



Cristina Poretti, Adrian Hess, Gerald Scharding

13. Juni 2025

Aeroradiometrie-Messkampagne 2025

vom 27. Mai bis 06. Juni 2025

Übungsbericht und Messresultate



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Übung Aeroradiometrie 2025	4
2.1	Allgemeine Ziele des Aeroradiometrie-Teams.....	4
2.2	Messflüge in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen.....	4
2.3	Internationale Messkampagne mit Teams aus Litauen, Tschechien, Deutschland und Frankreich vom 02. bis 06. Juni 2025	4
2.4	Information der Bevölkerung, der Medien und der Behörden	6
2.5	Wissenschaftlicher Bericht.....	6
2.6	Beteiligte Partnerorganisationen	6
3	Standardmessprogramme um die Kernkraftwerke Mühleberg und Gösgen	8
3.1	Standardmessprogramm KKW Mühleberg.....	8
3.2	Standardmessprogramm KKW Gösgen	11
4	Internationale Messkampagne	14
4.1	Mission 1: Referenzmessung über dem Waffenplatz Thun	14
4.2	Mission 2: Hintergrundmessung über dem Thunersee	16
4.3	Mission 3: Composite Mapping	17
4.4	Mission 4: Quellensuche.....	22
4.5	Mission 5: Gemischter Messflug	26
5	Erkenntnisse	33
Anhang A:	Aeroradiometrie allgemein	35

1 Zusammenfassung

Für die jährliche Aeroradiometrie-Messkampagne wurde 2025 wiederum vom gewohnten Modus abgewichen. Anstelle des üblichen Wochenprogramms mit einem Standardmessprogramm um Schweizer Kernanlagen, der radiologischen Kartierung bewohnter Gebiete und einigen herausfordernden Flügen mit besonderem Erkenntnisgewinn und Trainingseffekt wurde dieses Jahr eine verlängerte Messkampagne von anderthalb Wochen Dauer durchgeführt.

Am Dienstag 27.05. und Mittwoch 28.05.2025 wurden turnusgemäss die Standardmessprogramme über den Kernkraftwerken Mühleberg und Gösgen durchgeführt. In der Folgewoche vom 02. bis 06.06.2025 fand eine internationale Messübung in der Schweiz statt, mit Beteiligung sowohl der beiden Schweizer Messteams der Nationalen Alarmzentrale und des Kompetenzzentrums ABC-KAMIR als auch von Helikopter-Messteams aus Deutschland, Frankreich, Tschechien und Litauen. Zum ersten Mal wurde eine Quellensuche zuerst mit Helikoptern und danach mit fünf Drohnen geflogen. Zusätzlich gab es zwei schwedische Beobachter, die mehrere Messungen am Boden durchführten, teilweise in denselben Gebieten, die auch durch die Helikopter-Teams vermessen wurden.

Die wichtigsten Ergebnisse der Übung Aeroradiometrie 2025:

1. Im Rahmen der in der Schweiz durchgeführten internationalen Übung wurde die Zusammenarbeit mit ausländischen Teams erfolgreich trainiert. Im Unterschied zu der Übung im Vorjahr erfolgte die Auftragserteilung und -koordination durch die Schweizer Teamleitung.
2. Wiederum wurde das Composite Mapping trainiert. Bei diesem Vorgehen wird ein grosses Messgebiet aufgeteilt. Die Teilgebiete werden dann durch die einzelnen Teams vermessen und die Messwerte anschliessend auf einer gemeinsamen Messkarte zusammengeführt. Fünf Systeme wurden gleichzeitig und koordiniert eingesetzt und eine erste zusammengesetzte Karte am Folgetag erstellt.
3. Die Kampagne umfasste auch eine Quellensuche auf dem Waffenplatz Frauenfeld. In der vorgegebenen Zeit wurden mehrere radioaktive Quellen grob lokalisiert und auf Anweisung der Operatoren konnten die Piloten die lokalisierten Quellen schliesslich mehrfach in verschiedenen Richtungen überfliegen, was eine genauere Lokalisation und Identifikation der Radionuklide ermöglichte.
4. Der internationale Austausch brachte den beteiligten Messteams einen grossen Mehrwert. Die Kenntnisse über Einsatzdoktrin, Fähigkeiten, Datenauswertung und Ausrüstung der befreundeten internationalen Einsatzkräfte wurden verbessert und die persönlichen Kontakte vertieft.
5. Die Kontrollmessungen in Zusammenarbeit mit dem Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) in der Umgebung des Kernkraftwerks Gösgen und der im Rückbau befindlichen Anlage in Mühleberg konnten durchgeführt werden. Ausserhalb der Betriebsareale wurde keine gegenüber dem natürlichen Untergrund erhöhte Radioaktivität festgestellt. Im Vergleich mit den Messresultaten der Vorjahre wurden keine Veränderungen beobachtet.
6. Der Ausbildungs- und Trainingsstand der Messspezialisten, Techniker und Piloten der Aeroradiometrie-Equipe ist hoch.

2 Übung Aeroradiometrie 2025

Die diesjährigen Messflüge fanden in den beiden Wochen vom 26. Mai bis 06. Juni in der Schweiz statt. In der ersten Woche wurden im Rahmen des Standardmessprogramms die Gebiete rund um das Kernkraftwerk Gösgen sowie um das stillgelegte Kernkraftwerk Mühleberg überflogen und aeroradiometrisch vermessen.

Die zweite Woche stand ganz im Zeichen einer internationalen Messkampagne, an der spezialisierte ARM-Teams aus Tschechien, Deutschland, Frankreich und erstmals auch aus Litauen mit Unterstützung einer Delegation aus den USA teilnahmen. Am Mittwochnachmittag wurde die Quellensuche-Mission auf dem Waffenplatz Frauenfeld auch von 5 Drohnen-Teams aus denselben Ländern absolviert.

2.1 Allgemeine Ziele des Aeroradiometrie-Teams

Folgende grundsätzlichen Ziele sollten in den Messwochen erreicht werden:

- Zeitgerechter Einbau und zeitgerechtes Erstellen der Einsatzbereitschaft des Messsystems.
- Training der für einen Einsatz notwendigen Kenntnisse bezüglich:
 - Vorbereitung eines Einsatzes
 - Bedienung der Geräte im Einsatz
 - Auswertung und Interpretation der Resultate während und nach dem Flug
 - Training der Piloten für den Aeroradiometrie-Einsatz
- Training der Kommunikation zwischen Piloten und Messequipe während des Flugs (bspw. Instruktion der Piloten durch die Operatoren).
- Darstellung der Messresultate: Zusammenstellung und Interpretation der Resultate innert zwei Stunden nach dem Messflug.
- Verbesserung und Festigung der Kenntnisse für den Betrieb des durch die NAZ eingesetzten Aeroradiometrie-Systems.
- Überprüfung und Aktualisierung der Einsatzdokumentation.
- Austausch mit internationalen Teams und Fachpersonen

2.2 Messflüge in der Umgebung der Schweizer Kernanlagen

Die Schweizer Kernanlagen werden im Auftrag des ENSI im Zweijahresrhythmus aeroradiometrisch untersucht. Turnusgemäss wurde dieses Jahr die Umgebung der Anlagen KKM und KKG vermessen.

2.3 Internationale Messkampagne mit Teams aus Litauen, Tschechien, Deutschland und Frankreich vom 02. bis 06. Juni 2025

Ein Jahr nach der internationalen Übung in Tschechien und 8 Jahre nach der letzten internationalen Aeroradiometrie-Übung in der Schweiz konnte in der Woche von Montag 2. bis Freitag 6. Juni wieder eine Kampagne unter Teilnahme von Helikopter-Teams aus Frankreich, Tschechien, Deutschland, Litauen und der Schweiz stattfinden, mit zusätzlich je einem Drohnenteam aus den teilnehmenden Ländern. Auch eine US-amerikanische Delegation war anwesend als Unterstützung des litauischen Teams und als unabhängige Beobachter. Zudem war ein schwedisches Team mit bodengestützten Messmitteln vor Ort. Die übergeordneten Ziele der Messwoche waren:

- Training der für einen Einsatz notwendigen Kenntnisse
- Erfahrungsaustausch unter internationalen Partnern bezüglich Einsatzstrategien, operativer und technischer Fähigkeiten, Datenauswertung und eingesetzter Ausrüstung
- Training von internationalen Messeinsätzen, insbesondere
 - Koordination der Messflüge in einem gemeinsamen Gebiet
 - Gemeinsame Quellensuche
 - Datenaustausch und -abgleich unter den Teams
- Vergleich der unterschiedlichen Messsysteme und Vorgehensweisen der teilnehmenden Länderdelegationen

2.3.1 Umfang des internationalen Übungsprogramms

Mission 1: Referenzmessung

Ein Messflug über den Waffenplatz Thun sollte den Teilnehmenden die Möglichkeit bieten, ein topologisch einfaches Gebiet mit für die Schweiz typischer, unauffälliger Verteilung von Radionukliden zu vermessen. Nachdem in diesem Gebiet schon viele verschiedene Bodenmessungen durchgeführt wurden, ist dort die Bodenbeschaffenheit aus radiologischer Sicht gut bekannt.

Mission 2: Hintergrundmessung

Messflüge über grösseren Gewässern ermöglichen es, die nicht-terrestrischen Anteile der Radioaktivität zu bestimmen. Weil das Wasser den terrestrischen Anteil grösstenteils abschirmt, erlaubt diese Messung eine Quantifizierung der anderen Strahlungsbeiträge, also der kosmischen Strahlung und der Eigenstrahlung des Messsystems (Helikopter-Hintergrund). Damit können Korrekturfaktoren für die Bestimmung der Nettowerte ermittelt werden. Aufgrund der örtlichen Nähe zum Messgebiet von Mission 1 wurde für einen solchen Flug der Thunersee gewählt.

Mission 3: CM – Composite Mapping

Das Composite Mapping hat zum Ziel, ein grösseres Gebiet aufzuteilen und durch mehrere Teams in kürzerer Zeit zu vermessen, als dies ein einzelnes Team erledigen könnte. Die Herausforderungen liegen dabei in der Definition der Teilgebiete unter bestmöglicher Berücksichtigung von maximaler Flugdauer und Messgeschwindigkeit der teilnehmenden Teams und dem Zusammenführen der erhobenen Messdaten. Ein grosses Gebiet im Schweizer Mittelland war für ein solches Composite Mapping vorgesehen, inklusive für die Übung ausgelegter und bewachter radioaktiver Quellen. Aufgrund sehr schlechter Wetterbedingungen musste das Messgebiet am Flugtag deutlich verkleinert werden.

Mission 4: Quellensuche

Auf einem Militär-Übungsgelände in Frauenfeld TG wurde eine Quellensuche durchgeführt. Am Vormittag des Quellensuche-Messtages konnten die Helikopterteams ihre Flüge durchführen, am Nachmittag kamen die Drohnenteams zum Einsatz.

Mission 5: Gemischter Messflug

Aus den zweijährlich stattfindenden Messungen in der Umgebung der Kernkraftwerke Leibstadt und Beznau sowie des PSI und des Zwiilag ist ein Gebiet nordwestlich des PSI mit einer überdurchschnittlichen natürlichen Thorium ²³²Th-Konzentration bekannt. In der Umgebung des PSI wurde ein Teilgebiet A definiert mit dem Ziel, dass die Messteams einerseits eine dieser natürlichen ²³²Th-Anomalien und andererseits bedingt durch den Betrieb

der PSI-Anlagen weitere Effekte, wie beispielsweise die Annihilationsstrahlung, vermessen konnten. Im Teilgebiet B wurde auf dem Gelände des Linearbeschleunigers SwissFEL eine Selenium ⁷⁵Se-Quelle deponiert. Die Helikopter mussten eine vorgegebene Linie über dem SwissFEL fliegen und konnten, je nach Messergebnis, flexibel reagieren und die Messung ad-hoc verdichten.

Eine detaillierte Analyse der Resultate wird im Nachgang der Messkampagnen durch das Paul Scherrer Institut PSI erfolgen. Diese wird eine wissenschaftliche Auswertung und Vergleiche der Resultate umfassen. Ausserdem sollen Erkenntnisse über die Kompatibilität der Messsysteme und -daten gewonnen werden.

2.4 Information der Bevölkerung, der Medien und der Behörden

2.4.1 Messflüge allgemein

Aufgrund der Lärmemissionen des Messhelikopters wurde Wert auf eine umfassende Vorabinformation der Bevölkerung gelegt. Dazu wurden die Behörden aller betroffenen Schweizer Gemeinden sowie die Kantonspolizeien der betroffenen Kantone schriftlich über die bevorstehenden Flüge orientiert und gebeten, bei allfälligen Fragen aus der Bevölkerung auf die Nationale Alarmzentrale zu verweisen.

In einer Medienmitteilung wurden am 20. Mai die Messflüge angekündigt. Partner und Behörden wurden vorab aktiv informiert.

Während der Messwoche wurden zudem Informationsmeldungen über die [Alertswiss](#)-Kanäle des BABS abgesetzt und via Social Media begleitet. Der Flugplan wurde zudem auf der NAZ-Website aufgeschaltet.

Diverse Anfragen von Behörden, Medien und aus der Bevölkerung wurden vor und während der Messwoche beantwortet.

Am 5. Juni wurde eine Medienmitteilung mit einer ersten Bilanz der Woche publiziert.

2.4.2 Internationale Übung

Am 2. Juni, zum Start der internationalen Übung, wurden Medienschaffende eingeladen. Bei diesem Anlass informierten die Beteiligten über die Zusammenarbeit der fünf internationalen Messteams in der Luft sowie über die Radioaktivitätsmessflüge. Anschliessend konnten die Medienschaffenden die Messteams auf dem Flugfeld besuchen und interviewen. Es wurde bewusst eine offensive Informationsstrategie gewählt, weil in der Schweiz wenig grosse unbewohnte Übungsgebiete vorhanden sind und daher Lärmemissionen und eine entsprechende Wahrnehmung durch die Bevölkerung nicht vermieden werden konnten.

2.5 Wissenschaftlicher Bericht

Das PSI wird voraussichtlich bis Ende Jahr einen detaillierten wissenschaftlichen Bericht publizieren.

2.6 Beteiligte Partnerorganisationen

Folgende Organisationen waren in die Vorbereitung und Durchführung des Standardmessprogramms um die Schweizer Kernanlagen KKM und KKG und der internationalen Übung involviert:

- Nationale Alarmzentrale (NAZ) mit dem Stab Bundesrat NAZ

- Paul Scherrer Institut (PSI)
- Kompetenzzentrum ABC-KAMIR
- Labor Spiez (LS)
- Schweizer Luftwaffe (LW)
- Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI)
- Tschechisches Team: Nationales Strahlenschutzinstitut – SÚRO
- Französisches Team: Autorité sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR)
- Deutsches Team: Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) und Bundespolizei-Flugdienst (BPOLFLD)
- Litauisches Team: Radiation Protection Centre (RSC) und State border guard police (SBGS), unterstützt durch Vertreter des Nevada National Security Site NNSS (USA)
- Schwedisches Team: Swedish Radiation Safety Authority
- Aufsichtsbehörden: Bundesamt für Gesundheit (BAG) und SUVA
- Armee: Waffenplätze Frauenfeld, Liestal, Brugg, Dagmersellen, Thun und Armeelogistikcenter Othmarsingen
- Schweizerischer Verein für Schweisstechnik (SVS)
- SAR-Transport
- Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit (BAZG)
- Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL)
- Kantonspolizeien und ABC-Koordinatoren von den Kantonen AG, BE, BL, LU, TG, SO

Die Nationale Alarmzentrale und das Aeroradiometrie-Team danken allen Beteiligten für die gute, unkomplizierte Zusammenarbeit und den kollegialen Austausch.



3 Standardmessprogramme um die Kernkraftwerke Mühleberg und Gösgen

Turnusgemäss wurden dieses Jahr die Kernkraftwerke Mühleberg (KKM) und Gösgen (KKG) aeroradiometrisch vermessen.

Das KKM wurde im Dezember 2019 abgeschaltet und der Leistungsbetrieb eingestellt. Der Rückbau des KKM ist noch nicht abgeschlossen, das Areal und die Umgebung werden weiterhin überwacht und die Notfallschutzzonen bestehen unverändert, entsprechend wurde auch das Standardmessprogramm wieder durchgeführt.

Das KKG war während der ARM-Woche 2025 in Revision und daher heruntergefahren.

3.1 Standardmessprogramm KKW Mühleberg

3.1.1 KKM: Angaben zum Messflug

Datum / Zeit:	27.05.2025, 14:00 – 16:10 h	Flugdauer:	2 h 10 min
Fluglinien:	28 Linien, Abstand 250 m	Fluggebiet:	ca. 75 km ²
Flughöhe über Grund:	ca. 90 m		

3.1.2 KKM: Ortsdosisleistung

Ausserhalb des Betriebsareals des Kernkraftwerks Mühleberg:

Die Karte der Ortsdosisleistung (ODL) in Abbildung 1 zeigt keine Auffälligkeiten ausserhalb des Betriebsareals des KKM. Die beobachteten Variationen im Messgebiet sind auf Einflüsse der Geologie und Topographie, der Wasserläufe sowie auf die Vegetation zurückzuführen.

Deutlich sichtbar ist der Wohlensee mit tiefen Werten aufgrund der Abschirmung der terrestrischen Strahlung durch das Wasser.

Der Vergleich mit den Resultaten aus früheren Messungen in der Umgebung des KKM zeigte keine signifikanten Unterschiede.

Innerhalb der Betriebsareale:

Das KKM ist auf der Karte klar zu erkennen. Die erhöhte ODL über dem Betriebsareal ist auf Material zurückzuführen, welches auf dem Betriebsareal sicher zwischengestapelt wird. Dieses Material enthält das Aktivierungsprodukt Cobalt-60 (⁶⁰Co), welches von den Messgeräten der Aeroradiometrie identifiziert wurde. Die Ortsdosis am Perimeter des Betriebsareals wird laufend überwacht. Die entsprechenden gesetzlichen Grenzwerte werden eingehalten.

Die in der Karte rot markierte Fläche erscheint grösser als das Kraftwerksareal. Dies liegt an der begrenzten örtlichen Auflösung der Messdaten und dem Umstand, dass der Detektor nicht nur auf senkrecht eintreffende Strahlung empfindlich ist, sondern Strahlung aus einem kegelförmigen Volumen zu den Messwerten beiträgt (siehe Erklärung auf Seite 13). Tatsächlich wurden ausschliesslich auf derjenigen Fluglinie erhöhte Werte gemessen, die direkt über das Werksareal führte. Dies ist in der Karte mit den effektiven ODL-Messpunkten in Abbildung 2 ersichtlich.

Da sich bereits ein Teil des Kraftwerksareals in diesem kegelförmigen Volumen befand, als sich der Helikopter 100 m westlich des Areal befand, sind schon dort Messpunkte mit scheinbar erhöhten Werten zu erkennen, obwohl das tatsächlich vorhandene ⁶⁰Co-kontaminierte Material innerhalb der Arealgrenzen gelagert war.

Standardmessprogramm KKM

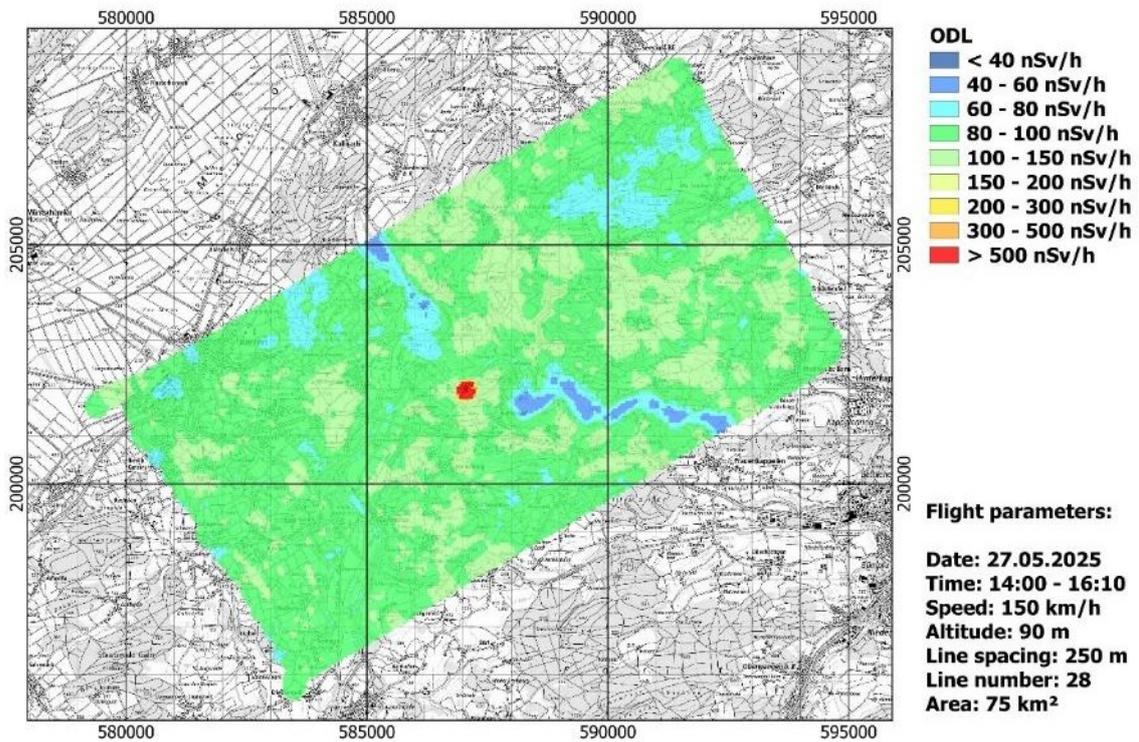


Abbildung 1: Karte der ODL in der Umgebung des im Rückbau befindlichen KKM.

Standardmessprogramm KKM

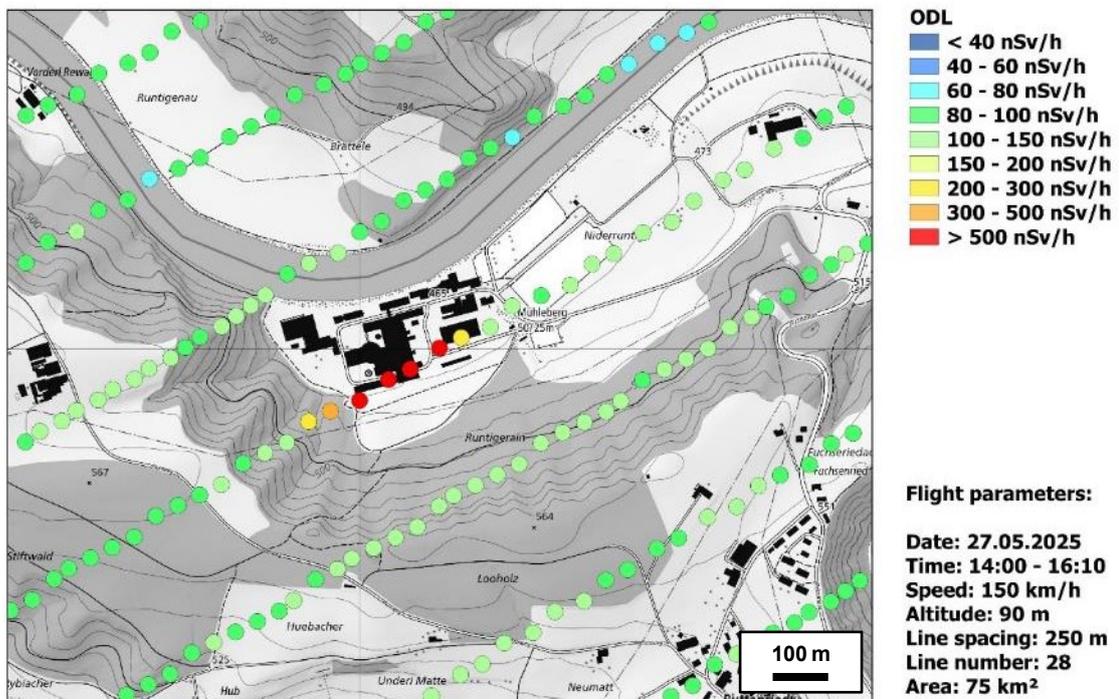


Abbildung 2: Karte mit den ODL-Messpunkten entlang der Fluglinie über dem KKM und der benachbarten Fluglinien.

3.1.3 KKM: MMGC-Verhältnis

In der Karte in Abbildung 3 wird das Verhältnis vom niederenergetischen zum hochenergetischen Anteil des Strahlenspektrums dargestellt. Weil die künstlich erzeugten Radioisotope meist γ -Strahlung niedriger Energie aussenden, entspricht dieses Verhältnis ungefähr demjenigen von künstlicher zu natürlicher Strahlung und wird als «Man made gross count (MMGC)» bezeichnet. Auf dem Betriebsareal des KKM wurde ein erhöhtes MMGC-Verhältnis festgestellt, das auf das erwähnte, ^{60}Co enthaltende Material zurückzuführen ist.

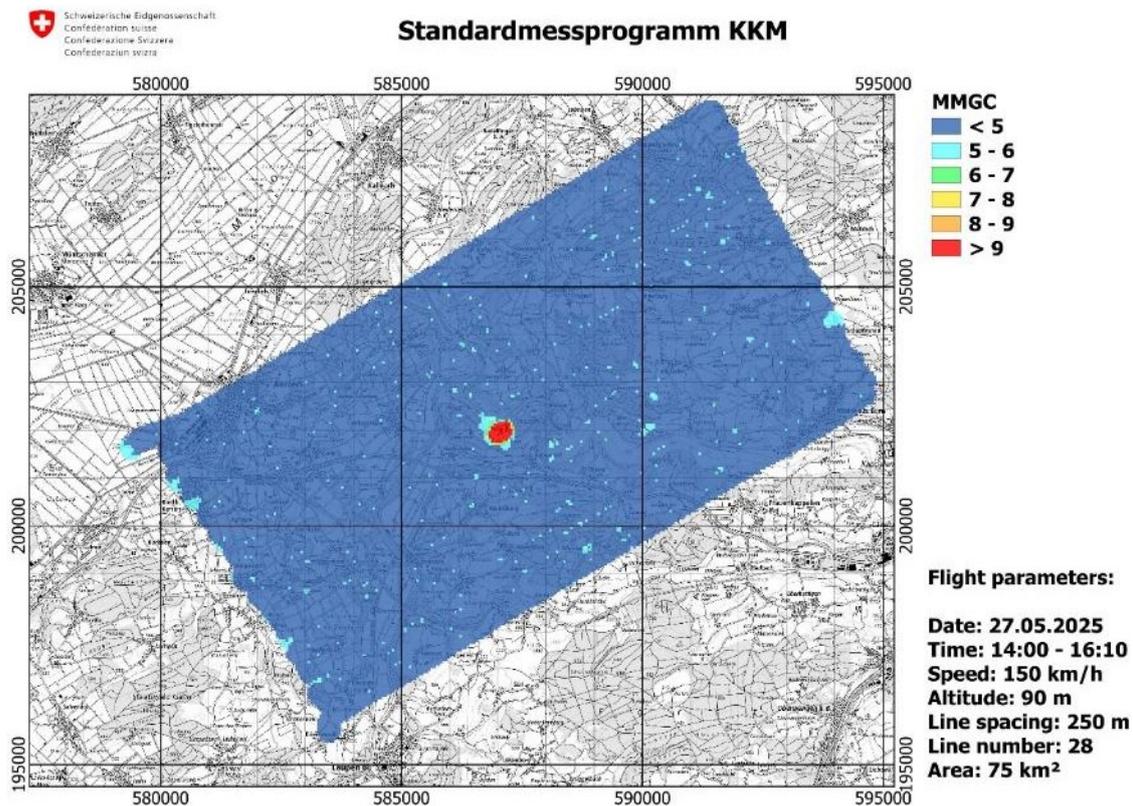


Abbildung 3: Karte des MMGC-Verhältnisses in der Umgebung des im Rückbau befindlichen KKM.

Ausserhalb des Betriebsgeländes des KKM wurden keine erhöhten Messwerte festgestellt. Dass der rot markierte Bereich über das Betriebsgelände hinausgeht, liegt an der Interpolation der Messwerte bei der Darstellung auf der Karte.

3.1.4 KKM: Cobalt ^{60}Co

Das Gammaspektrum in Abbildung 4 wurde über dem KKM gemessen. Die für Cobalt ^{60}Co typischen Energiepeaks bei 1173 keV und 1333 keV sind darin klar zu erkennen und bestätigen, dass die erhöhte ODL und das höhere MMGC-Verhältnis durch Cobalt bedingt sind.

Andere nuklidspezifische Karten enthalten keine Auffälligkeiten und werden daher im aktuellen Kurzbericht nicht dargestellt.

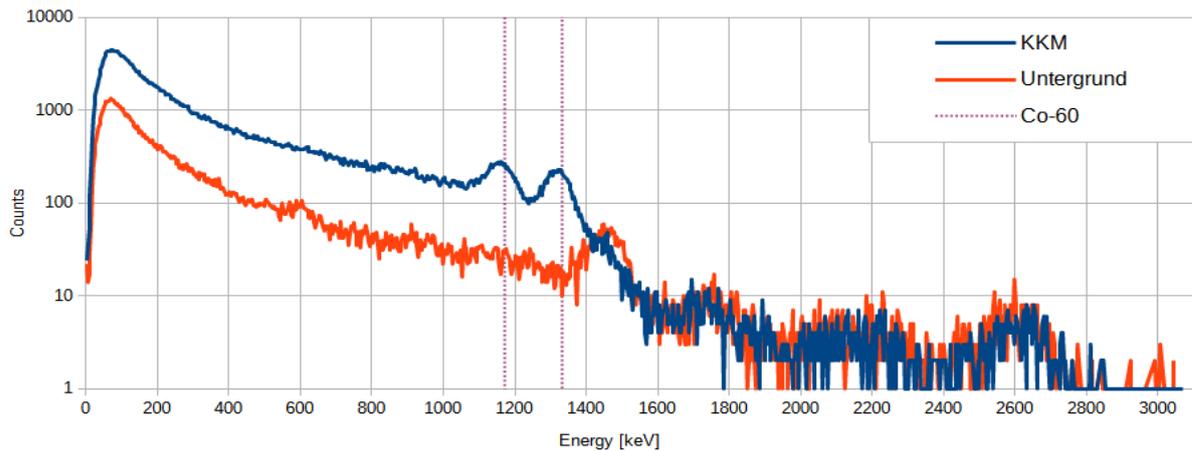


Abbildung 4: Gammaspektrum, gemittelt aus einigen Messpunkten mit erhöhter ODL beim KKM. Die für Cobalt ^{60}Co typischen Energiepeaks bei 1173 und bei 1333 keV sind klar zu erkennen.

3.2 Standardmessprogramm KKW Gösgen

3.2.1 KKG: Angaben zum Messflug

Das Standardmessprogramm um das KKG wurde im 2023 erstmals leicht angepasst um eine bessere Abdeckung der bewohnten Gebiete zu ermöglichen. In der aktuellen Messkampagne wurde das Gebiet nun zum zweiten Mal im gleichen Umfang vermessen.

Datum / Zeit:	28.05.2025, 08:13 – 10:26 h	Flugdauer:	2 h 13 min
Fluglinien:	28 Linien, Abstand 250 m	Fluggebiet:	ca. 93 km ²
Flughöhe über Grund:	ca. 90 m		

3.2.2 KKG: ODL

Die ODL-Karte in Abbildung 5 zeigt keine Auffälligkeiten ausserhalb der Betriebsareale des KKG. Die beobachteten Variationen im Messgebiet sind auf Einflüsse der Geologie und Topographie, der Wasserläufe sowie auf die Vegetation zurückzuführen. Aufgrund der Abschirmung der terrestrischen Strahlung durch das Wasser fallen die Messwerte direkt über der Aare niedriger aus.

Im Vergleich mit den Resultaten aus den früheren Messungen in der Umgebung des Kernkraftwerkes Gösgen sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

3.2.1 KKG: Kalium ^{40}K

Wie schon 2023 beobachtet, zeigt die Karte der Kalium ^{40}K -Aktivität in Abbildung 6 besonders tiefe Werte im Westen des Messgebietes, ungefähr zwischen Bad Lostorf und dem Ort Hauenstein in mehrheitlich nicht besiedeltem Gebiet. Beim direkten Vergleich mit der ODL-Karte in Abbildung 5 ist diese Korrelation gut zu erkennen.

Andere nuklidspezifische Karten enthalten keine Auffälligkeiten und werden daher im aktuellen Kurzbericht nicht dargestellt.

Standardmessprogramm KKG

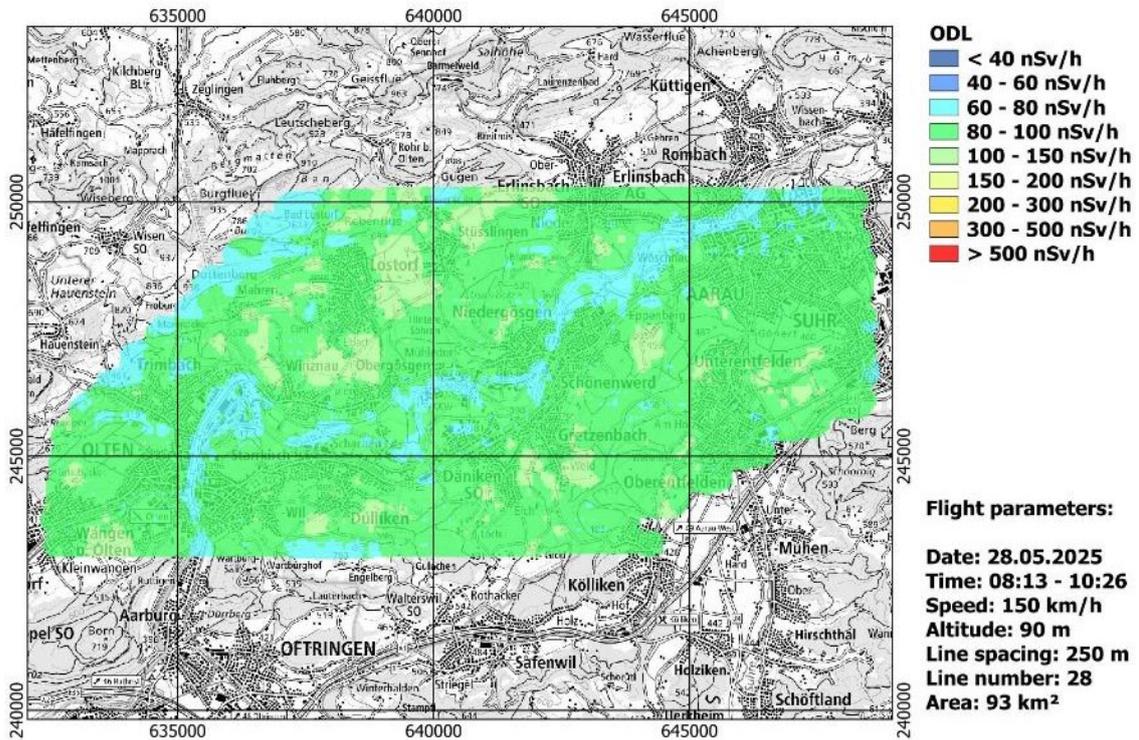


Abbildung 5: Karte der ODL in der Umgebung des KKG.

Standardmessprogramm KKG

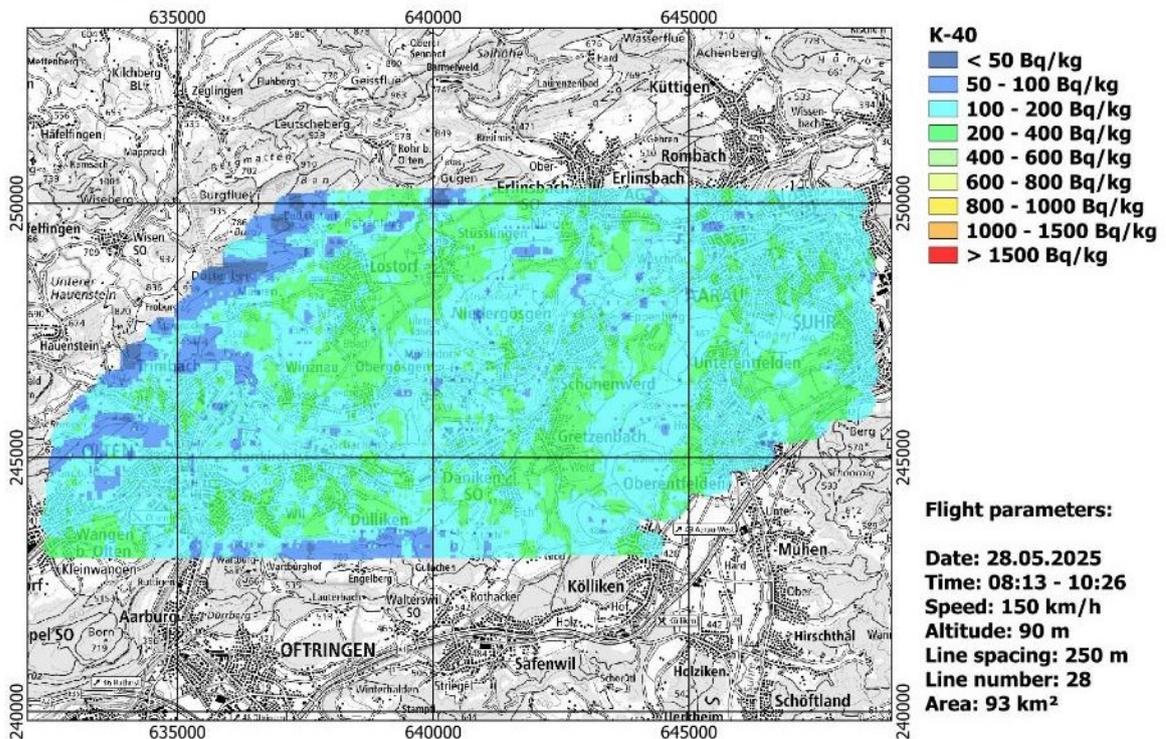


Abbildung 6: Kalium ⁴⁰K-Karte der Umgebung des KKG.

Erklärung: Detektor-Empfindlichkeit

Das Messsystem ist empfindlich auf Gammastrahlung, die von unten her den Detektor erreicht. Es spricht aber nicht nur auf genau senkrecht eintreffende Strahlung an. Vielmehr trägt Strahlung aus einem kegelförmigen Volumen unterhalb des Helikopters zu den Messwerten bei.

Wird eine horizontale Fläche mit einem Abstand von 90 m überflogen und befinden sich keine Strahlungsquellen zwischen Boden und Helikopter, repräsentiert ein Messpunkt somit Gammastrahlung aus einem kreisförmigen Bereich mit ungefähr 250 m Durchmesser.

Auch wenn entlang der Fluglinie mehrere Messpunkte in kürzerem Abstand als 250 m vorhanden sind, bedeuten erhöhte Messwerte nicht, dass sich die Quelle der Strahlung senkrecht unter dem Helikopter befindet.



4 Internationale Messkampagne

In diesem Kapitel werden ausschliesslich die Ergebnisse des Schweizer Teams dargestellt. Die Ergebnisse aller Teams werden im ausführlichen wissenschaftlichen Bericht des Paul Scherrer Instituts analysiert und veröffentlicht.

4.1 Mission 1: Referenzmessung über dem Waffenplatz Thun

4.1.1 Mission 1 – Angaben zum Messflug (Flug Team CHE1)

Datum / Zeit CHE1: 05.06.2025, 08:32 – 08:45 h Flugdauer: 13 min
Fluglinien CHE1: 7+2 Linien, Abstand 125 m Fluggebiet: ca. 1.6 km²
Flughöhe über Grund: ca. 90 m

Restriktion der Übungsleitung: Flugzeit im Messgebiet maximal 15 min

Vorgaben der Übungsleitung: Fluglinien (Anzahl und Abstand) und Flughöhe sind definiert

4.1.2 Mission 1 – Referenzmessung: ODL und MMGC

Im Rahmen der Mission 1 «Referenzmessung» wurden zuerst 7 Linien auf dem Waffenplatz Thun gemessen und dann mit 2 zusätzlichen Linien die Messdatendichte in der Mitte des Gebietes erhöht. Abbildung 7 zeigt die resultierende ODL-Karte, als graue Punkte sind die Messpunkte eingezeichnet, die auch die Fluglinien erkennen lassen. Die gemessenen ODL-Werte streuen nur schwach und liegen allesamt nahe bei 80 nSv/h. Auch die MMGC-Karte in Abbildung 8 zeigt nur einzelne, gleichmässig verteilte Messpunkte mit MMGC ≥ 5 . Die Messkarten zu den Radionukliden ⁴⁰K, ²³²Th und ²³⁸U enthalten ebenfalls keine Auffälligkeiten und sind daher nicht dargestellt.

Mission 1: Reference Measurement

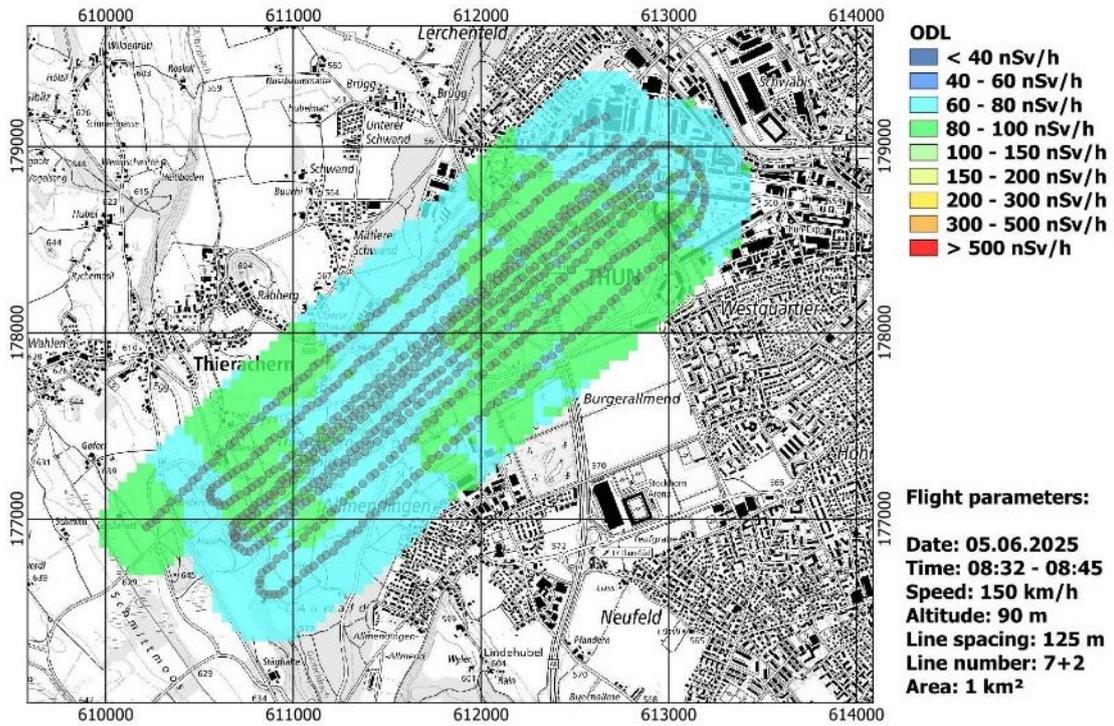


Abbildung 7: Mission 1: ODL-Karte der Umgebung des Referenzgebietes Waffenplatz Thun. Als graue Punkte eingezeichnet sind die Messpunkte, die auch die Fluglinien erkennen lassen.

Mission 1: Reference Measurement

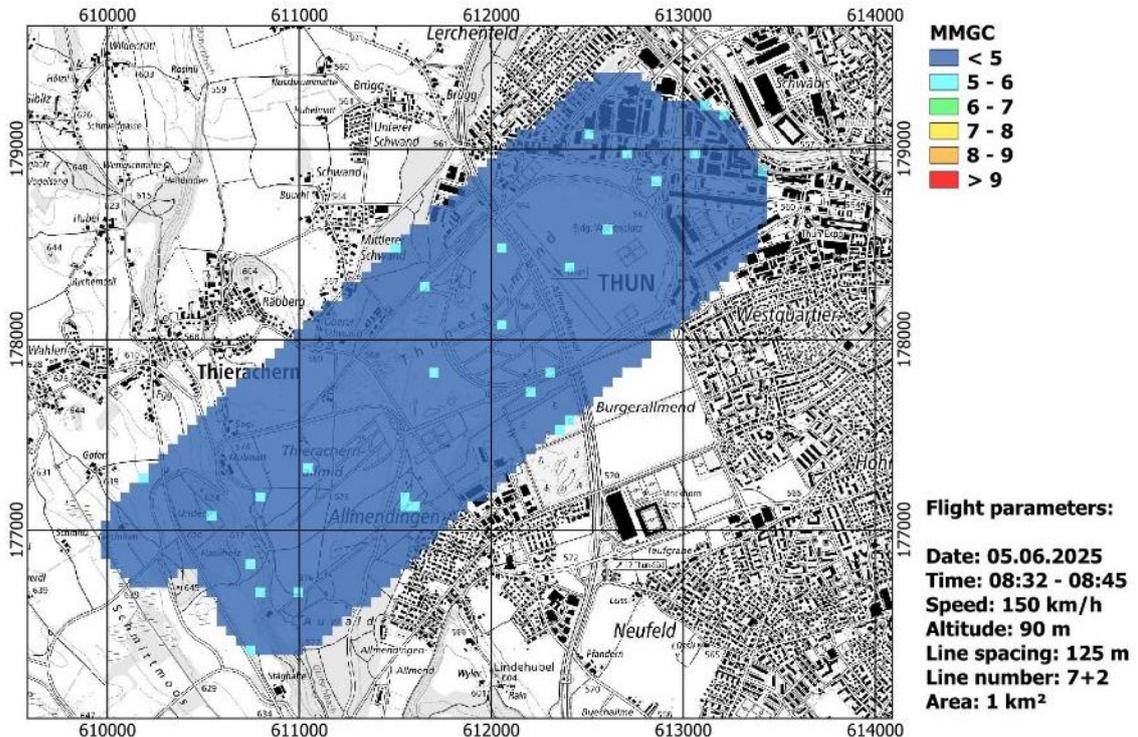


Abbildung 8: Mission 1: MMGC-Karte der Umgebung des Referenzgebietes Waffenplatz Thun.

4.2 Mission 2: Hintergrundmessung über dem Thunersee

4.2.1 Mission 2 – Angaben zum Messflug (Flug Team CHE1)

Datum / Zeit CHE1: 05.06.2025, 08:46 – 09:09 h Flugdauer: 25 min
Fluglinien CHE1: 7 Linien, auf verschiedenen Höhen
Flughöhe über Grund: ca. 90 – 2400 m
Vorgaben der Übungsleitung: Linie ist definiert, Flughöhen mit zwei verschiedenen Prioritäten sind angegeben, maximale Messzeit von 30 min

4.2.1 Mission 2 – Hintergrundmessung Thunersee

Über dem Thunersee wurde eine Linie auf verschiedenen Höhen (300 ft / 90 m, 600 ft / 180 m, 1000 ft / 300 m, 2000 ft / 600 m, 4000 ft / 1200 m, 6000 ft / 1800 m, 7700 ft / 2350 m) geflogen. Die höchste Linie war für 8000 ft / 2440m vorgesehen. Aufgrund der Wolkendecke konnte nicht ganz in dieser Höhe gemessen werden.

Da das Wasser den terrestrischen Anteil der Hintergrundstrahlung abschirmt, kann so die Summe der übrigen Strahlungsbeiträge bestimmt werden, die sich im Wesentlichen durch den kosmischen Anteil und die Eigenstrahlung des Messsystems (Helikopter-Hintergrund) zusammensetzt. Die Spektren in Abbildung 10 zeigen zum einen leicht erhöhte Zählraten über das gesamte Energiespektrum hinweg mit zunehmender Flughöhe, was auf den steigenden Anteil der kosmischen Strahlung zurückzuführen ist. Zum anderen tritt der Annihilationspeak bei 511 keV deutlicher hervor. Beide Effekte sind eine Folge der Wechselwirkungen der hochenergetischen kosmischen Teilchen mit der Materie der Atmosphäre, des Messsystems und des Helikopters.

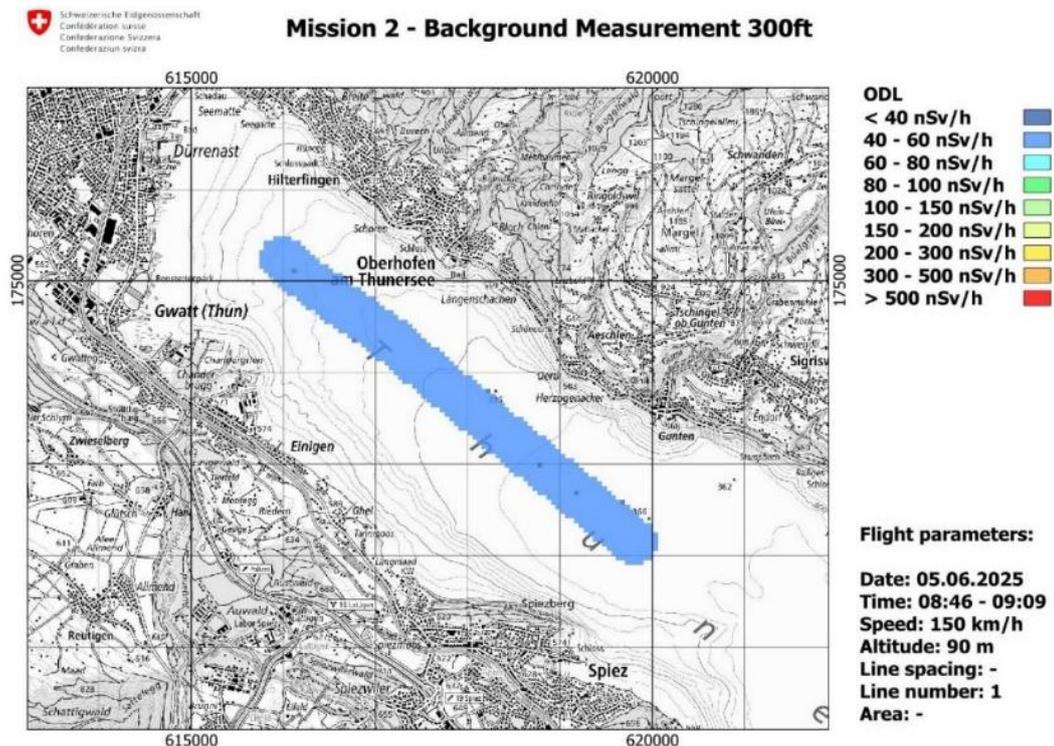


Abbildung 9: Mission 2: ODL-Karte aus der Hintergrundmessung über dem Thunersee. Erwartungsgemäss ist eine gleichmässige ODL ohne terrestrischen Beitrag zu erkennen.

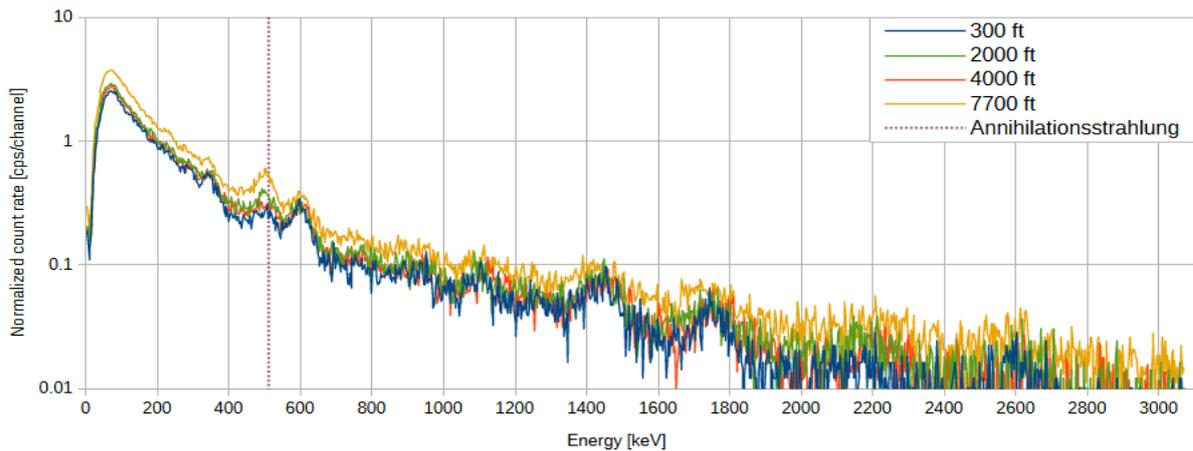


Abbildung 10: Mission 2: Summenspektren aus den Hintergrundmessungen 300 ft, 2000 ft, 4000 ft, und 7700 ft über dem Thunersee.

4.3 Mission 3: Composite Mapping

Das Composite Mapping wurde am Montag mit allen Teams unter Leitung des Schweizer Teams abgesprochen und definiert. Für die Durchführung der Messflüge war der ganze Dienstag vorgesehen und alle Teams sollten gleichzeitig ihren Teil eines Gesamtgebietes von ca. 2100 km² vermessen. Leider waren die Wetterverhältnisse am Dienstagvormittag im Messgebiet so schlecht, dass aus Gründen der Flugsicherheit nur am Nachmittag für wenige Stunden geflogen werden konnte und daher der Umfang der Mission stark reduziert werden musste. Am Dienstagvormittag wurde daher eine neue Flugplanung erstellt. Aufgrund der bekannten, niedrigen Quellaktivität wurde für alle Teams eine Flughöhe von 90 m und ein Linienabstand von 300 m festgelegt. Die Fluggeschwindigkeiten variierten leicht in Abhängigkeit von den gewohnten Standardparametern der Teams und lagen zwischen 100 und 150 km/h.

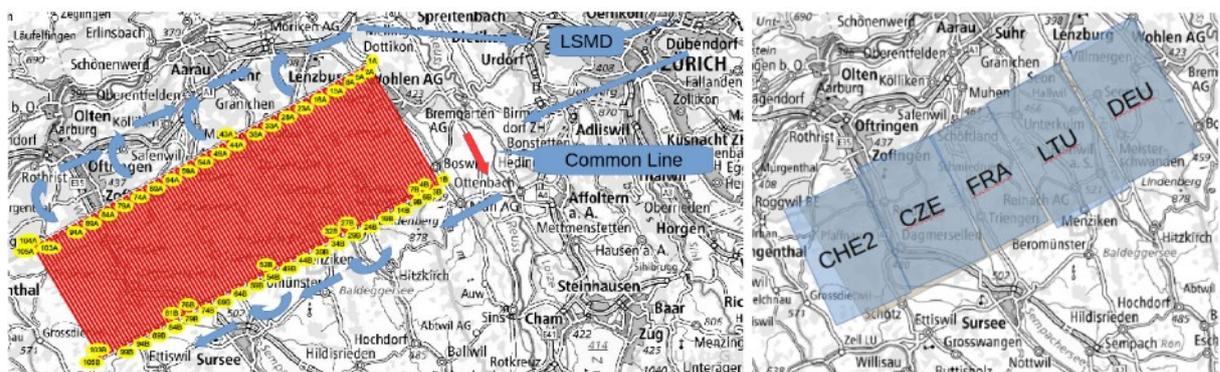


Abbildung 11: Planung des Composite-Mappings, das am Dienstagnachmittag durchgeführt wurde. Es wurde eine gemeinsame Linie (Common Line, rote Linie) festgelegt, die von allen Helikoptern abgeflogen werden musste, um die Vergleichbarkeit der Messwerte und somit auch der Kalibrierungen zu erleichtern. Zusätzlich wurden ein Eintritts- (im Süden) und ein Austrittspunkt (im Norden) definiert, um den Flugverkehr bestmöglich zu koordinieren.

Zwei für die Übung ausgelegte Quellen lagen ausserhalb des reduzierten Messgebiets. Um dennoch den bestmöglichen Erfahrungsgewinn zu erzielen, wurden die zwei Standorte als POI

(Point of Interest) dem Team CHE1 zugeteilt, sodass diese gezielt überflogen und versucht werden konnte, die Quellen zu identifizieren.

Am Nachmittag verhinderte ein technischer Defekt am deutschen Helikopter dessen Einsatz, weshalb das dem deutschen Team (DEU) zugeteilte Teilgebiet dem Schweizer Messteam CHE1 zugewiesen wurde, während dieses die zwei POI-Standorte vermast. Das deutsche Messteam konnte nach der Behebung der technischen Probleme den Messflug am Folgetag wiederholen. Somit sind für das östliche Teilgebiet Messresultate von CHE1 und DEU vorhanden, die auch untereinander verglichen werden können.

4.3.1 Mission 3: Angaben zum Composite Mapping und der Identifikationsübung von Quellen mit bekanntem Standort

Charakterisierung der Quellen mit bekanntem Standort

Datum / Zeit CHE1:	03.06.2025, 13:45 – 13:54 h	Flugdauer:	9 min
	03.06.2025, 14:02 – 14:12 h	Flugdauer:	10 min
Überflogene Standorte:	Orismühle, ca. 3 km südwestlich von Liestal Schiessplatz, ca. 2 km südöstlich von Zeihen		
Flughöhe über Grund:	ca. 90 m		

Messflüge im Rahmen des Composite Mapping mit reduziertem Gebiet

Datum / Zeit CHE1:	03.06.2025, 14:18 – 15:28 h	Flugdauer:	1 h 10 min
Datum / Zeit CHE2:	03.06.2025, 13:48 – 15:42 h	Flugdauer:	1 h 54 min
Fluglinien CHE1:	17 Linien, Abstand 300 m	Fluggebiet:	ca. 70 km ²
Fluglinien CHE2:	25 Linien, Abstand 300 m	Fluggebiet:	ca. 90 km ²
	im Bereich der Gemeinden Brittnau / Dagmersellen / Nebikon		
Flughöhe über Grund:	ca. 90 m		

Restriktionen der Übungsleitung: Jedem Team stehen zwei volle Tanks zur Verfügung (morgens und nachmittags), getankt wird nur während der Mittagspause in LSMD, Abflug erst ab 09:00 Uhr erlaubt

Bemerkung der Übungsleitung: geringste Aktivität beträgt ca. 350 MBq ¹³⁷Cs.

4.3.2 Mission 3 – Quellenidentifikation (Team CHE1): ODL und MMGC

Für die Messung wurden keine Fluglinien geplant, wichtige Anweisungen für die Piloten wurden ad hoc während des Fluges durchgegeben. Ca. 3 km südwestlich von Liestal waren 6 kleine ¹³⁷Cs-Quelle mit einer Gesamtaktivität von 400 MBq auf einer Fläche von ca. 3000 m² verteilt. In den ODL- und MMGC-Karten in Abbildung 12 sind die Quellen kaum zu erkennen.

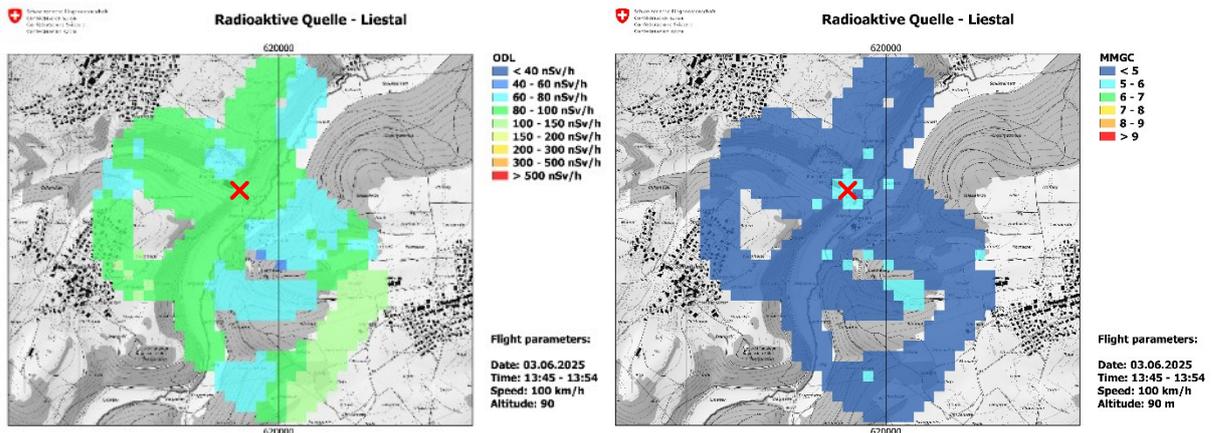


Abbildung 12: Mission 3 – Quellenidentifikation südwestlich von Liestal: In der ODL-Karte (links) sind die deponierten ^{137}Cs -Quellen nicht zu erkennen. Das MMGC-Verhältnis (rechts) erscheint in der Karte am Quellenstandort (rote Markierung) leicht erhöht, jedoch ist die Erhöhung kaum vom Rauschen zu unterscheiden.

Während des Fluges konnten die Cs-Quellen erfolgreich lokalisiert und identifiziert werden.

Abbildung 13 zeigt einen Screenshot der Messsoftware: Die Cs-Quellen erscheinen deutlich, obwohl eher als einzelne Quelle. Die weißen Linien stellen die Flugroute dar, während die Warnsymbole mit dem Radioaktivitätszeichen im roten Kreis die detektierten Quellpositionen markieren. Aufgrund der zeitlichen Messauflösung von einer Sekunde wurden mehrere Detektionen registriert. Die im Post-Processing abgeschätzte ^{137}Cs -Aktivität beträgt 464 MBq und liegt damit ausreichend nahe am tatsächlichen Wert von 400 MBq. Diese Aktivität befindet sich leicht unter der Nachweisgrenze des eingesetzten Messsystems.



Abbildung 13: Mission 3 – Quellenidentifikation südwestlich von Liestal: Screenshot der Messsoftware, nach mehrmaligem Überflug des Quellenstandortes.

Der zweite POI-Standort befand sich ca. 2 km südöstlich von Zeihen. Die Quellen umfassten Aktivitäten von 700 MBq ^{137}Cs , 400 MBq ^{133}Ba und 160 MBq ^{60}Co . Abbildung 14 zeigt die ODL- und MMGC-Karten aus dieser Messung. Die ODL ist am Quellenstandort erhöht, jedoch nicht auffällig stark. Das MMGC-Verhältnis ist hingegen deutlich erhöht.

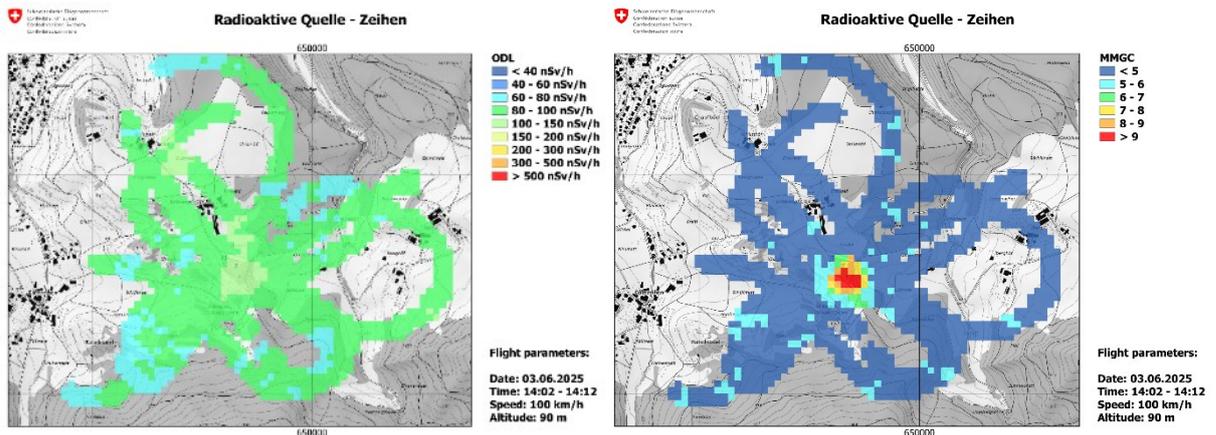


Abbildung 14: Mission 3 – Quellenidentifikation südöstlich von Zeihen: Die ODL-Karte (links) zeigt am Quellenstandort leicht erhöhte Werte, das MMGC-Verhältnis (rechts) ist am Standort der ausgelegten Quellen deutlich erhöht.

Auch während dieses Fluges konnten die Quellen erfolgreich lokalisiert und identifiziert werden. Abbildung 15 zeigt einen Screenshot der Messsoftware: Die im Post-Processing abgeschätzte Aktivitäten betragen 1247 MBq für ^{137}Cs , 946 MBq ^{133}Ba und 153 MBq für ^{60}Co . Die Überschätzung (unter Faktor 2) ist hauptsächlich auf eine Unterschätzung der effektiven Flughöhe infolge des Geländes (Hügel), erhöhte Quellpositionen (3 m über dem Boden) sowie Baumbestand zurückzuführen.

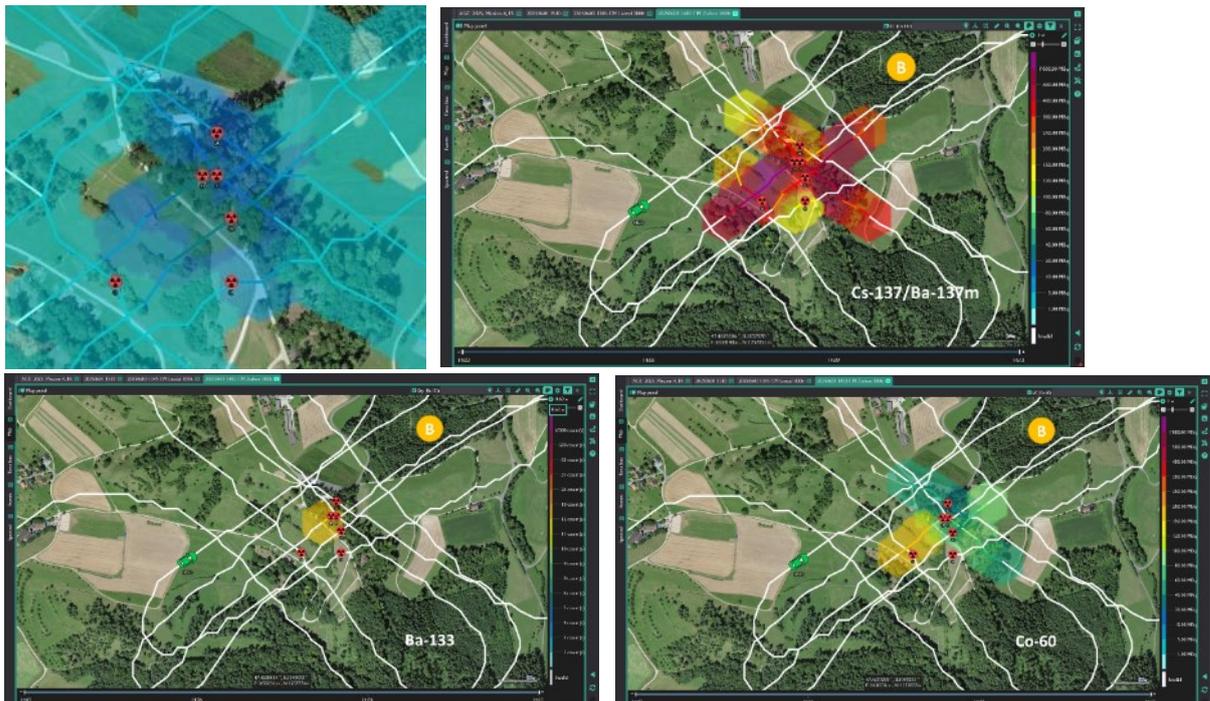


Abbildung 15: Mission 3 – Quellenidentifikation südwestlich von Zeihen: Screenshots der Messsoftware (oben links: Identifikationen, ^{137}Cs - (oben rechts), ^{133}Ba - (unten links) und ^{60}Co (unten rechts) -Aktivitätskarten.

4.3.3 Mission 3 – Composite Mapping (Flug Team CHE2): ODL und MMGC

Die ODL- und MMGC-Karten des vom Team CHE2 überflogenen südwestlichen Teils des Composite-Mapping-Gebietes sind in Abbildung 16 dargestellt. Bereiche mit auffällig erhöhter

ODL wurden nicht erkannt. In der MMGC-Karte (rechtes Bild) lässt sich ein Punkt mit leicht erhöhtem MMGC-Verhältnis ungefähr in der Mitte zwischen Dagmersellen und Nebikon erkennen. Der Punkt ist in beiden Karten mit einem roten Pfeil markiert. An diesem Standort war für die Übung tatsächlich eine ^{137}Cs -Quelle platziert worden, allerdings ohne die Abschirmung zu entfernen. Entsprechend war die Quelle durch das Messteam sehr schwer zu erkennen.

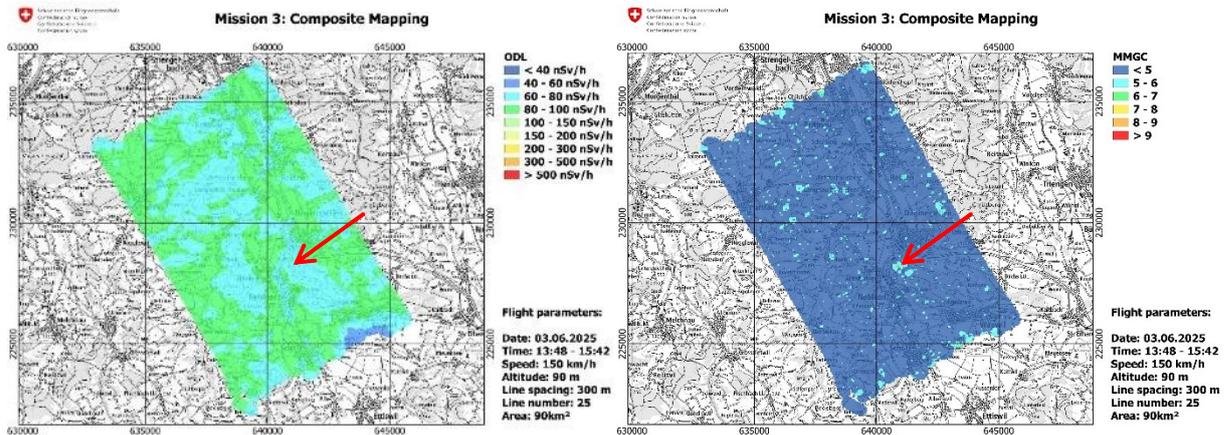


Abbildung 16: Mission 3 – Composite Mapping: ODL- und MMGC-Karten des durch das Team CHE2 überflogenen südwestlichen Teilgebiets des Composite Mapping.

In Abbildung 17 ist eine erste gesamte ODL-Karte als Resultat des Composite Mappings dargestellt. Das nordöstliche Teilgebiet wurde einmal durch das Team CHE1 (oberhalb violetter Trennlinie) und am Folgetag durch das deutsche Team (unterhalb der Trennlinie) vermessen.

In dieser ersten Auswertung sind Unterschiede zwischen den Teilgebieten (bzw. zwischen den Messteams) erkennbar. Diese sind jedoch in erster Linie auf die empfindliche Farbskala im unteren Dosisleistungsbereich ($<0,1 \mu\text{Sv/h}$) zurückzuführen. Aufgrund der feinen Abstufung werden bereits geringe Abweichungen deutlich hervorgehoben und sichtbar gemacht. Zusätzlich wurden unterschiedlicher Messsysteme mit verschiedenen Kalibrierungen eingesetzt. Auch die eingesetzten Helikopter sowie die Positionierung der Detektoren (innerhalb oder ausserhalb der Luftfahrzeuge) variieren. In der detaillierten Analyse, die vom Paul Scherrer Institut in den nächsten Monaten durchgeführt wird, werden weitere Parameter überprüft. Auf Basis der Missionen 1 (Referenzmessung) und 2 (Hintergrundmessung) sind zudem quantitative Korrekturen zu erwarten, welche voraussichtlich zu einer homogeneren Darstellung führen werden.

Die zusammengesetzte Messung lässt aber den eindeutigen Schluss zu, dass keine Strahlungsquellen zu einer Dosisleistung führen, die über den für das Schweizer Mittelland erwarteten Werten in der Grössenordnung von $0,1 \mu\text{Sv/h}$ liegt.

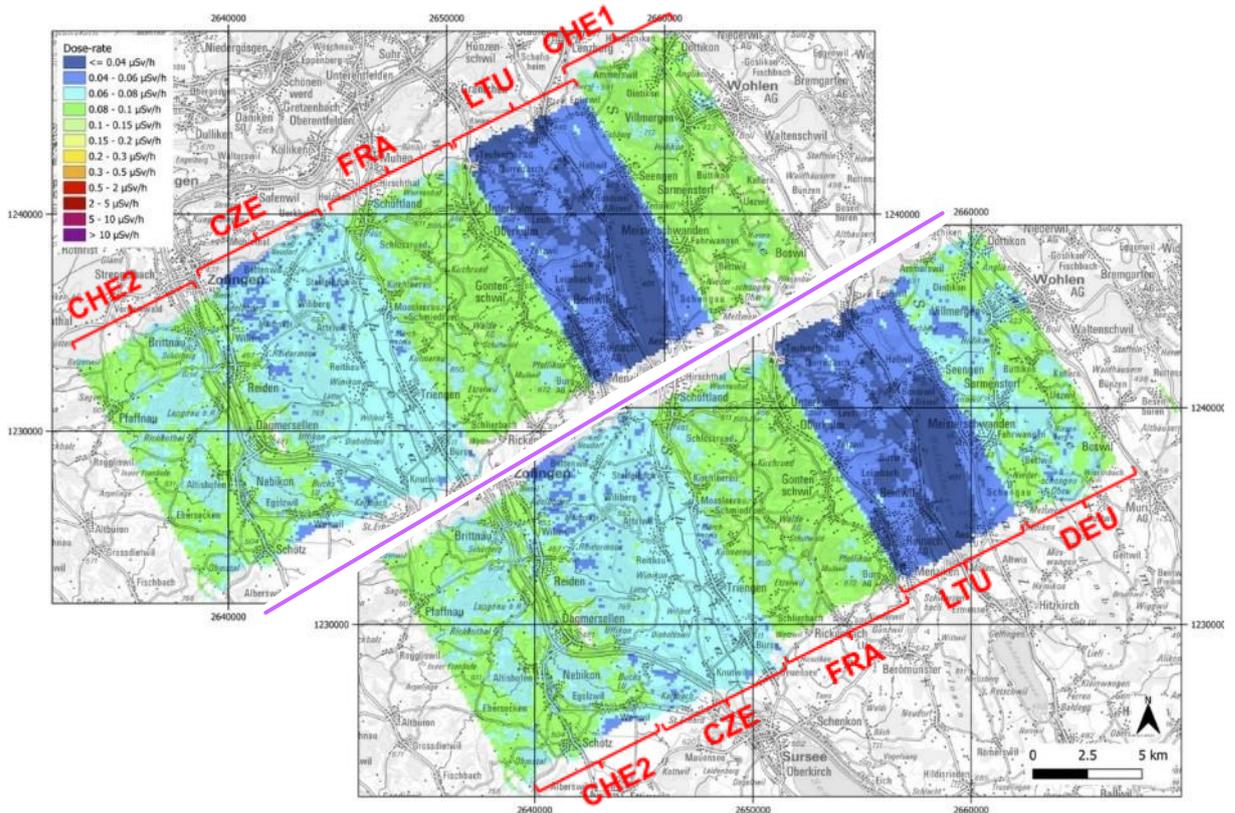


Abbildung 17: Mission 3 – Composite Mapping: Zusammengesetzte ODL-Karte aus den durch alle teilnehmenden Teams gemessenen Teilgebiete. Oberhalb der violetten Markierungslinie ist das Composite Mapping dargestellt, das entstanden ist, als das Team CHE1 den nordöstlichen Part übernommen hat. Unterhalb der violetten Markierungslinie die kombinierte Karte mit dem nordöstlichen Teilgebiet nachträglich gemessen durch das deutsche Team (Quelle: PSI).

4.4 Mission 4: Quellensuche

Am Mittwoch führten alle Messteams dieselbe Mission durch: eine Quellensuche auf dem Waffenplatz Frauenfeld. Die Übungsleitung definierte das Messgebiet inklusive Ein- und Ausflugsunkten (Entry/Exit Points) und begrenzte die Einsatzzeit im Gebiet auf maximal 30 Minuten pro Team. Der Zeitplan war sehr eng, da innerhalb eines halben Tages sechs Helikopterteams das vorgegebene Gebiet nacheinander vermessen mussten. Ursprünglich war vorgesehen, dass das CHE1 als erstes, dann die ausländischen Teams und schliesslich CHE2 als letztes Team in das Zielgebiet fliegen sollten. Um dem Team DEU Zeit für die Behebung des Defektes an ihrem Helikopter zu geben, wurden die Zeitfenster der Teams DEU und CHE2 getauscht.

4.4.1 Mission 4 – Angaben zum Messflug (Flug Team CHE1)

Datum / Zeit CHE1:	04.06.2025, 07:55 – 09:26 h	Flugdauer:	30 min
Fluglinien CHE1:	15 Linien, Abstand 125 m	Fluggebiet:	ca. 6 km ²
Flughöhe über Grund:	ca. 90 m		

Restriktionen der Übungsleitung: Eingang aus Westen & Ausgang nach Osten des Fluggebiets, Flugzeiten sind einzuhalten (30 min pro Team)

Bemerkung der Übungsleitung: Fluggebiet darf zum Wenden verlassen werden.

4.4.2 Mission 4 – Erkenntnisse der Quellensuche

Die MMGC-Karte in Abbildung 18 zeigt, dass im Suchgebiet zwei Points of Interest (POI1 und POI2) mit MMGC-Verhältnissen zwischen 6 und 8 gefunden wurden. POI2 wurde durch den Messhelikopter zweimal innert kurzer Zeit überflogen, entsprechend ist das für diesen Punkt typische Spektrum im oberen Drittel des Wasserfalldiagramms in Abbildung 20 zweimal zu erkennen, das durch die Operatoren während des Fluges fotografiert wurde.

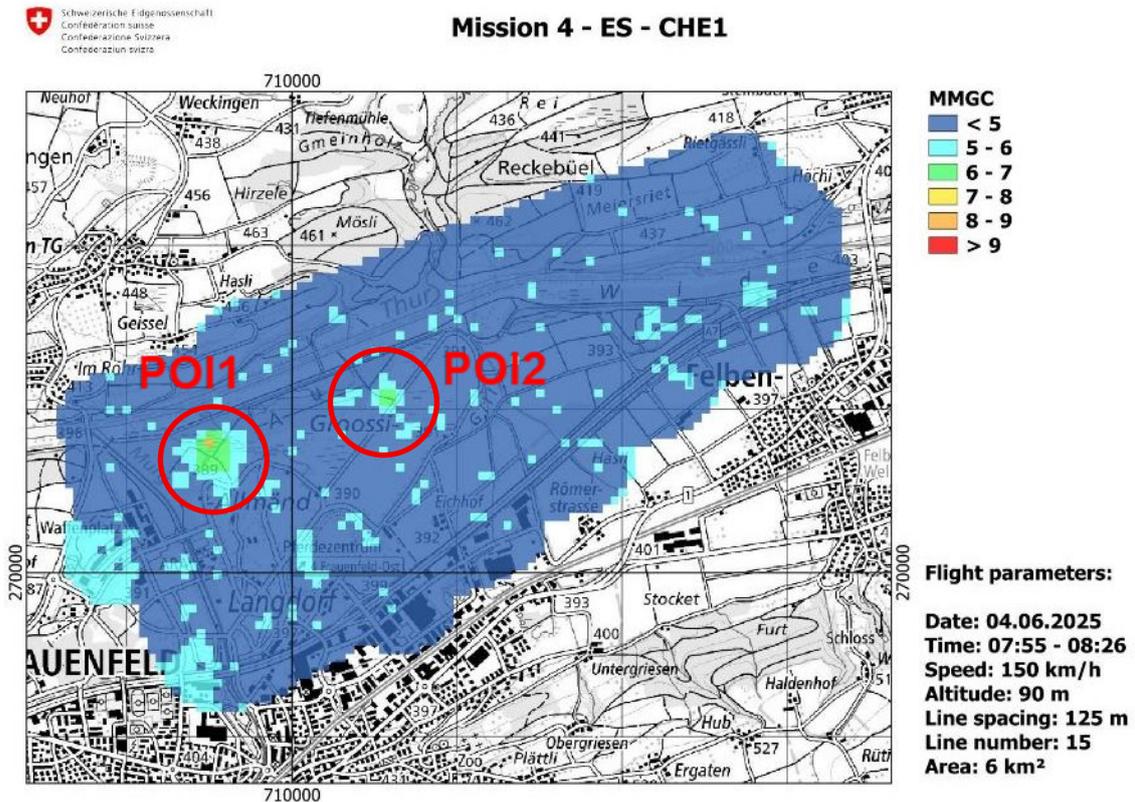


Abbildung 18: Mission 4 – Quellensuche: MMGC-Karte des durch das Team CHE1 überflogenen Messgebietes beim Waffenplatz Frauenfeld. Zwei Points of Interest (POI) mit MMGC-Verhältnissen zwischen 6 und 8 sind zu erkennen.

Während der Flug gab es keine automatische Detektion. Es war allerdings für beide POIs möglich, das charakteristische ¹³⁷Cs-Signal bei ca 660 keV im Spektrum zu beobachten.

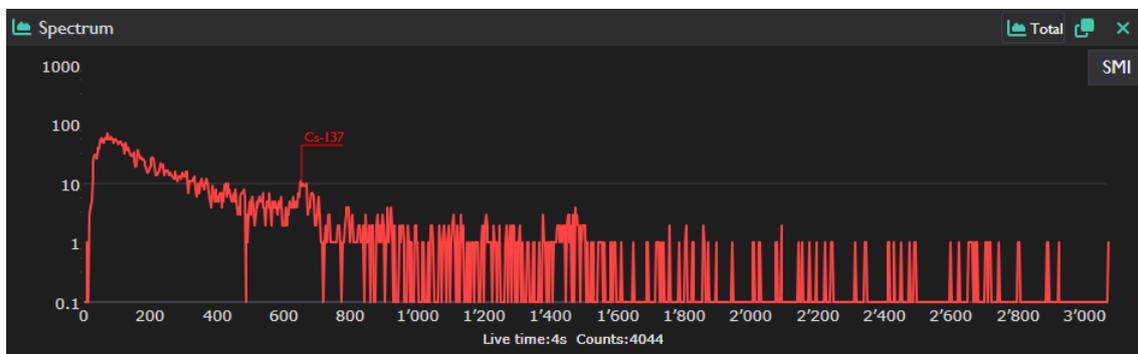


Abbildung 19: Mission 4 – Quellensuche: Beobachtetes Spektrum mit charakteristischem Cs-137 Signal um 660 keV bei POI2.

Im Fall von POI2 konnte die Detektion gut im Wasserfallspektrum nachverfolgt werden (siehe Abbildung 20). Es wurde beschlossen Verdichtungslinien 90° zu den vorgegebenen Messlinien zu fliegen, um die Position der Quellen besser einzugrenzen und die Aktivität besser abzuschätzen.

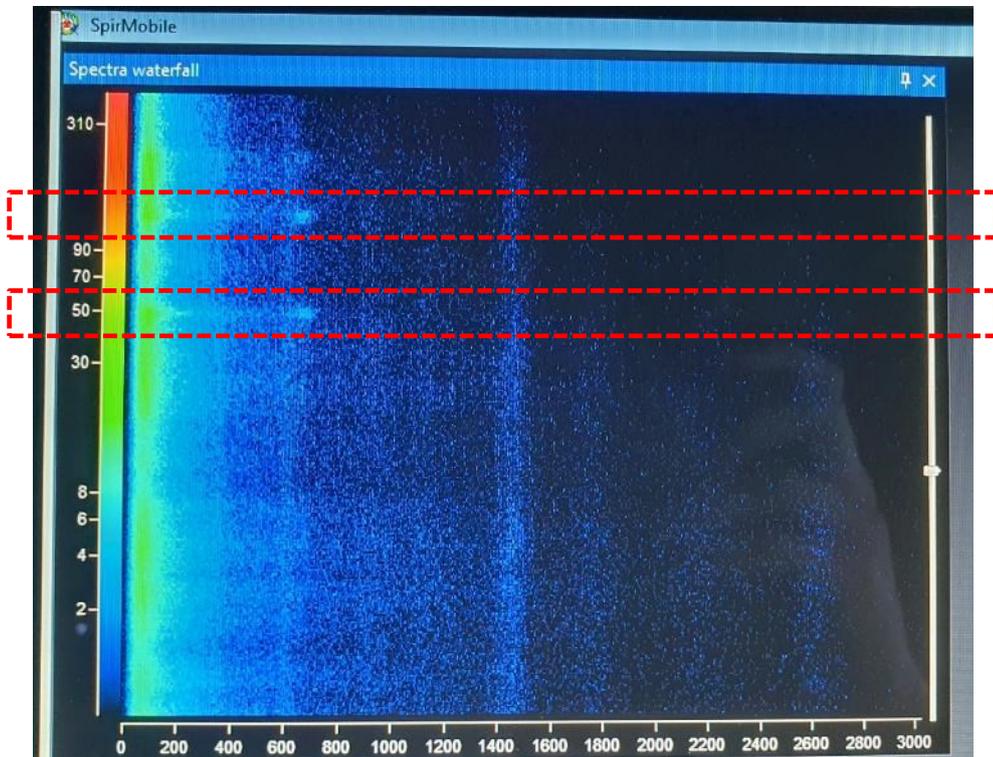


Abbildung 20: Mission 4 – Quellensuche: Wasserfalldiagramm nach zweimaligem Überflug des POI2, mit zweimal sehr ähnlichen für diesen Punkt charakteristischem Energiespektrum, zu erkennen im oberen Drittel des Diagramms (innerhalb der roten Markierungen).

In Abbildung 21 ist das Energiespektrum am POI1 dargestellt. Die für Barium ^{133}Ba charakteristischen Peaks bei 302 keV und 356 keV und derjenige für Cäsium ^{137}Cs bei 662 keV sind zu erkennen. Tatsächlich war auch noch eine Cobalt ^{60}Co -Quelle am POI1 deponiert, die jedoch zu schwach war, um durch das Messsystem erkannt zu werden. Im entsprechenden Spektrum für POI2 in Abbildung 22 weist der Peak bei 662 keV auf ^{137}Cs hin. Andere Radionuklide waren an diesem Punkt nicht ausgelegt.

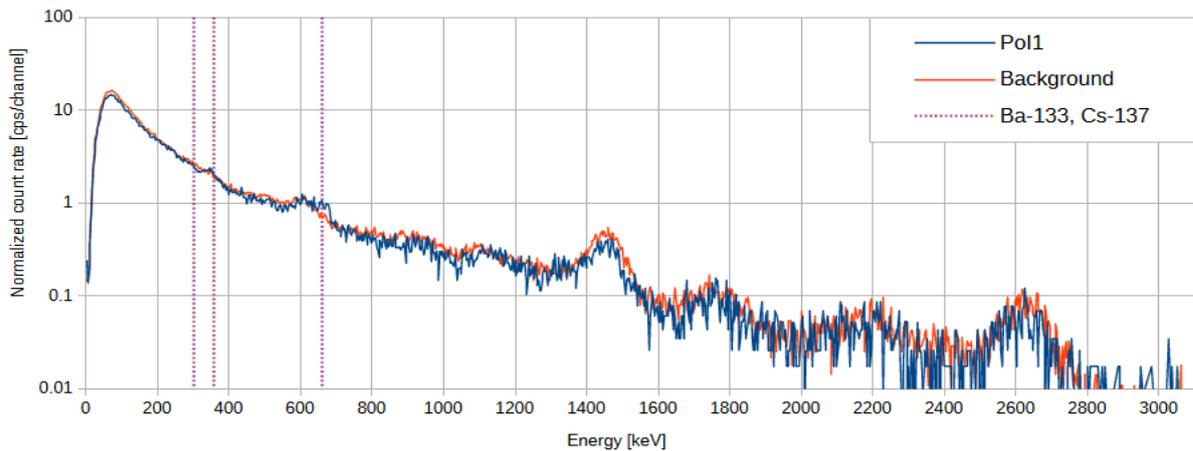


Abbildung 21: Mission 4 – Quellensuche: Energiespektrum am POI1. Die für ^{133}Ba charakteristischen Peaks bei 302 keV und 356 keV und derjenige für ^{137}Cs bei 662 keV sind zu erkennen, insbesondere im Vergleich mit dem Hintergrundsignal.

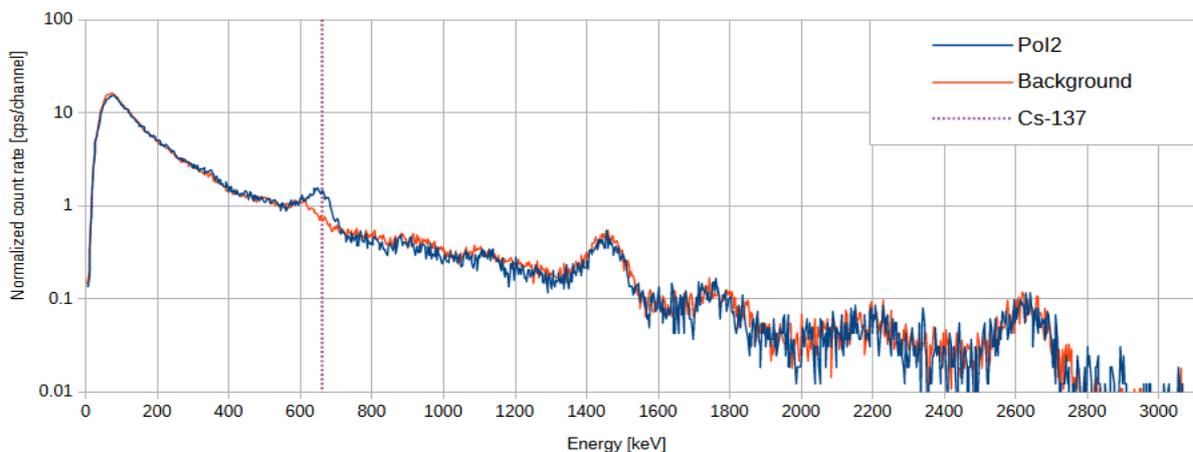


Abbildung 22: Mission 4 – Quellensuche: Energiespektrum am POI2. Nur der für ^{137}Cs (662 keV) charakteristische Peak hebt sich vom Hintergrundsignal ab.

Unter der Annahme, dass die am Detektor gemessene Netto-Dosisleistung (7 nanoSv/h bei 106 m Abstand) hauptsächlich durch das Cäsium ^{137}Cs bedingt ist, wurde für den POI1 eine Quellenaktivität von 0.85 GBq abgeschätzt. Eine entsprechende „Worst-Case“-Abschätzung kann auch für Barium-133 (^{133}Ba) vorgenommen werden, obwohl das Spektrum eindeutig zeigt, dass das Signal von ^{137}Cs deutlich stärker ist als das von ^{133}Ba . Bei Verwendung derselben Parameter (7 nanoSv/h bei 106 m Abstand) ergibt sich eine geschätzte Aktivität von 925 MBq für ^{133}Ba .

Tatsächlich waren 700 MBq ^{137}Cs , 400 MBq ^{133}Ba und zusätzlich eine schwache ^{60}Co -Quelle (160 MBq) vorhanden. Die Abschätzungen liegen somit in der richtigen Größenordnung. Die ^{60}Co -Quelle konnte weder lokalisiert noch identifiziert werden. Gründe dafür sind einerseits die schwache Aktivität der ^{60}Co -Quelle (knapp unter der Nachweisgrenze des Messsystems), sowie die dominanten Signale von den ^{137}Cs - und ^{133}Ba -Quellen.

Die Quellenaktivität am POI2 wurde auf 0.40 GBq ^{137}Cs abgeschätzt, was sehr genau der verwendeten ^{137}Cs -Quelle entspricht. Da keine weiteren Radionuklide vorhanden waren, erscheint es plausibel, dass die Abschätzung am POI2 genauer ausfiel als am POI1.

Am Nachmittag wurde dieselbe Übung in zwei kleineren Messgebieten auf dem Waffenplatz Frauenfeld von fünf Drohnenteams aus Deutschland, Frankreich, Litauen, Tschechien und der Schweiz durchgeführt. Für die Schweiz war das Labor Spiez mit dem Drohnenmodell Acecore Noa im Einsatz, ausgestattet mit einem 3 × 3-Zoll NaI-Detektor der Firma Nuvia.

Erste Messergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. An beiden Standorten konnten radioaktive Quellen lokalisiert werden. Eine genaue Identifikation sowie Abschätzung der Aktivität ist derzeit jedoch nur im Post-Processing möglich und teilweise anspruchsvoller, da die Drohnensysteme bislang nicht kalibriert sind.



Abbildung 23: Mission 4 – Quellensuche mit Drohnen: ODL-Karten der beiden für die Drohnen definierten Messgebiete, erstellt vom Team CHE des Labors Spiez.

Ungeachtet dessen zeigt sich, dass auch mit Drohnensystemen Gefahrenquellen in kleineren Gebieten rasch erkannt werden können. Diese Informationen leisten einen wertvollen Beitrag zur zielgerichteten Planung des Einsatzes von Bodenteams.

Die detaillierte Auswertung der Drohnenmessungen wird ebenfalls in den wissenschaftlichen Bericht des Paul Scherrer Instituts aufgenommen, der in Zusammenarbeit mit dem Labor Spiez erstellt wird.

4.5 Mission 5: Gemischter Messflug

Der gemischte Messflug über den Anlagen des PSI und dessen nördlichem Umland wurde durch das Team CHE1 am Montagnachmittag, durch CHE2 am Donnerstagvormittag erledigt.

4.5.1 Mission 5: Angaben zum Gemischten Messflug

Datum / Zeit CHE1:	02.06.2025, 14:58 – 15:25 h	Flugdauer:	27 min
Fluglinien (nur CHE1):	8 + 1 Linien, Abstand 250 m	Fluggebiet:	ca. 12 km ²
Flughöhe über Grund:	ca. 90-150 m		

Restriktionen der Übungsleitung: maximale Flugzeit für «Teilgebiet A+B» ist 30 Minuten, «Teilgebiet B» ist bis zum Abschluss von Teilgebiet A» Sperrzone, erste Linie in «Teilgebiet B» muss von Norden nach Süden verlaufen

4.5.2 Mission 5: ODL

In der Karte in Abbildung 24 ist über dem Areal des PSI West nördlich der Synchrotron-Anlage ein Bereich mit erhöhter ODL sichtbar. Das Gammaskpektrum in Abbildung 25 mit dem charakteristischen Peak bei 511 keV belegt, dass es sich dabei um Annihilationsstrahlung handelt. Der Grund dafür ist ein Messartefakt, der im Kurzbericht 2024 zum Standardmessprogramm in diesem Gebiet beschrieben wurde: Durch die in der Anlage vorhandene Neutronenstrahlung werden Teile der Umgebungsluft aktiviert und fallen nach Abgabe über den Fortluftkamin innert weniger Minuten zurück in den Ruhezustand. Die dabei entstehende Photonenstrahlung wird aufgrund der Kaminhöhe von 30 m überschätzt, weil das Messsystem für die Messung von am Boden befindlichen Strahlungsquellen kalibriert ist. Die Freisetzung dieser aktivierten Luftbestandteile ist bewilligt, wird überwacht und bilanziert. Die Beobachtung der leicht erhöhten ODL-Werte und des erhöhten MMGC-Verhältnisses im PSI-West decken sich mit der Windmessung von MeteoSchweiz auf der Wetterstation im PSI.

Der Bereich mit deutlich erhöhter ODL südlich auf der Messkarte im Bereich des Linearbeschleunigers SwissFEL ist bedingt durch die dort von der Übungsleitung platzierte Selenium ⁷⁵Se-Quelle.

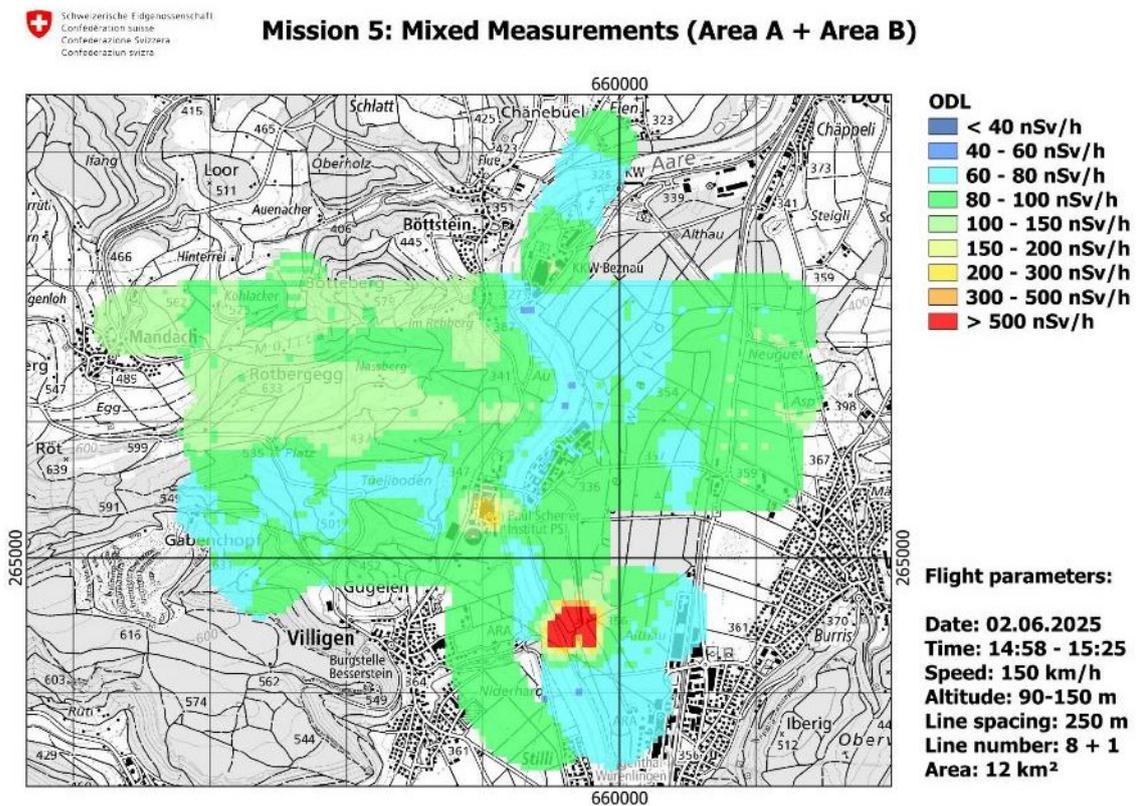


Abbildung 24: Karte der ODL in der Umgebung des PSI.

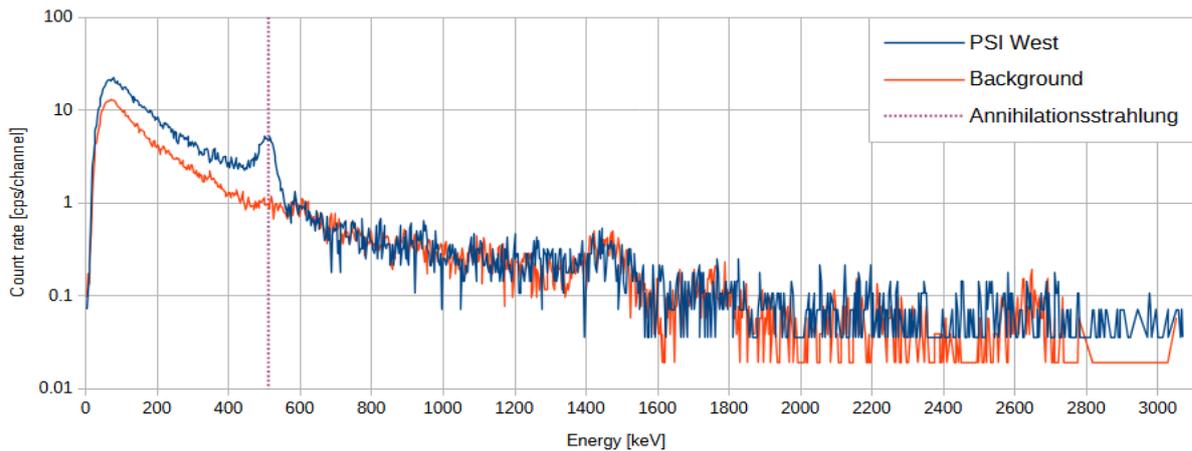


Abbildung 25: Gammaspektrum der Punkte mit erhöhten ODL-Werten über dem Areal des PSI West, nördlich der Beschleunigeranlage; der für Annihilationsstrahlung charakteristische Peak bei 511 keV ist klar zu erkennen.

4.5.1 Mission 5: MMGC-Verhältnis

In Abbildung 26 ist neben den Bereichen mit erhöhter ODL auch ein erhöhtes MMGC-Verhältnis im nördlichen Bereich des PSI Ost zu erkennen. Das Gammaspektrum in Abbildung 30 weist keine auffällig erhöhten Werte im niedrigen Energiebereich auf, jedoch sind kaum Counts im höheren Energiebereich vorhanden, was ebenfalls eine Erhöhung des MMGC-Verhältnisses zur Folge hat. Beim SwissFEL stellt man eine übergangslose Veränderung von <5 auf über >1000 MMGC-Werte fest. Das deutet darauf hin, dass die Quelle gegen die Seiten stark abgeschirmt war.

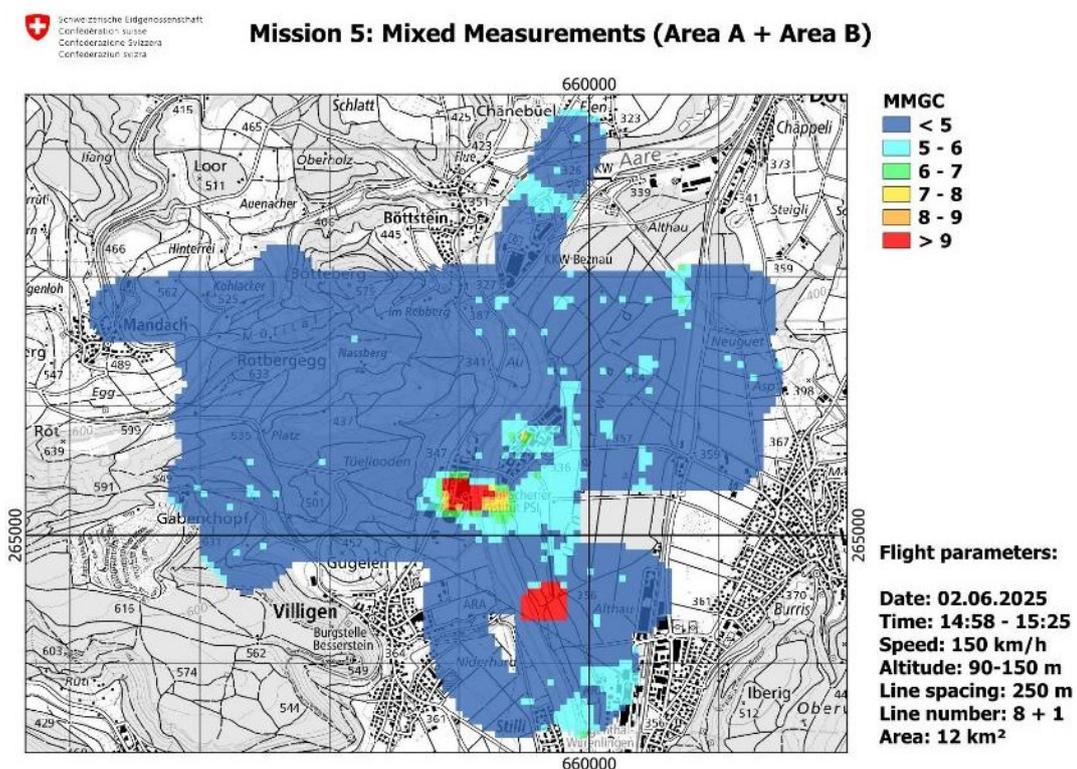


Abbildung 26: MMGC-Messkarte in der Umgebung des PSI.

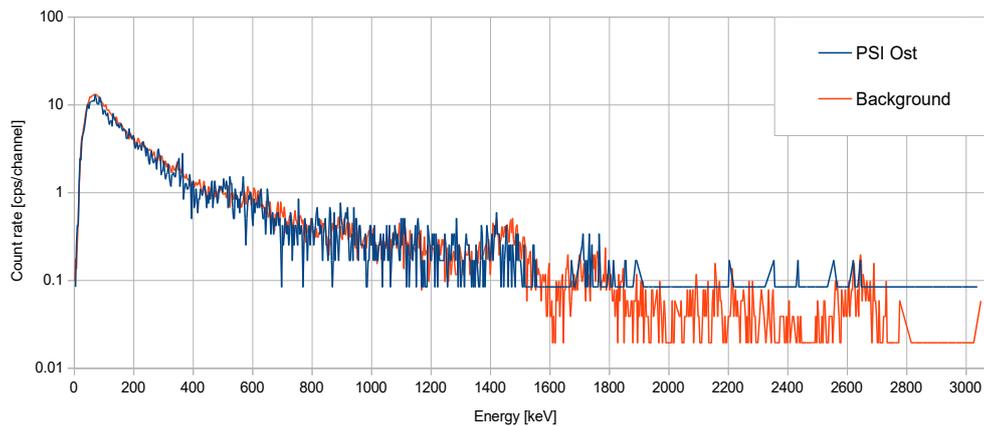


Abbildung 27: Gammaspektrum der Standorte mit erhöhtem MMGC-Verhältnis im nördlichen Bereich des PSI Ost; es sind keine ausgeprägten Peaks zu erkennen, aber im Bereich der hochenergetischen Strahlung gibt es kaum Counts, was ein erhöhtes MMGC-Verhältnis zur Folge hat.

Abbildung 28 zeigt das MMGC-Verhältnis mit angepasster Farbskala auf einem Satellitenbild des südlichen Endes der SwissFEL-Anlage. Der rot gefärbte Bereich lässt eine ziemlich genaue Lokalisierung der Quelle zu, deren tatsächlicher Standort mit einem Kreuz eingezeichnet ist.

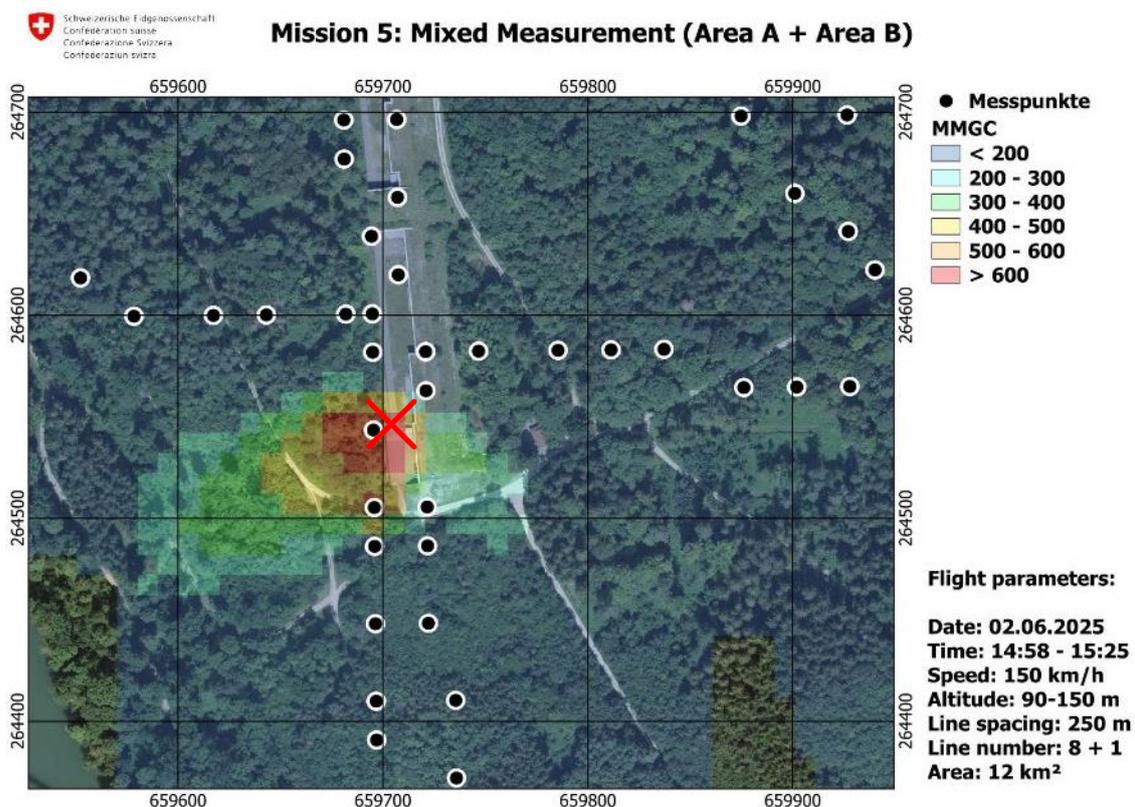


Abbildung 28: MMGC-Verhältnis auf einem Satellitenbild des südlichen Endes der SwissFEL-Anlage. Ebenfalls eingezeichnet sind die Messpunkte, die erkennen lassen, dass das Team CHE1 die Anlage zweimal in Nord-Süd-Richtung und einmal quer dazu überflogen hat. Die Farbskala wurde angepasst, um der starken Quelle gerecht zu werden. Die Interpolationsfunktion der Messsoftware führt zu den Schattierungen in höherem Abstand von der Quelle. Der tatsächliche Quellenstandort ist mit einem roten Kreuz eingezeichnet.

Die Abbildung 29 zeigt ein Foto, welches während des Überfluges des Teams CHE1 aus dem Helikopter gemacht wurde. Der Aufbau der Quellenhalterung ist darauf gut zu erkennen.



Abbildung 29: Standort der Selenium ^{75}Se -Quelle, fotografiert aus dem Helikopter des Teams CHE1 beim Überflug der SwissFEL-Anlage.

Das Gammасpektrum der Messpunkte mit den höchsten MMGC-Werten im südlichen Bereich der SwissFEL-Anlage in Abbildung 30 zeigt deutlich die für Selenium ^{75}Se charakteristischen Energiepeaks bei 136, 265 und 401 keV, was eine klare Identifikation des Radionuklids ermöglicht.

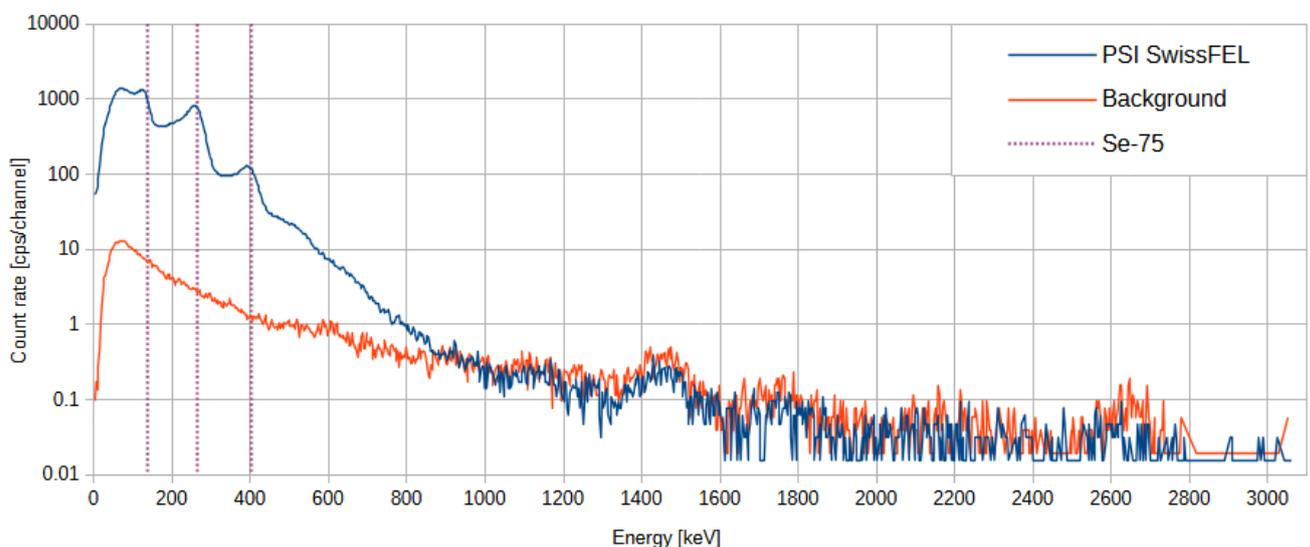


Abbildung 30: Gammасpektrum der Messpunkte bei der Selenium ^{75}Se -Quelle, mit deutlich sichtbaren charakteristischen Energiepeaks bei 136, 265 und 401 keV.

Da das Messsystem für die Quantifizierung einer ^{75}Se -Quelle nicht kalibriert ist, war eine plausible automatische Aktivitätsabschätzung nicht möglich. Beim am nächsten beim Quellenstandort liegenden Messpunkt registrierte der Detektor eine Dosisleistung von $3.0 \mu\text{Sv/h}$ in einer Flughöhe von 92 m. Der Dosiskoeffizient für externe Bestrahlung beträgt für

^{75}Se $h_{10}(^{75}\text{Se}) = 64 \text{ } (\mu\text{Sv/h})/\text{GBq}$ in 1 m Abstand. Aus diesen Werten wurde unter Anwendung des quadratischen Abstandsgesetzes die Quellenaktivität abgeschätzt:

$$A = \frac{DL_{\text{Detektor}} \cdot FH^2}{h_{10}(^{75}\text{Se}) \cdot (1\text{m})^2} = \frac{3.0 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot (92\text{m})^2}{64 \frac{\mu\text{Sv}}{\text{h}} \cdot \text{GBq}} \approx 400\text{GBq}$$

Um den Strahlenschutz des Personals am Boden zu gewährleisten, musste das Feld kollimiert werden. Das heisst, die Abschirmung der Quelle war lediglich nach oben hin geöffnet. Aufgrund der hohen Überfluggeschwindigkeit sowie eines nicht exakt zentrierten Überflugs über die Quelle wurde die effektive Dosisleistung – und damit auch die daraus abgeleitete Aktivität – mit hoher Wahrscheinlichkeit unterschätzt. Ein präziser Überflug direkt über die Quelle, gegebenenfalls im Schwebeflug, hätte eine genauere Abschätzung ermöglicht. Es erscheint daher plausibel, dass die tatsächliche Aktivität der Quelle deutlich über den abgeschätzten 400 GBq liegt.

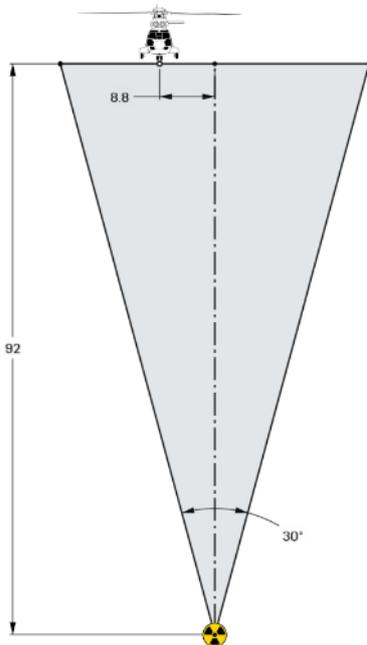


Abbildung 31: Darstellung der Helikopterposition über der Quelle: Gemäss GPS-Position (die ebenfalls eine gewisse Ungenauigkeit aufweist) flog der Helikopter mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h 8,8 m neben der senkrechten Achse der Quelle.

4.5.2 Mission 5: Thorium ^{232}Th -Anomalie

In der Thorium ^{232}Th -Messkarte in Abbildung 32 ist im westlichen Teil des Messgebietes, ungefähr in der Mitte zwischen der Gemeinde Mandach und dem PSI, die aus den Standardmessprogrammen bekannte natürliche Thorium-Anomalie deutlich zu erkennen. Typische Werte für die Th-232-Konzentration liegen in der Schweiz bei 20 bis 30 Bq/kg, in der Umgebung von Mandach erreicht sie Werte bis 75 Bq/kg. Der überdurchschnittliche Thorium ^{232}Th -Gehalt im Boden führt zu einer geringfügigen Erhöhung der ODL, daher ist dieser Bereich in der ODL-Karte (Abbildung 24) schwach erkennbar.

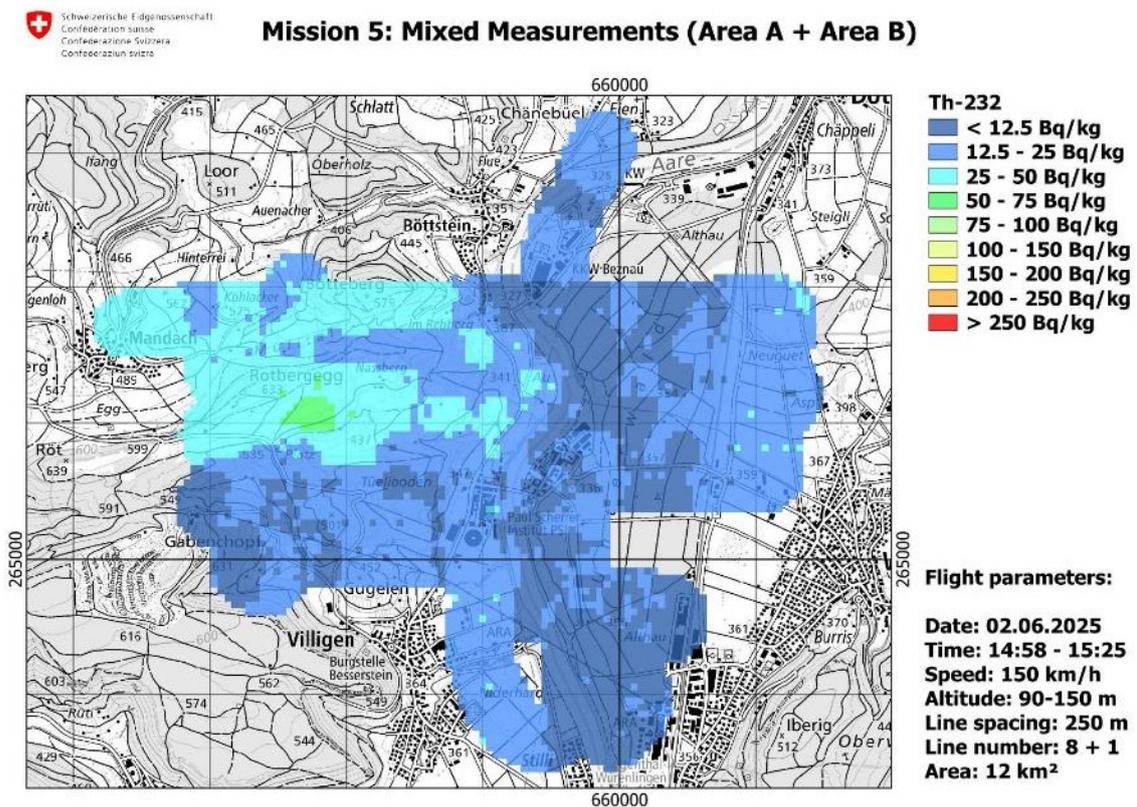


Abbildung 32: Thorium ^{232}Th -Messkarte in der Umgebung des PSI.

5 Erkenntnisse

- Die Ziele der Aeroradiometrie-Messwochen 2025 wurden erreicht. Das geplante Standardmessprogramm in der Umgebung von KKM und KKG wurde erfolgreich absolviert.
- Die internationale Messkampagne stellte alle Beteiligten vor anspruchsvolle Aufgaben: Wetterbedingte Herausforderungen und ein technischer Defekt am deutschen Helikopter erforderten von allen Teams ein hohes Mass an Flexibilität und kurzfristiger Einsatzplanung. Dennoch konnten alle 6 Teams sämtliche der 5 vorgesehenen Missionen erfolgreich absolvieren – unter vollständiger Einhaltung der von der Übungsleitung festgelegten Restriktionen.
- Trotz der kurzfristigen Umplanung der Composite-Mapping-Mission aufgrund schlechter Wetterbedingungen – knapp zwei Stunden vor Einsatzbeginn – gelang es unter der Leitung des Schweizer Teams, die Messung des Teilgebiets effizient umzusetzen: Fünf Helikopter-Teams führten gleichzeitig Messflüge durch und die gesammelten Daten konnten zügig zu einer gemeinsamen Karte zusammengeführt werden. Diese Karte wäre ausreichend gewesen, um eine erste Analyse der radiologischen Lage durchzuführen und weitere Massnahmen zu planen.
- Die fünf Missionen stellten hohe Anforderungen, da die Übungsleitung bewusst die Systemgrenzen testen wollte – mit schwachen Quellen nahe der Nachweisgrenze sowie starken Quellen mit möglicher Detektorsättigung. Dennoch konnten die meisten Quellen erfolgreich identifiziert werden, teils sogar unterhalb der spezifizierten Nachweisgrenze (z. B. durch das CHE-Team). Zudem trat keine Detektorsättigung auf. Die Systeme zeigten somit eine bessere Leistung als ursprünglich spezifiziert.
- Der parallele Einsatz von zwei Schweizer Helikoptern ermöglichte den Vergleich von Einsatzprozessen sowie den gezielten Austausch von Erfahrungen und Erkenntnissen zwischen den beiden Schweizer Teams (NAZ mit Stabs BR NAZ und Kompetenzzentrums ABC-KAMIR), die normalerweise getrennte Übungswochen absolvieren. Zudem konnten verschiedene Systemkonfigurationen unter identischen Missionsbedingungen getestet und hinsichtlich ihrer Stärken und Schwächen in konkreten Situationen evaluiert werden. Bei zwei Missionen kamen zudem gemischte Teams zum Einsatz.
- Die von der Übungsleitung eingeführten kurzen täglichen Debriefings haben sich sehr bewährt: Sie ermöglichten sowohl der Übungsleitung als auch den Teams einen transparenten Überblick über die durchgeführten Tätigkeiten und boten Raum für Bemerkungen und Feedback.
- Das schwedische Team, das ursprünglich hauptsächlich als Beobachter vorgesehen war, führte letztlich mehrere erfolgreiche Messungen durch.
- Internationale Messkampagnen sind wichtig um gemeinsame Messeinsätze zu trainieren und den Erfahrungsaustausch unter internationalen Partnern zu fördern. Die gegenseitige Kenntnis von Messstrategien, Charakteristika der Messdaten und Auswertungsmethoden ist entscheidend für eine effiziente Zusammenarbeit im Ereignisfall.
- Die erstmals in der Schweiz durchgeführte internationale Vergleichsmesskampagne mit 5 verschiedenen Drohnenteams bot eine wertvolle Gelegenheit, diese noch relativ neuen Messsysteme besser kennenzulernen und erste internationale Vergleiche anzustellen. Drohnen haben bislang noch nicht den Entwicklungsstand der etablierten, helikoptergestützten Gammaspectrometrie erreicht – insbesondere aufgrund fehlender standardisierter Kalibrierungen und der noch «fundamentalen Datenanalyse» während des Flugs. Dennoch ist das Potenzial deutlich erkennbar. Radiologisch interessante Punkte lassen sich identifizieren, auch wenn weiterführende Informationen häufig noch

nicht verfügbar sind. Keines der eingesetzten Drohnensysteme ist derzeit offiziell in Notfallorganisationen integriert, könnte jedoch im Bedarfsfall wertvolle Unterstützung leisten.

Die beiden Messverfahren – Aeroradiometrie und drohnengestützte Messungen – ergänzen sich ideal: Während mit der Aeroradiometrie in kurzer Zeit ein umfassendes radiologisches Lagebild erstellt und Gefahrenbereiche identifiziert werden können, liefern Drohnen zusätzliche, hochaufgelöste Detailinformationen. Diese tragen wesentlich dazu bei, den Einsatz von Bodenequipen gezielt und effizient zu planen, um noch rascher einen präzisen Überblick über die radiologische Situation zu erhalten.

- Die Prozesse für die Darstellung der Messresultate wurden überprüft, trainiert und optimiert.
- Der Ausbildungs- und Trainingsstand der Messspezialisten, Techniker und Piloten der Aeroradiometrie-Equipe ist hoch.

Anhang A: Aeroradiometrie allgemein

Wie funktioniert die Aeroradiometrie?

Eine ausführliche Beschreibung des Messverfahrens und der eingesetzten Ausrüstung findet sich in diesem [Factsheet](#).

Auswertung aeroradiometrischer Daten

Das Auswerteverfahren für aeroradiometrische Daten ist beschrieben in: SCHWARZ, G.F., 1991: Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie (Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik Nr. 23, Schweizerische Geophysikalische Kommission).

Für die Praxis wird oft eine einfache Methode benötigt, um die aeroradiometrisch gemessenen Werte direkt im Feld auswerten zu können. Dafür haben sich zwei Methoden bewährt:

1. MMGC-Ratio: Dabei wird das Verhältnis vom tiefeenergetischen zum hochenergetischen Anteil des Spektrums gebildet. Weil die künstlich erzeugten Radionuklide meist nur γ -Strahlung niedriger Energie aussenden, entspricht dieses Verhältnis ungefähr dem Verhältnis von künstlicher zu natürlicher Strahlung.
2. Abschätzung der Ortsdosisleistung: Die Summe der Produkte von Zählrate und Kanalenergie über alle Kanäle des Energiespektrums ist proportional zur Dosisleistung am Ort des Detektors. Von dieser Dosisleistung wird der Detektoruntergrund (ca. 2 nSv/h) und die Dosisleistung aus der kosmischen Strahlung (gemessen über einen speziellen Zählkanal für hochenergetische Photonen) abgezogen, was die terrestrische Dosisleistung am Ort des Detektors ergibt. Über eine exponentielle Korrektur von der Flughöhe auf einen Meter über Grund wird anschliessend die terrestrische Ortsdosisleistung berechnet. Die Abschätzung der gesamten Ortsdosisleistung erfolgt durch Addition der kosmischen Dosisleistung in einem Meter über Grund, welche über die kosmische Höhenformel berechnet wird.

Bei der Interpretation von aeroradiometrischen Karten ist zu beachten, dass die Messungen aus der Luft immer einen Mittelwert über ein Gebiet von 300 m x 300 m (90'000 m²) für eine Flughöhe von 90 m über Boden darstellen. Zum Vergleich: Bodenmessungen decken nur eine Fläche von rund 80 m² ab.

Messergebnisse in der Umgebung der Kernanlagen

Mit Ausnahme der KKW Beznau und Gösgen (Druckwasserreaktoren) können sämtliche schweizerischen Kernanlagen mit aeroradiometrischen Messungen anhand ihrer Direktstrahlung nachgewiesen werden. Das Strahlungsfeld beschränkt sich auf die Areale der Kernanlagen. In der Umgebung ist keine erhöhte künstliche Radioaktivität nachweisbar.

Beim PSI wird die durch die Beschleunigeranlage induzierte Streustrahlung (PSI-West) resp. die Strahlung von radioaktiven Abfällen (Bundeszwischenlager) am Standort (PSI-Ost) erfasst.

Bei Siedewasserreaktoren (KKM und KKL) gelangt im Betrieb durch die Frischdampfleitung das Aktivierungsprodukt ¹⁶N ins Maschinenhaus. Da das Dach des Maschinenhauses vergleichsweise wenig abgeschirmt ist, wird Gammastrahlung des ¹⁶N aus der Luft gut detektiert. KKW mit Druckwasserreaktoren (KKG und KKB) weisen eine sehr geringe Gesamtstrahlung auf und sind in der Regel nicht erkennbar.

Ausserhalb der umzäunten Areale der Kernanlagen wurde keine erhöhte künstliche Radioaktivität festgestellt, die nicht durch den Reaktorunfall in Tschernobyl oder die Kernwaffenversuche der sechziger Jahre erklärt werden kann. Der Aktivitätspegel in der Umgebung ist über die letzten 15 Jahre konstant geblieben.