

Vorlage	4
zu Drs.	2848

Stellungnahme zu neuen Messungen der Radioaktivität in Umweltproben aus der Elbmarsch

Rolf Michel

Zentrum für Strahlenschutz und Radioökologie (ZSR)
Leibniz Universität Hannover

1 Einleitung

Mit Schreiben des Präsidenten des Niedersächsischen Landtages vom 26.2.2007 bin ich gebeten worden, an einer Anhörung in nichtöffentlicher Sitzung des Ausschusses für Soziales, Frauen, Familie und Gesundheit am 11. und 12. April 2007 teilzunehmen und unter dem Themenblock „Kügelchen“ zu Messungen der Radioaktivität in Umweltproben der Elbmarsch Stellung zu nehmen.

Mit dem Thema Radioaktivität in der Elbmarsch habe ich mich als Mitglied der Strahlenschutzkommission (SSK), die das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in allen Angelegenheiten des Schutzes vor ionisierenden und nicht-ionisierenden Strahlen berät, intensiv befasst.

Auf Wunsch des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat sich die SSK ab März 2001 mit dem Thema Radioaktivität in der Elbmarsch befasst. Im Verlauf der Beratungen hat das BMU den Beratungsauftrag dahin gehend präzisiert, dass die SSK prüfen möge, ob die von verschiedenen Seiten vorgelegten Messergebnisse Anlass zu der Aussage geben, dass im betrachteten Gebiet

- ein erhöhtes Vorkommen an angereichertem Uran,
- ein erhöhtes Vorkommen an Transuranen,
- gegenüber anderen Gebieten abweichende Pu-Isotopenverhältnisse,
- ein erhöhtes Vorkommen an Tritium und
- PAC-Brennstoffkügelchen vorliegen.

Die Beratungsthemen wurden später um den Punkt erweitert, in wie weit derartige Befunde zu einer erhöhten Strahlenexposition der Bevölkerung führen können.

Der Ausschuss „Strahlenschutz bei Anlagen“ der SSK, dem ich ebenfalls angehörte, hat den Fragenkomplex auf neun Sitzungen detailliert beraten und als Ergebnis eine Stellungnahme formuliert [1]. Die Stellungnahme wurde in der 183. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 14.2.2003 verabschiedet. Sie ist im Internet unter www.ssk.de abrufbar und liegt dieser Stellungnahme als Anlage I bei. Seit Verabschiedung der SSK-Stellungnahme sind mir zu den darin behandelten Messungen keine neuen Informationen bekannt geworden, die eine veränderte Einschätzung erforderlich gemacht hätten.

In der Folgezeit sind einige Publikationen und Stellungnahmen erschienen, die jedoch nicht auf einer erweiterten Datenbasis beruhen und die SSK Stellungnahme nicht berücksichtigten. Zu nennen wäre hier z. B. der Abschlussbericht des Vorsitzenden O. Wassermann vom 15.09.2004 „*Erkenntnisse der schleswig-holsteinischen Fachkommission Leukämie im Zeitraum 1993-2004*“

zur Ursache der in der Nahumgebung der Geesthachter Atomanlagen aufgetretenen Leukämiehäufung bei Kindern" [2] und eine Arbeit von Schmitz-Feuerhacke et al. [3].

Im Jahr 2003 wurde eine umfangreiche epidemiologische Studie, die Norddeutsche Leukämie- und Lymphomstudie (NLL), publiziert [4], in der mit epidemiologischen Methoden, mögliche Ursachen für die Leukämieerkrankungen in der Elbmarsch untersucht wurden. Leider lieferte auch diese Studie keine abschließende Antwort auf die Frage nach möglichen Ursachen der Leukämieerkrankungen in der Elbmarsch.

2 Neuer Sachstand

Neue experimentelle Daten zur Radioaktivität in der Elbmarsch sind auf Grund einer Initiative des ZDF¹ verfügbar geworden. Durch das ZDF wurden nach den Ausführungen in [5] Umweltproben aus der Elbmarsch am 20.12.2004 durch A. Gerdes vom Institut für Mineralogie der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt in Anwesenheit einer Justiziarin und eines Kamerteams des ZDF genommen. Über die Analysen dieser Proben durch das Institut für Mineralogie liegen mir zwei Teilberichte vom 20.3.2005 [5] und vom 25.8.2006 [6] vor. Außerdem liegen mir Vortragsfolien mit Untersuchungen einzelner Kügelchen durch das Institut für Mineralogie mittels Laserablation-ICP-MS vor [7].

Nach Ausführungen von Schmitz-Feuerhacke et al. [8] vom 31.3.2006 wurden Proben aus (vermutlich) dieser Probennahme durch den Geologen W. Fuhrmann vom GEOLAB + GEOEXPLORATION eine Sortierung der Bodenproben nach Korngrößen vorgenommen. Die Analyse der radioaktiven Inhaltsstoffe erfolgte durch V.N. Mironov von der Internationalen Sacharow Umwelt Universität in Minsk mit Hilfe der Alpha-Spektrometrie nach radiochemischer Aufarbeitung. Über diese Untersuchungen liegt mir ein einseitiges, undatiertes Ergebnisblatt [9] vor, das mit Anhang C überschrieben ist und zwei Tabellen und einige kurz gefasste Anmerkungen zur Probennahme und Analytik sowie zur Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf U-235/U-238 und Pu-238/(Pu-239+Pu-240) Aktivitätsverhältnisse enthält. Die Ergebnistabelle stimmt dem Augenschein nach mit den im ZDF in dem Film „Und keiner weiß warum ...“, 2.4.2006, 23:30 - 00:00 gezeigten Tabellen überein.

Zu den in den vier Unterlagen [5-7,9] aufgeführten experimentellen Ergebnissen nehme ich im Folgenden Stellung. Dabei behandle ich die vom Ausschuss für Soziales, Frauen, Familie und Gesundheit vorgegebenen Fragestellungen

1. Untersucher, Zeitpunkt, Auftraggeber
2. Formulierung des Auftrags: Anlass, Ziel, Vorgaben der Auftraggeber
3. Ort, Umstände der Probennahme

¹ Im November 2005 wurde auch ich angefragt, ob ich mit dem ZSR „an einer Ringanalyse“ mitwirken würde, in der das ZDF „Bodenproben aus dem Umkreis von Nuklearanlagen auf Thorium, Uran und Transurane alpha-spektrometrisch untersuchen“ lasse. Ich habe dieses abgelehnt, da ich das ZDF nicht für kompetent halte, eine Ringanalyse zu organisieren. Ich habe das auch auf telefonische Rückfrage der Redaktion so formuliert. Unser Institut nimmt regelmäßig an Ringanalysen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und der IAEA teil, die die für die Organisation von Ringanalysen notwendige Kompetenz besitzen. Abgesehen von meiner grundsätzlichen Ablehnung waren zu diesem Zeitpunkt unsere alpha-spektrometrischen Kapazitäten durch ein Forschungsvorhaben in den hochkontaminierten Regionen der nördlichen Ukraine gebunden. Existenzangst, wie das ZDF in der Begründung des Entschließungsantrages vom 9.5.2006 zitiert wird, war nicht der Grund, das Angebot des ZDF abzulehnen.

4. Probenpräparation
5. Welche Messmethode(n) wurde(n) gewählt und aus welchen Gründen?
6. Ergebnisse
7. Gehalt der Kügelchen an Transuranen und Aktiniden
8. Herkunft und Zusammensetzung der in Bodenproben aus dem Untersuchungsgebiet enthaltenen Kügelchen

und nehme darüber hinaus Stellung zu den Fragen

9. der Qualität der ermittelten Ergebnisse und der Dokumentation der Untersuchungen und Ergebnisse
10. der Eignung von Analyseverfahren für die Ermittlung von Aktivitätskonzentrationen und Isotopen- und Aktivitätsverhältnissen und
11. der Dosisrelevanz von Radioaktivitätsgehalten in mikroskopischen und makroskopischen Komponenten von Umweltproben.

3 Probennahme

Zu den ersten drei Fragen nach

1. **Untersucher, Zeitpunkt, Auftraggeber**
2. **Formulierung des Auftrags: Anlass, Ziel, Vorgaben der Auftraggeber**
3. **Ort, Umstände der Probennahme**

liegen mir nur unvollständige Informationen vor. Dem Vernehmen nach wurden alle neuen Untersuchungen durch die Initiative des ZDF ausgelöst. Wer wen beauftragt hat, wie der Auftrag formuliert war, was als Anlass und Ziel genannt wurde und ob Vorgaben der Auftraggeber existierten, ist mir unbekannt.

Die Gesamtheit der Probennahmeorte, die Gesamtanzahl der Proben, die einzelnen Probenmassen und die Art und Umstände der Entnahme sind aus den Unterlagen nicht zu entnehmen. Es ist die Rede von „*Bodenproben vom Dezember 2004 aus der Umgebung von Geesthacht*“ [9]. In dem Ergebnisblatt der Minsker Untersuchungen [9] werden die Standorte „*Waldschule in der Nähe der GKSS (Entfernung 500 m)*“ und „*Kriegerdenkmal auf der Elbmarschseite (1500 m entfernt von der GKSS)*“ genannt.

Im ersten Bericht [5] des Instituts für Mineralogie/Frankfurt werden „*einen Baumrinde, eine Staubprobe und sechs Bodenproben aus der Elbmarsch, die am 20.12.2004 vom Verfasser dieses Berichtes in Anwesenheit einer Justiziarin und eines Kamerateams des ZDF*“ genommen wurden. Im zweiten Bericht [6] des Instituts für Mineralogie/Frankfurt werden „*3 Bodenproben aus der Umgebung des GKSS Forschungszentrums und des Kernkraftwerkes Krümmel*“ genannt. In den Ergebnistabellen der Berichte [5,6] sind die untersuchten Proben mit Probenbezeichnungen GK *n* versehen und auch in ihrer Herkunft grob benannt. Die Daten in [6] nennen die Ortsbezeichnungen „*Waldschule nahe GKSS Gelände*“ und „*Kriegerdenkmal Tespe*“. Der Bericht [5] nennt außerdem weitere Proben mit unbestimmten Probennahmeorten „*Boden Tespe*“, „*Moos/Erde Tespe*“, „*Staubsaugerb.*“, „*Waldboden GKSS*“, „*Minigolf*“, „*GKSS Baumrinde*“.

Die Informationen zur Probennahme in den mir vorliegenden Unterlagen erfüllen nicht die Anforderungen, die man an die Qualität der Berichterstattung in derartig relevanten Untersuchungen

stellen muss. Außerdem ist nicht auf die Geschichte der Proben von der Entnahme bis zur Analytik eingegangen; Information über die „chain of custody“ sind nicht gegeben.

Insgesamt ist der Mangel an Information zwar bedauerlich, er ist aber kein Argument, sich mit den neuen Daten nicht eingehend zu befassen.

4 Alphaspektrometrische Untersuchungen durch V.N. Mironov/Minsk

Zu Frage 4. Probenpräparation:

Nach Ausführungen von Schmitz-Feuerhacker, Gabriel und Pflugbeil vom 31.3.2006 [8] wurden an Proben aus (vermutlich) der durch ZDF veranlassten Probennahme durch den Geologen W. Fuhrmann vom GEOLAB+GEOEXPLORATION eine Sortierung der Bodenproben nach Korngrößen vorgenommen. Das Ergebnisblatt [9] bestätigt dies und nennt zwei Fraktionen, die aus Proben unbekannter Gesamtmasse gewonnen wurden: eine „*feine*“ Fraktion mit Korngrößen < 0,122 mm und eine „*grobe*“ Fraktion mit Korngrößen zwischen 0,122 mm und 0,466 mm. In der Ergebnistabelle taucht noch eine nicht näher spezifizierte Fraktion „*mittel fein*“ auf. Die Anteile der Fraktionen an den Gesamtproben wurden nicht spezifiziert. Die Massen der Analysenproben sind ebenfalls nicht angegeben.

Zu Frage 5. Welche Messmethode(n) wurde(n) gewählt und aus welchen Gründen?

Die Analyse der radioaktiven Inhaltsstoffe erfolgte nach den Unterlagen durch V.N. Mironov von der Internationalen Sacharow Umwelt Universität in Minsk mit Hilfe der Alpha-Spektrometrie mit Halbleiterdetektoren. Dazu sind ein chemischer Aufschluss der Proben und eine radiochemische Abtrennung erforderlich. Das Ergebnisblatt [9] führt dazu lediglich aus „*mit Tracer, Partikel chemisch aufgeschlossen*“. Welche Trennverfahren und welche Tracer zur Bestimmung der chemischen Ausbeute benutzt wurden, ist nicht gesagt. Auch sind keine Aussagen über die Isotopreinheit der verwendeten Tracer gemacht.

Zu Frage 6. Ergebnisse

Für jeweils drei Proben von der „*Waldschule*“ und vom „*Kriegerdenkmal*“ sind Aktivitätskonzentrationen in Bq kg^{-1} für die Radionuklide Th-228, Th-230, Th-232, U-234, U-235, U-238, Pu-238 und Pu-239+Pu-240 angegeben.

Die angegebenen Messunsicherheiten der Aktivitätskonzentrationen sind – wie bei der Alpha-Spektrometrie nicht ungewöhnlich – teilweise sehr hoch (relative Unsicherheiten bis zu knapp 50 %). Für zwei Proben vom Kriegerdenkmal sind keinerlei Messunsicherheiten angegeben. Es ist nicht dokumentiert, ob es sich bei den angegebenen Messunsicherheiten um Standardmessunsicherheiten nach dem „ISO Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement“ [12] handelt und welche Quellen der Unsicherheit berücksichtigt wurden.

Das Ergebnisblatt [9] nennt keine Ergebnisse einer Blindwertanalyse und macht keine Aussagen über Normalwertanalysen.

Insgesamt erfüllt das Ergebnisblatt [9] im Hinblick auf die experimentellen Befunde in keiner Weise die an einen Prüfbericht zu stellenden Anforderungen.

Zu Frage 7. Gehalt der Kügelchen an Transuranen und Aktiniden

Zu Messergebnissen ohne jegliche Unsicherheitsangabe nehme ich grundsätzlich nicht Stellung. Die entsprechenden Proben werde ich nicht weiter diskutieren.

Für jeweils drei Proben von der „*Waldschule*“ und vom „*Kriegerdenkmal*“ sind Aktivitätskonzentrationen in Bq kg^{-1} für die Radionuklide Th-228, Th-230, Th-232, U-234, U-235, U-238, Pu-238 und Pu-239+Pu-240 angegeben. Es werden auf dem Ergebnisblatt [9] keine Angaben gemacht, ob es sich dabei um Kügelchen oder lediglich um Korngrößenfraktionen von Bodenproben handelt.

Es kann wegen fehlender Angaben über die Masse der Analysenproben nicht auf die Repräsentativität der Ergebnisse für makroskopische Bodenproben geschlossen werden. Sie sollen dennoch hier diskutiert werden, als ob sie repräsentativ für makroskopische Komponenten wären.

Die Ergebnisse für Th-228 und Th-232 sind innerhalb der angegebenen Unsicherheiten konsistent. Mit Ausnahme der zweiten Probe „*Waldschule fein*“ sind die Th-Gehalte unauffällig. Für letztere werden identische Aktivitätskonzentrationen für Th-228 und Th-232 von jeweils $210 \pm 80 \text{ Bq kg}^{-1}$ angegeben. Diese Th-Gehalte sind hoch, aber z.B. für feinkörnige klastische Sedimente in Flussauen auch nicht ungewöhnlich.

Die Aktivitätskonzentrationen für Th-230 sind separat zu betrachten, da Th-230 der U-238-Zerfallsreihe angehört. Auch diese Aktivitätskonzentrationen sind unauffällig mit Ausnahme der zweiten Probe „*Waldschule fein*“. Die Aktivitätskonzentration dieser Probe für Th-230 von $210 \pm 80 \text{ Bq kg}^{-1}$ ist nicht im Gleichgewicht mit denen der Uran-Isotope. Dies kann mit dem Verhalten von Thorium in wässrigen Systemen und Sedimenten erklärt werden. Für die Probe „*Kriegerdenkmal fein*“ wird eine Th-230 Aktivitätskonzentration von $650 \pm 30 \text{ Bq kg}^{-1}$ berichtet. Dieser Wert ist angesichts der niedrigen Uran-Aktivitätskonzentrationen sehr hoch und nicht durch die Urangelhalte der Analysenprobe zu erklären.

Die Aktivitätskonzentrationen der Uranisotope U-234, U-235 und U-238 liegen mit Ausnahme der zweiten Probe „*Waldschule fein*“ im Bereich Normalwerte in Böden. Es ist hier darauf hinzuweisen, dass in Böden die Tendenz besteht, dass feinkörnigere Fraktionen höhere Gehalte an natürlichen Radionukliden haben; vgl. hierzu die Berechnungsgrundlagen Bergbau [10]. Auch Aktivitätskonzentrationen von $230 \pm 50 \text{ Bq kg}^{-1}$, wie für U-234 in dieser Probe berichtet, sind nicht außergewöhnlich.

Die Aktivitätskonzentrationen von Pu-238 und Pu-239+240 sind in der zweiten Probe „*Waldschule fein*“ und in der Probe „*Waldschule grob*“ mit $11 \pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ bzw. $3,2 \pm 1,5 \text{ Bq kg}^{-1}$ für Pu-238 und $36 \pm 10 \text{ Bq kg}^{-1}$ bzw. $11 \pm 5 \text{ Bq kg}^{-1}$ für Pu-239+240 außergewöhnlich hoch. Hier ist die ungelöste Frage der Repräsentativität der Analysenproben für makroskopische Bodenkomponenten entscheidend für eine Bewertung. Da Plutonium an Partikel gebunden abgelagert wird, können in kleinen Analysenproben hohe Inhomogenitäten der Aktivitätskonzentrationen auftreten.

Die Frage der Herkunft der Plutonium-Isotope kann nur anhand von Isotopen- oder Aktivitätsverhältnisse diskutiert werden. Gleiches gilt für die Frage nach angereichertem oder abgereichertem Uran in den Proben.

Auf dem mir vorliegenden Ergebnisblatt [9] werden unter dem Stichwort „*Auswertung Mironov Ergebnisse*“ für die Proben, für deren Ergebnisse Messunsicherheiten angegeben wurden, Aktivitätsverhältnisse U-235/U-238 und Pu-238/(Pu-239+Pu-240) angegeben. Es wird dazu im Er-

gebnisblatt [9] ausgeführt: „Das Gewichtverhältnis von U-235/U-238 im natürlichen Gemisch von 0.7 % entspricht einem Aktivitätsverhältnis von 4,66 %. Plutonium: im alten Bombenfallout beträgt das Verhältnis der Aktivitäten von Pu238/Pu(239+240) = 0,03 bis 0,04. Bombenfallout enthält jedoch kein Thorium. Zwei Proben enthalten abgereichertes Uran, die anderen angereichertes Uran. Bei letzteren ist der Pu 238-Anteil gegenüber Bombenfallout stark erhöht.“

Für Uran ist Folgendes anzumerken:

- Natürliches Uran besteht aus drei Isotopen, U-238, U-235 und U-234 mit den Isotopenhäufigkeiten 99,2745 %, 0,7200 % bzw. 0,0055 %. Im radioaktiven Gleichgewicht sind die Aktivitäten von U-238 und U-234 gleich, $(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat} = 1$. Das Aktivitätsverhältnis von U-235 zu U-238 beträgt $(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat} = 0,0466$. Wird durch Isotopentrennung U-235 angereichert, wird U-234 noch stärker angereichert. Im abgereicherten Uran ist neben einer Verringerung der Häufigkeit oder der relativen Aktivität von U-235 eine noch stärkere Verringerung für U-234 zu erwarten. Das heißt, dass für mit U-235 angereichertes Uran die Verhältnisse

$$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat} < (A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$$

und für bzgl. U-235 abgereichertes Uran die Verhältnisse

$$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat} > (A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$$

sein müssten.

- Die Ergebnisse im Ergebnisblatt [8] für die drei Uranisotope folgen dieser Systematik nicht; sie sind völlig inkonsistent. Für die als mit angereichertem Uran bezeichneten Proben (zweite Probe „Waldschule fein“ und „Waldschule grob“) stellt sich dies wie folgt dar.

	$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat}$	$(A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$
„Waldschule fein“	11 ± 6	1,2 ± 0,4
„Waldschule grob“	21 ± 12	1,3 ± 0,6

Diese Proben erfüllen nicht die Bedingung für angereichertes Uran

$$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat} < (A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$$

Für die als mit abgereichertem Uran bezeichneten Proben (erste Probe „Waldschule fein“ und „Kriegerdenkmal fein“) stellt sich dies wie folgt dar.

	$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat}$	$(A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$
„Waldschule fein“	0,18 ± 0,04	0,57 ± 0,18
„Kriegerdenkmal fein“	0,19 ± 0,06	0,43 ± 0,13

Diese Proben erfüllen nicht die Bedingung für abgereichertes Uran

$$(A_{U-235}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-235}/A_{U-238})_{U-nat} > (A_{U-234}/A_{U-238})_{Probe}/(A_{U-234}/A_{U-238})_{U-nat}$$

- Die Ursache für diese Inkonsistenz der Ergebnisse für die Uran-Isotope kann nur vermutet werden, vgl. hierzu auch Kap. A 3.2.3 in [1]. Zusätzlich kann die Alpha-Spektrometrie von Uran-Isotopen durch interferierende Alpha-Energien anderer natürlicher Radionuklide gestört werden. So sind anscheinende Abweichungen von „natürlichen Aktivitäts- oder Isotopenverhältnissen“ bei der Alpha-Spektrometrie (und der Gamma-Spektrometrie)

von Uran-Isotopen nicht ungewöhnlich. Ohne Ergebnisse von Blindwert- und Normalwertanalysen sind sie nicht zu bewerten. Generell kann man aber feststellen, dass nur mit massenspektrometrischen Verfahren präzise Aussagen über Isotopenverhältnisse gemacht werden können.

Für Plutonium ist Folgendes anzumerken:

- Plutonium aus Bombenfallout und aus Kernreaktoren kann anhand der Aktivitäts- oder Isotopenverhältnisse deutlich unterschieden werden. Geeignet ist hier das Aktivitätsverhältnis $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$. Für alten Bombenfallout aus den 1960er Jahren liegt dieses Aktivitätsverhältnis heute bei 0,02. In Kernreaktoren ist das Aktivitätsverhältnis $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ vom eingesetzten Brennstoff und dem jeweiligen Abbrand abhängig. Für den Fallout aus dem Unfall von Chernobyl lag das Aktivitätsverhältnis $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ bei $0,55 \pm 0,04$. In durch den Unfall von Chernobyl hoch kontaminierten Gebieten lässt sich der Anteil alten Bombenfallouts und das aus dem Unfall stammende Plutonium mittels Alpha-Spektrometrie gut von einander unterscheiden [11].
- Die im Ergebnisblatt [9] sind $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ Aktivitätsverhältnisse zwischen 0,026 und 0,31 angegeben. Berechnet man die aus den angegebenen Unsicherheiten der Aktivitätskonzentrationen die Unsicherheiten der Aktivitätsverhältnisse, erhält man für die $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ Aktivitätsverhältnisse:
 - „Waldschule fein“: $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240}) = 0,039 \pm 0,013$
 - „Waldschule fein“: $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240}) = 0,31 \pm 0,16$
 - „Waldschule grob“: $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240}) = 0,29 \pm 0,19$
 - „Kriegerdenkmal fein“: $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240}) = 0,026 \pm 0,008$.
- Die $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ Aktivitätsverhältnisse für die erste Probe „Waldschule fein“ und für „Kriegerdenkmal fein“ sind eindeutig als alter Bombenfallout zu identifizieren. Die $A(\text{Pu-238})/A(\text{Pu-239+Pu-240})$ Aktivitätsverhältnisse für die zweite Probe „Waldschule fein“ und für die Probe „Waldschule grob“ lassen wegen der großen Unsicherheit von mehr als 50 % keine Entscheidung zwischen altem Bombenfallout und Fallout aus dem Unfall von Chernobyl zu, sind aber mit altem Bombenfallout verträglich.

Zu Frage 8. Herkunft und Zusammensetzung der in Bodenproben aus dem Untersuchungsgebiet enthaltenen Kügelchen

Hierzu können aus den dokumentierten Befunden dieser Untersuchung keine Aussagen gemacht werden.

Zu Frage 9. der Qualität der ermittelten Ergebnisse und der Dokumentation der Untersuchungen und Ergebnisse

Die Qualität der Ergebnisse kann wegen Fehlens von Ergebnissen für Blindwertanalysen und Normalwertanalysen sowie wegen fehlender Angaben zu den Messunsicherheiten nicht beurteilt werden.

Die absoluten Aktivitätskonzentrationen werden in Bq kg^{-1} ohne Angabe der Massen der Analysenproben dokumentiert. Eine Beurteilung, ob es sich um Aktivitätskonzentrationen für mikro-

skopisches oder makroskopische Bodenbestandteile handelt, ist daher nicht möglich. Ebenso kann nicht beurteilt werden, ob die Ergebnisse für größere Bodenbereiche repräsentativ sind.

Die angegebenen Messunsicherheiten sind (wie vielfach bei alpha-spektrometrischen Messungen) hoch. Bei hinreichender Masse der Analysenproben können aus solchen Messungen jedoch Ergebnisse gewonnen werden, die als repräsentativ für Umweltmaterialien angesehen werden können und die zur Abschätzung möglicher Strahlenexpositionen geeignet sind. Man kann mit alpha-spektrometrischen Messungen von Umweltproben durch Immissionsmessungen und radioökologische Modellierung potentielle Strahlenexpositionen von weniger als 0,01 mSv pro Jahr erfassen.

Für präzise Bestimmungen von Isotopenverhältnissen ist die Alpha-Spektrometrie (wie auch die Gamma-Spektrometrie) im Allgemeinen nicht geeignet. Hierfür sind massenspektrometrische Verfahren erforderlich.

Zu Frage 10. der Eignung von Analyseverfahren für die Ermittlung von Aktivitätskonzentrationen und Isotopen- und Aktivitätsverhältnissen

Das Messverfahren der Alpha-Spektrometrie nach radiochemischer Aufarbeitung ist für die Bestimmung von absoluten Aktivitätskonzentrationen geeignet. Die relativ hohen Unsicherheiten sind für die niedrigen Probenaktivitäten bei diesem Verfahren typisch, schränken jedoch die Aussagefähigkeit im Hinblick auf radioökologische Modellierungen der zu erwartenden Strahlenexposition nicht ein. Dies ist im Hinblick auf die Repräsentativität der Proben kritischer zu bewerten. Man kann deshalb bei der Bewertung nur konservativ Repräsentativität ausgehen und damit eine abdeckende Betrachtung der zu erwartenden Strahlenexpositionen durchführen.

Wie auch in der SSK-Stellungnahme [1] detailliert diskutiert, sind sowohl Alpha- als auch Gamma-Spektrometrie zu Bestimmung von Uran-Isotopenverhältnissen bzw. den zugehörigen Aktivitätsverhältnissen nur bedingt geeignet. Bei der Gamma-Spektrometrie stören schwer beherrschbare spektroskopische Interferenzen die Messung, bei der Alpha-Spektrometrie begrenzen niedrige Ereigniszahlen und eventuell mangelnde Abtrennung von Radioelementen der natürlichen Zerfallsreihen die Genauigkeit der Bestimmung.

Auch die Bestimmung von Plutonium-Aktivitätsverhältnissen in Umweltproben mittels Alpha-Spektrometrie nach radiochemischer Aufarbeitung ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. Eine Herkunftsanalyse ist bei großen Unterschieden der in einer Probe enthaltenen Plutonium-Anteile zwar möglich [11], stößt aber bei geringen Beimengungen von Plutonium unterschiedlicher Herkunft schnell an ihre Grenzen.

Die Methoden der Wahl für zuverlässige Isotopenanalysen sind entweder die doppelfokussierende Multikollektor ICP-MS für Uran und Plutonium oder die Resonanzionisations-Massenspektrometrie für Plutonium.

Zu Frage 11. der Dosisrelevanz von Radioaktivitätsgehalten in mikroskopischen und makroskopischen Umweltproben.

Unter der Annahme, dass die Aktivitätskonzentrationen im Ergebnisblatt [8] repräsentativ für makroskopische Anteile des Bodens wären, kann man aus den Aktivitätskonzentrationen hypothetische Strahlenexpositionen abschätzen. Dazu kann man nach Erfahrungen aus der Ukraine, z.B. [11], annehmen, dass das Plutonium sich noch in den obersten 5 cm des Bodens befindet.

Damit ergäben sich Depositionsdichten von 0,8 bzw. 2,7 kBq m⁻². Ungeachtet des Umstandes, dass eine derart hohe, großräumige Umweltkontamination mit Plutonium von den Immissionsmessungen mit Sicherheit erfasst würde, kann man unter der Annahme eines Menschen, der auf einem Boden mit den Pu-Aktivitätskonzentrationen der zweiten Probe „Waldschule fein“ als ländlicher Selbstversorger lebt, mit aggregierten Dosiskoeffizient von 7,1 μSv kBq⁻¹ m² für Pu-238 und 4,3 μSv kBq⁻¹ m² für Pu-239/Pu-240 [11] die hypothetischen jährlichen Strahlenexpositionen zu etwa 0,01 mSv abschätzen. Diese hypothetische Strahlenexposition wäre aber klein gegenüber der natürlichen Strahlenexposition und ihrer Schwankungsbreite.

5 Massenspektrometrische Untersuchungen durch A. Gerdes/Frankfurt

Zu Frage 4. Probenpräparation

In der ersten Unterlage von A. Gerdes [5] wird über die Analyse einer Baumrinde, eine Staubprobe und sechs Bodenproben aus der Elbmarschteil berichtet. Die Massen der im Feld entnommen Proben wird nicht genannt. Die Massen der Analysenproben lagen zwischen 80 mg (Baumrinde) und 1.6 g der homogenisierten Proben. Es wurde die Fraktion kleiner 1 mm untersucht. Die Proben wurden einem detailliert beschriebenen Aufschluss- und Trennverfahren unterzogen.

In der zweiten Unterlage von A. Gerdes [6] werden noch detaillierter Angaben über die Probenpräparation gemacht. Es heißt dort: *„... wurden die Proben in 4 Korngrößenfraktionen getrennt und ein repräsentativer Anteil davon bei unterschiedlich hohen Temperaturen und Drücken und mit verschiedenen Säuregemischen aufgeschlossen. Ziel war es nachzuweisen, ob und inwieweit gewisse radioaktive Bestandteile (U, Th und Pu) in einzelnen Korngrößen angereichert sind und ob sie bei bestimmten Aufschlussmethoden bevorzugt oder auch nicht in Lösung gehen. Zusätzlich wurden von dem am häufigsten vorkommenden Partikelarten (1. metallisch-grau und magnetisch; 2. unmagnetisch, grau-schwarz und glatt) jeder Probe jeweils ca. 80 bis >400 Kugeln separiert, vollständig mittels verschiedener Säuregemische bei >180°C aufgeschlossen und deren Uran-, Thorium- und Plutoniumkonzentrationen und Isotopenverhältnisse massenspektrometrisch analysiert.*

Im Weiteren wurden unter dem Mikroskop aus den verbleibenden Siebfraktionen alle Arten von kugeligen Partikeln (0,5 bis 0,01 mm groß) herausgepickt, in Harz eingebettet und zur Hälfte angeschliffen, und anschließend mit dem Forschungsmikroskop, der Elektronenstrahlmikrosonde und der Laserablation-ICP-Massenspektrometrie untersucht.“

Auf die im letzten Absatz genannten Untersuchungen mit Laserablation-ICP-Massenspektrometrie beziehen sich die Daten der Unterlage [7], in der keine weiteren Angaben zur Probenpräparation enthalten sind.

Die beschriebenen Probenpräparations- und Trennverfahren entsprechen üblicher Vorgehensweise und dem Stand der Wissenschaft. Die Dokumentation der Probenpräparation in den mir vorliegenden Unterlagen ist nicht so vollständig, dass ich sie im Detail beurteilen könnte. Aber es sind auch Ausführungen zur Qualitätskontrolle gemacht. Es heißt z.B. in [5]: *„Bei den Isotopenmessungen wurden verschiedene internationale „Standards“ mit zertifizierten Isotopenverhältnissen als Referenz und zur Kontrolle mitanalysiert. Bei der Auswertung der Rohdaten wurden verschiedene Korrekturen - Massenfraktionierung, Instrumentdrift, Ionenzähler: Faraday-cup Gain etc.- durchgeführt, die standardmäßig bei Isotopenuntersuchungen mittels eines Multikollektor-ICP-Massenspektrometer erfolgen.“*

Diese Vorgehensweise entspricht guter Laborpraxis. In [5] sind die Ergebnisse für eine Blindwertanalyse (GK 24) und eine nicht näher spezifizierte Kontrollprobe (GK 25) angegeben. Die übrigen Ergebnisse von Qualitätskontrollanalysen liegen mir nicht vor.

Zu Frage 5. Welche Messmethode(n) wurde(n) gewählt und aus welchen Gründen?

Die abgetrennten chemischen Fraktionen wurden über die Isotopenverdünnungsanalyse mittels eines Multikollektor-ICP-Massenspektrometers gemessen.

Das gewählte Analysenverfahren entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik und gehört zu den präzisesten und empfindlichsten Verfahren, die für Messungen von Isotopenverhältnissen und Konzentrationen derzeit verfügbar sind. Die Messverfahren sind für den Messzweck geeignet. Aber auch sie stoßen bei extrem geringen Probenmassen z.B. bei der Analyse von Plutonium an ihre Grenzen. Vgl. hierzu die Diskussion von Nachweisgrenzen in [6]. Allerdings wird in den mir vorliegenden Unterlagen nichts dazu gesagt, auf welcher Grundlage die Nachweisgrenzen bestimmt wurden.

Die abgetrennten Kügelchen wurden in Einzelanalysen mittels Laserablation-ICP-Massenspektrometrie untersucht. Auch dieses Analysenverfahren gehört zum Besten, was man derzeit für derartige Untersuchungen anwenden kann. Es erlaubt die Bestimmung einer großen Anzahl von Elementen in geringsten Probenvolumina [7].

Zu Frage 6. Ergebnisse

Bestimmt wurden über die Isotopenverdünnungsanalyse mittels eines Multikollektor-ICP-Massenspektrometers die Konzentrationen und Verhältnisse der Isotope U-234, U-235, U-236, U-238, Pu-239, Pu-240 und Pu-241 in verschiedenen Umweltproben, darunter Böden und kugelige Partikel [5,6]. Mittels Laserablation-ICP-Massenspektrometrie wurden einzelne Kügelchen auf bis zu 30 Elemente, darunter Th und U, untersucht [7].

In der ersten Unterlage von A. Gerdes [5] wird über die Analyse einer Baumrinde, eine Staubprobe und sechs Bodenproben aus der Elbmarschteil berichtet. Es werden Angaben über die Ergebnisse einer Blindwertanalyse und einer Kontrollprobe gemacht. In der zweiten Unterlage von A. Gerdes [6] werden Ergebnisse für Bodenfraktionen und kugelige Partikel für die Konzentrationen und Verhältnisse der Isotope Pu-239, Pu-240 und Pu-241 (Tabelle 1), Th-230 und Th-232 (Tabelle 2) sowie U-234, U-235, U-236 und U-238 (Tabelle 3) aufgeführt.

Messunsicherheiten werden für Isotopenverhältnisse und Konzentrationen jeweils global als $\pm 2\sigma$ Unsicherheiten angegeben. Es ist nicht dokumentiert, ob es sich bei den angegebenen Messunsicherheiten um Standardmessunsicherheiten nach dem „ISO Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement“ [12] handelt und welche Quellen der Unsicherheit berücksichtigt wurden.

In der ersten Unterlage von A. Gerdes [5] liegen alle Uran-Konzentrationen im Verhältnis zum normalen Vorkommen von Uran in Böden relativ niedrig. Die Konzentrationen gehen bis zu $1 \mu\text{g g}^{-1}$. Die Isotopenverhältnisse entsprechen alle der Zusammensetzung natürlichen Urans. Die Aktivitätskonzentrationen von Plutonium sind ebenfalls im Bereich dessen, was für Norddeutschland aufgrund des Bombenfallouts erwartet werden kann. Die Plutonium-Isotopenverhältnisse entsprechen ebenfalls diesem Szenario.

Zitat aus [5]: „Die gemessenen $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ aller Proben sind innerhalb der angegebenen Unsicherheit identisch mit dem mittleren Wert für den Globalfallout (Atomwaffentest vor 1979; $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} \sim 0,18$). Einen kleinen Anteil von Chernobyl-Fallout (0,38) lässt sich anhand der Werte vermuten, aber aufgrund analytischer Schwierigkeiten nicht eindeutig belegen. Die Anwesenheit von ^{241}Pu ließ sich nur in der Probe GK4 eindeutig nachweisen. Das $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ Verhältnis liegt bei 0,0040 ($\pm 0,0014$) bzw. 0,0077 ($\pm 0,0010$) (erste bzw. zweite Messreihe) und somit höher als der typische Wert für den Globalfallout von 0,0017. Diese Werte ließen sich mit einem Anteil von etwa 5 bzw. 15% Chernobyl-Fallout (0,043) erklären.“

Dem ist nichts hinzuzufügen. Dieser Einschätzung schließe ich mich an. Es ist aber zu betonen, dass die extreme Empfindlichkeit und Präzision der benutzten Analyseverfahren den Analysergebnissen ein außergewöhnliches Gewicht verleiht.

In der zweiten Unterlage von A. Gerdes [6] sind einige höhere Uran-Konzentrationen (bis zu $4,7 \mu\text{g g}^{-1}$) aufgeführt. Aber auch diese entsprechen normalen Vorkommen in Böden, selbst in Gegenden ohne erhöhte geologische Vorkommen von Uran. Die Isotopenverhältnisse U-235/U-238, U-234/U-238 und Th-230/U-238 sind ebenfalls normal. Auch die U-236/U-238 Verhältnisse sind unauffällig. Die Ergebnisse für Plutonium in [6] sind in Einklang mit dem zu [5] oben ausgeführten. Die Unterlage [6] bietet auch Ergebnisse für Thorium-Isotope, die als in Bezug auf die Konzentrationen als niedrig und auf die Isotopenverhältnisse als normal einzustufen sind.

Zitat aus [6]: „Die gefundenen Uran-, Thorium- und Plutoniumkonzentrationen sind alle als unauffällig bzw. niedrig einzustufen. Sie sind vergleichbar zu typischen Konzentration in Böden und Gesteinen Deutschlands.“

Auch dieser Einschätzung schließe ich mich an.

In der Unterlage [7] werden sieben verschiedene Typen kugeliger Partikeln angesprochen; drei Gruppen werden als gerundete Minerale, vier Gruppen als gerundete Partikel („Kügelchen“) bezeichnet. Die Typen werden bei den gerundeten Mineralen als Eisenoxide (M1), verschiedene Silikate (M2) und Zirkone, bei den gerundeten Partikeln als Fe-Oxide (K1, magnetisch, Flugaschen), organisches Material (K2), organisches Material plus etwas mehr Eisen (K3 ~ K2), organisches Material (K4, Pflanzensamen) eingestuft. Die Analyseergebnisse zeigen die ganze Variabilität der Vorkommen der Elemente auf mikroskopischer Ebene, bei gleichzeitig klassentypischen Elementverteilungsmustern. Auffällig sind z.B. die hohen Uran- und Thoriumgehalte der Zirkone, eine wissenschaftlich wohlbekanntere Erscheinung. Insgesamt zeigen sich keine Teilchen, die in Bezug auf die Uran- oder Thoriumgehalte auf menschlichen Einfluss hinweisen. Für die Aktivitätsgehalte makroskopischer Bodenbestandteile sind sie nicht von Bedeutung.

Zitat aus [6]: „Die Thorium-, Uran- und Plutoniumkonzentrationen der sphärischen Partikel sind vergleichbar niedrig, wie die der verschiedenen Siebfraktionen. Aufgrund der geringen Häufigkeit dieser Partikel in den Bodenproben (< 0.1%) haben sie also keinen Einfluss bzw. keine Bedeutung für die Gesamtkonzentration diese Elemente und ihrer Isotope in den Böden der Elbmarsch.“

Dieser Einschätzung schließe ich mich ebenfalls an.

Zu Frage 7. Gehalt der Kügelchen an Transuranen und Aktiniden

Es ergeben sich keine Hinweise auf außergewöhnliche Vorkommen von Transuranen und Aktiniden in den Kügelchen. Selbst die oberen Abschätzungen der Plutonium-Aktivitätskonzentrationen

trationen in [6] deuten nicht auf Transurane in Brennstoffpartikeln und ebenfalls nicht auf dosisrelevante Anteile von Plutonium in den Kügelchen hin.

Zu Frage 8. Herkunft und Zusammensetzung der in Bodenproben aus dem Untersuchungsgebiet enthaltenen Kügelchen

Die beobachteten sieben verschiedenen Typen kugeliger Partikel können alle als natürlich vorkommend betrachtet werden. Hinweise auf eine Herkunft aus Prozessen der Kerntechnik oder -forschung ergeben sich nicht.

Zu Frage 9. der Qualität der ermittelten Ergebnisse und der Dokumentation der Untersuchungen und Ergebnisse

Wenn auch, wie oben angesprochen, in den mir vorliegenden Unterlagen [5-7] einige Fragen der Dokumentation offen bleiben, so zeigen Ergebnisse und Dokumentation insgesamt doch eine außergewöhnlich hohe Qualität.

Zu Frage 10. der Eignung von Analysenverfahren für die Ermittlung von Aktivitätskonzentrationen und Isotopen- und Aktivitätsverhältnissen

Die verwendeten Analysenmethoden entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Sie sind für den Messzweck geeignet. Es ist nach meiner Einschätzung derzeit nicht besser zu machen.

Zu Frage 11. der Dosisrelevanz von Radioaktivitätsgehalten in mikroskopischen und makroskopischen Umweltproben.

Auch in dieser Untersuchung bleibt die Frage nach der Dosisrelevanz der Ergebnisse offen, da keine Aussagen über die Repräsentativität der Ergebnisse für makroskopische Bodenbestandteile oder -flächen gemacht werden können. Es ist festzustellen, dass man für eine zuverlässige Modellierung einer potentiellen Strahlenexposition Mittelwerte und Verteilungen der Aktivität in den Umweltmedien benötigt. Mit den insgesamt vorliegenden Ergebnissen sind allerdings obere Abschätzungen potentieller Expositionen möglich. Die oben bereits vorgenommene sehr konservative Einschätzung in Bezug auf potentielle Strahlenexpositionen bleibt daher bestehen.

In diesem Zusammenhang sind hier noch einige allgemeine Anmerkungen zur Strahlenexposition der Bevölkerung in der Elbmarsch anzufügen.

Abschätzungen der Strahlenexpositionen der Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks Krümmel und des Forschungszentrums GKSS sind in der Leukämie- und Lymphomstudie mit AVV zu § 47 StrlSchV durchgeführt worden. Diese Daten müssen als sehr konservativ angesehen werden, da die Berechnungsverfahren der AVV [13] für eine realistische Dosisermittlung nicht geeignet sind. Sie würden zu massiven Risikoüberschätzungen führen. Dies wurde auch vom internationalen Gutachterausschuss [14] zur Leukämie- und Lymphomstudie als Kritik angeführt.

Auch die jährlichen Strahlenexpositionen, die im Parlamentsbericht der Bundesregierung für die Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung des Kernkraftwerks Krümmel und des

Forschungszentrums Geesthacht angegeben werden, sind als konservativ anzusehen. Sie sind insgesamt unauffällig, z.B. weniger als 0,004 mSv im Jahr 2000 [15].

Durch Immissionsmessungen nach den Anforderungen der Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen [16] sind jährliche Strahlenexpositionen von 0,01 mSv nachweisbar. Aus den bisherigen Immissionsmessungen ist kein Hinweis dafür ableitbar, dass die Strahlenexpositionen durch Ableitungen aus dem Kernkraftwerk Krümmel oder dem Forschungszentrum GKSS die in den Parlamentsberichten genannten, übersteigen würden.

In Bezug auf geforderte unbemerkte Unfallereignisse, die zu die Leukämiehäufung erklärenden Strahlenexpositionen geführt haben könnten, ist anzumerken, dass mir auf Grund physikalisch/chemischer Randbedingungen keine Freisetzungsmöglichkeit kurzlebiger Radionuklide vorstellbar ist, die nicht ihre Spuren mit vergesellschafteten langlebigen Radionukliden in der Natur hinterlassen würde. Der Unfall von Chernobyl und andere nukleare Ereignisse haben das in der Vergangenheit deutlich gemacht. Ein Ereignis, dass selbst vor mehreren Jahrzehnten zu signifikanten Strahlenexpositionen durch kurzlebige Radionuklide geführt hätte, müsste angesichts der existierenden technischen und physikalisch/chemischen Randbedingungen auch heute noch durch Immissionsmessungen mit hoher Wahrscheinlichkeit nachweisbar sein. Hinweise darauf liefern die Ergebnisse bisheriger Immissionsmessungen nicht.

6 Schlussfolgerung

Die Schlussfolgerungen der SSK-Stellungnahme [1] mache ich mir ohne Einschränkung zu Eigen. Ich wiederhole sie daher hier:

„Die Behauptung der ARGE PhAM, dass in der Umgebung von GKSS und KKK anthropogene Radionuklide vorliegen, die nicht auf den Fallout der oberirdischen Kernwaffentests oder des Unfalls in Tschernobyl zurückgeführt werden können, ist wissenschaftlich durch Messungen nicht belegt. Aus der Vielzahl der vorliegenden Messungen ergeben sich keine Hinweise auf das Vorkommen von angereichertem Uran und auf das erhöhte Vorkommen von Transuranen und Spalt- oder Aktivierungsprodukten in der Elbmarsch. Die Messungen ergeben auch keine Hinweise auf ein lokales oder gar großräumiges Vorkommen kernbrennstoffhaltiger Kügelchen. Insgesamt ergibt sich kein Hinweis auf erhöhte Strahlenexpositionen von Personen in der Elbmarsch und damit kein Hinweis auf Radioaktivität als Ursache für die dort beobachtete Leukämiehäufung.“

Diese Schlussfolgerungen gelten für mich auch angesichts der neuen experimentellen Daten.

Hannover, 31.03.2007

Prof. Dr. Rolf Michel

7 Unterlagen und Literatur

- [1] SSK, Bewertung von Messungen der ARGE PhAM zur Radioaktivität in der Elbmarsch Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 183. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 14.02.2003, www.ssk.de.
- [2] O. Wassermann, Erkenntnisse der schleswig-holsteinischen Fachkommission Leukämie im Zeitraum 1993 - 2004 zur Ursache der in der Nahumgebung der Geesthachter Atomanlagen aufgetretenen Leukämiehäufung bei Kindern, Abschlussbericht des Vorsitzenden Univ.-Prof. (em.) Dr. Otmar Wassermann, 15.09.2004, 12 Seiten.
- [3] I. Schmitz-Feuerhake, H. Dieckmann, W. Hoffmann, E. Lengfelder, S. Pflugbeil, A.F. Stevenson, The Elbmarsch leukemia cluster: are there conceptual limitations in controlling immision from nuclear establishments in Germany? Arch. Environ. Contam. Toxicol. 49, 589 – 600 (2005).
- [4] W. Hoffmann, C. Terschüren, W. Schill, H. Pohlabein, E. Greiser, Norddeutsche Leukämie- und Lymphomstudie (NLL); Ergebnisbericht - Kurzfassung -; Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein und des Niedersächsischen Ministeriums für Soziales, Frauen, Familie und Gesundheit; Bremer Institut für Präventionsforschung und Sozialmedizin (BIPS) Bremen, April 2003.
- [5] A. Gerdes, Brief an Bürger gegen Leukämie in der Elbmarsch, c/o Susane Zeyn, Elbuferstraße 86, 21436 Marschacht, 20.03.2005, 4 Seiten.
- [6] A. Gerdes, Bericht zu den isotopengeochemischen Untersuchungen an Bodenproben und darin enthaltenen sphärischen Partikel aus der Elbmarsch: Teil 1, Isotopenverdünnungsanalyse mittels ICP-Multikollektor-Massenspektrometrie, 25.08.2006, 16 Seiten.
- [7] Anonymus, Vortragsfolien ohne Titelblatt, teilweise mit Logo „Mineralogie Frankfurt“ versehen, 12 Seiten, undatiert.
- [8] Anonymus, Ergebnisblatt zu den alpha-spektrometrischen Untersuchungen von V.N. Mirovov, Überschrift Anhang C, 1 Seite, undatiert.
- [9] I. Schmitz-Feuerhake, H.-W. Gabriel, S. Pflugbeil, Neue Untersuchungen zum Dosis-Wirkungs-Zusammenhang in der Ursachenforschung zu den Leukämiefällen in der Elbmarsch, Berlin, 31.3.2006
- [10] BMU, Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen-Bergbau), Empfehlung der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 155. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 02./03.07.1998, durch BMU und BfS überarbeitete Fassung, Stand 30.07.1999
- [11] S. Hippler, Strahlenexposition durch anthropogene Actinoide in der nördlichen Ukraine, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2006.
- [12] ISO, ISO Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement, Genf, 1995.
- [13] Bundesministerium des Innern, Bundesministerium für Umwelt N und R. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu Paragraph 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Vom 21. Februar 1990. Bundesanzeiger 1990; Nr. 64a, 31. März 1990.
- [14] U. Ackermann-Liebrich, Statement of International Expert Group invited to the Workshop in Kiel on April 8th and 9th, 2. Mai 2003.

- [15] BMU (2001) Parlamentsbericht, Unterrichtung durch die Bundesregierung, Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2000, Deutscher Bundestag, Drucksache 14/690514. Wahlperiode, 10.09.2001
- [16] Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, GMBI. Nr. 9/10 (1996), S. 229ff, 20. März 1996

Anlage 1:

Strahlenschutzkommission (SSK)

Bewertung von Messungen der ARGE PhAM zur Radioaktivität in der Elbmarsch Stellungnahme der Strahlenschutzkommission, verabschiedet in der 183. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 14.02.2003, www.ssk.de.