation zwischen den Datensätzen verschiedener Jahre und der Mittelwertkarte im Messgebiet KKG.

Messgebiet KKM

In der Abbildung 8.17 ist die Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung im Messgebiet KKM abgebildet. Deutlich ist anhand der erhöhten Werte der Standort des Kernkraftwerkes Mühleberg zu erkennen. Im Gegensatz zu diesen hohen Werten zeichnet sich der Wohlensee durch tiefe Werte ab. Mehr im Westen des Messgebietes ist auch schwach der Verlauf der Saane zu erkennen, die nördlich des Kernkraftwerkes Mühleberg in die Aare mündet. Diese Einmündung zeichnet sich in den Ortsdosisleistungen mit tiefen Werten ab, da dort eine grössere Wassermenge einen bedeutenden Teil der terrestrischen Strahlung absorbiert. Neben dem Einfluss des Wassers ist hier wie in den anderen Messgebieten ebenfalls der Einfluss des Waldes anhand tieferer Werte zu erkennen.

Die gemittelten Ortsdosisleistungen liegen zwischen 50 nSv/h (Wohlensee) und 119 nSv/h, wobei die erhöhten Werte im unmittelbaren Bereich des Kernkraftwerkes nicht berücksichtigt wurden. Der Mittelwert liegt mit rund 96 nSv/h auf etwas höherem Niveau als in den anderen Messgebieten KKG und KKB/KKL/PSI.

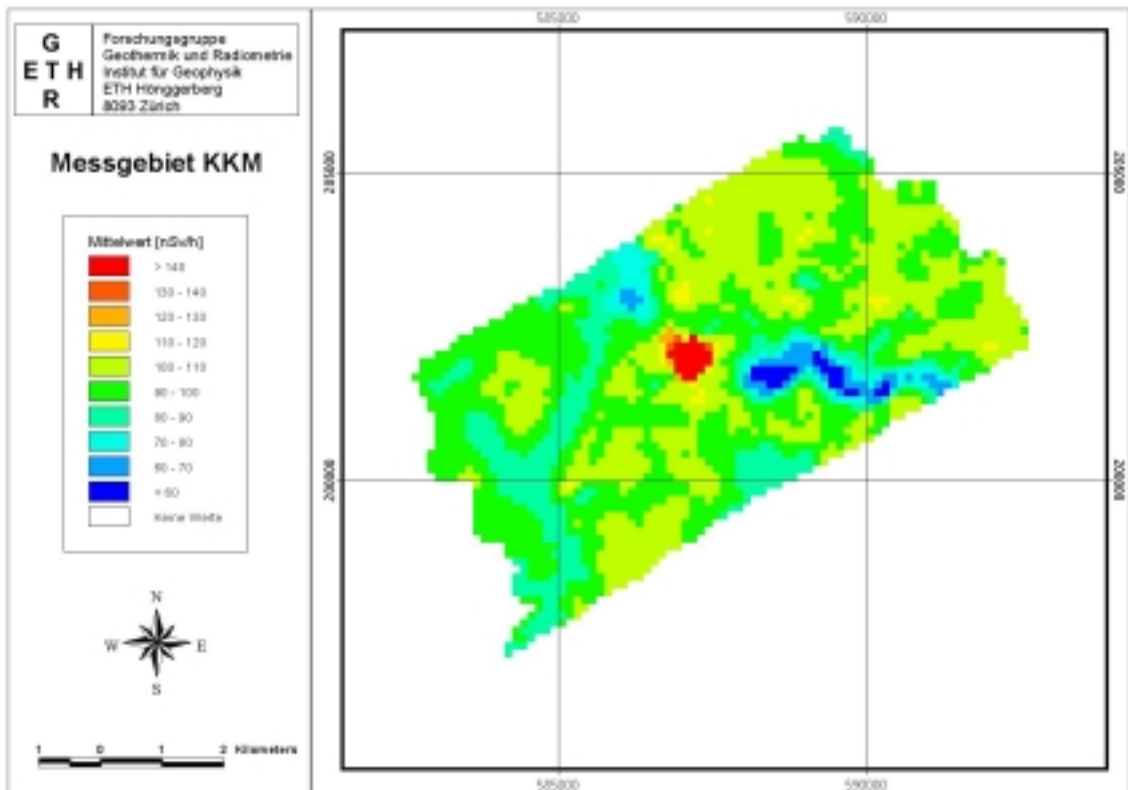


Abbildung 8.17: Mittelwertkarte der Ortsdosisleistung im Messgebiet KKM.

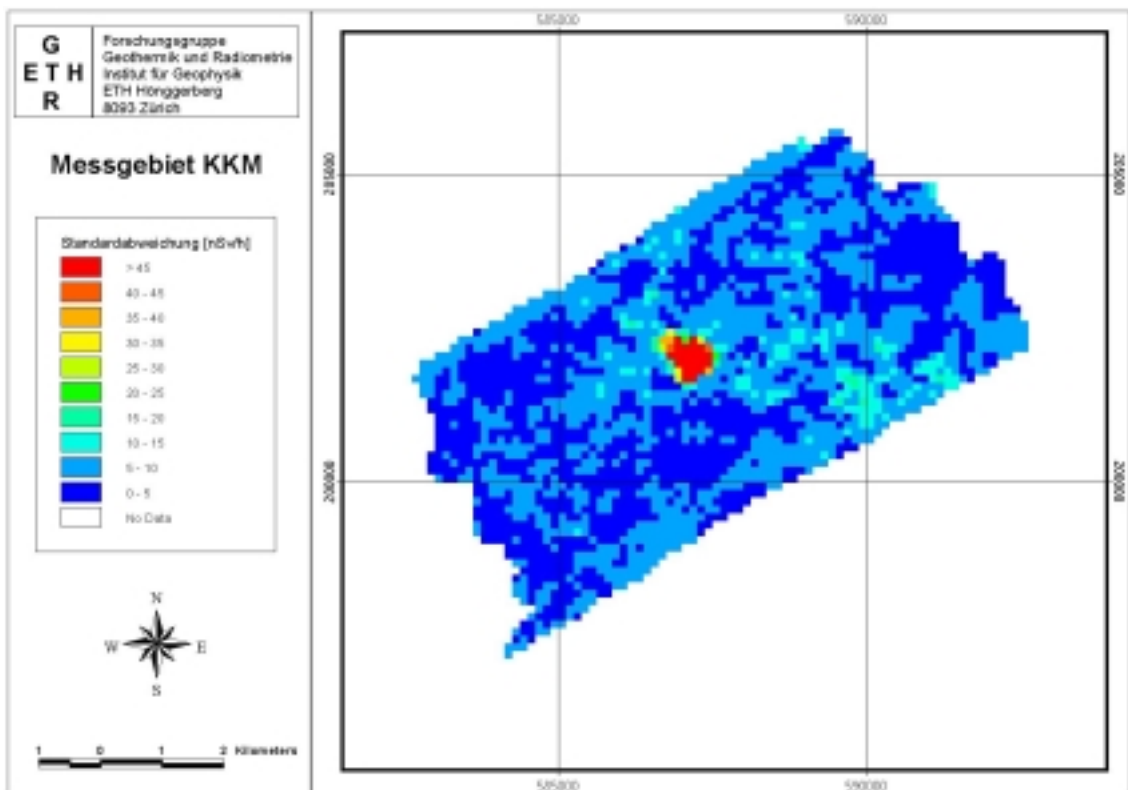


Abbildung 8.18: Standardabweichungen der gemittelten Ortsdosisleistung im Messgebiet KKM.

Die in Abbildung 8.18 dargestellten Standardabweichungen der gemittelten Ortsdosisleistungen liegen grösstenteils im Bereich von 0 nSv/h bis 10 nSv/h. Wie bei der Karte der Ortsdosisleistung fällt auch hier der Standort des KKM anhand stark erhöhter Werte auf.

Im Gebiet des Wohlensees sind auch vermehrt erhöhte Standardabweichungen zu erkennen. Diese sind sehr wahrscheinlich auf eine unterschiedliche Genauigkeit der Positionen in den verschiedenen Datensätzen zurückzuführen. Die Ungenauigkeiten wirken sich dann gerade dort am stärksten aus, wo grössere Änderungen in der Ortsdosisleistung über eine kurze Distanz auftreten. Dies ist vor allem an Rändern von grossen Wasserflächen der Fall.

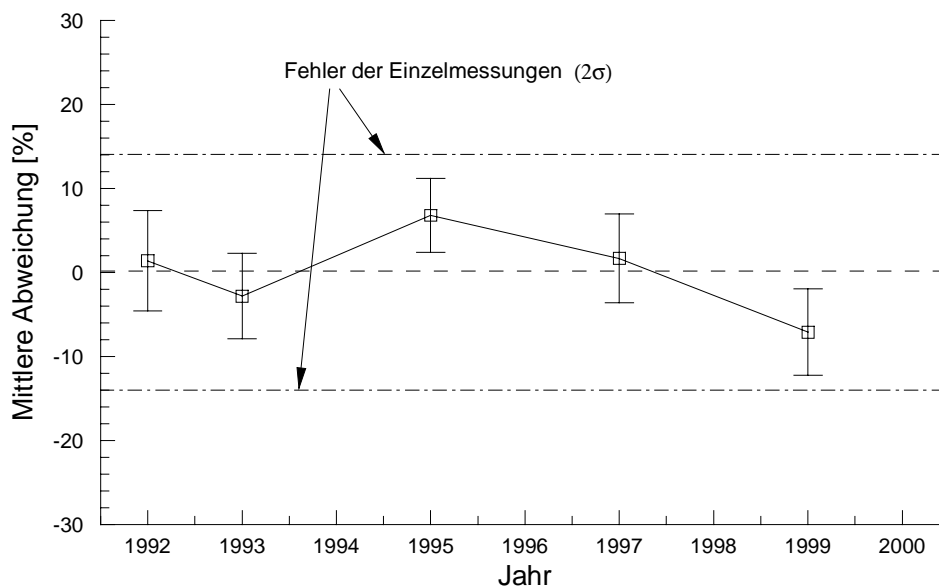


Abbildung 8.19: Mittlere prozentuale Abweichung der jährlichen Resultate von der Mittelwertkarte im Messgebiet KKM. Die Fehlerbalken entsprechen der einfachen Standardabweichung (1σ). Die Fehlergrenzen der Einzelmessungen ergeben sich aus einem mittleren Fehler der Einzelmessungen von 7 %.

Die mittleren prozentualen Abweichungen der einzelnen Jahre von der Mittelwertkarte sind in Abbildung 8.19 graphisch dargestellt. Sie schwanken um den Nullpunkt, wobei der Wert für das Jahr 1995 mit rund 7 % die grösste Abweichung aufweist. Die Standardabweichungen der gemittelten Werte, die in der Abbildung 8.19 als Fehlerbalken eingezeichnet sind, unterscheiden sich von Datensatz zu Datensatz nur wenig und liegen allesamt zwischen 4.2 % und 5.4 %. Ein eindeutiger Trend über den ganzen Zeitbereich ist hier nicht zu erkennen.

Bei den Offsets der Regressionsgeraden, die aus den einzelnen Datensätzen und der Mittelwertkarte erstellt wurden, ist in Abbildung 8.20 ein ähnliches Muster wie in Abbildung 8.19 zu erkennen. Denn auch bei den Offsets ergibt sich für das Jahr 1995 der höchste Wert. Im Gegensatz dazu zeigen die entsprechenden Steigungen nur geringe Schwankungen um den Wert Eins. Auch die Korrelation zwischen den Datensätzen einzelner Jahre und der Mittelwertkarte bewegt sich in einem engen Bereich um den Wert 0.9. Bei keinem dieser drei Parameter in Abbildung 8.20 ist ein deutlicher Trend über die Zeit festzustellen.

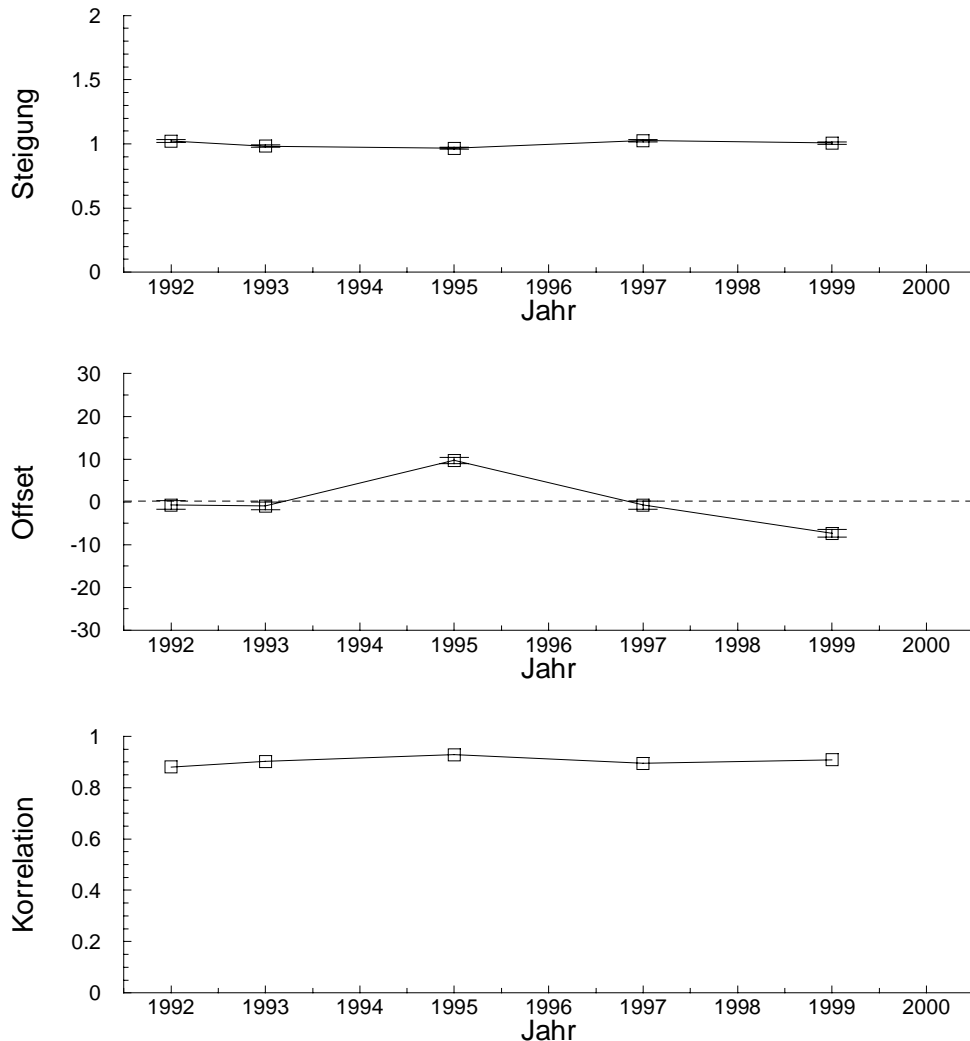


Abbildung 8.20: Steigungen und Offsets der Regressionsgeraden sowie Korrelation zwischen den Datensätzen verschiedener Jahre und dem gemittelten Datensatz im Messgebiet KKM.

8.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Vergleiche der Datensätze aus verschiedenen Jahren zeigen eine gute Übereinstimmung. In den Mittelwertkarten treten Muster, die durch Vegetation oder Gewässer verursacht werden, deutlicher hervor als in den Karten der einzelnen Jahre. Die bestimmten Standardabweichungen der einzelnen Zellen liegen grösstenteils zwischen 0 nSv/h und 10 nSv/h. Dies entspricht in etwa einer Unsicherheit von $\pm 10\%$.

Die Mittelwertkarten weisen im allgemeinen zuverlässigere Resultate aus, da die statistischen Schwankungen durch die Bildung des Mittelwertes ausgeglichen werden. Dies bestätigen auch die Korrelationen für alle Datensätze eines Messgebietes. Sie liegen überall zwischen 0.7 und 1. Bei der Betrachtung der mittleren prozentualen Abweichungen der einzelnen Jahre zur Mittelwertkarte sind ähnliche Grössen wie bei den Standardabweichungen auszumachen. Mit Ausnahme des Jahres 1997 im Messgebiet KKG liegen alle Werte innerhalb von $\pm 10\%$ um den Mittelwert.

Die Untersuchung der Steigungen und Offsets zeigt, dass sich die Abweichungen durch eine von Jahr zu Jahr unterschiedliche, jedoch innerhalb des Messgebietes konstante Werteverchiebung erklären lassen.

8.3.4 Vergleich

Nun sollen die Ortsdosisleistungen aus der Aeroradiometrie mit entsprechenden Bodenmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern verglichen werden. Insbesondere werden die prozentualen Abweichungen der einzelnen Jahre zum Mittelwert betrachtet. In Abbildung 8.21 sind die Ergebnisse für den Messpunkt beim Grundwasserpumpwerk in der Gemeinde Full/AG dargestellt.

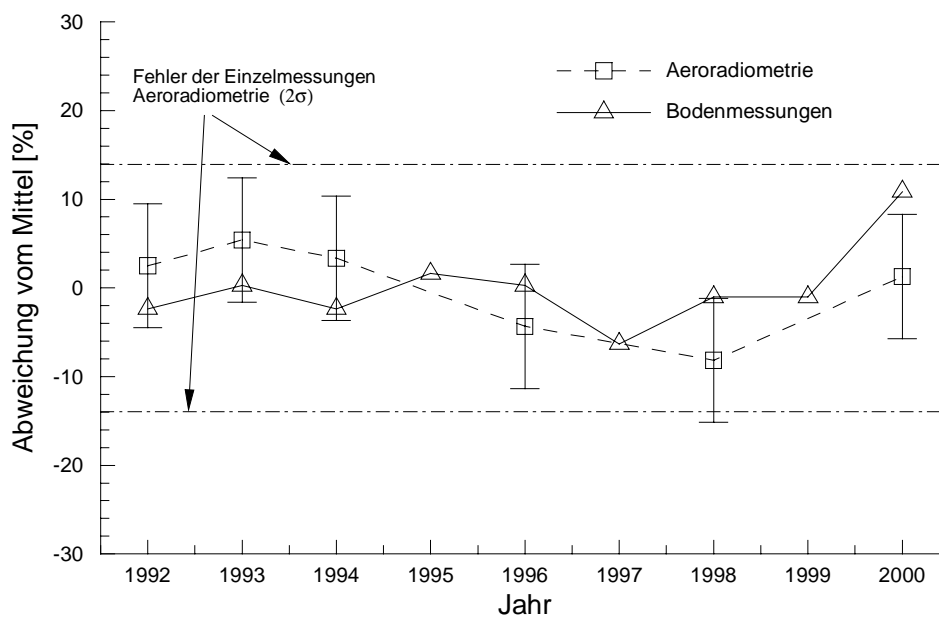


Abbildung 8.21: Prozentuale Abweichungen vom Mittel der aeroradiometrischen und insitu Messungen beim Grundwasserpumpwerk in Full/AG.

Wie aus Abbildung 8.21 ersichtlich wird, sind auch die Bodenmessungen gewissen Schwankungen unterworfen (maximal rund 10 % zum Mittelwert).

Wie sich aufgrund der vorausgehenden Ergebnisse zeigte, sind die aeroradiometrischen Messungen sehr gut reproduzierbar. Die Abweichungen der Messungen einzelner Jahre von der Mittelwertkarte liegen alle in einem engen Bereich von ± 10 % um den Mittelwert. Sie weisen damit eine ähnliche Schwankungsbreite wie jährlich wiederholte Bodenmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern auf.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Jahren werden durch über das ganze Messgebiet konstante Werteverchiebungen verursacht. Die relative Verteilung ist noch besser reproduzierbar als der Mittelwert.

Die jährlichen Werteverchiebungen lassen keinen Trend erkennen. Sie schwanken um den Mittelwert.

Da es sich bei den Messungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern um eine genaue Methode handelt, können die Unterschiede in den entsprechenden Messwerten nicht nur auf die Unsicherheiten der Messungen zurückgeführt werden. Vielmehr scheinen andere zeitlich variierende Effekte die gemessenen Ortsdosisleistungen zu beeinflussen. Mögliche natürliche Einflüsse auf die Resultate aus Bodenmessungen und aus der Aeroradiometrie sollen deshalb nun im folgenden beschrieben werden.

8.3.5 Natürliche Einflüsse auf das Strahlungsfeld

Wie im vorhergehenden Kapitel dargelegt, können die jährlichen Schwankungen der Messungen auf über ein Messgebiet konstante Werteverchiebungen zurückgeführt werden. Solche Werteverchiebungen könnten durch folgende Effekte verursacht werden:

- Schwankungen des Radongehaltes in der Atmosphäre
- Schwankungen des Wassergehaltes im Boden

Effekte durch ungenügende Kalibration sind aufgrund der hohen Datenqualität nicht zu erwarten. Ein schwankender Helikopterbackground kann jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden. Weitere Einflüsse wie Effekte der Atmosphäre werden korrigiert (Temperatur, Luftdruck) oder sind von untergeordneter Bedeutung (Luftfeuchtigkeit, siehe auch Kogan 1969). Im folgenden werden die beiden erstgenannten Effekte näher untersucht.

Radon

Radon selber strahlt keine Gammaquanten aus. Zu seinen Tochterisotopen zählt jedoch auch das ^{214}Bi , dessen Strahlung bei den aeroradiometrischen Messungen verwendet wird. Das Edelgas Radon gelangt durch Diffusion vom Boden in die Luft. Dort zerfällt es in seine Folgeprodukte, die aufgrund ihrer Ladung und metallischen Eigenschaften gerne an Aerosolen haften bleiben. Somit gibt es auch ^{214}Bi Atome in der Atmosphäre, die dann bei den aeroradiometrischen Messungen als Quelle in unmittelbarer Nähe des Detektors wirken. Dadurch führen sie zu einer Überschätzung der aeroradiometrisch bestimmten ^{214}Bi Aktivitäten im Boden.

Weil der Gehalt an Radon und seinen Tochterisotopen in der Atmosphäre von Tag zu Tag stark variieren kann, ist das Radon eine Erklärungsmöglichkeit für die beobachteten Unterschiede in den Mittelwerten. Bei den Schwankungen des Radongehaltes spielen vor allem meteorologische Grössen wie Wind und Niederschlag eine wichtige Rolle. So wurden bei verschiedenen Messgebieten, die mit Flügen an verschiedenen Tagen vermessen wurden, bei der Auswertung der Daten Streifenmuster für die ^{214}Bi Aktivitäten erkannt. Solche Muster lassen sich auch erkennen, wenn man für die Ortsdosisleistung die prozentuale Abweichung von der Mittelwertkarte der Jahre 1992 bis 2000 bestimmt (Abbildung 8.22). Das abgebildete Beispiel stammt vom Messgebiet KKB/KKL/PSI. Deutlich sind die grösseren Abweichungen im Süden zu erkennen. Der südliche Teil des Messgebietes wurde zwei Tage später als das übrige Gebiet abgeflogen. Die Differenz zwischen den Abweichungen vom Mittelwert der beiden Teilgebiete beträgt gegen 10 %. Dies entspricht rund 10 nSv/h. Das gleiche Muster lässt sich auch in der Karte für die korrigierten Zählraten im Uranfenster erkennen. Der dort erkenntliche Unterschied von rund 4 cps zwischen den beiden Gebieten wirkt sich bei der Umrechnung in Dosisleistungen mit rund 8 nSv/h aus. Damit ist klar aufgezeigt, dass ^{214}Bi in der Atmosphäre

als Folgeprodukt von Radon einen relevanten Einfluss auf die aeroradiometrisch bestimmten Ortsdosisleistungen haben kann.

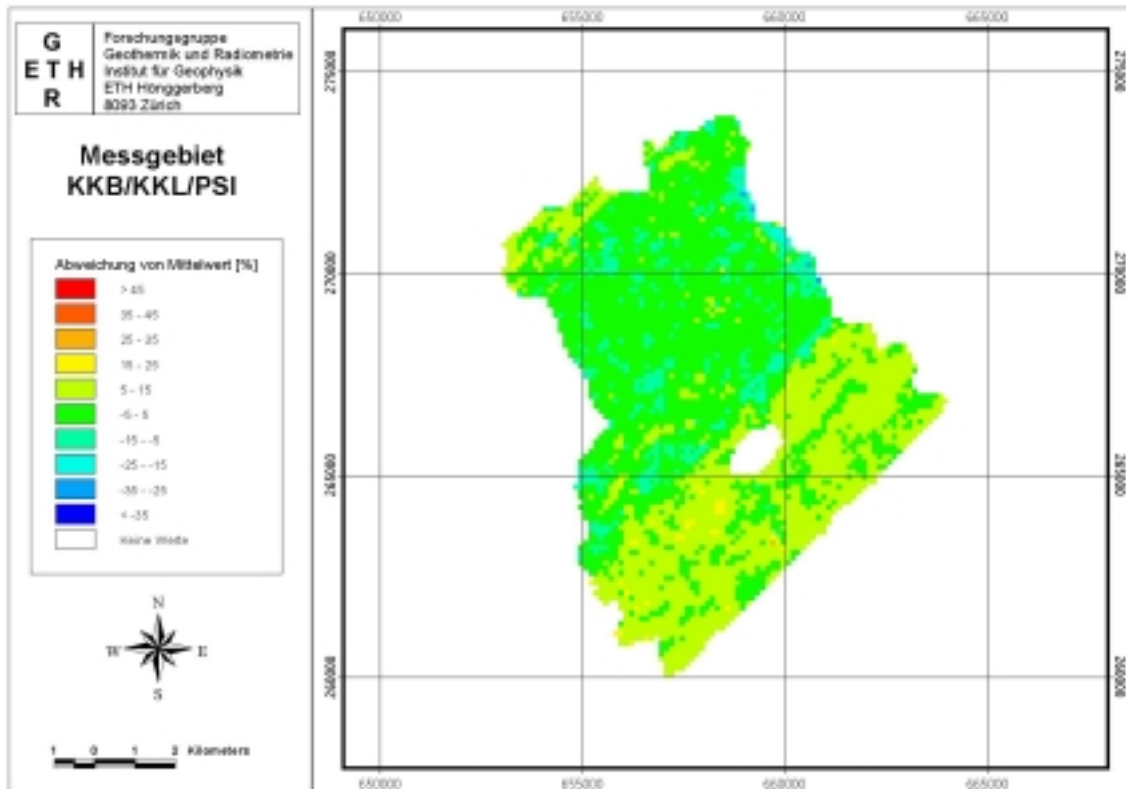


Abbildung 8.22: Prozentuale Abweichung der mit Hilfe der Aeroradiometrie bestimmten Ortsdosisleistung von der Mittelwertkarte für die Messflüge des Jahres 2000. Die Werte im unmittelbaren Einflussbereich des Kernkraftwerkes Leibstadt und der beiden PSI wurden maskiert.

Die in Abbildung 8.22 erkennliche Bänderung weist aber nur auf den Unterschied zwischen den Verhältnissen an den beiden Messtagen hin. Der absolute Beitrag von Radon zur Dosisleistung kann so nicht eruiert werden.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass auch bei der Bestimmung der Ortsdosisleistung eine Radonkorrektur angewandt werden sollte.

Wassergehalt des Bodens

Wie bereits Kogan et al. (1969) zeigte, besteht zwischen dem linearen Abschwächungskoeffizienten für einen trockenen und einen feuchten Boden der Zusammenhang nach Formel 8.2.

$$\mu_f = \mu_t \cdot (1 + 1.11 \cdot w) \quad (8.2)$$

wobei μ_f dem Abschwächungskoeffizienten von feuchtem Boden, μ_t demjenigen von trockenem Boden und w der Bodenfeuchte (Wassergewicht per Gramm trockenem Bodens) entspricht.

Daraus ergibt sich dann bei homogener Aktivitätsverteilung für die Intensität der primären Strahlung an der Bodenoberfläche die Abhängigkeit vom Wassergehalt nach Formel 8.3.

$$J_0 = J_{0,t} \frac{1}{(1 + 1.11 \cdot w)} \quad (8.3)$$

wobei J_0 die Intensität der primären Strahlung an der Bodenoberfläche, $J_{0,t}$ der Intensität der primären Strahlung bei $w = 0$ und w der Bodenfeuchte entspricht.

Die maximal mögliche Bodenfeuchtigkeit eines Bodens hängt von seinem Porenvolumen ab. Dieses ist wiederum von der Zusammensetzung des Bodens abhängig. Deshalb können grosse Unterschiede im Wassergehalt verschiedener Böden auftreten. Im untenstehenden Diagramm (Abbildung 8.23) ist der Einfluss unterschiedlicher Wassergehalte für Böden mit maximalen Bodenfeuchtigkeiten von $w = 0.2$ bis $w = 0.6$ dargestellt.

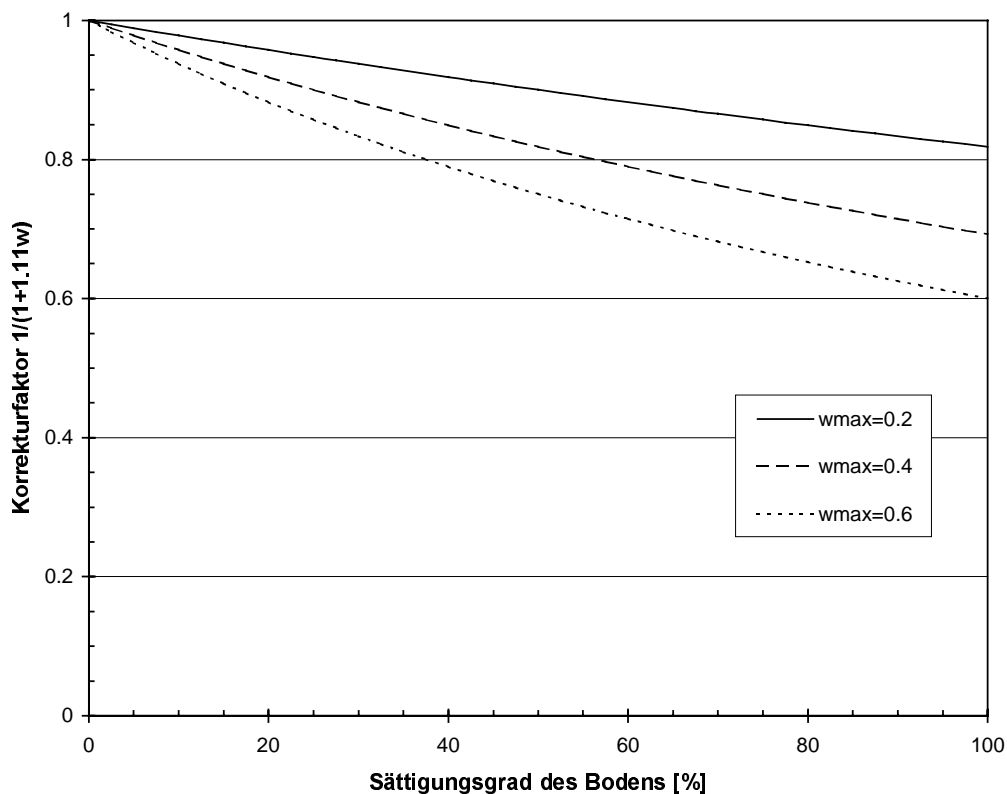


Abbildung 8.23: Verhalten des Korrekturfaktors bei unterschiedlichem Sättigungsgrad des Bodens für verschiedene maximale mögliche Bodenfeuchtigkeiten ($w = \text{Sättigungsgrad} \cdot w_{max}$).

Aus Abbildung 8.23 ist ersichtlich, dass das Strahlungsfeld über Böden mit einer maximal möglichen Bodenfeuchtigkeit von 0.2 bei Veränderungen durchaus um 10 % variieren können. Der mögliche Schwankungsbereich wächst mit zunehmender maximaler Bodenfeuchtigkeit. Geht man davon aus, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Strahlungsfeld des

Bodens und der Ortsdosisleistung besteht, können die durch ändernde Wassergehalte verursachten Schwankungen in der terrestrischen Dosisleistung problemlos 10 % ausmachen. Bei einer üblichen terrestrischen Dosisleistung von rund 50 nSv/h im Mittelland können so Schwankungen im Bereich von 5 nSv/h und mehr erwartet werden.

Leider lässt sich aufgrund der für die Messgebiete verfügbaren Boden- und Meteorodaten nicht ohne weiteres die Bodenfeuchtigkeit bestimmen. Denn die Bodenfeuchtigkeit wird nicht allein durch Porenvolumen und Niederschlagsmengen bestimmt, sondern auch die langfristige Temperaturentwicklung, die Vegetation und die Sonnenscheindauer spielen eine Rolle. Aufgrund des potentiellen Effektes sollte das Problem detaillierter untersucht werden.

Beide identifizierten Effekte verursachen Schwankungen im beobachteten Rahmen von 10 % und können während der Zeit eines Messfluges als mehr oder weniger konstant angesehen werden. Aufgrund der Überlagerung lassen sie sich nicht sauber trennen. Weitere Untersuchungen insbesondere unter Beizug von MADUK-Daten sind nötig.

8.3.6 Fazit

Wie sich bei der Datenanalyse mehrjähriger Messungen des selben Gebietes herausgestellt hat, weisen die mit der SDI-Methode aeroradiometrisch bestimmten Dosisleistungen eine sehr gute Reproduzierbarkeit auf. Die Wertenniveaus der verschiedenen Jahre schwanken rund $\pm 10\%$ um den Mittelwert. Aufgrund dieser Änderungen von Jahr zu Jahr sind keine zeitlichen Trends zu erkennen.

Die Schwankungen von Jahr zu Jahr sind auf innerhalb eines Messgebietes konstante Werteverchiebung zurückzuführen. Diese werden hauptsächlich durch ändernde Radonkonzentrationen in der Atmosphäre und unterschiedliche Bodenfeuchtigkeit verursacht. Beide Einflüsse können allein für die Schwankungen des Wertenniveaus verantwortlich sein, treten aber in kombinierter Form auf. Da der Radongehalt der Atmosphäre von den meteorologischen Verhältnissen abhängig ist, können die entsprechenden Effekte kurzzeitig stark variieren.

Aufgrund der Überlagerung der beiden Effekte lassen sie sich nicht sauber trennen. Weitere Untersuchungen insbesondere mit Hilfe von MADUK-Daten sind nötig. Da der Radongehalt der Atmosphäre auch einen relevanten Einfluss auf die aeroradiometrisch bestimmte Ortsdosisleistung besitzt, muss unbedingt eine entsprechende Radonkorrektur angestrebt werden.

9 Schlussfolgerungen

Die für diese Arbeit gesetzten Ziele konnten vollumfänglich erreicht werden. Damit konnte das bestehende Messsystem weiterentwickelt und die Einsatzbereitschaft gewährleistet werden. Neben den Neuerungen bezüglich der Hardware konnten auch bedeutende Fortschritte in der Auswertemethodik erzielt werden.

Messsystem

Bei Beginn dieser Arbeit bestanden verschiedene Probleme beim Messsystem und seiner Notfalltauglichkeit. Neben zum Teil sehr ungenauen GPS-Positionen lagen die Probleme vor allem bei der Auswertesoftware „Gamero“. Diese eher wissenschaftliche Software erwies sich als fehleranfällig und nicht benutzerfreundlich. Zudem benötigte die Auswertung viel Zeit und war umständlich, da unzählige Auswertungsschritte einzeln abgearbeitet werden mussten. Im weiteren erwies sich eine Überwachung der Messdaten während des Fluges als schwierig und ein Datentransfer war nur in Form von Disketten oder Papier möglich.

Mit dem neuen, P-Code fähigen GPS-Empfänger wird die Genauigkeit der bestimmten Positionen wesentlich verbessert. Die erreichten Genauigkeiten liegen im Bereich von ± 10 m und sind damit fünf bis zehn Mal genauer als mit dem bisherigen System. Zudem liest das Messsystem nun jede Sekunde eine Position aus, so dass zwischen den Messpunkten nicht mehr interpoliert werden muss, wie das beim früheren GPS-Empfänger nötig war. Mit den stark verbesserten Genauigkeiten der GPS-Positionen wurde auch die Voraussetzung für Verbesserungen in der Auswertemethodik und für räumliche Datenanalysen geschaffen (siehe unten).

Mit einer neuen Auswertungs- und Darstellungssoftware wurde ein Ersatz für „Gamero“ auf einer Windows-Plattform geschaffen. Die Bedienung ist einfach und erfolgt über Menüs, wobei der Benutzer so geführt wird, dass keine fehlerhaften Auswertungen mehr möglich sind. Die Auswertung in der neuen Software beinhaltet alle Korrekturen, die auch in „Gamero“ angewandt werden, und berechnet die nuklidspezifischen Aktivitäten sowie die Dosisleistung mit Hilfe der SDI-Methode (siehe unten).

Die neue Software (über 9'000 Sourcecode lines) kann während des Messfluges online betrieben werden, wobei die Daten in Echtzeit vom Messsystem ausgelesen, ausgewertet und in verschiedenen Formen graphisch dargestellt werden. Neben einer Kartendarstellung werden laufend die letzten 220 Spektren in geeigneter Form angezeigt. Dies erlaubt eine optimale Überwachung der Rohdaten und somit auch eine einfache Erkennung von Anomalien. Aufgrund der verschiedenen graphischen Darstellungen ist die neue Software im online Betrieb hervorragend geeignet für die Suche und Lokalisierung von radioaktiven Quellen sowie für deren Identifikation. Dies wurde auch durch entsprechende Tests im Feld unter Beweis gestellt.

Die bei der Auswertung erstellten Karten können sowohl ausgedruckt wie auch als Graphik exportiert werden. Im weiteren können auch die ausgewerteten Daten in verschiedenen Formaten exportiert werden, was einen Austausch mit anderer Software oder mit anderen Aeroradiometrietteams oder Behörden erlaubt.

Um bezüglich des Messsystems und dem Auswerteverfahren flexibel zu bleiben, wurde die neue Software objektorientiert aufgebaut. Dadurch ist es einfach bei einem Wechsel des Messsystems oder der Auswertungsmethode die einzelnen Programmteile entsprechend anzupassen.

Im Bereich der Datenübertragung vom Helikopter zu einer Bodenstation in Echtzeit wurde mit Hilfe von Tests die Machbarkeit via Mobiltelefonie grundsätzlich nachgewiesen. Somit ist die Möglichkeit gegeben, die Resultate der Messungen während des Fluges an einem beliebigen Ort online mitzuverfolgen. Die vorausgesetzte hohe Verbindungssicherheit kann im Mittelland aufgrund des dichten Antennennetzes der Mobiltelefonie gewährleistet werden.

Auswertemethodik

Für die Notfalltauglichkeit ist ebenfalls eine schnelle und genaue Bestimmung der Ortsdosisleistung nötig. Bei Beginn dieser Arbeit existierten zwar zwei Methoden zur Dosisleistungsbestimmung, die aber entweder zu ungenau oder zu aufwendig in der Berechnung waren. Im weiteren lagen Hinweise auf falsche Radarhöhen über Wäldern und Talflanken vor. Zudem wurde nach Möglichkeiten erweiterter und flexibler Datenanalysen gesucht.

Mit der SDI-Methode wurde ein sehr gutes Werkzeug zur Dosisleistungsbestimmung aus aeroradiometrischen Messdaten geschaffen. Die Unsicherheiten der mit dieser Methode erhaltenen Resultate liegen im Mittel unter 10 %. Da sich die berechneten Werte auf das Spektrum zwischen 240 keV und 3'000 keV abstützen, kann auch ein Grossteil der künstlichen Radionuklide und deren Anteil an der Ortsdosisleistung erfasst werden. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung für Messungen im Rahmen des Strahlenschutzes dar.

Die oben beschriebene Verbesserung der Positionierungsgenauigkeit ermöglichte es, die Fehlerhaftigkeit der Radarhöhen über Wäldern zu beweisen. Um diese falschen Radarhöhen zu eliminieren, wurde eine Höhenkorrektur ohne Radarhöhe realisiert. An Stelle der Radarhöhe wird dabei die Differenz zwischen der im Helikopter gemessenen Barometerhöhe und dem entsprechenden Punkt eines digitalen Höhenmodells ausreichender Genauigkeit verwendet. Dieses Verfahren führt zum Beispiel über Wäldern bei den berechneten Aktivitäten für ^{40}K zu einer Verbesserung der Resultate um rund 20 %. Damit ist rund die Hälfte der bis anhin beobachteten Abschwächung über Wäldern auf falsche Radarhöhen und die damit verbundenen fehlerhaften Höhenkorrekturen zurückzuführen.

Die durchgeführte Pilotstudie über den Einsatz eines Geographischen Informationssystems (GIS) in der Aeroradiometrie zeigte enorme Möglichkeiten in der flexiblen Darstellung und Analyse von aeroradiometrischen Daten auf. Insbesondere räumliche Analysen ermöglichen zusätzliche Erkenntnisse, wie sie die Beispiele zur Dosisleistungsverteilung in der Bevölkerung oder zur Radarhöhe über Wald deutlich belegen. Räumliche Analysen von Rohspektren lassen genauere Aussagen über vorhandene radioaktive Quellen zu. So wurden neben den künstlichen Radioisotopen ^{137}Cs und ^{60}Co auch die Strahlung von Aktivierungsprodukten (^{16}N) im Bereich der Siedewasserreaktoren der Kernkraftwerke Leibstadt und Mühleberg sowie die durch Positronenstrahler (β^+ -Strahlung) verursachte Annihilationsstrahlung in den Spektren erkannt.

Die GIS Software ist selber nicht für eine Datenarchivierung geeignet. Eine zu unübersichtliche Struktur und ein damit verbundener wachsender Aufwand für den Unterhalt sind die entscheidenden Gründe gegen eine solche Lösung. Deshalb wurde aufgrund der gesammelten

Erfahrungen in der Pilotstudie ein Grobkonzept entworfen, das eine klare Trennung der Datenverwaltung von der GIS Software vorsieht. Die Datenverwaltung wird dabei auch den Zweck der Datenarchivierung erfüllen.

Kalibration

Ein grundlegendes Problem bei der Zusammenarbeit mit anderen Messteams stellt die Vergleichbarkeit der Resultate dar. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage, wie reproduzierbar aeroradiometrische Messungen sind. Mit bilateralen Messflügen und einem detaillierten Datenvergleich mit den Nachbarländern Österreich und Deutschland, mit einer Zeitreihenanalyse in der Umgebung der Kernkraftwerke sowie Vergleichen von aeroradiometrischen Ergebnissen und Bodenmessungen wurden diese Probleme angegangen.

Die Interkalibrationsmessungen mit dem österreichischen und deutschen Aeroradiometrieteam zeigten nur eine teilweise Vergleichbarkeit der Resultate. Dies ist auf eine mangelnde Kalibration und Stabilitätsprobleme in den Spektren bei den österreichischen und deutschen Teams zurückzuführen. Die schweizerische Kalibration mit Punktquellen erwies sich mindestens als gleichwertig zu der Kalibration mit Calibration Pads, die von den beiden ausländischen Teams eingesetzt werden. Vergleiche mit Bodenmessungen belegten zudem eine korrekte Kalibration des schweizerischen Messsystems.

Aus den Erfahrungen, die im Rahmen dieser Interkalibrationsmessungen gesammelt wurden, lassen sich folgende Ansprüche für eine erfolgreiche Interkalibration ableiten:

- Das eingesetzte Messsystem muss stabile Spektren aufweisen.
- Mit jedem Messsystem ist ein Steigflug und ein Messflug über einer grösseren Wasserfläche durchzuführen.
- Neben dem gesamten Spektrum müssen bei den Messflügen für jeden Punkt die Position, die Radarhöhe, die Barometer- oder GPS-Höhe, die Temperatur und die kosmische Zählrate aufgenommen werden.
- Möglichst viele gammaspektrometrische Bodenmessungen müssen im gemeinsamen Messgebiet und im Bereich des Steigfluges durchgeführt werden.

Wenn diese Ansprüche erfüllt werden, sind die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Interkalibration und somit eine gute Vergleichbarkeit der Resultate geschaffen.

Die Analyse der Messungen über mehrere Jahre im Bereich der Kernanlagen in der Schweiz zeigten keine zeitlichen Trends. Die Unterschiede in der bestimmten Dosisleistung von Jahr zu Jahr liegen in einem mal positiven, mal negativen Offset. Dieser Offset ist hauptsächlich auf Radon und seine Tocherisotope in der Atmosphäre zurückzuführen und kann durchaus 10 nSv/h ausmachen. Ein weiterer Einfluss stellt der Wassergehalt des Bodens dar, der Unterschiede in der selben Grössenordnung verursachen kann. Mit einer Ausnahme liegen die mittleren Abweichungen der verschiedenen Jahre innerhalb von $\pm 10\%$ um den Mittelwert. Somit liegen die Schwankungen der aeroradiometrischen Ergebnisse nahezu im selben Bereich wie diejenigen von Bodenmessungen mit Reuter Stokes Ionisationskammern.

Grundsätzlich bestätigten diese Datenanalysen eine sehr gute Reproduzierbarkeit der aeroradiometrischen Ergebnisse innerhalb der Unsicherheiten, die auf den statistischen Fehler, die Unsicherheiten in den Berechnungsparametern und die natürlichen Einflüsse von Radon und der Bodenfeuchte zurückzuführen sind.

Ausserhalb der umzäunten Areale der schweizerischen Kernanlagen und der Kabelwerke Studer AG in Däniken konnte keine künstliche Radioaktivität detektiert werden, die nicht auf Fallout der Bombentests oder den Reaktorunfall in Tchernobyl zurückgeführt werden können.

10 Ausblick

Messsystem

Der Erhalt der Einsatzbereitschaft wird auch in Zukunft eine ständige Wartung und Weiterentwicklung des aeroradiometrischen Messsystems bedingen. So wird in der näheren Zukunft ein Ersatz der eingesetzten Rechner durch modernere notwendig werden, da bei einem Defekt kein identischer Ersatz für die momentan eingesetzten Systeme beschafft werden kann. Dieser Ersatz wird einen grösseren Umbau des Racks bedingen, womit auch andere Dinge überdacht oder zusätzlich eingebaut werden können. Insbesondere wäre es möglich die online Datenauswertung und –Darstellung direkt im Rack des Messsystems zu integrieren.

Die Datenübertragung vom Helikopter zu einer Basisstation ist, wie gezeigt wurde, grundsätzlich möglich. Mit neuen Technologien im Mobiltelefoniebereich wie General Packet Radio Service (GPRS) und Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) werden weitaus grössere Datenübertragungsraten erreicht werden können. Da GPRS bereits in naher Zukunft zur Verfügung stehen soll, wäre dies eine für die Datenübertragung vom Helikopter zu einer Basisstation geeignete Technologie. Eine Datenübertragung via Mobiltelefonie sollte im Hinblick auf Ereignisfälle realisiert werden, da dadurch doch bedeutend Zeit und Flugstunden eingespart werden können. Denn durch die mobile Datenübertragung entfällt im Ereignisfall die Notwendigkeit einer Rückkehr zur Nationalen Alarmzentrale.

Auswertemethodik

Wie sich bei der Analyse der mehrjährigen Messungen gezeigt hat, stellen Radon und seine Tochterisotope auch bei der Ortsdosisleistungsbestimmung die grössten Fehlerquellen bei der Auswertung dar. Es sollte unbedingt etwas unternommen werden, um diesen Einfluss eliminieren zu können. Mit dem zweiten Detektor, der in der Schweiz zur Verfügung steht, existiert die Möglichkeit, sehr billig ein upward looking System zu realisieren. Eine weitere Möglichkeit, um zusätzliche spektrale Informationen erhalten zu können, besteht im kombinierten Einsatz von Natriumiodid- und Germanium-Detektoren. Insbesondere die Offsetproblematik könnte durch Kombination einer genauen aber unempfindlichen Methode (Ge-Detektor) und einer empfindlichen aber weniger genauen Methode (NaJ-Detektor) angegangen werden. Ein entsprechender kombinierter Einsatz im schweizerischen Messsystem sollte deshalb geprüft werden.

Für die Datenarchivierung sollte in naher Zukunft eine Lösung realisiert werden, um einen Datenverlust zu verhindern. Dabei ist auch eine Verknüpfung mit einem GIS anzustreben, da räumliche Analysen der Daten enorme Möglichkeiten bieten, die sich in wertvollen Erkenntnissen niederschlagen. Bei der Datenarchivierung ist darauf zu achten, alle Rohdaten und die dazugehörenden Kalibrationsdaten zu erhalten.

Kalibration

Internationale Vergleiche von aeroradiometrischen Resultaten, wie sie im Rahmen der Interkalibration mit Österreich und Deutschland durchgeführt wurden, sind auch in Zukunft von Bedeutung. Dabei müssen jedoch die gemachten Erfahrungen mit den entsprechenden

Ansprüchen an Messsysteme und Messprogramm berücksichtigt werden. Im Rahmen des neuen EU-Projektes „European Calibration and Coordination of Mobile and Airborne Gamma Spectrometry“ (ECCOMAGS) soll unter anderem eine grosse gemeinsame Messübung der europäischen Messteams erfolgen. Eine Teilnahme des schweizerischen Aeroradiometrietteams ist unbedingt anzustreben, da damit unter realen Einsatzbedingungen ein Vergleich mit praktisch allen Teams aus Europa möglich ist.

Neben dieser grossen Messübung wird im Rahmen des ECCOMAGS-Projektes eine stärkere Harmonisierung der Auswertungsmethoden und eine Standardisierung der Resultate angestrebt. In Arbeitsgruppen sollen auch neue Entwicklungen in der Spektralanalyse sowie das Potential von unbemannten Fluggeräten für aeroradiometrische Messungen diskutiert und erarbeitet werden. Die Schweiz wird ebenfalls in diesem EU-Projekt vertreten sein und mit ihrer Erfahrung zu einem erfolgreichen Ergebnis beitragen.

Eine vertiefte Analyse der Langzeitmessungen in der Umgebung der Kernkraftwerke unter Einbezug von MADUK-Daten könnte mehr Aufschluss über den Einfluss der Bodenfeuchtigkeit und von Radon in der Atmosphäre geben.

11 Literaturverzeichnis

- Allyson, J. D., 1994: Environmental Gamma-Ray Spectrometry: Simulation of Absolute Calibration of In-Situ and Airborne Spectrometers for Natural and Anthropogenic Sources. PhD Thesis, The University of Glasgow.
- Allyson, J. D., Sanderson, D. C. W., 1998: Monte Carlo Simulation of Environmental Airborne Gamma-Spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 38, No. 3, pp. 259-282.
- Bächler, D., 1999: Einsatz geographischer Informationssysteme GIS in der Aeroradiometrie: Eine Pilotstudie. Diplomarbeit am Institut für Geophysik, ETH Zürich.
- Bucher, B., Schwarz, G. F., Rybach, L., Bärlocher, Ch., 1998: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM97. Bericht für das Jahr 1997 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.
- Bucher, B., Rybach, L., Schwarz, G. F., Bärlocher, Chr., 1999: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM98. Bericht für das Jahr 1998 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.
- Bucher, B., Schwarz, G. F., Rybach, L., Bärlocher, Ch., 2000: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM99. Bericht für das Jahr 1999 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.
- Bundesamt für Gesundheit (BAG), 1993-1999: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz. Jahresberichte der Jahre 1992-1998, Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Bern, Schweiz.
- Cartier, F., Leupin, A., Baur, W., Schibli, M., 1996: Ortsdosisleistung in der Umgebung der Kernanlagen. In: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 1995. Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Bern.
- Durrance, E. M., 1986: Radioactivity in geology: principles and applications. Ellis Horwood Ltd., Chichester (England).
- Eisenbud, M., Gesell, Th., 1997: Environmental Radioactivity. From Natural, Industrial, and Military Sources. Fourth Edition, Academic Press, San Diego.
- Federal Geographic Data Committee, 1998: Content Standard for Digital Geospatial Metadata. FGDC-STD-001-1998, Washington D.C.
- Frei, D., 1997: U ARM97 vom 9. - 12. Juni 1997. Resultate und Kurzbericht der Aeroradiometriemessflüge. Interner Bericht, Nationale Alarmzentrale, Zürich.
- Guillot, L., 1996: Spectrométrie Gamma Aéroportée: Etudes de nouvelles méthodes de traitement spectral et de calibration permettant une interprétation qualitative et quantitative des mesure. Thèse, Université de Bourgogne, France.
- Hofmann, B., 1989: Genese, Alteration und rezentes Fliess-System der Uranlagerstätte Krunkelbach (Menzenschwand, Südschwarzwald). Technischer Bericht 8-30, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), Baden.

- Hoover, R. A., 1988: An aerial radiological survey of the River Bend Station surrounding area. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield (Virginia).
- IAEA, 1979: Gamma-Ray Surveys in Uranium Exploration. IAEA Vienna, Technical Reports Series, No. 186.
- IAEA, 1991: Airborne Gamma Ray Spectrometry Surveying. IAEA Vienna, Technical Reports Series, No. 323.
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), 1994: ICRU-Report 53, Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ISBN 0-913394-52-1.
- Kogan, R. M., Nazarov, I. M., Fridman, S. D., 1969: Gamma Spectrometry of Natural Environments and Formations, Atomizdat, Moskau. (Englische Übersetzung: Israel Program for Scientific Translations Ltd., Jerusalem, 1971, Microfiche-TT-70-50092)
- Leupin, A., 1990: Vergleich aeroradiometrischer Messungen in der Umgebung von KKB/PSI mit in situ Gamma-Spektrometrie-Messungen am Boden. HSK-AN-2261, Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Würenlingen.
- Murith, Ch., 1986: Mesures de la Radioactivité dans le Voisinage des Centrales Nucléaires Suisses. Thèse No. 883, Institute de Physique, Université de Fribourg (Suisse).
- Murith, C., Völkle, H., Surveck, H., Piller, G, Baeriswyl, L., Beuret, P., Ferreri, G., Gobet, M., Gurtner, A., Ribordy, L., 1990: Mesures in situ – mesures aéroradiométrie dans le voisinage du PSI. Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Sektion Überwachung der Radioaktivität, Fribourg.
- Murith, C., Gurtner A., 1994. Mesures in situ et irradiation externe, In: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz, Jahresbericht 1993, Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Bern, Switzerland.
- Murith, Ch., Gurtner, A., 1995: A guide for insitu measurements. Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Sektion für die Überwachung der Radioaktivität (SUER), Interner Bericht.
- Oberlercher, G., 1997: Vergleichsmessung der Aeroradiometriesysteme Österreich-Schweiz in den Ötztaler Alpen im Juni 1997. Interner Bericht, Geologische Bundesanstalt, Wien.
- Oberlercher, G., 1999: Dose Rate Conversion Approach used by the Geological Survey of Austria. In: European Coordination of Environmental Airborne Gamma Ray Spectrometry. Final Report. European Concerted Action on Environmental AGS. 4th Framework Nuclear Fission Safety Programme.
- Oberlercher, G., Bucher, B., in Druck: A comparison of the Austrian and Swiss airborne gamma spectrometry systems in alpine terrain. In: Proceedings of the Symposium for Recent Applications and Developments in Mobile and Airborne Gamma Spectrometry (RADMAGS), 15.-18. June 1998, University of Stirling, UK.
- Purvance, D., Novak, E., 1983: General procedure for calibration and reduction of aerial gamma-ray measurements: Specification BFEC 1250-B. U.S. Department of Energy, Rep. GJBX-16(83)DE84004974.

Riesen, Th., Zimmermann, S., Blaser, P., 1995: Verteilung von Cäsium-137 in schweizerischen Waldböden, in: Umweltradioaktivität und Strahlendosen in der Schweiz 1994, Bundesamt für Gesundheit, Abteilung Strahlenschutz, Sektion Überwachung der Radioaktivität. ISBN 3-905235-16-1.

Rybach, L., Schwarz, G., Medici, F., 1996: Construction of radioelement and dose-rate baseline maps by combining ground and airborne radiometric data. IAEA-Tecdoc-980, p. 33-44.

Sanderson, D. C. W., Allyson, J. D., Tyler, A. N., 1995: Rapid Quantification and Mapping of Radiometric Data for Anthropogenic and Technologically enhanced natural nuclides, in : Application of uranium exploration data and techniques in environmental studies. Proceedings of a Technical Committee meeting held in Vienna, 9-12 November 1993, IAEA-TECDOC-827.

Sanderson, D., McLeod, J., 1999: European Coordination of Environmental Airborne Gamma Ray Spectrometry. Final Report. European Concerted Action on Environmental AGS. 4th Framework Nuclear Fission Safety Programme.

Rybach, L., Bucher, B., Schwarz, G. F., in Druck: Airborne surveys of Swiss nuclear facility sites. Journal of Environmental Radioactivity, Special Issue.

Schwarz, G., Klingelé, E., Rybach, L., 1989: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen. Bericht für das Jahr 1989 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G., Klingelé, E., Rybach, L., 1990: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen. Bericht für das Jahr 1990 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 23, Kümmerly & Frey AG, Geographischer Verlag, Bern.

Schwarz, G., Klingelé, E., Rybach, L., 1991: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen. Bericht für das Jahr 1991 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G., Klingelé, E., Rybach, L., 1992a: Airborne Radiometric Mapping in Switzerland. Geophysik Nr. 25, Schweizerische Geophysikalische Kommission, Kümmerly & Frey, Bern.

Schwarz, G., Klingelé, E., Rybach, L., 1992b: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen. Bericht für das Jahr 1992 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen. Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G. F., Klingele, E. E., Rybach, L., 1993: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen. Bericht für das Jahr 1993 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G. F., Rybach, L., Bärlocher, Ch., 1995: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM94. Bericht für das Jahr 1994 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G. F., Rybach, L., Bärlocher, Ch., 1996: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM95. Bericht für das Jahr 1995 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Schwarz, G. F., Rybach, L., Klingelé, E., 1997a: Design, calibration and application of an airborne gamma spectrometric system in Switzerland. *Geophysics* vol. 62, 1369-1378.

Schwarz, G. F., Rybach, L., Bärlocher, Chr., 1997b: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM96. Bericht für das Jahre 1996 zuhanden der Fachgruppe Aeroradiometrie (FAR). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

Tyler, A. N., Sanderson, D. C. W., Scott, E. M., Allyson, J. D., 1996: Accounting for Spatial Variability and Fields of View in Environmental Gamma Ray Spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 33, No.3, pp. 213-235.

UKL (Kommission für die sicherheitstechnische Untersuchung des Zwischenfalls im Versuchs-Atomkraftwerk Lucens), 1979: Schlussbericht über den Zwischenfall im Versuchs-Atomkraftwerk Lucens am 21. Januar 1969.

CURRICULUM VITAE

Name: **Benno Kurt Bucher**

geboren: 25.1.1970 in Lostorf/SO

Heimatort/Nationalität: Emmen/Schweiz

- | | |
|-------------|---|
| 1977 - 1982 | Primarschule, Stüsslingen/SO |
| 1982 - 1987 | Gymnasium Marienburg, Rheineck/SG |
| 1987 - 1989 | Kantonsschule Kollegium Schwyz, Maturität Typus A |
| 1989 - 1990 | Hilfselektriker bei der Firma Kummler & Matter in Zofingen/AG |
| 1990 - 1995 | Studium an der Abteilung für Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich.
Thema der Diplomarbeit (Forschungsgruppe Angewandte und Umweltgeophysik, Institut für Geophysik, ETH Zürich):
Goelektrische und elektromagnetische Messungen im Valsertal |
| 1995 - 1997 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie, Institut für Geophysik, ETH Zürich |
| 1997 - 2001 | Dissertation in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie, Institut für Geophysik, ETH Zürich |