GEOPHYSIKALISCHE EICHUNG DER AERO-GAMMASTRAHLEN PROSPEKTION

VON

D. C. BOIE *)

EINLEITUNG

Die geophysikalische Untersuchung oberflächennaher Gesteine unter Verwendung ihrer ort-spezifischen natürlichen Gammastrahlung ist seit zwanzig Jahren aus dem Versuchsstadium herausgewachsen. Doch immer noch wird die Methode meistens nur qualitativ beschreibend eingesetzt (z. B.: geringe „Zählrate" am Ort A, erhöhter „Background" am Ort B). Die Anwendung als Aerogeophysik – also Gammastrahlenmessung vom Flugzeug oder Hubschrauber aus – erweitert, unter Einsatz von Digitaltechnik, systematischer Befliegung und quantitativer Eichung der Geräte, das Verfahren über die direkte Prospektion auf radioaktive Minerale hinaus zur wirtschaftlichen Methode geologischer Oberflächenkartierung.

In Verbindung mit geeigneten Ortungsverfahren lassen sich anstehende Formationen sehr sicher kartieren, wenn Umweltparameter ausgeschaltet und die reduzierten Meßdaten in sinnvoll vergleichbaren und durch andere Geräte reproduzierbaren Größen angegeben werden können. Die Wirkung und die Korrektur der Umwelteinflüsse sowie die quantitative Eichung der Apparaturen sollen im folgenden beschrieben werden.

Bei den Umwelteinflüssen handelt es sich um

Abschirmung der Gammastrahlung durch Materie wie Gesteinsbedeckung des Strahlers, Luft, Niederschlag oder Oberflächenwasser, Vegetation;

Variation des in der Atmosphäre vagabundierenden Gammastrahlers Radon 222;

Variation der kosmischen Gammastrahlung.

Sie zu erfassen und zu reduzieren ist besonders dann möglich, wenn das Meßgebiet auf einander im terrestrischen Strahlungsbereich überlappenden parallelen Profilen zeitlich möglichst rasch vermessen worden ist. Hiermit sei gleichzeitig der wesentliche Vorteil der Flugmessungen gegenüber den örtlich zufällig angeordneten und zeitlich langsamen Bodenmessungen aufgezeigt.

Die Apparatur registriert zwei Größen der radioaktiven Strahlung: die Zählrate und die Energie. Die Zählrate, gemessen in Impulsen pro Sekunde, gibt die Konzentration des radioaktiven Materials an, die Energie der Impulse ist typisch für bestimmte strahlende Elemente. Da sowohl die Zählrate als auch die gemessene Energieverteilung vom Volumen des Detektors und dessen geometrischer Abmessung abhängen, führt man eine Eichung auf künstlich angelegten Testfeldern durch. Die Eichung liefert Umrechnungsfaktoren für die Umrechnung der gemessenen Feldwerte (Zählrate/Energie) in Oberflächenkonzentrationen der radioaktiven Elemente.

*) PRAKLA-SEISMOS GMBH, Hannover

1.1 DURCHGANG DURCH MINERALBODEN

Eine grobe Abschätzung der Durchlässigkeit N′/N von Gammastrahlung durch Mineralboden der Mächtigkeit d [cm] mit einem linearen Abschwächungskoeffizienten $\mu_{BO} = 0{,}081$ [cm^{-1}] für den Bi 214 Energiebereich 1,76 MeV ergibt nach dem Gesetz für die Durchlässigkeit durch Materie

$$\frac{N'}{N} = e^{-\mu d} \text{ mit } \begin{array}{l} N = \text{Gammahäufigkeit vor Durchgang} \\ N' = \text{Gammahäufigkeit nach Durchgang} \end{array}$$

das Diagramm in Fig. 1. Eine Quelle unter 1 m Bodenbedeckung wäre nicht mehr meßbar

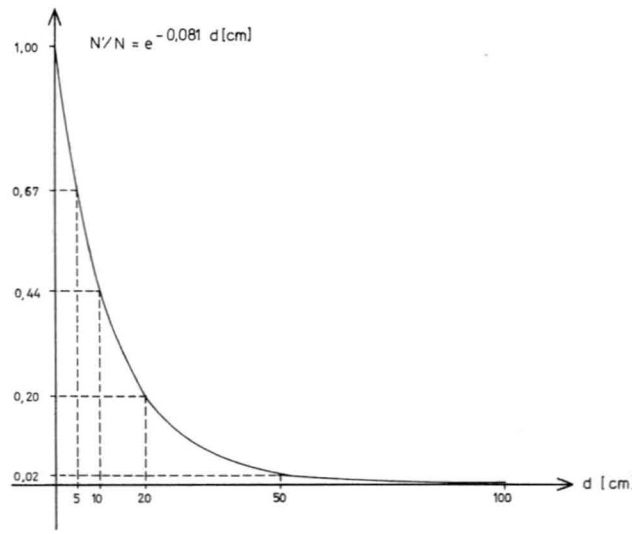

Fig. 1 Durchlässigkeit von Mineralboden der Mächtigkeit d für direkte Gammastrahlung (1,76 MeV)

Nun gibt es aber in den Zerfallsreihen der natürlichen Gammastrahler Th 232 und U 238 jeweils gasförmige Isotope, Radon 220 und Radon 222, die mechanisch durch Klüfte, im Wasser oder durch Diffusion an die Erdoberfläche und im Fall von Rn 222 auch noch in die Atmosphäre gelangen und hier im weiteren Zerfall als Thallium 208 (Halbwertszeit 3,1 min) und Wismut 214 (Halbwertszeit 19,7 min) Gammastrahlung emittieren.

Der Beweis für diese Hypothese ist sehr leicht zu führen, indem man den Tagesgang des Bi 214 an einem festen Ort verfolgt, wobei in Abhängigkeit von Lufttemperatur, Wind und Sonneneinstrahlung deutliche Maxima und Minima festzustellen sind. Diese Variationen sind nur durch einen permanenten Nachschub von Rn 222 aus dem Erdboden erklärbar.

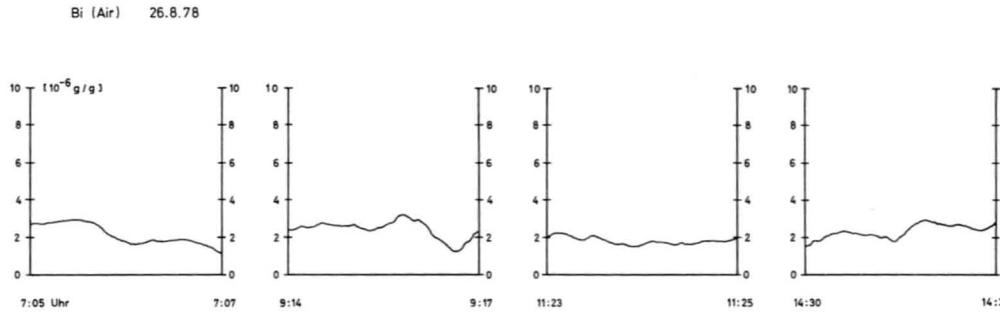

Fig. 2 Tages-Variation des atmosphärischen Radon 222

Ein weiterer Beweis für die Bewegungen von Rn 222 und Rn 220 kann durch das Isotop Actinium 228 der Thorium Reihe erbracht werden. Ac 228 ist ein Vor-Radon-220-Isotop mit Gamma-‚Peak' bei 0,91 MeV. Bei bedecktem Thoriumstrahler wird also wegen der Bodenabschirmung die direkte Strahlung, also der ‚Peak' bei 0,91 MeV, nur schwächer bis gar nicht beobachtet werden können, im Gegensatz zu den noch vorhandenen Nach-Radon-220-‚Peaks' von Tl 208.

Die Prospektionstiefe auf die radioaktiven Minerale Thorium und Uran ist nicht auf anstehende Quellen begrenzt, sie ist stets als so tief anzusetzen, wie die radioaktiven Gase Rn 220 und Rn 222 an die Erdoberfläche zu gelangen vermögen.

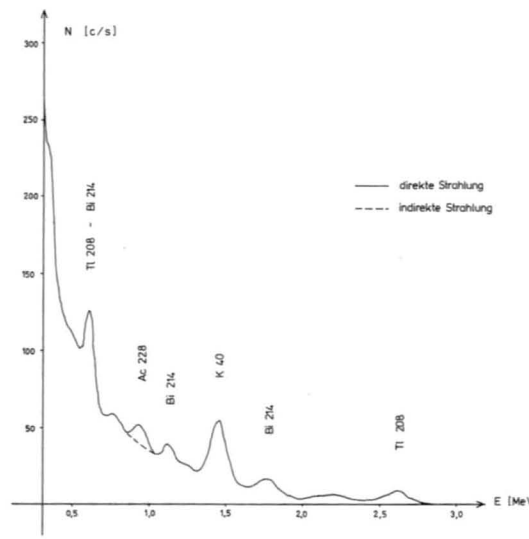

Fig. 3 Spektrum der direkten und indirekten terrestrischen Gammastrahlung

1.2 DURCHGANG DER LUFT

Die Abschirmung der an der Erdoberfläche zerfallenden Isotope Tl 208 und Bi 214 durch die Luftschicht bis zum Flugzeug wird im folgenden Diagramm dargestellt. Es ist berechnet für den Bi-214-Energiebereich 1,76 MeV mit einem $\mu_U = 0{,}0061$ [m^{-1}].

Bei den heute gängigen Detektorgrößen bis $V = 50\,000$ [cm^3] Kristallvolumen bedeuten 30 % durchkommende Intensität genügend Auflösungsvermögen, für das das Reduktionsverfahren einwandfreie Ergebnisse liefert.

Bei einem Verhältnis von $\frac{V}{v_G} > 200$ *(v_G: Meßfluggeschwindigkeit in km/h) bedeutet d = 200 m die Flughöhe über Grund. Bei günstigen Verhältnissen wäre also der Einsatz von Festflüglern möglich.*

Die momentane Luftdichte beeinflußt ein wenig diese Werte. Dieser Effekt ist jedoch durch Mitführen eines kontinuierlich messenden Barometers und eines Thermometers vollständig reduzierbar.

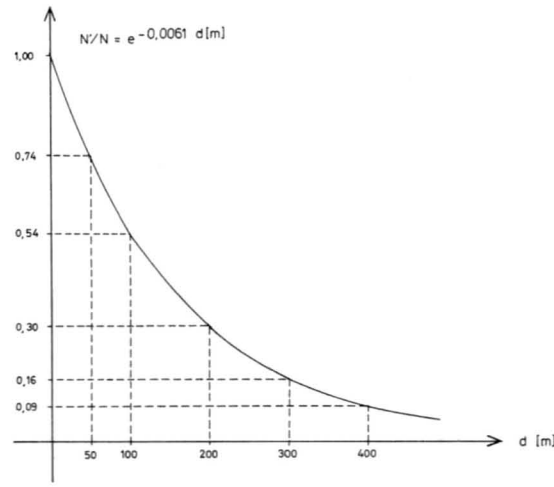

Fig. 4 Durchlässigkeit von Luft der Mächtigkeit d für Gammastrahlung (1,76 MeV)

1.3 DURCHGANG DURCH WASSER

Spürbarer als durch die Luftschicht wird der Abschirmeffekt durch Wasser in Form von Niederschlag oder Oberflächenwasser im Meßgebiet. Radioaktive Minerale unterhalb einer Gewässersohle sind natürlich nicht erkennbar.

Für d [cm] Wasser ergibt sich im Energiebereich Bi 214 (1,76 MeV) das Durchlässigkeitsdiagramm von Fig. 5 bei $\mu_U = 0{,}043$ [cm^{-1}].

Zur Feststellung, ob Niederschlag die Messungen beeinflußt hat, wird in der Regel eine ausgewählte Testlinie täglich möglichst genau beflogen, was jedoch nur dann repräsentativ ist, wenn der Niederschlag gleichmäßig im ganzen Gebiet und auch an der Testlinie erfolgt ist.

Besser erscheint hier ein Vergleich der mittleren Niveaus der quellentypischen ‚Peaks' des Gammaspektrums (Fensterwerte) benachbarter ungestörter Profilteile geologisch vergleichbarer Provinzen, was zu direkter Entdeckung von Abschirmvariationen führt und, abgesehen von Extremfällen, eine hochpräzise Eliminierung gestattet.

Gestattet man auch hier, wie beim Luftpaket bei 200 m Flughöhe, eine maximale Abschwächung auf 30 %, so wäre ein 20 cm starkes Wasserpaket zulässig, was auch beim schlimmsten Tropenregen praktisch nicht auftritt.

Der Niederschlagseffekt ist, wenn als solcher erkannt, stets mit genügender Genauigkeit reduzierbar. Eine Flugbeschränkung, wenn nicht aus Sicherheitsgründen, ist wegen Niederschlags nicht erforderlich.

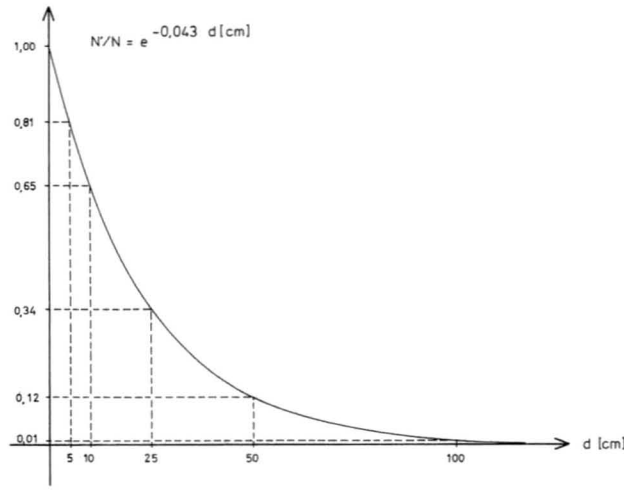

Fig. 5 Durchlässigkeit von Wasser der Mächtigkeit d für Gammastrahlung (1,76 MeV)

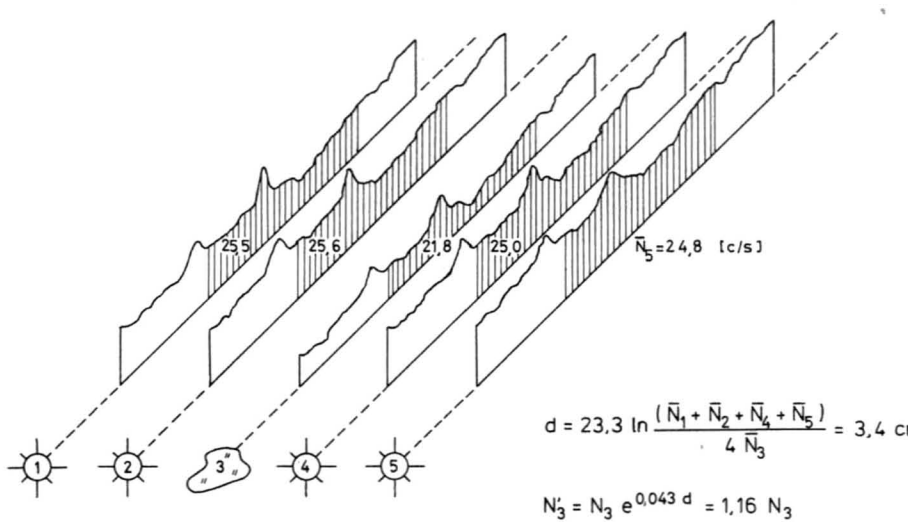

Fig. 6 Korrektur der Abschirmung der terrestrischen Gammastrahlung N durch Niederschlag d auf Linie 3

1.4 DURCHGANG DURCH VEGETATION

Der Einfluß von Vegetation auf die Abschirmung von Gammastrahlung ist wohl immer etwas überschätzt worden. Nimmt man die Verhältnisse von tropischem Regenwald mit maximal 50 kg/m^2 Biomasse (H. Lieth u.a., Primary Productivity of the Biosphere, Springer Verlag 1975), die zu 50 % aus Wasser besteht, so entspricht dies nur einem Wasserpaket von 2,5 cm und somit einem Durchlässigkeitsverhältnis von 90 %. (Siehe Diagramm: Durchlässigkeit von Wasser für Gammastrahlung.) Dieser maximalen Abschirmung wirkt auch noch entgegen, daß die lebende Vegetation radioaktive Minerale teilweise auch aufnimmt, in sich speichert und somit zusätzliche Strahlung liefert.

Der Abschirmeffekt von Gammastrahlung durch Vegetation ist in der Regel kleiner als zehn Prozent und somit immer reduzierbar. Das Reduktionsverfahren entspricht dem von Niederschlag.

2. VARIATION DES IN DER ATMOSPÄRE VAGABUNDIERENDEN RADIOAKTIVEN GASES RADON 222

In einer Reihe von Flugmessungen auf ausgewählten Radon-Testlinien zeigt sich, daß das aus dem Boden austretende Radon 222, obwohl es sechsmal schwerer als Luft ist, erheblichen örtlichen und zeitlichen Variationen ausgesetzt ist. Zur Bestimmung der Variation wurde im Flugzeug ein gesonderter, zur Erdoberfläche mit 5 cm Blei geschirmter, Spezial-Detektor installiert, dessen Restdurchlässigkeit für terrestrische Strahlung durch geeignete Eichung bekannt war und dessen reduzierte Meßwerte somit den Anteil von atmosphärischem Radon 222 (Bi(Air)) wiedergaben.

Die Fig. 2 zeigt die Variation von Bi(Air) an einem beliebigen Tag für jeweils das gleiche Profil, gemessen viermal innerhalb von 12 Stunden. Die Einheiten sind 10^{-6} g/g Uranäquivalent (eppm). Die auftretenden Bi(Air)-Variationen liegen zwischen 10 % und maximal 100 % der Bodenkonzentrationen, sind also bei Prospektionen in keinem Fall zu vernachlässigen. Vielmehr treten sie besonders verstärkt über topographisch bewegtem Gelände auf. Wind, Luftdruck und Sonneneinstrahlung dürften hier die Parameter sein.

Die Variation lediglich auf einer Basisstation zu messen, reicht nicht aus. Es ist also unerläßlich, immer einen Spezial-Detektor für Bi(Air) von etwa 10 % Kristallvolumen der Meß-Detektoren mitzuführen.

Das gleitende Mittel über 20–30 Meßwerte des Bi(Air)-Detektors gestattet dann, die Bi(Air)-Anteile in dem oberhalb des Flugzeuges liegenden Halbraum vollständig zu reduzieren. Unterhalb des Flugzeuges ist die Aufgabe sehr sicher zu lösen nach dem für die Niederschlags-Reduktion in 1.3 angegebenen Verfahren, also vereinfacht gesprochen, durch Vergleich mit den Niveaus der Nachbarprofile.

3. VARIATION DER KOSMISCHEN GAMMASTRAHLUNG

Die kosmische Strahlung ist im wesentlichen nur von der Meereshöhe abhängig. Sie weist ein Gammaspektrum auf, das mit Ausnahme einer Anomalie praktisch nur aus Comptonstrahlung der harten Weltraumstrahlung besteht. Diese Ausnahme ist ein

Gamma-‚Peak' von Positronen-Zerfallsstrahlung bei 0,51 MeV, dessen Integral genau 42% der integralen kosmischen Strahlung oberhalb der terrestrischen Strahlungsgrenze von 3,0 MeV beträgt. Da bis 5,1 MeV Energie gemessen wird, ist der kosmische Parameter also stets bekannt und sein Einfluß leicht und präzise reduzierbar. Das restliche Gammaspektrum der kosmischen Strahlung im terrestrischen Bereich (also < 3,0 MeV) ist ebenfalls direkt proportional der integralen kosmischen Strahlung > 3,0 MeV und somit ebenfalls leicht und sicher entsprechend der folgenden Formel bestimm- und reduzierbar.

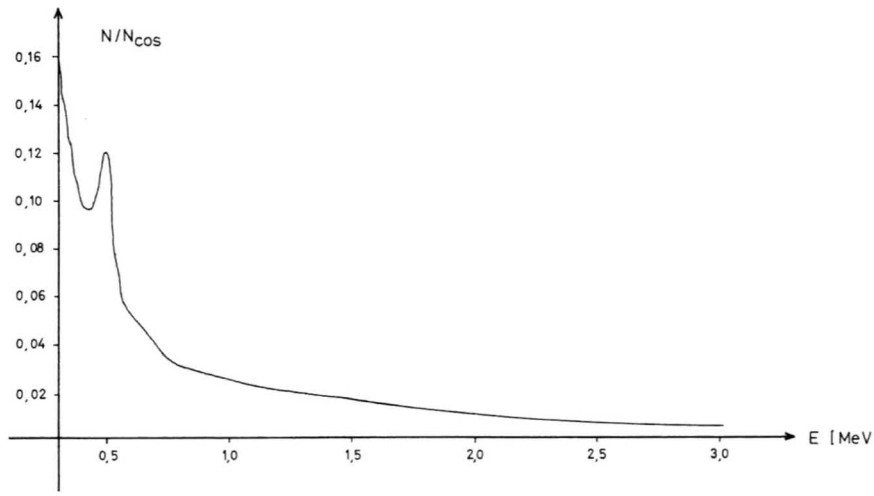

Fig. 7 Spektrum der kosmischen Gammastrahlung im Bereich der terrestrischen Gammastrahlung.
N: Zählrate in Imp./s
N_{cos}: Zählrate im Fenster > 3,0 MeV

$N' = N - c \cdot N_{cos}$ mit N: Gesamtstrahlung
N': reduzierte Strahlung
c: kosm. Faktor
N_{cos}: Strahlung > 3,0 MeV

Die Abhängigkeit der kosmischen Strahlung von der Höhe über NN wurde nur wie folgt (aus wenigen Meßwerten) bestimmt, um den Einfluß grob angeben zu können:

$\frac{N_0}{N_H} = H^{-0,688}$ mit N_0: kosmische Strahlung in NN
N_H: kosmische Strahlung in Höhe H
H: Höhe über NN in [m]

Ändern sich die Flughöhen im Meßgebiet um x Prozent, so ändert sich die kosmische Strahlung um etwa 2/3x Prozent.

Bei einem Verhältnis von kosmischer zu terrestrischer Strahlung von 1 : 10 kann ab 50 m relativer Höhenänderungen im Meßgebiet auf eine Reduzierung der Variation der kosmischen Strahlung nicht mehr verzichtet werden.

4. QUANTITATIVE EICHUNG DER APPARATUR

Die Durchführung der quantitativen Eichung soll hier nicht im einzelnen beschrieben werden. Es genügt zu sagen, daß man zwei künstliche Anlagen sowie die Möglichkeit zum Fliegen über einem mindestens 10 km breiten See oder über einem Meer in mindestens 10 km Abstand von der Küste braucht. Die künstlichen Anlagen sind:

○ 3 bis 5 flächenhafte Testplätze unterschiedlicher aber bekannter Oberflächenkonzentrationen von Th, U, K, auf denen das Flugzeug im Stand praktisch flächenhafte Dauermessungen ausführen kann.

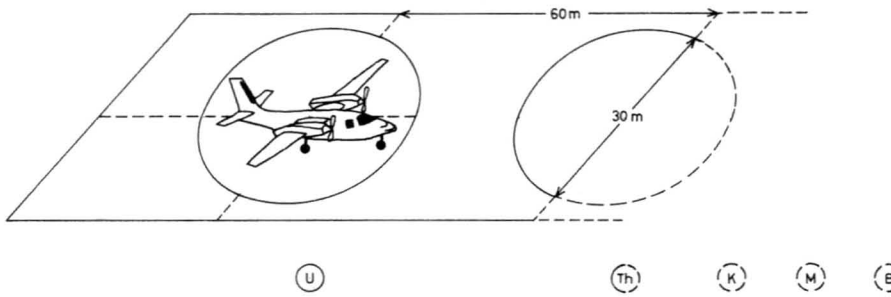

Fig. 8 Künstlicher Eichplatz für Flugzeuge mit bekannten U, Th, K Konzentrationen (M : Mix, B : Blank)

Hierbei werden die Parameter der sog. Comton-Interaktion bestimmt, also der Gammaanteile in niederenergetischen Kanälen, verursacht beim Zerfall höher energetischer Partikel.

○ Ein radioaktiv gleichförmiges, durch Probenanalyse bekanntes eben gelegenes Areal von etwa 4 km Breite und 10 km Länge, mit gekennzeichneter Zentrallinie als dynamische Testlinie, auf der in verschiedenen Höhen gemessen werden kann.

Hierbei können gleichzeitig die Abschwächungsparameter μ wegen des Durchganges durch unterschiedlich mächtige Luftpakete (Höhenreduktion) und die Eichparameter zum Umrechnen auf Oberflächenkonzentrationen in 10^{-6} g/g bestimmt werden.

Die Messungen über einem großen Süßwassersee mit beiderseitiger Profilausdehnung über Land liefert empirisch die Schirmdurchlässigkeitszahlen für den Bi(Air) Spezialdetektor sowie das von der Flughöhe abhängige Geometrieverhältnis von Meßdetektor zu Bi(Air)-Detektor.

Die Meßflüge über dem Meer schließlich, weit ab von der Küste, liefern die Eichfaktoren für die kosmische Strahlung und die Flugzeug-Eigenhintergrundstrahlung.

Das Ergebnis der Eichungen wird im Datenprocessing benutzt, um die Gesamtheit der Meßwerte in 10^{-6} g/g äquivalenter Oberflächenkonzentration oder in μci/m^2 physikalischer Strahlungsintensität umzurechnen.

Die in diesen Dimensionen gezeichneten Profilsektionen und Karten der Oberflächenkonzentrationen sind nun geeicht, jederzeit reproduzierbar und können mit gesteins-spezifischen Konzentrationen zum Zweck der geologischen Kartierung verglichen werden.

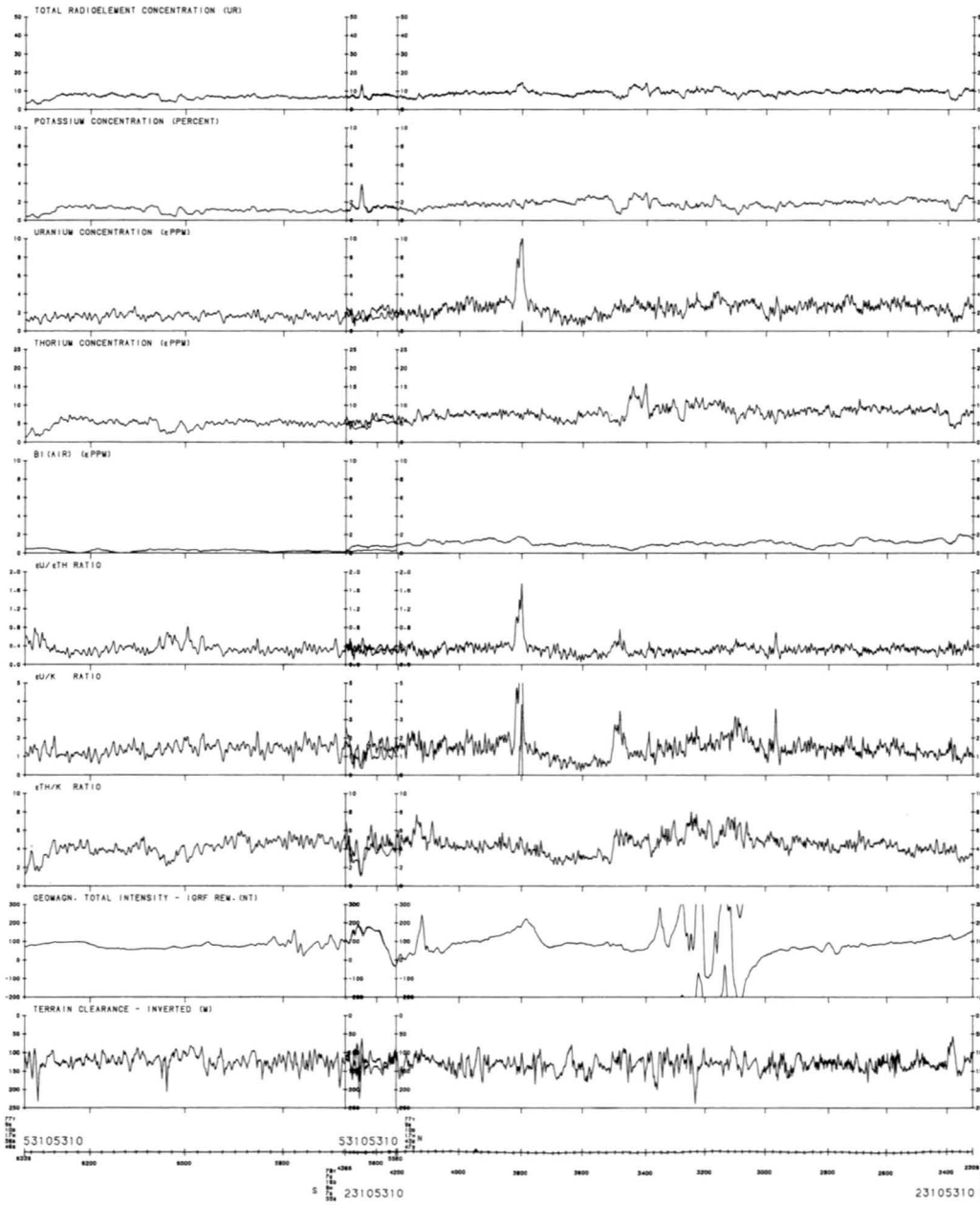

Fig. 9 Aerogeophysikalisches Profil, 1 : 250000

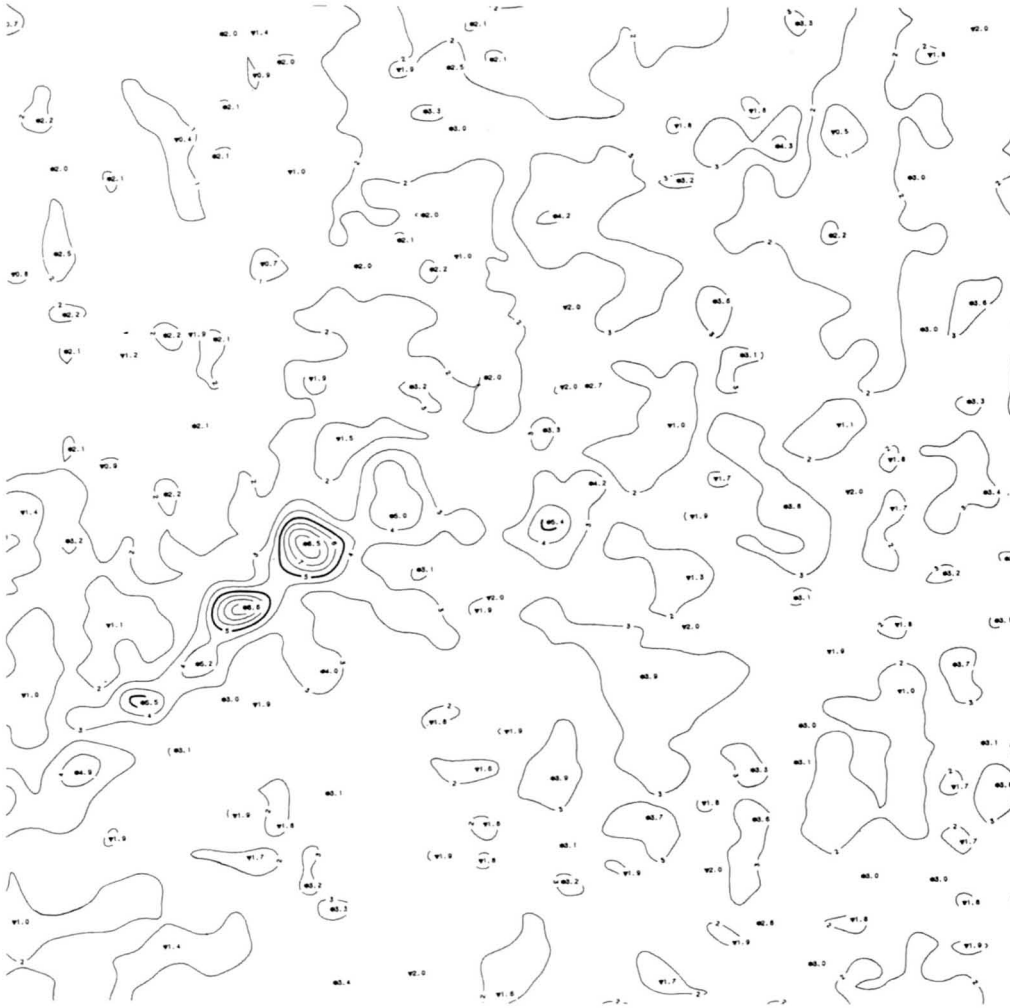

Fig. 10 Äquivalente Uran-Konzentration, 1 : 250000