

Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung ARM04

B. Bucher¹, G. Butterweck², L. Rybach³, G. Schwarz¹

¹ Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, 5232 Villigen HSK, Schweiz

² Paul Scherrer Institut, Abteilung für Strahlenschutz und Sicherheit, 5232 Villigen PSI, Schweiz

³ Institut für Geophysik, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich, Schweiz

September 2005

Zusammenfassung

Im Frühjahr 2004 wurde die Aeroradiometrieausrüstung für eine Suchfahrt nach einer möglicherweise verlorenen ^{137}Cs -Quelle erstmals in einem Personenwagen eingesetzt. Vorangehende Tests zeigten, dass eine ^{137}Cs -Quelle mit einer Aktivität von 500 MBq in unmittelbarer Fahrbahnnähe bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h durch das Aeroradiometriesystem problemlos erkannt wird. Bei der eigentlichen Messfahrt wurde keine ^{137}Cs -Quelle gefunden.

Im Rahmen der Messübung „Braunbär“ der Nationalen Alarmzentrale wurde im März 2004 eine Quellensuche mittels Aeroradiometrie durchgeführt. Von den drei ausgelegten ^{137}Cs -Quellen mit Aktivitäten von 25 MBq, 860 MBq und 890 MBq konnten erwartungsgemäss die beiden stärkeren lokalisiert und identifiziert werden. Die Übung zeigte zudem, dass die Aeroradiometrie innerhalb der vorgesehenen Zeit von vier Stunden einsatzbereit ist.

Die Messflüge im Rahmen der Übung UARM04 fanden vom 14. bis 17. Juni unter der Leitung von Y. Lörtscher (Nationale Alarmzentrale) statt. Turnusgemäss wurden die Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt, sowie das Paul Scherrer Institut und die Anlagen der Zwischenlager AG (ZWI-LAG) in Würenlingen aeroradiometrisch vermessen. Die Messflüge zeigten ähnliche Resultate wie in den früheren Jahren.

Das KKW Leibstadt wurde aufgrund seiner reaktortypischen Direktstrahlung klar erkannt. Beim Block I des KKW Beznau, der sich zum Zeitpunkt der Messflüge in Revision befand, wurde ^{58}Co im Spektrum identifiziert. Dessen Aktivität erhöht sich vorübergehend beim Abfahren der Anlage im Brennstofflagerbecken und im Reaktorkühlsystem. Über dem auf dem Gelände des Paul Scherrer Instituts angesiedelten Bundeszwischenlager wurde ^{60}Co detektiert. In der Umgebung des Fortluftkamins PSI-West wurde Annihilationsstrahlung nachgewiesen. Die ZWILAG konnte wie bereits in früheren Jahren aeroradiometrisch nicht detektiert werden. Ausserhalb der Kernanlagen wurde keine künstliche Radioaktivität festgestellt, die nicht auf den Atomwaffen- oder Tschernobyl-Fallout zurückgeführt werden konnte.

Entlang Rhein und Rhone von Chur bis zum Genfersee wurde ein aeroradiometrisches Profil aufgenommen. Das Profil zeigte die aufgrund der Geologie zu erwartenden Variationen mit den höchsten Aktivitätswerten der natürlichen Radionuklide im Bereich des Aarmassivs mit seinem Altkristallin.

Über Davos und Lausanne konnte zum ersten Mal die Durchführbarkeit von Messflügen über Stadtgebiet demonstriert werden. Die Resultate der aeroradiometrischen Messungen entsprachen den aufgrund der natürlichen Gegebenheiten erwarteten Aktivitätswerten. In Lausanne wurden zwei in einer gemeinsamen Übung mit den lokalen Behörden ausgelegte ^{137}Cs -Quellen erkannt und lokalisiert. Ein Vergleich mit InSitu-gammaspektrometrischen Bodenmessungen ergab eine gute Übereinstimmung.

Nach dem Abschluss der Überführung der radioaktiven Abfälle des ehemaligen Versuchsreaktors Lucens zur ZWILAG erfolgte über dem Gebiet des ehemaligen Versuchsreaktors eine aeroradiometrische Kontrollmessung. Im Gegensatz zu Messungen aus früheren Jahren konnte keine künstliche Radioaktivität nachgewiesen werden, die nicht auf Atomwaffen- oder Tschernobyl-Fallout zurückgeführt werden konnte.

Abstract

In spring 2004 the airborne gamma spectrometry (AGS) equipment was used for the first time in a car borne survey searching for a lost ^{137}Cs source. Initial tests showed a smooth detection of a 500 MBq ^{137}Cs source at a speed of 60 km/h. During the actual survey no radioactive source was found.

In March 2004, the AGS equipment was employed during the exercise “Braunbär” of the Swiss National Emergency Operations Centre (NAZ). Three ^{137}Cs sources with activities of 25 MBq, 860 MBq and 890 MBq were concealed in the exercise area. As expected, the two stronger sources could be localized and identified. Additionally, the exercise demonstrated the readiness of the AGS system within the scheduled deployment time of four hours.

The measurement flights within the scope of the exercise UARM04, organised by Y. Lörtscher (NAZ), were performed from June 14 to June 17. According to the alternating schedule of the annual UARM exercises the environs of the nuclear power plants Beznau and Leibstadt, the environs of the research facility Paul Scherrer Institute (PSI) and of the intermediate storage facility for nuclear waste (ZWILAG) were inspected. The aeroradiometric measurements showed similar results to those observed in the past.

The nuclear power plant Leibstadt could be identified by its direct radiation which is characteristic for a boiling water reactor. Block I of the nuclear power plant Beznau was in revision during the survey. The aeroradiometric measurement identified ^{58}Co activity, which is temporarily increasing in the fuel storage pool and in the reactor cooling system during the shut down. ^{60}Co could be identified over the Federal intermediate storage facility, located on the PSI area. The exhaust stack at PSI West showed an elevated amount of annihilation radiation. The intermediate storage facility Würenlingen (ZWILAG) could not be detected by aeroradiometric measurements. Outside the fenced areas of the inspected nuclear facilities no man-made radiation was detected which could not be attributed to the nuclear weapons test fallout and the Chernobyl fallout.

An aeroradiometric profile was flown along the rivers Rhine and Rhone from Chur to the Lake of Geneva. The results showed the highest radiation measurements according to the geology above the crystalline rocks of the Aarmassif.

For the first time in Switzerland, surveys of cities were carried out over the cities of Lausanne and Davos demonstrating the feasibility of such operations. The results showed activity values which are corresponding to the local environment. A comparison with ground measurements yielded good agreement between the results of ground and aeroradiometric measurements.

The vicinity of the former test reactor at Lucens was inspected after the last radioactive waste was transported to the intermediate storage facility ZWILAG. The aeroradiometric measurements showed no increased radiation values.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
1 Einleitung	1
1.1 Messgeräte	1
1.2 Messflüge	1
1.3 Auswertung	1
2 Erneuerung des Messsystems	2
2.1 Konzept	2
2.2 Umsetzung	2
2.3 Stand der Arbeiten	3
3 Messungen ausserhalb der jährlichen Übung	4
3.1 Quellensuche für das Bundesamt für Gesundheit	4
3.1.1 Einbau der Messapparatur	4
3.1.2 Tests	5
3.1.3 Resultate der Messfahrt	5
3.2 Übung „Braunbär“	7
3.2.1 Messergebnisse	7
3.2.2 Fazit	8
4 Vergleichsmessungen Boden - Luft	9
4.1 Messresultate	9
4.2 Fazit	10
5 Ergebnisse der Messflüge im Rahmen der UARM04	11
5.1 Wiederkehrendes Messgebiet KKB/KKL/PSI/ZWILAG	11
5.2 Profil Rhein – Rhone	14
5.3 Messgebiet Davos	16
5.4 Messgebiet Lausanne	18
5.5 Messgebiet Lucens	21
6 Ausblick	23
7 Literaturhinweise	23

1 Einleitung

Die aeroradiometrischen Messungen in der Schweiz begannen 1986. Methodik und Software für Kalibrierung, Datenerfassung, Datenverarbeitung und Kartendarstellung wurden am Institut für Geophysik der ETH Zürich entwickelt. In der Zeit von 1989 bis 1993 wurde die Umgebung der schweizerischen Kernanlagen im Auftrag der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK) jährlich aeroradiometrisch vermessen. Im Jahre 1994 ging man zu einem Zweijahresrhythmus über, wobei abwechslungsweise zwei bzw. drei Gebiete mit nuklearen Installationen vermessen werden.

Seit 1994 ist die Aeroradiometrie in die Einsatzorganisation Radioaktivität des Bundes integriert. Als mögliche Einsatzfälle stehen Transport- und Industrieunfälle mit radioaktivem Material, KKW-Störfälle und Satellitenabstürze im Vordergrund. Der operative Einsatz erfolgt unter der Regie der Nationalen Alarmzentrale (NAZ).

Die Arbeiten für Unterhalt und Bereitstellung des Messsystems wurden im Jahre 2003 von der Sektion Messwesen am PSI übernommen. Die wissenschaftliche Betreuung und die laufende Weiterentwicklung der Aeroradiometrie erfolgen ebenfalls durch die Sektion Messwesen des PSI im Auftrag der HSK.

1.1 Messgeräte

Das Messsystem besteht aus vier NaI-Detektoren mit insgesamt 16.8 l Volumen. Das zugehörige Spektrometer verfügt über einen Vielkanalanalysator mit 256 Kanälen und einer automatischen Verstärkungsjustierung. Die Steuerung des Systems sowie die Erfassung und Speicherung der Daten erfolgt mit Hilfe eines Industrie-PCs. Für die Positionierung wird das GPS (Global Positioning System) verwendet. Die erste Version des Messsystems wurde 1992 am Institut für Geophysik der ETH-Zürich gebaut. Gleichzeitig mit dem aufgenommenen Spektrum und der Position werden Luftdruck, Aussentemperatur und Radarhöhe aufgezeichnet.

Das Messsystem wird für die Messflüge in einen Super-Puma-Helikopter der Schweizer Armee eingebaut. Dieser Helikoptertyp bietet sehr gute Navigationsmöglichkeiten und erlaubt durch seine Blindflugtauglichkeit auch Notfalleinsätze bei schlechtem Wetter.

1.2 Messflüge

Der Vorteil von aeroradiometrischen Messungen liegt in der grossen Geschwindigkeit, mit der ein grosses Messgebiet abgedeckt werden kann. Messungen sind auch über unwegsamem Gelände möglich.

Um das Messgebiet gleichmässig abzudecken, werden die Flüge in einem regelmässigen Raster durchgeführt. Das Raster besteht aus parallelen Fluglinien, die je nach Aufgabenstellung 100 – 500 m auseinander liegen. Die Flughöhe wird nach Möglichkeit konstant bei 300 ft (91.5 m) über Grund gehalten. Während des Flugs wird ein Gammaspektrum pro Sekunde aufgenommen.

1.3 Auswertung

Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt nach dem in Schwarz (1991) beschriebenen Auswerteverfahren für aeroradiometrische Messdaten. Seit dem Jahre 2000 kommt dabei die in der Forschungsgruppe Geothermik und Radiometrie des Instituts für Geophysik an der ETH Zürich entwickelte Auswertesoftware (Bucher, 2001) mit online-Auswerteoption zum Einsatz.

Bei Vergleichen von aeroradiometrischen Messungen mit gammaspectrometrischen InSitu-Bodenmessungen ist die unterschiedliche Ortsauflösung der beiden Methoden zu beachten. Während der

Messwert der Aeroradiometrie den Mittelwert über ein Gebiet von 300 m x 300 m darstellt wird bei der InSitu-Bodenmessung lediglich eine Fläche von ca. 10 m x 10 m abgedeckt.

2 Erneuerung des Messsystems

In 2003 wurde mit den Vorbereitungen für die Erneuerung des überalterten Messsystems begonnen. Im Zuge dieser Erneuerung wird die Online-Auswertesoftware in das Messsystem integriert.

2.1 Konzept

Eine entscheidende Randbedingung für das Erneuerungsprojekt war die Aufrechterhaltung der Redundanz durch zwei identische Messsysteme. Ferner galt es, die bestehenden Gehäuse (Racks) und die vorhandenen Einbauhilfsmittel (Kits) für den Helikopter beizubehalten.

Die bestehenden Messplattformen mit den Kristallen werden ebenfalls unverändert beibehalten. Die Kristalle sind jedoch zu prüfen und gegebenenfalls zu revidieren.

2.2 Umsetzung

In Abbildung 1 ist die schematische Übersicht über das erneuerte Messsystem dargestellt.

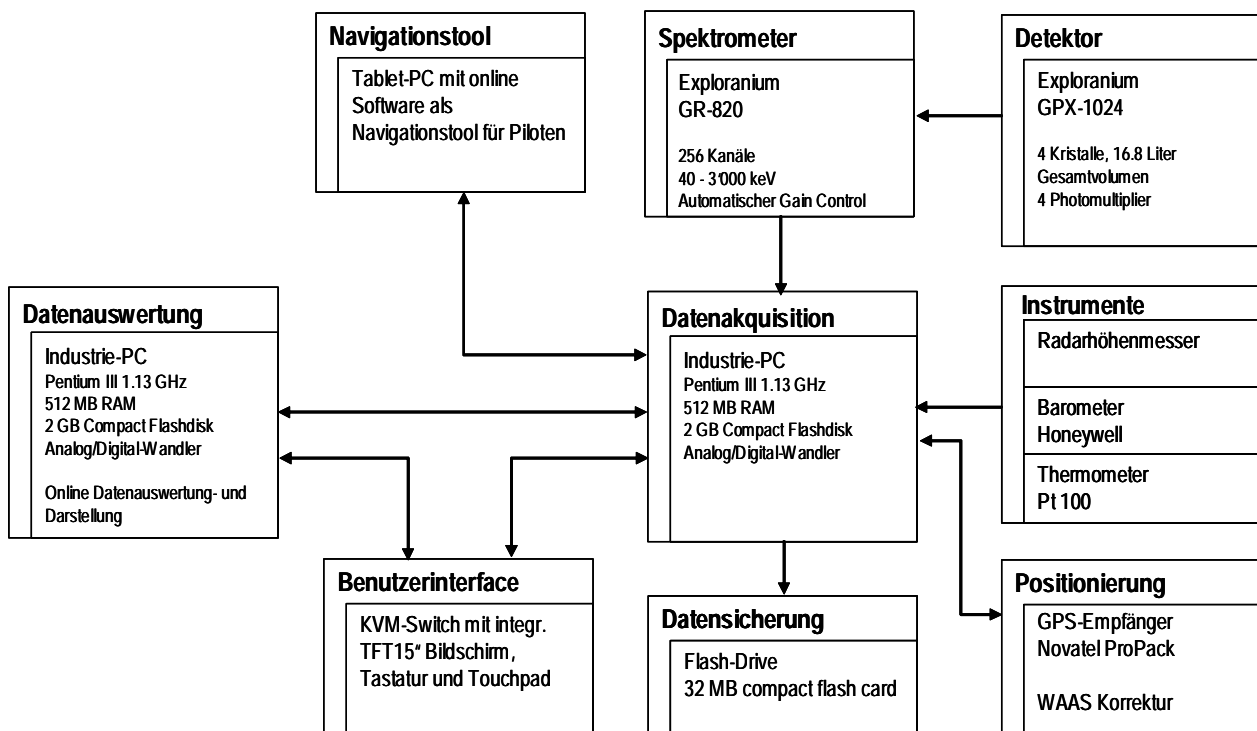


Abbildung 1: Schematische Darstellung des erneuerten Aeroradiometrie-Messsystems.

Für die Datenakquisition und Online-Datenauswertung wird je ein Rechner eingesetzt. Aufgrund der grossen Vibrationen im Helikopter werden bei den Rechnern als Massenspeicher Flashdisks mit einer Grösse von 2 GBytes eingesetzt. Für die Datensicherung kommen Compact Flash Cards mit einer Grösse von 32 MBytes zum Einsatz. In den beiden Rechnern ist zudem eine Analog/-

Digital-Wandlerkarte zur Datenaufnahme integriert. Beide Rechner sind identisch konfiguriert, so dass sie die Datenakquisition redundant übernehmen können.

Für die Bedienung der Rechner steht ein KVM-Switch mit integriertem 15“ TFT-Display, Tastatur und Touchpad zur Verfügung. Da die Bedienung einer Maus im Helikopter schwierig ist, wurde bei der Programmierung der Datenakquisitions- und Onlineauswertungssoftware darauf geachtet, dass die Bedienung grösstenteils über die Tastatur erfolgen kann.

Im erneuerten Messsystem liefert ein Barometer von der Firma Honeywell die benötigten Luftdruckdaten.

Als GPS-Empfänger wird ein ProPak-G2 von der Firma Novatel eingesetzt. Nachdem die Swisstopo die Übertragung der Korrekturdaten für Differential-GPS über UKW eingestellt hat, haben wir uns für die Nutzung der satellitengestützten Korrektursignale von EGNOS entschieden.

Als Navigationshilfe für die Piloten ist ein Tablet-PC vorgesehen. Als Softwaretool kommt dabei ebenfalls die online-Auswertungssoftware zum Zuge.

Aufgrund der Neuerungen wurde auch eine neue Software für die Datenakquisition nötig. Diese bietet neben der Überwachung der verschiedenen Peripheriegeräte auch eine grafische Überwachung der gemessenen Spektren in der Form von Wasserfallspektren. Dieselben Daten können auch in der online-Auswertungssoftware überwacht werden. Die Datenakquisitionssoftware lässt sich ebenfalls über die Auswertungssoftware steuern. Dies macht ein Umschalten zwischen den beiden Rechnern unnötig.

2.3 Stand der Arbeiten

Der Umbau des ersten Racks begann im Dezember 2003 und wurde im Frühjahr 2004 abgeschlossen. Gleichzeitig wurde die Datenakquisitionssoftware erstellt und die nötigen Anpassungen an der Auswertungssoftware vorgenommen. Erste Tests im Labor verliefen einwandfrei.

Parallel zu den Erneuerungsarbeiten wurde Kontakt mit der Firma RUAG Aerospace aufgenommen, um die Flugabnahme des erneuerten Systems in die Wege zu leiten. Eine Abnahme im Hinblick auf die Messflüge 2004 konnte aus terminlichen Gründen nicht mehr erreicht werden. Im Herbst 2004 erfolgte ein EMV-Test, den das erneuerte Messsystem erfolgreich bestand. Leider verzögerte sich die Abnahme weiterhin, sodass diese nicht mehr im Jahr 2004 abgeschlossen werden konnte. Anlässlich einer Sitzung mit allen Beteiligten im Dezember 2004 stellte sich heraus, dass aufgrund der Überführung ins neue Qualitätssicherungssystem der Armasuisse (zuständig für die Flugsicherheit bei der Armee) noch zusätzliche Unterlagen benötigt wurden. Man einigte sich, dass die Flugabnahme spätestens bis zu den Messflügen 2005 erfolgen sollte.

Um bis zur definitiven Abnahme des erneuerten Messsystems in 2005 die Einsatzbereitschaft der Aeroradiometrie aufrecht erhalten zu können, wird das zweite Messsystem im Anschluss an die Abnahme des ersten Messsystems erneuert.

3 Messungen ausserhalb der jährlichen Übung

3.1 Quellensuche für das Bundesamt für Gesundheit

Bei einer Räumungsaktion im Kantonsspital Baden gelangten mehrere ^{137}Cs -Quellen, die in einem Tresor gelagert wurden, in die Sperrgutabfuhr. Das Sperrgut wurde aufgetrennt und der Metallanteil einer Schrottverarbeitungsfirma zugeführt. Dort schlug beim Eintreffen des Transportes der Eingangsmonitor Alarm, woraufhin die Suva alarmiert und schliesslich eine Untersuchung wegen Verstosses gegen das Strahlenschutzgesetz eingeleitet wurde. Bei der weiteren Abklärung wurde festgestellt, dass bereits Quellen aus dem defekten Tresor fehlten. Mehrere Quellen konnten in der Transportmulde sichergestellt werden. Eine weitere Quelle wurde auf dem Platz entdeckt, wo das Sperrgut getrennt worden war. Insgesamt wurden 14 Quellen sichergestellt. Da aber bei den gefundenen Abschirmungen 15 Steckplätze für Quellen vorhanden waren und keine Unterlagen zu den Quellen beigebracht werden konnten, blieb unklar, ob eine 15. Quelle während des Transports verloren wurde.

In Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Gesundheit (BAG) und der Nationalen Alarmzentrale (NAZ) wurde abgeklärt, ob eine radioaktive ^{137}Cs -Quelle mit einer Aktivität von 500 MBq mit Hilfe der Aeroradiometrieausrüstung geortet werden kann. Ferner stellte sich die Frage, ob die Aeroradiometrieausrüstung in ein Fahrzeug eingebaut und dort betrieben werden kann. Theoretische Abschätzungen und die Erfahrungen aus den Aeroradiometrieübungen vergangener Jahre erwiesen, dass eine solche Quelle sowohl aus der Luft als auch mit einem Fahrzeug geortet werden kann. Es wurde entschieden, die Aeroradiometrieausrüstung in ein Fahrzeug einzubauen und die Transportstrecke damit zu vermessen.

3.1.1 Einbau der Messapparatur

In einigen europäischen Ländern wird fahrzeuggestützte (car borne) Gammaskpektrometrie im Rahmen des Katastrophenschutzes eingesetzt. Internationale Kontakte der Fachgruppe Aeroradiometrie und Erfahrungen aus vergangenen internationalen Messübungen halfen, den in der Schweiz erstmaligen Einbau in ein Fahrzeug zu erleichtern und Fehler zu vermeiden.

Um eine bessere Abdeckung des umliegenden Geländes zu erhalten, wurde der Detektor (16.8 l NaI) auf dem Dachträger des Fahrzeugs montiert (Abbildung 2). Auf dem Dachträger wurden ausserdem ein Notstromaggregat für die Stromversorgung sowie die Antenne des GPS-Systems befestigt. Für die Positionierung wurde der in der Aeroradiometrieausrüstung enthaltene GPS-Empfänger verwendet. Das Gehäuse (Rack) mit dem Spektrometer, dem Rechner, dem GPS-Empfänger und der Stromversorgung wurde im Innenraum des Fahrzeuges installiert und mit Spanngurten befestigt.



Abbildung 2: Detektor mit GPS-Antenne auf dem Dachträger des Fahrzeugs.

3.1.2 Tests

Nach dem Einbau wurden die Geräte in Betrieb genommen und erste Tests durchgeführt. Eine ^{137}Cs -Quelle mit einer Aktivität von 3.7 MBq wurde 3 m vom Fahrbahnrand entfernt auf den Boden gelegt. Beim Passieren der Quelle mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h bzw. 30 km/h konnte die Quelle direkt anhand des Spektrums erkannt werden. Ein weiterer Test wurde mit einer ^{137}Cs -Quelle der Aktivität von 37 MBq durchgeführt. Die Quelle wurde im Abstand von rund 4 m zur Fahrspur des Fahrzeugs ausgelegt und mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h passiert. Auch diese Quelle konnte mühelos erkannt und anhand des Spektrums klar identifiziert werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde die Geschwindigkeit für die Messfahrt auf 60 km/h festgelegt. Dies sollte erlauben, eine Quelle mit der erwarteten Aktivität von rund 500 MBq in der Nähe der Fahrbahn zu erkennen.

3.1.3 Resultate der Messfahrt

In der ersten Etappe der Messfahrt wurde die Strecke zwischen dem Trennplatz und der Schrottverarbeitungsfirma und in der zweiten Etappe die Strecke zwischen dem Spital und dem Trennplatz gammaspektrometrisch vermessen. Der über Autobahn führende Teil der Messstrecke wurde wegen der Fahrgeschwindigkeit von 60 km/h von einer Polizeipatrouille begleitet.

Die Messungen auf der gesamten Strecke ergaben keinen Hinweis auf die gesuchte ^{137}Cs -Quelle. Es wurde lediglich erhöhte natürliche Strahlung im Bereich von Gebäuden, in Unterführungen und Tunnels registriert (siehe Abbildung 3 und 4). Hier addierte sich das Signal von neben und über dem Detektor liegenden natürlichen Radionukliden zu demjenigen der vom Erdboden ausgehen-

den Gammastrahlung. Die höchsten berechneten Dosisleistungen ergaben sich im Arisdorf-Tunnel und in zwei Eisenbahnunterführungen. Diese Ergebnisse lassen darauf schliessen, dass sich auf der vermessenen Strecke keine ^{137}Cs -Quelle mit der vermuteten Aktivität von 500 MBq in einer Distanz unter 25 m zur Fahrspur befand.

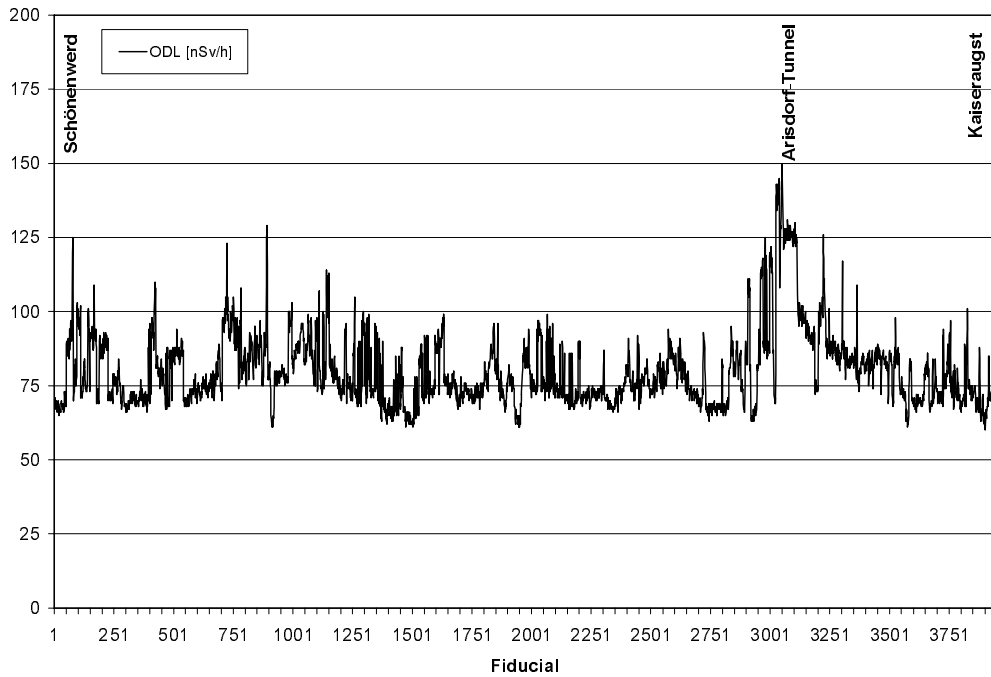


Abbildung 3: Abgeschätzte Ortsdosisleistung auf der Strecke zwischen dem Trennplatz und dem Schrottarbeiter.

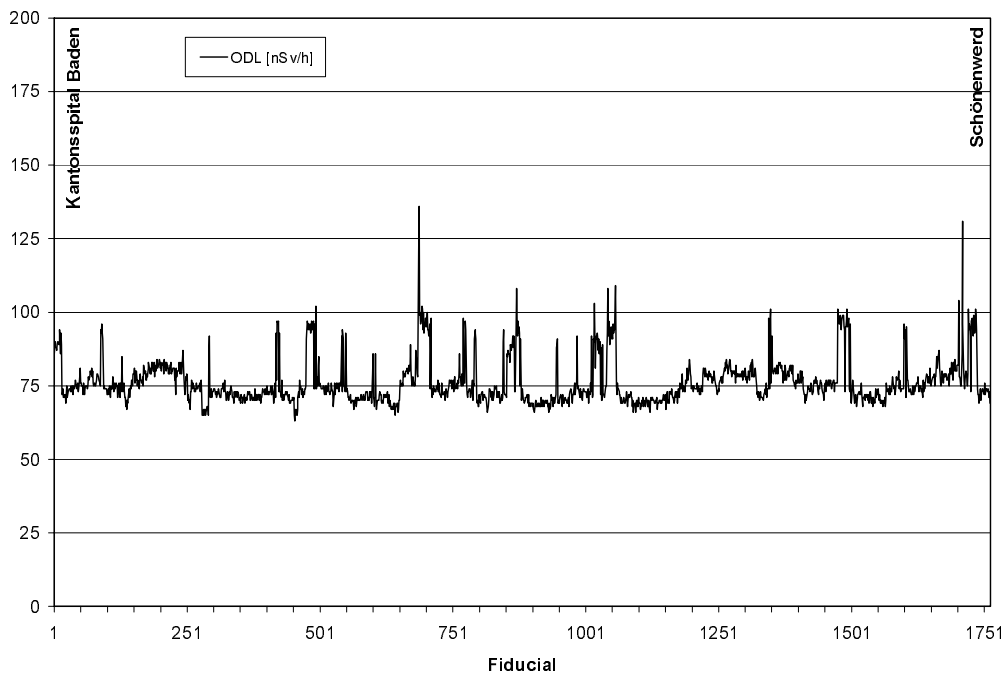


Abbildung 4: Abgeschätzte Ortsdosisleistung auf der Strecke vom Spital zum Trennplatz. Die höchsten Werte wurden in Eisenbahnunterführungen gemessen.

3.2 Übung „Braunbär“

Im März 2004 fand unter der Leitung der Nationalen Alarmzentrale eine Messübung der Messorganisation EOR (Einsatzorganisation erhöhte Radioaktivität) statt. Als Übungsszenario diente der Absturz eines Transportflugzeuges mit radioaktiven Quellen. Die Aeroradiometrie wurde als Messmittel zum Auffinden und Identifizieren von radioaktiven Quellen aufgegeben. Für die Übung wurden durch das Labor Spiez ^{137}Cs -Quellen ausgelegt.

3.2.1 Messergebnisse

Die Flugplanung erfolgte aufgrund der Angaben über die Absturzstelle unter Berücksichtigung der nahen Landesgrenze zu Frankreich. Sie sah Messlinien im Abstand von 125 m vor, wobei in einem ersten Schritt die Linien im 250 m Abstand aeroradiometrisch vermessen wurden.

Bereits bei der ersten Messlinie wurden erhöhte Zählraten registriert und das Radionuklid ^{137}Cs in den Spektren identifiziert (siehe Abbildung 5). Nachdem das gesamte Messgebiet mit Fluglinien im Abstand von 250 m vermessen war, wurden noch zusätzliche Linien im Abstand von 125 m im Bereich der entdeckten Quellen geflogen.

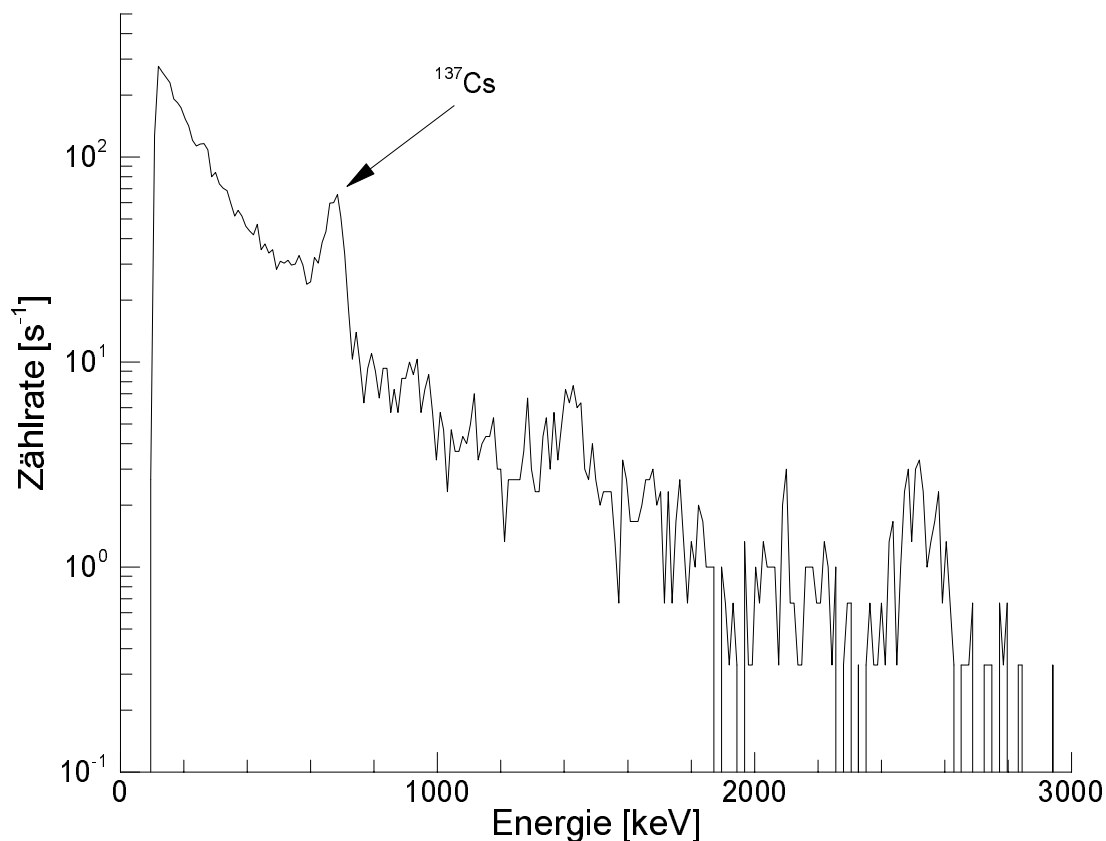


Abbildung 5: Gemitteltetes Spektrum in der unmittelbaren Umgebung einer der aus der Luft detektierten ^{137}Cs -Quellen.

Im Messgebiet konnten klar zwei ^{137}Cs -Anomalien erkannt werden (siehe Abbildung 6). Unter der Annahme von Punktquellen konnten mit Hilfe des Anhangs von ICRU-Report 53 die Aktivitäten der beiden Quellen mit rund 1.1 GBq bzw. 1.6 GBq abgeschätzt werden. Eine dritte ausgelegte ^{137}Cs -Quelle mit einer Aktivität von 25 MBq wurde durch das Aeroradiometriesystem nicht erkannt.

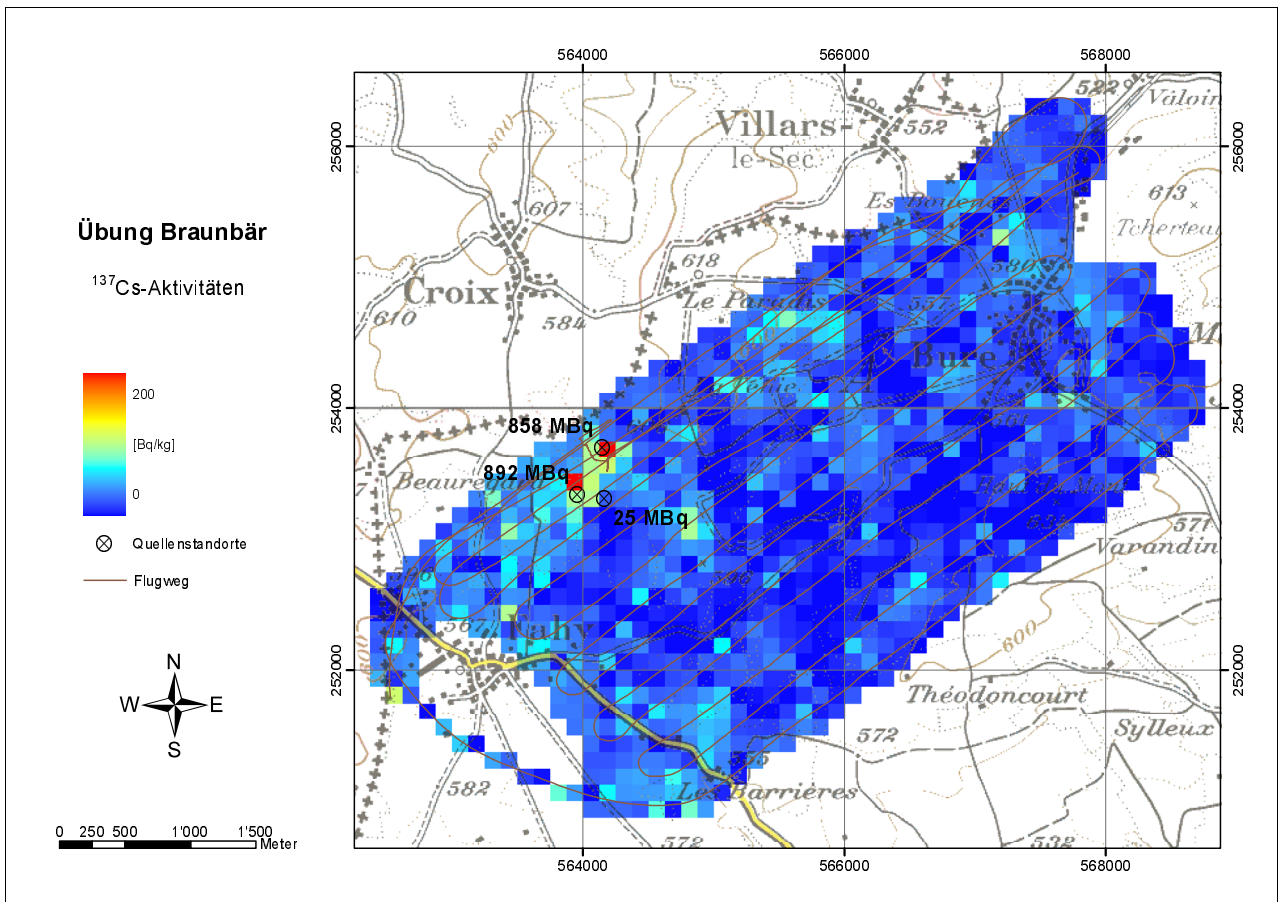


Abbildung 6: ^{137}Cs -Karte des Messgebiets Übung „Braunbär“, auf der deutlich die zwei Hot-Spots zu erkennen sind. Eingezeichnet sind auch die ausgelegten Quellen und deren Aktivitäten. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

3.2.2 Fazit

Diese Übung zeigte, dass die Aeroradiometrieausrüstung auch ausserhalb der jährlichen Übungen schnell einsatzbereit ist. Die Zusammenarbeit mit der Luftwaffe funktionierte einwandfrei.

Das Messgebiet konnte in kurzer Zeit flächendeckend erfasst und zwei ^{137}Cs -Quellen lokalisiert und identifiziert werden. Abschätzungen der Quellen-Aktivität aus den Messergebnissen lagen deutlich über den realen ausgelegten Aktivitäten von 858 MBq (geschätzt 1.6 GBq) und 892 MBq (geschätzt 1.1 GBq). Die schwächste Quelle mit einer Aktivität von 25 MBq konnte nicht detektiert werden.

Die Lokalisierung der Quelle 2 (858 MBq) lag mit den Koordinaten (564'186, 253'703) sehr nahe bei dem tatsächlichen Ort (564'150, 253'705). Die aus der Aeroradiometrie bestimmten Koordinaten (564'964, 253'443) der Quelle 3 (892 MBq) lagen 100 m zu dem eigentlichen Standort (563'960, 253'347) versetzt.

Für eine erste grobe Lokalisierung der Quellen reicht eine Kartierung des Messgebietes aus. Für eine genauere Ortsbestimmung ist die Entwicklung eines verfeinerten Suchverfahrens erforderlich.

4 Vergleichsmessungen Boden - Luft

In einem Ereignisfall werden die Ergebnisse von InSitu-Gammaspektrometrie, Dosisleistungsmessungen und aeroradiometrischen Messungen durch die NAZ zusammengeführt. Daher wurden im Messgebiet Lausanne Vergleichsmessungen der verschiedenen Methoden durchgeführt.

4.1 Messresultate

An einem Messpunkt wurden von Messequipen des Labors Spiez, des Institut Universitaire de Radiophysique Appliquée (IRA) und der Sektion Überwachung der Radioaktivität (SUEr) des Bundesamtes für Gesundheit (BAG) je eine InSitu-Messung durchgeführt. An diesem Punkt wurden auch von allen Messequipen ebenfalls Ortsdosisleistungsmessungen durchgeführt. Über demselben Messpunkt erfolgte mit der Aeroradiometrieausrüstung ein Steigflug.

Tabelle 1: Messresultate der InSitu-Gammaspektrometrie der Messequipen vom Labor Spiez, des IRA und der SUEr sowie die Ergebnisse aus der Aeroradiometrie (ARM).

Nuklid	Labor Spiez Messwert [Bq/kg]	IRA Messwert [Bq/kg]	SUEr Messwert [Bq/kg]	ARM Messwert [Bq/kg]
^{40}K	372 ± 75.4	399 ± 5	398.5	419 ± 109
^{214}Bi (609 keV)	23.6 ± 3.2	25.4 ± 8	24.4	23.5 ± 23
^{214}Bi (1120 keV)		24.2 ± 13		
^{214}Bi (1765 keV)		21.8 ± 10		
$^{226}\text{Ra}^*$	40 ± 29.8	61 ± 30	49.3	
$^{234\text{m}}\text{Pa}$	< 132.9	< 80		
^{214}Pb (295 keV)	26.0 ± 4.7	25.2 ± 12	26.6	
^{214}Pb (352 keV)		27.2 ± 8		
^{210}Pb	< 446.2			
Mittelwert ^{238}U	24.79	24.8	25.5	23.5
^{212}Pb	25 ± 5.7	31.4 ± 6	28.5	24.1 ± 10
^{212}Bi	31 ± 15.5	29.6 ± 20	32.2	
^{228}Ac (338 keV)	27.9 ± 4.5	28.3 ± 43	25.6	
^{228}Ac (911 keV)		25.5 ± 9		
^{208}Tl	8.9 ± 1.9	29.3 ± 8	26.7	
Mittelwert ^{232}Th	23.2	28.8	28.3	24.1
^{234}Th	< 73.4			
^{235}U	1.2 ± 0.9			
^{131}I	< 1.7			
^{134}Cs	< 1.2	< 1		
^{137}Cs	10.5 ± 2.5	10.4 ± 8	11.4	$< 60 (4.4 \pm 50)$

* ^{226}Ra wurde für die Bestimmung des Mittelwertes nicht berücksichtigt.

Die von der InSitu-Gammaspektrometrie und der Aeroradiometrie bestimmten Aktivitäten für die natürlichen Radionuklide (^{238}U -Serie, ^{232}Th -Serie, ^{40}K) stimmen innerhalb der Unsicherheiten ($\pm 2\sigma$) mit Ausnahme der ^{208}Tl -Aktivitäten des Labor Spiez gut überein (siehe Tabelle 1). Für ^{137}Cs

liegt der von der Aeroradiometrie angegebene Wert weit unter der eigentlichen Nachweisgrenze von rund 60 Bq/kg.

Tabelle 2: Ortsdosisleistungen am Vergleichspunkt, die mit verschiedenen Messgeräten und Methoden bestimmt wurden.

Methode/Messgerät	Ortsdosisleistung [nSv/h]			
	Labor Spiez	IRA	SUER	ARM
Über Aktivitäten	98	103	104	99 ± 8
Reuter Stokes IC		106 ± 5	97	
SDI-Methode				107 ± 6

Bei der Bestimmung der Ortsdosisleistung (ODL) aus spektrometrischen Messungen kommen verschiedene Methoden zur Anwendung. Einerseits kann die ODL über die Nuklidaktivitäten und die entsprechenden Anteile an der Messgrösse Kerma in Luft (ICRU Report 53) berechnet werden. Für die Umrechnung von Kerma in Luft [nGy/h] in $H^*(10)$ [nSv/h] wurde in erster Näherung jeweils ein Umrechnungsfaktor 1.2 verwendet, der eigentlich für die Photonenenergie von ^{137}Cs gültig ist (KSR, 2004). Andererseits lässt sich die ODL auch über die „Spectrum Dose Index“-Methode (siehe Bucher, 2001) abschätzen. Dabei wird das Produkt von Zählrate und Kanalnummer über das Spektrum integriert, was ein Mass für die im Detektor deponierte Energie liefert. Die mit den verschiedenen Geräten gemessenen Ortsdosisleistungen (Tabelle 2) stimmen innerhalb der Unsicherheiten gut überein.

Auf dem Gelände des Paul Scherrer Instituts (PSI) erfolgte im Juni 2004 eine Vergleichsmessung von Dosisleistungs- und Dosismessgeräten (Reuter Stokes Ionisationskammer, MADUK- und NADAM-Sonde, Aeroradiometrie sowie diverse Dosimeter). Die mit der Aeroradiometrie bestimmte Ortsdosisleistung war 20 % niedriger als die am Boden mit Reuter-Stokes-Ionisationskammern gemessenen Werte (Wernli, 2005). Ursache für diese Abweichung war die Nähe des Messpunkts zur Aare und einem Waldgebiet, die das Messergebnis der Aeroradiometrie beeinflussten.

4.2 Fazit

Trotz der unterschiedlichen Gesichtsfelder von InSitu-Gammaspektrometrie und der Aeroradiometrie stimmen die Resultate zufriedenstellend überein. Eine bessere Überprüfung liesse sich durch mehrere über eine Fläche von 100 m x 100 m verteilte InSitu-Messungen erzielen.

5 Ergebnisse der Messflüge im Rahmen der UARM04

Die Messungen des Jahres 2004 erfolgten mit einem Super-Puma-Helikopter der Armee in der Zeit vom 14. bis zum 17. Juni 2004. Die Messflüge standen unter der Leitung von Y. Lörtscher (NAZ).

Die Daten aller im Rahmen der UARM04 durchgeführten Flüge sind in den Tabellen 3 und 4 zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenstellung der Flugparameter, die in der Übung ARM04 verwendet wurden.

Messgebiet	Fluglinien- abstand [m]	Fläche [km ²]	Flughöhe [m]	Flugrichtung [Grad]	Fluggeschwin- digkeit [m/s]	Mess- Intervall [s]
KKB/KKL/PSI/ZWILAG	250	94	90	45/225	30	1
Profil Rhein-Rhone	-	-	120	-	30	1
Davos	250	12	90	50/230	30	1
Lausanne	250	50	90	160/340	30	1
Lucens	250	19	90	45/225	30	1

Tabelle 4: Zusammenstellung der Flugdaten der Übung ARM04.

Messgebiet	Flug-Nummern	Datum	Fluglinien	Eff. Messzeit [s]	Flugstrecke [km]
KKB/KKL/PSI/ZWILAG	0410	14.6.2004	1-24	6'510	390
	0411	14.6.2004	24-39	5'568	
Profil Rhein-Rhone	0414	15.6.2004	1	6'966	249
Davos	0412	15.6.2004	1-5	1'175	41
Lausanne	0415	15.6.2004	1-23	5'405	190
Lucens	0416	16.6.2004	1-13	2'270	79

5.1 Wiederkehrendes Messgebiet KKB/KKL/PSI/ZWILAG

Im Jahre 2004 wurde turnusgemäss die Umgebung der Kernkraftwerke Beznau und Leibstadt sowie der Forschungsanstalt Paul Scherrer Institut (PSI) und des Zwischenlagers für radioaktive Abfälle (ZWILAG) aeroradiometrisch vermessen. Wie in früheren Jahren konnte das KKL anhand der Streustrahlung des Aktivierungsprodukts ¹⁶N klar erkannt werden (Abbildung 7, links). Im Bereich des Fortluftkamins des PSI West wurde Annihilationsstrahlung registriert (Abbildung 7, rechts). Zudem konnten über dem Bundeszwischenlager (BZL), das sich auf dem Gelände des PSI Ost befindet, die Gammalinien von ⁶⁰Co gemessen werden (Abbildung 8, links). Die ZWILAG wurde auch dieses Jahr aeroradiometrisch nicht erkannt.

Hingegen registrierte das Messsystem beim KKB die Gammalinie von ⁵⁸Co (810 keV, Abbildung 8, rechts). Die Aktivität von ⁵⁸Co erhöht sich während des Stillstands von Kernreaktoren im Brennstofflagerbecken und im Reaktorkühlsystem temporär. Während des Überflugs befand sich Block I des KKB in Revision.

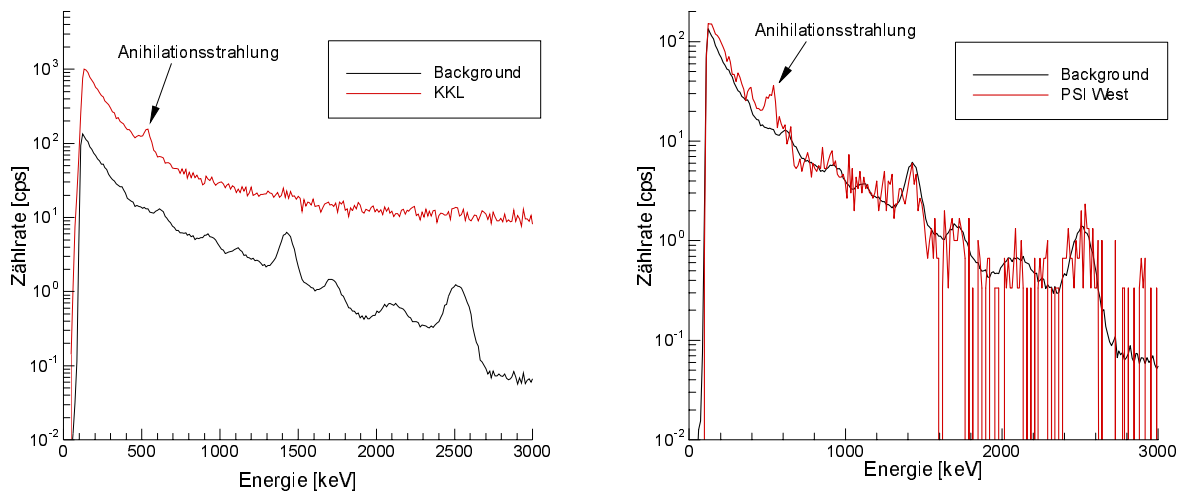


Abbildung 7: Die linke Graphik zeigt je ein gemitteltes Spektrum aus unmittelbarer Umgebung des Maschinenhauses KKL und zum Vergleich eines aus der Umgebung ausserhalb des Werkareals. Auf der rechten Seite ist ein gemitteltes Spektrum in der Nähe des Fortluftkamins von PSI West und zum Vergleich eines aus der Umgebung ausserhalb des umzäunten Areals („Background“) dargestellt.

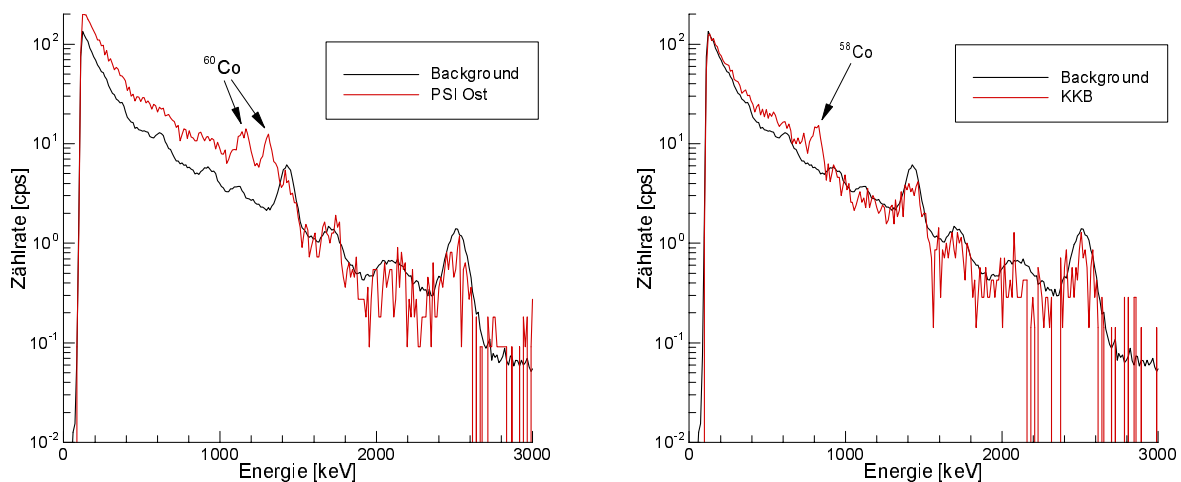


Abbildung 8: Die linke Graphik zeigt je ein gemitteltes Spektrum aus unmittelbarer Umgebung des Bundeszwischenlagers (BZL, PSI Ost) und zum Vergleich eines aus der Umgebung ausserhalb des Werkareals. Auf der rechten Seite ist ein gemitteltes Spektrum aus unmittelbarer Umgebung des Block I von KKB und eines aus der Umgebung ausserhalb des Werkareals dargestellt.

Auf der Karte der Ortsdosisleistung (Abbildung 9) sind das KKL und das BZL (auf dem Gelände des PSI-Ost) zu erkennen. Das KKB hebt sich in der ODL-Karte nicht wesentlich von der Umgebung ab. Deutlich sind in der Karte Strukturen auszumachen, die auf Einflüsse der Geologie, der Topographie sowie der Vegetation zurückzuführen sind.

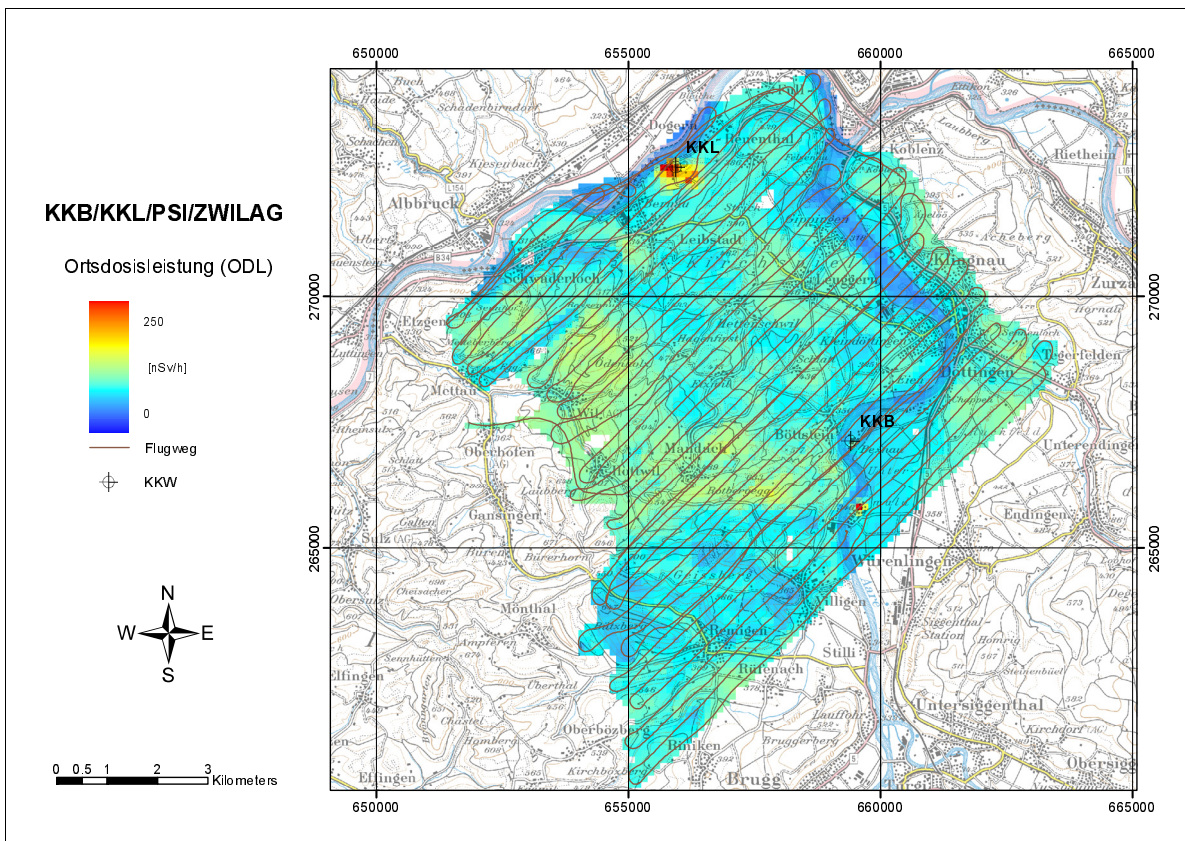


Abbildung 9: Karte der Ortsdosisleistung im Messgebiet KKB/KKL/PSI/ZWILAG mit eingezeichneten Flugwegen sowie den Standorten der KKW. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

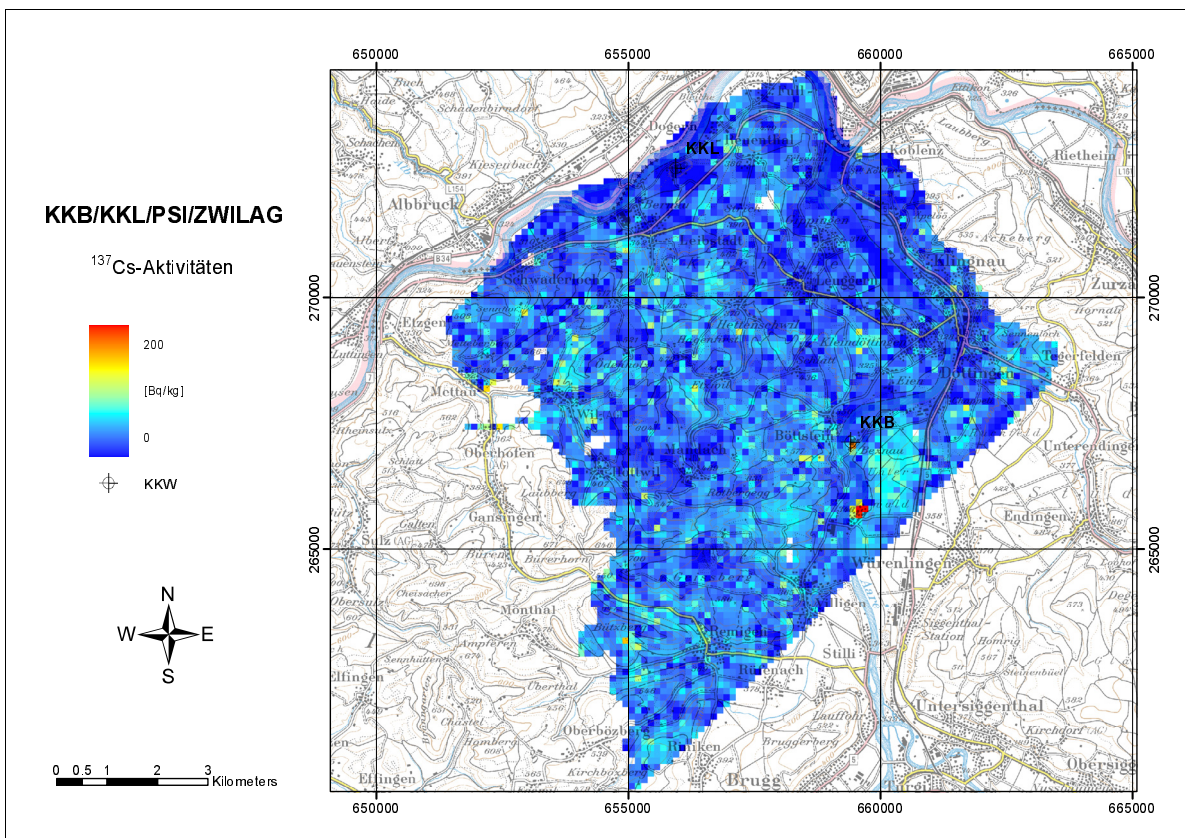


Abbildung 10: Karte der ^{137}Cs -Aktivitäten. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

In der Karte der ^{137}Cs -Aktivitäten (Abbildung 10) sind beim PSI-Ost (BZL) und beim KKB erhöhte Werte zu sehen. Bei beiden Standorten handelt es sich um einen Artefakt, der durch eine ungenügende Strippingkorrektur für ^{58}Co (wird standardmässig beim Stripping nicht berücksichtigt) und ^{60}Co verursacht wird. Ausserhalb der umzäunten Areale sind keine erhöhten Werte zu erkennen, die nicht auf Tschernobyl- bzw. Bombentests-Fallout zurückzuführen sind.

In der Karte des modifizierten MMGC-Verhältnisses (siehe Schwarz & Rybach, 1995) sind KKB, KKL, PSI-West (Fortluftkamin) und PSI-Ost (BZL) anhand erhöhter Werte zu erkennen (Abbildung 11). Die ZWILAG zeigt wie schon in den Karten der Ortsdosisleistung und der ^{137}Cs -Aktivität im MMGC-Verhältnis keine Erhöhung.

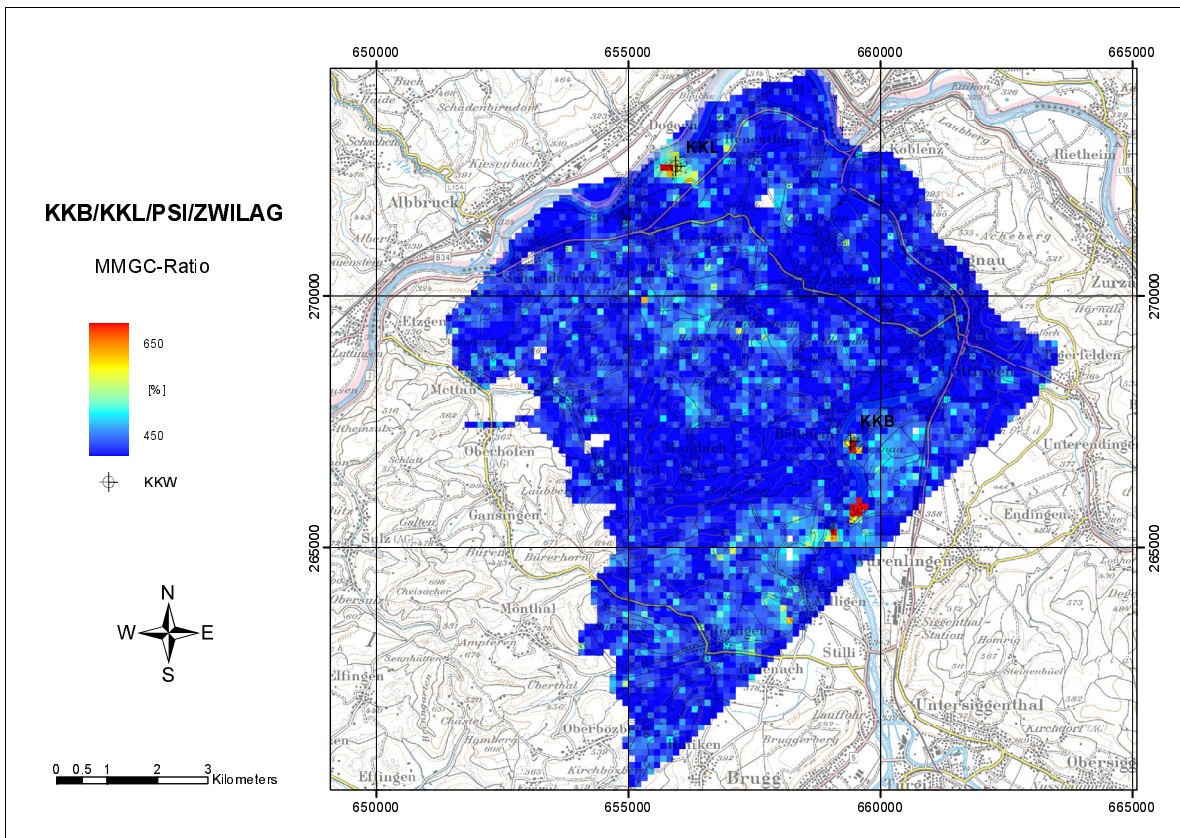


Abbildung 11: Karte des modifizierten MMGC-Verhältnisses im Messgebiet KKB/KKL/PSI/ZWILAG. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

5.2 Profil Rhein – Rhone

Als Ergänzung zu den Profilen früherer Jahre (Bodensee-Genfersee, Schaffhausen-Bellinzona) wurde im Jahre 2004 ein Profil entlang Rhein und Rhone von Chur bis an den Genfersee aeroradiometrisch vermessen. Die Resultate spiegeln die Gesteinszusammensetzungen im Messgebiet wider (Abbildungen 15 und 16). Im Goms sowie zwischen Andermatt und Furka lässt sich mehrmals beobachten, dass in unmittelbarer Nähe von Bachrinnen bzw. Bachkegeln die Messwerte deutlich ansteigen. Auch im unteren Rhonetal gibt es zum Teil markante Schwankungen. Über dem ehemaligen Militärflugplatz von Raron konnte eine deutliche Erhöhung in der terrestrischen Dosisleistung (ohne kosmischen Anteil) festgestellt werden. An dieser Stelle befindet sich zurzeit die Ausbruchmaterialbewirtschaftung des Lötschberg-Basistunnels, dessen Gestein sich deutlich vom natürlichen Untergrund im Rhonetal unterscheidet.

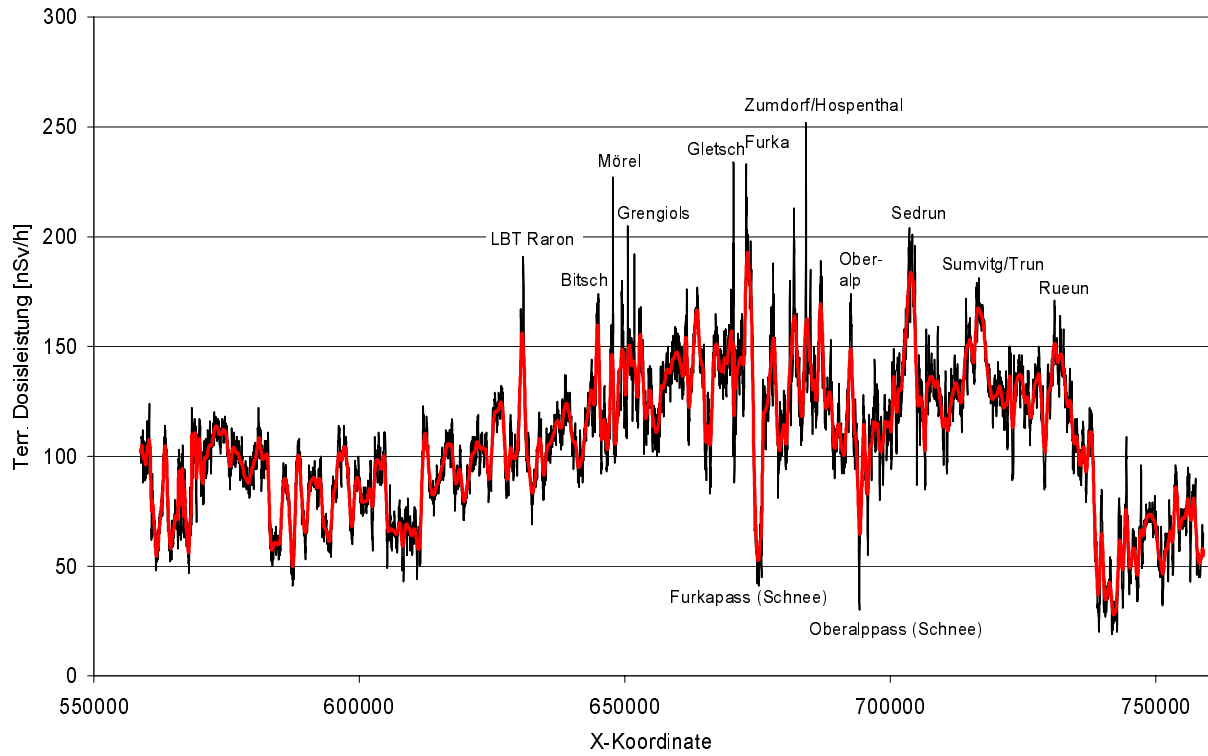


Abbildung 12: Die Graphik zeigt die terrestrischen Beiträge der Dosisleistung entlang des Profils von Chur (rechts) an den Genfersee (links) entlang Rhein und Rhone. Die rote überlagerte Kurve zeigt die mit einem Mathisfilter behandelten Messwerte. LBT: Ausbruchsmaterial Lötschberg-Basistunnel.

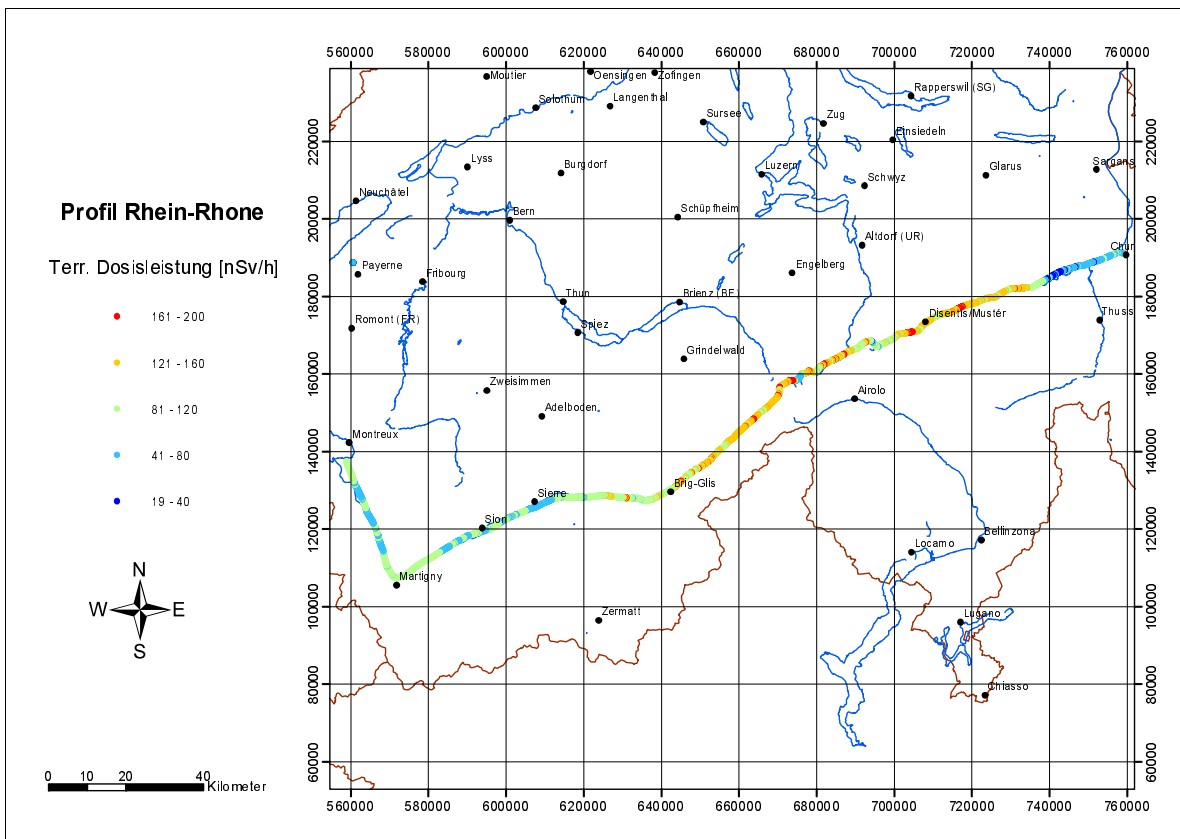


Abbildung 13: Karte der terrestrischen Dosisleistung entlang des Profils Rhein-Rhone. Kartendaten VEC200©2002 swisstopo.

Bei einigen Stellen des Profils Rhein-Rhone wurden etwas erhöhte Isotopengehalte bestimmt und damit auch höhere Ortsdosisleistungswerte. Dafür sind meist Kristallin-Gesteine verantwortlich (vgl. Tabelle 5)

Tabelle 5: Messpunkte mit etwas erhöhten Isotopengehalten und höherer Ortsdosisleistung und die entsprechenden Gesteinstypen am Messort.

Koordinaten	²¹⁴ Bi [Bq/kg]	²⁰⁸ Tl [Bq/kg]	⁴⁰ K [Bq/kg]	ODL [nSv/h]	Gesteinstyp	Tektonische Zuordnung
672800/158100	83	62	838	259	Pelit-/Psammitgneis (Paragneis)	Altkristallin des Aarmassivs
670350/156350	128	68	865	272	Pelit-/Psammitgneis (Paragneis)	Altkristallin des Aarmassivs
681880/162300	71	60	746	238	Pelit-/Psammitgneis (Paragneis)	Altkristallin des Aarmassivs
684050/163600	69	69	804	241	Pelit-/Psammitgneis (Paragneis)	Altkristallin des Aarmassivs
704000/170600	103	66	806	233	Pelit-/Psammitgneis (Paragneis)	Tavetscher Zwischenmassiv
730800/182100	109	46	785	195	Konglomeratischer Paragneis	Ilanzer Verrucano
630500/128250*	89	61	930	204	Lockergestein	Quartär

*Ausbruchsmaterial aus dem Lötschberg-Basistunnel.

5.3 Messgebiet Davos

Mit Davos wurde in 2004 erstmals in der Schweiz ein Stadtgebiet aeroradiometrisch vermessen. Davos liegt auf einer Höhe von rund 1'400 m ü. Meer, wodurch aufgrund der erhöhten kosmischen Strahlung höhere Ortsdosisleistungen als im Mittelland zu erwarten waren.

In Abbildung 12 ist die Karte der Ortsdosisleistung zusammen mit dem geflogenen Pfad abgebildet. Deutlich ist der Davosersee anhand tiefer Werte zu erkennen. Die mittlere Ortsdosisleistung im Messgebiet liegt bei 133 nSv/h mit einem Minimum von 68 nSv/h und einem Maximum von 186 nSv/h. Der Tagesmittelwert der NADAM-Sonde in Davos am 15. Juni 2004 betrug 149 nSv/h (korrigiert für Eigennulleffekt), der am entsprechenden Punkt von der Aeroradiometrie bestimmte Wert 143 nSv/h.

Die Karte der ¹³⁷Cs-Aktivitäten (Abbildung 13) zeigt durchweg tiefe Werte. Auch der MMGC-Ratio (Abbildung 14) weist keine Anomalien auf.

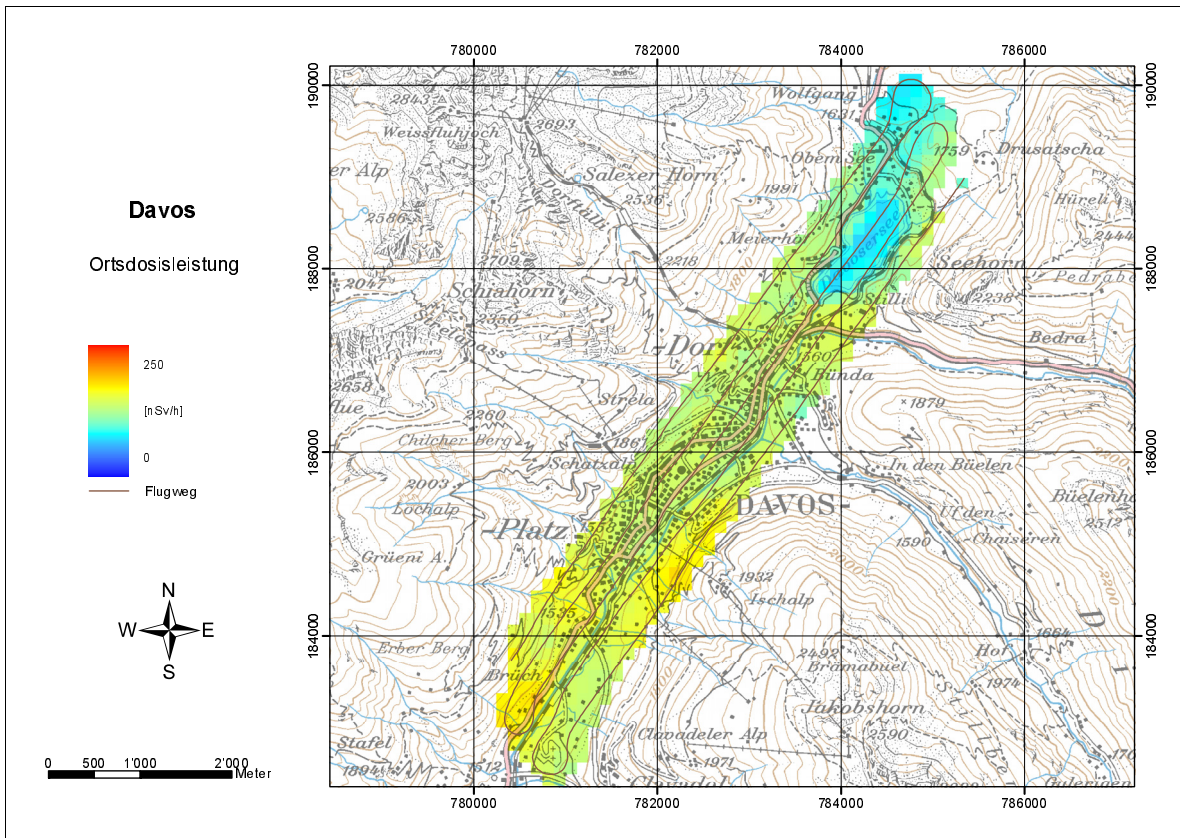


Abbildung 14: Karte der Ortsdosisleistung im Messgebiet Davos mit eingezeichnetem Flugweg. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

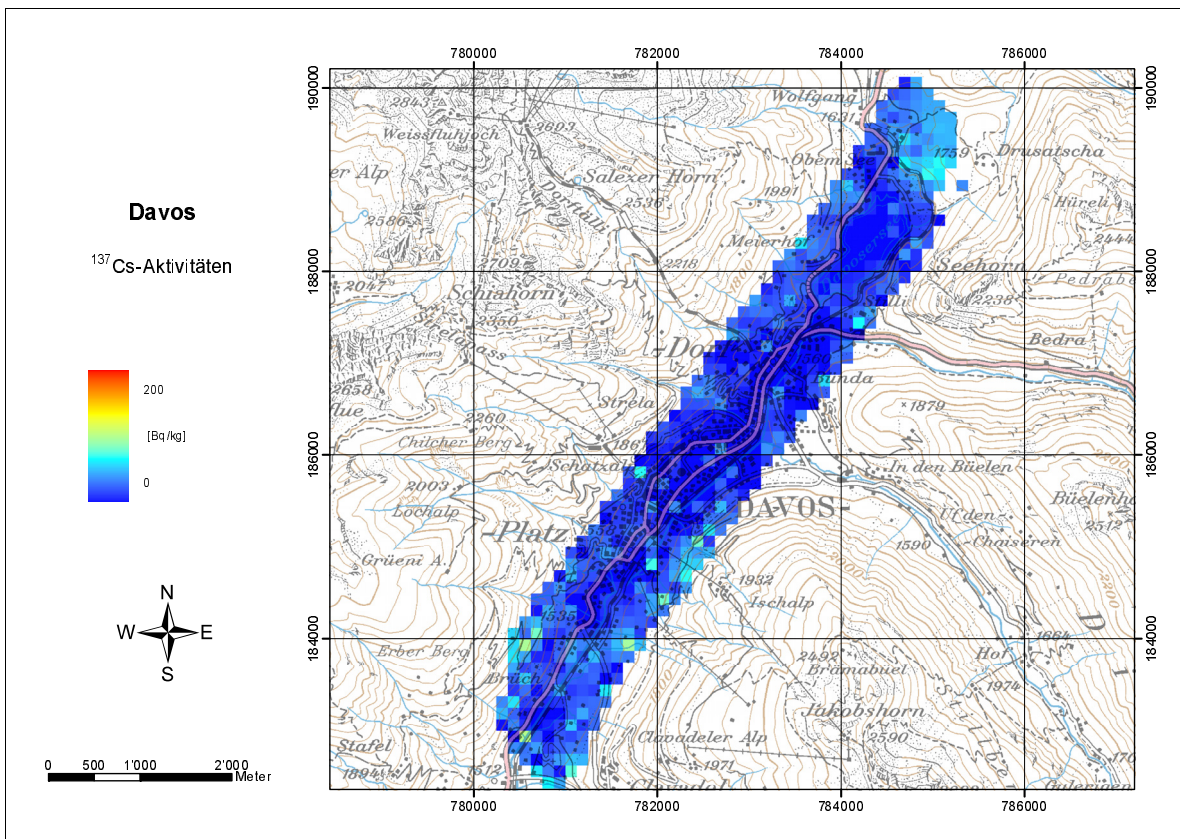


Abbildung 15: Karte der ^{137}Cs -Aktivitäten im Messgebiet Davos. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

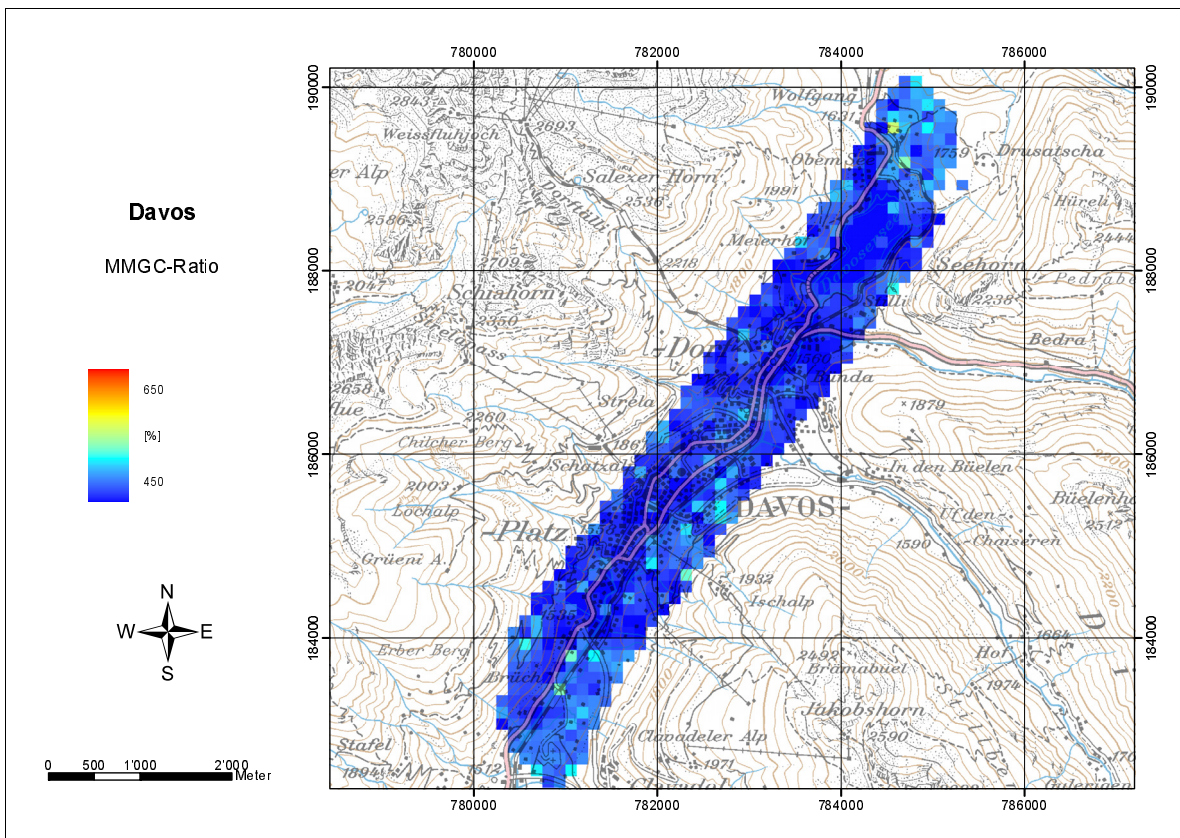


Abbildung 16: Karte des MMGC-Ratio im Messgebiet Davos. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

5.4 Messgebiet Lausanne

Mit Lausanne wurde im Jahre 2004 eine zweite Stadt aeroradiometrisch vermessen. Ferner wurden im Rahmen einer Übung der lokalen Behörden (Zivilschutz, Feuerwehr, Polizei) insgesamt vier ^{137}Cs -Quellen im Messgebiet ausgelegt. An einem Standort nördlich der Stadt wurden zwei Quellen mit 300 MBq und auf einem Gebäudedach in der Stadt zwei Quellen mit je 250 MBq platziert.

Abbildung 17 stellt die Ortsdosisleistung über der Stadt Lausanne und den Flugweg in diesem Messgebiet dar. Deutlich sind die tiefen Werte über dem Genfersee zu erkennen. Die Werte über dem Stadtgebiet entsprechen den Erwartungen aufgrund der geographischen Lage (Geologie und Höhe über Meer). Die Werte liegen zwischen 36 nSv/h (über dem See) und 142 nSv/h. Der Mittelwert liegt bei 92 nSv/h. Die NADAM-Sonde in Pully weist für den 15. Juni 2004 einen Tagesmittelwert von 120 nSv/h (korrigiert für Eigennulleffekt) aus. Für den entsprechenden Punkt lieferte die Aeroradiometrie 109 nSv/h.

Die höchste Ortsdosisleistung wurde im Norden von Lausanne in der Nähe des Flugplatzes La Blécherette gemessen. Aus den Abbildungen 18 und 19 geht hervor, dass es sich dabei um eine ^{137}Cs -Quelle handelt. Der Messpunkt stimmt mit der Position der ^{137}Cs -Quellen mit je 300 MBq überein. Aus den Messwerten der Aeroradiometrie wurde die Aktivität dieser Quellen zu 460 MBq abgeschätzt.

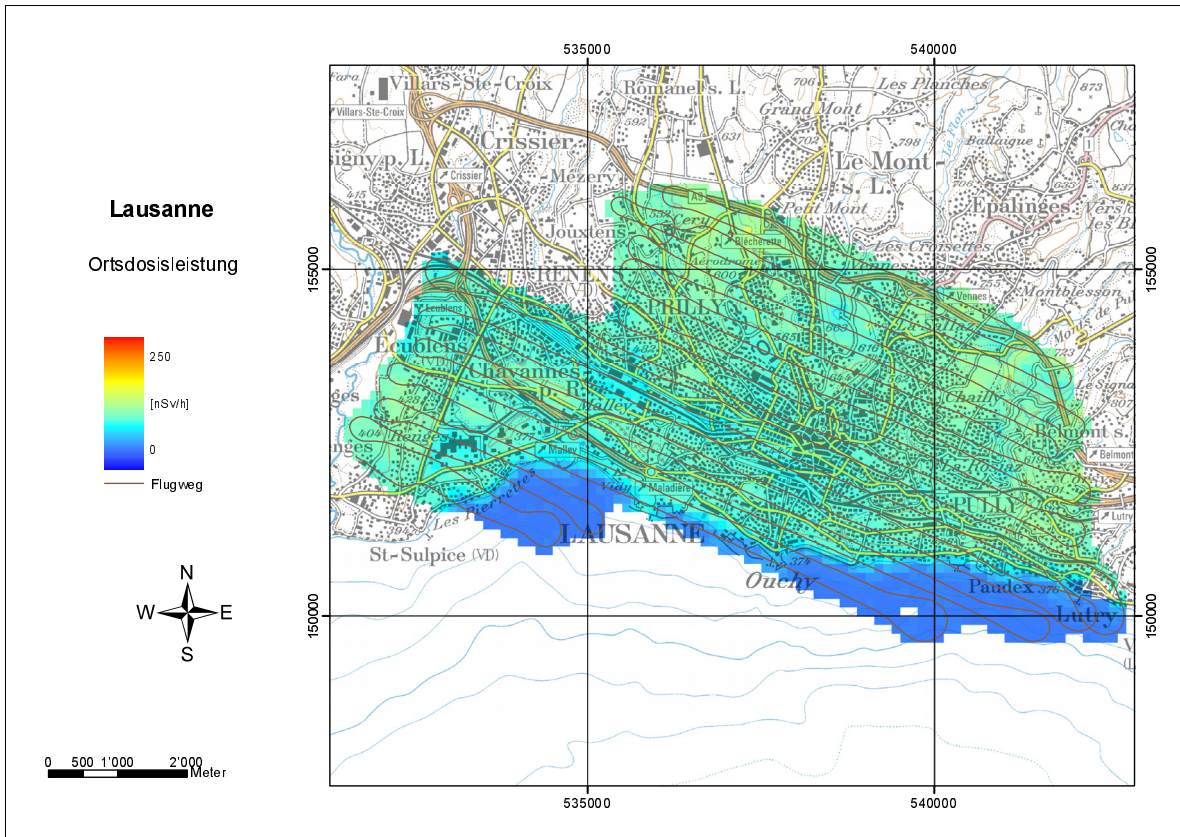


Abbildung 17: Karte der Ortsdosisleistung im Messgebiet Lausanne mit eingezeichnetem Flugweg. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

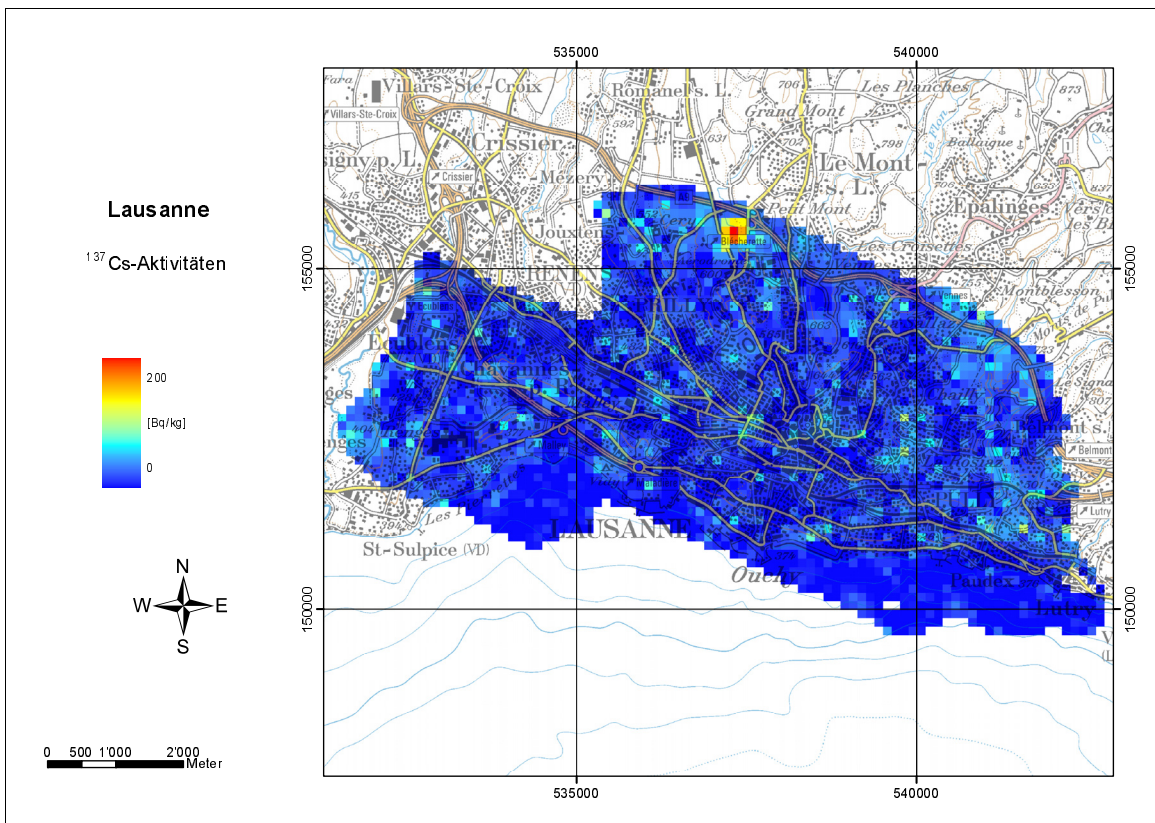


Abbildung 18: Karte der ¹³⁷Cs-Aktivitäten im Messgebiet Lausanne. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

Die auf einem Gebäudedach in der Stadt ausgelegten ^{137}Cs -Quellen mit einer Aktivität von insgesamt 500 MBq wurden nicht erkannt. Der Ort der Quellen lag mittig zwischen zwei Fluglinien (Abstand 250 m). Nachträglich wurde im MMGC-Verhältnis (Abbildung 19) eine Erhöhung über dem Ort der Quellen erkannt. Bei einer genaueren Analyse der Daten konnte in den entsprechenden Spektren eine schwache ^{137}Cs -Anomalie gefunden werden (Abbildung 20).

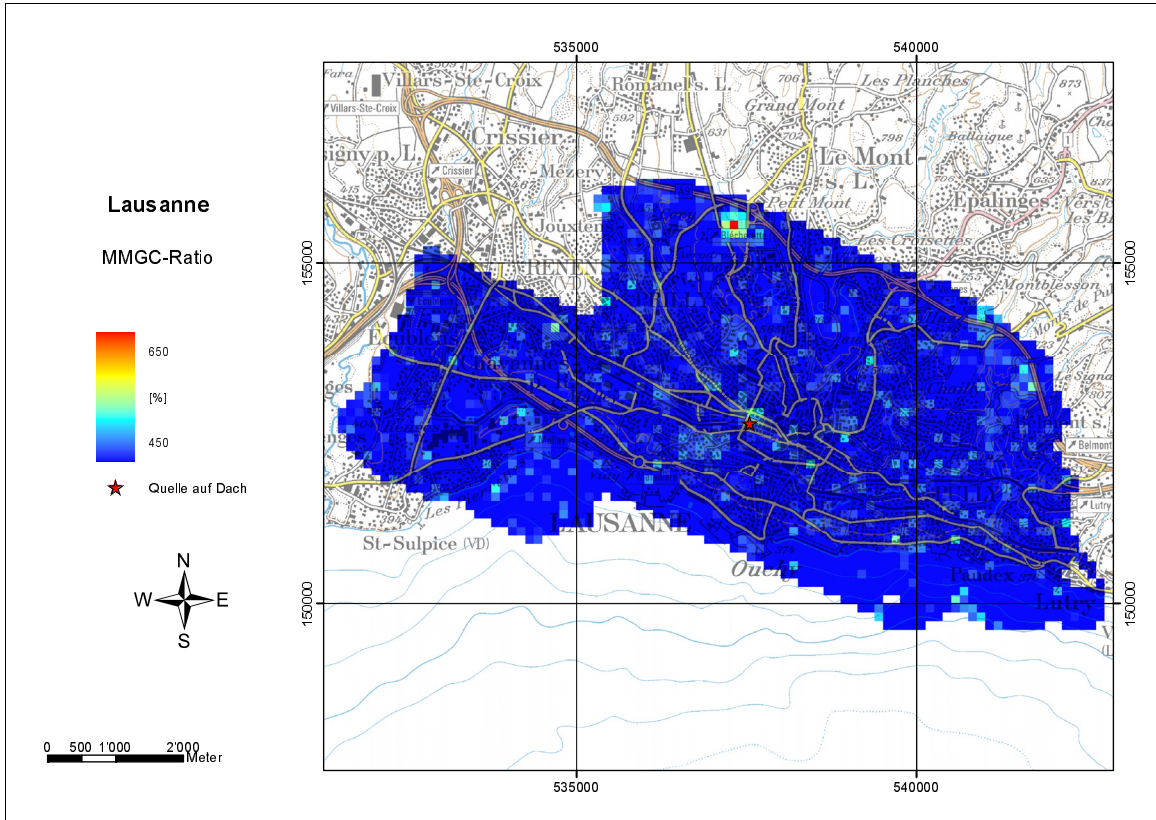


Abbildung 19: Karte des MMGC-Ratio im Messgebiet Lausanne. Mit einem roten Symbol ist der Standort der beiden 250 MBq-Quellen markiert, die auf einem Gebäudedach ausgelegt wurden. Kartendaten PK100©2002 swisstopo.

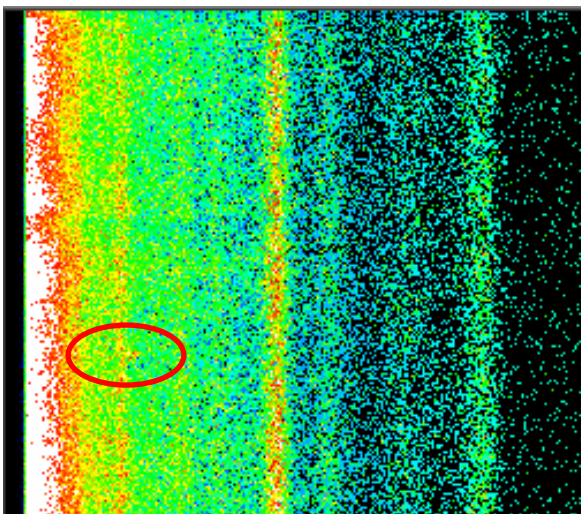


Abbildung 20: Darstellung der gemessenen Spektren im Bereich der 250 MBq-Quellen. Rot eingekreist ist die schwach erkennbare ^{137}Cs -Anomalie. Die horizontale Achse entspricht den Kanälen 1-256, die vertikale Achse der Zeit. Die Farbe der Pixel korreliert mit den Counts im jeweiligen Kanal.

5.5 Messgebiet Lucens

Im September 2003 wurden die auf dem Gelände des ehemaligen Versuchsreaktors Lucens gelagerten radioaktiven Abfälle unter Aufsicht der HSK in die Zwischenlager Würenlingen AG transportiert. Im November 2003 wurden von der HSK Kontrollmessungen durchgeführt. Aufgrund der Resultate wurden die kontrollierte Zone und der überwachte Bereich aufgehoben.

Mit den aeroradiometrischen Messungen im Messgebiet Lucens sollte die Veränderung zu Messungen aus früheren Jahren dokumentiert werden. Erwartungsgemäss konnte im Bereich des früheren Lagerareals im Jahre 2004 keine erhöhte Ortsdosisleistung festgestellt werden (Abbildung 21). Die gemessene Ortsdosisleistung lag zwischen 86 nSv/h und 120 nSv/h mit einem Mittelwert von 104 nSv/h über das gesamte Messgebiet. Dies entspricht dem natürlichen Schwankungsbereich des Untergrunds.

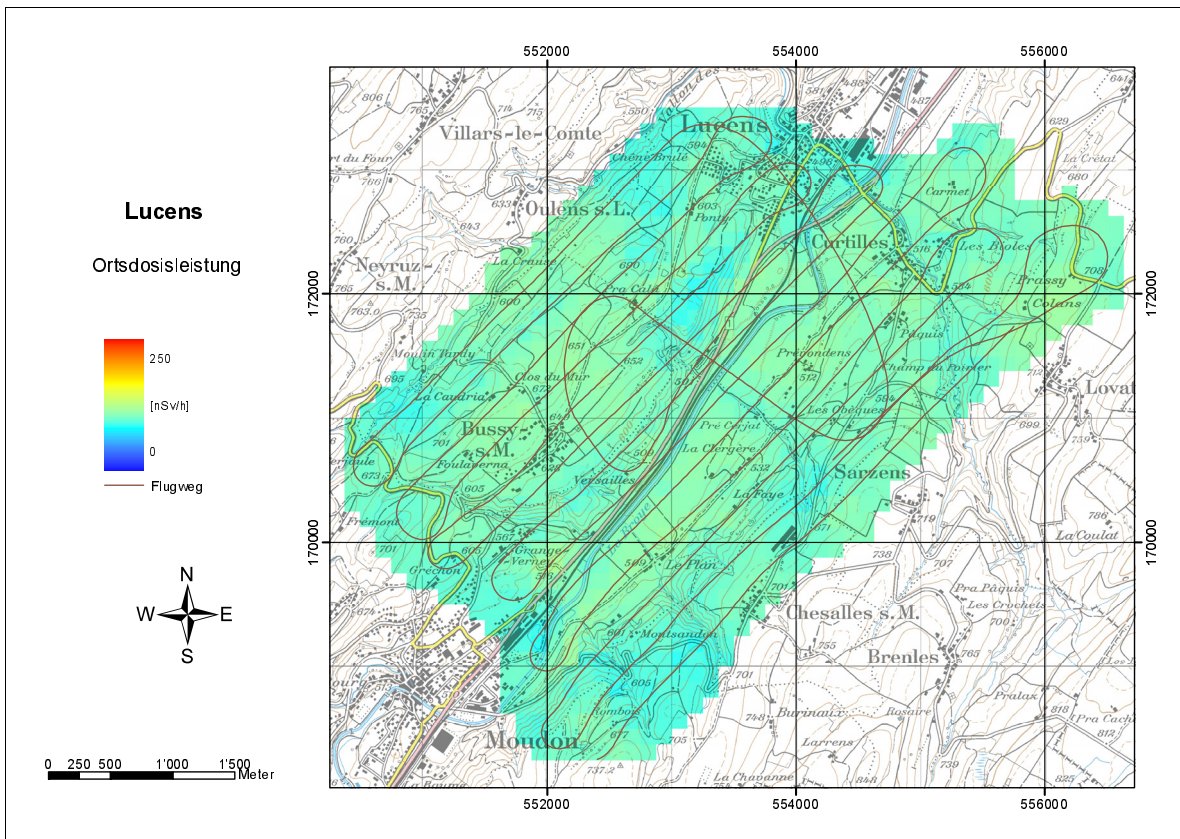


Abbildung 21: Karte der Ortsdosisleistung im Messgebiet Lucens im Jahre 2004. In der Karte sind auch die Flugwege eingezeichnet. Kartendaten PK50©2002 swisstopo.

Der Unterschied zu den aeroradiometrischen Messwerten früherer Jahre wird im MMGC-Verhältnis besonders deutlich. In Abbildung 22 sind die entsprechenden Resultate der Jahre 1999 und 2004 dargestellt. Während 1999 ein deutlicher Peak am Standort des ehemaligen Versuchsreaktors Lucens erkannt werden kann, unterscheidet sich derselbe Punkt im Jahre 2004 nicht mehr von der Umgebung.

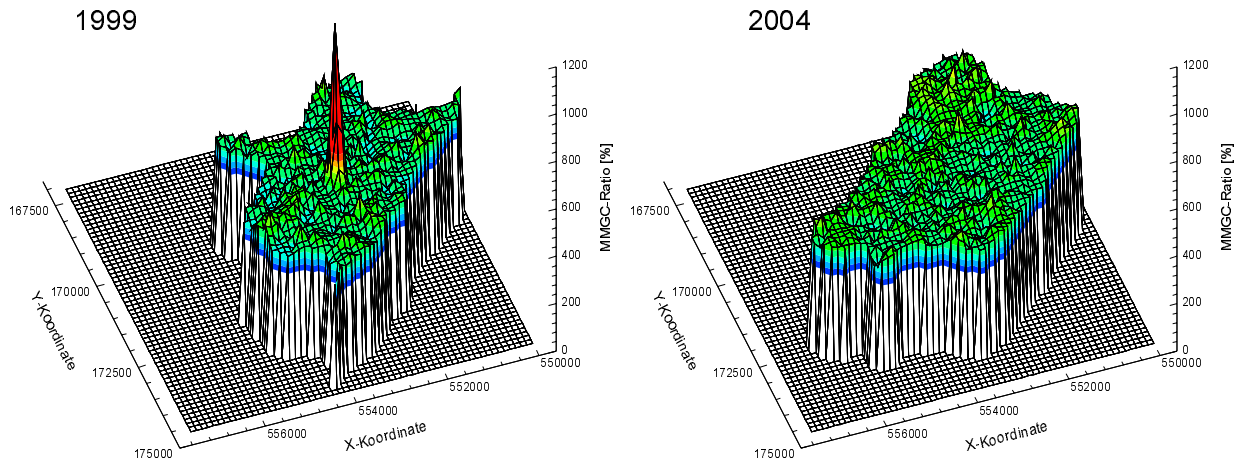


Abbildung 22: 3D-Darstellung des MMGC-Ratio im Messgebiet Lucens für die Jahre 1999 und 2004. Blickrichtung ist von Nordost nach Südwest.

6 Ausblick

Nach erfolgreicher Flugfreigabe ist geplant, die Messflüge 2005 mit dem erneuerten Messsystem durchzuführen. Erweist sich das erneuerte Messsystem unter Einsatzbedingungen als tauglich, wird anschliessend das zweite System identisch erneuert.

Für die Messflüge 2005 ist neben der aeroradiometrischen Vermessung der Kernkraftwerke Gösigen und Mühleberg ein Nord-Süd-Profil von der Ajoie bis zum Mattmark-Stausee vorgesehen. Ferner ist neben kleineren Messgebieten mit ^{137}Cs -Anomalien im Kanton Tessin die aeroradiometrische Vermessung der Stadt Bellinzona geplant. Zudem wird die Quellensuche erneut geübt und eine weitere Boden-Luft-Vergleichsmessung mit InSitu-Gammaspektrometrie durchgeführt.

7 Literaturhinweise

BUCHER, B., 2001: Methodische Weiterentwicklungen in der Aeroradiometrie. Dissertation Nr. 13973, ETH Zürich.

BUCHER, B., RYBACH, L., SCHWARZ, G., BÄRLOCHER, CHR., 2003: Aeroradiometrische Messungen im Rahmen der Übung UARM02. PSI Bericht Nr. 03-11. ISSN 1019-0643.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS (ICRU), 1994: ICRU-Report 53, Gamma-Ray Spectrometry in the Environment. ISBN 0-913394-52-1.

EIDGENÖSSISCHE KOMMISSION FÜR STRAHLENSCHUTZ UND ÜBERWACHUNG DER RADIOAKTIVITÄT (KSR), 2004: Empfehlungen zur Sicherstellung der Messdatenqualität von Umgebungsdosimetriesystemen. Bundesamt für Gesundheit, Bern.

SCHWARZ, G. F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr.23, Schweizerische Geophysikalische Kommission.

SCHWARZ, G. F., RYBACH, L.: 1995: Aeroradiometrische Messungen in der Umgebung der schweizerischen Kernanlagen; Bericht für das Jahr 1994 zuhanden der Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK). Interner Bericht, Institut für Geophysik, ETH Zürich.

WERNLI, CH., 2005: Bericht über die Pilot-Vergleichsmessung für Umgebungsdosimetriesysteme 2004. Interner Bericht, Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen-PSI.