

# **Strahlenbiologisches Gutachten**

**zur**

**Ermittlung des Standes wissenschaftlicher Erkenntnisse  
und der Verlässlichkeit der Strahlenschutzbestimmungen**

**unter**

**besonderer Berücksichtigung der Belastung durch Radioaktivität  
in der Umgebung von Kernkraftwerken**

**und zur**

**Frage der Strahleninduktion kindlicher Leukämien**

**durchgeführt  
im Auftrag des**

**Ministeriums für Finanzen und Energie  
des Landes Schleswig-Holstein**

**vorgelegt von**

**Dr. rer.nat.habil. Abraham F.G. Stevenson, M.Sc.  
(Federführung)**

**Institut für Toxikologie  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel  
Brunswiker Straße 10,  
24105 K i e l**

**mit Beiträgen von  
Experten aus dem In- und Ausland**

**Kiel, im April 2001**

## Vorwort

Das Ministerium für Finanzen und Energie (MFE) des Landes Schleswig-Holstein beauftragte mich im Herbst 1996 mit der Erstellung eines Konzeptes eines Strahlenbiologischen Gutachtens über:

- die Zulänglichkeit der wissenschaftlichen Grundlagen der angewandten Grenzwertregelung hinsichtlich Emissionen und Immissionen aus Kernkraftwerken mit besonderem Bezug zum Kernkraftwerk Krümmel (KKK)
- die Zulänglichkeit der Immissionsrichtwerte im Zusammenhang mit dem gesundheitlichen Schutz der Bevölkerung
- die Strahleninduzierbarkeit des prädominanten Leukämietyps in der Elbmarsch ALL (akute lymphozytäre Leukämie)
- Dosiswirkungsbeziehungen und die erforderliche Strahlendosis, um das Leukämiecluster in der Elbmarsch zu verursachen

Weil es mir von Anfang an bewußt war, daß eine derartige Aufgabe die Kompetenzen eines einzelnen Wissenschaftlers weit überschreitet, hatte ich darauf verwiesen, daß die Fragestellungen nur durch eine Mehrzahl von Experten verschiedener Fachrichtungen sachgerecht bearbeitet werden können. Der Staatssekretär teilte meine Auffassung, bat mich dennoch die Federführung zu übernehmen.

Eine Auflistung relevanter Themen mit den Namen entsprechender potentieller Autoren wurde in Absprache mit der Reaktorsicherheitsabteilung des MFE erstellt. Nach Zusage der ausgesuchten Experten wurde ein vorläufiges Konzept eingereicht. Ein formeller Auftrag wurde vom Ministerium im Sommer 1997 erteilt, worin die Aufgaben in drei Hauptfragen formuliert wurden. Die detaillierten Fragen wurden spezifisch auf das Problem der kindlichen Leukämien in der Umgebung des Kernkraftwerkes Krümmel (KKK) zugeschnitten. Ideal wäre es gewesen, wenn diese exakten Fragestellungen von Anfang an gestanden hätten, um die Konzeption danach auszurichten. Die den Experten zuvor zugeteilten Themen waren breit genug angelegt, so daß sie nicht modifiziert werden mußten, um mehr als ausreichende Information für die Beantwortung der nun klar formulierten Fragen zu gewährleisten.

Den beauftragten Experten wurde volle Freiheit gewährt, die Themen so zu behandeln, wie sie es für angemessen erachteten. Für die Schlußfolgerungen der einzelnen Beiträge sind die jeweiligen Autoren selbst verantwortlich. Die Originalbeiträge sind als Anhang beigefügt.

Das eigentliche Gutachten basiert zum größten Teil auf den Beiträgen der Experten, ist aber keineswegs eine Synopse daraus. Ich habe mir das Recht vorbehalten, den Meinungen der Experten beizupflichten oder wo es mir angebracht erschien, mich davon zu distanzieren und eine andere Meinung zu vertreten. Meine Schlußfolgerungen basieren auf diesen Informationen und zusätzlich auf persönlichen wissenschaftlichen Erkenntnissen, gewachsen in drei Jahrzehnten

Tätigkeit in verschiedenen biomedizinischen Bereichen.

Das Gutachten wurden erst in Englisch verfaßt (aufgrund persönlicher Annehmlichkeit), und danach ins Deutsche übersetzt. Das Gutachten liegt daher in Deutsch und Englisch vor, mit der Hoffnung somit einem größeren Leserkreis zu dienen. Bei der Gliederung des Gutachtens wurde sich streng an die im Auftrag festgelegten Fragestellungen gehalten.

Ich habe es vorgezogen, in der Englischen Fassung Dosen in cGy/cSv einheitlich anzugeben. Die deutsche Fassung enthält zusätzlich die Angabe in mGy/mSv, um einer Bitte der Reaktorsicherheitsabteilung nachzukommen. Die Anwendung dieser Angaben ist konform mit dem größten Teil der strahlenbiologischen Literatur, da cGy/cSv den alten Einheiten rad/rem entsprechen. Das Gutachten sollte innerhalb eines Jahres nach Vertragsvergabe vorliegen. Die Verzögerung von über einem Jahr liegt in der Unterschätzung der Zeit, die die Sachverständigen benötigten, um ihre Beiträge fertigzustellen. Persönlich habe auch ich die Zeit unterschätzt, die für die angemessene Bearbeitung der aus völlig verschiedenen Fachrichtungen stammenden Beiträge nötig war.

Das Gutachten wurde Herrn Professor Dr. Christian Streffer, emeritierter Leiter der Abteilung für Medizinische Strahlenbiologie an der Universität Essen, der langjähriges Mitglied und Vorsitzender der Deutschen Strahlenschutzkommission und auch Mitglied der ICRP war, vorgelegt. Obwohl ich persönlich Herrn Professor Streffer als Reviewer vorgeschlagen habe, behalte ich mir vor, seiner Kritik bzw. seinen Vorschläge zu folgen oder sie abzulehnen.

Ich hoffe, daß das Gutachten einen Beitrag zum Verständnis der strahleninduzierten Leukämogenese leistet und damit auch zur Lösung der Frage der Plausibilität einer Strahlenbedingtheit der kindlichen Leukämieerkrankungen in der Umgebung des Kernkraftwerkes Krümmel beiträgt.

Kiel, im Dezember 1999

Dr. rer.nat.habil. A.F.G. Stevenson, M.Sc.

Die vorliegende Fassung des Gutachtens ist überarbeitet worden unter Berücksichtigung der schriftlich vorgelegten sowie mündlich bei einer Besprechung im MFE am 07.02.00 vorgetragenen Kritiken der Reaktorsicherheitsabteilung (Auftraggeber) und vom Herrn Professor Streffer (Review-Sachverständiger). Änderungen sind an den Stellen durchgeführt worden, an denen ich mit den Kritiken einverstanden bin. An Stellen an denen ich eine andere fachlich begründete Meinung vertrete, habe ich selbstverständlich den Änderungswünschen nicht entsprochen.

Kiel im April 2001

Dr. rer.nat.habil. A.F.G. Stevenson, M.Sc.

### Abkürzungsverzeichnis/ Glossar

ABCC	Atomic Bomb Casualty Commission, Vorläufer der RERF
AKW	Atomkraftwerk
ALL	akute lymphozytäre Leukämie
AML	akute myeloische Leukämie
ANLL	akute nicht-lymphozytäre Leukämie
ASL	acute stem cell undifferentiated leukaemia, akute undifferenzierte Stammzell-Leukämie
ATB	at time of bombings, (Alter) zum Zeitpunkt der Bombenexplosionen
ATL	adult T-cell leukaemia, T-Zellen-Leukämie der Erwachsenen, hervorgerufen durch das HTLV-1-Virus
AUL	akute unspezifische Leukämie
AVV	Allgemeine Verwaltungsvorschrift
BEIR	Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations
BI	Bürgerinitiative
BIPS	Bremer Institut für Präventionsforschung und Sozialmedizin
BNFL	British Nuclear Fuels Limited
CLL	chronische lymphozytäre Leukämie
CML	chronische myeloische Leukämie
CMT	Combined Modality Treatment, kombinierte Behandlungsmodalität
DD	doubling dose, Verdopplungsdosis
DOE	Department of Energy, USA
DS 86	Dosimetry System 1986
EAR	excess absolute risk, Anzahl zusätzlicher Erkrankungen oder Sterbefälle, meist pro $10^4$ oder $10^5$ Personenjahre
ELF	Extremely Low Frequencies, extrem niedrige Frequenzen
ERR	excess relative risk, zusätzliche Erkrankungen oder Sterbefälle im Verhältnis zu den erwarteten Erkrankungen oder Sterbefällen, entspricht RR-1
EURATOM	zuständige Behörde für nukleare Angelegenheiten der Europäischen Union
FAB	French American British classification of leukaemia
GKSS	Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffahrt und Schiffbau
Hormesis	Konzept der stimulierenden Wirkung extrem kleiner Dosen von Toxika
HWZ	Halbwertszeit
IAEA	International Atomic Energy Agency, Internationale Atomenergie Behörde
ICRP	International Commission for Radiological Protection, Internationale Kommission für Strahlenschutz
KKK	Kernkraftwerk Krümmel
LD <sub>50</sub>	Dosis, bei der 50% Mortalität erreicht wird

LANL	Los Alamos National Laboratories
LSS	Lifespan Study, Vorläufer der RERF
MDS	myelodysplastisches Syndrom
ORNL	Oakridge National Laboratories
OSCC	Oxford Survey of Childhood Cancers, Kinderkrebsregister in Oxford
PY	person years, Personenjahre
RBW	Relative biologische Wirksamkeit
REI	Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen
RERF	Radiation Effects Foundation, Nachfolge der ABCC (ab April 1975)
RR	relatives Risiko
Schulter	Schulterbereich der linear-quadratischen Überlebenskurven (Strahlenbiologie)
SIR	standard inzidenz ratio, standardisiertes Verhältnis der Erkrankungsinzidenz
SLL	subakute lymphozytäre Leukämie
SMR	standard mortality ratio, Standardisiertes Mortalitätsverhältnis
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SWR	Siedewasserreaktor
TSE	time since exposure, Zeit nach Exposition
TÜV	Technischer Überwachungsverein
UNO	Vereinte Nationen
UNSCEAR	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
UV	ultraviolettes Licht

### Einheiten

a	Annum, Jahr
d	Day, Tag
Gy	Gray, absorbierte Energiedosis (Joule/kg)
h	hour, Stunde
rad	radiation absorbed dose
rem	roentgen equivalent medical
Sv	Sievert, äquivalent absorbierte Dosis (Joule/kg)

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Abkürzungsverzeichnis	4
I. Allgemeine Einleitung	10
I. 1. Hintergrund des Gutachtens	10
I. 2. Aufgaben	12
I. 3. Aufbau und Umfang	13
I. 4. Grundsätze der Strahlenwirkung	15
I. 5. Quellen der Strahlenexposition	20
<b>II. Aufgabe 1, Teil A: Frage über die Zulänglichkeit der wissenschaftlichen Grundlagen der angewandten Grenzwertregelung hinsichtlich Emissionen und Immissionen aus Kernkraftwerken mit besonderem Bezug zum Kernkraftwerk Krümmel (KKK).</b>	
II. 1. Einleitung	22
II. 1. 1. Das 30 mrem (0,03 cSv) Konzept	22
II. 1. 2. Allgemeine Verwaltungsvorschriften zu § 45 StrlSchV (AVV)	26
II. 1. 2. 1. Ausbreitung radioaktiver Stoffe	27
II. 1. 2. 2. Strahlenexposition bei Ableitung mit Luft	28
II. 1. 2. 3. Strahlenexposition bei Ableitung mit Wasser	31
II. 1. 2. 4. Zuverlässigkeit der AVV bezüglich der Einhaltung der Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung	32
II. 2. Quellen und Freisetzung von Radioaktivität	34
II. 2. 1. Relevante Radionuklide und Dosisbeiträge	36
II. 2. 2. Anmerkungen zur Wiederaufbereitung nuklearer Brennstoffe: Sellafield	40
II. 3. Ausbreitung von Radioaktivität	43
II. 3. 1. Technische Regeln für den Betrieb kerntechnischer Anlagen	45
II. 3. 1. 1. KTA-Regel 1503.1	45
II. 3. 1. 2. KTA-Regel 1504	46
II. 3. 1. 3. Gutachten zum KKK, TÜV 1983	46
II. 3. 2. Kontroverse Immissionsdaten	47
II. 4. Inkorporation von Radioaktivität und Auswirkungen auf Menschen	50
II. 4. 1. Inkorporation durch Ingestion	51
II. 4. 2. Inkorporation durch Inhalation	52
II. 4. 3. Biokinetik und Dosisermittlung	53
II. 4. 3. 1. Radiobiologie von Jod-131	56
II. 4. 3. 2. Radiobiologie von Cäsium-137	57

II. 4. 3. 3. Radiobiologie von Strontium-90 .....	58
II. 4. 3. 4. Radiobiologie von Plutonium-239 .....	59

**II. Aufgabe 1, Teil B: Frage der Zulänglichkeit der Immissionsrichtwerte im Zusammenhang mit dem gesundheitlichen Schutz der Bevölkerung.**

II. 5. Einleitung: Stochastische frühsomatische Strahlenwirkung - Leukämie .....	62
II. 5. 1. Zulänglichkeit der Immissionsrichtwerte hinsichtlich des gesundheitlichen Schutzes .....	65
II. 5. 2. Zulänglichkeit der gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich des gesundheitlichen Schutzes .....	68

**III. Aufgabe 2: Frage ob der prädominante Leukämietyp in der Elbmarsch ALL (akute lymphozytäre Leukämie), als strahleninduzierbar bekannt ist.**

III. 1. Strahlenleukämogenese .....	72
III. 1. 1. Überlebende der Atombomben: RERF-Daten über Leukämie .....	74
III. 1. 2. Medizinische Strahlenexposition .....	77
III. 1. 2. 1. Medizinische Exposition: Strahlentherapie .....	78
III. 1. 2. 2. Medizinische Exposition: Röntgendiagnostik .....	80
III. 1. 3. Berufliche Exposition: Arbeiter in der nuklearen Industrie .....	82
III. 1. 4. Exposition in der Umwelt .....	85
III. 1. 4. 1. Exposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen .....	85
III. 1. 4. 2. Die Tschernobylkatastrophe .....	88
III. 1. 5. <i>In utero</i> -Exposition .....	91
III. 1. 6. Präkonzeptionelle Exposition .....	93
III. 2. Kontroverse über die Strahleninduzierbarkeit von ALL provoziert durch die Professoren Gaßmann und Löffler, vormals Universität Kiel .....	97
III. 3. Beziehung zwischen ALL und AML .....	100

**IV. Aufgabe 3: Frage zu Dosisbeziehungen: Welche Strahlendosis wäre erforderlich, um das Leukämiecluster in der Elbmarsch zu verursachen?**

IV. 1. Strahlenbiologie niedriger Expositionen .....	101
IV. 1. 1. Über die Zulässigkeit von Extrapolationen .....	104
IV. 1. 2. Dosis-Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF) .....	105
IV. 1. 3. Relative biologische Wirksamkeit (RBW) .....	107
IV. 1. 4. Dosiseffektbeziehungen: Adaptiver Response .....	108
IV. 2. Zellbiologie der Strahlenwirkung .....	111

IV. 2. 1. DNA-Schäden als klassische Grundlage der Strahlensensitivität .....	112
IV. 2. 2. Zytoplasmatische Reaktion auf Strahlenwirkung .....	115
IV. 2. 3. Strahlen-Hypersensitivität embryonaler Zellen .....	120
IV. 2. 4. Strahlenhypersensitivität der Gametozyten .....	124
IV. 2. 5. Strahleninduzierte Genominstabilität .....	127
IV. 3. Kombinierte Strahlenwirkungen .....	132
V. Zusammenfassung .....	135
VI. Schlußfolgerung .....	146

### Anhang

- Overview of the BEIR, UNSCEAR and ICRP recommendations: Bases for estimations; adjustment to progress in knowledge.  
**Beitrag von J.J. Broerse & J. Geleijns** ..... A
- Kritische Diskussion der strahlenschutzrechtlichen Bestimmungen mit besonderem Blick auf die Aufnahme und Wirkung radioaktiver Stoffe im Körper.  
**Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake** ..... B1
- Immissionsrichtwerte der atomrechtlichen Bestimmungen.  
**Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake** ..... B2
- Kritische Diskussion der Bevölkerungsschutzbestimmungen beim Betrieb von AKW in der Bundesrepublik. **Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake** ..... B3
- Zuverlässigkeit der AVV hinsichtlich der Emissionsausbreitungs-Berechnungen und Dosisermittlung. **Beitrag von Otfried Schumacher** ..... C1
- Sicherheit der Emissionsgrenzwerte der atomrechtlichen Genehmigungen hinsichtlich der Immissionsrichtwerte am Beispiel des AKW Krümmel.  
**Beitrag von Otfried Schumacher** ..... C2
- Kritische Würdigung der meteorologischen Basis im Zusammenhang mit den AVV.  
**Beitrag von Karsten Hinrichsen** ..... D
- Das 30-Millirem-Konzept: Wissenschaftliche und politische Grundlagen.  
**Beitrag von Roland Scholz** ..... E
- Darstellung und Diskussion der relevanten Radionuklide einschließlich ihrer Transferfaktoren. **Beitrag von W. Burkart und E. Wirth** ..... F
- Radioactivity around the Sellafield nuclear complex, UK: A review of ITE studies, 1990 - 1994. **Beitrag von Arthur L. Sanchez** ..... G
- Besonderheiten bei inkorporierten Radionukliden: Wechselwirkungen chemischer, biologischer und radiologischer Eigenschaften der Radionuklide.  
**Beitrag von Felicitas Planas-Bohne** ..... H
- The role of epidemiology in the detection of harmful effects of radiation and



- the setting of safety standards. **Beitrag von Alice M. Stewart** ..... I
- Epidemiological studies of the effects of exposure to ionizing radiation.  
**Beitrag von D. Richardson, S. Wing & A.M. Stewart** ..... J
- Epidemiological studies of medical irradiation and cancer risk.  
**Beitrag von Janice Pogoda & S. Preston-Martin** ..... K
- Kanzerogenität unter besonderer Berücksichtigung immunhämatopoetischer  
Malignitäten. **Beitrag von Horst Kuni** ..... L
- Erkenntnisse aus der Tschernobyl-Katastrophe. Beitrag von Edmund Lengfelder . M
- Perinatale Mortalität in Deutschland nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl.  
**Beitrag von Bernd Grosche** ..... N
- Onkogene Effektivität niedriger Strahlendosen. Beitrag von Wolfgang Köhnlein . O
- Dose-effect relationships: Components of the survival curve - adaptive response.  
**Beitrag von Michael C. Joiner** ..... P
- Konzepte, Modelle und Extrapolationen. Beitrag von Jürgen Kiefer ..... Q
- The special characteristics of alpha-particle irradiation and their implications for  
radiation protection dosimetry. **Beitrag von Nicholas D. Priest** ..... R
- Radiosensitivity of mammalian cells.  
**Beitrag von Christopher S. Lange** ..... S
- Cellular and extracellular aspects of radiation response.  
**Beitrag von Bozidar Djordjevic** ..... T1
- Disruption of cell-cell interaction and consequences towards radiosensitivity.  
**Beitrag von Bozidar Djordjevic** ..... T2
- A review of the modulation of radiation effects by eicosanoids and cytokines.  
**Beitrag von Wayne R. Hanson** ..... U
- 1. Strahleninduzierte Genominstabilität und ihre Konsequenzen für die  
Zelltransformation. 2. Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen des  
zytogenetischen Biomonitoring. **Beitrag von P. Virsik-Peuckert** ..... V
- Radiobiology of the developing organism: Radiation exposure *in utero*.  
**Beitrag von William J. Schull** ..... W
- Kombinierte Strahlenwirkung: Stand der Erfahrungen und Erkenntnisse.  
**Beitrag von W.-U. Müller** ..... X
- Welche hämatologischen Neoplasien können durch radioaktive Strahlung  
ausgelöst werden.  
**Stellungnahme vom 14.10.96 der Professoren Löffler und Gaßmann** ..... Y
- **Schriftwechsel mit Dr. Dale Preston (RERF, Japan)** bezüglich der jüngsten  
Veröffentlichungen der RERF zur Leukämie und der erhobenen Vorwürfen von  
den Professoren Löffler und Gaßmann ..... Z

## **I. Allgemeine Einleitung**

### **I. 1. Hintergrund des Gutachtens**

Von 1989 bis 1991 wurden in einem Zeitraum von 18 Monaten 5 Fälle von kindlicher<sup>1</sup> Leukämie, 1 Fall kindlicher aplastischer Anämie und 1 Fall von Leukämie eines jungen Mannes in der Samtgemeinde Elbmarsch auf der niedersächsischen Seite des Elbufers diagnostiziert. Die Gesamtzahl der Kinder in der Samtgemeinde beträgt etwa 1600. Damit wurde ein Cluster kindlicher Leukämien entdeckt.

Nicht allein die Größe des Clusters<sup>2</sup>, sondern vielmehr noch seine auffallende Nähe zu dem weltgrößten Siedewasser-Reaktor (SWR, 1316 MW Kapazität) und einem benachbarten, lang bestehenden Kernforschungszentrum mit Versuchsreaktoren hat zu einer Besorgnis in der Öffentlichkeit geführt. Das Kernkraftwerk Krümmel (KKK) und das Forschungszentrum der Gesellschaft für Kernenergieverwertung in Schiffahrt und Schiffbau (GKSS-Forschungszentrum) befinden sich auf der schleswig-holsteinischen Seite des Elbufers direkt gegenüber der niedersächsischen Samtgemeinde Elbmarsch. Beide Bundesländer, Niedersachsen und Schleswig-Holstein, haben jeweils eine unabhängige Expertenkommission zur Aufklärung der Leukämieerkrankungen in der Elbmarsch berufen.

Die niedersächsische Kommission wurde 1991 mit der Aufgabe der Ursachenaufklärung beauftragt. Diese Kommission war bereits ein Jahr zuvor mit der Aufklärung einer anderen Häufung kindlicher Leukämie in der Stadt Sittensen in Niedersachsen befaßt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde von der Kommission auf Umwelttoxikologie gelegt, einschließlich Innenraumluftbelastungen der Einwohner der betroffenen Gemeinden. Da sich das Kernkraftwerk (KKK) und das Kernforschungszentrum (GKSS) auf schleswig-holsteinischem Gebiet befinden, hat die Fachkommission Schleswig-Holstein die Klärung der Frage zum Ziel, ob die Erkrankungsfälle in ursächlichem Zusammenhang mit dem Betrieb dieser nuklearen Anlagen stehen - eine Frage, die in der Öffentlichkeit diskutiert wird. Sämtliche Untersuchungen der Fachkommission wurden deshalb auf dieses Ziel hin ausgerichtet. Die Untersuchungen wurden in enger Kooperation mit der Expertenkommission Niedersachsens und einer von Niedersachsen zusätzlich gegründeten Arbeitsgruppe Belastungsindikatoren durchgeführt - zur Förderung der aktiven Mitwirkung Niedersachsens an der Untersuchung der schleswig-holsteinischen Fachkommission.

Die Untersuchungen fallen in die drei Kategorien Epidemiologie, Bioindikatoren und Umweltphysik. Da die Bundesländer mit Ausnahme des Saarlandes und Hamburgs bislang keine Krebsregister geführt haben, war es erforderlich, eine Inzidenzerhebung bezüglich der Leukämien durchzuführen, um die statistische Signifikanz der Häufung zu prüfen. Diese Erhebung hat nicht

---

<sup>1</sup>Kinder im Alter bis zu 14 Jahren.

<sup>2</sup>Die Inzidenz kindlicher Leukämien beträgt in der BRD  $4,3 \times 10^{-5}$ , d.h. 0,043 Fälle auf 1000 Kinder.

nur die statistische Signifikanz gezeigt und weiterhin auch eine Erhöhung der Erwachsenen-Leukämien binnen eines 5 km-Radius um die nuklearen Anlagen angezeigt. Daraufhin wurde eine Fall-Kontroll-Studie in Auftrag gegeben. In einer quasi-randomisierten Studie an Kindern aus der betroffenen Samtgemeinde und aus einem Kontrollgebiet - entfernt von jeglichen nuklearen Anlagen - wurden die Häufigkeiten der dizentrischen Chromosomen in peripherem Blut untersucht. Das Ergebnis dieser Untersuchung war negativ. Im Gegensatz dazu hat eine von der Bürgerinitiative (BI) angeregte Studie an der Universität Bremen, in der die Geschwister von erkrankten Kindern untersucht wurden, eine statistisch gesicherte Erhöhung der Häufigkeit dizentrischer Chromosomen im Vergleich zu historischen Kontrollwerten der Universität Bremen ergeben. Da Tritium und Kohlenstoff-14 als Indikatoren für unzulässige Freisetzungen von Reaktornukliden dienen können, weil sie in Jahreswachstumsringen<sup>3</sup> abgelagert werden, wurde die Menge der Inkorporation dieser beiden Nuklide in Holz von Bäumen bestimmt. Auch diese Untersuchung ergab negative Ergebnisse, bis auf eine kleine auffällige Erhöhung der Werte für das Jahr 1986. Eine Nachuntersuchung haben die Kommissionen in Anbetracht des Arbeitsaufwandes nicht empfohlen. In einer von der BI angeregten, vorausgegangenen Pilotstudie ist das Holz einer Kastanie von der anderen Elbferseite, dem KKK direkt gegenüberliegend, auf Tritium untersucht worden. Die Ergebnisse zeigten deutliche Erhöhungen der Tritium-Aktivitäts-Konzentration, die auf neuere Einträge und nicht auf die zurückliegenden oberirdischen Kernwaffentests zurückzuführen waren. Die Auflösung der Meßwerte in einzelne Jahresabschnitte war nicht möglich, weil sie aufgrund der Dichte der Wachstumsringe in Jahresgruppen zusammengefaßt werden mußten. Die Emissionsaufzeichnungen des KKK wurden rückwirkend von einem unabhängigen Institut (Öko-Institut Darmstadt) analysiert ohne Hinweise auf Unregelmäßigkeiten.

Nach einem vorübergehenden Ausbleiben weiterer Fälle sind erneut kindliche Leukämien in der 5 km-Nahzone auf der anderen Elbseite festgestellt worden, womit die Gesamtzahl der Erkrankungsfälle auf 10 oder 11 - je nach Sichtweise - anstieg. Die Zunahme der Erkrankungsfälle, die den negativen Befunden der offiziellen Untersuchungen<sup>4</sup> entgegenstanden, veranlaßte die Landesregierung von Schleswig-Holstein, jeweils ein technisches und ein strahlenbiologisches Gutachten in Auftrag zu geben. Ersteres hat zum Ziel, nach den

---

<sup>3</sup>Pinien und Eichen aus der Elbmarsch, Würgassen (ein anderer Siedewasserreaktor) und Celle, wo kein Kernreaktor im Umkreis von 40 km ist. Da Pinien im Gegensatz zu Laubbäumen auch in Wintermonaten einen Grundumsatz an Photosynthese aufweisen, hoffte man, auch etwaige Radioaktivitätsfreisetzungen im Winter erfassen zu können.

<sup>4</sup>Nichtsdestotrotz haben die BI und einige kritische Mitglieder der Fachkommission abermals darauf hingewiesen, daß verschiedene Radionuklide in der Umgebung, auch wenn sie in genehmigtem Bereich liegen mögen, auf erhöhte Immissionen deuten. Die Situation wurde durch eine Fernsehsendung ("Monitor") verschärft, nachdem Journalisten herausfanden, daß beim Bau des Reaktordruckbehälters des KKK die Hauptteile nicht paßgenau waren und unter hydraulischem Druck zusammengeschweißt werden mußten.

Möglichkeiten unerkannter Emissionspfade zu suchen, und letzteres soll anhand derzeitiger wissenschaftlicher Erkenntnisse feststellen, ob die Strahlenbelastung in der Umgebung eines Kernkraftwerkes, hier des KKK, stochastische (zufällige) Effekte wie kindliche Leukämien verursachen kann.

**Tabelle: Erkrankte Kinder in der 5-km-Nahzone um das KKW Krümmel**

Fall	Datum	Geb.-Jahr	Geschlecht	Wohnsitz	Diagnose
1	12/89	1982	w	Tespe	Aplast. Anämie
2	02/90	1986	w	Avendorf	(C)-ALL
3	03/90	1981	m	Tespe	ALL
4	04/90	1981	m	Rönne	Monobl.-L (ANLL)
5	01/90	1989	w	Tespe	(C)-ALL
<b>6</b>	<b>04/91</b>	<b>1979</b>	<b>m</b>	<b>Marschacht</b>	<b>AML</b>
7	05/91	1988	w	Avendorf	(C)-ALL
8	09/94	1993	m	Geesthacht	AML (ANLL)
9	07/95	1984	m	Tespe	ALL
10	08/95	1991	m	Geesthacht	ALL
11	06/96	1993	m	Grünhof	ALL

- ALL = Akute Lymphozytäre Leukämie  
 (C)-ALL = (common) Akute Lymphozytäre Leukämie  
 AML = Akute Myeloische Leukämie  
 ANLL = Akute Nicht-Lymphozytäre Leukämie  
 Monobl.-L = Monoblastische Leukämie  
 Aplast. = Aplastisch  
**Fall 6** = hier handelt es sich um einen jungen Erwachsenen

## I. 2. Aufgaben

Die Aufgaben wurden in drei Hauptfragestellungen formuliert.

Die **erste Frage** ist, ob in dem in der Bundesrepublik und speziell beim Kernkraftwerk Krümmel (KKK) angewendeten Schutzkonzept (Begrenzung bestimmter Abgaben radioaktiver Stoffe durch verschiedene Grenzwerte - siehe Genehmigung KKK - wissenschaftliche

Erkenntnisse über

- die Entstehung und Abgabe radioaktiver Stoffe (in AKW)
  - die Ausbreitung radioaktiver Stoffe
  - die Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper
  - die Wirkung radioaktiver Stoffe im Körper
- fehlgewichtet oder negiert sind, mit der Folge, daß
- die beobachtete Kinderleukämiehäufung in der Elbmarsch durch die genehmigten bzw. gemessenen Abgaben radioaktiver Stoffe (KKK, GKSS) erklärt werden kann?
  - ein zuverlässiger Schutz vor - stochastischen - Strahlenschäden (Leukämie, Krebs) durch den bestimmungsgemäßen Betrieb von AKW nicht gegeben ist?

Die **zweite Frage** ist, ob der in der Elbmarsch beobachtete Leukämietyp ALL (akute lymphozytäre Leukämie) als Folge von Strahlenexposition festgestellt worden ist? Die Begründetheit der Position

- die RERF (Radiation Effects Research Foundation), nach Atombombenabwurf wurden vermehrt AML (akute myeloische Leukämie) und ALL beobachtet;
  - von Prof. Löffler/Prof. Gaßmann, nach medizinischer Bestrahlung wurden nahezu ausschließlich AML beobachtet,
- ist im Detail zu untersuchen. Im Ergebnis soll damit der Expertenstreit,
- ob die ALL bei Kindern durch Strahlung (ggf. in welchem Dosisbereich?) ausgelöst werden kann und
  - in welchem Verhältnis ALL und AML stehen,
- entschieden werden.

Die **dritte Frage** ist, welche Strahlendosis vorgelegen haben muß, um die beobachtete Anzahl der Leukämien zu induzieren?

### I. 3. Aufbau und Umfang

Die drei zur Beantwortung gestellten Fragen umfassen diverse Aspekte der medizinischen Strahlenbiologie, des Strahlenschutzes und der Radioökologie, wobei jedes für sich ein umfangreiches Fachgebiet darstellt. Die Behandlung der angegebenen Themen und Fragen überschreitet bei weitem die Fachkompetenz eines jeden einzelnen Wissenschaftlers. Die Mitwirkung einer Vielzahl von Fachleuten wurde daher ausdrücklich gewünscht. Jedoch ist eine Sammlung von getrennten Fachbeiträgen zu einzelnen Themen, wenn auch mit Bezug auf die gestellten Fragen, allein nicht zweckmäßig. Aus diesem Grunde wurde von dem federführenden Gutachter in Einvernehmen mit den Experten der Abteilung für Reaktorsicherheit am Ministerium für Finanzen und Energie ein Gesamtkonzept vorgelegt. Hierfür sind 29 Einzelthemen entwickelt worden mit dem Gedanken, auf diese Weise die erforderlichen

Informationen aus dem derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis zu erhalten, um die gestellten Fragen zu beantworten. Die beteiligten Autoren erhielten Hinweise zum inhaltlichen Umfang der jeweiligen Themen. Abgesehen davon waren die Autoren frei in der Ausarbeitung der Themen. Sie bearbeiteten diese nach ihren eigenen Vorstellungen. Die erstellten Einzelbeiträge sind als Original dem Anhang beigelegt. Das vorliegende Gutachten ist von mir als federführendem Autor unter Verwendung der Informationen aus den beigelegten Beiträgen erstellt worden. Somit ist dem Gutachten Konsistenz in der Erarbeitung verliehen worden. Damit ist es keineswegs eine reine Synopse der Einzelbeiträge. Der federführende Autor beansprucht für sich die Freiheit, basierend auf in über drei Jahrzehnten gewachsenen wissenschaftlichen Erfahrungen aus verschiedenen Bereichen der medizinischen Biologie, nach eigenem Wissen gegebenenfalls auch andere Positionen zu vertreten.

Da der Auftraggeber die Abteilung für Reaktorsicherheit am genannten Ministerium ist, ist es nachvollziehbar, daß ein erheblicher Teil des Gutachtens (und entsprechend die Zahl der Einzelbeiträge) sich mit Fragen zum Thema Strahlenschutz befaßt, insbesondere mit Grenzwerten der Emission und Immission von Radioaktivität durch AKW. Obwohl nationale Regierungen in der Grenzwertfestlegung unabhängig sind, werden dennoch die Empfehlungen einiger Internationaler Körperschaften, wie die Internationale Kommission für Strahlenschutz (ICRP), das Wissenschaftliche Komitee für Ionisierende Strahlungen der UNO (UNSCEAR) und das Komitee für Biologische Effekte Ionisierender Strahlungen der Akademie der Wissenschaften, USA (BEIR) entweder als solche (von zuständigen nationalen Fachkommissionen) übernommen oder zumindest berücksichtigt bei ihren Empfehlungen an die Regierungen zur Umsetzung in nationale Gesetze/Verordnungen. Daher ist für eine Bewertung der nationalen Verordnungen und Grenzwerte - als logische Konsequenz - die Zurückverfolgung der Empfehlungen auf die ursprüngliche Quelle erforderlich. Es bleibt dennoch festzustellen, ob die nationalen beratenden Körperschaften den Fortschritt der Erkenntnisse in ihre Empfehlungen einbeziehen.

Da im Mittelpunkt die Frage steht, ob kindliche Leukämie durch freigesetzte Radioaktivität verursacht werden kann, muß verschiedenen theoretischen Aspekten der Strahleninduktion von Leukämien nachgegangen werden. Ein angeführtes zentrales Argument gegen die Vorstellung einer Strahlenätiologie ist die Art der Leukämie, nämlich ALL, die in der Elbmarsch überwiegend vorgekommen ist. Erkenntnisse auf diesem Gebiet sind aus epidemiologischen Studien entstanden. Konventionelle toxikologische Prinzipien setzen Erkenntnisse über Dosiswirkungs-Beziehungen voraus, da diese als Beweis der Kausalität angesehen werden. Mangels Wissen über die Induktionsdosis oder aufgrund der Nichtbestimmbarkeit wird die statistische Verdopplungsdosis als hinnehmbarer Kompromiß angesehen.

Die einzelnen Punkte der drei Hauptfragestellungen zu den Aufgaben dieses Gutachtens werden hier der Reihenfolge entsprechend abgehandelt. Jede Frage wird als ein Abschnitt für sich behandelt, beginnend mit einer entsprechenden Einleitung, gefolgt von der Abhandlung spezifischer Themen und einer abschließenden Bilanz zu jedem Unterabschnitt. Eine gesamte Zusammenfassung und Schlußfolgerung wurde in Einklang mit einer allgemeinen Einführung

erstellt.

#### I. 4. Grundsätze der Strahlenwirkung

Strahlung ist die unvermittelte Übertragung von Energie unabhängig vom Medium und sie kommt als elektromagnetische Wellen oder Teilchen mit Ruhemasse vor. Das elektromagnetische Spektrum - ein winziges Fenster davon ist sichtbares Licht - besteht aus Strahlungen unterschiedlicher Energien. Oberhalb des sichtbaren Lichtes mit ansteigender Frequenz und - damit verbunden - zunehmender Energie folgen Ultraviolett-Strahlung, Röntgen- und Gamma-Strahlung. In umgekehrter Richtung mit abnehmender Energie folgen Infrarot Strahlung, Mikrowellen, Radiowellen unterschiedlicher Frequenzen bis hinunter zu extrem niedrigen Frequenzen (Netzfrequenzen der Stromversorgung). Die Wellenlänge ist umgekehrt proportional zur Frequenz<sup>5</sup>. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit aller elektromagnetischer Strahlung im Vakuum ist gleich. Röntgen- und Gamma-Strahlung interagiert mit Materie auf atomarer Ebene.

Die Wechselwirkung führt zur Anregung oder Ionisation der Atome. Röntgen- und Gamma-Strahlen werden daher zur "ionisierenden" Strahlung gezählt. Die grundlegenden Prozesse dabei sind Photo- und Comptoneffekt. Bei beiden werden Hüllenelektronen freigesetzt und beschleunigt, die ihrerseits Atome ionisieren können. Bei sehr hoch energetischer Strahlung tritt außerdem die Paarbildung auf, die wieder zur Aussendung von Gammastrahlung führt. Zur ionisierenden Strahlung gehören weiterhin die schnellen geladenen Korpuskeln der Radioaktivität (Alpha und Beta), ferner Neutronen, deren ionisierende Wirkung über Sekundärprozesse erfolgt.

Die biologischen Effekte durch Strahleneinwirkung sind von der Höhe absorbierten Energie abhängig. Die Effizienz der Energieübertragung wird in hohem Maße von den Eigenschaften der Strahlung bestimmt. So sind z.B. Alpha-Teilchen mit 2 positiven Ladungen versehen und haben eine Masse von 4 (Heliumkerne). Aufgrund dessen besitzen die Partikel ein extrem geringes Eindringvermögen<sup>6</sup> und die Energieübertragung pro Wegstrecke ist hoch. Man spricht von "dicht" ionisierender Strahlung (hoher LET). Als Maß für die Energieübertragung wird der Lineare Energie-Transfer (LET) benutzt. Im Vergleich dazu sind Gamma- und Röntgen-Strahlen wie auch hochenergetische Beta-Teilchen nur locker ionisierend (niedriger LET), sie haben dafür aber eine wesentlich stärkere Eindringtiefe (insbesondere Röntgen- und Gamma-Strahlen). Strahlungen wie Neutronen, Niedrig-Energie-Röntgen-Strahlen und Niedrig-Energie-Betateilchen liegen bezüglich des LET etwa dazwischen (moderater LET).

Die Art der Energieübertragung, gekennzeichnet durch den LET-Wert, beeinflusst die biologischen Effekte tiefgreifend. Anders ausgedrückt: für eine gegebene Dosis (absorbierte

---

<sup>5</sup>Die Frequenz wird angegeben in Hertz, das einer Schwingung pro Sekunde entspricht.

<sup>6</sup>In biologischen Geweben kann diese Eindringtiefe zwischen 10 und 40 Mikrometer liegen, abhängig von der Art des Gewebes und der Energie der Alpha-Teilchen.

Energie pro Gewebemasse)<sup>7</sup> werden sich die Wirkungen je nach Strahlenqualität (LET) verändern. Um die biologische Wirksamkeit verschiedener Strahlenarten zu vergleichen, ist Cobalt-60-Gammastrahlung als Referenzstrahlung festgelegt worden. Für die gleiche biologische Wirkung, unter definierten Bedingungen, wird das Verhältnis der Dosis der Referenzstrahlung zur Dosis der Teststrahlung genommen. Den so erhaltenen Faktor nennt man die Relative Biologische Wirksamkeit (RBW). Im Strahlenschutz wird die unterschiedliche RBW von Strahlung durch den sog. Qualitätsfaktor Q berücksichtigt. Das Produkt aus Energiedosis und Qualitätsfaktor ergibt die Äquivalentdosis in Sv. Die biologischen Wirkung ionisierender Strahlung sind außer von der Dosis im allgemeinen auch von der Dosisleistung (Dosis pro Zeiteinheit) abhängig.

Als Folgen von Niederdosisbestrahlung beim Menschen werden Mutationen und Krebserkrankungen erwartet. Die Dosiswirkungskurven für diese "stochastischen" Schäden werden als schwellenlos angesehen, d.h. bei Verringerung der Dosis besteht immer noch eine endliche Wahrscheinlichkeit für einen Effekt. Bezüglich des Verlaufes der Dosiswirkungskurve im Niederdosisbereich gibt es unterschiedliche Auffassungen. Die ICRP geht davon aus, daß bei locker ionisierender Strahlungen eine linear-quadratische Dosisabhängigkeit besteht<sup>8</sup>, d.h. es gibt einen Anteil des Effektes, der proportional mit der Dosis ansteigt, und einen Anteil, der mit dem Quadrat der Dosis steigt. Bei der Ableitung der Risikofaktoren für strahleninduzierten Krebs aus Daten, die bei höheren Dosen gewonnen wurden, haben sie daher für den Strahlenschutz im Niederdosisbereich einen Reduktionsfaktor - den DDREF (dose and dose rate effectiveness factor) - von 2 verwendet. Eine Reihe von Autoren hält diese Reduktion nicht für gerechtfertigt und favorisiert einen linearen - also dosisproportionalen - Dosiswirkungsverlauf, der unabhängig von der Dosisleistung ist<sup>9</sup>. Bei strahleninduzierten Tumoren gibt es Beobachtungen über einen umgekehrten Dosisseffekt, d.h. obwohl die Dosen immer geringer werden, ist das Vermögen, Krebs zu provozieren, relativ stärker<sup>10</sup>. Dieser Effekt kann auch durch eine Herabsetzung der

---

<sup>7</sup>Die absorbierte Strahlendosis (radiation absorbed dose, rad) = 100 erg g<sup>-1</sup> war die frühere Dosis-Einheit. Heute verwendet man das Gray (Gy) = 1 J kg<sup>-1</sup> = 100 rad. Damit ist 1 rad = 1 cGy. Die alte Einheit für die absorbierte Äquivalenz-Dosis war das rem (roentgen equivalent medical). Dies ist jetzt die Einheit Sievert (Sv). 1 Sv = 100 rem oder 1 rem = 1 cSv.

<sup>8</sup>ICRP Publication 60, 1990.

<sup>9</sup>Kellerer, A.M. & Breckow, J: Neue Erkenntnisse zur Dosisrelation nach der Revision der Dosimetrie in Hiroshima und Nagasaki und Auswirkungen auf den Strahlenschutz. In Medizinische Physik 88, Nüsslin, F (Hrsg), Deutsche Gesell. Med. Phys. Tübingen 1988, S. 499-513.

<sup>10</sup>Nussbaum, R.H. & Köhnlein, W.: Inconsistencies and open questions regarding low dose health effects of ionising radiations, Environmental Health Perspectives 102 (1994) 656-667.



Dosisleistung erreicht werden <sup>11,12</sup>.

Wenn die individuelle Strahlendosis eine bestimmte Höhe überschreitet, führt dies zu deterministischen Schäden, die sich in typischen Krankheitsbildern äußern, deren Ausmaß und Verlauf voraussagbar sind. Sie können akut (als Syndrome<sup>13</sup>), binnen Wochen, Tagen oder sogar binnen Stunden auftreten, je nachdem, um welches Syndrom es sich handelt. Wenn die Dosis subletal war und akute Effekte umgangen sind, d.h. die Dosis unterhalb des Schwellenwertes für das empfindlichste Syndrom (das hämatopoetische Syndrom) lag, können nichtsdestotrotz spätdeterministische Effekte immer noch nach Monaten oder sogar Jahren auftreten. Die andere Schadensart sind die stochastischen Schäden, die auf Wahrscheinlichkeiten beruhen und durch die Nicht-Voraussagbarkeit für das Individuum gekennzeichnet sind. In einer Population hingegen sind die solche stochastischen Schäden durchaus voraussagbar, wobei die Genauigkeit der Vorhersage von der Größe der untersuchte Population beeinflusst wird. Stochastische Schäden sind typisch für niedrige Strahlenexpositionen, die Läsionen sind vererbbar. Wenn somatische Zellen Läsionen erhalten, dann kann daraus Krebs folgen, und wenn Keimzellen betroffen sind, dann entsteht ein genetischer Schaden, der auf die folgende Generation übertragen wird. Wie bereits ausgeführt, besteht ein grundsätzlicher Unterschied zwischen deterministischen und stochastischen Schäden darin, daß für die letzteren keine Schwellendosen haben.

Die Strahleneinwirkungen auf Organismen können durch externe Quellen (radioaktive Stoffe oder radiologische Apparate) oder interne Quellen (Inkorporationen von Radionukliden) erfolgen. Die Bestrahlung kann als Ganzkörper-, Teilkörper-Bestrahlung oder stark eingegrenzt auf Organbereiche stattfinden. Die daraus entstehenden Schäden und Reaktionen werden entsprechend unterschiedlich sein. Es ist im allgemein nicht möglich, einen menschlichen Körper homogen<sup>14</sup> zu bestrahlen, d.h. die gleiche Dosis auf beliebige Stellen im Körper zu verabreichen. Dieses ist in der Praxis nur annähernd erreichbar. Die Strahleneinwirkung kann auf verschiedenen Ebenen, namentlich auf molekularer, zellulärer, Gewebe-, Organ- und letztlich auf der Ebene des

---

<sup>11</sup>Brenner, D.J. & Hall E.J: The inverse dose-rate effect for oncogenic transformation by neutrons and charged particles: a plausible interpretation consistent with published data. *International Journal of Radiation Biology* 58 (1990),745-758.

<sup>12</sup>Crompton, N.E.A., Barth, B & Kiefer, J: Inverse dose-rate effect for the induction of 6-thioguanine-resistant mutants in chinese hamster V 79-S cells by <sup>60</sup>Co-gamma-rays. *Radiation Research* 124 (1990) 300-308.

<sup>13</sup>Akute Strahlenerkrankungen werden in drei Syndrome klassifiziert: hämatopoetisches, gastrointestinales und neurologisches Syndrom. Die Namen deuten auf das hauptsächlich betroffene Organsystem hin, welches für das Überleben des Organismus ausschlaggebend ist. Die Schwellenwerte für die Syndrome sind verschieden. Er ist am niedrigsten für das hämatopoetische Syndrom und am höchsten für das neurologische oder Nervensyndrom.

<sup>14</sup>Dieses ist für bestimmte medizinische Anwendungen erforderlich, z.B. bei der Vorbereitung vor einer Knochenmarkstransplantation.

Gesamtorganismus, untersucht werden. Die physikalischen Prozesse der Strahleneinwirkung erfolgen, wie bereits erwähnt, augenblicklich und im Bereich von Femtosekunden. Molekulare Reaktionen laufen innerhalb von Milli- bis Pikosekunden ab, während biochemische/physiologische Reaktionen von Sekunden bis zu Stunden hin andauern. Die Wirkungskette, die in komplexen Systemen bis zur Ausbildung einer beobachtbaren Erkrankung führen kann, bedingt u.U. lange Latenzzeiten. Abhängig von der Art der interessierenden Effekte kann die Latenzzeit Wochen, Monate, Jahre (für Späteffekte) und sogar Jahrzehnte (für stochastische Effekte wie Krebserkrankungen) betragen.

Um die Strahleneinwirkung auf der Organ-/Organismus-Ebene zu verstehen, sind Kenntnisse über die funktionelle Organisation von Geweben<sup>15</sup> erforderlich. In den Geweben findet ein ständiger Umsatz<sup>16</sup> von Zellen statt, wobei die Zellumsatzrate in den verschiedenen Geweben äußerst unterschiedlich ist. Organe mit hohem Zellumsatz sind die hämatopoetischen Organe, das Darmepithel und die Epidermis der Haut. Der Zellumsatz wird durch unipotente bzw. multipotente Stammzellen<sup>17</sup> ermöglicht. Nach neueren Erkenntnissen sind auch im erwachsenen Organismus embryonale mesenchymale Stammzellen in bestimmten Gewebsarten vorhanden. Die Gewebe sind im allgemeinen hierarchisch organisiert; multipotente Stammzellen bilden verschiedene Vorläuferzellen mit begrenzter Vermehrungsfähigkeit. Die Nachkommen der Vorläuferzellen reifen zu entsprechenden gewebetypischen funktionellen Zellen. Die Komplexität der Differenzierungsvorgänge ist eine charakteristische Eigenschaft der betreffenden Gewebe. Die Strahlenempfindlichkeit der Zellen in solchen hierarchischen Systemen ist nicht einheitlich, sondern sehr stark abhängig vom Stadium der Differenzierung; weiterhin kann diese zwischen verschiedenen Gewebearten wiederum sehr stark schwanken. Innerhalb einer Gewebeart ist im allgemeinen zu erwarten, daß die Stammzellen strahlenempfindlicher sind als die ausgereiften Zellen. Es kommt sehr häufig vor, daß Vorläuferzellen und spätere Differenzierungsstadien weitaus empfindlicher sind als die Stammzellen selbst.

Wenn ein Säugetier mit einer Dosis ganzkörperbestrahlt wird, die ausreicht, um akute

---

<sup>15</sup>Ein Gewebe wird als eine Zellpopulation gemeinsamer Funktion und Herkunft definiert. Gewebe können als einfach oder komplex angesehen werden. Organe bestehen aus Geweben, und Organismen bestehen aus Organsystemen.

<sup>16</sup>Es wurde früher gedacht, daß bestimmte Gewebe, wie die Neuronen im Zentralnervensystem, Herz- und Skelettmuskeln, beim Erwachsenen keine Fähigkeit zur Erneuerung besitzen. Neuere Erkenntnissen weisen darauf hin, daß auch diese eine Erneuerungsfähigkeit aufweisen, wenn auch stark eingeschränkt.

<sup>17</sup>Stammzellen sind Zellen, deren Nachkommen sich weiter vermehren und in reife funktionelle Zellen ausdifferenzieren. Embryonale mesenchymale Stammzellen in Erwachsenen besitzen *Omnipotenz*. Die Zahl der Stammzellen in einem Gewebe ist definiert, und diese Population ist selbsterhaltend. Die morphologische Undefinierbarkeit der Stammzellen macht eine Identifikation unmöglich und erschwert den Fortschritt in ihrer Erforschung.

hämatopoetische Effekte hervorzurufen, sind kurzfristige Änderungen (binnen Stunden) im peripheren Blut festzustellen. Die Zahl der Thrombozyten, gefolgt von Lymphozyten und später Granulozyten fällt ab. Der Grund dafür ist, daß diese Zellen - insbesondere die ersteren beiden - auch als reife Zellen sehr strahlenempfindlich sind. Verstärkt wird diese Abnahme noch durch die Tatsache, daß sie im peripheren Blut nur eine kurze Verweildauer aufweisen<sup>18</sup>. Die Erythrozyten sind strahlenresistent. Die Stärke der Abnahme ist abhängig von Dosis und Dosisleistung und ein Tiefpunkt wird gewöhnlich nach einigen Tagen erreicht und kann mehrere Tage andauern - wiederum abhängig von Dosis und Dosisleistung - bis eine Regeneration eintritt. In dieser Zeit beginnt auch die Anzahl der Erythrozyten abzufallen. Das Ausmaß ist wiederum abhängig von Dosis und Dosisleistung. Der verzögerte Abfall bei den Erythrozyten ist auf ihre Strahlenresistenz und ihren sehr langsamen Umsatz zurückzuführen. Versagt die Regeneration tritt der Tod aufgrund fehlender Immunkompetenz mit gleichzeitig zunehmender Anämie ein. Diese kann, aufgrund fehlender Thrombozyten, durch petechiale Blutungen begleitet sein.

Das Knochenmark wird zunächst aufgrund absterbender Zellen und beschleunigter Zellreifung von reifen und differenzierenden Zellen entleert. Das Kompartiment der Stammzellen, das normalerweise die hämatopoetische Homöostase lediglich durch eine kleine Fraktion von etwa 5 bis 10 % sich im Zellzyklus befindlicher Zellen aufrecht erhält, wird gezwungen, den Anteil dieser Fraktion durch Rekrutierung ruhender Stammzellen je nach Schadensausmaß - abhängig von Dosis und Dosisleistung - zu erhöhen. Das Stammzellkompartiment stellt sich zunächst selbst wieder her, bevor es Vorläuferzellen zur weiteren Differenzierung produziert. Ein sehr kleiner Anteil überlebender Stammzellen (schätzungsweise um 5%) genügt, um die vollständige Regeneration sicherzustellen. Bei fortschreitender Wiederherstellung wird die im Zyklus befindliche Fraktion der Stammzellen allmählich herabgesetzt. Nach dem scheinbaren Wiedererlangen der Homöostase kann nicht ausgeschlossen werden, daß Monate später eine erneute Krise im Sinne einer gestörten Hämatopoese in Erscheinung tritt. Diese ist als ein spät-deterministischer Effekt anzusehen und ist auf ein Versagen des Stromas zurückzuführen, welches ein eigenständiges Gewebesystem darstellt und für die Hämatopoese durch Aufrechterhaltung eines adäquaten Mikromilieus verantwortlich ist. Der Zellumsatz dieses Gewebes ist äußerst langsam, und die zugehörigen Stammzellen sind relativ strahlenresistent. Sobald das Stroma sich erholt hat, kann die Hämatopoese normal ablaufen, es sei denn, ein drittes Problem tritt hinzu, und das ist die Manifestation stochastischer Effekte wie Leukämie.

---

<sup>18</sup>Die im peripheren Blut befindlichen Lymphozyten (kleine und große) bestehen im Grunde genommen aus zwei sehr heterogenen Zellpopulationen. Der größte Anteil dieser Zellen gehört in der Tat den immunkompetenten Lymphozyten an. Manche dieser sogenannten Lymphozyten sind eigentlich diverse Stammzellen, die sich gerade im Blutkreislauf befinden, hierunter auch hämatopoetische Stammzellen. Die Zellen einiger Gewebsarten sind hämatopoetischen Ursprungs. Die meisten Lymphozyten sind kurzlebig, aber es gibt auch solche, insbesondere aus der T-Zell-Population, die sehr langlebig sein können (Jahre), und weiterhin sind einige Zellen aus dieser Reihe sogar strahlenresistent.

Die subtilen Wechselbeziehungen zwischen absorbierter Dosis, Dosisleistung und individueller Prädisposition bestimmen letztendlich die Auswirkung von Strahlenschäden. Es bestehen Hinweise darauf, daß die Streuung der menschlichen Strahlenempfindlichkeit<sup>19</sup> groß sein muß, und daß individuelle Empfindlichkeit eine Funktion des Alters ist, wobei der Embryo die höchste Empfindlichkeit aufweist. Da die individuelle Strahlenempfindlichkeit nicht bekannt ist, ist eine Vorhersage über die individuelle Reaktion auf Strahlung nur verallgemeinert möglich. Die Datenbasis für die menschliche Erfahrung stammt aus epidemiologischen Analysen der Atombombenüberlebenden in Japan und aus der medizinischen Praxis, insbesondere aus der Strahlentherapie. Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Kenntnisse über die menschlichen Reaktionen auf ionisierenden Strahlungen unzureichend sind.

Dies ist besonders augenfällig, wenn es sich um Expositionen im Niedrigdosisbereich handelt, in dem akute Effekte nicht auftreten. Es ist in der Tat problematisch, die niedrige Strahlenexposition zu definieren. Da im Bezug auf stochastische Wirkungen die Meinung besteht, daß signifikante Effekte erst ab 50 cGy (0,5 Gy) auftreten, werden von manchen Experten Dosen darunter als niedrige Expositionen angesehen. Andere stufen Dosen unterhalb von 10 cGy (0,1 Gy) und noch andere sogar Dosen unter 5 cGy (0,05 Gy) als niedrige Strahlenexposition ein. Es ist auch möglich, die Exposition einer regionalen Bevölkerung durch die natürliche Hintergrundstrahlung, die für diese Region spezifisch ist, als Maß anzusetzen - unberücksichtigt, ob zusätzliche Expositionen anderer Quellen vorliegen. Diese Umweltorientierung wird im vorliegenden Gutachten bevorzugt, nicht obwohl, sondern weil die Kontroversen, ob Strahlendosen gerade oberhalb der Hintergrundwerte Gesundheitsrisiken bergen können, zwischen den Experten anhalten.

### **I. 5. Quellen der Strahlenexposition**

Die Erdkruste besteht aus Mineralien, denen Familien extrem langlebiger Radionuklide angehören, die seit der Entstehung der Erde bis zum heutigen Tag existieren<sup>20</sup>. Im Verlauf des radioaktiven Zerfalls werden von diesen Nukliden ionisierende Strahlungen ununterbrochen in die

---

<sup>19</sup>In den letzten Jahren wurde für eine ganze Gruppe von ansonsten diskreten einzelnen menschlichen Erkrankungen eine gemeinsame erblich bedingte ätiologische Basis gefunden, welche auf defiziente DNA-Reparaturmechanismen hinweist. Diese Erkrankungen sind folglich durch Chromosomenfragilität gekennzeichnet. Zellen von Patienten einer dieser Erkrankungen, *Ataxia telangiectasia*, können typischerweise DNA-Schäden durch Röntgenstrahlen nicht reparieren, obwohl sie Schäden durch UV-Licht normal reparieren. Da die verantwortlichen Gene dieser Erkrankungen i.d.R. rezessiv sind, bleiben die Heterozygoten in der Bevölkerung unerkannt. Die Reaktionen dieser Heterozygoten auf toxische Einwirkungen, insbesondere ionisierende Strahlung, ist ein Thema aktueller Forschung.

<sup>20</sup>Diese primordialen Radionuklide sind Kalium-40 (HWZ  $1,28 \times 10^9$  a), Thorium-232 (HWZ  $1,41 \times 10^{10}$  a), Uran-238 (HWZ  $4,47 \times 10^9$  a) und Uran-235 (HWZ  $7,04 \times 10^8$  a).

Umwelt ausgestrahlt. Hochenergetische kosmische Strahlen aus dem All dringen durch die Atmosphäre und strahlen auf die Erdoberfläche. Somit erhalten Lebewesen eine Exposition aus kosmischen Strahlen. Ein Großteil der kosmischen Strahlung interagiert mit Komponenten aus den oberen Schichten der Erdatmosphäre, wobei Radionuklide entstehen, die schließlich auch in die Biosphäre eindringen<sup>21</sup>. Die natürliche Strahlenbelastung setzt sich zusammen aus externer Bestrahlung durch hochenergetische kosmische Strahlen, Strahlung aus dem Boden und interner Bestrahlung aus inkorporierten Radionukliden: Kohlenstoff-14, Kalium-40, Radium-226, Radon-222 und die kurzlebigen Zerfallsprodukte Blei-210 und Polonium-210.

In der industrialisierten Welt wird die natürliche Strahlenbelastung zusätzlich durch künstlich erzeugte externe und interne Quellen erhöht. Die Anwendung von Strahlungen für medizinische Zwecke, insbesondere die Röntgendiagnostik, stellt den größten Teil der künstlichen Exposition dar. Das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein nuklearer Industrien (insbesondere nukleare Wiederaufbereitungsanlagen) einschließlich Kernkraftwerken in einer Region beeinflusst zweifelsohne die Strahlenbelastung der umliegenden Bevölkerung. Und schließlich bleibt noch zu erwähnen, daß die oberirdischen Kernwaffentests und die Zerstörung von nuklear angetriebenen Satelliten in der Atmosphäre zu einer globalen Umweltkontamination mit sehr langlebigen Radionukliden, wie Plutonium und Americium, geführt und damit zu einer Erhöhung der Strahlenbelastung beigetragen haben. Weiterhin sind großflächige Umweltkontaminationen in bestimmten geografischen Gebieten entstanden, z.B. die nukleare Katastrophe in Tschernobyl, großflächige Kontaminationen durch Mißmanagement von militärischen nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen in Rußland, die RadioJodfreisetzungen bei Hanford in USA, aufgrund von früherer Ignoranz und der nukleare Unfall Three Mile Island in Harrisburg, USA, um nur die prominentesten Beispiele zu erwähnen.

Die nationale mittlere effektive Äquivalentdosis<sup>22</sup> für die Bevölkerung bezüglich ionisierender Strahlungen, wird vom Bundesamt für Strahlenschutz, BRD, für das Jahr 1995 näherungsweise wie folgt angegeben:

• Medizinische Anwendungen (inklusive Radionuklide)	0,15 cSv	( 1,5 mSv)
• Inhalationen von Radon mit Folgeprodukten	0,14 cSv	( 1,4 mSv)
• Kosmische Strahlung (in Meereshöhe)	0,03 cSv	( 0,3 mSv)
• Terrestrische Strahlung (extern)	0,04 cSv	( 0,4 mSv)

<sup>21</sup>Diese kosmogenen Radionuklide sind Tritium, Beryllium-7, Kohlenstoff-14 und Natrium-22.

<sup>22</sup>Die effektive Dosis ist eine Bestimmungsgröße, die im Bereich des Strahlenschutzes Anwendung findet. Danach wird die Summe der organspezifisch gewichteten Äquivalentdosen gebildet. Die Begründung hierfür ist zum einen die Berücksichtigung der unterschiedlichen Strahlenempfindlichkeiten verschiedener Gewebearten und zugleich die Schaffung einer Grundlage für die Vergleichbarkeit der Strahlenbelastung inkorporierter Radionuklide und externer Bestrahlung.

• Ingestierte natürliche Radionuklide	0,03 cSv	( 0,3 mSv)
• Strahlenbelastung aus Tschernobyl	0,002 cSv	( 0,02 mSv)
• Fallout von Kernwaffentests	0,001 cSv	( 0,01 mSv)
• Betrieb kerntechnischer Anlagen	0,001 cSv	( 0,01 mSv)
• Anwendung in Technik und Haushalt	0,001 cSv	( 0,01 mSv)
• Berufliche Strahlenexposition	0,001 cSv	( 0,01 mSv)
<b>Insgesamt</b>	<b>0,396 cSv</b>	<b>( 3,96 mSv)</b>

## II. 0. Aufgabe 1, Teil A: Frage über die Zulänglichkeit der wissenschaftlichen Grundlagen der angewandten Grenzwertregelung hinsichtlich Emissionen und Immissionen aus Kernkraftwerken mit besonderem Bezug zum Kernkraftwerk Krümmel (KKK).

### II. 1. Einleitung

#### II. 1. 1. Das 30 mrem (0,03 cSv) Konzept

Die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) zum Schutz der Bevölkerung vor schädigenden Wirkungen von ionisierenden Strahlungen wurde 1976 in Deutschland - bzw. in den alten Länder der BRD - erstmals eingeführt. Diese ist 1989 revidiert worden und gilt bis zum heutigen Tag. Obwohl die StrlSchV erst 1976 verabschiedet wurde, war in der Zeit zuvor in den alten Bundesländern eine Atomkommission mit einem Ausschuß zuständig für Strahlenschutz tätig. Die Empfehlungen dieses Ausschusses lehnten sich an die Empfehlungen der ICRP an. Der Grenzwert zum Schutz der Bevölkerung nach dem 30 mrem-Konzept<sup>23</sup> ist auf eine ICRP-Empfehlung von 1965<sup>24</sup> zurückzuführen, die auf einer Definition der "genetisch signifikanten Dosis"<sup>25</sup> der ICRP basiert und vom zuständigen Ausschuß 1969 übernommen und dann in die StrlSchV von 1976

---

<sup>23</sup>30 mrem = 0,03 cSv = 0,3 mSv

<sup>24</sup>ICRP Publication 9, 1966

<sup>25</sup>Als "genetisch signifikante Dosis" wurde die Gonaden-Dosis herangezogen, die sich als vererbare Schäden in Folgegenerationen manifestieren. Da die "genetisch signifikante Dosis" zwischen 6 und 10 rem bzw. cSv abgeschätzt wurde, wurde 5 rem bzw. cSv pro Generation (eine Generation als 30 Jahre angenommen) als ein vertretbarer Wert angesehen mit "genügend Spielraum für die Fortentwicklung von Kernenergie-Programmen". Die ICRP (1958, 1965) betrachtete 5 cSv zuzüglich der Belastungen aus dem natürlichen Hintergrund und medizinischer Anwendungen als hinnehmbares zusätzliche Risiko, betonte aber wiederholt, daß "die genetische Dosis auf das geringst Mögliche gehalten werden sollte". In der Überlegung wurde davon ausgegangen, daß im Durchschnitt die Familienplanung bis zu diesem Alter abgeschlossen ist. Der Ausschuß für Strahlenschutz entschied 1969, daß der Gesamtwert von 5 cSv gleichermaßen der natürlichen Hintergrundstrahlung (externe sowie interne), medizinischen Expositionen und Emissionen aus kerntechnischen Anlagen zugeteilt werden soll.

übertragen wurde. Bei der Novellierung der StrlSchV 1989 wurde der so abgeleitete Grenzwert für die Bevölkerung von 30 mrem/Jahr (0,3 mSv/Jahr) beibehalten.

Nach näherer Betrachtung läßt sich feststellen, daß die ICRP-Empfehlung von 1965 diesen Grenzwert aus einer Empfehlung des UNSCEAR-Berichtes von 1962 zitiert und diese wiederum den Wert aus dem früheren ICRP-Empfehlungen von 1958 übernommen hatte. Im Jahre 1958 hatte die ICRP ein Expertengremium berufen, um eine Abschätzung anhand des damaligen wissenschaftlichen Erkenntnisstandes zu der Frage der "genetisch signifikanten Dosis" vorzunehmen, weil zu dieser Zeit die Sorge über vererbare genetische Schäden im Vordergrund stand. Mit anderen Worten, der limitierende Faktor waren genetische Effekte.

Der Grenzwert von 30 mrem pro Jahr wurde in den späteren Jahren beibehalten, als die Notwendigkeit des Strahlenschutzes besonders in Hinblick auf die Vermeidung von Krebserkrankungen gesehen wurde. Von dem o.g. Ausschuß für Strahlenschutz und der jetzigen Strahlenschutzkommission wurde diesem Grenzwert eine neue Begründung beigegeben. Man legte die mittlere natürliche Hintergrundbestrahlung zugrunde und erklärte die 30 mrem pro Jahr deshalb für angemessen, weil sie innerhalb der Schwankungsbreite der natürlichen Hintergrundstrahlung liege. Deshalb seien Schädigungen nicht zu erwarten.

Zurückblickend auf den Kenntnisstand und die Forschung in den 50er Jahren, als die ersten ICRP-Empfehlungen formuliert wurden, wird offensichtlich, daß die akuten Effekte von Strahleneinwirkung aus Tierversuchen und aus den Erfahrungen der Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki bekannt waren, d.h. die akuten Strahlenerkrankungen waren bereits beschrieben, auch wenn die zellulären Abläufe noch nicht bekannt waren. Die Entwicklungen in der Politik - Kalter Krieg und nukleare Wettrüstung - führten zur Förderung der strahlenbiologischen Forschung mit Zielsetzungen, die hauptsächlich auf wehrmedizinische Interessen ausgerichtet waren, mit dem Ergebnis, daß eine breiter angelegte Grundlagenforschung zu kurz kam. Stochastische Effekte<sup>26</sup>, wie die Entwicklung von Krebs, waren wohl schon bekannt, aber lediglich als Ergebnis wiederholter Teilkörperbestrahlungen mit ziemlich hohen Dosen. Hauptsächlich waren hiervon Radiologen betroffen. Stochastische Effekte niedriger Expositionen - wie sie im Kontext dieses Gutachtens und auch im allgemeinen jetzt verstanden werden - waren zu damaliger Zeit unvorstellbar. Nichtsdestotrotz machten Mendelsche Genetik und Zytogenetik Fortschritte, wobei die Chromosomen beliebte Forschungsobjekte waren. Bereits gegen Ende der 20er Jahre erbrachten die Pionierarbeiten von H. J. Muller mit der Fruchtfliege *Drosophila sp.* unwiderlegbare Beweise über die mutagenen Eigenschaften von Röntgenstrahlung und die Vererbbarkeit dieser Mutationen auf Folgegenerationen, wofür er im

---

<sup>26</sup>Abgesehen von akuten lokalen Effekten ("Strahlenverbrennungen") wurden Krebse auch als Berufserkrankung bei den früheren Radiologen zum Anfang dieses Jahrhunderts bekannt, so daß bei einem internationalen Kongreß der Radiologen im Jahre 1928 die Mitglieder dringenden Handlungsbedarf erkannten; dies führte zur Gründung der "Internationalen Kommission zum Schutz vor Röntgenstrahlung und Radium". Diese Kommission wurde in die heutige ICRP umbenannt.

Jahre 1946 den Nobelpreis für Medizin erhielt. Danach dominierte die Drosophila-Genetik über mindestens zwei Jahrzehnte den Bereich der Strahlengenetik, bis Anstrengungen in der Züchtung von Mäusen mit spezifischen phänotypischen Merkmalen, ausgelöst durch Punktmutationen, zum Erfolg führten und diese die Drosophila als Modell für genetische Studien ablösten. In der Tat zielten in den 50er und 60er Jahren die Studien über stochastische Wirkungen von Strahlungen auf die Transmission von Mutationen auf Folgegenerationen, kurzgesagt genetische Effekte<sup>27</sup>. Überlegungen zur Festlegung von Grenzwerten, sei es für beruflich exponierte Personen<sup>28</sup> oder für die Allgemeinbevölkerung, waren folglich auf die Vorbeugung von Erbkrankheiten bei den Nachkommen ausgerichtet. Damit war das Schutzkonzept vielmehr auf Folgegenerationen ausgerichtet, und nicht auf die betroffene Generation selbst, trotz der Tatsache, daß die ICRP schon im Jahre 1965 erkannt hatte, daß es eine "absolut sichere Strahlendosis" auch für die Exponierten selbst nicht gibt.

Der Wendepunkt kam in den 70er Jahren mit der Herausgabe der Krebsdaten von der damaligen Atombomben-Untersuchungskommission (ABCC), heute Radiation Effects Research Foundation (RERF), Japan, mit ergänzenden Dosis-Abschätzungen. Damit wurde klar, daß die bis dahin herrschenden Vorstellungen des Strahlenschutzes neu orientiert werden mußten: Die betroffene Generation selbst muß vor stochastischen somatischen Effekten geschützt werden, welche sich nach extrem unterschiedlichen Latenzzeiten als Krebs manifestieren. Die StrlSchV wurde 1976 in Kraft gesetzt vom damaligen zuständigen Bundesministerium für Inneres durch Übernahme der Empfehlungen von 1969 der ehemaligen Atomkommission (Ausschuß für Strahlenschutz). Diese Empfehlungen waren nichts anderes als die der ICRP von 1965 ("genetische Dosis") von 5 cSv (50 mSv) in 30 Jahren als Gesamtbelastung für die Allgemeinbevölkerung. Diese hat festgelegt, daß die Strahlenbelastung aus kerntechnischen Anlagen nicht mehr als ein Drittel der genetischen Dosis betragen darf (die restlichen zwei Drittel wurden auf Expositionen aus medizinischen Anwendungen und natürlicher Hintergrundstrahlung zugeteilt). Der Einfachheit halber wurde ein Drittel als 2 cSv (20 mSv) in 30 Jahren festgesetzt und davon dürfen atmosphärische Emissionen nur die Hälfte, d.h. 1 cSv (10 mSv) in 30 Jahren betragen. Die verbleibende Hälfte wurde flexibel gehalten für Ableitungen ins Wasser, Radioaktivität in der Nahrungskette u.s.w. Der Grenzwert pro Jahr war und ist dadurch 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a) oder 30 mrem/a für atmosphärische Emissionen und wurde als das 30 mrem-

---

<sup>27</sup>Genetik ist per Definition die Vererbung von Eigenschaften auf Folgegenerationen und wurde früher gleichsam als die Transmission über die Keimbahn auf die Nachkommen verstanden. Heute schließt dieser Begriff auch die Vererbung von somatischen Zellen auf folgende Zellgenerationen mit ein.

<sup>28</sup>Die Grenzwerte für beruflich exponierte Personen wurden bei 5 cSv/a (50 mSv/a) im Jahre 1958 festgesetzt und bestehen bis zum heutigen Tag. Mit der Novellierung der StrlSchV (§ 49) im Jahre 1989 wurde jedoch die gesamte Exposition während des Berufslebens auf maximal 40 cSv (0,4 Sv) eingeschränkt. Eine Novellierung der StrlSchV. nach EU-Richtlinie (1996) wurde angekündigt, aber noch nicht umgesetzt.



Konzept<sup>29</sup> bekannt. Allerdings sind die Exposition über Luft und Wasser unabhängig voneinander zu berücksichtigen, mit dem Ergebnis, daß die zulässige Belastung in Wirklichkeit das Doppelte beträgt, d.h. 0,06 cSv/a (0,6 mSv/a).

Die Novellierung der StrlSchV im Jahre 1989 hat den Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung unverändert belassen, obwohl sich zu jener Zeit die prinzipiellen Erkenntnisse über Strahlenwirkung gewandelt hatten. In ICRP-Publikation 26 von 1977 waren die zu erwartenden Krebstodesfälle in einer bestrahlten Population mit 100 auf  $10^4$  Sv (Kollektivdosis) abgeschätzt worden. Auf der Basis dieser Risikoangabe wurde der Grenzwert von 5 cSv/a (50 mSv/a) für beruflich Strahlenexponierte für vertretbar gehalten. Nach einer Dosisrevision in Hiroshima und Nagasaki, sowie einer längeren Beobachtungszeit, in der erhöhte Krebstodesraten pro Doseinheit auftraten, wurde der Risikoeffizient in ICRP-Publikation 60 von 1990 um den Faktor 5 erhöht. Die neue Schadenserwartung einschließlich der Berücksichtigung genetischer Folgen und der Krebsmortalität beträgt nach ICRP neuerdings 720 pro  $10^4$  Sv. Dementsprechend hätten die Grenzwerte um den Faktor 7 gesenkt werden müssen, um den gleichen Schutzstandard zu haben, wie vorher empfohlen wurde. Stattdessen wurde der Grenzwert für beruflich exponierte Personen von 5 cSv/a (50 mSv/a) in der Strahlenschutzverordnung beibehalten, jedoch die maximale Exposition im Berufsleben auf 0,4 Sv festgesetzt.

Nach Herausgabe der LSS-Daten über die atombombenbedingten Krebsraten in Hiroshima und Nagasaki wurden in Großbritannien Konsequenzen daraus gezogen und der Grenzwert für beruflich exponierte Personen von 5 auf 1,5 cSv/a (von 50 auf 15 mSv/a) herabgesetzt. Für die Allgemeinbevölkerung wurde der Grenzwert von 0,15 auf 0,05 cSv/a (von 1,5 auf 0,5 mSv/a) entsprechend reduziert. Die ICRP hat in Publikation 60 von 1990 eine Herabsetzung der Grenzwerte für beruflich Exponierte dergestalt empfohlen, daß in 5 Jahren 10 cSv (100 mSv) nicht überschritten werden dürfen, woraus eine mittlere Dosis von 2 cSv/a (20 mSv/a) resultiert, jedoch dürfen in einem einzelnen Jahr 5 cSv (50 mSv) erreicht werden. Diese jüngste Empfehlung der ICRP hat bislang keine Berücksichtigung in der deutschen StrlSchV gefunden.

Die Bestimmung der Ganzkörperdosis wurde modifiziert durch die Einführung des Konzeptes der effektiven Äquivalentdosis (ICRP 'Publication 60, 1990), wonach diese Äquivalentdosis im Teilkörperbereich mit organspezifischen Faktoren gewichtet wird.

### Fazit

Der derzeitige Grenzwert für beruflich exponierte Personen und der Grenzwert für die

---

<sup>29</sup>30 mrem oder 0,03 cSv (0,3 mSv) sind 0,6 % bezogen auf den Grenzwert für beruflich exponierte Personen von 5 cSv (50 mSv) pro Jahr (dies entspricht der "genetischen Dosis") und wurde ursprünglich willkürlich von der ICRP anhand der damaligen Erkenntnisse der 50er Jahre als Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung festgelegt.

Allgemeinbevölkerung leiten sich von den ursprünglichen ICRP-Empfehlungen von 1958 ab. Die Basis dafür war die "genetische Dosis", da das Hauptanliegen damals - und weiterhin im Jahre 1965 - die Minimierung von vererbaren Schäden an nachfolgenden Generationen war, wobei der Fortgang der Entwicklung von Kernenergie-Programmen frei von Hindernissen bleiben sollte. In der Zwischenzeit hat das LSS unwiderlegbare Hinweise somatisch-stochastischer Effekte in Form von verschiedenartigen Krebsen erbracht, deren Häufigkeit in linearer Beziehung zu den ermittelten Dosen standen. Danach war das Strahlenrisiko wesentlich höher zu bewerten, als vorher angenommen. Diese Erkenntnisse haben zu Konsequenzen bei den zuständigen britischen Behörden geführt, die die Grenzwerte für beruflich exponierte Personen herabsetzten. Entsprechende Konsequenzen hat es in Deutschland bislang nicht gegeben.

Im Gesamturteil kann gesagt werden, daß die Grenzwerte der deutschen StrlSchV sowohl für die allgemeine Bevölkerung als auch für beruflich strahlenexponierte Personen den Stand der Erkenntnis über die schädlichen Folgen einer Exposition nicht angemessen berücksichtigen.

**Bezug:**

- Anhang E: Beitrag von Roland Scholz
- Anhang O: Beitrag von Wolfgang Köhnlein

**II. 1. 2. Allgemeine Verwaltungsvorschriften zu § 45 StrlSchV (AVV)**

Die StrlSchV zum Schutz der Allgemeinbevölkerung (§ 45) schreibt vor, daß die technische Auslegung und der Betrieb eines Kernkraftwerkes so zu planen ist, daß die durch Emissionen über Luft und Ableitungen über Wasser bedingte Strahlenexposition jeweils den Grenzwert von 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a) in der Umgebung nicht überschreitet<sup>30</sup>. Da die Behörden der Länder für die Erteilung von Baugenehmigungen und für die betriebliche Aufsicht zuständig sind, wurden von der Bundesregierung Allgemeine Verwaltungsvorschriften, AVV, zu § 45 Strahlenschutzverordnung im Jahre 1990<sup>31</sup> erlassen, und dienten der Vereinheitlichung im Genehmigungs- und betrieblichen Aufsichtsverfahren in den Bundesländern. Die Behörden dürfen davon ausgehen, daß, wenn die Ausgangsparameter bei einer Anlage - d.h. die nuklidspezifischen Emission - in die Rechenvorschrift der AVV eingesetzt werden und zu entsprechend niedrigen

---

<sup>30</sup>damit ist die ungünstigste Einwirkungsstelle externer und interner Strahlenexposition auf eine Referenzperson (Erwachsener, 175 cm groß und 70 kg schwer), aufgrund von Emissionen in der Luft, Ableitungen über Wasser und über die Nahrungskette gemeint. Die Strahlenbelastung aus inkorporierten Radionukliden wird auf eine 50 Jahre-Folgedosis für Erwachsene und 70 Jahre-Folgedosis für Kinder gerechnet.

<sup>31</sup>Zuvor war eine Allgemeine Berechnungsgrundlage für Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächenwasser (Richtlinie zu § 45 StrlSchV), 1979, in Kraft.

Expositionen führen, die Grenzwerte für die Bevölkerung eingehalten werden. Wenn diese Vorschriften dem Erkenntnisstand der Wissenschaft und Technik entsprechen sollen, müssen Möglichkeiten einer Unterschätzung diskutiert werden, die die folgenden drei wichtigen Abschnitte der AVV betreffen:

- Ausbreitung radioaktiver Stoffe,
- Ermittlung der Strahlenexposition bei Ableitungen mit Luft,
- Ermittlung der Strahlenexposition bei Ableitung mit Wasser

### II. 1. 2. 1. Ausbreitung radioaktiver Stoffe

Verständnis über die Ausbreitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft setzt Berechnungen über die Exposition an einer beliebigen Stelle in der Umgebung voraus. Dieses wird erreicht durch die Anwendung meteorologischer Modelle. Die AVV verwendet das zweidimensionale Gaußsche Modell. Dieses Modell setzt voraus, daß

- das Gelände eben ist,
- die Emissionsrate (zeitlich) konstant ist,
- das meteorologische Windfeld stationär und homogen ist ,
- die Turbulenz stationär und homogen ist,
- die Diffusion in Transportrichtung vernachlässigbar gegenüber der Advektion ist,
- die Schadstofffahne einmal am Boden reflektiert wird.

Da die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen sich sehr stark ändern können, werden in der AVV sechs Ausbreitungsclassen (sog. Diffusionskategorien) eingeführt. Bei kurzzeitiger Emission, d.h. wenn die Annahme konstanter meteorologischer Bedingungen gerechtfertigt ist, wird die bodennahe Konzentrationsverteilung im Lee der Emissionsquelle gemäß AVV unter Verwendung des Kurzzeitenausbreitungsfaktors berechnet. Bei länger andauernden Emissionen (z.B für Betrachtungen des gesamten Jahres oder des Sommerhalbjahres) ist der Langzeitenausbreitungsfaktor zu verwenden. Die Bestimmung der Ablagerungsgeschwindigkeit radioaktiver Stoffe ist in einer festen Bezugshöhe, d.h. 1 m über der Vegetation, durchzuführen. Die Ablagerung können trocken (Fallout) oder mit Regen (Washout) niederschlagen und können jeweils entweder über kurze oder lange Zeiträume erfolgen, wobei für beide Fälle Berechnungsverfahren festgelegt worden sind.

Es stellt sich die Frage, ob mit der AVV sichergestellt ist, daß eine Unterschätzung der Strahlenexposition auf eine Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle nicht eintreten kann. Nach Auffassung der Strahlenschutzkommission, die die Modellierungen der AVV zusammengestellt hat, führt die Vorgehensweise zu konservativen Ergebnissen<sup>32</sup>, da insgesamt die Modelle und deren Parameter für die Berechnungen so gewählt seien, daß die berechnete Strahlenexposition schon deshalb konservativ sein müsse, weil

---

<sup>32</sup>Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission BD. 17, 1992

- die angenommene ungünstigste Einwirkungsstelle (Aufpunkt) fiktiv ist,
- die Referenzperson am Aufpunkt nicht ständig dem Maximum sämtlicher Expositionspfade ausgesetzt ist,
- jegliche Dekontaminationseffekte bei der Lebensmittelverarbeitung - durch Waschen oder Herauslösen über die Nahrungsmittelzubereitung - vernachlässigt werden.

Demgegenüber werden zu den Ausbreitungsrechnungen in den Beiträgen von Hinrichsen (Anhang D) und Schumacher (Anhang C1) folgende Feststellungen getroffen:

Ein gravierender Schwachpunkt des Gaußschen Modells liegt darin, daß es nur bei bestimmten orografischen Voraussetzungen Gültigkeit hat, die mehr oder minder idealisierte Bedingungen darstellen, die kaum anzutreffen sind. So können insbesondere in komplex gegliedertem Gelände oder bei Vorliegen einer komplexen Meteorologie (wie das Vorhandensein eines größeren Gewässer) Gauß-Modelle zu falschen Ergebnissen betreffend der Bestimmung der ortsabhängigen Schadstoffkonzentration in der Luft führen. Ein weiteres Problem liegt in der Anwendung vereinfachter Schemata für die genannten Ausbreitungskategorien. Außerdem kann es zu einer Fehlzuordnung von Ausbreitungskategorien kommen. Ein Zusammenwirken dieser beiden Fehlerquellen kann zu signifikanten Unterschätzungen der Expositionen<sup>33</sup> führen. Weiterhin sind Diskrepanzen zwischen theoretisch errechneten und gemessenen Werten für die Ausbreitung von Radioaktivität in Abhängigkeit von der Emissionshöhe und Entfernung von der Quelle beobachtet worden. Die Anwendung von gemittelten Werten aus Langzeitausbreitungen für die Berechnung von Kurzzeitausbreitungen kann zu Verfälschungen und folglich Unterschätzungen führen. Von besonderem Interesse ist auch, was als Quasi-Langzeitausbreitung bezeichnet wird, charakterisiert durch eine Vielzahl von Kurzzeit-Emissionen (eine Stunde Dauer) über einen längeren Zeitraum, z.B. von einem Jahr, anstatt einer kontinuierlichen Emission. Die gesamte Jahresexposition aus der Summe solcher kurzen Emissionen kann den Grenzwert für Langzeitausbreitungen um einen Faktor von 5,5 höher liegen<sup>34</sup>, wenn ersatzweise mit Langzeitausbreitung gerechnet wird.

## II. 1. 2. 2. Strahlenexposition bei Ableitung mit Luft

Die Strahlenbelastung der Bevölkerung durch Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft berücksichtigt sowohl externe als auch interne Expositionen, letztere bestehen aus der

---

<sup>33</sup>Abweichungen bis zu 2 Größenordnungen können dadurch erreicht werden (siehe Anhang C1: Beitrag von O. Schumacher S. 13 - 16)

<sup>34</sup>Die maximale Emission am Tag (24 h) darf 1 % der Jahresabgabe nicht überschreiten mit Ausnahmen von Jod, welches 0,05 % der Jahresabgabe nicht überschreiten darf. Die maximale Emission für eine Stunde wurde jedoch auf das 20fache der mittleren Jahresabgabe pro Stunde gesetzt (siehe Anhang D: Beitrag von K. Hinrichsen, Anhang C1: Beitrag von O. Schumacher).

Inkorporation von Radionukliden entweder durch Inhalation oder durch Ingestion mit Nahrung. Als externe Exposition werden Gamma- und Beta-Strahlen sowohl als direkte Ausstrahlung von der Emissionsfahne (Gamma- bzw. Beta-Submersion) als auch Strahlungen aus radioaktiven Niederschlägen betrachtet. Als Beta-Submersion wird ausschließlich die Dosis an der Haut bei einer Tiefe von 0,07 mm berücksichtigt. Bei Betrachtung eines Gemisches von Radionukliden darf die Summe der effektiven Dosen - spezifisch für die einzelnen Radionuklide - als Gesamtstrahlenbelastung angesehen werden.

Nach Schumacher sind vor allem folgende Vernachlässigungen zu kritisieren:

- Kontaminationen von Kleidung durch radioaktive Niederschläge, welche zur Dosis beitragen könnten;
- Suspension radioaktiver Niederschläge auf Boden durch Wind, welche entweder inhaliert oder mit Nahrung ingestiert werden könnten - betrachtet wird nur der Washout in den Boden;
- Anreicherung von Radionukliden über bestimmte Glieder der Nahrungskette, welche entweder unmittelbar oder mittelbar zur Nahrungsbelastung beitragen könnten;
- inhomogene Depositionen von radioaktiven Stoffen mit der Bildung von sogenannten "hot spots".

Ein weiterer Punkt ist die Vernachlässigung unterschiedlicher Partikelgrößen bei der Inhalation von Aerosolen. Die Vernachlässigung dieser zusätzlichen Quellen der Strahlenbelastung wird jedoch gewissermaßen durch die großzügige Handhabung bei Annahmen in der Expositionsrechnung kompensiert:

- Aufenthaltsdauer im Freien wird bei 100 % angesetzt und ist von Bedeutung hinsichtlich der Beta-Submersion;
- Vernachlässigung von Abschirmeffekten durch Gebäude ist relevant in Zusammenhang mit Gamma-Submersion und Gamma-Strahlung von kontaminiertem Boden;
- Für die Berechnung der Folgedosis wird ein Zeitraum von 50 bzw. 70 Jahren angesetzt.

Für die Ermittlung der Strahlenbelastung durch inhalierte Radionuklide werden in der AVV lediglich radioaktive Gase und Aerosole aus der Emissionsfahne berücksichtigt; resuspendierte radioaktive Stoffe aus abgelagerten Einträgen in den Boden werden vernachlässigt. Untersuchungen haben ergeben, daß die Resuspension einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zur Strahlenbelastung durch Inhalation darstellt. Die ICRP hat sich mit diesem Sachverhalt in ihren neueren Mitteilungen auseinandergesetzt, und Empfehlungen zur Resuspension wurden in die Richtlinie der EU (EURATOM 96/29) aufgenommen. Diese muß bis zum Jahr 2000 von den Mitgliedstaaten in ihren Schutzverordnungen umgesetzt werden. Dieser Aspekt hat bislang noch keinen Eingang in die AVV-Bestimmungen gefunden.

Für die Strahlenexposition bei der Inhalation radioaktiver Aerosole spielt die Partikelgröße eine Rolle. Vom ICRP wurden Biokinetik und dosimetrische Modelle für radioaktive Aerosole entwickelt, welche die Komplexität unterstreichen. Die ICRP hat das

respiratorische System in drei anatomisch-funktionelle Bereiche unterteilt (nasopharyngeale, trachiobronchiale und alveolare Bereiche). Welche dieser Regionen betroffen ist, hängt von der Partikelgröße ab. In der AVV wird jedoch von einem einheitlichen Aerosoldurchmesser von 1  $\mu\text{m}$  ausgegangen. Da Partikel dieser Größe in der Regel bis zu den Alveolen vordringen und deshalb eine höhere Wahrscheinlichkeit der Retention als größere Partikel haben, sind die Bestimmungen der AVV diesbezüglich als eher konservativ anzusehen<sup>35</sup>. Größere Partikel, die sich in den oberen Atemwegen absetzen, haben eine höhere Wahrscheinlichkeit durch den Transportmechanismus der Cilienaktivität der Schleimhaut aus dem Atmungstrakt eliminiert und anschließend ingestiert zu werden.

Der Hauptpfad der Exposition aus atmosphärischen Emissionen durch Ingestion ist über die Nahrungskette. Die Kontamination von Ackerpflanzen findet für die meisten der relevanten Radionuklide durch Oberflächendeposition statt, mit Ausnahme von Tritium (H-3) und Kohlenstoff 14 (C-14), welche über den Stoffwechselweg assimiliert werden. Die Aktivitätsdeposition über die ganze Wachstumsperiode der Ackerpflanzen wird als gleichmäßig angenommen. Für die Berechnung der spezifischen Aktivität in Pflanzen werden Transferfaktoren für die Nuklide vom Boden auf Pflanzen angewandt und eine Akkumulationszeit im Boden von 50 Jahren unterstellt. Für die Berechnung der spezifischen Aktivität von Tritium wird angenommen, daß Tritium als Dampf freigesetzt wird, welcher durch Kondensation niederschlägt. Pflanzen können Tritium entweder mit dem Tau über das Blattwerk oder mit dem Regen über das Wurzelwerk aufnehmen. Ersterer Pfad könnte effizienter sein, da die Verdünnung durch Oberflächenwasser ausbleibt (siehe Beitrag von W. Burkart und E. Wirth, Anhang F). Kohlenstoff-14 wird von Pflanzen als Kohlendioxid über die Photosynthese assimiliert.

Um die jährliche Strahlenbelastung zu ermitteln, muß die Aufnahme von Blattgemüse, pflanzlicher Erzeugnisse außer Blattgemüse, Fleisch- und Fleischprodukte und Milch- und Milchprodukte berücksichtigt werden. Das in der AVV angewandte vereinfachte Modell berücksichtigt Milchprodukte, Kuhmilch und Fleisch und läßt alle anderen Nahrungsmittel gleicher Kategorien außer acht. Transferfaktoren in der Nahrungskette sind ermittelt worden und werden für Berechnungen eingesetzt - mehr hierüber in einem späteren Abschnitt. Da einige Pilz- und Pflanzenarten die Eigenschaft besitzen, bestimmte Nuklide aus der Umwelt anzureichern, können durch ihren Verzehr sehr viel höhere Expositionen auftreten, als in der AVV berücksichtigt werden. Dies geschieht entweder durch direkte Aufnahme der genannten Nahrungsmittel oder indirekt durch den Verzehr von Wild, welches auch Nuklide sekundär sehr stark anreichern kann. Obwohl die dekontaminierende Wirkung bei der Verarbeitung roher Nahrungsmittel unberücksichtigt bleibt, wird dieser Vorteil ganz oder teilweise durch die

---

<sup>35</sup>Schumacher (Anhang C1) vertritt eine andere Meinung. Wie auch immer, es kommt auf die Verteilung der Partikelgröße an. Partikel kleiner als 5  $\mu\text{m}$  können in der Regel in die Alveolen eindringen, aber deren Wahrscheinlichkeit, wieder ausgeschieden zu werden, ist deutlich geringer.

Tatsache aufgehoben, daß Kontaminationen von Gemüse durch Bodenspritzwasser (vom Regen oder Bewässerungen), Deposition durch Resuspension und Kurzzeitemissionen (< 24 h) mit höheren genehmigten Emissionen um die Erntezeit außer acht gelassen worden sind.

Nach Schumacher kann daher die Dosisunterschätzung bei Verwendung der AVV für den Ingestionspfad 2-3 Größenordnungen betragen.

## II. 1. 2. 3. Strahlenexposition bei Ableitung mit Wasser

Das Modell, das die AVV für die Berechnung der Exposition durch Ableitungen mit Wasser vorschreibt, ist nur auf Fließgewässer anwendbar; nicht aber auf stehende Gewässer und Meere. Da die Kernkraftwerke in der BRD allesamt an Flüssen gebaut worden sind, hat diese Einschränkung des Modells keine Bedeutung. Wie im Fall der Ableitungen mit Luft müssen externe und interne Expositionspfade betrachtet werden. Bei ersterem bestimmt der Aufenthalt von Personen auf kontaminiertem Sediment die Exposition. Deshalb müssen folgende Situationen einbezogen werden:

- Aufenthalt auf Sediment
- Aufenthalt auf Überschwemmungsgebieten, wenn dies aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standortes begründet ist
- Aufenthalt auf Spülfeldern, wenn dies aufgrund der örtlichen Besonderheiten des Standortes begründet ist

Zur Ermittlung der inneren Strahlenexpositionen bei Ableitungen radioaktiver Stoffe mit Wasser werden in der AVV folgende Expositionspfade berücksichtigt:

- Trinkwasser
- Verzehr von Fisch aus Flüssen
- kontaminierte Viehtränken - Verzehr von Kuhmilch und Milchprodukte
- kontaminierte Viehtränken - Verzehr von Fleisch
- Beregnung<sup>36</sup> von Futterpflanzen mit kontaminiertem Wasser - Vieh - Milch (wie oben)
- Beregnung<sup>33</sup> von Futterpflanzen mit kontaminiertem Wasser - Vieh - Fleisch (wie oben)
- Beregnung<sup>33</sup> von Pflanzen mit kontaminiertem Wasser - Verzehr von Gemüse

Wenn es durch örtliche Besonderheiten des Standortes begründet ist, sieht die AVV darüber hinaus noch die Berücksichtigung folgender Expositionspfade vor:

- landwirtschaftliche Nutzung auf Überschwemmungsgebieten
- landwirtschaftliche Nutzung von Fluß- und Klärschlamm

Die mit Wasser abgeleitete Radioaktivität fließt zunächst in einen Auffangbereich (Vorfluter), wo eine gewisse Verdünnung stattfindet, bevor eine Ableitung in den Fluß zustande kommt.

---

<sup>36</sup>Die Anwendung von Beregnungsanlagen erfordert die Berücksichtigung von folgenden beiden Kontaminationspfaden: direkte Kontamination aus der Luft und indirekte Kontamination durch Bodenspritzwasser.

Obwohl die Ableitung von Radioaktivität mit Wasser von der AVV ziemlich umfassend abgehandelt wird, bestehen dennoch zwei Kritikpunkte. Erstens sind die Eßgewohnheiten von Menschen, auch wenn es sich evtl. um eine Minderheit handelt, die häufiger bspw. Krebse und Muscheln verzehren, außer Acht gelassen worden. Zweitens bleiben Expositionen durch sportliche Aktivitäten, z.B. Baden oder Segeln, unberücksichtigt. Epidemiologische Untersuchungen<sup>37</sup> zu kindlichen Leukämien in der Umgebung von nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen in Sellafield, England, und La Hague, Frankreich, weisen darauf hin, daß der Aufenthalt am Strand (mit Gischt vom Meer) und der Verzehr von Fisch und Schalentieren eindeutige Risikofaktoren sind.

#### II. 1. 2. 4. Zuverlässigkeit der AVV bezüglich der Einhaltung der Dosisgrenzwerte für die Bevölkerung

Laut § 45 der StrlSchV ist für die Allgemeinbevölkerung der Immissionsgrenzwert von 0,03 cSv (0,3 mSv) effektive Äquivalentdosis pro Jahr festgelegt. § 45 der StrlSchV schreibt weiterhin die maximal zulässige Teilkörperdosis wie folgt vor:

- |    |   |                    |
|----|---|--------------------|
| 1. | Keimdrüsen, Gebärmutter, rotes Knochenmark                    | 0,03 cSv (0,3 mSv) |
| 2. | alle Organe und Gewebe, soweit nicht unter 1. oder 3. genannt | 0,09 cSv (0,9 mSv) |
| 3. | Knochenoberfläche, Haut                                       | 0,18 cSv (1,8 mSv) |

Ferner fordert § 28 der StrlSchV, daß Expositionen grundsätzlich so niedrig wie möglich gehalten werden sollen. Die Dosis-Berechnungen für die Allgemeinbevölkerung wurden vom TÜV-Nord im Gutachten über die Sicherheit des KKK zum Strahlenschutz beim Betrieb durchgeführt. Zu jener Zeit (1983) bestand die AVV noch nicht in ihrer jetzigen Form (siehe Fußnote 31), und demnach ist die Konzeption nach damalig geltenden Bestimmungen erfolgt. Dennoch muß eine Bewertung nach heutigen Bestimmungen, welche im wesentlichen auf die früheren Bestimmungen aufgebaut sind, vorgenommen werden. Es ist selbstverständlich, daß sich die Grenzwertfestlegung an dem damaligen Stand von Wissenschaft und Technik orientierte. Da für die Kernkraftwerke eine durchschnittliche Gesamtbetriebsdauer von 30 Jahren vorgesehen war, ist es dringend erforderlich, daß die AKW-Betreiber ständig für technische Innovationen offen sind und die Bereitschaft zeigen, diese auch umzusetzen.

Aufgrund von Erfahrungen mit Siedewasserreaktoren hat der TÜV folgende Emissionsgrenzwerte für das KKK errechnet:

- |   |                             |                            |
|---|-----------------------------|----------------------------|
| • | radioaktive Gase            | $1,48 \times 10^{15}$ Bq/a |
| • | Jod-131                     | $9,62 \times 10^9$ Bq/a    |
| • | andere Aerosole (HWZ > 8 d) | $1,48 \times 10^{10}$ Bq/a |

<sup>37</sup>Gardner, MJ *et al.*: British Medical Journal, 300 (1990) 423-429.

Veil, J-F & Pobel, D: British Medical Journal 314 (1997) 101-106.



max. 24 h Emission	1/100 d. Jahresemission*
ausgenommen Jod-131 (i.d. Weideperiode)	1/200 d. Jahresemission
max. 6 monatige Emission	1/2 d. Jahresemission*

\* jeweils für Jod, Aerosole und Gase

Im Anhang C2, Beitrag von O. Schumacher S. 8 wird darauf hingewiesen, daß bei einer einzigen Emission bei maximalem, genehmigtem Wert für 24 Stunden die zulässige effektive Ganzkörperdosis sowie die Teilkörperdosis für die Schilddrüse überschritten werden kann. Denn es sind bezüglich kurzzeitiger Emissionen < 24 h, d.h. Emissionen in Stundenzeiträumen, keine weiteren Einschränkungen gemacht worden. Dieser Sachverhalt ist im Bericht vom TÜV angemerkt worden, wurde aber durch die Anwendung modifizierter Berechnungsgrundlagen gerechtfertigt. Eine wesentliche Annahme ist, daß Emissionen kontinuierlich und lediglich ausnahmsweise periodisch sind. Tatsache ist jedoch, daß die Emissionen diskontinuierlich stattfinden mit der Folge, daß eine 1/100 Fraktion theoretisch binnen einer Stunde und die genehmigte Jahresemission innerhalb von 100 Stunden freigesetzt werden kann. Daraus ergibt sich das Problem, daß Emission von kurzer Dauer aber erheblichen Ausmaßes unter vielfältigsten meteorologischen Bedingungen stattfinden können.

### Fazit

In der Praxis verfehlt die AVV ihr Ziel, die Allgemeinbevölkerung ohne Ausnahme zu schützen, da Dosis-Unterschätzungen nicht auszuschließen sind. Die AVV beinhaltet Unzulänglichkeiten aufgrund der angewandten Modelle und läßt Variabilitäten menschlicher Aktivitäten und Eßgewohnheiten unberücksichtigt. Es muß dennoch anerkannt werden, daß es Situationen gibt, wo die AVV die Expositionen überschätzt, aber der Gewinn wird durch eine ganze Reihe von Unzulänglichkeiten aufgehoben, die hier in Kürze zusammengefaßt werden. Die Anwendung einer Standard-Referenzperson ist in der internationalen Praxis für die Festsetzung von toxikologischen Grenzwerten für beruflich exponierte Personen üblich. Der Bezug auf eine solche Referenzperson für die Festlegung von Grenzwerten für die Allgemeinbevölkerung begründet sich in der Handhabbarkeit, stellt jedoch aus biologischer Sicht eine schwerwiegende Verfälschung dar, da einer Bevölkerung Mitglieder vom Ungeborenen bis hin zum Greisen angehören (siehe Kap. II.4.). Auch wenn für Folgedosis-Berechnungen Kinder gesondert berücksichtigt werden, sind dies Schätzungen, die weder Entwicklungsstufen noch der genetisch bedingten Individualität der Strahlenempfindlichkeit gerecht werden können.

Die Anwendung des Gauß-Modells ist mit schwerwiegenden Einschränkungen verbunden, da es für Situationen komplexer Orografie und der damit verbundenen komplexen meteorologischen Lage nicht vorgesehen ist. Die Verwendung von Langzeitausbreitungsfaktoren, die durch Mittelung bei Kurzzeitemission eingesetzt werden, führt zu Fehlern in der Konzentrationsbestimmung, die nach Schumacher einen von Faktor 5,5 ausmachen können.

Radioaktivität lagert sich nicht homogen ab. Auf dem Boden abgesetzte Radioaktivität kann wieder aufgewirbelt werden und als Resuspension erneut in die Kette von Geschehnissen eintreten. Obwohl die ICRP auf dieses Problem eingegangen ist und es vom EURATOM (Europäische Union) in ihren Richtlinien aufgenommen wurde, hat die AVV das Problem bislang ignoriert. Schließlich werden von der AVV die mögliche Anreicherung von Radionukliden in Nahrungsmitteln wie z.B. Pilzen nicht berücksichtigt und damit für diese Fälle zu kleine Dosiswerte ermittelt; statt dessen bevorzugt die AVV vereinfachte Modelle, basierend auf Nahrungsprodukten aus Kuhmilch und Fleisch.

Hinrichsen (Anhang D) betrachtet ein Fallbeispiel für die Jod-131-Emission beim KKK, in dem bei Anwendung der AVV die Einhaltung der Grenzwerte für die Effektive Ganzkörperdosis und Teilkörperdosis für die Schilddrüse überschritten werden können. Die genehmigte Jod-131-Jahresemission beträgt  $9,62 \times 10^9$  Bq/a und die Tagesemission (24 h) wurde auf 1 % der Jahresemission (ohne weitere Einschränkungen) begrenzt. Die Nichteinhaltung kann sich bei Ausnutzung des Grenzwerts für die Kurzzeitemission aufgrund der unter bestimmten Bedingungen vorliegenden meteorologischen Parameter ergeben.

Derartige Situationen können aufgrund der großen Variationsbreite der meteorologischen Verhältnisse entstehen. Für die Ermittlung der effektiven Emissionshöhe beim KKK (ein Parameter, der für die Dosisberechnung nach AVV benötigt wird) hat der TÜV-Nord Windkanalversuche der Fachhochschule Aachen herangezogen. Es ist festzustellen, daß lediglich die Hauptwindrichtungen berücksichtigt wurden. Nach Hinrichsen wurden folgende Ausbreitungssituationen außer acht gelassen: Inversionen, thermisch dominierte Zirkulationen, Ein- und Ausstrahlung am Hang, Kaltluftabflüsse sowie Führung des Windes durch den Elbhänge. Diese Aspekte sind jedoch von Bedeutung in Zusammenhang mit der Untersuchung zur Frage der kindlichen Leukämien in der Elbmarsch auf der gegenüberliegenden Seite der Elbe.

#### **Bezug:**

- Anhang C1: Beitrag von Otfried Schumacher
- Anhang D: Beitrag von Karsten Hinrichsen
- Anhang B1: Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake

## **II. 2. Quellen und Freisetzung von Radioaktivität**

Die Themen in diesem und weiteren Abschnitten nehmen besonderen Bezug auf das KKK (Kernkraftwerk Krümmel). Im allgemeinen werden in Kernreaktoren Radionuklide von Elementen aus praktisch allen Gruppen des Periodensystems gebildet. Diese Nuklide sind entweder Produkte der Kernspaltung oder der Neutronenaktivierung. Da die Halbwertszeiten (HWZ) und Zerfallsenergien dieses Spektrums an Radionukliden mehrere Größenordnungen auseinanderliegen, hängt die Zusammensetzung der freigesetzten Radionukliden nicht nur von dem Freisetzungsmechanismus im Reaktor, Rückhalte- und Filterfaktoren ab, sondern auch vom

Alter des Gemisches. Die Freisetzung von Radioaktivität mit Wasser ist bereits in einem anderen Abschnitt in allgemeiner Form behandelt worden und wird deshalb hier vernachlässigt, zumal, wie schon erwähnt, sich dieser Pfad der Freisetzung als weniger problematisch erweist. Im Gegensatz hierzu ist die Freisetzung von Radioaktivität mit Luft mit Problemen verbunden und wird hier speziell im Zusammenhang mit KKK behandelt.

Die Radionuklide, die mit der Fortluft über den Reaktorkamin abgeleitet werden, werden quantitativ identifiziert, es sei denn die Halbwertszeit (HWZ) ist zu kurz oder sie können aufgrund von Interferenz nicht bestimmt<sup>38</sup> werden. Da es technisch nicht machbar ist, die Emissionen nach jeglichen Kombinationsmöglichkeiten redundant zu erfassen, wird die Routineüberwachung - zum Zweck der Kontrolle der Einhaltung der Grenzwerte für die Bevölkerung - anhand eines Schemas, das nur teilweise Redundanz aufweist, durchgeführt. Die ermittelte Dosis für die Bevölkerung wird für Expositionen auf Beta- und Gamma-Submersionen und von Depositionen auf dem Boden errechnet. Hinzu muß die interne Strahlenbelastung durch inkorporierte Nuklide durch Inhalation und Ingestion berücksichtigt werden. Ein System zur Überwachung der tatsächlichen Strahlenbelastung innerhalb des 5 km-Nahbereichs wurde geplant und installiert. Die meisten Überwachungsmessungen erfassen die örtliche Gammadosisleistung. Thermolumineszenzdosimeter werden an verschiedenen Stellen angebracht, um die kumulative Dosis zu ermitteln. Ein weiteres, davon unabhängiges System der Fernüberwachung zeichnet die Gammadosisleistung auf und überträgt diese direkt an die Reaktorsicherheitsbehörde. Radioaktive Ablagerungen am Boden und auf Bewuchs werden ein- bis zweimal jährlich an einigen Stellen beprobt. Da das Überwachungssystem nicht darauf ausgerichtet ist, Edelgase, Kohlenstoff-14, kurzlebige Nuklide und Alpha-Strahler zu erfassen, ergibt sich die Frage, ob sich bestimmte, für einen Siedewasserreaktor (KKK) typische Radionuklide einer Detektion entziehen können.

Da die Pfade der Freisetzung von Radioaktivität in einem vorhergehenden Abschnitt zusammenhängend mit der AVV behandelt wurden, wird in diesem Abschnitt auf bestimmte Probleme eingegangen, welche in der Diskussion und Kritik in Zusammenhang mit den Leukämieerkrankungen im Nahbereich von KKK standen. In dem vom TÜV-Nord 1983 erstellten Betriebsgutachten wurde dargestellt, daß abgesehen von den Edelgasen sowohl Jod-131, Strontium-90, Cäsium-137 als auch Alpha-Strahler von radiologischer Bedeutung sind, weil Dosiermittlungen darauf hinweisen, daß diese Nuklide beim Normalbetrieb größtenteils für die Strahlenbelastung verantwortlich sind (Schmitz-Feuerhake, Anhang B1, S. 9). Für Strontium-90 und Alpha-Strahler wurden explizit Jahresrichtwerte empfohlen, welche in der Summe deutlich

---

<sup>38</sup>Bestimmungen sind nur möglich oberhalb der Nachweisgrenze, welche von der Zusammensetzung des Radionuklid-Gemisches abhängig ist. Als solches ist es vorstellbar, daß bestimmte Kombinationen von Radionukliden zur Nichterfassung von Anteilen, aufgrund von Interferenz, eine Grenzwertüberschreitung bedeuten könnte. Es wird angenommen, daß diese Möglichkeit auszuschließen ist, was durch Rechenbeispiele modellhaft überprüft worden ist.

die zulässige Grenze unterschreiten (wie oben, S. 32, unter andere Aerosole, HWZ > 8 Tage):

	<u>Emissionsrichtwert</u>
• Strontium-90	$3,7 \times 10^9$ Bq/a
• Alpha-Strahler	$5,55 \times 10^6$ Bq/a

Hinzugefügt wurde auch ein Richtwert für Tritium bei  $7,4 \times 10^{12}$  Bq/a.

Die Betreiber sind verpflichtet, bei erwarteten Überschreitungen der Richtwerte die Reaktorsicherheitsbehörde darüber zu unterrichten und dabei eine Vorlage für die Behebung beizufügen. Bei Normalbetrieb wird die Exposition durch luftgetragene Radioaktivität am Aufpunkt (ungünstigste Einwirkungsstelle) eine potentielle Ganzkörperdosis von  $4,1 \times 10^{-3}$  cSv (0,041 mSv) ermittelt ohne Unterscheidung zwischen Kindern und Erwachsenen. Dieser errechnete Wert wurde auf der Grundlage von Erfahrungswerten aus der Nuklidzusammensetzung im Wasser von anderen Siedewasserreaktoren ermittelt. Der Hauptanteil der gasförmigen Radioaktivität stammt aus dem Kondensator und wird über die Abgasanlage (Absorberstrecke mit 40 d-Verzögerung für Xenon- und 2,4 d für Krypton-Isotope) dem Fortluftkamin zugeführt. Die durch Leckagen freigesetzte gasförmige Radioaktivität wird nicht über die Abgasanlage geführt, sondern durch separate Entlüftungs- und Abgasstränge dem Fortluftkamin zugeleitet.

Im KKK werden seit Inbetriebnahme außerordentlich hohe chronische Leckagen aus dem Kühlsystem beobachtet (Anhang B 2, S. 7). Dieses Reaktorleckagewasser sammelt sich im Reaktorsumpf und wird in regelmäßigen Abständen nach Filtration abgeleitet. Die Strahlenbelastung der Bevölkerung ist abhängig von der Freisetzungsquelle aufgrund der qualitativen Unterschiede: Reaktorwasser ist mit Feststoffen beladen, die aus den Brennstäben aufgrund des unvermeidbaren Vorkommens von Porosität der Brennstabhüllen stammen. Die durch Leckagen freigesetzte gasförmige Radioaktivität wird nicht über die Abgasanlage geführt, sondern durch separate Entlüftungs- und Abgasstränge dem Fortluftkamin zugeleitet.

## II. 2. 1. Relevante Radionuklide und Dosisbeiträge

Die Bevölkerungsexposition durch Freisetzungen mit der Luft aus dem KKK am Aufpunkt ist vom TÜV 1983 (die Belastungen aus dem Versuchsreaktor an der GKSS mit berücksichtigt) berechnet worden:

	<u>Ganzkörper</u>	<u>Knochen</u>
• Gammasubmersion + Bodenstrahlung	$3,9 \times 10^{-3}$ cSv (0,039 mSv)	$3,9 \times 10^{-3}$ cSv (0,039 mSv)
• Inhalation + Ingestion	$0,31 \times 10^{-3}$ cSv (0,0031 mSv)	$1,3 \times 10^{-3}$ cSv (0,013 mSv)
• Gesamt	$4,2 \times 10^{-3}$ cSv (0,042 mSv)	$5,2 \times 10^{-3}$ cSv (0,052 mSv)

Diese auf der Grundlage eines Modells durchgeführte Berechnung gibt an, daß 93 % der

Ganzkörperdosis und 75 % der Knochendosis von der Gammasubmersion und von abgelagerter Radioaktivität auf dem Boden stammen. Bonka<sup>39</sup> sieht den Anteil der Bodenstrahlung als sehr gering an. Die in diesem Zusammenhang interessierende Dosis des roten Knochenmarks wurde vom TÜV nicht explizit ausgewiesen.

Verschiedene Szenarien über eventuelle Radioaktivitäts-Freisetzungen aufgrund von Störfällen wurden vom TÜV erarbeitet. Im Hinblick auf die oben genannten in den KKK-Monatsberichten unter Punkt 4.12 ausgewiesenen chronischen Kühlmittleckagen (aus dem druckführenden Teil innerhalb des Sicherheitsbehälters) ist ein anderes Szenario über akute Reaktorwasserleckage vom TÜV - wenn auch nicht direkt vergleichbar - dennoch quasi analog und wird hier als Beispiel angewandt, um darzustellen, daß die Strahlendosis insbesondere des roten Knochenmarks wahrscheinlich signifikant höher liegt, als aus den Messungen der Gammasubmersion zu folgern wäre. Dieses Szenario beschreibt eine schwerwiegende akute Kühlwasserleckage innerhalb der Sicherheitsbehälter, gefolgt von Luftspülungen nach 80 Tagen. Die berechneten maximalen Dosen wären dann wie folgt:

			<u>Dosen in cSv x 10<sup>-3</sup> (mSv x 10<sup>-2</sup>)</u>		
			<u>Kleinkind</u>	<u>Kleinkind</u>	<u>Erwachsener</u>
			<u>korrigiert</u>		
•	alle Organe	Gammasubmersion	0,13	0,16	0,13
•	alle Organe	Bodenstrahlung	6,3	9,5	6,3
•	Knochen	Inhalation	0,68	0,68	11
•	Knochen	gesamt	7,1	10,3	17,4
•	r. Knochenmark	Inhalation	0,14	0,14	2,2
•	r. Knochenmark	gesamt	6,6	9,8	8,6
			<u>Verhältnis von Dosisbeiträgen</u>		
•	r. Knochenmark	Gammasubmersion/gesamt	2,0 %	1,6 %	1,5 %
•	r. Knochenmark	Inhalation/gesamt	2,1 %	1,4 %	25,6 %
•	r. Knochenmark	Bodenstrahlung/gesamt	96 %	97 %	73 %

Die korrigierte Dosis für das Kleinkind wird nach gängigen Konzepten für Dosis-Berechnungen, entsprechend einer Empfehlung der Strahlenschutzkommission<sup>40</sup>, ermittelt, in der Faktor 1,2 für

<sup>39</sup>Bonka, H: Strahlenexposition durch radioaktive Emission aus kerntechnischen Anlagen im Normalbetrieb. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1982.

<sup>40</sup>BMU (Bundesministerium für Umwelt), Hrsg.: Modelle, Annahmen und Daten mit Erläuterungen zur Berechnung der Strahlenexposition bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Luft oder Wasser zum Nachweis der Einhaltung der Dosisgrenzwerte nach § 45 StrlSchV. Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission, Band 17, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York, 1992.

Gammasubmersion und 1,5 für Bodenstrahlung gegenüber Erwachsenen festgelegt wurde. Diese Werte stellen eine Situation dar, nach der die Strahlenbelastung von der Gammasubmersion und Inhalation von vernachlässigbarer Bedeutung bezüglich der Belastung des Kleinkindes ist, und bei Erwachsenen beträgt diese lediglich ein Viertel der Dosis. Von den Berechnungen wurde die Exposition durch Ingestion bewußt ausgenommen, da es sich bei dem gewählten Szenario um eine sehr kurzfristige Betrachtung handelt. Wie effektiv Inhalation und/oder Ingestion sein kann, hängt von der chemischen Natur der in Frage kommenden Nuklide ab. Dieser Aspekt wurde unkommentiert belassen. Die Berechnungen mögen Gültigkeit haben für eine spezifische Situation wie oben angegeben. Bei einer chronischen Leckage, die hier das Problem ist, sind die Radionuklid-Parameter geändert. Dies erfordert eine dem entsprechende neue Bewertung der Dosiswirkungs-Beziehungen.

Während bei einer chronischen Leckage die Zeitintervalle zwischen jeder Luftspülung des Sicherheitsbehälters sicherlich von Bedeutung wären, müssen zwei zusätzliche Aspekte angesprochen werden, um korrekte Dosismittlungen durchzuführen. Der eine ist die stärkere Abnahme kurzlebiger Radionuklide bei einer gleichzeitigen Zunahme langlebiger Nuklide. Der andere ist der ständige Zufluß frischer Gemische aus dem Nuklidinventar. Und schließlich muß die Wechselwirkung zwischen beiden genannten Aspekten, abhängig von der Leckagerate, je nachdem, ob sie konstant oder veränderlich ist, berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß es mit der Zeit zu einer Akkumulation schwerer, langlebiger Aerosolbestandteile durch Ablagerung an den inneren Oberflächen des Sicherheitsbehälters kommt. Aus den Monatsberichten des KKK über eine Zeitspanne von 5 Jahren wurde festgestellt, daß 75 Luftspülungen des Sicherheitsbehälters stattgefunden hatten, wodurch sich ein Intervall von durchschnittlich 83 Tagen ergibt, welches ziemlich in Übereinstimmung mit dem 80 Tage-Szenario des TÜVs steht. Es wird postuliert, daß im Zeitverlauf die Fraktion der schweren Partikel bei jeder Luftspülung zunehmen würde. Eine Verifizierung dieser Postulate steht aus. Eine quantitative Untersuchung dieses Belastungspfades kann nicht Gegenstand dieses (strahlenbiologischen) Gutachtens sein. Aufgrund der strahlenbiologischen Bedeutung der knochensuchenden Radionuklide muß dieser eventuelle Belastungspfad erörtert werden.

Eine ausschließliche Berufung auf die Aufgaben über die gemessenen KKK-Emissionen ist zur Aufklärung nicht ausreichend, da sich nach Ansicht von Fachleuten mehrfach Widersprüche zwischen den Emissionswerten und denen in der Umgebung aufgefundenen Reaktornukliden ergeben haben<sup>41</sup>. Durch Kühlmittleckagen kann eine Zunahme der Beta- und Alpha-Strahler in der Umgebung erwartet werden und somit eine erhöhte Strahlenbelastung des roten Knochenmarks bis hin zur Überschreitung des Grenzwertes.

Die Aufsichtsbehörde hat bisher eine solche Möglichkeit der Freisetzung

---

<sup>41</sup>Schmitz-Feuerhake, I., Schumacher, O., Ziggel, H.: Umweltindikatoren für radioaktive freisetzungen durch das KKW Krümmel. Fachverband für Strahlenschutz, 28. Jahrestagung 1996, S. 353-357.

knochenmarksrelevanter Radionuklide ausgeschlossen, mit dem Hinweis, es handele sich bei den in den Monatsberichten dokumentierten Kühlmittelverlusten um Dampfleckagen. In solchem Fall würden die Feststoffnuklide im Kühlmittel weitgehend zurückbleiben. Der Gutachter kann diese Schlußfolgerung anhand der in den Leukämiekommission zur Verfügung stehenden Unterlagen nicht überprüfen. Die Problematik der Leckagen sollen Gegenstand des angekündigten anlagenspezifischen technischen Gutachtens zum Reaktor Krümmel sein.

Sämtliche Emissionen in der Gasphase (einschließlich Aerosole) müssen bei Normalbetrieb mit der Fortluft durch den Reaktorkamin abgeleitet werden. Ein zusätzliches Luftableitsystem ("Venting") ist vorhanden. Es ist aber nur für Notfälle vorgesehen, die über Auslegungstörfälle hinausgehen. Es wird alles erfaßt, was über den Fortluftkamin abgeleitet wird. Dieses Erfassungssystem muß von derartiger Effizienz sein, daß keine Freisetzung ohne Aufzeichnung zustanden kommen kann. Die Unfehlbarkeit des Systems wird erwartet. Demzufolge dürfen dann keine Diskrepanzen zwischen den aufgezeichneten Emissionen und Immissionen auftreten. Die Erfahrungen mit KKK kann dieses jedoch nicht bestätigen. Im Gegenteil, über die Jahre hindurch ist ein ganzes Spektrum von Radionukliden kurz-, mittel- und langlebiger Isotope, die zweifellos als Produkte der Kernspaltung<sup>42</sup> charakterisierbar sind, nicht nur nachgewiesen worden, sondern wurden teilweise in deutlichen Konzentrationen in der Umgebung (auf dem Boden und im Bewuchs<sup>43</sup>) bestimmt. Diese Meßergebnisse sind bislang als normal angesehen worden, da die berechneten Dosisbeiträge unter den Jahresgrenzwerten liegen. In einer 1998 durch die BI in Zusammenarbeit mit der Universität Bremen durchgeführten Pilotuntersuchung wurde unterstellt, daß Plutonium-239 und Americium-241 im Hausstaub die erwartete Summe der aus den Fallouts der überirdischen Kernwaffentests, des Satellitenabsturzes und der Tschernobylkatastrophe übersteigt. Diese Behauptung wurde in einer Studie des MFE

---

<sup>42</sup>Einige der Nuklide sind als Korrosionsprodukte bezeichnet worden und andere als Produkte der Neutronenaktivierung.

<sup>43</sup>Abgesehen vom Routineüberwachungsprogramm des KKK, in dem Gräser und - über eine begrenzte Zeitspanne von einigen Jahren - auch Fisch untersucht wurden, war die BI aus der Elbmarsch bemüht, in Zusammenarbeit mit der Universität Bremen Belege für übermäßige radioaktive Emissionen aus dem KKK herbeizuführen, anhand von Messungen von Tritium (als Indikator für Ableitungen mit Luft) als Inkorporation in Jahreswachstumsringen von Bäumen aus der Umgebung erkrankter Kinder. Die Leukämiekommissionen zur Ursachenaufklärung der Leukämiefälle schlossen sich diesem Weg an und empfahlen eine systematische Untersuchung von Tritium und Kohlenstoff-14 in den Wachstumsringen von Fichten und Eichen. Die offiziellen Untersuchungen ergaben negative Befunde mit Ausnahme einer statistisch gesicherten Abweichung im Wert des Jahresringes 1986 einer Kiefer aus der Elbmarsch. Auf eine Nachfolgeuntersuchung wurde verzichtet, da die Kommission den Aufwand als zu groß ansah im Vergleich zur eventuell zu erwartenden Aussage. Die initiale Pilotstudie der BI andererseits wies Tritiumerhöhungen auf, da allerdings die BI andere Baumarten aussuchte (Apfel und Kastanie) und die Wachstumsringe - aufgrund der Dichte der einzelnen Ringe - in Jahresgruppen zusammengefaßt werden mußten, bleibt eine Interpretation der Ergebnisse offen.

nachgeprüft. Das Ergebnis steht im Widerspruch zu einer zweiten Messung der BI, in der die erhöhten Konzentrationen der Transurane einschließlich Americium-241 bestätigt wurden. Ohne weiter auf Einzelheiten der beiden Studienergebnisse einzugehen, zeigen diese, daß der Schwachpunkt des Überwachungssystems in der Tat bei der Bestimmung von Alpha-Strahlung aus Aerosolen liegt. Die Erfassung der Alpha-Strahler wird durch Herausfiltern der Feststoffe im Fortluftkamin durchgeführt. In der Umgebungsüberwachung ist das angewandte Instrumentarium nicht für die nuklidspezifische Messung von Alpha- und Beta-Strahlern ausgelegt. Die Überwachung der Immissionen zielt auf die Messung von Gamma-Strahlen. Aufgrund der strahlenbiologischen Bedeutung der Alpha-Strahler ist es erforderlich, daß die Überwachung der Alpha-Emissionen deutlich verbessert wird.

## **II. 2. 2. Anmerkungen zur Wiederaufbereitung nuklearer Brennstoffe: Sellafield**

Der derzeitige Stand der Technik sieht die Wiederaufbereitung verbrauchter nuklearer Brennstoffe vor. Demzufolge werden die verbrauchten Brennstäbe aus dem KKK zu einem der zwei europäischen Zentren, entweder La Hague an der bretonischen Küste, Frankreich, oder nach Sellafield an der englischen Westküste transportiert. Die Wiederaufbereitung verbrauchter Kernbrennstoffe ist mit der Freisetzung von enormen Mengen an Radioaktivität verbunden, wovon geringe Mengen unvermeidlich entweder mit der Luft oder mit dem Wasser in die Umwelt gelangen. Diese Anmerkung beschränkt sich auf Sellafield (ehemals Windscale), die weltgrößte nukleare Wiederaufbereitungsanlage.

Die Wiederaufbereitung besteht im Prinzip aus der mechanischen Vorbereitung und chemischen Extraktion von Uran und Plutonium aus den Reaktorbrennstäben, welche zuvor in Abklingbecken gelagert wurden. Nach dem Abklingen bestehen die Brennstäbe typischerweise aus 96 % Uran, 1 % Plutonium und 3 % Spaltelementen. Das Ziel der Wiederaufbereitung ist die Trennung von Uran und Plutonium von den Spaltprodukten, für die erneute Herstellung von Brennstäben. Die radioaktiven Abfälle, die in Sellafield als Folge der Lagerung und Wiederaufbereitung entstehen, werden nach deren Aktivität als niedrig-, mittel- und hochaktive Fest- bzw. flüssige Abfälle eingestuft. Hochaktive Abfälle werden auch als wärmeproduzierend bezeichnet, da ihr Aktivitätsniveau groß genug ist, um Wärme zu generieren. Die Ableitung von Radioaktivität in die Umwelt wird von den Umweltbehörden geregelt. Ableitungen erfolgen entweder über die Luft oder mit dem Abwasser durch eine 2,5 km lange Leitung in die Irische See. Freisetzungen in die Atmosphäre bestehen aus Gasen und Aerosolen. Die genehmigte und aufgezeichnete Freisetzung für das Jahr 1996 wird hier als Beispiel aufgeführt:



<b>Radionuklide</b>	<b>Freisetzung 1996 (TBq)</b>	<b>Genehmigte Freisetzung (TBq)</b>
<b>Ableitungen ins Meer</b>		
Tritium	3000	31000
Kohlenstoff-14	11	20,8
Strontium-90	16	48
Technetium-99	150	200
Cäsium-137	10	75
Plutonium (Alpha)	0,21	0,7
Plutonium-241	4,4	27
Americium-241	0,07	0,3
<b>Freisetzung mit Luft</b>		
Tritium	524,3	1443
Kohlenstoff-14	0,63	7,97
Argon-41	2600	3700
Krypton-85	94000	590000
	<b>GBq</b>	<b>GBq</b>
Schwefel-35	140	210
Jod-131	2,3	--
Cäsium-137	0,75	7,1
Plutonium (Alpha)	0,057	0,66
Plutonium-241	0,53	4,0
Americium-241	0,036	0,2

Als Auflage für die genehmigten Freisetzungen wird der Betreiber British Nuclear Fuels Ltd. (BNFL) verpflichtet, die Erfassung der Freisetzungen als Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte und regelmäßige Umgebungsüberwachungen durchzuführen und die Ergebnisse dieser Maßnahmen in ihren Jahresberichten anzugeben. Das britische Ministerium für Landwirtschaft und Fischerei beauftragt Forschungsinstitute für die Entwicklung und Durchführung von unabhängigen Umweltüberwachungsprogrammen. In einer derartigen Untersuchung im Jahre 1993 wurde die Konzentration von Cäsium-137, Strontium-90, Plutonium-239/-240 und Americium-241 im Boden und Bewuchs an 18 verschiedenen Stellen im Lande gemessen. Die Konzentrationen um Sellafield erwiesen sich dabei als die höchsten. Als die Konzentration von Cäsium-137 im Jahre 1993 mit früheren Werten verglichen wurde, stellte sich eine Zunahme um einen Faktor von 1,2 heraus, welche im Schwankungsbereich liegen mag. Ein Vergleich für Plutonium-239/-240 ergab ein bemerkenswert anderes Ergebnis: eine signifikante Zunahme um den Faktor 5. Die Überwachungssysteme arbeiten nach dem gleichen Prinzip, wie

die der Kernkraftwerke. Wie schon erwähnt, liegt hier der Schwachpunkt in der Überwachung von Alpha- und Beta-Strahler niedriger Energie.

Sowohl in der Umgebung von Sellafield als auch von La Hague sind jeweils Cluster kindlicher Leukämien festgestellt worden. Das Cluster um Sellafield war im Grunde genommen der erste epidemiologisch gründlich untersuchte Cluster. Professor Dr. Martin Gardner der Universität Sheffield (siehe Fußnote 37, Seite 32 für Literaturhinweis) hat diesen Cluster untersucht. Die Quintessenz seiner Befunde war, daß die Väter der an Leukämie erkrankten Kinder in der Wiederaufbereitungsanlage beschäftigt waren. Sie waren 6 Monate vor Konzeption der Kinder mit überhöhten Strahlendosen exponiert. Das Cluster bei La Hague wurde von Professor Dr. Jean François Veil (siehe auch Fußnote 37 für Literaturhinweis) untersucht. Die gemeinsamen Risikofaktoren für beide Untersuchungsgebiete waren der Verzehr von Fisch und Schalentieren und der Aufenthalt am Strand.

### **Fazit**

Die Exposition durch AKW wird unter normalen Betriebsbedingungen auf Gamma- und Betasubmersionen zurückgeführt. Dagegen hat der TÜV auch darauf hingewiesen, daß unter besonderen Umständen, wie ein Störfall in Form von Wasserleckagen, die Gamma- und Betasubmersionen unwesentlich sein können, da bei deutlicher Überschreitung der Grenzwerte die Strahlenbelastung durch Bodenkontamination verursacht wird. Da das KKK seit Inbetriebnahme erhebliche chronische Wasserleckagen bis an die Toleranzgrenze hin aufweist, stellt sich die Frage, ob die halbjährlichen Freisetzungen mit Luftspülungen über das zusätzliche Ableitsystem gewissermaßen dem Szenario der TÜV-Experten entspricht. Ist dies der Fall, dann sollte die Exposition logischerweise höher liegen als die theoretisch berechneten Expositionen unter Annahmen von Bedingungen, die der betrieblichen Realität nicht entsprechen. Dieser Verdacht wird gestützt durch die fehlende Überwachung niederenergetischer Beta- und nuklidspezifische Alpha-Strahlungen. Die Beobachtungen in Sellafield bestätigen die Existenz dieses Problems. Die Umgebungsüberwachung (Immission) ist nicht auf die Erfassung dieser Strahlungen ausgerichtet, sondern prinzipiell auf die Messung von Gammastrahlung eingestellt. Dies wird mit der vollständigen Nukliderfassung am Fortluftkamin begründet. Tatsache ist jedoch, daß die redundante Erfassung von niederenergetischen Beta- und Alpha-Strahlungen in der Umwelt nicht gegeben ist, obwohl der TÜV in seiner radiologischen Bewertung die strahlenbiologische Bedeutung dieser Strahlungen hervorgehoben und deswegen orientierende Richtwerte für entsprechende Nuklide festgelegt hat. In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß das Zielorgan derartiger Strahlenbelastung das rote Knochenmark ist, ohne an dieser Stelle näher darauf einzugehen.

### **Bezug**

- Anhang B1: Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake
- Anhang G: Beitrag von Arthur L. Sanchez

### II. 3. Ausbreitung von Radioaktivität

In vorhergehenden Abschnitten, in denen die AVV behandelt wurde, wurde die Frage über die Ausbreitung von Radioaktivität in allgemeiner Form angesprochen. Daher wird dieser Abschnitt speziellen Problemen in Zusammenhang mit dem KKK gewidmet. Dem Vorwurf, daß das Cluster kindlicher Leukämien in der Umgebung des KKK in ursächlichem Zusammenhang mit seinem Betrieb steht, wird von der Betreiberseite und der Reaktoraufsicht wie folgt entgegnet:

- "... daß die tatsächlichen Abgaben radioaktiver Stoffe des KKK im Bereich von 1 % der Genehmigungswerte lagen,
- daß die Genehmigungsgrenzwerte mit einer Strahlenexposition am höchstbelasteten Aufpunkt (östlich der Anlage) in Höhe von 0,004 cSv/a (0,04 mSv/a) korrespondieren, also um ca. eine Größenordnung unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a) liegen,
- daß die Ausbreitung nach Süden in Richtung Elbmarsch (in dem Sektor von 135° bis 225°) um einen Faktor 5 seltener erfolgt als die Ausbreitung zu dem höchstbelasteten Aufpunkt im Osten der Anlage (Ausbreitungsrichtung von 45° bis 135°).
- Zusammengenommen ergibt sich daraus, daß die Strahlenbelastung in der Elbmarsch mehr als drei Größenordnungen unterhalb des gesetzlichen Grenzwertes von 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a) lag. ..."

Die Ablagerung radioaktiver Stoffe in der Elbmarsch (wo der Hauptanteil der Leukämie-Häufung vorliegt) ist eine direkte Funktion der freigesetzten Radioaktivität und müßte sich in dieser Gegend niederschlagen. Jedes Postulat - Mikroklimaeffekt u.s.w. - als Unterstützung für die These, daß das KKK als sehr wahrscheinlicher Verursacher für die Leukämien verantwortlich ist, wird verpflichtet sein nachzuweisen, wie Expositionen mindestens drei Größenordnungen höher als die oben genannten erreicht werden können, um die Grenzwerte zu überschreiten. Es sei unvorstellbar, daß ein Mikroklimaeffekt dieses zustandebringen kann.

Dennoch ist zu bedenken, daß, so logisch diese Argumentationslinie zu sein scheint, die Unsicherheiten in der Dosisbestimmung anhand gemessener Emission enorm sind. Darüber hinaus deutet der in § 45 StrlSchV angegebene Grenzwert in keiner Weise an, Schwellendosis zur Leukämieauslösung oder für sonstige stochastische somatische Effekte zu sein. Die o.a. "Fakten" werden jedoch nicht nach ihrer Gültigkeit hinterfragt. Der oben implizierte Expositionspfad beruht auf Ableitung mit Luft, und das Gauß-Modell (worauf die Berechnungen und Vorraussagen basieren) weist, wie schon in einem vorhergehenden Abschnitt dargestellt, einige Unzulänglichkeiten auf. Der schwerwiegendste Einwand ist der der Nichtanwendbarkeit bei komplexer Orografie.

Diese Tatsache, gekoppelt mit der Anwendung von sechs vereinfachenden

Ausbreitungskategorien, könnte ohne weiteres zu einem geschätzten Fehler am maximalen Aufpunkt von zwei Größenordnungen führen, wenn bei der Kategorisierung Fehler unterlaufen. Der geografische Ort des maximalen Aufpunktes ist variabel und abhängig von den aktuellen Parametern, demzufolge hat ein räumlich exakt fixierter Aufpunkt nur fiktiven Charakter. Damit ist der Ort des maximalen Aufpunktes möglicherweise verschieden für Beta- und Gammasubmersion bzw. Inhalation und Ingestion. Hinzu kommt, daß der Ort des maximalen Aufpunktes sich mit den meteorologischen Bedingungen und den Jahreszeiten ändert. Weitere grundlegende Fehler, wie bereits erwähnt, sind die Annahme einer kontinuierlichen Emission sowie die Ausbreitungsberechnungen zur Langzeitausbreitung mit Hilfe von Koeffizienten, die über viele Jahre gemittelt wurden. Tatsache ist, daß die Emissionen aus dem KKK diskontinuierlich sind. Nach Hinrichsen (Anlage D) kann eine einzige dem KKK genehmigte Tages-(Stunden)ableitung bei Verwendung des Kurzzeitausbreitungsfaktors und erhöhter Ablagerungsgeschwindigkeit für Aerosole (ausschließlich als Strontium-90 angenommen) beim Kleinkind zu einer Knochenmarksdosis von 0,13 cSv (1,3 mSv) führen. Für verbesserte Voraussagen wurde das Konzept der Quasi-Langzeitausbreitung eingeführt. Die Diskrepanz bei der Anwendung dieser Berechnungsweise, im Gegensatz zu der Langzeitausbreitung, wird etwa bei einer Größenordnung eingeschätzt. Folglich können, allein auf einer rein formellen Basis, die oben aufgeführten Argumente widerlegt werden.

Tatsächlich können Expositionen durch Beta- und Gammasubmersionen um den Grenzwert ( $0,03 \text{ cSv/a} = 0,3 \text{ mSv/a}$ ) das Vorkommen des Leukämieclusters in der festgestellten Größe nicht erklären. Diese Tatsache schließt in keiner Weise die Möglichkeit einer Strahlenätiologie aus; hierzu bedarf es lediglich einer anderen Erklärung. In allen bisherigen Untersuchungen zum Leukämiecluster liegt ein ernsthafter Mangel darin, daß kein Vergleich zwischen Emissions- und Immissionsdaten - sowohl auf qualitativer als auch quantitativer Basis - möglich ist. Dieses muß als elementare Voraussetzung für jegliche Diskussionen über Betriebsfehler betrachtet werden. Statt dessen hat es lediglich unvollständige Daten über das eine oder das andere (d.h. entweder Emissionen oder Immissionen) gegeben, begleitet von Anschuldigungen bzw. Zurückweisungen. Auch wenn dieser Vergleich in den Leukämiekommissionen angestellt worden wäre, würde sich allerdings die Korrelation zwischen Emission und Immission wegen der Unvollständigkeit der Immissionsmessung nur schwer überprüfen lassen.

Bei fehlender Information über Emissionen müssen die Emissionsdaten *prima facie* bewertet werden. Nach Expertenmeinung dürfen beim genehmigten Jahresemissionsgrenzwert und den geforderten Nachweisgrenzen der Meßgeräte die Immissionen in der Umwelt nicht meßbar sein<sup>44</sup>. Da die Daten der Jahresemission aus dem KKK die Ausschöpfung von lediglich

---

<sup>44</sup>Bundesamt für Strahlenschutz, Prof. Dr. A. Kaul: Leukämie in der Elbmarsch, Brief an Vorsitzenden der nieders. Expertenkommission Leukämie Prof. Dr. Dr. E. Wichmann vom 30.12.1992.

1% der genehmigten Emission zeigen, dürften dann logischerweise die Immissionen unter der Nachweisgrenze liegen. Dieses war und ist sicherlich nicht der Fall. Die Situation verschlimmert sich, indem bestimmte kurzlebige Nuklide, welche als Reaktorkorrosionsprodukte identifizierbar sind, wiederholt in der Umgebung gemessen wurden.

In Kürze: es hat eine Vorgeschichte von schwerwiegenden Diskrepanzen gegeben. Daher muß die Zuverlässigkeit des Überwachungsinstrumentariums angezweifelt werden. In diesem Zusammenhang ist es relevant zu wiederholen, was schon in einem vorhergehendem Abschnitt erwähnt wurde, daß die Effizienz der Überwachung von niederenergetischer Betastrahlung und die nuklidspezifische Erfassung von Alphastrahlern fraglich ist.

### **II. 3. 1. Technische Regeln für den Betrieb kerntechnischer Anlagen**

Die Überwachung (und das dafür erforderliche Instrumentarium) der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken wird durch einige Regeln vom Ausschluß (KTA)<sup>45</sup> bestimmt.

#### **II. 3. 1. 1. KTA-Regel 1503.1**

Diese Regel stellt die sicherheitstechnischen Anforderungen an das Überwachungssystem für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Kaminfortluft bei bestimmungsgemäßem Betrieb auf und schreibt organisatorische Maßnahmen vor, die für diese Überwachung zusätzlich als notwendig angesehen werden. Die Überwachung hat nach KTA folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Bilanzierung der mit der Kaminfortluft abgeleiteten radioaktiven Stoffe als eine Grundlage für die Beurteilung der radiologischen Auswirkungen,
- automatische Auslösung von Signalen bei Grenzwertüberschreitungen,
- Lieferung eines Beitrages zur Erfüllung der Vorschriften des § 46, Abs. 1, Ziffer 3, der StrlSchV (betr. Schutz von Luft, Wasser und Boden).

Die Bilanzierung erfolgt über die nuklidspezifische Erfassung aller durch den Reaktorbetrieb denkbaren radioaktiven Stoffe, außer Kohlenstoff-14. Da reine Alpha- und Betastrahler nuklidspezifisch nur über Langzeitmessungen ermittelt werden (vierteljährlich), verzichtet man auf die angemessene Erfassung kurzlebiger Strahler wie z.B. dem  $\beta$ -strahler Yttrium-90 (HWZ 65 hr). Die KTA-Regel schreibt einen Katalog von Nukliden vor, über die der Aufsichtsbehörde berichtet werden muß. Darüber hinaus müssen weitere aufgefundene Nuklide angegeben werden, deren HWZ > 8 d beträgt. Die Dokumentation muß vollständig und lückenlos sein. Prüfungen

---

<sup>45</sup>Der KTA ist eine Einrichtung der Bundesregierung mit einer Geschäftsstelle am Bundesamt für Strahlenschutz.

durch von der zuständigen Behörde hinzugezogene Sachverständige haben jährlich stattzufinden. Sie beziehen sich auf die Funktionstüchtigkeit der Meßgeräte, Probenahme und Meßverfahren sowie Kalibrierungen. Eine Kontrolle der Dokumentation und der Bilanzierung durch den Betreiber sieht sie nicht vor. Inwieweit Kontrollrichtlinien über die KTA-Regeln hinaus bestehen, entzieht sich der Kenntnis des Gutachters.

### II. 3. 1. 2. KTA-Regel 1504

Diese ist die parallele Regel, die sich auf die Überwachung der Ableitung radioaktiver Stoffe mit Wasser bezieht und nach dem gleichen Schema vorgeht. Gegenüber der Luftüberwachung schreibt sie jedoch vor, daß Proben aus dem Nebenkühlwasser zur Beweissicherung einzubehalten sind, allerdings nur für die Dauer eines Jahres. Zu überwachen sind alle Abwässer aus der Anlage, die radioaktiv kontaminiert sein könnten. Das Ziel ist die Bilanzierung aller Nuklide im Abwasserpfad, also auch nur von der Emissionsseite her, um eine Beurteilung der radiologischen Auswirkungen zu ermöglichen. Wie schon in einem vorhergehenden Abschnitt über die AVV erwähnt, sind die Kontrollen der Radioaktivitätsableitungen über den Wasserpfad im Rahmen des strahlenbiologischen Gutachtens weniger relevant, weil diese im allgemeinen nur bestimmte Risikogruppen, wie Fischkonsumenten und Wassersportler, betreffen. Ausnahmen bilden der Aufenthalt am Elbufer, mögliche Verbindungen der Elbe mit dem Trinkwasser und die Kontamination von Nutzpflanzen durch die südlich der Elbe angelegten Bewässerungssysteme. Diese werden immissionsseitig überwacht, indem Messungen an Elbwasser und Sediment sowie in Nutzpflanzen und Kuhmilch regelmässig erfolgen. Allerdings fehlen dabei wiederum nuklidspezifische Bestimmungen reiner Alphastrahler. Strontium-90 wird nur in Pflanzen und Kuhmilch gemessen.

### II. 3. 1. 3 Gutachten zum KKK , TÜV 1983

Da einige Aspekte dieses Gutachtens in früheren Abschnitten im Zusammenhang mit der AVV schon erwähnt wurden, werden hier zusätzliche Punkte in bezug auf die KTA-Regeln behandelt. Die potentielle Strahlenbelastung durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe mit Luft und mit Wasser wurde wie folgt abgeschätzt:

	<u>Jahresdosis in cSv (x 10 mSv) durch Ableitung</u>		
	<u>mit Luft</u>	<u>mit Wasser</u>	<u>Gesamt</u>
<u>Kleinkinder</u>			
• Schilddrüse	0,030	0,0024	0,032
• Knochen	0,0047	0,0068	0,0115
• Ganzkörper	0,0041	0,0043	0,0084

Erwachsene

• Schilddrüse	0,008	0,0043	0,0012
• Knochen	0,0051	0,0068	0,0119
• Ganzkörper	0,0041	0,0043	0,0084

Eine Dosisabschätzung für das rote Knochenmark wurde nicht erstellt. Die Berechnungen sind auf der Grundlage gemittelter Werte aus Langzeitausbreitungsdaten erstellt worden, und auf die Unzulänglichkeiten in Zusammenhang mit dieser Verfahrungsweise ist bereits hingewiesen worden. Das Modell wurde aufgrund gesammelter Erfahrung in Jülich entwickelt und auf das Problem bezüglich der Extrapolationsfähigkeit von Daten wurde ebenfalls aufmerksam gemacht.

Aus diesen Szenarien unter Berücksichtigung der aufgeführten Organ- und Gewebedosen wonach außer der Schilddrüse die Organ- und Ganzkörperdosis über den Wasserpfad in etwa gleich ist mit der über die Abluft, läßt sich schließen, daß die Einwohner nördlich der Elbe, wo keine Bewässerung stattfindet, und die südlich der Elbe sehr unterschiedliche Strahlenbelastungen durch den Wasserpfad haben können, und daß die nördliche Kollektivdosis (als Maß für einen Strahleneffekt) im Nahbereich bei gleicher Kontamination über den Luftpfad u.U. deutlich kleiner sein kann als die südliche.

Immissionsseitig ist das vom TÜV dargestellte Szenario mit Hilfe von Gammadosisleistungsmessungen und akkumulierenden Gammadosisbestimmungen überwachbar. Die damals (in der Fassung von 1979) gültige "Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen" (REI) wird für geeignet gehalten, diejenigen Radionuklide zu überwachen, die maßgeblich zur Strahlenexposition beitragen. Die REI stützt sich überwiegend auf Gammamessungen und stellt daher kein zweites unabhängiges System dar, anhand dessen die Einhaltung der Dosisgrenzwerte kontrolliert werden kann. Weitere Defizite in den Anforderungen des TÜV an die Umgebungüberwachung sind darin zu sehen, daß keine Anweisungen für den Fall gegeben werden, wenn es zu Diskrepanzen zwischen aufgefunderer Umgebungskontamination und dem über die Emission ermittelten Eintrag kommt.

### II. 3. 2. Kontroverse Immissionsdaten

Wie erwähnt, soll es bei bestimmungsgemäßem Betrieb eines AKW im allgemeinen zu keiner meßbaren Zunahme der künstlichen Radioaktivität in der Umgebung kommen. Die Immissionsdaten in den Jahresberichten des KKK und der GKSS sowie im Behördenmeßprogramm gaben Anlaß zur Besorgnis (s. Fußnote 41, Schmitz-Feuerhake, Schumacher, Ziggel und Anhang D, Beitrag von Hinrichsen), weil daraus die wiederholten Feststellungen einer ganzen Reihe von kurz- und langlebigen Radionukliden, die als Kernspaltungs- und Aktivierungsprodukte entstehen, in der Umgebung (in Boden und

Bewuchs)<sup>46</sup> zu entnehmen sind. Die zitierten Gutachter behaupten, daß dieses eine chronische Gegebenheit des KKK sei. Eine unabstreitbare Tatsache ist, daß der Reaktor eine sog. "schmutzige Phase"<sup>47</sup>, um das Jahr 1985 herum, etwa ein Jahr nach Inbetriebnahme des Reaktors, aufzuweisen hat. Anstiege von Cäsium-134, Cäsium-137 und Strontium-90, die sich nicht durch Kernwaffentests oder Tschernobyl erklären lassen, sind wiederholt im Boden und Bewuchs gemessen worden. Im Jahr 1987 stieg die Strontium-90-Konzentration im Bewuchs bei Dassendorf (Schleswig-Holstein) in 10 km Entfernung vom KKK auf 30 Bq/kg Strontium-90 an<sup>48</sup>. Ein Meßfehler ist durch Mehrfachbestimmung auszuschließen. Diese Konzentration ist nicht nur relativ sondern auch absolut herausragend. Die Jahresmittelwerte in Niedersachsen nach 1986 waren <4 Bq/kg, die Maximalmittelwerte im Zeitraum 1985-1993 lagen bei <9 Bq/kg<sup>49</sup>. Die Mittelwerte von 1989-1993 an reaktorfernen Standorten in Schleswig-Holstein lagen unter 4 Bq/kg, die Maximalwerte waren < 10Bq/kg. Der 1987 in der BRD gemessenen höchste Wert betrug 5,3 Bq/kg; nur 1989 trat ein Wert von 25,3 Bq/kg auf. Am Meßort Dassendorf werden nur einmal im Jahr Boden- und Bewuchsproben genommen. Im Folgejahr 1988 zeigte sich dort ebenfalls eine etwa 3-fach erhöhte Strontium-90-Konzentration im Boden, begleitet von einem Eintrag des Spaltproduktes Ruthenium-106, 1,9 Bq/kg (HWZ 1 Jahr). Der Hinweis, es handele sich bei Dassendorf um einen Referenzort, ist wenig entlastend, denn nähere Meßorte befinden sich in der Ausbreitungsrichtung (nördlich von KKK) nicht.

Regelmäßig erhöhte Meßwerte für des Spaltproduktes Cäsium-137 zeigten sich im Regenwasser an der Meßstelle Grünhof in Hauptwindrichtung vom KKK. Die Erklärung durch den Betreiber und die Aufsichtsbehörde, daß diese durch einen tschernobylverseuchten Laubpropf

---

<sup>46</sup>Schmitz-Feuerhake, I. *et al*: Leukaemia in the proximity of a German boiling water nuclear reactor: Evidence of population exposure by thromosome studies and environmental radioactivity. Environ. Health Perspectives 105, (1997) 1499-1504.

<sup>47</sup> Aus Expertenkreisen wird inoffiziell zugegeben, daß Reaktoren von der Bauart des KKK eine anfängliche "schmutzige Phase" aufweisen, bis anfängliche Probleme gelöst sind und der Betrieb sich stabilisiert. In dieser Phase war es, als Inspektoren der Internationalen Atomenergieagentur in Wien (IAEA) ungewöhnliche Mengen an "crud"-Bildung im Reaktor feststellten und auf Lösung des Problems bestanden.

<sup>48</sup>Nimmt man an, daß sich jemand 1 Jahr lang von Gemüse mit der Strontium-90-Konzentration 30 Bq/kg ernährt, ergibt sich eine Folgedosis von etwa 8.5 mSv für das Kind und 25.5 mSv für den Erwachsenen.

<sup>49</sup>BMU: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresberichte.



erzeugt wurden<sup>50</sup>, führt zu Widersprüchen<sup>51</sup>. Die Beobachtung einer luftgetragenen Zusatzkontamination wird außerdem durch erhöhte Cäsium-137-Werte in der Luftüberwachung um das KKK gestützt, die ebenfalls nicht durch die genehmigten KKK-Emission erklärbar sind (s. Schmitz-Feuerhake, Schumacher & Ziggel, Fußnote 41; Schmitz-Feuerhake et al Environmental Health Perspectives, 1997). Bei der Luftüberwachung wurde auch Strontium-90 bestimmt und es traten in den Jahren 1984 und 1988 erhöhte Konzentrationen dieses Spaltproduktes auf. Diese liegen um mindestens 3 Größenordnungen höher, als sich anhand der vom Betreiber ausgewiesenen Strontium-90-Emissionen nach AVV ermitteln läßt (Schmitz-Feuerhake, Schumacher & Ziggel).

Radioaktive Korrosionsprodukte wie Chrom-51 (HWZ 27,8 d) und andere, die zu den mittellanglebigen Nukliden zählen, wie Mangan-54 (303 d), Kobalt-60 (5,26 a), Zink-65 (250 d), Silber-110 (255 d) und Antimon-125 (2,7 a), sind in der Umgebung und im Getreide festgestellt worden. Ein außerordentlicher Befund war die Messung von Kobalt-60 im Quellwasser. Belegt ist, daß genau diese Korrosionsprodukte in den Jahren 1983-1985 in großen Mengen in das KKK-Abwasser abgegeben wurden<sup>52</sup>.

Es ist bemerkenswert, daß das KKK die Verursachung dieser Kontaminationen stets abgestritten hat. Eine Ablehnung der Verantwortlichkeit wäre nur dann legitim, wenn überzeugende Erklärungen für eine andere Herkunft der Radionuklide vorgelegt worden wären. Dieses ist bisher nicht der Fall gewesen. Ob ein Zusammenhang mit der von der IAEA beanstandeten ungewöhnlichen "crud"-Bildung und den Korrosionsprodukten in der Umwelt besteht, ist nicht bekannt. Nicht weil keine Kenntnis darüber besteht, sondern weil die Experten darüber schweigen. Gelassenheit seitens der Betreiber wird legitimiert durch die REI, die den Betreiber dazu nicht verpflichtet, Erklärungen für die Immissionsdaten vorzulegen. Folglich ist die Ursache der Kontaminationen unklar und die Angelegenheit bleibt unverfolgt, weil keine rechtliche Verpflichtung dazu besteht.

### Fazit

Die vorgelegten Argumente, zur Zerstreuung des Vorwurfs, daß das Leukämiecluster durch Strahlenbelastungen aus dem KKK verursacht wäre, sind rein formalistisch und stützen sich auf die Grundlage, daß die aus Modellen gewonnenen theoretischen Berechnungen, tadellos in

---

<sup>50</sup>Stellungnahme zur Radioaktivität des Niederschlags in der Umgebung des Kernkraftwerks Krümmel des MFE VI 61/610 vom Januar 1997.

<sup>51</sup>Schmitz-Feuerhake, I: Radionuklide in den Luftfiltern aus der Umgebung des KKK beruhen nicht auf Laborkontaminationen: Regenwassermessungen bestätigen anhaltende nicht bilanzierte Freisetzungen. Bericht an AG Belastungsindikatoren vom 8.2.00.

<sup>52</sup>Ziggel, H: Untersuchung zur Rekonstruktion kurzlebiger Spaltproduktemissionen durch das KKK anhand der Auswertung von Umgebungsüberwachungsmeßdaten. Auftrag des Nieders. Sozialministeriums. Bremen, im Februar 1996.

der Praxis funktionieren. Diese Argumente sind in gleicher Weise mit rein theoretischen Gegenargumenten widerlegbar. Eine Irrführung in der Argumentation ist die Auslegung von Dosisgrenzwerten aus der StrlSchV, als wären sie Schwellenwerte für stochastische Strahlenwirkungen. In diesem Zusammenhang muß bedacht werden, daß die Stelle des maximalen Aufpunktes (an der der Dosisgrenzwert festzustellen sei) fiktiv ist. Das Gutachten vom TÜV 1983 - auf dessen Grundlage die Baugenehmigung erteilt wurde - nahm Bezug auf die REI für die Überwachung von Emissionen und Immissionen. Obwohl die REI die Bedeutung der Immissionsüberwachung als Ergänzung zur Emissionsüberwachung hervorhebt, um Redundanz und damit eine genaue Bilanzierung zu gewährleisten, wird diese Zielsetzung durch ihre eigene Empfehlung eines Überwachungssystemes (für Immissionen), gerichtet hauptsächlich auf Gammastrahlen, zunichte gemacht. Als Resultat bleibt Disparität zwischen den beiden Überwachungen. Grundlage für die KTA-Regeln ist wahrscheinlich auch die REI, weshalb keine stringenter Überwachung für Alpha- und Betastrahler erfolgt. Betriebliche Besichtigungen mit Überprüfungen der Emissionsdaten wurden als nicht erforderlich erachtet. Bald nach Inbetriebnahme hat der Reaktor seine "schmutzige Phase" gehabt, belegt durch die Feststellung einer ganzen Reihe von Spalt-, Aktivierungs- und Korrosionsprodukten in der Umwelt, welche von KKK geleugnet wird. Die Feststellung der ungewöhnlichen "crud"-Bildung im Reaktor durch die IAEA fiel auch in diese "schmutzige Phase", aber schriftliche Expertenmeinungen über die "crud"-Bildung und die Kontamination der Umwelt liegen (dem Autor und der Leukämie-Kommission des Landes S.-H.) nicht vor, siehe jedoch Abb.7.3.1.4, Korrosionsprodukte im Abwasser (Ziggel 1996) in Anhang B1, Anlage 3.

#### **Bezug**

- Anhang D: Beitrag von Karsten Hinrichsen
- Anhang B1, B3: Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake
- Anhang C2: Beitrag von Otfried Schumacher

#### **II. 4. Inkorporation von Radioaktivität und Auswirkungen auf Menschen**

Die Inkorporation von Radionukliden erfolgt entweder durch Inhalation oder durch Ingestion mit Nahrung. Eine dritte Möglichkeit ist die Inkorporation durch direkte Kontamination offener Wunden mit radioaktiven Stoffen, obwohl diese Möglichkeit nur bei Notfällen und Unfällen von Relevanz ist. Dennoch ist die Eintrittspforte durch Kontamination offener Wunden ein gefährlicher Weg der Inkorporation, verglichen mit Ingestion bzw. Inhalation, wegen fehlender physiologischer Barrieren. In diesem Abschnitt werden lediglich die ersten zwei genannten Wege der Inkorporation, aufgrund der Freisetzung von Radioaktivität mit Luft, behandelt. Nur die Radionuklide aus dem Reaktorinventar, die erheblich zur Strahlenbelastung beitragen, können berücksichtigt werden.

Die Ablagerung radioaktiver Aerosole kann sich entweder als trockener "Fallout" oder als "Washout" mit Regen niederschlagen. Welcher Fall auch immer vorliegt, die Oberflächeneigenschaften der Blätter beeinflussen maßgebend den Anteil der Niederschläge, die sich festsetzen. Zusätzliche Kontamination kann vom Bodenspritzwasser bei Regen zustandekommen. Monovalente Nuklide, wie Cäsium, können gut vom Blattwerk aufgenommen und in der Pflanze verteilt werden. Dieses gilt gewissermaßen auch für bi-valente Nuklide, wie Strontium, aber die Translokation innerhalb der Pflanze ist beschränkt. Chelatgebundene multivalente Nuklide können auch von Pflanzen aufgenommen werden. Die Resorption über das Wurzelwerk wird im allgemeinen als geringer effizient angesehen und kann erheblich durch verschiedene Bodenparameter, wie Humusgehalt und pH-Wert, beeinflußt werden. Die Effizienz der Inkorporation von Radionukliden aus dem Boden in Pflanzen wird durch den Transferfaktor (Verhältnis der Aktivitätskonzentration zwischen Boden und Pflanze) bestimmt.

#### **II. 4. 1. Inkorporation durch Ingestion**

Kontamination des Blattwerkes kann häufig 50% oder mehr der gesamten Kontamination der Vegetation ausmachen. Da die aufgelagerten radioaktiven Feststoffe auf der Oberfläche sich nicht leicht lösen, werden diese mit Grünfutter von Tieren ingestiert. Die weitere Aufnahme ist von den chemischen Eigenschaften abhängig. Prävention der Kontamination von Tieren wird am besten erreicht durch Vermeidung von verseuchtem Futter. Der Verzehr von Blattgemüse ist die analoge Form der direkten Kontamination von Menschen. Der andere Pfad der Kontamination von Menschen - und damit auch von anderen Tieren, entweder Raubtiere oder Allesfresser, wie Menschen selbst - ist der über die Nahrungskette, mit der Anreicherung der Schadstoffe auf jeder trophischen Ebene. Der Verzehr von Fleisch als auch Fleisch- und Milchprodukten bringt eine potentielle Strahlenbelastung mit sich, wenn diese Nahrungsmittel aus einer radioaktiv verseuchten Gegend stammen. Das Kontaminationspotential hängt von den Ernährungsgewohnheiten des Einzelnen ab. Deshalb können allgemeine Angaben über den Hauptkontaminationspfad beim Menschen nur ansatzweise erfolgen. Da die europäische Ernährung zum überwiegenden Teil sowohl aus Fleisch als auch aus Fleisch- und Milchprodukten besteht, kann die Kontamination als überwiegend über die Nahrungskette angesehen werden. Obwohl die Kontamination durch den Verzehr von Blattgemüsen ein unmittelbarer Radioaktivitätstransfer ist, darf nicht außer acht gelassen werden, daß die Kontamination über die Nahrungskette das zusätzliche Risiko der Bioakkumulation mancher Radionuklide in bestimmten Produkten in sich bergen kann. Die Bioakkumulation ist von besonderer Bedeutung bei bestimmten Nahrungsmitteln aus dem Meer und Süßwasser.

Die Resorption von Nukliden aus dem Darm ist abhängig von der physiologischen Relevanz der Elemente, den chemischen/physiko-chemischen Eigenschaften, bedingt durch die Position im periodischen System der Elemente. Der normale physiologische Bedarf an Mineralien wird in essentielle und Spurenelemente unterteilt. Nuklide, die einer der beiden Kategorien dieser

physiologischen Elemente angehören, werden im Darm gewöhnlicherweise resorbiert und durchlaufen den Metabolismus. Nichtphysiologische Elemente, auch wenn sie nicht ohne weiteres resorbiert werden, können aufgrund der og. physiko-chemischen Verhältnisse die Darmbarriere dennoch überschreiten. Die chemische Form wird dann der limitierende Faktor sein. Obwohl solche Elemente - von besonderem Interesse sind die Metallionen - in die physiologischen Vorgänge nicht einbezogen sind, können sie transportiert und in Organen deponiert werden. Die Deposition könnte vorübergehend sein, und wenn die Ausscheidung nicht gelingt, dann findet die Retention durch eine sekundäre Ablagerung z.B. in den Knochen statt. Da derartige fremde Metallionen an Stoffwechselfvorgängen nicht beteiligt sind, dürfen solche Vorgänge nicht als Stoffwechsel/Metabolismus, sondern müssen als Biokinetik bezeichnet werden. Die Resorptionsfähigkeit von radioaktiven Nukliden wird von der Menge der nichtradioaktiven Form und von anderen Nahrungskomponenten im Darmtrakt beeinflusst, welche fördernde bzw. hemmende Wirkungen ausüben können.

Als Folge von Kontaminationen der Umwelt ist es oft erforderlich, die Konzentration der Radionuklide in einem Organ bzw. Organsystem zu berechnen. Mit der Zeit stellt sich ein Gleichgewicht ein, in dem die Tagesaufnahme eines bestimmten Nuklids mit Nahrung gleich der Ausscheidung am Tage ist. Die erforderliche Zeit für die Gleichgewichtseinstellung ist von der Art der Nuklide abhängig<sup>53</sup>. Auf die biokinetischen Charakteristika der vier wichtigsten Nuklide, die aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden und die Strahlenbelastung maßgebend entscheiden (Jod, Strontium, Cäsium, Plutonium) wird einzeln eingegangen.

#### II. 4. 2. Inkorporation durch Inhalation

Obwohl es in der Strahlenbiologie üblich ist, bei Kontamination von Menschen an einen Transfer von Radionukliden über die Nahrungskette (d.h. Ingestion) zu denken, ist die Inhalation - insbesondere bei der Betrachtung von Radioaktivitätsableitungen mit Luft - sicherlich der effektivere Pfad der Inkorporation. In Anerkennung dieses Sachverhaltes und wie durch den Tschernobyl-Unfall beispielhaft bestätigt, hat die ICRP Modelle<sup>54</sup> entwickelt, die folgendes beschreiben:

- Verteilung der Radionuklide in verschiedene Bereiche des Atmungssystems in Abhängigkeit der aerodynamischen Eigenschaften der Aerosole,
- Entfernung von Partikeln aus dem Atmungstrakt durch Cilienaktivität,

---

<sup>53</sup>Zur Berechnungsmethode des Transferfaktors, Formeln usw. siehe Anhang F, Beitrag von Burkart und Wirth.

<sup>54</sup>Annals of the ICRP 66: Human respiratory tract model for radiological protection. Vol 24, 1994.

Annals of the ICRP 71: Age dependent doses to members of public from intake of radionuclides. Part 4: Inhalation dose coefficient. Vol 25, 1996.

- Übertritt in den Blutkreislauf und Transport durch weiße Blutzellen.

Entgegen früheren Publikationen in denen ein mittlerer Wert für das ganze System angenommen wurde, werden heute Dosisberechnungen spezifisch für einzelne Abschnitte des Atmungstraktes (bronchial, bronchiolar und alveolar) durchgeführt. Es wird geschätzt, daß etwa 50 % der eingeatmeten Aerosole wieder ausgeatmet werden und etwa 25 % durch Cilienaktivität aus dem Atmungstrakt entfernt und schließlich geschluckt werden. Was mit den verbleibenden 25 % geschieht, wird von den chemischen Eigenschaften der einzelnen Nuklide bestimmt. Lösliche Formen können rasch in den Blutkreislauf übertreten. Aktiniden und Lanthaniden neigen auch wenn in löslichen Formen (wie Nitraten) dazu, bei physiologischem pH-Wert Kolloide zu bilden und werden daher in der Resorption gebremst. Chemische Verbindungen wie Oxide, die nicht löslich sind, können in den Lungen über längere Zeiten verbleiben. Partikel von 1 - 5 µm Größe können sich in den tiefsten Berichen der Alveolen absetzen, und deren weiterer Übertritt in den Kreislauf und Verteilung ist von zellulärer Phagozytose abhängig. Die Größe der Partikel ist ein kritischer Parameter. Es ist beobachtet worden, daß Oxide von Americium-241, Curium-244, Plutonium-238 schneller in den Kreislauf übertreten als von Plutonium-239 gleicher Partikelgröße. Dies wird auf die wesentlich kürzeren HWZ der ersten drei Radionuklide und die damit verbundene intensivere inhärente Bestrahlung der Partikel mit daraus folgender verminderter physikalischer Stabilität und schnellerem Zerfall in kleinere Partikel zurückgeführt, deren Größe den Übertritt in den Kreislauf ermöglicht.

#### II. 4. 3. Biokinetik und Dosisermittlung

Nuklide, die in das Blut übergetreten sind, werden entsprechend ihrer chemischen Ähnlichkeit mit physiologischen Elementen<sup>55</sup> transportiert. Aktiniden und Lanthaniden verbinden sich, wenn möglich, mit Citrationen oder sind an Serumproteine gebunden, die als Transportproteine dienen. Plutonium z.B. wird vorzugsweise an Transferrin gebunden, welches normalerweise Eisen bindet. Der Mechanismus der Einlagerung derartiger, physiologisch fremder Nuklide in die Zellen ist noch nicht aufgeklärt. Die Dauer der Retention eines Nuklides im

---

<sup>55</sup>Wie schon erwähnt, wird in diesem Abschnitt über die Strahlentoxikologie der Nuklide absichtlich auf Vollständigkeit verzichtet, zugunsten der vier Radionuklide, die maßgebend für die Strahlenbelastung aus Freisetzungen mit Luft aus kerntechnischen Anlagen sind. Alle Organismen sind einer Strahlengrundbelastung aus inkorporierten natürlich vorkommenden Radionukliden ausgesetzt. Auch unter dieser Gruppe befinden sich solche, die physiologisch notwendig sind, und solche, die fremdartig sind. Ersteres sind Nuklide wie Tritium, Kohlenstoff-14 und Kalium-40 und letzteres Nuklide wie Radon-222 (ein Edelgas und kontaminant in Gebäuden, die auf uranreichem Boden stehen), Radium-226 und Uran- und Thorium-Isotope etc. Für vertiefende Information siehe Anhang F, Beitrag von Burkart und Wirth.

Organismus ist eine Funktion der physikalischen sowie der biologischen Halbwertszeit<sup>56</sup>. Während erstere für jedes Nuklid definiert und charakteristisch ist, ist letztere äußerst variabel und abhängig von der Ausscheidungsweise. Da Lanthaniden und Aktiniden bei physiologischem pH-Wert zur Kolloidbildung neigen, wird die Ausscheidung erschwert und damit die Retention begünstigt.

Die Verteilung der meisten Radionuklide erfolgt im allgemeinen in die Organe, die die größte Masse aufweisen, mit Ausnahme der Haut. Folglich sind die Skelettmuskulatur, die Knochen und die Leber die drei Organsysteme bzw. Organe, die gewöhnlich die meisten Nuklide inkorporieren, wenn sie nicht rasch ausgeschieden werden. Einen Sonderfall bildet radioaktives Jod, welches wegen seiner Bindung an das Schilddrüsenhormon zu einer selektiven Anreicherung in der Schilddrüse führt. Nuklide, die keine besondere Affinität zu irgendwelchen Geweben aufweisen und aufgrund ihrer physikochemischen Ähnlichkeit zu physiologisch relevanten Elementen aufgenommen worden sind, können gleichmäßig in verschiedene Organe verteilt werden. Ein typischer Fall ist Cäsium, welches sich als "Surrogat" für Kalium darstellt. Strontium bietet sich als Surrogat für Calcium, und wie Calcium wird es primär in das Mineralkompartiment des Knochens eingelagert. Kolloidbildende Nuklide sammeln sich vorübergehend in den Viszeralorganen, die als Bestandteil des sogenannten retikulo-endothelialen Systems<sup>57</sup> bezeichnet werden. Die Makrophagen (Kupffersche Zellen mit eingeschlossen) nehmen die kolloiden Teilchen auf. Auch die Eintrittspforte in den Körper beeinflusst die Verteilung und Ablagerung der Radionuklide. Die Aufnahme durch Inhalation kann erhebliche Rückstände in den Lungen zur Folge haben, insbesondere wenn die Nuklide nicht löslich sind, wie z.B. die Oxide von Aktiniden. Die Einlagerung in das Mineralkompartiment von Knochen findet an Stellen des aktiven Knochenumsatzes statt, dieses hauptsächlich in der Spongiosa in den Epiphysen langer Röhrenknochen. Der Übertritt von der Mutter aufgenommener Radionuklide ins fötale Gewebe ist während der Schwangerschaft durch die Blutschranke der Plazenta für multivalente Ionen erschwert. Der Übertritt mono- und divalenter Ionen wird nicht verhindert. Dieses Hindernis ist besonders wirksam, wenn Kolloidbildung stattfindet, obwohl eine vollständige Verhinderung des

---

<sup>56</sup>Die physikalische Halbwertszeit eines Nuklids ist die Zeitspanne, in der die Radioaktivität halbiert ist aufgrund physikalischen Zerfalls. Dieses ist eine inhärente Eigenschaft, die nicht beeinflusst werden kann und ist charakteristisch für ein Nuklid. Die Aktivität kann jederzeit anhand von Zerfallskoeffizienten berechnet werden. Die biologische Halbwertszeit andererseits ist die Zeitspanne, in der die Hälfte der Aktivität ausgeschieden ist.

<sup>57</sup>Das sogenannte retikulo-endotheliale System ist kein anatomisch definiertes System. Impliziert sind Organe, die mit der immunhämatologischen Aktivität eng verbunden sind, wie Leber und Milz. Die Bezeichnung ist gewissermaßen irreführend, da die Endothelzellen an Freß-/Aufräumaktivitäten (Phagozytose) nicht beteiligt sind, sondern dies eine Eigenschaft der Kupfferschen Zellen ist (Makrophagen, die mit den Sinus-Endothelzellen eng vergesellschaftet sind). Die Herkunft dieser Zellen ist inzwischen aufgeklärt. Dieses System wird gegenwärtig als das mononukleare phagozytäre System bezeichnet.

Übertritts zum Fetus nicht zu erwarten ist. Große Unterschiede, wären aufgrund der unterschiedlichen Plazentatypen abhängig von der Tierart zu erwarten - Beziehung zwischen endometrialem und plazentalem Gewebe - die bei den Säugetieren vorkommen.

Wie bereits erwähnt, verteilen sich monovalente Ionen, wie Cäsium (Surrogat für Kalium), und divalente Ionen, wie Strontium (Surrogat für Calcium), in den Organen ziemlich gleichmäßig. Dieses ist nicht der Fall für multivalente Ionen, insbesondere für diejenigen, die Kolloide bilden, wie z.B. Plutonium. Als Folge daraus kann die Strahlenbelastung für verschiedene Zelltypen innerhalb desselben Organs unterschiedlich ausfallen. Dies ist abhängig von der Affinität der Zellen gegenüber derartiger Nuklide (Plutonium) und von der Lage der Zelle in Bezug auf das Nuklid, da eine benachbarte Zelle die volle Belastung durch einen Alphastrahler aus einer anderen Zelle erhalten könnte. Die Kupfferschen Zellen in der Leber phagozytieren kolloidales Plutonium; wenn aber Plutonium als lösliches Tributylphosphat verabreicht wird, dann wird es von den Hepatozyten aufgenommen, und die Strahlenbelastung der Hepatozyten wird von dem Maße der Ausscheidung aus den Hepatozyten abhängen. Tierarten, in denen die Komplexe (mit Lysosomen) wirksam durch Exozytose ausgeschieden werden, wird Plutonium mit der Galle über den Darm ausgeschieden. Was nicht eliminiert werden kann, wird letztlich in den Knochen deponiert. Plutonium und andere Aktiniden werden nicht im Mineralkompartiment der Knochen eingelagert, da die Ionen nicht in die Gitterstruktur des Hydroxyapatitkristalls passen, statt dessen werden sie auf den Knochenoberflächen (Peri- und Endosteum), sowie auf der Oberfläche der Spongiosa abgelagert. Die Ablagerung im Knochen ist daher nicht gleichmäßig. Autoradiogramme weisen begrenzte Areale der Ablagerung - sogenannte "patches", auf. Diese sind von weitreichender Bedeutung hinsichtlich der Dosisverteilung: die Oberfläche und benachbarte Zellen erhalten den größten Teil der Strahlenbelastung. Es wurde ermittelt, daß diese bis auf zwei Größenordnungen von den gemittelten Dosiswerten im Knochen abweichen kann.

Da es zum grundlegenden Verständnis gehört, daß strahlenbiologische Auswirkungen eine direkte Funktion der absorbierten Energie (d.h. Dosis) in dem Gewebe bzw. Organ sind, ist es von größtem Interesse, die Dosis in den Organen unter Berücksichtigung der Einlagerung von Radionukliden zu bestimmen. Weil Radionuklide sowohl korpuskulare als auch nicht-korpuskulare Strahlungen beim Zerfall aussenden können, ist es besonders problematisch in letzterem Fall, die eigentliche Fraktion der absorbierten Energie zu ermitteln. Daher hat die ICRP Modelle für die Dosisberechnung<sup>58</sup> entwickelt.

Auf diesen Berechnungen beruhen die Dosisfaktoren, die nach der AVV zur Ermittlung

---

<sup>58</sup>Für Übersicht siehe: H. Fischer, B. Hettwig & M. Urbach, Strahlenbelastung durch inkorporierte Radionuklide, Information zu Energie und Umwelt, Universität Bremen, Teil A, Nr. 15, 1982.

der Personendosis verwendet werden sollen<sup>59</sup>. Sie werden auch für die anderen in der AVV zu verwendenden Faktoren ohne Vertrauensbereiche angegeben, obwohl eine Reihe von Annahmen über die Größe der Organe, die Verteilung der Nuklide und ihre Verweildauer gemacht werden müssen. Trotz der naturgemäßen Variationen dieser Einflußgrößen ist die Strahlenschutzkommission der Auffassung, daß die Modellierung zu konservativen Dosisfaktoren führt<sup>60</sup>, d.h. in der überwiegenden Zahl der Fälle erfolgt keine Unterschätzung der Dosis durch ihre Anwendung. Demgegenüber ist aber die Vorgehensweise der ICRP so, daß die Ableitung eines Meridienwertes in Rahmen der Variationsbreite der Parameter angestrebt wird<sup>58</sup>. Die Konservativität der Dosisfaktoren wurde von der ICRP nicht belegt. Daher gibt es in der wissenschaftlichen Literatur eine zunehmende Diskussion und Kritik der Dosisfaktoren<sup>61,62,63</sup>. Es wird geschätzt, daß diese Unsicherheiten und Fehler in ihren Wechselbeziehungen, zu fehlerhaften Berechnungen mit Abweichungen bis zu zwei Größenordnungen führen können<sup>58</sup>.

#### II. 4. 3. 1. Radiobiologie von Jod-131

Jod-131 hat eine HZW von 8 Tagen und sendet Beta- und Gammastrahlungen aus. Jod wird entweder als reines Element oder als chemische Verbindung in Form von Aerosolen aus kerntechnischen Anlagen freigesetzt. Es ist ein hoch reaktives Element und setzt sich als reines Element schneller aus Luft ab. Die Ablagerung auf Weidegras, Bewuchs im allgemeinen sowie auf Gemüse, führt zur unmittelbaren Ingestion durch Nutztiere und Menschen. Mit der Aufnahme durch Milchkühe<sup>64</sup> werden weitere Belastungen mit diesem Radionuklid durch den Verzehr von Milch und Milchprodukten auf Menschen übertragen, da das aufgenommene Jod zum Teil mit der Milch ausgeschieden wird. Das Jod wird ansonsten in der Schilddrüse abgelagert, ohne nennenswerte Kontamination der übrigen Organe. Folglich steht im Mittelpunkt der Modelle über Transferfaktoren die Übertragung durch Milch.

---

<sup>59</sup>Bundesministerium für Justiz (Hrsg): Bekanntmachung der Dosisfaktoren. Bundesanzeiger Jahrg. 41, Nr. 185 a, G 1990 A vom 30.9.1989.

<sup>60</sup>Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission, Band 17, 1992.

<sup>61</sup>Hamby, D.M.: Uncertainty of the tritium dose conversion factor. Health Physics 77 (1999) 291 - 297.

<sup>62</sup>Roy, M.A: Reliability of dose coefficients calculated with the respiratory tract model of the ICRP. Radiation Protection & Dosimetry 79 (1998) 237 - 240.

<sup>63</sup>Taylor, D.M: Why is age-dependent dosimetry important? Radiation Protection & Dosimetry 41 (1992) 51 - 54.

<sup>64</sup> Eine Kuh weidet auf 20-50 qm/Tag und nimmt dabei beachtliche Mengen des abgelagerten Jods auf.



Da das Radionuklidinventar in Reaktoren für Jod-131 hoch ist und bei Störfällen freigesetzt wird, ist Jod-131 in überwiegendem Maße für die Strahlenbelastung in der Frühphase verantwortlich. Direkte Bestrahlung aus einer radioaktiven Wolke (Submersion) und aus Ablagerungen tragen zur externen Dosis bei, während die Inkorporation durch Inhalation zur internen Dosis beiträgt, welche sich in der Schilddrüse konzentriert. Weitere Aufnahme durch Ingestion erhöht die interne Strahlenbelastung, insbesondere die der Schilddrüse. Der Tschernobylunfall hat die hohe Aufnahmefähigkeit durch Inhalation unter Beweis gestellt: Jod-131 wurde in den Schilddrüsen von Kindern der radioaktiv verseuchten Gegenden binnen eines Tages festgestellt.

Seit dem maßgebenden Werk von Rubin & Casserett, 1969<sup>65</sup> galt die Schilddrüse als quasi strahlenresistentes Organ. Daher haben Risikoberechnungen nach der Tschernobylkatastrophe eine nur unerhebliche Zunahme von Schilddrüsenkrebsen vorausgesagt. Diese Ansicht mußte grundlegend revidiert werden, weil die Zahl des kindlichen Schilddrüsenkrebses auf völlig unerwartete Höhen und binnen einer unerwartet kurzen Zeit von einigen Jahren anstieg. Die Schilddrüse, insbesondere von Kindern, muß als strahlenempfindliches Organ angesehen werden. Die gesundheitlichen Auswirkungen der Tschernobylkatastrophe werden in einem späteren Abschnitt behandelt.

#### II. 4. 3. 2. Radiobiologie von Cäsium-137

Cäsium-137 ist ein Betastrahler, welcher bei einer HWZ von 30 Jahren in Barium-137m (94,6%) mit HWZ von 2,5 min und Aussendung von 661,6 keV Gammastrahlen zerfällt. Die restlichen 5,4% zerfallen unmittelbar in das stabile Barium-137. Am Boden abgelagert, verhält sich Cäsium als Surrogat für Kalium und wird von Pflanzen entsprechend aufgenommen. Weil Cäsium den größten Ionendurchmesser unter den monovalenten Kationen besitzt, wird es leichter aus Verbindungen herausgelöst. Wie Kalium wird es vorzugsweise in tonhaltigen Böden gebunden, und die Sorption von Cäsium im Austausch für Kalium, verursacht den Kollaps von Silikatschichten. In dieser Weise "fixiert", verliert Cäsium an Mobilität. Die Bewegungsfreiheit von Cäsium in derartigen Böden ist dann eingeschränkt. Im Gegensatz dazu, ist die Bewegungsfreiheit in Sand und in humusreichen Böden gewährleistet. Die pflanzliche Aufnahme von Cäsium aus tonhaltigen Böden ist, verglichen mit humusreichen Böden, signifikant vermindert. Weil Cäsium in den Laubschichten auf Waldböden nicht "fixiert" und daher leicht verfügbar ist, kann es dort, wo Pilze im Wachstum sind, von deren Mycel, das sich in diesen Schichten befindet, sehr leicht aufgenommen und in den Fruchtkörpern (den "Pilzen") angereichert werden.

Cäsium wird beinahe vollständig aus dem Darmtrakt der meisten Säugetiere resorbiert. Eine geringere Resorption von etwa 60% ist bei den Wiederkäuern normal. Bei Ratten ist die

---

<sup>65</sup>Rubin & Casserett: Radiation Pathology Vol. I & II, Academic Press, Toronto, 1969.

maximale Resorption 30 Minuten nach Nahrungsaufnahme beobachtet worden. Die Ausscheidung findet über Fäzes (ca. 20%) und Urin (ca. 80%) statt. Die biologische HWZ wird von der Körpergröße der Tiere beeinflusst und könnte zwischen 45 und 135 Tagen liegen. Cäsium weist keine Organpräferenz auf und wird folglich ziemlich gleichmäßig verteilt. Die Menge in einem Organ bzw. Organsystem steht dadurch in direkter Beziehung zur Masse. Die physiologischen Vorgänge in Organen bzw. Organsystemen können für Kalium gegen Cäsium diskriminieren. Die hohe Energie der Gammastrahlen aus Cäsium-137 verleiht ihnen eine starke Reichweite. Dadurch wird kein Gewebe bzw. Organ von der Strahlenbelastung ausgenommen, auch wenn die Belastung der einzelnen Gewebe bzw. Organe ungleichmäßig ausfallen mag. Obwohl die Modelle, die die Inkorporation von Cäsium beschreiben, dies im allgemeinen, aufgrund des verstärkten Vorkommens des Cäsiums in Nahrungsmitteln in Zusammenhang mit der Nahrungskette behandeln, darf nicht übersehen werden, daß Cäsium aus inhalierten, cäsiumhaltigen Aerosolen aufgrund der hohen Reaktivität dieses Nuklids, leicht in den Blutkreislauf übertritt. Die aus der Tschernobylkatastrophe hervorgegangenen Erfahrungen werden in einem späteren Abschnitt erörtert.

#### **II. 4. 3. 3. Radiobiologie von Strontium-90**

Strontium-90 zerfällt durch Ausstrahlung eines Betateilchens von 0,54 MeV Energie und hat eine HWZ von 28,7 Jahren. Das Folgenuklid Yttrium-90 ist ebenfalls radioaktiv und zerfällt mit einer HWZ von 64 Stunden, ebenfalls durch Ausstrahlung eines Betateilchens von 2,18 MeV Energie, und ergibt das stabile Zirkonium-90. Aufgrund des enormen Unterschiedes zwischen den HWZ von Mutter- und Tochterradiationukliden, erreichen die beiden Nuklide bei ungestörten Verhältnissen radioaktives Gleichgewicht. Wie bei Cäsium-137 beschreiben die Modelle die Inkorporation von Strontium-90 über die Nahrungskette. Auch wenn die Prädominanz dieses Inkorporationspfades nicht angezweifelt wird, darf auch in diesem Fall nicht übersehen werden, daß Strontium als inhaliertes Aerosol leicht resorbiert wird aufgrund seiner Löslichkeit und fehlender Kolloidbildung. Dies gilt jedoch nicht für Yttrium-90, weil es dreiwertig ist und bei physiologischem pH zur Kolloidbildung kommt. Die Menge an begleitendem Yttrium-90 ist von verschiedenen Faktoren abhängig.

Auf dem Erdboden abgelagert, besitzt Strontium-90 die gleiche Mobilität wie Calcium und wird von Pflanzen über das Wurzelwerk leicht aufgenommen. Der Transferfaktor ist für kalkarme Böden höher und umgekehrt niedriger für kalkhaltige Böden. Von Pflanzen aufgenommen, nimmt Strontium-90 die gleichen metabolischen Wege wie Calcium und wird folglich an den gleichen Stellen wie Calcium deponiert. Es wurden in Blättern die 10-fach höhere Menge als in Getreide samen und entsprechend Kartoffeln gegenüber anderen Rhizomen (unterirdischen Ausläufern) ermittelt.

Die Resorption aus dem Darm ist altersabhängig und liegt bei jüngeren Tieren höher. Es wurde ermittelt, daß bei jüngeren Tieren etwa 20 bis 100% des aufgenommenen Strontium-90

resorbiert wird, im Vergleich dazu bei älteren Tieren 5 bis 40%. Für Berechnungszwecke wird der Wert für Erwachsene bei 20% und für Schafe, Rinder, Schweine und Ziegen im Alter von unter 60 Tagen wird der Wert bei 60% angesetzt. Etwa 90% des resorbierten Strontium-90 wird in das mineralische Kompartiment des Knochens eingelagert, während sich die restlichen 10% in den anderen Geweben ablagern. Die biologische HWZ in den weichen Geweben wurde mit etwa 10 Tagen ermittelt. Der Umsatz von Strontium-90 im Knochen ist langsam und die biologische HWZ abhängig von der Tierart: 20 - 70 Tage bei Mäusen, 60 - 400 Tage bei Ratten, 90 - 500 Tage bei Schweinen und Hunden und 200 - 600 Tage bei Menschen, und somit auf eine Korrelation zur Körpergröße hinweisend. Etwa 90% werden mit den Fäzes und der Rest mit Urin ausgeschieden. Strontium-90 wird anstelle von Calcium vorzugsweise mit Milch ausgeschieden: bei Kühen 1 - 3% und bei Ziegen 4% der Tagesaufnahme. Diese Diskriminierung gegenüber Strontium-90 ist altersabhängig und bei Jungtieren nur in geringem Maße vorhanden.

Strontium-90 kommt natürlicherweise in radioaktivem Gleichgewicht mit Yttrium-90 vor. Da Yttrium-90 mindermäßig resorbiert wird, wird das inkorporierte Strontium-90 an den Einbaustellen erneut mit Yttrium-90 das Aktivitätsgleichgewicht bilden. Dieses kann, wie schon angemerkt, im Knochen vorkommen, obwohl Strontium-90 auch hier einer konstanten Remobilisierung unterworfen ist. Da die Beta-Teilchen von Yttrium-90 um den Faktor 4,15 energiereicher sind als die des Strontium-90, sind sie in Reichweite und damit in Einwirkung entsprechend stärker. Damit werden näherliegende Gewebe, wie das Knochenmark, auch in größeren Organismen, wie Menschen, effektiv bestrahlt. Die direkte, gleichzeitige Inkorporation von beiden Nukliden kann in Ausnahmefällen über offene Wunden zustandekommen. In einer derartigen Situation nehmen die Nuklide unterschiedliche physiologische Wege. Yttrium, gebunden an ein Plasmaprotein, wird zur Leber und anderen viszerale Organen transportiert und in diesen Organen zunächst deponiert. Danach wird Yttrium sekundär an Knochenoberflächen abgelagert und führt zu einer Akkumulation des Yttrium an jenen Stellen. Da das Yttrium kaum ausgeschieden wird (Kolloidbildung), kommt in derartigen Situationen ein vorübergehender Überschuss des Yttriums im Knochen vor. Damit wäre die initiale Strahlenbelastung des Knochenmarks größtenteils auf das Yttrium-90 zurückzuführen.

#### **II. 4. 3. 4. Radiobiologie von Plutonium-239**

Plutonium-239 zerfällt mit einer HWZ von 24.100 Jahren durch Ausstrahlung eines Alphateilchens und eines Gammaquantums geringer Energie. Wie alle Aktiniden, ist die Strahlentoxizität (als Ergebnis der absorbierten Dosis) von der Inkorporation abhängig. Da Plutonium aus dem Darmtrakt nur spärlich resorbiert wird (im allgemeinen < 0,01%), ist der Inkorporationspfad durch Ingestion mit der Nahrung nur von geringerer Bedeutung, da insbesondere Nutzpflanzen Plutonium über das Wurzelwerk kaum aufnehmen. Der wichtigste Pfad der Inkorporation von Plutonium-239 ist der durch Inhalation von plutoniumhaltigen Aerosolen, wobei Aufnahmen von bis zu 5% möglich sind. Plutoniumaerosole bilden unlösliche

Oxide und Hydroxide in der Atmosphäre. Nach der Ablagerung auf dem Erdboden weist Plutonium sehr geringe Mobilität auf und verbleibt deshalb über längere Zeiträume in den oberen Bodenschichten. Der Transferfaktor vom Boden auf Pflanzen ist im allgemeinen  $< 0,001$ . Die Kontamination von Pflanzen erfolgt daher hauptsächlich durch Ablagerung auf pflanzliche Oberflächen (insbesondere Blätter).

Wie in einem vorhergehenden Abschnitt schon erwähnt, sind Unterschiede zwischen Plutonium-239 und Plutonium-238 beim Übertritt aus den Lungen in den Kreislauf beobachtet worden. Der schnellere Übertritt des relativ kurzlebigen Plutonium-238 wird auf physikochemische Effekte intensiverer inhärenter Bestrahlung zurückgeführt, die zur Zertrümmerung der Partikel und damit zu verbesserten Übertrittseigenschaften führen. Da nur ein beschränkter Teil der sich in den Lungenalveolen abgesetzten feinsten Aerosolpartikel den Übertritt in den Blutkreislauf findet, bildet sich in den Lungen ein Rückstand, der erheblich sein kann. Ein weiterer Isotopeneffekt zwischen Plutonium-239 und -238 wurde in Leberzellen *in vitro* beobachtet, wobei die Fähigkeit, das SV-40-Gen zu amplifizieren, für Plutonium-239 größer war. Ferner wies die subzelluläre Verteilung der zwei Isotopen Unterschiede auf trotz gleicher Aufnahme und Bindung, und der Verlust an Plutonium-238 war schneller.<sup>66</sup> Dieses ist ein bemerkenswerter Hinweis auf subtile zelluläre Diskriminierung.

Obwohl Plutonium anfänglich in den viszeralen Organen (Leber, Milz und Nieren) abgelagert wird, weil es nicht ausgeschieden werden kann, wird es sekundär in das Periosteum und Endosteum sowie der Oberfläche der Spongiosa des Knochens abgelagert. Wie in einem anderen Abschnitt schon erwähnt, phagozytieren die Kupffer'schen Sternzellen in der Leber (die im Grunde genommen sinusoidale Makrophagen sind) die Plutonium-Kolloidaggregate. Geringe Mengen an Plutonium finden den Übertritt in die Hepatozyten. Etwa 80% des inkorporierten Plutonium wird auf Knochenoberflächen abgelagert. Die restliche Menge wird in den viszeralen Organen und Lymphknoten etc. abgelagert, die biologische HWZ wird etwa 500 bis 1000 Tage für das lymphatische System und zwischen 1 und 100 Jahren für das Skelett abgeschätzt. Zur praktischen Näherung kann gesagt werden, daß die inkorporierte Menge ohne sich zu vermindern im Körper verbleibt. Ein Übertritt durch die Plazenta findet kaum statt.

Alphateilchen sind Hoch-LET-Strahlungen (siehe oben). Die Alphateilchen von Plutonium-239 werden mit einer Energie von 5,15 MeV ausgestrahlt und haben eine Reichweite von etwa 20-40  $\mu\text{m}$ . Der Energietransfer liegt bei etwa 100  $\text{keV}\mu\text{m}^{-1}$ . Es wurde schon erwähnt, daß Autoradiogramme von Knochen nach Plutonium-239-Inkorporation ungleichmäßige Ablagerungsstellen sog. "patchy sites" aufweisen. Um ein Verständnis der Strahlentoxikologie von Plutonium-239 zu gewinnen, sind die zeitlichen und räumlichen Charakteristika der Ablagerung von Plutonium-239 von höchster Relevanz. Alphateilchen, die den Zellkern passieren,

---

<sup>66</sup>F. Planas-Bohne, W. Rau & C. Boxler: Can differences in the subcellular distribution explain different effectiveness of two plutonium isotopes. Paper presented at the 22<sup>nd</sup> Annual Meeting of the European Society for Radiation Biology, September 11-16, 1989, Brussels.

werden dem Erbmateriale (DNA) schwerste Schäden zufügen, die wahrscheinlich nicht vollständig repariert werden können. Über das Schicksal derartig getroffener Zellen kann nur spekuliert werden. Die RBW (siehe oben) für Alphateilchen wurde von der ICRP<sup>67</sup> bei 20 angesetzt, obwohl mehrere Studien stark abweichende Werte ergeben haben (siehe Anhang R, Beitrag von N. Priest, S. 6-8). Es ist wichtig zu betonen, daß aufgrund der räumlichen Verteilung und der Interaktionscharakteristika der Alphateilchen nur eine begrenzte Zellzahl mit sehr hohen Dosen bestrahlt wird, während Nachbarzellen ungetroffen bleiben. Für die strahlenbiologischen Auswirkungen, insbesondere im Zusammenhang mit Risikoabschätzungen ist es erforderlich für das betrachtete Gewebe zu wissen, welches die Targetzellen sind, und welche Strahlenbelastungen diese Zellen erhalten haben. Da diese kritischen Faktoren durch große Unsicherheiten verschleiert bleiben, müssen Berechnungen mit der notwendigen Zurückhaltung betrachtet werden. Die gewöhnliche Praxis der Extrapolation von Werten, gewonnen aus externen Bestrahlungen mit niedrigerem LET (wobei Gewebe homogen bestrahlt wird), zum Vergleich mit der Wirkung inkorporierter Alphastrahler ist sehr fragwürdig. Derartige Aussagen sind von sehr begrenztem Wert.

#### Fazit

Strahlenbiologische Erkenntnisse basieren hauptsächlich auf Erfahrungen mit Niedrig-LET-Strahlungen. Daraus wurden die Modelle und Methoden für Dosisberechnungen sowie Risikoabschätzungen entwickelt. Das Konzept der absorbierten Dosis nimmt an - und in diesem Fall zu Recht -, daß Strahlungen von allen getroffenen Zellen homogen, nach stochastischem Prinzip, absorbiert werden. Die Strahlenbelastung aus inkorporierten Radionukliden bringt aber spezielle Probleme mit sich, welche im Zusammenhang mit den physiko-chemischen Eigenschaften, den chemischen Verbindungen und der physiologischen Relevanz der betrachteten Nuklide stehen. Diese bestimmen wiederum die Biokinetik oder die zeitlich-räumliche Verteilung der Radionuklide. Weiterhin bestimmt das Zerfallscharakteristikum, d.h. die ausgestrahlte Strahlenart, die radiotoxikologische Auswirkung. Von den vier Radionukliden, die für die Strahlenbelastung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen und an Menschen maßgebend verantwortlich sind, mit Ausnahme von Cäsium-137, weisen die anderen drei gewebe- bzw. organspezifische Affinitäten auf. Die Strahlenbelastung ist dadurch in bestimmten Körperteilen lokalisiert. Diese Spezifität wird im Fall von Alphastrahlern verstärkt (Plutonium-239), weil durch Alphastrahlen nur eine begrenzte Zahl von Zellen in einem Gewebe getroffen wird. Damit wird die Zellpopulation eines Gewebes aus stark bestrahlten und nicht bestrahlten Zellen bestehen. Es stellt sich die Frage, ob die für die Regeneration kritischen Zellen (Targetzellen) eher getroffen

---

<sup>67</sup>ICRP Publication 30, Annals of the ICRP, Pergamon Press, Oxford, 1979.

werden oder nicht. Die Stammzellen<sup>68</sup> eines jeden Gewebes könnten die kritische Subpopulation und damit die Targetzellen sein. Die physikalischen Berechnungen von Dosen nach Inkorporation von Radionukliden gehen davon aus, daß die Energiedeposition gleichmäßig ist. Besonders bei Alphastrahlern ist dieses ein schwerwiegender Fehler, der eine Dosisunterschätzung bis zu zwei Größenordnungen bedeuten kann (siehe Zitat in Fußnote 58). Der Gebrauch der Extrapolation von Daten aus Niedrig-LET-Strahlungen in Situationen, in denen es sich um Alphastrahler hoher LET handelt, muß daher mit äußerster Vorsicht betrachtet werden. Aufgrund der mikrodosimetrisch stark inhomogenen Energiedeposition kommt es zu Anstieg der RBW bei niedriger Dosis, d.h. daß der Dosiswirkungsverlauf überlinear ist<sup>69</sup>. Bei der Ermittlung der Schadensfolgen pro Doseinheit wird nach ICRP jedoch ein linearer Zusammenhang und ein konstanter Q-Faktor vorausgesetzt, so daß es bei inkorporierter Alphaaktivität zu einer Unterschätzung der Wirkung kommt. Der wichtigste Pfad der Inkorporation von Alphastrahlern ist die Inhalation.

#### Bezug

- Anhang F: Beitrag von W. Burkart und E. Wirth
- Anhang H: Beitrag von F. Planas-Bohne
- Anhang R: Beitrag von N.D. Priest
- Anhang B1: Beitrag von I. Schmitz-Feuerhake

## II. Aufgabe 1, Teil B: Frage der Zulänglichkeit der Immissionsrichtwerte im Zusammenhang mit dem gesundheitlichen Schutz der Bevölkerung.

### II. 5. Einleitung: Stochastische frühsomatische Strahlenwirkung - Leukämie

Die stochastischen somatischen Strahlenwirkungen äußern sich als Krebserkrankungen. Die Induktion von Krebs durch ionisierende Strahlungen ist bekanntlich unspezifisch, d.h. sie sind in der Lage alle sog. spontan vorkommenden Arten von Tumoren bzw. Krebsen<sup>70</sup> hervorzurufen.

---

<sup>68</sup>Derzeitiges Verständnis über die Dynamik von Gewebe ist, daß in allen Geweben Stammzellen vorhanden sind. Die Größe dieser Subpopulation schwankt zwischen den verschiedenen Gewebetypen und ist von der Zellenumsatzrate abhängig. Das Vorhandensein einer geringen Population von embryonal mesenchymalen Stammzellen wurde schon erwähnt und die Lage dieser Zellen scheint um das Periosteum (Knochenhaut) zu sein.

<sup>69</sup>Kuni, H: Niedrige Strahlendosen und Gesundheit der Arbeitnehmer. Berichte des Otto Hug Strahleninstitutes Nr. 8 - 11, München 1994.

<sup>70</sup>Aus diesem Grund werden ionisierende Strahlungen als geeignetes Agens bei Studien zum Verständnis der Mechanismen der Krebsentstehung eingesetzt, da Strahlungen lediglich als

Vom Zeitpunkt der Auslösung bis zur Feststellung einer sichtbaren Erkrankung kann der Zeitraum - Latenzzeit - abhängig von Tumor bzw. der Krebsart und anderen biologischen Faktoren, wie dem Alter zum Zeitpunkt der Induktion, unterschiedlich lang sein. Im allgemeinen ist die Latenzzeit für Leukämien am kürzesten und insbesondere im Fall kindlicher Leukämien. Die RERF-Daten über die Atombombenüberlebenden zeigen, daß der Höhepunkt in der Latenzzeit kindlicher Leukämien etwa im 4. oder 5. Jahr nach der Exposition liegt, bei Erwachsenen etwa die doppelte Zeitdauer<sup>71</sup>. In Fällen von frühkindlichen Leukämien (während der ersten Lebensjahre) könnte die Induktion *in utero*<sup>72</sup> stattgefunden haben. Die RERF-Daten stellen ein Referenzdatensatz der strahlenbedingten Krebs epidemiologie dar und dienen deshalb als Basis der ICRP-Empfehlungen. Diese Daten bergen einen schwerwiegenden Schwachpunkt, indem die Mortalitäten der ersten 5 Jahre verlorengingen - Daten über die schwächsten Mitglieder der Kohorte, nämlich Ungeborene junge Kinder und ältere Menschen, wie vom Altersprofil der Kohorte<sup>73</sup> belegt wird. Überhöhungen in der Erkrankungsrate verschiedener Krebsarten werden bis zum heutigen Tag bei den Überlebenden festgestellt.

Die Strahlenexposition der RERF-Kohorte wird auf externe Bestrahlung durch die Atombombenzündung zurückgeführt. Weitere Referenzdaten aus bestrahlten Populationen (medizinische oder berufsbedingte Expositionen), sowie aus anderen epidemiologischen Studien beziehen sich größtenteils auf externe Bestrahlungen. Die Anwendung dieser Daten für die Risikoabschätzung in Situationen der Radionuklidinkorporation ist aus schon vorher genannten Gründen fehlerhaft. Die Erfahrungen über Radionuklidinkorporation bei Menschen entstanden aus retrospektiven Studien über Malerinnen von Uhrenziffernblättern<sup>74</sup>, mit Thorotrast behandelten Patienten/innen und Uranbergarbeiter, die hohen Radonbelastungen ausgesetzt waren. Da die Dosisabschätzungen mit großen Unsicherheiten verbunden sind, müssen diese mit der erforderlichen Zurückhaltung betrachtet werden<sup>58</sup>. Tierversuche zur Krebsinduktion nach

---

Auslöser von spontanen Ereignissen angesehen werden.

<sup>71</sup>Shimizu Y., Kato H. & Schull W: Life Span Study Report II. Part 2. Cancer mortality in the years 1950-85 based on the recently revised dosis (DS86). Radiation Research 121 (1990) 120 - 141.

<sup>72</sup>Ein Beweis dafür wurde erstmalig vom Oxford Survey of Childhood Cancers (UK) unter Leitung von Alice M. Stewart erbracht [siehe Alice Stewart *et al* Lancet ii (1956) 447]. Auf die zahlreichen Publikationen dieser Autorin und deren Mitarbeiter wird hingewiesen. Insbesondere: Kneale, G.W. und Stewart, A.M.: Age variation in the cancer risks from foetal irradiation. British Journal of Cancer, 35 (1977) 501-510.

<sup>73</sup>Stewart, A.M. und Kneale, G.W.: A-bomb survivors: Further evidence of late effects of early deaths. Health Physics, 64 (1993) 467-472.

<sup>74</sup>Rowland, R.E: Radium in Humans: A Review of U.S. Studies. Argonne Nat Lab 1994.

Inkorporation knochenaffiner Radionuklide (Strontium-90, Radium-226 und Plutonium-239) sind äußerst eingeschränkt in ihrer Zahl und hinsichtlich Leukämien sogar kontrovers<sup>74, 75, 76</sup>. Die Quintessenz dieser Studien weist darauf hin, daß Alphastrahler für die Leukämieinduktion nur geringfügig wirksam sind, während sie bei Leberkrebs (Plutonium-239) und Osteosarkomen (beide Radium-226 und Plutonium-239) hochwirksam sind. Die geringe leukämogene Fähigkeit ist vorwiegend auf Zelltötung zurückzuführen. Die Schlüsselfrage, deren Beantwortung noch aussteht, ist, ob die leukämogenen Potentiale bei Dosisverminderungen, d.h. weniger Inkorporation durch Herabsetzung der Zelltötung gesteigert werden. Es wurde darauf hingewiesen, daß die inhomogene Bestrahlung der Zellpopulation, welche aus nicht getroffenen und schwer geschädigten Zellen besteht, ein hochkomplexes Problem darstellt und eine Reduktion der Dosis schlichtweg eine Verschiebung der Verhältnisse bedeuten würde. Ob das leukämogene Potential dadurch beeinflusst wird, ist schwer vorauszusagen. Neuere Studien zur Frage der Onkogenität von Alphastrahlen liefern Ergebnisse, welche andere biologische Konzepte erfordern, die von den alten physikalisch-mechanistischen Vorstellungen Abstand nehmen; diese werden in einem späteren Abschnitt (IV. 2. 2) angesprochen.

Ionisierende Strahlungen sind bekanntlich vollständige Karzinogene; die Anwesenheit eines zweiten fördernden Agens ("Promoter") ist für die weitere onkogene Entwicklung nicht erforderlich. Dennoch könnte die Anwesenheit eines Promoters oder eines anderen Karzinogens den Prozeß beeinflussen, und folglich könnte die Inzidenz erhöht bzw. die Latenzzeit verkürzt sein oder sogar beides zutreffen. Derzeitige Erkenntnisse über die kombinierten Wirkungen von Strahlung mit chemischen Substanzen basieren im wesentlichen auf Erfahrungen aus der Strahlentherapie (Radioonkologie) in Wechselbeziehung mit der Medizinischen Onkologie. Diese Aspekte der Strahlenkarzinogenese werden in einem späteren Abschnitt ausführlicher angesprochen. An dieser Stelle genügt es, darauf hinzuweisen, daß Untersuchungen über die Interaktionen von ionisierenden Strahlungen aus inkorporierten Radionukliden im Zusammenhang mit anderen Umwelttoxinen, insbesondere chemischen bzw. physikalischen (z.B. magnetische oder elektromagnetische Felder usw.) Karzinogenen kaum bekannt sind, und wenn es sich um die Frage der Induktion von Leukämien handelt, gar keine Erkenntnisse vorhanden sind. Die einzigen Studien, die gewisse Relevanz im Hinblick auf die bereits erwähnten Punkte haben, sind einige experimentelle<sup>77</sup> bzw. epidemiologische Untersuchungen über radioaktives Radon, Plutonium und

---

<sup>75</sup>van Kaick G et al (Eds.): Health Effects of Internally Deposited Radionuclides, World Scientific Pub., 1995.

<sup>76</sup>BEIR IV: Health Effects of Radon and other Internally Deposited Alpha-emitters. National Academy Press, Washington DC, 1988.

<sup>77</sup>Eine bemerkenswerte experimentelle Studie (Little, J.B.: Radiation Research 87 (1981) 240-250 hat gezeigt, daß nach der Inkorporation von 3700 Bq Polonium-210 in Hamstern 2% der Tiere Lungenkrebs entwickelten. Aber wenn die Luft mit Kochsalzgicht versehen war, stieg die Tumorrare auf 36%. Die Kochsalzgicht alleine hat keinen Krebs verursacht.



Uran, zusammenhängend mit inhalierten Asbest- bzw. Silicattäuben, jeweils in bezug auf die Entwicklung von Lungenkrebs. Die Wirkung von Karzinogenen allein entscheidet den Verlauf der Krankheitsentwicklung nicht. Vielmehr beeinflusst die Prädisposition einzelner Betroffener in Zusammenhang mit ihrem persönlichen Lebensstil bzw. ihren Gewohnheiten den Verlauf der Krankheitsentwicklung.

### II. 5. 1. Zulänglichkeit der Immissionsrichtwerte hinsichtlich des gesundheitlichen Schutzes

Das Genehmigungsverfahren und der Betrieb von Kernkraftwerken wurden in einem anderen Abschnitt bereits angesprochen. Eine zentrale Angelegenheit ist die Sicherheit der Umwelt und damit selbstverständlich der gesundheitliche Schutz der Bevölkerung. Die Einhaltung der StrlSchV wird gewährleistet durch ein Regelwerk, dem beim Bau (AVV, siehe oben) und während des Betriebs (KTA-Regel 1503.1 für Ableitungen mit Luft und KTA-Regel 1504 für Ableitungen mit Wasser, siehe oben) entsprochen werden muß. Die maximal zulässige Emission -nur Ableitungen mit Luft werden hier berücksichtigt, da sie von ausschlaggebender Bedeutung sind -beinhaltet eine Sicherheitsmarge, und die vom KKK gemeldeten Emissionswerte betragen lediglich 1% der genehmigten Emission. Damit erscheint jede Frage nach einem Zusammenhang zwischen den kindlichen Leukämien und dem Betrieb des Kernkraftwerkes zunächst absurd. Die Erfahrung zeigt jedoch, daß sich dort, wo sorgfältige epidemiologische Studien durchgeführt worden sind, immer Zusammenhänge dieser Art feststellen ließen<sup>78</sup>. Damit besteht eine Diskrepanz zwischen dem, was theoretisch als sicher angesehen wird und epidemiologischen Beobachtungen<sup>80, 82</sup> auch in Deutschland<sup>79, 81</sup>, die auf eine Einwirkung der kerntechnischen Anlagen auf die Umgebung hinweisen.

Bei dem kindlichen Leukämiecluster in der Umgebung des KKK ist die Frage, inwieweit die Unsicherheiten in der Dosisbestimmung und der Risikoabschätzung es denkbar erscheinen lassen, daß ein Zusammenhang mit dem Betrieb der Anlage besteht. Dieser Aspekt wird in den folgenden Abschnitten behandelt. Verschiedene Punkte waren in diesem Zusammenhang schon Gegenstand vorangehender Kapitel und werden in Beantwortung der hier gestellten Frage zusammenfassend dargelegt.

---

<sup>78</sup>Schmidt, M. *et al* (Eds.): Radiation Exposures by Nuclear Facilities. Evidence of the Impact on Health. Proceedings of International Workshop, Portsmouth, 1966, Gesellschaft für Strahlenschutz, Berlin, 1998.

<sup>79</sup>Hoffmann, W & Greiser E: Retrospective Inzidenzstudie Elbmarsch: Inzidenz von Leukämien, malignen Lymphomen, multiplen Myelomen und von verwandten Erkrankungen in den Landkreisen Herzogtum Lauenburg, Harburg und Lüneburg, 1984-1993, Bremen Dezember 1994. Im Auftrag des Schleswig-Holsteinischen Ministeriums für Natur und Umwelt.

Kindliche lympho-hämatopoetische Malignitäten - um eine allgemeine Bezeichnung anzuwenden - wurden sowohl um Sellafield, La Hague, in der Umgebung von 14 britischen Kernkraftwerken (kollektiv untersucht)<sup>80</sup> als auch in der Umgebung von 20 deutschen Kernkraftwerken (kollektiv untersucht)<sup>81</sup> und in der Umgebung mehrerer Kernkraftwerke in den USA - prominentestes davon ist die Fallkontrollstudie um den Pilgrimreaktor in Massachusetts,<sup>82</sup> um einige der wichtigsten Studien zu nennen festgestellt. Eine weitere Zahl kleinerer Studien haben die gleichen Befunde ergeben<sup>83</sup>. Die Strahlenschutzbestimmungen und die technischen Fähigkeiten dieser Länder, die zu den technisch Fortschrittlichsten zählen, sind ohne Zweifel vergleichbar. Da ungenehmigte Freisetzungen radioaktiver Stoffe abgestritten werden und noch nie nachgewiesen werden konnten, bleiben zur Erklärung lediglich Fehler in technischen Berechnungen oder Fehler in den Annahmen von Dosis- und Dosiswirkungskonzepten übrig und sogar Kombinationen davon. Dennoch müssen zwei oder drei Punkte mit Vorsicht benannt werden. Eine Untersuchung in England hat auf höhere Krebsinzidenz in der Umgebung von geplanten kerntechnischen Anlagen hingewiesen<sup>84</sup>. Obwohl dieser Befund statistisch nicht gesichert war, wird diese Arbeit häufig zitiert, als ob es sich um ein allgemeines Phänomen handle. In der deutschen Studie des IMSD der Universität Mainz schien sich dieser Befund zu bestätigen, da eine signifikant erhöhte Leukämieinzidenz in der ausgewählten Regionen um geplante Anlagen gefunden wurde. Spätere Analysen ergaben jedoch, daß es sich hierbei nicht um eine Clusterung handelt<sup>86</sup>.

In der deutschen und der britischen Studie, die positive Korrelationen bezüglich kindlicher Leukämien zeigten, erhoben die Autoren Zweifel an ihren eigenen Befunden mit dem Argument, daß die ausgewählten Referenzregionen zu niedrige Inzidenzen aufwiesen. Dadurch seien die

---

<sup>80</sup>Cook-Mozaffari PJ *et al.*: Cancer incidence and mortality in the vicinity of nuclear installations, England and Wales, 1959-80. HM Stationary Office, London.

<sup>81</sup>Keller B *et al.*: Untersuchung der Häufigkeit von Krebserkrankungen im Kindesalter in der Umgebung westdeutscher kerntechnischer Anlagen (Federführung: J. Michaelis). BMU-1992-326, ISSN 0724-3316.

Kaletsch U *et al.*: Epidemiologische Studien zum Auftreten von Leukämieerkrankungen bei Kindern in Deutschland. (Federführung: J. Michaelis). IMSD Technischer Bericht, Universität Mainz, 1997.

<sup>82</sup>Morris M und Knorr RS: Investigation of Leukaemia incidence in 22 Massachusetts communities 1978 - 1986. Southern Massachusetts Health Study Final Report. Massachusetts Department of Public Health, October 1990.

<sup>83</sup>Für eine Übersicht siehe: Childhood Cancer and Nuclear Installations, Eds. V. Beral, E. Roman & M. Bobrow, Book dedicated to Martin J. Gardner, British Medical Journal, 1993.

<sup>84</sup>Cook-Mozaffari JP *et al.*: Cancer near potential sites of nuclear installations. Lancet (1989 b) 1145-1147.

Erhöhungen im Studiengebiet rein statistisch entstanden. Tatsache ist jedoch, daß die Referenzregionen nicht nach dem Zufallsprinzip ausgesucht wurden, sondern das Ergebnis sorgfältiger Überlegungen aufgrund von festgelegten Kriterien waren. Ein weiteres Argument *in* der Ursachendebatte ist, daß Clusterbildung bei Leukämie typisch und naturbedingt sei.<sup>85</sup> In Veröffentlichungen der Ergebnisse dieser von EURATOM geförderte Großstudie (Federführung: F.E. Alexander) wird behauptet, die erforderliche statistische Signifikanz zur Bestätigung dieser Hypothese erbracht zu haben. Diese Schlußfolgerung wird von einige Epidemiologen (insbesondere aus dem BIPS an der Universität Bremen) für nicht zulässig erklärt, da die angewandte statistische Auswertung ungeeignet sei. Eine deutsche Studie zu Cluster-Bildung in der BRD hat gegenteilige Ergebnisse vorgelegt<sup>86</sup>. Ein Zusammenhang der kindlichen Malignitäten mit dem Betrieb kerntechnischer Anlagen ist nicht zwingend, muß aber unbedingt ausgeschlossen werden. Die Wahrscheinlichkeit der Zufallsbedingtheit des Leukämieclusters in der Umgebung von KKK ist ausreichend gründlich überprüft und als extrem gering eingestuft worden.

Wie schon in vorhergehenden Abschnitten dargestellt wurde, sind in der AVV und den KTA-Regeln Lücken und Unsicherheiten enthalten, welche Verbesserungen erfordern. Die Zielsetzung in der StrlSchV ist der gesundheitliche Schutz der Bevölkerung ohne Ausnahmen. Demzufolge müssen sämtliche Individuen einer Bevölkerung, angefangen vom Nichtgeborenen bis zum Greisen, berücksichtigt werden. Zudem sind gerade diese beiden Gruppen die empfindlichsten Mitglieder der Bevölkerung, und nach fortschreitender Erkenntnis auch genetisch veranlagte strahlenempfindliche Minderheiten. Die Dosisberechnungen der AVV beziehen sich auf eine konventionelle Standard-Referenzperson, die ursprünglich für toxikologische Bewertungen in der Arbeitsmedizin eingesetzt wurde. Abgesehen von Anwendungseinschränkungen bei komplexer Orographie, mit der damit verbundenen komplizierten Meteorologie, entspricht das Gaußmodell bei den Ausbreitungsberechnungen nicht dem Stand der Entwicklung. Die Ableitung von Kurzzeit-Ausbreitungskoeffizienten aus gemittelten Werten von Langzeitausbreitungen führt zu fehlerhaften Abschätzungen. Die in der AVV praktizierte Festlegung des ungünstigsten Einwirkungsortes als feste Stelle ist falsch, da dieser immer ein anderer ist, je nach Änderung der meteorologischen Parameter. Damit ist der "Aufpunkt" fiktiv. Die AVV hat bis jetzt die potentielle Strahlenbelastung durch Resuspension von abgelagerten radioaktiven Stoffen vernachlässigt. Zwischen den erklärten Zielsetzungen der KTA-Regeln und die darin

---

<sup>85</sup>Alexander, FE: Clustering of childhood acute leukaemia: The EUROCLUS Project. *Radiation and Environmental Biophysics* 37 (1998) 71 - 74.

<sup>86</sup>Westermeier T & Michaelis J: Applicability of the Poisson distribution to model the data of the German Children's Cancer Registry. *Radiat. & Environ. Biophys.* 34 (1995) 7-11. Laut PD Dr. W. Hoffmann, BIPS, ließe sich keine Kritik an der methodischen Sorgfältigkeit dieser Studie üben. Ferner wäre das Ergebnis der Studie bezeichnend für die Situation hinsichtlich der Cluster-Bildung in der BRD, und nicht das methodisch fragwürdige Ergebnis von Frau Professor F.E. Alexander aus Großbritannien.

vorgeschriebene Überwachung der Immissionen in der Umwelt besteht eine Diskrepanz. Der erweckte Eindruck von redundanten Messungen ist eine Täuschung, weil die Immissionsüberwachung im wesentlichen auf Gammastrahlung ausgerichtet ist und nicht in der Lage ist, nuklidspezifisch niederenergetische Beta- sowie reine Alphastrahler festzustellen. Die bestehende AVV löste die Allgemeinen Berechnungsgrundlagen von 1979 ohne wesentliche Änderungen ab.

Die Aufsichtsbehörde ist der Ansicht, daß die genehmigten Emissionen für das KKK lediglich 1/10 des Expositionsgrenzwertes für die Bevölkerung darstelle und daß die Jahresemissionen etwa 1% des genehmigten Wertes betragen. Es würde Emissionen von mindestens drei Größenordnungen darüber bedürfen, um den Expositionsgrenzwert der StrlSchV zu überschreiten<sup>87</sup>. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß allein Fehler in der Dosisermittlung in den AVV aufgrund der meteorologischen Unsicherheiten und der Unsicherheiten der Dosisfaktoren nach Inkorporation von Radionukliden ohne weiteres Unterschätzungen bis zu drei Größenordnungen bedeuten kann. Ein Schwachpunkt des Überwachungssystems liegt in der mangelnden nuklidspezifischen Überwachung von Alphastrahlern, die in Kernreaktoren als langlebige Aktiniden (insbesondere Plutonium-239) in großen Mengen vorkommen. Die allgemeine Überwachungsmessung ist im Hinblick auf Alphastrahler deshalb unzureichend, weil dabei nicht gegen die natürlich vorkommende alphaaussendende Radioaktivität diskriminiert werden kann. Die Alphastrahler bergen noch ungelöste Probleme der Dosimetrie und sind ein aktuelles Forschungs Feld der Strahlenbiologie. Eine Kontrolle der Einhaltung der betrieblichen Vorschriften ist grundsätzlich der erste Schritt zur Untersuchung einer möglichen Strahlenbedingtheit der kindlichen Leukämien (evtl. zur Entlastung der Betreiber). Selbst wenn jedoch diese Einhaltung - entgegen den Feststellungen der von hier beteiligten Gutachtern - bestätigt werden könnte, müßte aufgrund der angegebenen Unsicherheiten festgestellt werden, daß die Bevölkerungsdosis durch den Betrieb des KKK, wie auch in anderen Fällen nicht verläßlich angegeben werden kann. Für eine Abschätzung der maximal möglichen Exposition müßte ein neues Gutachten unter Berücksichtigung der Vertrauensbereiche der eingehenden Parameter angefertigt werden.

#### **II. 5. 2. Zulänglichkeit der gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich des gesundheitlichen Schutzes**

Die Induktion von Leukämie wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, wobei das Alter ein sehr kritischer ist. Leukämien kommen in früher Kindheit vor und können bereits *in utero* ausgelöst sein. Da der Embryo bekanntlich besonders strahlenempfindlich ist, wird die Induktionsdosis sehr niedrig sein, wie Studien über Leukämierisiken nach diagnostischer

---

<sup>87</sup>Schreiben des MFE (Abteilung für Reaktorsicherheit) an den Vorsitzenden der Fachkommission Leukämie des Landes S.-H Prof. Dr. O. Wassermann vom 19.01.1996.

Röntgenexposition während der Schwangerschaft belegen. Der erste diesbezügliche Bericht von Alice Stewart (siehe oben) wurde durch weitere Studien bestätigt. Nennenswert ist eine entsprechende, große Studie in den Neu-England-Staaten in den USA.<sup>88</sup> Trotz dieser und anderer vorliegender Studien berücksichtigt die ICRP weiterhin für Risikoabschätzungen lediglich die RERF-Mortalitätsdaten der Atombombenüberlebenden. Die Unvollständigkeit der RERF-Daten - Nichterfassung der Mortalität in den ersten 5 Jahren, die hauptsächlich aus Kindern und alten Menschen bestanden - müssen zu einer Unterschätzung der Risiken bei Kindern führen. Trotzdem hat der BEIR V-Bericht<sup>89</sup> die Frage zur Empfindlichkeit als Funktion des Alters in Zusammenhang mit Leukämien aufgeworfen, und der Anstieg des relativen Risikos im Alter von 5 Jahren wurde mit 4,66 pro 10 cGy (0,1 Gy) bei einer Latenzzeit von 2 bis 15 Jahren abgeschätzt. Die Verdoppelungsdosis für Leukämieinduktion *in utero* wird von Alice Stewart mit etwa 1 cSv (10 mSv) abgeschätzt (siehe Anhang I). Der entsprechende Wert, abgeleitet von BEIR V für Kinder im Alter von 5 Jahren, beträgt etwa 2,7 cSv (27 mSv) und ist weit niedriger, als er hin und wieder in den öffentlichen Medien von Mitgliedern der deutschen Strahlenschutzkommission deklariert wird. Die bewußte Mißachtung der Daten aus *in utero*-Expositionen ist durchaus zu verstehen; die Anerkennung dieser Daten würde Konsequenzen verlangen, die sich in der StrlSchV niederschlagen müßten, und bedeuten, daß die Grenzwerte erheblich herabgesetzt werden müßten. Eine strengere Handhabung würde die Industrie, insbesondere die Atomindustrie, aber auch verschiedene medizinische Disziplinen mit erheblichen Einschränkungen belasten.

Wie in einem vorhergehenden Abschnitt bereits erwähnt, wurde die Grundlage des Grenzwertes von 5 cSv/a (50 mSv/a) ursprünglich von der ICRP im Jahre 1958 empfohlen und hat in Deutschland für berufsexponierte Personen weiterhin Gültigkeit, obwohl in Großbritannien dieser nach dem LSS-Bericht von 1997 auf 1,5 cSv/a (15 mSv/a) herabgesetzt worden ist. Diese "genetic dose" der ICRP war zu jener Zeit die beste Abschätzung der Verdoppelungsdosis für vererbare Schäden an Folgegenerationen, d.h. eine Generation wird mit 30 Jahren angesetzt. Die ICRP hat in ihrem Bericht von 1990 die Grenzwerte für berufsexponierte auf 2 cSv/a (20 mSv/a) herabgesetzt und sieht eine Optimierung des Grenzwertes (ICRP 1997<sup>90</sup>) für den Schutz der allgemeinen Bevölkerung bei 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a). § 45 der StrlSchV entspricht letzterem, jedoch ist eine entsprechende Herabsetzung des Grenzwertes für beruflich Exponierte in Deutschland bisher nicht erfolgt. Die damalige Zielsetzung war, zukünftige Generationen zu schützen, ohne der sich gerade entwickelnden Nuklearindustrie Hindernisse aufzuerlegen.

---

<sup>88</sup>MacMahon, B: Prenatal X-ray exposure and childhood cancer. J. National Cancer Institute, 28 (1965) 1173-1191.

<sup>89</sup>BEIR V: Health effects of exposure to low levels of ionising radiations. National Academy Press, Washington DC, 1990, S. 352- 370.

<sup>90</sup>ICRP Publication 77: Radiological Protection Policy for the Disposal of Radioactive Waste. Pergamon 1998.

Stochastische somatische Effekte wurden nicht berücksichtigt, da die Vorstellung bestand, daß dafür erheblich höhere Dosen erforderlich seien. Der Einfluß des Alters, insbesondere die Empfindlichkeit der *in utero*-Induktion des kindlichen Krebses, fand bei der damaligen Formulierung der ICRP-Empfehlungen keine Berücksichtigung, da Daten darüber erst später erhoben wurden. Bald erfolgten die zwei maßgebenden Arbeiten von A. Stewart (1956) und B. MacMahon (1962) über die Risiken von kindlichen Leukämien durch *in utero*-Expositionen infolge röntgendiagnostischer Maßnahmen, die dennoch keine Auswirkungen auf die ICRP-Entscheidungen hatten. Die herrschende Philosophie des Strahlenschutzes hätte aufgegeben werden müssen - vermutlich zum Nachteil der politisch geförderten nuklearen Industrie - wenn eine ernsthafte Berücksichtigung dieser und weiterer Studien ähnlicher Richtung gegeben wäre. Die Atomenergieprogramme wurden als Quellen waffenfähiger Nuklide konzipiert.

Obwohl das nukleare Wettrüsten beendet ist und die öffentliche Haltung westlicher Industrienationen gegenüber Atomenergie sich zu einer allgemein kritischen Einstellung gewandelt hat, ist eine Neubewertung der wissenschaftlichen/ technologischen Grundlagen sowie eine Änderung der gesetzlichen Bestimmungen für den Betrieb von AKW und der Grenzwertbestimmungen noch nicht in Sicht. Die Philosophie des Strahlenschutzes nur auf der Grundlage von Grenzwerten, bestimmt durch die "genetic dose", ohne Berücksichtigung der empfindlichsten der stochastischen somatischen Effekte, ist nicht vertretbar. Die *in utero*-Effekte müssen als wahrscheinlichste Kandidaten für limitierende Faktoren gesehen werden. Die Hinwendung zu einer Betonung biologischer Faktoren muß durch das Voranbringen mikrodosimetrischer Methoden und der Entwicklung von Modellen zur realistischen Abschätzung von Dosis- und Dosiswirkungsbeziehungen, insbesondere für Alphastrahler gefördert werden. Bis dahin bleiben die StrlSchV und die Bestimmungen für den Betrieb von AKW suboptimal und das erklärte Ziel des ausnahmslosen Schutzes der Bevölkerung eine Täuschung.

Die Annahme, daß die zellulären Bereiche in einem Organ nach Inkorporation von Radionukliden gleichmäßig bestrahlt werden, ist falsch, da sie (a) die Biokinetik einzelner Radionuklide und (b) die eigentliche Biophysik der Energiedeposition in Geweben außer acht läßt. Die Bedeutung dieser Fehler ist besonders ausschlaggebend in Bezug auf Alphastrahler sowie auf Niedrigenergie-Betastrahler, speziell diejenigen, die Auger-Elektronen ausstrahlen. Die Unterschätzung der Dosis in den Zielzellen kann bis zu zwei Größenordnungen betragen (siehe oben) und die Risikoabschätzung entsprechend verfälschen. Die derzeit angewandten Berechnungsmethoden bedürfen einer Verbesserung auf Grundlage der Mikrodosimetrie. Leukämien und andere kindliche Neoplasien müssen auch schwerwiegenden Vernachlässigungen in der Methodik der Risikoabschätzung angelastet werden. Es ist höchste Zeit, daß hier entscheidende Verbesserungen vorgenommen werden.

## Fazit

Malignitäten des lympho-hämatopoetischen Systems sind die frühesten der stochastischen

somatischen Effekte nach niedriger Strahlenexposition. Die Zellen, die zu diesem System gehören, zählen auch zu den strahlenempfindlichsten des somatischen Gewebes. Die Empfindlichkeit der Zielzellen und die Latenzzeiten sind beide Umkehrfunktionen des Alters; das höchste Risiko mit kürzester Latenzzeit ist daher während der foetalen Entwicklung gegeben. Die Abschätzungen der Verdoppelungsdosis liegen zwischen 1 - 3 cGy (10 - 30 mGy). Die *in utero*-Daten sind aus epidemiologischen Studien über diagnostische Röntgenexpositionen abgeleitet worden. Diese Daten sind von der ICRP und folglich auch von den nationalen Strahlenschutzgremien bei Überlegungen der Grenzwertfestsetzung mit Bedacht außer acht gelassen worden, um Hindernisse in der Entwicklung von Kernenergieprogrammen auszuräumen.

Die gesetzliche Grundlage für die StrlSchV ist in allen Ländern die Empfehlung der ICRP, welche sich als älteste internationale Körperschaft darstellt, die sich mit Problemen des Strahlenschutzes beschäftigt. Die Sorge zur Zeit der Entwicklung von Grenzwerten waren vererbare Schäden in der Nachkommenschaft und zukünftiger Generationen. Dieses führte zum Konzept der "genetischen Dosis", welche als Fundament für die Festsetzung von Grenzwerten diente und zugleich Hindernisse in der Entwicklung von Atomenergieprogrammen ausräumte. Die AVV- und KTA-Regeln in diesem Lande sollten als Garanten für die Aufrechterhaltung der Zielsetzungen der StrlSchV dienen, welche den Schutz der Bevölkerung ohne Ausnahmen vorsieht. Diese Verantwortung erfordert eine gründliche Bewertung der Entwicklung in Wissenschaft und Technologie, gefolgt von gewissenhaftem Handeln. Eine Prüfung der Regeln und Bestimmungen ergab, daß dieses nicht der Fall ist. Als logische Konsequenz daraus kann ein AKW (hier das KKK), auch bei voller Einhaltung der Betriebsbestimmungen nicht automatisch von der Schuld einer möglichen Gesundheitsgefährdung freigesprochen werden. Die Unzulänglichkeiten der AVV und KTA-Regeln 1503.1 sind vielseitig und wurden ausgeführt. Das Risiko kindlicher Leukämien wurde hierzulande für Einwohner innerhalb eines 5 km-Radius um ein AKW als signifikant erhöht festgestellt. Gleiches gilt für Großbritannien und in den Vereinigten Staaten. Die erwähnte Studie in der BRD wies auf eine definitive Umkehrbeziehung hin zwischen dem Alter der Kinder und dem Leukämierisiko, im Zusammenhang mit der Dauer des Betriebes eines AKW hin.

Auch wenn die Strahlenbiologie, aufgrund der genauen dosimetrischen Fähigkeiten, für sich in Anspruch nimmt, zu den exakteren Biowissenschaften zu zählen - und in diesem Lande über viele Jahre ein Bestandteil der Biophysik war - gilt dieses nur für Strahlenabsorption in einfachen homogenen nicht lebenden Systemen, wie Gasen und Flüssigkeiten. In komplexen lebenden Organismen ist die Dosimetrie für hochenergetische, elektromagnetische Strahlungen genau bestimmbar. Unsicherheiten entstehen, wenn es sich um kopuskulare Strahlungen mit geringer Reichweite handelt. Die Komplexität nimmt zu, wenn es sich bei der Quelle der Strahlung um inkorporierte Radionuklide handelt. Erkenntnisse aus diesem Bereich sind sehr

lückenhaft<sup>91</sup>. Es sollte auch anerkannt werden, daß in der Biologie auf molekularer, zellulärer und Gewebeebene während der letzten drei Jahrzehnte enorme Fortschritte erzielt wurden. Diese haben zum besseren Verständnis der Kanzerogenese als solcher und zum Problem der individuellen Empfindlichkeiten beigetragen. Erkenntnisse aus diesen Gebieten müssen noch Niederschlag in der StrlSchV finden.

Emotionsfreie Diskussionen zwischen den informierten Einwohnern der betroffenen Region, dem Betreiber des KKK und der Aufsichtsbehörde werden aufgrund von Haftungssorgen der Betreiber, Sorge vor Verletzungen der Aufsichtspflicht seitens der Behörde und der Tatsache, daß die BI mit Initiativlern diverser Motivationen durchsetzt sind, erschwert. Von der Bundesbehörde für Reaktorsicherheit und der Strahlenschutzkommission ist keinerlei Unterstützung zugesichert worden. Diese Haltung der Nichtunterstützung kann nur aufgrund der Tatsache verstanden werden, daß beide als "geistige Väter" für die inhaltliche Konzeption der StrlSchV und anderer Aufsichtsbestimmungen verantwortlich sind.

#### **Bezug**

- Anhang O: Beitrag von Wolfgang Köhnlein
- Anhang A: Beitrag von Johann J. Broerse & J. Geleijns
- Anhang C2: Beitrag von Otfried Schumacher
- Anhang B2, B3: Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake

### **III. Aufgabe 2: Frage, ob der prädominante Leukämietyp in der Elbmarsch, ALL (akute lymphozytäre Leukämie), als strahleninduzierbar bekannt ist**

#### **III. 1. Strahlenleukämogenese**

Ionisierende Strahlungen sind bekanntlich hocheffiziente leukämogene Agenzien. Die kanzerogene Eigenschaft ionisierender Strahlung wurde bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen erkannt, da Ärzte, die die Anwendung von Röntgenstrahlen pioniert haben, die

---

<sup>91</sup>Die Hauptforschungsrichtung der Strahlenbiologie hat vor etwa drei Jahrzehnten die Forschung auf dem Gebiet der Radiotoxikologie von Radionukliden als ein Gebiet von geringer Bedeutung abgetan, nicht nur in Deutschland. Als Folge dieser Entwicklung wurden Institute und Laboratorien, die auf diesem Gebiet tätig waren, nicht weiter finanziert und aufgelöst. Das letzte solcher Institute, wo bedeutsame Arbeiten über die Radiotoxikologie von Lanthaniden und Aktiniden durchgeführt wurden, war das Kernforschungszentrum Karlsruhe, das andere Aufgaben zugeteilt bekam. Diese Entwicklung ist weder von der Strahlenschutzkommission in Bonn noch vom Wissenschaftsrat verhindert worden.



lückenhaft<sup>91</sup>. Es sollte auch anerkannt werden, daß in der Biologie auf molekularer, zellulärer und Gewebeebene während der letzten drei Jahrzehnte enorme Fortschritte erzielt wurden. Diese haben zum besseren Verständnis der Kanzerogenese als solcher und zum Problem der individuellen Empfindlichkeiten beigetragen. Erkenntnisse aus diesen Gebieten müssen noch Niederschlag in der StrlSchV finden.

Emotionsfreie Diskussionen zwischen den informierten Einwohnern der betroffenen Region, dem Betreiber des KKK und der Aufsichtsbehörde werden aufgrund von Haftungssorgen der Betreiber, Sorge vor Verletzungen der Aufsichtspflicht seitens der Behörde und der Tatsache, daß die BI mit Initiativlern diverser Motivationen durchsetzt sind, erschwert. Von der Bundesbehörde für Reaktorsicherheit und der Strahlenschutzkommission ist keinerlei Unterstützung zugesichert worden. Diese Haltung der Nichtunterstützung kann nur aufgrund der Tatsache verstanden werden, daß beide als "geistige Väter" für die inhaltliche Konzeption der StrlSchV und anderer Aufsichtsbestimmungen verantwortlich sind.

#### **Bezug**

- Anhang O: Beitrag von Wolfgang Köhnlein
- Anhang A: Beitrag von Johann J. Broerse & J. Geleijns
- Anhang C2: Beitrag von Otfried Schumacher
- Anhang B2, B3: Beitrag von Inge Schmitz-Feuerhake

### **III. Aufgabe 2: Frage, ob der prädominante Leukämietyp in der Elbmarsch, ALL (akute lymphozytäre Leukämie), als strahleninduzierbar bekannt ist**

#### **III. 1. Strahlenleukämogenese**

Ionisierende Strahlungen sind bekanntlich hocheffiziente leukämogene Agenzien. Die kanzerogene Eigenschaft ionisierender Strahlung wurde bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen erkannt, da Ärzte, die die Anwendung von Röntgenstrahlen pioniert haben, die

---

<sup>91</sup>Die Hauptforschungsrichtung der Strahlenbiologie hat vor etwa drei Jahrzehnten die Forschung auf dem Gebiet der Radiotoxikologie von Radionukliden als ein Gebiet von geringer Bedeutung abgetan, nicht nur in Deutschland. Als Folge dieser Entwicklung wurden Institute und Laboratorien, die auf diesem Gebiet tätig waren, nicht weiter finanziert und aufgelöst. Das letzte solcher Institute, wo bedeutsame Arbeiten über die Radiotoxikologie von Lanthaniden und Aktiniden durchgeführt wurden, war das Kernforschungszentrum Karlsruhe, das andere Aufgaben zugeteilt bekam. Diese Entwicklung ist weder von der Strahlenschutzkommission in Bonn noch vom Wissenschaftsrat verhindert worden.

ersten Opfer<sup>92</sup> waren, aufgrund gänzlich fehlender Schutzmaßnahmen. Seitdem wurden ionisierende Strahlungen zum am besten untersuchten kanzerogenen Agens, belegt durch umfangreiche Literatur. Trotzdem stehen ionisierende Strahlungen weiterhin im Brennpunkt der Diskussionen über Krebs. Der Grund liegt in der breiten Anwendung ionisierender Strahlungen in Medizin und Industrie, somit erscheint es bei vollständigem Verzicht auf die Anwendung ionisierender Strahlungen unvorstellbar, daß es in den Industrienationen nicht zu einem merklichen Verlust von Lebensqualität kommen würde.

Die Faszination, ionisierender Strahlungen in der Grundlagenforschung beruht auf den Tatsachen, daß

- ionisierende Strahlungen vollständige Karzinogene sind, d.h. die Anwesenheit eines anderen fördernden Agens ist nicht erforderlich für die onkogene Wirkung, kann aber, falls vorhanden, den Prozeß modulieren;
- im Gegensatz zu chemischen Karzogenen – ionisierende Strahlungen frei von chemischen Reaktionen (in konventionellem Sinn) wirken und dadurch keinen Stoffwechselvorgängen unterworfen sind; sie stellen nur die Aufnahme von Energie in einer besonderen Weise dar;
- ionisierende Strahlungen alle bekannten Arten von Tumoren und Krebse hervorrufen können und somit darauf hinweisen, daß sie lediglich die Häufigkeit der natürlich vorkommenden sog. spontanen Neoplasien erhöhen;
- ein gewisser Anteil der sog. spontanen Tumore bzw. Krebse sicherlich auf die natürliche Hintergrundstrahlung zurückzuführen ist, da alles Leben dieser ausgesetzt ist, was durch epidemiologische Befunde belegt wurde;
- der Mechanismus der strahleninduzierten Zelltransformation als Inbegriff natürlicher Ereignisse angesehen wird.

In Anbetracht des Gesagten kann die Frage in Aufgabe 2, ob ALL strahleninduzierbar ist, als überflüssig betrachtet werden, da es theoretisch keine Gründe gibt, warum ionisierende Strahlungen ALL nicht verursachen sollten. Die Frage kann daher lediglich sein, ob ionisierende Strahlungen vorzugsweise bestimmte Leukämiearten hervorrufen. Derartige Präferenzen wurden in verschiedenen Studien beobachtet. Die Aufgabe wird daher die Prüfung der verschiedenen Kohorten sein, um zu ermitteln, ob die beobachteten Präferenzen biologisch begründet sind. Ein Teil der Aufgabe hier wäre, die zugrunde liegenden Prinzipien der Strahlenätiologie zu erkennen. Biologische Faktoren, wie Alter, Geschlecht und auch das Vorhandensein von Co-Faktoren, beeinflussen die Ätiologie und den Verlauf von Krankheiten.

Daten über Leukämien, in Zusammenhang mit Exposition gegenüber ionisierenden Strahlungen, sind durch eine Reihe von epidemiologischen Studien erhoben worden. Hierzu zählen die RERF-Daten der Atombombenopfer in Hiroshima und Nagasaki in Japan, medizinische

---

<sup>92</sup>z.B. Freiben, E: Cancroid des rechten Handrückens. Deutsche Medizinische Wochenschrift, 28 (1902) 335.

Expositionen sowohl aus der Strahlentherapie als auch aus der Röntgendiagnostik, berufliche Expositionen bei Arbeitern in der nuklearen Industrie und Umweltexpositionen – kindliche Leukämien in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen. In den frühen Jahren der Röntgendiagnostik fand Thorotrast (Thorium) Anwendung als Kontrastmittel. Damit entstanden Kohorten von Patienten, die mit einem alpha-emittierenden Radionuklid kontaminiert waren. Eine andere Situation, die zu Kontaminationen zahlreicher Frauen mit einem anderen alpha-emittierenden Radionuklid (Radium) führte, waren die Uhrenziffermalerinnen. Daten über *in utero*-Expositionen wurden aus früheren Röntgenaufnahmen im Bereich der Geburtshilfe für Voraussagen über den Geburtsverlauf (Exposition im späteren Trimester) oder durch unwissentliche Expositionen aufgrund röntgendiagnostischer Maßnahmen an Müttern im unteren Bauchbereich (Ersttrimester-Exposition) erhoben. Die akkumulierten Erkenntnisse aus diesen Studien haben zum derzeitigen Verständnis über die Strahlenleukämogenese beigetragen. Einzelne Studien werden immer unvollständig sein und könnten Schwächen beinhalten. Insgesamt betrachtet, können die Unzulänglichkeiten einzelner Studien aufgrund der gegenseitigen Ergänzungen von Ergebnissen aufgehoben werden.

Da Leukämien in der Tat seltene Krankheiten sind, ist das Erkrankungsrisiko, ausgedrückt in absoluten Zahlen erkrankter Personen, immer klein im Vergleich zu soliden Tumoren. Aufgrund der höheren Empfindlichkeit hämatopoetischer Zellen gegenüber ionisierenden Strahlungen, sind die Verdoppelungsdosen für Leukämien extrem niedrig, und in Zusammenhang mit der relativ kurzen Latenzzeit eignet sich diese Krankheitsgruppe als kardinaler Indikator einer Strahlenexposition. Diese Tatsache zeigt sich, wenn das Relative Risiko berechnet wird. Weil die soliden Tumore, insgesamt in ihrer absoluten Zahl die Leukämien bei weitem übertreffen, ist es verständlich, daß bei Risikoabschätzungen im öffentlichen Gesundheitswesen dem Vorkommen von soliden Tumoren größeres Gewicht beigemessen wird. Wenn das Ziel aber investigativ ist und die Ätiologie festzustellen ist, dann ist das Vorkommen von Leukämien von größter Bedeutung als Indikator einer möglichen Strahlenexposition über die natürliche Hintergrundstrahlung hinaus.

Leukämie ist eine allgemeine Bezeichnung für eine Gruppe verwandter, maligner Bluterkrankungen. Die Klassifikation der Leukämien richtet sich nach den prädominanten Zelltypen und der Dauer vom Ausbruch bis zum Tode. Der Verlauf akuter Formen dauert im allgemeinen nur einige Monate, während die chronischen Formen sich über ein Jahr oder länger hinziehen können.

### III. 1. 1. Überlebende der Atombomben: RERF-Daten über Leukämie

Die Befunde der RERF werden als Berichte herausgegeben und haben eine Sonderstellung aufgrund der Größe der Kohorte. Die Tatsache, daß die Beurteilungen und Empfehlungen der ICRP sich fast ausschließlich auf diese Daten stützen, trägt erheblich zum Sonderstatus der ICRP-Daten bei. Wie schon in früheren Abschnitten erwähnt und hier nochmals betont, beinhalten diese Daten schwerwiegende Unzulänglichkeiten, die nicht beachtet werden.

Die Notsituation nach den Bombenabwürfen und andere Besonderheiten (u.a. Strahlencharakteristika) der zwei Kohorten (aus Hiroshima und Nagasaki) geben Anlaß zur Zurückhaltung bei einer Verallgemeinerung der Befunde, obwohl sie ohne Zweifel von sehr großem Wert für das Verständnis der Strahlenbiologie des Menschen sind. Bevor diese Daten entstanden, beschränkte sich die menschliche Erfahrung überwiegend auf strahlenexponierte männliche Ärzte mittleren Alters, die keineswegs repräsentativ für eine natürliche Bevölkerung sind.

Die Anzahl der Atombombenüberlebenden in Hiroshima und Nagasaki lag bei 120.321. Ausgeschlossen aus der Kohortenstudie wurden: 26.580 Personen, die zum Zeitpunkt der Bombenexpositionen nicht in den betroffenen Städten waren; 7.103 Personen, für die keine Dosisangaben nach dem Dosimetry System 1986 (DS 86) vorlagen; 262 Personen, bei denen die abgeschätzte Dosis bei mehr als 4 Gy lag; und 45 Personen, bei denen Angaben über den gesundheitlichen Status fehlten. Weitere 38 Personen, bei denen vor dem 1. Oktober 1950 Krebs diagnostiziert wurde, wurden auch aus der Studie ausgeschlossen. Damit sind 86.293 Personen, bei denen eine Dosisabschätzung von unterhalb 4 Gy (DS 86 Kerma) festgestellt wurde, als geeignet für die Kohortenstudie erklärt worden. Als Ende der 40er Jahre Anzeichen für ein Leukämiezunahme erkannt wurden, ist ein Leukämierregister eingerichtet worden, um Leukämien, Lymphome, Plasmozytome und andere lympho-hämatopoetische Erkrankungen zu erfassen. Die Diagnosen wurden nach der damals geltenden Nomenklatur erstellt und nach der *ad hoc*-Klassifizierung kodiert. In den 80er Jahren sind diese nach geltenden Kriterien erneut klassifiziert worden und die Klassifikation der Krankheiten wurde in Übereinstimmung mit dem französisch-amerikanisch-britischen (FAB) System gebracht.

In einer jüngst erschienenen Publikation der RERF-Befunde, basierend auf og. Kohorte, wird im Hinblick auf die Häufigkeit von Leukämien, Lymphomen und Plasmazytomen im Zeitraum von 1950-1987<sup>93</sup> aufgezeigt, daß es für eine adäquate Bewertung der Folgen einer Strahlenbelastung nicht sachgerecht ist, die verschiedenen Leukämien als eine Entität zusammenzufassen, weil die verschiedenen Erkrankungstypen deutliche ätiologische Reaktionsunterschiede auf Bestrahlung aufweisen. Ferner sollten maligne Lymphome, chronische lymphozytäre Leukämie (CLL) und Plasmazytome nicht ausgeschlossen werden. Das Exzess-Relativrisiko (ERR) für akute lymphozytäre Leukämie (ALL) wurde mit 9,1 für chronische myeloische Leukämie (CML) mit 6,2 und für akute myeloische Leukämie (AML) mit 3,3 als Mittelwert angegeben. Da das Relativrisiko (RR) von der Zeit nach der Exposition (Time Since Exposure, TSE) abhängig ist, kann das RR zu unterschiedlichen Zeitpunkten signifikant variieren. Die angegebenen Werte wurden durch die Anwendung eines Modells des konstanten RR nach der Latenzzeit berechnet, womit die Vergleichbarkeit erreicht wurde.

Da die Kohorte erst fünf Jahre nach den Atombombenabwürfen im Oktober 1950 etabliert

---

<sup>93</sup>Preston, DL *et al.*: Cancer incidence in atom bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. Radiation Research, 137 (1994), P. 68-97.

wurde, kann das Vorkommen von Leukämiefällen in der Zwischenzeit nicht ausgeschlossen werden, insbesondere angesichts der Erkenntnisse, daß die Latenz für Leukämien wesentlich kürzer ist als für solide Tumore<sup>94</sup>. Eine Unterschätzung bzw. Überschätzung der Latenzzeit beeinflußt das gemittelte RR indem nicht erfaßte relevante Fälle bzw. erfaßte nicht relevante Fälle ins Gewicht fallen. Beide Situationen können zur Unterschätzung des RR führen. Die o.g. Arbeit von Preston et al<sup>93</sup> zeigt die Verteilung der Fälle als Funktion der Zeit nach Exposition (TSE) wobei die Maxima vom Alter, Geschlecht und von der Dosis abhängig sind. Im Falle der ALL wurde ein steiler Abfall der Inzidenz für alle Altersgruppen ab Studienbeginn aufgezeichnet. Falls der Gipfel der Inzidenz nicht mit dem Studienanfang übereinstimmt, sondern bei einem früheren Zeitpunkt lag – und dieses trifft sicherlich für die Kinder zu – dann wird durch Nichterfassen des Gipfels, das RR deutlich unterschätzt. Entsprechend muß dieses für die Altersgruppe < 20 Jahre zur Zeit des Bombenabwurfs (at time of bombing, ATB) in Zusammenhang mit AML festgehalten werden. Tatsache ist, daß die RR für alle Leukämien in Umkehrbeziehung zum Alter ATB stehen. Wenn das RR für die Altersgruppe < 20 Jahre weiter unterteilt wird und lediglich das Alter bis zum 15. Jahr berücksichtigt wird, dann steigt das RR um eine Größenordnung im Vergleich zu den Gruppen ab dem 40. Lebensjahr und mehr ATB. Das RR für AML für die Altersgruppen 40 und mehr stieg mit der Zeit im Vergleich zu den Altersgruppen < 20 und 20-39 Jahre ATB. Aufgrund der starken Zunahme der natürlichen Inzidenz der Leukämien bei den älteren Gruppen liegt das mittlere Exzess-Absolutrisiko (EAR) für alle Leukämien bei allen Altersgruppen über 20 Jahre höher als das für diejenigen unter 20 Jahre (3,06 gegen 2,28 pro 10<sup>4</sup> PY Sv<sup>95</sup>), obwohl das ERR im Durchschnitt für erstere etwa die Hälfte ist als für letztere (3,7 gegen 6,11 pro Sv).

Die Disparität zwischen ERR und EAR wurde auch für den Geschlechtseinfluß für alle Leukämien zusammenfassend festgestellt. Der Durchschnitt des ERR aller Altersgruppen war 4,75 und für Männer 3,91. Im Gegensatz dazu lag der Durchschnitt des EAR für Frauen bei 2,29 und für Männer bei 3,35. Diese Werte ändern sich je nach Leukämietypen. Im Falle der ALL ist das RR für das männliche Geschlecht unter < 20 Jahre ATB deutlich erhöht und bis zu 15 Jahren sogar 3mal höher. Das RR ist auch für das männliche Geschlecht < 20 Jahre ATB hinsichtlich der AML und der CML für alle Altersgruppen höher. Dieser Unterschied vermindert sich mit der Zeit,

---

<sup>94</sup>In der 2. Hälfte der 40er Jahre wurde eine Leukämieregistratur eingerichtet um Leukämien, Lymphomen, Plasmazytomen und andere hämatopoietische Erkrankungen, die nach 1945 bis in den Anfang der 50er Jahre bei den Überlebenden der Bombenopfern aufgetreten sind, zu erfassen. Auch wenn die Vollständigkeit dieser Daten angezweifelt wird, stand sie allenfalls zur Verfügung. Preston et al<sup>93</sup> haben diese Daten in ihre Auswertungen extra einbezogen. Hierfür stützten sie sich auf die Veröffentlichung von Folley et al [Am. J. Med. 13 (1952) 311 - 321]. Bei Einbeziehung der Mortalitäten von 1948 bis 1950 in den RERF-Daten wurden die Risiken für die verschiedenen Leukämien durchschnittlich um 10 bis 15% erhöht.

<sup>95</sup>PY Sv = persons per year per Sievert. Für die Umrechnung von Gy auf Sv wird die RBW für Gammastrahlung als 1 und für Neutronen als 10 angesetzt.

obwohl die Auswirkung der TSE Typenspezifitäten aufweist.

Die Strahlendosis ist entscheidend für die Inzidenzrate und das Häufigkeitsverhältnis der verschiedenen Leukämietypen zueinander. Mit Ausnahme der AML ist die aufgezeichnete Dosisbeziehung linear. Für AML wurde eine statistisch signifikante, quadratische Komponente in der Dosisbeziehung festgestellt. Damit steigt die Inzidenz der AML exponentiell in relative und absolute Verhältnisse bei zunehmender Dosis. Bei niedrigen Dosen – abhängig von anderen Faktoren wie ATB, TSE und Geschlecht – kann die AML den Umständen entsprechend überwiegen oder auch nicht. Aufgrund der Höhe natürlicher Inzidenz, äußert sich bei steigender Dosis das quadratische Komponent mit deutliche Zunahme der AML-Fälle.

T-Zellen-Leukämie bei Erwachsenen (Adult T-Cell Leukaemia, ATL) ist bekanntlich in Japan (hauptsächlich auf der Hauptinsel Khyushu) endemisch und hat eine virale (HTLV-1) Ätiologie. Von den 43 Fällen, die nicht unter ALL, AML oder CML klassifiziert wurden, waren 25 als ATL identifiziert, und bis auf eine Ausnahme waren sie Überlebende aus Nagasaki. Da die Strahlenexposition bei 22 dieser Fälle unter 4 Gy lag, sind sie gesondert analysiert worden. Eine Dosisbeziehung konnte nicht belegt werden. 19 andere Leukämieerkrankungen als die erwähnten Typen wurden diagnostiziert. 17 dieser Fälle stammten aus Hiroshima und 15 konnten für diese Studie berücksichtigt werden. Hierunter wurden 7 Fälle von unspezifizierten Leukämien, 4 chronische lymphozytäre Leukämien (CLL), 2 myelodysplastische Syndrome und 2 Haarzellen-Leukämien aufgezeichnet. Eine signifikante lineare Dosisbeziehung konnte für diese 15 Fälle festgestellt werden; das ERR war 3,6 und näherte sich dem AML von 3,3 an.

### III. 1. 2. Medizinische Strahlenexposition

Die medizinische Anwendung ionisierender Strahlungen ist die größte Quelle der Exposition von Menschen. Das Potential der medizinischen Anwendung wurde bald nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 erkannt. Die Röntgenradiografie entstand unmittelbar danach. Der sorglose Umgang seitens der Ärzte erbrachte rasch Beweise für die schädigenden Wirkungen der Röntgenstrahlen – Strahlenverbrennungen und Krebs. Die zelltötende Wirkung der Röntgenstrahlen gemacht man sich in der Strahlentherapie zu Nutzen. In der anfänglichen Zeit waren Röntgenstrahlen ein Wundermittel, das für viele Zwecke eingesetzt wurde. Es wäre ein Unrecht zu behaupten, daß es an Bewußtsein der Gefahren bei Strahlenexposition mangelte. Das Problem lag an dem, was als sichere Dosis galt, d.h. wo keine Wirkungen oder zumindest keine schädigenden Wirkungen erwartet wurden. Bis 1925 gab es keine Grenzwerte. Der Jahresgrenzwert für beruflich exponierte Personen wurde danach in den USA mit 1,6 Sv festgelegt. Der Grenzwert wurde bis 1958 immer wieder herabgesetzt, als die ICRP das Konzept der "genetischen Dosis" von 5 cSv/a einführte. Vor diesem Hintergrund ist es begreiflich, daß die diagnostische Strahlenexposition immer als risikolos angesehen wurde, zumal die aufgenommenen Dosen, wenn auch stark schwankend, im allgemeinen nur den Bruchteil eines cSv darstellen. Obwohl die ICRP unmißverständlich festgehalten hat, daß es keine risikofreie Strahlendosis gibt

("there is no safe dose of radiation") und mehrere Studien über niedrige Strahlenexposition dieses tatsächlich bestätigen, ist die Haltung immer noch weit verbreitet, daß die Röntgendiagnostik risikolos sei. Hiermit wird in keinerlei Weise versucht, die Vor- oder Nachteile der Röntgendiagnostik zu bewerten. Es wird lediglich für eine aktive bewußte Minimierung von medizinischen Expositionen plädiert.

### III. 1. 2. 1. Medizinische Exposition: Strahlentherapie

Obwohl die therapeutische Anwendung ionisierender Strahlung zur Zeit auf die Strahlentherapie von Tumoren (jetzt als Radioonkologie genannt) beschränkt ist, wurde sie zu früheren Zeiten für verschiedenste Arten von Erkrankungen eingesetzt ohne über die Risiken der Auslösung von Neoplasien nachzudenken. Epidemiologische Analysen über die ERR für verschiedene Krebsarten aus diesen Kohorten und analoge Studien über sekundäre Krebse nach Strahlentherapie liefern ergänzende Informationen zu den RERF-Daten, welche im wesentlichen Befunde über die Kanzerogenese bei Menschen nach Exposition mit hohen Strahlendosen bei höheren Dosisleistungen darstellen. Eine Bewertung sämtlicher bedeutender Studien konnte CLL als sekundären Krebs nach Strahlentherapie nicht belegen. Dieser Befund stimmt mit dem RERF-Bericht überein. Es ist jedoch Vorbehalt geboten, da sekundäre Krebse nach Strahlentherapie bei sehr alten Menschen kaum Gegenstand von Studien gewesen sind. Bei den RERF-Daten mangelt es an Überlebenden dieser Altersgruppe, wie schon in einem anderen Abschnitt erwähnt, weil die meisten älteren Menschen der Kohorte binnen der ersten 5 Jahre vor dem Anfang der Erfassung starben. CLL ist typischerweise eine Erkrankung die in der 7. bis 8. Lebensdekade vorkommt, also im höheren Alter. Ein weiterer, erschwerender Aspekt der CLL ist im Vergleich zu anderen Leukämietypen die lange Latenz.

Im Zusammenhang mit dem Risiko der Entstehung von sekundären Krebsen nach Strahlentherapie, insbesondere Leukämien, begegnet man zwei Problemen: 1. daß die Patienten in der Regel kombinierte Therapien erhalten, d.h. Strahlentherapie und Chemotherapie (combined modality treatment, CMT); 2. daß, im Hinblick auf das besondere Problem der Frage einer Strahleninduktion kindlicher Leukämien, Kohorten von Kindern, die lediglich einer Strahlentherapie unterzogen wurden, eine Rarität sind - was in der Natur der Sache liegt. Abgesehen von Krebs, gehen die dokumentierten Fälle, wo Kinder aus therapeutischen Gründen teilkörperbestrahlt wurden, auf die früheren Zeiten der Anwendung von Röntgenstrahlen zurück. Drei derartige Situationen waren (a) postnatale Thymusbestrahlungen, (b) postnatale Bestrahlung von Hämangiomen, (c) Bestrahlung der Kopfhaut von Kindern, die mit *Tinea capitis*, einer Pilzkrankung, befallen waren. Insgesamt weisen Studien aus diesen drei Situationen darauf hin, daß das ERR für Leukämie signifikant ausfiel und nur akute Formen beobachtet wurden. Abgesehen von einigen Klassifikationsproblemen waren die aufgezeichneten Erkrankungstypen bei bestrahlten Säuglingen AUL (acute unspecific leukemia), ALL, SLL (sub-acute lymphoid leukemia) und ASL (acute stem cell indifferntiated leukemia). Bei Kindern war ALL

überwiegend. AML überwiegt im Erwachsenenalter und wird selten bei Kindern diagnostiziert. Wenn Kinder jedoch bei der Krebsbehandlung CMT unterzogen werden, dann verschiebt sich das Risiko des Sekundärkrebses zugunsten von AML. Das Sekundärkrebsrisiko bei Kindern, die nur Chemotherapie in Form von alkylierenden Verbindungen erhielten, war überwiegend AML.

Bei Erwachsenen (überwiegend Männer zwischen dem 20. und 40. Lebensjahr), die einer Strahlentherapie aufgrund von *Morbus Bechterew* (einer rheumatischen Arthrose der Wirbelsäule) unterzogen wurden, war der zweite Krebs überwiegend AML. Bei Betrachtung einer quasi TSE lag das RR für CML innerhalb der ersten Jahre nach der Therapie deutlich höher, erreicht einen Gipfelwert, gefolgt durch einen steilen Abfall. Zum Vergleich blieb das RR für AML bei der RERF-Kohorte lebenslänglich unverändert. Folglich zeichnet sich eine Umkehrung des Verhältnisses CML/AML mit TSE mit einem multiplikativen Effekt auf, aufgrund der quadratischen Komponente der Dosiswirkungsbeziehung der AML (siehe oben). In Zusammenhang mit diesem Merkmal der AML (im Vergleich zu CML), ist bezüglich der Mortalität Vorsicht geboten: die Prognosen für AML-Patienten sind schlecht und der Tod tritt innerhalb weniger Monate nach Ausbruch der Erkrankung ein, während die Situation für CML-Patienten gänzlich anders ist, und der Tod sich länger hinzieht. In 70% der Fälle ist der Tod auf einen Übergang zu AML zurückzuführen. Dieses kann zu statistischen Unterschätzungen der CML bei der Auswertung von Mortalitätsraten führen.

Es gab Kohorten von Frauen, die eine Strahlentherapie bei gutartigen, gynäkologischen Erkrankungen, die sich klinisch als Blutungsstörungen manifestierten, erhielten. Zusätzlich zu anderen Krebsarten wurden auch Leukämien festgestellt. Da die Leukämietypisierung nicht in allen Fällen verlässlich durchgeführt wurde, können keine genauen Aussagen gemacht werden. Dennoch handelte es sich in den meisten Fällen um akute Leukämien, und einer begründeten Annahme zufolge waren es AML-Fälle.

Leukämien sind als sekundäre Krebse nach der Strahlentherapie von Tumoren dokumentiert worden. Ein Problem bei diesen Kohorten ist, daß sie in der Regel zusätzlich Chemotherapien erhalten haben. In nur wenigen Fällen, wie einige Kohorten von Brustkrebs, bei denen eine reine Strahlentherapie durchgeführt wurde, ist das RR für AML und CML vergleichbar mit denen des ANLL (acute non-lymphoid leukemia, einschließlich AML) und des MDS (myelodysplastic syndrome, als pre-leukämisches Stadium zur AML). Bei Kohorten, die nur Chemotherapie erhielten, wurden keine Fälle von ALL und CML festgestellt, und das RR für ANLL bzw. MDS lag 4 mal höher. Bestand die Behandlung aus CMT, dann stieg das RR für ANLL bzw. MDS sogar höher als bei einer Chemotherapie. Bei der CMT verhält sich die Strahlung als Promoter der chemischen Leukämogenese. In absoluten Zahlen überwiegen myeloische Leukämien bei Erwachsenen.

Da das Alter bei der Exposition einen kritischen Faktor darstellt, ist es sinnvoll, Kinder in Altersgruppen zu klassifizieren, die den natürlichen Inzidenzen der prädominanten Leukämietypen entsprechen. Eine Prüfung der Studien über das Vorkommen sekundärer Krebse nach CMT bei Kindern ergab, daß diese bis zum Alter von 10 Jahren gleich häufig ALL, AUL und ANLL



entwickelten. Kinder von 10-14 Jahren entwickelten nur ANLL. Die Latenzzeit bei der chemischen Leukämogenese ist deutlich kürzer als für die Strahlenleukämogenese.

Eine interessante Tatsache ist, daß trotz unterschiedlicher Dosen und Dosisleistungen, die in den verschiedenen Therapien eingesetzt wurden, das RR immer zwischen 2 und 3 lag. Die Quintessenz hieraus ist, daß hier offensichtlich hohe Dosen bei hohen Dosisleistungen ein geringeres leukämogenes Potential besitzen als niedrigere Dosen bei niedrigeren Dosisleistungen, pro Dosisleistung. Dieses wird durch Befunde von Chromosomenaberrationen nach Bestrahlung unterstützt.

### III. 1. 2. 2. Medizinische Exposition: Röntgendiagnostik

Der erste Hinweis auf einen kausalen Zusammenhang zwischen diagnostischer Röntgenexposition und erhöhtem Risiko für Krebs entstand aus dem britischen OSCC und einer darauffolgenden amerikanischen Studie über geburtshilfliche Röntgenuntersuchungen (siehe oben). Für den hartnäckigen Widerstand gegen diese Vorstellung (sehr wahrscheinlich aufgrund verborgener Motive) wurde immer das Argument vorgebracht, daß die RERF-Daten keine vergleichbaren Befunde bei Kindern ergaben. Es wurde schon darauf aufmerksam gemacht (siehe Abschnitt II. 5), daß eine schwerwiegende Unzulänglichkeit der RERF-Daten die grobe Unterrepräsentation der im ersten Trimester befindlichen *in utero*-Kohorte ist, teilweise aufgrund spontaner Aborte und zusätzlich wegen des Fehlens der Mortalitätsdaten der ersten 5 Jahre.

Routinemäßige fluoroskopische Thoraxuntersuchungen bei der Tuberkulose führen zu hohen kumulativen Strahlenbelastungen. Diese Untersuchungen wurden deshalb eingestellt. Kohorten der untersuchten Frauen wiesen deutlich erhöhte Krebsrisiken auf. Ebenfalls wiesen Kohorten von Frauen, bei denen aufgrund von Skoliosen regelmäßig Röntgenaufnahmen der Wirbelsäule durchgeführt wurden, hohe Risiken für Brustkrebs auf. Obwohl ersteres eingestellt wurde, wird letzteres (welches auch zur starken kumulativen Strahlenbelastung führt) weiterhin praktiziert. Aufgrund der hohen kumulativen Dosen und des Vorteils, daß derartige Patientinnen in der Regel von einer einzigen Einrichtung betreut werden, konnten Dosisabschätzungen aus den Unterlagen durchgeführt werden; diese zwei Situationen stellen Ausnahmen dar.

Ansonsten unterliegen retrospektive Studien über die Langzeitauswirkung diagnostischer Röntgenstrahlen auf das Krebsrisiko verschiedenen methodischen Hindernissen, vor allem bei der Abschätzung von Dosen. Da Röntgenuntersuchungen zu den am häufigsten durchgeführten Maßnahmen zählen, geraten sie leicht in Vergessenheit. Es besteht dadurch die Gefahr fehlerhafter Klassifikationen basierend auf Interviewdaten. Das Bias fehlerhafter Klassifikation ist bedenkenswert, da Krebspatienten sich eventuell besser an vergangene Strahlenexpositionen erinnern. Ein weiteres Problem ist der potentielle Confoundereffekt durch Röntgenexposition bei der Krebsfrüherkennung. Dennoch sind Studien, fokussiert auf das Risiko für Leukämien und verwandte Erkrankungen, bestmöglich durchgeführt worden. Weil annähernd 90% des aktiven Knochenmarks im Rumpfbereich des Körpers vorkommen, sind Röntgenaufnahmen im

Rumpfbereich von Interesse hinsichtlich des Leukämierisikos.

Die erste Studie zu der Frage des potentiellen Risikos für Leukämie durch diagnostische Röntgenaufnahmen bei Erwachsenen wurde von Alice Stewart *et al.*<sup>96</sup> in Großbritannien durchgeführt. In dieser Studie wurde zwischen lymphozytärer (einschließlich Lymphosarkome) und myeloischer (einschließlich monozytärer und anderer) Leukämie unterschieden. Erhöhte myeloische Leukämie korrelierte mit Röntgenaufnahmen im Rumpfbereich positiv und negativ mit Aufnahmen der Extremitäten jeweils 5 Jahre vor der Erkrankungsdiagnose. Die Häufigkeit der Röntgenaufnahmen, d.h. Expositionen, war in diesen Fällen höher im Vergleich zu krebserkrankten bzw. gesunden Kontrollen und das Risiko am größten nach einer Latenzzeit von 3 - 4 Jahren.

Eine andere frühe Studie aus Neuseeland<sup>97</sup> (Daten gesammelt zwischen 1958 und 1961) hat CML mit Röntgenaufnahmen hoher Dosen korreliert. Wegen der erheblichen Verzerrung der Dosisverteilung war eine Assoziation nur mit einer stark erhöhten Anzahl von Röntgenaufnahmen gegeben. Kein weiterer Leukämietyp wurde assoziiert, wobei ALL und AML zusammengefaßt wurden. In einer Studie aus den USA (Daten gesammelt zwischen 1959 und 1962)<sup>98</sup> wurde hervorgehoben, daß für AML und CML das Risiko bei Männern signifikant erhöht war nach Röntgenaufnahmen im Rumpfbereich (bei 9% der Fälle > 10 Aufnahmen). Das Risiko für CLL war signifikant erhöht bei > 20 Aufnahmen im Rumpfbereich, aber nicht konsistent für alle Altersgruppen (d.h. wahrscheinlich beschränkt auf die Ältesten). Das Exzessrisiko bei jedem der 5-Jahres-Intervalle war in der gesamten Studienzeit von 20 Jahren evident. Das Risiko für ALL war nicht beeinflußt. Anstatt weitere Studien aufzulisten, genügt es darauf hinzuweisen, daß eine Vielzahl von Untersuchungen (einschließlich sorgfältig geplanter Fallkontrollstudien) positive Korrelationen festgestellt haben und deren Ergebnisse von den zuvor erwähnten Studien, die als Meilensteine angesehen werden können, nicht abweichen. Zwei Studien (eine aus USA, die andere aus Japan) haben negative Ergebnisse hervorgebracht, d.h. keine Risiken für Leukämie in Zusammenhang mit Röntgenaufnahmen festgestellt. In der USA-Studie wurden keine Interviews durchgeführt, sondern ausschließlich Krankenhausakten ausgewertet. Kritik wurde dahingehend geäußert, daß die Referenzgruppe ebenfalls aus Krankenhausakten herausgesucht wurde. Damit war die Möglichkeit gegeben, daß die Referenzgruppe eine höhere Exposition als die allgemeine Bevölkerung hatte. Die Daten der japanische Kontrollgruppe stammten ebenfalls aus Krankenakten. Weitere Studien haben sich mit anderen Krebsarten befaßt, beispielsweise dentale

---

<sup>96</sup>Stewart, AM, Pennybacker, W & Barber, R: Adult leukaemias: A retrospective survey. *British Medical Journal*, 2 (1962) 882-890.

<sup>97</sup>Gunz, FW & Atkinson, HR: Medical relations and leukaemias: A retrospective study. *British Medical Journal*, 1 (1964) 389-393.

<sup>98</sup>Gibson, R *et al.*: Irradiation in the epidemiology of leukaemia among adults. *Journal of the National Cancer Institute* 48 (1972) 301-311.

Röntgenaufnahmen korreliert mit Parotid- bzw. Schilddrüsentumoren mit positiven Befunden. Panoramaaufnahmen der Zähne bei Kindern wurden sogar mit Hirntumoren korreliert.

### III. 1. 3. Berufliche Exposition: Arbeiter in der nuklearen Industrie

Abgesehen davon, daß Arbeiter in nuklearen Industrien aus gesundheitlichen Gründen auf Strahlenexpositionen überwacht werden, sind diese Daten von wissenschaftlichem Interesse, weil die Expositionen in der Regel chronisch und von niedriger Dosis sind und dadurch in gewisser Hinsicht Belastungen im Umweltbereich simulieren. Bei den meisten Untersuchungen handelt es sich um externe Strahlenbelastungen aufgrund der leichten Ermittlung von Dosen im Vergleich zu Dosisabschätzungen aus inkorporierten Radionukliden. Die untersuchten Akten stammen jeweils von Arbeitnehmern aus den Bereichen der Atomwaffenherstellung, der Kernbrennstoff-Wiederaufbereitung und von Atomkraftwerken. Eine Mehrzahl dieser Studien in den USA wurde vom Department of Energy (DOE) und in Großbritannien vom Atomic Energy Authority gefördert. Die Daten aus den US-Kernwaffenanlagen zählen zu den wichtigsten, da diese Einrichtungen sehr lange bestehen und die Überwachung der Arbeiter und deren dosimetrische Angaben vollständig sind. Da die Expositionen im allgemeinen niedrig sind, wird das ERR pro cSv bzw. mSv ( $ERR_{cSv}$  bzw.  $ERR_{mSv}$ ) anstatt pro Sv angegeben, wie sonst in den RERF-Daten üblich.

Die Hanford-Atomwaffeneinrichtung im Bundesstaat Washington verfügt über die größten und ausführlichsten dokumentierten Kohorten hinsichtlich externer Bestrahlung. Anfängliche Analysen wiesen im Vergleich zu allen anderen Todesursachen<sup>99</sup> höhere kumulative Dosen in Zusammenhang mit erhöhter Krebsmortalität auf. Andere haben eine geringere Krebsmortalität für die Arbeiter in Hanford im Vergleich zur allgemeinen Bevölkerung (standardised mortality ratio, SMR = 0,86) bescheinigt, Plasmazytom, Hodgkin'scher Erkrankung und Karzinom der Bauchspeicheldrüse ausgenommen.<sup>100</sup> Die Kontroverse über die Krebsrisiken bei den Hanford-Arbeitern setzte sich mit weiteren Publikationen aus den zwei Gruppen (Stewart und Gilbert) fort, bis Stewart und Kneale sich um eine Erklärung der Diskrepanzen zwischen ihren Ergebnissen und denen von Gilbert *et al.* bemühten. Nach Stewart und Kneale sind Faktoren, wie Alter zur Zeit der Exposition, Kalenderjahr der Exposition und Latenzzeit, grundlegend für eine Erklärung der

---

<sup>99</sup>Mancuso, TF, Stewart, AM & Kneale, G: Radiation exposures of Hanford workers dying from cancer and other causes. *Health Physics*, 33 (1977) 369-385.

<sup>100</sup>Gilbert, ES & Marks, S: An analysis of mortality of workers in a nuclear facility. *Radiation Research* 79 (1979) 122-148.

Unterschiede in den Ergebnissen.<sup>101, 102</sup>

Der Zusammenhang zwischen Krebs und Strahlenexposition ist auch Gegenstand von Studien am Oak Ridge National Laboratory (ORNL) in Tennessee gewesen. Checkoway *et al.* haben Untersuchungen bei 8375 männlichen, weißen Arbeitern durchgeführt, die zwischen 1943 und 1972 im ORNL tätig waren<sup>103</sup>. Wie bei anderen DOE-Kohorten war der Tod von allen Ursachen (SMR = 0,73) und sämtliche Krebsen (SMR = 0,78) geringer als erwartet, verglichen mit der allgemeinen Bevölkerung. Erhöhte SMR wurde jedoch für Leukämie (SMR = 1,49), Prostatakrebs (SMR = 1,16) und Hodgkin'sche Erkrankung (SMR = 1,10) aufgezeichnet. Das Risiko für Leukämie nahm mit der Dosis und längerer Latenzzeit zu. Eine Fortschreibung der ORNL-Kohortenuntersuchung mit Daten bis 1984 wies auf eine Zunahme der Leukämiemortalität hin (SMR = 1,63)<sup>104</sup>. Weiterhin waren sämtliche Krebse, einschließlich Lungenkrebs, positiv mit der Dosis korreliert. Zusammenfassend war diese Korrelation am stärksten für Leukämie, intermediär für Lungenkrebs und am geringsten für alle anderen Krebsarten. Unter Annahme einer 20-jährigen Zeitdifferenz wurde über eine 4,94%ige Zunahme der Krebsmortalität pro cSv berichtet. Ähnlich wie die Befunde von Stewart & Kneale bei der Hanford-Kohorte, war die Korrelation zwischen externer Strahlenexposition und sämtlichen Krebsmortalitäten für Expositionen nach dem 45. Lebensjahr am stärksten ( $ERR_{cSv} = 0,059$ ).

Arbeiter an der Rocky Flat-Anlage sind aufgrund der Strahlenexposition von externen Quellen sowie der Inkorporation von Radionukliden, insbesondere Plutonium, von Interesse. Die Unterlagen über die externe Bestrahlung waren nicht so vollständig, wie bei Hanford und ORNL. Dennoch wurden die Verhältnisraten berechnet, um einen Vergleich zwischen der Exposition unter- oder oberhalb von 1 cSv zu erzielen. Erhöhte Verhältnisraten wurden für myeloische Leukämie (rate ratio = 3,02), Lymphosarkom, Retikulumzellsarkom (rate ratio = 3,00) und Leberkrebs (rate ratio = 2,77)<sup>105</sup> festgestellt. Die Aufmerksamkeit stieg, nachdem sich ein positiver Dosisseffekt zwischen den abgeschätzten Dosen nach Inkorporation von Radionukliden

---

<sup>101</sup>Kneale, GW & Stewart, AM: Re-analysis of Hanford data. *American Journal of Industrial Medicine* 23 (1993) 371-389.

<sup>102</sup>Stewart, AM & Kneale, GW: The Hanford data: Issues of age and exposure and dose recording. *Physicians for Social Responsibility Quarterly* 3 (1993) 101-111.

<sup>103</sup>Checkoway, H *et al.*: Radiation, work experience and cause-specific mortality among workers at an energy research laboratory. *British J. of Industrial Medicine* 42 (1985) 525-533.

<sup>104</sup>Wing, S *et al.*: Mortality among workers at ORNL: Evidence of radiation effects in follow up through 1948. *Journal of the American Medical Association* 265 (1991) 1397-1402.

<sup>105</sup>Wilkinson, GS *et al.*: Mortality among plutonium and other radiation workers at a plutonium weapons facility. *American Journal of Epidemiology* 125 (1987) 231-250.

und Mortalität aufgrund spezifischer Krebsarten ergab. Standardisierte Verhältnisraten (rate ratios) für Mortalitäten sämtlicher Ursachen und für alle Krebsarten einschließlich Darmkrebsen nahmen mit Plutoniumbelastungen zu.

Eine andere Anlage, wo die Arbeiter sowohl externer Strahlenexposition als auch Kontamination mit Radionukliden ausgesetzt waren, war an den Los Alamos National Laboratories (LANL). Die LANL-Kohorte bestand aus 15727 weißen Männern und wies niedrigere SMR für alle Krebsmortalitäten (SMR = 0,64) und für sämtliche Mortalitäten (SMR = 0,63) auf. Damit wurde insgesamt keine Assoziation zwischen den Kategorien der kumulativen externen Exposition und Krebsmortalität festgestellt. Insgesamt wurden jedoch positive Trends für Hodgkin's Erkrankungen, Hirntumore, Oesophaguskrebs und Nierenkrebs beobachtet. Die abgeschätzte interne Exposition wurde bei 2 nCi (= 74 Bq) für Plutonium festgelegt, nicht überwachte Personen ausgenommen. Die Verhältnisrate (rate ratio) für Lungenkrebs lag bei 1,78; für Hirntumore bei 1,20; für Blasenkrebs bei 6,39; für Lymphome bei 1,29 und ein Fall von Knochentumor bei einer Erwartung von 0.

Die Situation in Großbritannien wurde ebenfalls untersucht. Die Daten für insgesamt 22.552 Arbeiter in Atomwaffenanlagen (in der Zeit von 1951 bis 1982) wiesen auf starke Selektionsbias hin. Die Mortalität für sämtliche Todesursachen war um 23% unter dem nationalen Durchschnitt und für Krebsmortalität um 18%. Für diese Kohorte waren die dosimetrischen Unterlagen äußerst unvollständig, da lediglich 42% überhaupt überwacht wurden.<sup>106</sup> Zwei spätere Studien über Arbeiter bei British Nuclear Fuels-Einrichtungen haben über positive Korrelationen zwischen niedriger externer Strahlenexposition und Leukämiemortalität berichtet ( $ERR_{cSv} = 0,0418$ ). Für andere Krebsarten konnten keine Dosiskorrelationen festgestellt werden.<sup>107, 108</sup>

Metaanalysen über die Korrelationen zwischen Leukämieerkrankungen und beruflicher Strahlenexposition sind durchgeführt worden. Eine derartige Analyse der Arbeitnehmerdaten aus 7 Anlagen ergab ein RR von 1,5 für kumulative Dosen von 1 cSv und ein RR von 1,8 für kumulative Dosen zwischen 1 und 5 cSv nach Korrektur für Alter und Kalenderzeit. Eine andere Analyse gepoolter Daten aus ORNL, Hanford und Rocky Flats ergab eine negative Korrelation, und die Autoren erhoben Bedenken über die Heterogenität der Kohorten sowie einige andere Aspekte. Die internationale Krebsforschungsagentur in Lyon hat Daten aus den USA, Großbritannien und Kanada zusammengefaßt. Sie stellte negative Korrelationen ( $ERR_{cSv} = -$

---

<sup>106</sup>Beral, V *et al.*: Mortality of employees of the atomic weapons establishment, 1951-1982. British Medical Journal 297 (1988) 757-777.

<sup>107</sup>Douglas AJ, Omar RZ & Smith PG: Cancer mortality and morbidity among workers at the Sellafield plant of British Nuclear Fuels. British Journal of Cancer 70 (1994) 1232-1243.

<sup>108</sup>Carpenter, L *et al.*: Combined analysis of mortality in three United Kingdom nuclear industry workforces, 1946 - 1988. Radiation Research 138 (1994) 224-238.

0,0007) für alle Krebsarten, ausgenommen Leukämie, fest. Die positive Korrelation ( $ERR_{csv} = 0,0218$ ) für Leukämie wurde unter Ausschluß von CLL erhoben. Diese Korrelation ist kleiner als jene der RERF-Daten.<sup>109</sup>

### III. 1. 4. Exposition in der Umwelt

Die Belastung durch die natürliche Hintergrundstrahlung in der Umwelt wird durch die Freisetzung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen verstärkt. Diese zusätzliche Strahlenbelastung aus externen und internen Quellen ist Grund gesundheitlicher Besorgnis in den Industrieländern. Ein Schwachpunkt der Bemühungen, die Auswirkung dieser zusätzlichen Strahlenbelastungen durch epidemiologische Untersuchungen zu analysieren, ist häufig der Mangel an dosimetrischen Angaben. Weiterhin stellen die Migrationsgewohnheiten einer Bevölkerung ein Hindernis dar. Im allgemeinen stützen sich umweltepidemiologische Studien auf Korrelationen zwischen geographischem Expositionsmuster und der Inzidenz von Erkrankungen. Abgesehen von Fehlern bei der Dosisermittlung, verursacht durch Migration, könnten konkurrierende Faktoren zur falschen Assoziation bzw. zur Verdeckung von Effekten (Unterschätzung) führen. Expositionen aus der Umwelt werden im allgemeinen als niedrig angenommen, können dennoch erhebliche Schwankungen aufweisen. Unterschiede in der Erkrankungshäufigkeit wurden als Korrelate der Unterschiede der Umweltbelastung angesehen.

#### III. 1. 4. 1. Exposition in der Umgebung kerntechnischer Anlagen

Eine Vielzahl von Untersuchungen sind über die Inzidenz kindlicher Leukämien in der Umgebung kerntechnischer Anlagen durchgeführt worden. Studien, die für internationale Aufregung gesorgt haben, waren die von dem inzwischen verstorbenen Martin J. Gardner, ehem. Professor der Statistik an der Universität Sheffield in Großbritannien. In einer sorgfältig durchgeführten Studie bestätigte er die Häufung an kindlichen Leukämien in der Umgebung von Sellafield. In einer Fallkontrollstudie wurde die Information über sämtliche kindliche Leukämien und Lymphome (von 1950-1985) mit den Daten örtlicher Kontrollfälle verglichen, ausgewählt aus dem Geburtsregister. Eine Anzahl potentieller Risikofaktoren wurde untersucht und die Beschäftigung der Väter an der nuklearen Anlage in Sellafield als signifikanter Risikofaktor

---

<sup>109</sup>Cardis, E *et al.*: Effects of low doses and low dose rates of external radiation: Cancer mortality among nuclear industry workers in three countries. *Radiation Research* 142 (1995) 117-132.

identifiziert.<sup>110, 111</sup> In den Fällen, deren Väter in der Sellafield-Anlage arbeiteten, waren sie größeren kumulativen präkonzeptionellen Strahlendosen ausgesetzt, verglichen mit Kontrollvätern aus derselben Anlage.

Über Häufungen kindlicher Leukämien und Non-Hodgkin'scher Lymphome wurde in der Umgebung der nuklearen Anlage in Dounreay, Schottland, berichtet. Diese Häufungen, erstmalig in den 80er Jahren berichtet, haben bis 1991 angehalten.<sup>112</sup> In einer Fallkontrollstudie wurde der Aufenthalt an den örtlichen Stränden als Risikofaktor in Verbindung zu den kindlichen Leukämien gebracht.<sup>113</sup> Eine weitere Analyse durch dieselbe Arbeitsgruppe über Leukämien und Lymphome im Umfeld von sieben nuklearen Anlagen in Schottland stellte eine signifikante Häufung nur um Dounreay fest. Eine Fallkontrollstudie kindlicher Leukämien in der Umgebung der französischen Wiederaufbereitungsanlage bei La Hague ergab, daß der Aufenthalt an den benachbarten Stränden sowie der Verzehr von Meeresschalentieren als signifikante Risikofaktoren der Leukämien identifiziert wurden.<sup>114, 115</sup>

In den drei vorher erwähnten Studien handelt es sich um Wiederaufbereitungsanlagen für Kernbrennstoffe; somit dürfte die Menge der abgeleiteten radioaktiven Stoffe in die Umwelt als relativ hoch (höher als beim Betrieb eines AKW) erwartet werden, insbesondere für langlebige Radionuklide der Gruppe der Transurane. Drei wichtige kollektive Studien sind in drei verschiedenen Ländern durchgeführt worden. Die erste davon war eine Studie zur Erfassung der

---

<sup>110</sup>Gardner, MJ: 8<sup>th</sup> Duncan memorial lecture: Childhood cancer and nuclear installations. *Public Health* 105 (1991) 277-285.

<sup>111</sup>Gardner, MJ: Fathers' occupational exposure to radiation and the raised level of childhood leukaemia near the Sellafield nuclear plant. *Environmental Health Perspectives* 94 (1991) 5-7.

<sup>112</sup>Black, RJ *et al.*: Leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma: Incidence in children and young adults resident in the Dounreay area. *Journal of Epidemiology and Community Health*. 48 (1994) 232 - 236.

<sup>113</sup>Urquhart, JD *et al.*: Case-control study of leukaemia and non-Hodgkin's lymphoma in children in Caithness near the Dounreay nuclear installation. *British Medical Journal* 302 (1991) 687-692.

<sup>114</sup>Viel, JF, Pobel, D & Carre, A: Incidence of leukaemia in young people around the La Hague nuclear waste reprocessing plant: A sensitivity analysis. *Statistics in Medicine* 14 (1995) 2459-2472.

<sup>115</sup>Pobel, D & Viel, JF: Case-control study of leukaemia among young people near the La Hague nuclear reprocessing plant: The environmental hypothesis revisited. *British Medical Journal* 314 (1997) 101-106.

Krebsmortalität im Umfeld von 14 kerntechnischen Anlagen in Großbritannien im Zeitraum von 1959 bis 1980.<sup>116</sup> Die Studie berücksichtigte den Einfluß von Geschlecht, Alter (Bildung von Altersgruppen) und Entfernung zur Anlage (als Maße der Exposition). Die Schlußfolgerung war, daß keine allgemeine Zunahme der Krebsmortalität in der Umgebung der Anlagen in den 22 Jahren festgestellt werden konnte. Für die Altersgruppe 0 bis 24 Jahre wurden jedoch signifikante Risiken für Leukämien und Hirntumore festgestellt. Bei einer Aufteilung dieser Altersgruppe stiegen die Risiken in jeder Hinsicht für Kinder im Alter zwischen 0 und 9 Jahre, insbesondere für lymphozytäre Leukämie. In Zone 1 (am nächsten zur Anlage) für Anlagen, die vor 1959 in Betrieb genommen wurden, war das RR für lymphozytäre Leukämie 3,95 (einseitige  $P = 0,001$ ).

Die britische Untersuchung diente als Modell für eine deutsche Studie zur Ermittlung der Inzidenz kindlicher Krebse im Alter bis zu 14 Jahren im Umfeld der 20 westdeutschen AKW.<sup>117</sup> Die erste Studie überdeckte einen Zeitraum von 10 Jahren und ergab vergleichbare Ergebnisse, d.h. auf keine Erhöhung hinweisend, wenn alle Krebsarten zusammengefaßt wurden. Das RR für akute Leukämie war signifikant erhöht für Kinder unter 4 Jahren, die im Nahbereich (innerhalb 5 km) der Anlage wohnten, bei Zusammenfassung der Daten sämtlicher Anlagen. Bei Unterteilung der Anlagen nach Betriebsjahren stieg das RR (2,25) für akute Leukämie an – obwohl statistisch nicht signifikant ( $P = 0,071$ ) – für alle Kinder im Umfeld von Anlagen, deren Inbetriebnahme vor 1970 war. Für Kinder im Alter zwischen 0 und 4 Jahren jedoch war das RR 7,95 ( $P = 0,021$ ) und für dieselbe Gruppe war das RR für Neuroblastome und Nephroblastome 3,35 ( $P = 0,029$ ). Eine Fortschreibung dieser Untersuchung mit Daten, erweitert auf 15 Jahre, wurde 1977 fertiggestellt.<sup>118</sup> Hervorzuheben ist, daß das RR 2,87 ( $P = 0,005$ ) für akute Leukämie bei Kindern im Alter von 0-4 Jahre im 5 km-Nahzonenbereich der Atomkraftwerke statistisch signifikant geblieben ist.

Die dritte kollektive Studie wurde in den USA<sup>119</sup> durchgeführt, ebenfalls aufgrund der

---

<sup>116</sup>Cook-Mozaffari, PJ *et al.*: Cancer incidence and mortality in the vicinity of nuclear installations, England and Wales, 1959-1980. HM Stationary Office Publication No 51, 1987.

<sup>117</sup>Keller, B. *et al.* (Federführung: J. Michaelis): Untersuchung der Häufigkeit von Krebserkrankungen im Kindesalter in der Umgebung westdeutscher kerntechnischer Anlagen. Schriftreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz, BMU-1992-326, Bundesministerium für Umwelt und Natur, Berlin. ISSN 0724-3311.

<sup>118</sup>Kaletsch, U *et al.* (Federführung: J. Michaelis): Epidemiologische Studien zum Auftreten von Leukämieerkrankungen bei Kindern in Deutschland. IMSD-technischer Bericht der Universität Mainz, Mainz, Juli 1997.

<sup>119</sup>Jablon, S *et al.*: Cancer populations living near nuclear facilities: A survey of mortality nationwide and incidence in two states. J. American Medical Association 265 (1991) 1403.



britischen Studie initiiert. Diese Mortalitätsstudie überdeckte eine Zeitspanne von 34 Jahren (1950-1984) und schloß 107 Bezirke (counties) ein, die in der Umgebung kerntechnischer Anlagen lagen, welche vor 1982 in Betrieb genommen wurden. Das Kollektiv bestand aus 900.000 Krebstodesfällen. Jeder Bezirk wurde mit drei "Kontrollbezirken" aus derselben Region verglichen. Diese Studie ergab negative Ergebnisse: Die Todesursache Leukämie oder andere Krebse war in den untersuchten Bezirken nicht häufiger als im Vergleich zu den Kontrollen. Bei der Mortalität kindlicher Leukämie war das RR 1,08 vor Inbetriebnahme und 1,03 nach Inbetriebnahme. Das RR für Leukämiemortalität sämtlicher Alter war 1,02 vor und 0,98 nach Inbetriebnahme. Nur für eine einzige Anlage wurde ein signifikanter Anstieg des RR nach Inbetriebnahme festgestellt. Diese Studie wurde wegen Nichtberücksichtigung der Expositionsverteilungen und der Bevölkerungsmigrationen kritisiert, da dieses zu erheblicher Fehlklassifikation geführt haben könnte. Da der Schnitt bei 1984 gesetzt wurde und die letzte Inbetriebnahme für Anlagen 1982 war, war bei einigen die erforderliche Latenzzeit für eine Vielzahl von Krebsarten nicht gegeben und somit eine Untererfassung gefördert. Das enorme Datenreservoir wäre besser ausgewertet, wenn es eine Klassifikation der Anlagen nach Betriebsdauer und der Wohnorte nach Entfernung von den jeweiligen Anlagen gegeben hätte. Die britischen und deutschen Studien haben eindeutig auf die Bedeutung dieser Parameter sowie des Alters der Betroffenen hingewiesen. Die gleichen Hinweise sind aus einer Fallkontrollstudie erwachsener Leukämien im Umfeld des Pilgrim-AKW in Massachusetts entstanden. Das Ausmaß der positiven Korrelation stand im Umkehrverhältnis zur Entfernung von der Anlage.<sup>120</sup> In der Studie blieben Kinder im Alter unter 13 Jahre unberücksichtigt. Es ist nicht auszuschließen, daß die Einbeziehung dieser Kinder zu erhöhter positiver Korrelation geführt hätte.

### III. 1. 4. 2. Die Tschernobylkatastrophe

Die Reaktorkernschmelze und die Explosion im Block 4 des AKW Tschernobyl geschah am 26. April 1986. Nach Schätzungen wurden  $10^{19}$  Bq radioaktiver Stoffe über eine Dauer von etwa 10 Tagen in die Atmosphäre freigesetzt. Diese freigesetzte Radioaktivität beinhaltete etwa 60 bis 80% des gesamten Radiojod-Inventars. Die Verteilung der Radioaktivität in der hauptbetroffenen Regionen war schätzungsweise 70% Ablagerung in Belarus, 15% in der Ukraine und 15% in Rußland. Die Ausbreitung der Radioaktivität wurde von den Windrichtungen bestimmt und war, bedingt durch Regen, äußerst inhomogen. Die radioaktive Wolke zog auch über andere Teile Europas. Die Richtung und Deposition war ebenfalls von den meteorologischen Bedingungen abhängig. In den am schlimmsten betroffenen Gegenden (hauptsächlich Belarus)

---

<sup>120</sup>Morris MS & Knorr RS: Adult leukaemia and proximity based surrogates for exposure to Pilgrim plan's nuclear emissions. Archives of Environmental Health 51 (1996) 266-267.

betrug die Bodenkontamination im Durchschnitt etwa 555 kBq/qm für eine geschätzte Fläche von etwa 10.000 km<sup>2</sup>. Kartierungen über die Kontaminationen in Europa sind erstellt worden, denen die durchschnittliche Cäsiumaktivität zu entnehmen ist.

Obwohl die soziomedizinischen und direkten gesundheitlichen Auswirkungen eine große Spannbreite von Problemen darstellen, welche insgesamt die stochastischen Effekte der Strahlenexposition überwiegen, wird hier die Aufmerksamkeit lediglich auf den letzteren Aspekt eingeschränkt, d.h. die Inzidenz von Neoplasien, insbesondere bei Kindern, aufgrund ihrer Empfindlichkeit. Bevor eine Behandlung der epidemiologischen Daten der regionalen Bevölkerung erfolgt, muß erwähnt werden, daß die am stärksten exponierten Personen die sog. Liquidatoren waren, junge männlichen Militärrekruten, die aus den verschiedensten Teilen der früheren Sowjetunion stammten und zur Arbeit in die Sperrzonen um den Reaktorkomplex und andere hoch kontaminierte Bereiche abgeordnet wurden, um Evakuierungsbefehle usw. durchzuführen. Obwohl die Dosisgrenze für die Liquidatoren bei 25 cSv (0,25 Sv) gesetzt wurde, ist es äußerst zweifelhaft, ob dieser Grenzwert eingehalten werden konnte. Die WHO schätzt dieses Kontingent der Liquidatoren auf etwa 800.000, zusammengesetzt aus etwa 200.000 aus der Ukraine, 300.000 aus Rußland, 130.000 aus Belarus und die restlichen aus anderen Staaten der ehemaligen Sowjetunion. Die Mortalität bei den Liquidatoren ist erheblich gewesen und wird z.Zt. auf etwa 25.000 geschätzt, einschließlich Selbstmorden. Zu Hauptbeschwerden der Liquidatoren zählen kardiovaskuläre Probleme, Lungenkrebs, Entzündungen im gastro-intestinalen Bereich, Leukämien und weitere Tumore.

Die UNICEF hat über die Verschlechterung der Gesundheit der Kinder in den radioaktiv verseuchten Gegenden von Belarus berichtet. Auch die Gesundheit der Kinder, die aus den stark kontaminierten Gegenden evakuiert wurden, verschlechtert sich im Vergleich zu dortigen Kindern. Die UNO stellte fest, daß Erkrankungen wie Diabetes, Störungen im gastrointestinalen und urogenitalen Bereich zugenommen haben, obwohl die Inzidenz der Leukämien nicht als erhöht gesichert werden konnte. Eine gesundheitliche Verschlechterung, in Zusammenhang mit allgemeiner Immundefizienz, wurde ebenfalls festgestellt.<sup>121</sup> Diese Anerkennung von Tatsachen seitens der UNO steht in eklatantem Gegensatz zu den Leugnungen der Internationalen Atomenergie Agentur (International Atomic Agency, IAEA, Wien) und ihrer Experten zu Zusammenhänge zwischen den gesundheitlichen Problemen und der nuklearen Katastrophe.

---

<sup>121</sup>United Nations General Assembly: Strengthening of international cooperation and coordination of efforts to study, mitigate and minimise the consequences of the Chernobyl-disaster. Report of the Secretary-General, A/50/1995, New York, 1995.

	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	Total
Children	2	4	5	7	29	59	66	79	82	91	84	66	574
Youth	2	3	1	0	4	7	6	17	19	23	17	21	120
Adults	162	202	207	226	289	340	416	512	553	531	568	641	4647

Jahresinzidenz des Schilddrüsenkrebses bei Kindern, jungen Erwachsenen und Erwachsenen in Belarus nach der Tschernobyl-Katastrophe.

Daten aus dem nationalen Schilddrüsenzentrums von Belarus, Minsk, 1998.

Die Daten zeigen ohne jeglichen Zweifel die drastische Zunahme des Schilddrüsenkrebses in Belarus, der am stärksten betroffenen geografischen Regionen. Da schätzungsweise 60 - 80% des gesamten Jodinventars im Reaktor als Aerosole freigesetzt wurden, fand die Inkorporation des Radiojods hauptsächlich durch Inhalation und praktisch sofort statt. Damit wurden die Schilddrüsen einer hohen Strahlenbelastung ausgesetzt, weil der überwiegende Teil des Jods das Nuklid Jod-131 war. Der Typus der Schilddrüsenkrebses war hoch spezifisch und bestand fast ausschließlich aus papillären Karzinomen. 60% der Kinder, die zu der am stärksten betroffenen Altersgruppe gehören, waren zur Zeit der Diagnose 10 bis 14 Jahre alt. Davon waren 39% zwischen 5 und 9 Jahre und etwa 1% unter 4 Jahre alt. Zur Zeit des Unfalls war die große Mehrheit der Kinder unter 6 Jahre und etwa 50% unter 4 Jahre alt; diese Tatsache weist eindeutig auf die außerordentliche hohe Strahlenempfindlichkeit der Schilddrüsen von Kleinkindern und Säuglingen hin.

In einem internationalen Symposium über Schilddrüsenkrebses, veranstaltet an der Universität Cambridge im Sommer 1998 (gefördert durch die Europäische Union, vertreten durch EURATOM, und das Nationale Krebsinstitut der USA), hat E. Cardis vom Internationalen Krebsforschungszentrum (IARC) Lyon eine Hochrechnung über die zu erwartenden Schilddrüsenkrebses präsentiert, indem sie auf die absolute Diskrepanz zu den Modellen der Risikoberechnungen hinwies. Unter Verwendung der aktuell beobachteten Häufigkeit des kindlichen Schilddrüsenkrebses nach der Tschernobyl-Katastrophe für ihre Hochrechnung ergibt sich nach der Einschätzung von Cardis, daß 1/3 aller Kinder alleine aus der Region Gomel in Belarus an Schilddrüsenkrebs leiden würden, was in absoluten Zahlen mehr als 50.000 Menschen bedeutet.<sup>122</sup>

<sup>122</sup>Cardis, E *et al.*: Observed and predicted thyroid cancer incidence following the Chernobyl accident. Evidence for factors which influence susceptibility to radiation induced thyroid cancer. In *Radiation and Thyroid Cancer*, Eds. G. Thomas *et al.*, World Scientific, Singapore, 1999, pp. 395-405.

Die Inzidenz der Leukämien bleibt unter Beobachtung wegen der damit gekoppelten strahlenbiologischen Erwartung. Obwohl sich laut offizieller Verlautbarungen eine statistisch gesicherte Zunahme der Leukämien in den betroffenen Regionen noch nicht feststellen läßt<sup>123</sup>, berichtet eine Klinik für Hämatologie im Bezirk von Gomel über einen Trend erhöhter Leukämiefälle in ihrem Zuständigkeitsbereich.<sup>124</sup> Die Anzahl der Kinder im Alter von 0 bis 14 Jahren im Bezirk Gomel wird mit 150.000 angegeben und für konstant gehalten. Die durchschnittliche Zunahme der Leukämiehäufigkeit nach dem Reaktorunfall gegenüber vorher wird für diese Altersgruppe um etwa 50% geschätzt.

Eine andere Krebsart, die laut Beobachtungen im Zunehmen ist, ist der Brustkrebs. Die Latenzzeit für Brustkrebs wird im allgemeinen bei 20 Jahren oder mehr eingeschätzt, könnte aber erheblich kürzer ausfallen, wenn das Alter während der Exposition noch in die späterer Kindheit und Pubertät hineinreicht. Diese These wird sich erst in der Zukunft überprüfen lassen.

### III. 1. 5. *In utero*-Exposition

Die klassische Strahlenbiologie hat sich fast ausschließlich mit teratogenen Wirkungen der *in utero*-Strahlenexposition beschäftigt mit der Folge, daß die Frage über Krebsinduktion *in utero* bei Menschen in den Interessenbereich der Epidemiologen aufgenommen wurde. Dieses ist auch verständlich, zumal derartige Erkrankungen erst im postnatalen Leben auftreten. Das Konzept, daß Krebs im Kindesalter im Grunde genommen während der embryonalen Entwicklung ausgelöst werden könnte, wird neuerdings anerkannt und ist aus epidemiologischen Untersuchungen hervorgegangen. Dieser Verdienst gebührt Dr. Alice Stewart und ihrem Oxford Survey of Childhood Cancers (OSCC), der größten diesbezüglichen Fallkontrollstudie. Von Anfang an wurde dieses Konzept massiv attackiert, nicht nur aufgrund der erschreckenden Bedeutung im Hinblick auf die Strahlenempfindlichkeit von Menschen, sondern wahrscheinlich vielmehr, weil sie zu einer Zeit der Begeisterung für nukleare Entwicklungen in den Industrienationen kam. Da die OSCC-Befunde niemals widerlegt noch anerkannt wurden, wurden sie automatisch zu einer kontroversen Angelegenheit und blieben es über viele Jahre. Ein vorgebrachtes Argument gegen die OSCC-Befunde ist, daß vergleichbare kindliche Leukämien von der RERF, die als strahlenbiologische "Elle" dient, nicht beobachtet wurden. Dabei wird der Verlust kritischer Daten (hinsichtlich kindlicher Leukämien) der ersten 5 Jahre nur zögerlich eingestanden. Erst in den letzten Jahren haben Kritiker zugegeben, daß durch Folgestudien die Zurückhaltungen gegenüber

---

<sup>123</sup>Ivanov, EP *et al.*: Childhood leukaemia in Belarus before and after the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics* 35 (1996) 75-80.

<sup>124</sup>Netschai, A & Schumichina, T: *Dokumentation of the District Clinic of Gomel. State Health Authority of Belorussia, Belorussia, 1998.*

der OSCC-Ergebnisse größtenteils ausgeräumt wurden.<sup>125</sup> Diese Autoren kamen zu der Schlußfolgerung, daß die OSCC-Daten in ihrer Gesamtheit auf erhöhten Krebs im Kindesalter bei einer Dosis von 1 cGy (10 mGy) oder einem Risikoeffizient von etwa 6% pro Sv hinweisen, in Übereinstimmung mit dem des UNSCEAR der bei 5% pro Sv liegt.<sup>126</sup> Diese Risikoabschätzungen sind größer als die von der RERF<sup>127</sup>, deren Wert bei 1 bis 4,7% pro Sv liegt und sich nicht signifikant von 0 unterscheidet. Es ist eine anerkannte Tatsache, daß die Verdoppelungsdosis für Leukämie während der Embryonalzeit enorm schwankt. Das erste Trimester ist das empfindlichste (geschätzte Verdoppelungsdosis 0,2 cGy oder 2 mGy), das zweite am geringsten empfindliche und der Wert des dritten Trimesters entspricht in etwa dem mittleren Wert. Diese Werte sind epidemiologisch ermittelt worden. Aus biologischer Sicht kann es nicht ausgeschlossen werden, daß eventuell engere Fenster der Empfindlichkeit gegeben sind und die geschätzte Verdoppelungsdosis für das erste Trimester lediglich einen gemittelten Wert darstellt.

Es ist darauf aufmerksam gemacht worden, daß wegen möglicher konkurrierender Faktoren (confounders) Vorsicht geboten ist bei der Interpretation der Studien über medizinische Expositionen. Medizinische Expositionen zeigten ihre Auswirkung (Leukämie) bald nach der Geburt im Frühkindesalter, während sich die gleiche Auswirkung der frühen postnatalen Bestrahlung bei der japanischen Kohorte verspätet äußerte (in Einklang mit anderen postnatalen Strahleneffekten). Die Konstanz in den RR-Werten für verschiedene Krebsarten nach medizinischer Exposition weicht von anderen Daten ab, die auf organ-/gewebsspezifische Effekte hinweisen. Es wird auch darauf hingewiesen, daß während des ersten Trimesters der embryonalen Entwicklung keine Differenzierung hämatopoetischer Stammzellen stattfindet; daher ergibt sich die Schwierigkeit die Induktion von Leukämie während des ersten Trimesters nach medizinischer Exposition - wie epidemiologisch behauptet - nachzuvollziehen. In diesem Zusammenhang muß daran erinnert werden, daß der Dottersack mit Blutinseln in der 8. Woche der Entwicklung des menschlichen Embryos bereits gut ausgebildet ist. Es ist möglich, daß die Konzentration hämatopoetischer Stammzellen in dieser Anlage sehr hoch ist. Weiterhin liegen experimentelle Ergebnisse vor, die auf eine postnatale onkogene bzw. teratogene<sup>128</sup> Entwicklung hinweisen, nachdem die Tiere im Zygotenstadium bestrahlt wurden. In einem großen Tierversuch an der

---

<sup>125</sup>Doll, R & Wakeford, R: Risk of childhood cancer from foetal irradiation. British Journal of Radiology 70 (1997) 130-139.

<sup>126</sup>UNSCEAR 1994 Report to the General Assembly on Sources and Effects of Ionising Radiations. United Nations Publications, New York, 1994.

<sup>127</sup>Yoshimoto, Y, Kato, H & Schull, WJ: Risk of cancer among *in utero* children exposed to A-bomb radiation, 1950-1984. Lancet 2 (1988) 655-669.

<sup>128</sup>Pils, S., Müller, W.-A. & Streffer, C.: Lethal and teratogenic effects of two successive generations of HLG mouse strain after irradiation exposure of zygotes - association with genomic instability? Mutation Research 429 (1999) 85 - 92.

Universität Colorado, USA, wurden 1.680 Beagle-Hunde in verschiedenen embryonalen Entwicklungsstadien *in utero* am 8., 28. und 55. postcoitalen Tag bestrahlt; dies entspricht dem ersten, zweiten und dritten Trimester der Entwicklung beim Menschen. Die applizierten Strahlendosen waren von 0 - 0,83 Gy. Die Krebsmortalität für alle Altersgruppen war mehr als 10 mal höher als erwartet<sup>129</sup>.

Die Kohorte der *in utero* exponierten Atombombenüberlebenden betrug 1.250 Personen. Obwohl keine Zunahme der Krebserkrankungen im kindlichen Alter aufgezeichnet wurden, wurde eine erhöhte Frequenz der Erwachsenen-Krebse mit vergleichsweise kürzeren Latenzzeiten beobachtet. In dieser Kohorte besteht eine Umkehrung des Verhältnisses der Erkrankungsrate mit mehr weiblichen als männlichen Personen. Die Zunahme der Inzidenz setzt sich immer noch fort; die kumulative Inzidenzrate liegt für die 0,03 Gy-Gruppe 3,5fach höher. Für die Gruppe, die mehr als 0,01 Gy erhielt, ist das EAR (Excess Absolute Risk) pro 10<sup>4</sup> PYGy (Person Year Gray) 6,57, und das geschätzte attributive Risiko liegt bei 40,9%. Zwei Fälle von Leukämien sind aus dieser Kohorte registriert: ein Mann mit ALL, diagnostiziert im Alter von 29, abgeschätzte *in utero*-Dosis 0,04 Gy; eine Frau mit AML, diagnostiziert im Alter von 18, geschätzte *in utero*-Dosis 0,02 Gy. Die Dosisangaben sind nach DS 86.

### III. 1. 6. Präkonzeptionelle Exposition

Obwohl die Frage der präkonzeptionellen Exposition bei radiologischen Maßnahmen im Hinblick auf Krebsrisiken in einer Fallkontrollstudie in USA schon im Jahr 1966<sup>130</sup> untersucht wurde, sind diese Ergebnisse als nicht schlüssig angesehen worden, auch wenn erhöhte Risiken für Leukämien in Zusammenhang mit bestimmten diagnostischen Maßnahmen gezeigt wurden. Zu jener Zeit des nuklearen Enthusiasmus waren die Autoren dieser Arbeit vielleicht umsichtig und ließen die Frage offen, da ein derartiges Konzept - der zeitgenössischen Strahlenbiologie weit voraus - lediglich heftigen Attacken ausgesetzt gewesen wäre. Angesammelte epidemiologische Befunde haben inzwischen das Konzept untermauert, daß die väterliche präkonzeptionelle Exposition zu erhöhten Risiken kindlicher Leukämie führen kann. Diese Daten der amerikanischen Studie von 1966 wiesen in der Tat auf ein höheres Leukämierisiko im Zusammenhang mit väterlicher Exposition hin, aber ein Postulat in dieser Richtung wäre in den 60er Jahren für absurd erklärt worden.

Die schon erwähnten Untersuchungen (siehe oben) von Martin Gardner zur Aufklärung des Clusters kindlicher Leukämien bei Seascale führten zur Wiederaufbereitungsanlage in Sellafield,

---

<sup>129</sup>Benjamin, S.A. *et al.*: Radiation carcinogenesis in dogs irradiated during prenatal and postnatal development. *Journal of Radiation Research* 32 (1991) 86-103.

<sup>130</sup>Graham, S. *et al.*: Preconception, intrauterine and postnatal irradiations related to leukaemia. *National Cancer Institute, Monograph* 19 (1966) 347-371.

wo die Väter der erkrankten Kinder arbeiteten und mehrere Monate vor der Konzeption erhöhten Expositionen ausgesetzt waren. Durch eine sorgfältig durchgeführte Fallkontrollstudie war die Schlußfolgerung väterlicher Strahlenexposition in Verbindung mit dem Leukämierisiko der Kinder zwingend. Da die Dosen niedrig waren, löste die Studie vehemente Kontroversen aus. Diese haben inzwischen zwar nachlassen, sind aber keineswegs verklungen, obwohl weitere epidemiologische und experimentelle Daten dieses Postulat unterstützen.

Eine Fallkontrollstudie kindlicher Leukämien in Zusammenhang mit röntgendiagnostischen Maßnahmen aus Shanghai<sup>131</sup> zeigte eine allgemeine Assoziation zwischen einer Risikozunahme und der Anzahl präkonzeptioneller väterlicher Expositionen. Der Trend war sowohl für ALL als auch für ANLL signifikant. Dieselbe federführende Autorin führte eine weitere Fallkontrollstudie in den Vereinigten Staaten<sup>132</sup> durch, in der die Exposition beider Eltern in körperliche Bereiche (Brust, Bauch und Unterbauch) unterteilt wurde. Diese Studie zeigte auch, daß das Risiko der kindlichen Leukämie besonders stark sowohl mit väterlicher Exposition als auch mit mütterlicher Exposition korreliert war. Deutliche Risiken wurden in Zusammenhang mit Röntgenaufnahmen der Väter im unteren Bauchbereich festgestellt; diese waren besonders stark für ALL im Vergleich zu AML. Korrekturen für die beruflichen Expositionen hatten keinen Einfluß auf die Ergebnisse gehabt. Die mütterliche Exposition konnte das Risikoverhältnis nur beeinflussen, wenn die Exposition einen Monat vor Konzeption stattfand, obwohl kein Dosisseffekt festgestellt werden konnte.

So kontrovers Gardner's Hypothese war, sie war nicht völlig neu, da experimentelle Studien an Mäusen zuvor gezeigt hatten, daß väterliche präkonzeptionelle Bestrahlungen signifikante Erhöhungen der Häufigkeit von Lungentumoren aufwiesen.<sup>133, 134</sup> Eine neuere Studie zur Leukämie bei Mäusen mit gleichem Versuchsplan zeigte gegenüber der Untersuchung von Gardner eine bessere Korrelation: Väterliche Bestrahlung wurde durch Inkorporation von Plutonium-239 erzielt, und die Nachkommen wurden mit Methylnitrosoharnstoff (MNU, ein chemisches Karzinogen, welches Lymphome und Leukämie bei Mäusen hervorruft) behandelt. Die väterliche Exposition mit Plutonium-239 förderte eine signifikante Zunahme der Leukämieinzidenz

---

<sup>131</sup>Shu X.O. *et al.*: A population-based case-control study of childhood leukaemia in Shanghai. *Cancer* 62 (1988) 653-644.

<sup>132</sup>Shu, X.O. *et al.*: Association of paternal diagnostic x-ray exposure with risk of infant leukaemia. *Cancer Epidemiology Biomarkers Prev.* 3 (1994) 645-653.

<sup>133</sup>Nomura, T: Paternal exposure to x-rays and chemicals induces heritable tumors and anomalies in mice. *Nature* 256 (1982) 575-577.

<sup>134</sup>Nomura, T: Of mice and men? *Nature* 345 (1990) 671

und verkürzte zugleich die Latenzzeit.<sup>135</sup> Anstatt MNU wurden in weiteren Experimenten die Nachkommen gamma-bestrahlt und vergleichbare Ergebnisse erzielt, d.h. eine stärkere Zunahme der myeloischen Leukämieinzidenz im Vergleich zu lymphatischer Leukämie<sup>136</sup>

### Fazit

Ionisierende Strahlungen sind effektive Leukämogene. Sie sind vollständige Karzinogene, die weder eingeschränkt im Induktionspotential noch bevorzugend in der Art der induzierten Krebse wirken. Im Falle der Leukämien ist die beschriebene Prädominanz für einen bestimmten Leukämietyp das Ergebnis mitwirkender biologischer und/oder anderer Faktoren. Die RERF-Daten haben eindeutig gezeigt, daß Geschlecht, Alter zur Zeit des Bombenabwurfes (ATB) und die Zeitdauer nach dem Atombombenabwurf (TSE) alles kritische Faktoren sind, die die ätiologische Entwicklung bestimmen. Weil Leukämie eine seltene Erkrankung ist, wird das absolute Risiko (Fallzahl) immer klein sein im Vergleich zu den soliden Tumoren. Die niedrige Verdoppelungsdosis und die kurze Latenzzeit, insbesondere kindlicher Leukämien, eignet sich als kardinaler Indikator einer zurückliegenden Strahlenexposition. Die Aufmerksamkeit bei der Risikoabschätzung sollte auf das relative Risiko (RR) gerichtet sein, worin es sich deutlicher als das Absolutrisiko hervorhebt. Die RERF-Daten über ALL zeigen, daß bis zu einem Alter von 20 Jahren das RR höher ist als für AML. Wenn jedoch der Schnitt beim Alter von 15 Jahre gesetzt wird, steigt das RR für ALL weiter um einen Faktor von 3.

Obwohl die Kohorte der Atombombenüberlebenden ohne Zweifel eine der wichtigsten Informationsquellen der Auswirkung von Strahlung auf Menschen darstellt, sind diese Daten aus verschiedener Hinsicht einzigartig. Risikoabschätzungen seitens der Strahlenschützer (insbesondere internationale Organisationen wie die ICRP) basieren fast ausschließlich auf RERF-Daten was spezifische Unzulänglichkeiten mit sich bringt. Die schwerwiegendste davon ist die Unterschätzung der Risiken für kindliche Leukämien. Die RERF hat die Daten der ersten 5 Jahre, die kritisch hinsichtlich der Sterblichkeit von Säuglingen, jungen Kindern und Menschen im hohen Alter waren, nicht erfaßt (siehe auch Fußnote 94 bezgl. Daten von Folley *et al.*, die während dieser erhoben wurden). Eine Analyse der Altersstruktur der Kohorte bestätigt dies. Die neueste Bewertung der RERF-Daten weist darauf hin, daß es aufgrund der jeweiligen, deutlichen ätiologischen Reaktion auf ionisierende Strahlung unsachgemäß ist, die verschiedenen Leukämietypen (ALL, AML und CML) als eine Entität zur Risikoabschätzung (oder jeder

---

<sup>135</sup>Lord, B.I. *et al.*: Tumor induction by methyl-nitroso-urea following preconceptional paternal contamination with plutonium-239. *British Journal of Cancer* 78 (1998) 301-311.

<sup>136</sup>Lord, B.I. & Hoyes K.P: Hemopoietic damage and induction of leukemia in offspring due to preconception paternal irradiation from incorporated plutonium-239. *Radiation Research* 152 (1999) S34-S37.



anderen Analyse) zusammenzufassen. ALL kommt typischerweise bei Säuglingen und Kindern vor, während AML typischerweise bei Erwachsenen vorkommt, mit Ausnahme von Menschen im hohen Alter, wo CLL in der Häufigkeit zunimmt und im Greisenalter prädominiert. Die Inzidenzen der malignen Lymphome CLL und Plasmazytome sollten für eine umfassende Bewertung von Strahlenauswirkungen ebenfalls berücksichtigt werden<sup>137</sup>.

Abgesehen von der natürlichen Hintergrundstrahlung ist ein erheblicher Teil der Strahlenexposition auf medizinische Maßnahmen zurückzuführen. Starke Expositionen bei hohen Dosisleistungen werden im Bereich der Strahlentherapie angewandt. Sekundäre Krebse entstehen in der Regel in benachbarten Geweben außerhalb des Strahlenfeldes. Da die Krebstherapie häufig aus kombinierten Modalitäten besteht, ist es nicht einfach, Kohorten von Patienten zu finden, die ausschließlich strahlentherapiert wurden, und eine derartige Kohorte aus Kindern stellt eine Rarität dar. Folglich ist AML derjenige Leukämietyp, der im allgemeinen als Sekundärkrebs bei therapierten Krebspatienten vorkommt. Um vergangene Erfahrungen zwecks qualitativer Risikobetrachtung bei Leukämien (Leukämietyp) nützlich einzusetzen, welche mit hoherer Wahrscheinlichkeit bei Kindern ausgelöst werden, kann dies am besten bei Kindern geschehen die aus anderen Gründen Strahlentherapien erhielten (z.B. *Tinea capitis*), wobei ALL beobachtet wurde, ganz im Einklang mit den RERF-Daten. Eine bekannte Kohorte von Erwachsenen (im Alter zwischen 20 bis 40 Jahren), die ebenfalls aus anderen Gründen strahlentherapiert wurden, waren solche, die gegen *Morbus Bechterew* behandelt wurden. In dieser Patientengruppe wurde AML beobachtet. Die Strahlenbelastung bei Röntgenaufnahmen ist im allgemeinen sehr niedrig, und von speziellem Interesse sind Kohorten von Kindern, die *in utero* exponiert waren. Solche Kinder haben erhöhte Risiken, im Kindesalter an Leukämie zu erkranken. Als Leukämietyp kommt fast ausschließlich ALL vor.

Berufliche Exposition mit ionisierender Strahlung ist bei Arbeitern in nuklearen Industrien gegeben. Das Krebsrisiko ist im allgemeinen niedrig, auch wenn positive Assoziationen festgestellt wurden. Eindrucksvoller als das Krebsrisiko ist eigentlich die generell niedrige Mortalitätsrate aufgrund von Krebserkrankungen, verglichen mit der allgemeinen Bevölkerung. Dieses weist deutlich auf den "Healthy Worker Effekt" hin und deutet auf die Selektion der Arbeitnehmerschaft nach gesundheitlichen Kriterien. Ein weiterer, interessanter Aspekt dieser Gruppe ist die Exposition zukünftiger Väter, insbesondere mit Radionukliden wie Plutonium. Die Häufung kindlicher Leukämien bei Seascale wurde dadurch erklärt, daß die Väter dieser Kinder in der nuklearen Wiederaufbereitungsanlage in Sellafield beschäftigt waren und, wie sich durch die

---

<sup>137</sup>Auch wenn die Analyse der RERF-Daten durch Preston et al<sup>93</sup> keine Korrelation mit Exposition für diese beide Leukämiearten ergab, ist die Situation nicht absolut klar aufgrund von anderen Arbeiten, wie diese Autoren selbst erwähnen (siehe auch S.81). Aus strahlenbiologischer Sicht besteht kein Grund warum CLL bzw. Plasmazytome nicht durch Bestrahlung hervorgerufen werden können. Die induzierte Krebsarten ist u.a. eine Funktion von biologischen Parametern. Weil mangelnde Korrelation nicht als Nichtinduzierbarkeit verstanden werden darf, ist es wichtig, daß diese beiden Leukämien mit erfaßt werden.

Fallkontrollstudie herausstellte, mehrere Monate vor Konzeption ihrer erkrankten Kinder höheren Strahlenexpositionen ausgesetzt wurden. Dieses Konzept des Leukämierisikos in Zusammenhang mit präkonzeptioneller Strahlenexposition wurde in anderen epidemiologischen Studien über väterliche Expositionen durch Röntgenaufnahmen, Monate vor der Konzeption, belegt und bestätigt durch experimentelle Untersuchungen an Mäusen. Der Leukämietyp bei den Kindern war ALL.

Künstliche Erhöhungen der Umweltstrahlenbelastung kommen in manchen geografischen Regionen vor. Diese können auf Fallout aus den Atomwaffentests bzw. aus nuklearen Katastrophen, wie Tschernobyl, oder auf das Vorhandensein von kerntechnischen Anlagen, insbesondere Wiederaufbereitungsanlagen, zurückzuführen sein. In derartigen Regionen können Erhöhungen der Krebshäufigkeit erwartet werden und wurden auch gefunden. Die Tschernobyl-Katastrophe ist gekennzeichnet durch den drastischen Anstieg des Schilddrüsenkrebses bei Kindern aufgrund des freigesetzten Radiojods (60 bis 80% des Jodinventars). Die Inzidenz kindlicher Leukämien im Umfeld von La Hague bzw. Dounreay ist höher als erwartet, und der Aufenthalt an den jeweiligen Stränden wurde als Risikofaktor identifiziert. Das Leukämierisiko (SIR) von Kindern in der Umgebung von britischen bzw. deutschen AKW wurde in zwei separaten Studien als erhöht festgestellt.

#### **Bezug**

- Anhang L: Beitrag von Horst Kuni
- Anhang J: Beitrag von David Richardson, Steven Wing & Alice M. Stewart
- Anhang K: Beitrag von Janice Pogoda und Susan Preston-Martin
- Anhang I: Beitrag von Alice M. Stewart
- Anhang M: Beitrag von Edmund Lengfelder
- Anhang N: Beitrag von Bernd Grosche
- Anhang W: Beitrag von William J. Schull

### **III. 2. Kontroverse über die Strahleninduzierbarkeit von ALL provoziert durch die Professoren Gaßmann und Löffler, vormals Universität Kiel**

In Beantwortung einer Anfrage durch den zuständigen Referenten für die Untersuchungen zur Ursachenaufklärung der kindlichen Leukämieerkrankungen in der Umgebung des KKK am Ministerium für Umwelt, Natur und Forsten in Kiel, ist eine Stellungnahme, datiert auf den 14.10.1996, von den zwei og. Professoren der Onkologischen Hämatologie an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel eingereicht, in der sie erklären, daß der überwiegende Leukämietyp (ALL), diagnostiziert bei den Kindern, nicht typisch für strahleninduzierte Leukämie sei und daher kein kausaler Zusammenhang zum Betrieb des Kernkraftwerkes (KKK) bestehen könne.

Weiterhin sei AML typisch für strahleninduzierte Leukämie. Diese Stellungnahme fand Verbreitung innerhalb der BRD und wurde von einigen wissenschaftlichen Gesellschaften (einschließlich der Deutschen Gesellschaft für Hämatologie) als Argument gegen die Tätigkeit der Leukämiekommissionen der Länder Schleswig-Holstein und Niedersachsen zitiert.

Gaßmann und Löffler haben die letzte Publikation der RERF über Leukämien und andere verwandte Erkrankungen, die in früheren Abschnitten erwähnt wurden, begutachtet und stellen die wissenschaftliche Fundiertheit der Risikoabschätzung für ALL (ERR = 9,1) in Frage. Sie argumentieren, daß dieser hohe Wert ein Ergebnis der weitaus zu gering angenommenen natürlichen Inzidenz sei und weisen darauf hin, daß echte Daten hierzu fehlen würden, obwohl sie selbst keinen Vorschlag unterbreiten, wie groß dieser Nullwert sein dürfte. Ihre Beurteilung beruhe auf Erfahrung, und höhere amerikanische Inzidenzdaten werden dafür als Beleg zitiert. Bei ihren Bemühungen, die aus ihrer Sicht typische strahleninduzierte Leukämie zu identifizieren (Stillschweigend unterstützt – wie von der Deutschen Gesellschaft für Hämatologie – und von einigen anderen wissenschaftlichen Gesellschaften), haben sie Literatur über Leukämien und verwandte Erkrankungen, die auf medizinische Anwendungen von Strahlungen zurückzuführen sind, nämlich Strahlentherapie und Röntgendiagnostik, sowie die Ergebnisse einer Analyse des IARC (in früheren Abschnitten erwähnt) über beruflich exponierte Personen, beschäftigt bei AKW in Großbritannien, USA und Kanada, bewertet. Sie haben die Bewertung der Studien über medizinische Anwendungen von Strahlungen für Erwachsene und Kinder gesondert durchgeführt. Damit sind sie zu der Schlußfolgerung gelangt, daß Strahlenexpositionen aus medizinischen Gründen AML, MDS und weniger häufig CML provozierten. CLL und ALL würden nach Strahlentherapie nicht beobachtet.

Die Quintessenz, die sie aus den RERF-Daten richtig hervorheben, ist, daß die Induktion solider Tumore um eine Zehnerpotenz höher liegt als für Leukämien und daß sogar eine 50%ige Erhöhung, beispielsweise bei Brustkrebs, in absoluten Zahlen höher liegt als eine 1000%ige Zunahme des Leukämierisikos. Und dieses ist, wie sie feststellen, auf die hohe Hintergrundhäufigkeit des Brustkrebses zurückzuführen. Somit haben sie in ihrer Stellungnahme die Angabe absoluter Anzahl von Fällen vorgezogen. In einem früheren Abschnitt dieses Berichtes ist darauf hingewiesen worden, daß AML eine häufigere Erkrankung ist als ALL: AML kommt während der weiten Spanne des Erwachsenenlebens vor, während ALL typischerweise eine Leukämie des frühen kindlichen Alters ist und wesentlich seltener als AML vorkommt. Damit muß für jede Bewertung das RR errechnet werden, um Einblick zu gewinnen. Unqualifizierte, absolute Zahlen sind irreführend. Insofern es sich um politische Entscheidungen handelt (und diese könnten Entscheidungen im Bereich des Gesundheitswesens einschließen), wären absolute Zahlen wichtig. Risikoabschätzungen in einer differenzierten Weise nicht zu beachten ist unwissenschaftlich.

Die vier Studien über Thorotrastkohorten und eine weitere über Radium-224-Applikation müssen ausgesondert werden aufgrund von besonderen strahlenbiologischen Problemen in Zusammenhang mit Alphastrahlern. Von den Erwachsenenstudien sind die Kohorten mit *Morbus Bechterew* bzw. mit gynäkologischen Blutungsproblemen, die nur mit Bestrahlung behandelt

wurden, von Interesse. Da es sich um Erwachsene handelt, ist eine Prädominanz der AML zu erwarten. Eine kleine und gleichwertige Anzahl von ALL und CLL wurde bei der *Morbus Bechterew*-Kohorte beobachtet. Das Alter zur Zeit der Behandlung wurde nicht angegeben, dennoch kann anhand der Leukämietypen vermutet werden, daß es in der Kohorte einige junge Erwachsene sowie ältere Patienten gegeben haben müßte. Da die Studienzeit bei den Frauen 26 Jahre betrug (ebenfalls ohne Altersangabe), ist es nicht auszuschließen, daß in dieser Kohorte ältere Frauen dabei waren. Die hohen Inzidenzen der AML bei Patienten, die Strahlen- und Chemotherapie erhielten überrascht nicht, da bekannt ist, daß die Chemotherapie vorzugsweise AML hervorruft, und ionisierende Strahlung eine fördernde Wirkung ausübt (siehe oben).

Der eigentlich relevante Teil der Stellungnahme von Gaßmann und Löffler beschränkt sich auf den Abschnitt über Kinder, die strahlentherapiert wurden. Die *Tinea capitis*-Kohorte von Kindern wurde jedoch herausgelassen. Die Studie über Kinder, die Bestrahlung der Thymusdrüse erhielten, ist erwähnt, gibt aber Risiken von Brustkrebs an ohne Erwähnung von Leukämie. Die einzige andere Kohortstudie, in der Kinder wegen Hämangiomen nur Bestrahlung erhielten, ergab erhöhte Risiken für Schilddrüsen- und Brustkrebs, nicht aber für Leukämie. Hier wäre es wichtig gewesen, die Bestrahlungsbedingungen kritisch zu betrachten, dieser Aspekt wurde aber vernachlässigt. Weil es sich hier um Oberflächenbestrahlung handelt, ist es anzunehmen, daß weiche Röntgenstrahlen angewandt wurden und somit die Knochenmarksdosis – abhängig von der Lage der Hämangiome am Körper – niedrig gewesen sein muß. Dies erklärt das Fehlen von Leukämien. Ansonsten war in allen anderen Fällen, wo es sich um die Strahlentherapie von Krebs handelt, auch Chemotherapie beteiligt. Damit sind diese Kohorten ungeeignet für die Ermittlung von Strahleneffekten. Die berichtete Prädominanz der AML muß aufgrund der begleitenden Chemotherapie erwartet werden.

Das Postulat von Gaßmann und Löffler ist nicht haltbar. Der überwiegende Teil der Studien, die sie aufgelistet haben, bestand aus kombinierten Bestrahlungsmodalitäten und sind somit für eine Bewertung reiner Strahlenwirkungen ungeeignet. Angesichts ihrer Kritik an der RERF-Publikation ist es um so erstaunlicher, daß sie die Unzulänglichkeit ihrer eigenen Präsentation nicht einmal ansatzweise erkannt haben. Da sie weder ausgebildete Strahlenbiologen noch Epidemiologen sind, sollen ihnen Mängel aus der Sicht von Experten jener Fachrichtungen hier nachgesehen werden. Dennoch kann ihnen als Hochschullehrer ihre grobe Fahrlässigkeit, daß sie Experten aus den genannten Fachrichtungen nicht zu Rate gezogen haben, ehe sie ein derartig irreführendes Postulat herausgeben, nicht entschuldigt werden.

## Fazit

Das Postulat von den Professoren Gaßmann und Löffler ist aus fachlicher Sicht (Strahlenbiologie und Epidemiologie) nicht haltbar. Die epidemiologischen Befunde der RERF- und dies trotz der bereits erwähnten spezifische Unzulänglichkeiten - und anderer stehen im Einklang mit den Prinzipien der Strahlenleukämogenese. Die Studien, die Gaßmann und Löffler

ausgewählt haben, um ihr Postulat zu untermauern, sind zum überwiegenden Teil ungeeignet. Es sollte hierbei zugegeben werden, daß Kohorten von Kindern, die ausschließlich strahlentherapiert wurden, äußerst selten sind. Dennoch können aufgrund dieser Datenlage diese beiden Kliniker, Gaßmann und Löffler, nicht entschuldigt werden. Epidemiologen haben schon darauf hingewiesen, daß die Chemotherapie vorzugsweise AML (auch bei Kindern) induziert und daß ionisierende Strahlung diesen Prozeß fördert. Krebspatienten erhalten in der Regel kombinierte Behandlungsmodalitäten und sind deswegen ungeeignet für die Bewertung von reinen Strahlenwirkungen.

#### **Bezug**

- Anhang Y: Stellungnahme von W. Gaßmann und H. Löffler
- Anhang Z: Stellungnahme von Dale Preston (RERF, Japan) zu og. Kritik
- Anhang L: Beitrag von Horst Kuni

### **III. 3. Beziehung zwischen ALL und AML**

Wie schon erwähnt ist Leukämie ein Sammelbegriff für verschiedene getrennte maligne Bluterkrankungen, die sich in ihren ätiologischen Reaktionen auf ionisierende Strahlung voneinander unterscheiden. Die Leukämien werden nach dem prädominanten Zelltyp und der Überlebensdauer vom Ausbruch bis zum Tod klassifiziert. Unter Leukämie im engeren Sinne wird ALL, AML und CML verstanden, wobei CLL (im hiesigen Kontext) herausgelassen wird aufgrund behaupteter ätiologischer Beständigkeit gegenüber ionisierender Strahlung. Leukämien im frühkindlichen Alter sind fast ausschließlich ALL. Während der weiten Spanne des Erwachsenenlebens überwiegen AML und CML in der Häufigkeit. CLL kommt im späteren Alter vor und überwiegt im hohen Alter. In absoluten Zahlen ist AML der am häufigsten vorkommende Leukämietypus. Strahlenexposition erhöht das natürliche Vorkommen der Leukämien mit Ausnahme von CLL – nach Ansicht der RERF und einiger anderer – obwohl keine Studie mit Kohorten von Menschen im höheren Alter vorliegen. Zusätzlich zum Alter zur Zeit der Exposition und Geschlecht lassen sich klare Risikomuster im Verlauf der Zeit erkennen. Die kürzeste Latenzzeit wird für ALL angegeben, die nach RERF-Befunden zwischen 3 und 10 Jahren betragen kann mit einer Gipfelbildung zwischen 3 bis 4 Jahren, gefolgt von einem steilen Abfall. Die Dosis hat kaum Einfluß auf die Latenzzeit. Höhere Strahlendosen induzieren vorzugsweise AML statt CML. Die Latenzzeit für AML ist länger als für ALL. Das Relativrisiko für AML ist in der 5. Lebensdekade deutlich höher als in der 3. und 4. Lebensdekade.

#### **Bezug**

- Anhang L: Beitrag von Horst Kuni

#### **IV. Aufgabe 3: Frage über Dosisbeziehungen: Welche Strahlendosis wäre erforderlich, um das Leukämiecluster in der Elbmarsch zu verursachen?**

##### **IV. 1. Strahlenbiologie niedriger Expositionen**

Daß ionisierende Strahlung zu den wirksamen leukämie-auslösenden Faktoren zählt, ist ein wohl akzeptiertes Faktum. In vorherigen Abschnitten wurden die menschlichen Erfahrungen mit ionisierenden Strahlungen dargestellt und Situationen mit Risiken, an Leukämie zu erkranken, geschildert. Bei Betrachtung der erhaltenen Dosen scheint die Situation von Willkür beherrscht, da sich die Dosen von einigen mGy bis zu einigen Gy erstrecken. Mit anderen Worten, trotz großer Unterschiede der Dosen, den gleichen stochastischen Effekt (Leukämie) hervorgerufen wird. Die Situation wird noch komplexer bei Betrachtung der Risikoindizes, weil sie - wie bereits erwähnt (siehe S. 79) - um ein vergleichbares Niveau schwanken. Daher besteht hier die Aufgabe darin, einen Einblick in die beteiligten biologischen Mechanismen zu gewinnen, um dieses Phänomen zu erklären. Die entscheidende Frage ist, ob niedrige Strahlendosen, wie sie in diesem Gutachten definiert wurden, tatsächlich kanzerogen sind.

Das Problem beginnt bei der Definition, was Niedrigstrahlenexposition ist. Niedrig und hoch sind relative Begriffe, die von der Perzeption abhängig sind. Zu jener Zeit, als die Vorläufer der ICRP gegründet wurden (in den 20er Jahren – Erkennung der Gefahren der ionisierenden Strahlung), wurde eine Jahresdosis von 1,6 Sv als verträglich angesehen. Seitdem haben Korrekturen der zulässigen Jahresdosis für beruflich Exponierte nur noch nach unten stattgefunden, bis die ICRP ihr Konzept der "genetischen Dosis" vorstellte und eine Grenzdosis von 5 cSv/a (50 mSv/a) empfahl. Dieser Grenzwert gilt heute noch in den meisten Ländern, mit Ausnahme von Großbritannien, wo Konsequenzen aus den LSS- (Vorläufer der RERF) Daten über Krebsmortalität gezogen wurden und der Grenzwert auf 1,5 cSv/a (15 mSv/a) herabgesetzt wurde. In Deutschland ist die kumulative Dosis für das Berufsleben auf ein Maximum von 40 cSv (0,4 Sv) festgesetzt. Der Expositionsgrenzwert für die Allgemeinbevölkerung, der in Deutschland bei 0,03 cSv/a (0,3 mSv/a) liegt, ist aus dem 5 cSv/a (50 mSv/a) empfohlenen Grenzwert für berufsexponierte Personen abgeleitet worden.<sup>138</sup> Diese Dosen werden häufig als sicher angesehen, obwohl die ICRP wiederholt gewarnt hat, daß es keine sichere Strahlendosis gäbe. Derzeitige Erkenntnisse aus verschiedenen Untersuchungen bestätigen diese ICRP-Warnung. Ein beliebtes Argument bei den Befürwortern einer Lockerung der Grenzwerte ist, daß verschiedene Menschen natürlicher Hintergrundstrahlungen unterschiedlicher Höhe ausgesetzt sind, wobei angenommen wird, daß diese natürlichen Strahlenbelastungen keine nachteiligen Effekte hervorrufen. Die

---

<sup>138</sup>Im ICRP-Bericht von 1990 wurde der Dosisgrenzwert für beruflich Exponierte auf 2 cSv/a (20 mSv/a) und für die allgemeine Bevölkerung auf 0,1 cSv/a (1 mSv/a) gesetzt. Dieser wurde 1997 (Bericht No. 77) jedoch auf 0,03 cSv/a (0,03 mSv/a) herabgesetzt.

jungsten Veröffentlichungen aus Indien zum Vorkommen von Krebsen, Fehlbildungen bei Neugeborenen und Chromosom-Aberrationen in Lymphozyten bei der Bevölkerung der Küstengegend von Kerala, wo die natürliche radioaktive Strahlung des Bodens (1% thoriumreiches Monazit) vergleichsweise höher ist, bestätigen diese Ansicht<sup>139</sup>. Eine Überprüfung von zwei der hier zitierten drei Arbeiten durch Epidemiologen (BIPS, Bremen) weisen jedoch auf Untererfassungen hin. In allen drei Arbeiten wird von den Autoren die Problematik der Exposition der Bevölkerung auf radioaktives Radium (Zerfallsprodukt von Thorium) im Trinkwasser im Untersuchungs- sowie im Kontrollgebiet nicht angesprochen. Wie die Autoren selbst darstellen, wird das Monazit von Flüssen des Landes zur Küste transportiert. Alle drei Arbeiten wurden vom Bhaba Atomic Research Centre - ein Forschungszentrum der indischen Atomenergiebehörde - durchgeführt. Anfragen bezüglich der Veröffentlichungen sollen an den "Project Manager" gerichtet werden, der nirgends als Mitautor erscheint - eine unübliche Praxis. Eine Reihe von Studien<sup>190, 140, 141, 142</sup> belegen andererseits die erhöhten Risiken für verschiedene gesundheitliche Effekte, einschließlich der Bildung von Neoplasien sowie zytogenetischer Aberrationen und mehr.

Es sind unter den Wissenschaftlern – und manche dieser Personen sind Mitglieder von Strahlenschutzkommissionen bzw. ICRP-Mitglieder – welche, die die Ansicht aufrecht erhalten, daß die nachweisliche untere Grenze für stochastische Strahleneffekte bei etwa 50 cGy (0,5 Gy) liegen würde. Sie geben jedoch zu, daß Hinweise derartiger Effekte evtl. bis zu 5 cGy (50 mGy) ermittelt werden könnten. Alles darunter sei zweifelhaft, da die Art von epidemiologischen Studien, die erforderlich wären um dieses einwandfrei zu belegen, zu umfangreich wären. Es muß in diesem Zusammenhang erwähnt werden, daß die neuesten RERF-Daten auf signifikante

---

<sup>139</sup>Nair, M.K. *et al*: Population study in the high natural background radiation area in Kerala, India. *Radiation Research* 52 (1999) S145-S148.

Jaikrishnan, G. *et al*: Genetic monitoring of the human population from high-level natural radiation areas of Kerala on the southwest coast of India. I. Prevalence of congenital malformations in newborns. *Radiation Research* 52 (1999) S149-S153.

Cheriyann, V.D. *et al*: Genetic monitoring of the population from high-level natural radiation areas of Kerala on the southwest coast of India. II. Incidence of numerical and structural chromosomal aberrations in the lymphocytes of newborns. *Radiation Research* 52 (1999) S154-S158.

<sup>140</sup>Luxin Wei *et al*: High levels of natural radiation 1996: Radiation dose and health effects. Elsevier, Amsterdam, 1997.

<sup>141</sup>Sohrabi, M. *et al*: High levels of natural radiation. IAEA, Wien, 1993.

<sup>142</sup>Körblein, A.: Persönliche Mitteilung. Eine Veröffentlichung über die Korrelation zwischen Umweltradioaktivität in Bayern und frühgeburtlichen Mortalität ist in Vorbereitung.

Erhöhungen der Krebsmortalität bei der Dosisgruppe 0 - 10 cSv ( 0 - 0,1 Gy) hinweisen.<sup>143</sup> Deshalb wird die Dosisspanne zwischen 5 und 50 cGy ( 0,05 - 0,5 Gy) unausgesprochen als niedrige Dosis angesehen, und die Beschäftigung mit Effekten unterhalb dieses Dosisbereichs würde mehr auf Spekulation als auf Fakten basieren. Dies ist natürlich nicht konsistent mit dem derzeit breit akzeptierten Konzept einer linearen Dosiswirkungsbeziehung ohne Schwelle für stochastische Effekte.

Niedrige Dosen werden in diesem Gutachten als Dosen dargestellt, die über die natürliche Hintergrundstrahlenbelastung hinausgehen. Die obere Grenze für niedrige Dosen bzw. die untere Grenze für die intermediären Dosen ist dadurch gekennzeichnet, daß von hier ab stochastische Effekte epidemiologisch leicht belegbar sind. Diese Grenze könnte daher etwa um 5 cGy (50 mGy) liegen<sup>144</sup>. Die Dosisspanne zwischen 5 und 50 cGy (0,05- 0,5 Gy) könnte vorläufig als untere intermediäre Dosis und die zwischen 50 cGy (0,5 Gy) und 1 Gy als obere intermediäre Dosis bezeichnet werden. Alles über 1 Gy wird dann als hohe Dosis bezeichnet, weil sich in diesem Dosisbereich akute oder deterministische Strahleneffekte manifestieren. Diese Aufteilung ist selbstverständlich willkürlich. Der Niedrigdosisbereich ist der Bereich der Strahlenbiologie, über den wenige zuverlässige Humandaten vorhanden sind, bedingt durch die Natur der Sache d.h. die Fallzahl muß sehr groß sein um gesicherte Ergebnisse zu erhalten. Risikoabschätzungen für stochastische Effekte haben sich auf die Rückextrapolation der RERF-Daten aus den intermediären und hohen Dosisbereichen verlassen. Da die RERF-Datenaufzeichnung praktisch 50 Jahre zurückgeht, sind die Latenzzeiten der meisten Tumore damit erfaßt. Obwohl Krebserkrankungen immer noch registriert werden, insbesondere für die Gruppen, die 10 cSv (0,01 Sv) oder geringerer Exposition ausgesetzt waren, sind die Gipfel der meisten Krebsarten schon überschritten. Die Fortsetzung der Datenaufzeichnung für diese Gruppe wird die Aussagekraft der Extrapolation auf niedrige Dosen zukünftig verbessern. Nach derzeitigem

---

<sup>143</sup>Pierce, DA *et al.*: Studys on mortality of atombomb survivors. Report 12 part 1. Cancer 1952-1999. Radiation Research 146 (1996) 1-27.

<sup>144</sup>Bei diesen Dosen sind sogar nicht stochastische Effekte bei Versuchstieren gemessen worden [z.B. siehe Feinendegen L.E: Acute non-stochastic effect of very low whole-body exposure, a thymidine equivalent serum factor. Int. J. Radiat. Biol. 41 (1982) 139-150]. Diese Arbeitsgruppe hat auch über die Aktivierung von Thymidinkinase bei den gleichen Dosen berichtet. Die Arbeitsgruppe von Prof. J. Little an der Harvard Universität untersucht seit vielen Jahren der Einfluß von niedrigen Dosen - wie hier definiert - auf Zellfunktionen. Einige Arbeiten sind an einer anderen Stelle erwähnt (siehe Fußnoten 164-168). Hinsichtlich stochastischer Effekte in diesem Dosisbereich, zählen hierzu sämtliche umweltepidemiologische Studien, die in verschiedenen Zusammenhängen zitiert wurden. Besonders zu beachten sind die Arbeiten von Alice Stewart, Martin Gardner, P.J. Cook-Mozaffari, B. Keller, U.Kaletsch, M. Morris, B. MacMahon, X.O. Shu und J.-F. Viel. Bei allen diesen Arbeiten handelt es sich um Dosen die im niedrigen Dosisbereich liegen.



Verständnis über stochastische Effekte sind Schwellenwerte nicht vorhanden, und für solide Tumoren ist die Dosiswirkungsbeziehung linear, während sie für Leukämien linear-quadratisch ist.

Aufgrund der unzureichenden Datenlage ist die beste Anpassung der retrogressiven Extrapolation für niedrige Dosiswirkungen immer noch umstritten. Auf Grundlage der spärlichen menschlichen Daten und Beobachtungen aus Tierversuchen sind 5 Modelle postuliert worden, die in Einzelheiten im Anhang A und O nachzulesen sind. Ein Modell, das allgemeine Akzeptanz findet und das derzeit bevorzugte Modell verschiedener internationaler Organisationen ist, insbesondere für solide Tumore, ist das lineare Modell, welches durch den Nullpunkt zieht, weil RERF-Daten eine lineare Beziehung nahe legen. Das andere Modell, das von dem BEIR-Komitee für Leukämie favorisiert wird, ist das linear-quadratische Modell, das eine im wesentlichen konkave Kurve zeigt. Eine ähnliche Anpassung würde dem von der ICRP (1990)<sup>145</sup> vorgeschlagenen Dosis- und Dosis-Leistungseffektivitäts-Faktor (DDREF) von etwa 2 entsprechen, der Anwendung finden sollte bei Dosen unter 20 cSv (0,2 Sv) und bei höheren Dosen bei Dosisleistungen geringer als 10 cSv/h (0,1 Sv/h), weil das krebsinduzierende Potential nur noch halb so effektiv sei. Der DDREF nähert sich dem Wert 1 bei Dosen über 20 cSv (0,2 Sv) und wird beeinflusst durch die Dosisleistung. Von den übrigen zwei Modellen, die kaum noch Beachtung bei den Strahlenbiologen finden, zeichnet sich eines durch das Vorhandensein einer Schwelle bei stochastischen Effekte aus, d.h. keine Effekte bis zu einer gewissen Dosis, und danach erfolgt eine lineare Korrelation.<sup>146</sup> Das andere ins Abseits geratene Modell geht einen Schritt weiter und nimmt an, daß kleine Strahlendosen sogar positive, gesundheitliche Effekte hervorrufen (Hormese: Die Kurve nimmt folglich eine anfänglichen Verlauf unter 0 und steigt wieder mit einem linearen Verlauf an). Das letzte Modell, das auch das jüngste ist, hat bislang wenig Aufmerksamkeit unter den Strahlenbiologen auf sich ziehen können. Der Verlauf ist praktisch das Umkehrbild des zuvor erwähnten linear-quadratischen Modells, indem die quadratische Komponente am Anfang ist. Die Kurve ist dadurch konvex und wurde von den Autoren als supralineares Modell bezeichnet: bei sehr niedrigen Dosen sei der Effekt größer als aus einer linearen Beziehung zu erwarten wäre.

#### IV. 1. 1. Über die Zulässigkeit von Extrapolationen

Modelle werden auf theoretischer Grundlage entwickelt. Bei den vorgenannten Fällen dienten die RERF-Daten aus dem hohen Expositionsbereich als Basis für Überlegungen über die beste Anpassung bei einer Rückextrapolation. Die ersten Modelle wurden zu einer Zeit

---

<sup>145</sup>International Commission on Radiological Protection. Publication No. 60. Recommendations of the ICRP, 1999. Pergamon Press, Oxford, 1991.

<sup>146</sup>Die postulierte Existenz einer Schwelle wird von einigen Wissenschaftlern weiterhin unterstützt aufgrund von Untersuchungen mit Alphastrahlern (siehe Anhang R)

entwickelt, als die RERF-Datenbasis noch nicht so groß war. Mit dem Datenzuwachs im niedrigen Dosisbereich, läßt sich die Eignung der Modelle feststellen. Dies hat zur Vorstellung des 5. (supralinearen) Modells geführt. Dieses Modell hat bislang weder Akzeptanz gefunden, noch wurde es widerlegt, und seine Eignung wird sich erst mit der Zeit herausstellen. Die Rekrutierung von Daten muß sich nicht auf die RERF beschränken. Ergebnisse auch aus anderen Studien könnten sehr wohl für theoretische Überlegungen geeignet sein.

Eine solide Datenbasis ist entscheidend für die Genauigkeit eines Modells. Da Modelle Unsicherheiten beinhalten, muß der Konfidenzbereich oder die Fehlerwahrscheinlichkeit angegeben werden, und dieses wird durch die Anwendung geeigneter statistischer Verfahren erreicht. Für die Zuverlässigkeit von Extrapolationen müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein, bevor ein Modell Anwendung findet: zunächst muß die theoretische Grundlage für das Modell fundiert sein, und dann müssen die beobachteten Daten innerhalb des vorausgesagten Bereichs liegen. Trotzdem kann die absolute Sicherheit der Genauigkeit von Extrapolationen nicht gewährleistet werden, da es letztenendes eine Fortschreibung ins Unbekannte ist. Nur fortschreitende Erkenntnisse durch Gewinn an Daten würden mit der Zeit die Extrapolation entweder bestätigen oder widerlegen. Genau genommen erfüllt die Epidemiologie die Voraussetzungen für eine Extrapolation, wie üblich in den experimentellen Wissenschaften, häufig nicht. Andererseits können menschliche Daten nur durch epidemiologische Methoden erhoben werden.

#### **IV. 1. 2. Dosis-Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DDREF)**

Der Einfluß der Dosisleistung auf Strahlenwirkungen ist seit langem bekannt und zur Genüge in experimentellen Untersuchungen dokumentiert mit verschiedenen Parametern, einschließlich stochastischen Effekt. Solche Studien haben gezeigt, daß der Einfluß der Dosisleistung bei Niedrig-LET-Strahlungen (Gamma- und Röntgenstrahlen) deutlich merkbar ist, weniger für Neutronen und zweifelhaft oder nicht gegeben für Hoch-LET-Strahlungen, wie Alphateilchen. Zwecks Risikoabschätzung der kanzerogenen Effekte von Strahlungen, hat das BEIR V-Komitee den Dosisbeziehungen für Leukämien aus den RERF-Daten Rechnung getragen. Weil die Häufigkeit in Abhängigkeit von der Dosis linear-quadratisch erschien, wurde das Verhältnis der linearen Koeffizienten für die ersten beiden Anpassungen herangezogen, um einen Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor (DREF) abzuleiten, versehen mit dem Wert 2. Nach weiterer Berücksichtigung tierexperimenteller Daten wurde der Wert von 2 beibehalten. In ihren Empfehlungen von 1990 hat auch die ICRP diese Angelegenheit ins Visier genommen und kam zu der Schlußfolgerung, daß genügend Daten vorlägen, um einen Korrekturfaktor für Risikoabschätzungen bei Niedrig-LET-Strahlungen im niedrigen Dosisbereich und bei niedrigen Dosisleistungen einzuführen, wenn eine Extrapolation von Daten, gewonnen aus dem hohen Dosisbereich bei hohen Dosisleistungen, erfolgt. Eine Herabsetzung des Wahrscheinlichkeitskoeffizienten um den Faktor 2 wurde als vernünftig angesehen und empfohlen, obwohl die

Kommission einräumte, daß die Streuung groß und die Festlegung des Wertes eine willkürliche Entscheidung sei. Der Korrektor sei für alle Äquivalentdosen anwendbar, errechnet aus absorbierten Dosen unter 20 cGy (0,2 Gy) und für alle höheren Dosen bei Dosisleistungen unter 10 cGy/h (0,1 Gy/h). Die ICRP hat diesen Korrekturfaktor als Dosis-Dosisleistungs-Effektivitätsfaktor DDREF mit einem Wert von 2 genannt. Er ist nicht für Hoch-LET-Strahlungen anwendbar.

Die Anwendung des DDREF mit dem Wert von 2 für Risikoberechnungen sei für Leukämien vertretbar, ist jedoch problematisch hinsichtlich der soliden Tumoren (siehe J. Kiefer, Anhang Q). Weiterhin, "wäre es im Sinne der 'Konservativität' von Risikoabschätzungen zu erwägen, die Verwendung des DDREF noch einmal kritisch zu hinterfragen". Die Feststellung eines 'inversen Dosisleistungseffektes' bei Mutagenitätsstudien<sup>11, 12, 147</sup> sei laut Professor Kiefer auf den hohen Anteil der sich proliferierenden Zellen in Zellkulturen zurückzuführen. Da derartiges im erwachsenen menschlichen Körper nicht anzutreffen sei - unterstützt durch Befunde aus Tierexperimenten - wäre eine Berücksichtigung des 'inversen Dosisleistungseffektes' nicht begründet. Ausgeblieben ist aber eine Diskussion über die zellkinetische Situation bei Föten, in denen hohe Anteile proliferierender Zellen in allen Geweben insbesondere im hämatopoetischen Bereich zu erwarten sind, denn erfahrungsgemäß sind embryonale Gewebe äußerst strahlenempfindlich. Ferner kann auch bei Erwachsenen unter bestimmten pathologischen Bedingungen der Anteil der proliferierenden Zellen in betroffenen Geweben stark erhöht sein.

Die biophysikalische Grundlage liegt in den Prinzipien der Strahlenwirkung. Da Neoplasien aus transformierten Zellen entstehen, und derzeitige strahlenbiologische Vorstellungen die genetische Mutation einer somatischen Zelle als initiiertes Ereignis voraussetzen, werden mikrodosimetrische Ansätze (intrazelluläre punktuelle Energiedeposition) als Eckstein für die Darstellung von Dosiswirkungsbeziehungen angesehen. Strahlenläsionen, die durch den Durchtritt eines Photons oder Teilchens durch den Zellkern verursacht werden, hinterlassen eine diskrete Spur reaktiver Moleküle. Die räumliche Anordnung der einzelnen Spuren steht in Beziehung zur Dosis und zur Dosisleistung. Letztere beeinflußt das Zeitintervall zwischen den Spuren bei Niedrig-LET-Strahlung. Die dichte Häufung von Spuren ist ein Merkmal der Hoch-LET-Strahlung. Bei Exposition einer homogenen Zellpopulation, wie in einem einfachen Gewebe, mit einer Dosis von Niedrig-LET-Strahlung, so daß jeder Zellkern eine einzige Ionisationsspur erhält, wird die Dosisleistung für die Äußerungen von Schäden relevant sein, weil die Herabsetzung der Dosisleistung dazu führt, daß nur manche Zellkerne getroffen sein werden. Damit wird die Äußerung von Schäden nur durch die Wahrscheinlichkeit der Reaktion einzelner Spuren mit Targets in den Zellkernen entscheidend sein. Die Möglichkeit, daß mehr als eine Spur im Zellkern vorkommt ist - auch unter solchen Bedingungen - gegeben, wenn auch die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist. Über eine umgekehrte Dosisleistungswirkung, d.h. eine Erhöhung stochastischer Effekte bei verminderten Dosisleistungen, wurde bei Exposition auf Gammastrahlen<sup>12</sup> und auf

Spaltneutronen berichtet<sup>11, 147</sup>.

#### IV. 1. 3. Relative biologische Wirksamkeit (RBW)

Da mit Änderung der Strahlenqualität die absorbierte Dosis nicht allein die biologischen Effekte bestimmt, wird bei Risikoabschätzungen eine Korrektur mit einem Qualitätsfaktor erforderlich sein. Folglich hat eine gegebene absorbierte Energiedosis von Röntgenstrahlen nicht unbedingt das gleiche kanzerogene Potential wie die gleiche Dosis von Neutronen oder Alphastrahlung. Um diesem biologischen Unterschied Rechnung zu tragen, ist das Konzept der relativen biologischen Wirksamkeit (RBW) eingeführt worden; sie gibt das Umkehrverhältnis der erforderlichen Dosen der ersten zur zweiten Strahlung ( $D_2/D_1$ ) an, die den gleichen biologischen Effekt hervorrufen.<sup>148</sup> Wenn sich die Dosis-Wirkungsbeziehungen der beiden Strahlenarten im Verlauf unterscheiden, ist die RBW notwendigerweise von den Ausmaßen des berücksichtigten biologischen Effektes abhängig und muß als solches angegeben werden. Obwohl eine erhebliche Menge Literatur über den Vergleich zwischen Niedrig- und Hoch-LET-Strahlung für verschiedene (nicht-stochastische) experimentelle Endpunkte vorliegt, von denen die Dosiswirkungsbeziehung ersterer als linear-quadratisch und letzterer als linear beschrieben wurden, lagen die Expositionen im allgemeinen bei hohen Dosisleistungen. Bei der Ermittlung der RBW bei niedrigen Dosen liegt die Schwierigkeit in der Bestimmung der Effekte der Niedrig-LET-Strahlung. Aufgrund des Mangels an menschlichen Daten muß auf Extrapolationen zurückgegriffen werden, trotz der Unsicherheit derartiger Verfahren. Der Umfang an vorhandenen Daten über RBW bezüglich Mutagenese und Karzinogenese - stochastische Effekte - ist äußerst gering.

Die lineare Komponente der linear-quadratischen Dosis-Wirkungskurve für Niedrig-LET-Strahlung ist angeblich bei niedrigen Dosen bei niedrigen Dosisleistungen ausgeprägt. Diese lineare Komponente wird als Ergebnis der Wirkung einzelner Spuren,<sup>149</sup> unabhängig von der Dosisleistung, interpretiert. Es wird erwartet, daß die bei hoher Dosisleistung ermittelte RBW, stark von der Dosis abhängt, wobei die RBW bei sinkenden Dosen zunimmt. Bei niedrigen Dosisleistungen wird nur eine geringe Änderung in der Steigung der Dosisbeziehung für Hoch-LET-Strahlung erwartet, während sich für die Kurve der Niedrig-LET-Strahlung letztendlich die Steigung der initialen linearen Komponente eignet. Die Ermittlung der RBW bei sehr niedrigen

---

<sup>147</sup>Hill, CK, Han, A & Elkind, MM: Fission spectrum neutrons at a low dose-rate enhanced neoplastic transformation in the linear dose region (0-10 cGy) International Journal of Radiation Biology 46 (1984) 11-15.

<sup>148</sup>Niedrig-LET-Strahlung (entweder Gamma-oder Röntgenstrahlen) wurde als Referenzstrahl mit LET von 1 als geeignet angesehen und festgelegt als Strahlung mit Durchschnitts-LET von 3,5 keV/µm oder weniger im Wasser.

<sup>149</sup>Gedacht wird an die Hoch-LET-Bereiche am Ende der einzelnen Spuren.

Dosen oder bei sehr niedriger Dosisleistung – wenn die Werte von zwei linearen Steigungen verglichen werden – ergibt die maximale RBW ( $RBW_m$ ), welche bei minimaler Dosis erhalten wird. Die  $RBW_m$  ist entscheidend für Überlegungen hinsichtlich stochastischer Effekte von Strahlung bei niedrigen Expositionen.

#### IV. 1. 4. Dosis-effektbeziehungen: Adaptiver Response

In den letzten Jahren – angesichts der bevorstehenden Stilllegung einer großen Anzahl von AKW während der kommenden Dekade und damit verbundenen Kosten der Sanierung der AKW-Gelände in mehreren Ländern – haben in zunehmendem Maße Diskussionen stattgefunden, ob konventionelle Risikoabschätzungen zu hoch lägen, da festgestellt wurde, daß geringe Strahlendosen zelluläre Prozesse in Gang setzen, die die Strahlenschäden vermindern und somit evtl. die Wahrscheinlichkeit Krebs zu verringern. Dieses Phänomen wurde als „*Adaptive Response*“ bezeichnet.<sup>150</sup> Es ist bei verschiedenen Zellarten und unterschiedlichen Endpunkten festgestellt worden, daß es dennoch kein generelles Phänomen ist. Bemerkenswert ist, daß dieses Phänomen weder bei frühembryonalen Zellen noch bei Spermatozyten beobachtet wurde. Die meisten Studien beschränken sich auf Arbeiten mit peripheren Blutlymphozyten, wobei Chromosomenaberrationen als Endpunkte ausgewertet wurden.<sup>151</sup> Das Phänomen wurde als Antwort auf konditionierende Dosen von ca. 1 - 20 cGy (0,01-0,2 Gy) charakterisiert, wobei Dosen darüber bzw. darunter nicht die typische Reaktion hervorrufen. Die stimulierten Zellreparaturvorgänge dauern über 4 - 6 Stunden nach der Bestrahlung an. Eine Änderung der Zusammensetzung des Zellkulturmediums kann den Adaptiven Response verändern, und eine Behandlung der Zellen mit Inhibitoren der Eiweißsynthese kann diesen eliminieren, was auf die Mitwirkung von Enzymen hinweist. Eine Wiederholung der konditionierenden Dosis ruft keinen zusätzlichen Schutzeffekt hervor. Obwohl die meisten Untersuchungen an menschlichen Lymphozyten durchgeführt wurden, weisen die Lymphozyten mancher Individuen keinen Adaptiven Response vor. Über synergistische Effekte der konditionierenden Dosis mit anderen genotoxischen Agenzien wurde berichtet.

Der Adaptive Response wird wahrscheinlich sowohl von Niedrig-LET als auch von Hoch-LET-Strahlungen hervorgerufen. Wie schon erwähnt, sind niedrige Strahlendosen bzw. Expositionen bei niedrigen Dosisleistungen pro Doseinheit effektiver als größere Dosen oberhalb des Schwellenwertes für die Induktion des Schutzeffektes (Adaptiver Response). Der

---

<sup>150</sup>Langendorff, H. *et al*: Die Änderung der Strahlenempfindlichkeit der Maus nach Vorbestrahlung mit schnellen Neutronen oder Röntgenstrahlen. *Strahlentherapie* 146 (1973) 327 - 338.

<sup>151</sup>Siehe UNSCEAR-Bericht 1994 Report to the General Assembly, Annex B: Adaptive responses to radiation in cells und organisms. United Nations, NY., 1994.

physiologische Zustand von Zellen in Abwesenheit des Adaptiv Responses<sup>152</sup> wurde als Niedrigdosis-Hypersensitivität (low-dose-hypersensitivity) und die Auslösung des Responses als induzierte Strahlenresistenz bezeichnet (siehe Anhang P, M.C. Joiner). Das Phänomen der induzierten Strahlenresistenz wurde bei verschiedenen Zellarten, die nicht von Säugetieren stammen, untersucht. Entsprechende Studien mit Säugetierzellen erforderten die Entwicklung eines angepaßten Assaysystems, welches Veränderungen bei Dosen unter 1 Gy auflösen konnte, wobei die meisten Säugetierzelllinien sich einer 100%igen Überlebensrate nähern. Die präzise Bestimmung der Anzahl der Zellen, die dem Risiko des Verlustes des proliferativen Vermögens in einem Testsystem der Koloniebildung ausgesetzt waren, war eine technische Herausforderung, die durch die Entwicklung geeigneter Geräte gelöst wurde. Zwei Gruppen mit Zugang zu dieser neueren Methodik – eine am Gray Laboratories in London und eine andere in Vancouver – haben an einer Reihe von Zelllinien aus menschlichen Tumoren demonstriert, daß eine inverse Dosis-effektbeziehung (oder Hypersensitivität der Zellen) existiert, und daß die Zellen etwa 20mal empfindlicher sein können als erwartet. Eine geringe, konditionierende Strahlendosis ruft Strahlenresistenz hervor, und mit Zunahme der konditionierenden Dosis geht die Überlebenskurve allmählich in die bekannte Schulter der konventionellen Überlebenskurve über.

Der zugrundeliegende Mechanismus für die Induktion der Strahlenresistenz wird als identisch mit dem zuvor erwähnten Adaptiven Response angesehen. Die beobachtete Homologie zwischen Säuger- und Nicht-Säugerzellen legt den Gedanken nahe, daß dieses in der geschichtlichen Entwicklung konservierte Streßresponse-Mechanismen sind. Der hypersensitive Zustand könnte entweder durch eine größere Anzahl von Läsionen oder verminderte Leistung des Reparatursystems zustandekommen, welches *de facto* die andere Seite der Medaille ist. In zunehmendem Maße mehren sich die Hinweise, daß die induzierte Resistenz des Adaptiven Responses auf verstärkter Reparaturaktivität beruht, und Substanzen wie Aminobenzarnid, welche die Reparaturmechanismen blockieren, das Fortdauern der Empfindlichkeit verursachen. Der eigentliche Aspekt im Hinblick auf stochastische Effekte niedriger Strahlenexposition – besonders wenn die Exposition unterhalb des festgestellten Dosisfensters für den Adaptiven Response liegt – ist, ob solche Dosen kanzerogene Ereignisse effektiver hervorrufen können. Ferner ist das Ausbleiben des Adaptiven Responses bei frühembryonalen Zellen und Spermatozyten Anlaß zur Besorgnis, da die epidemiologischen Hinweise die Relevanz sowohl des Ersttrimesters *in utero* als auch der väterlichen Exposition auf niedrige Strahlenexpositionen in Zusammenhang mit der Ätiologie kindlicher Leukämien unterstreichen.

## Fazit

Bei Betrachtung der stochastischen Effekte ionisierender Strahlung begegnet man einem

---

<sup>152</sup>Es ist momentan reine Spekulation, ob Chemikalien den gleichen Response hervorrufen können.

strahlenbiologischen Rätsel, welches vergleichbare erwartete Risiken von Expositionen sowohl niedriger als auch hoher Strahlendosen, mit großen Dosisunterschieden, aufzeigt. Der Effekt der natürlichen Hintergrundstrahlung bezüglich Krebserkrankungen ist umstritten. Offizielle Abschätzungen führen etwa 11% der Leukämien und 4% aller soliden Tumoren auf die Hintergrundstrahlung zurück<sup>153</sup>. Für diese Berechnungen sind die RERF-Daten zugrunde gelegt worden. Einige Studien aus geographischen Regionen mit höherer Hintergrundstrahlung haben auf erhöhte Krebsraten hingewiesen. Eine gesicherte Feststellung von Krebsrisiken durch Hintergrundstrahlung bleibt dennoch ein schwieriges Unterfangen aufgrund der erforderlichen statistischen Power, die bei derartigen epidemiologischen Studien sehr große Kohorten voraussetzt. Als niedrige Strahlendosen werden in diesem Gutachten Expositionen über dem natürlichen Hintergrund verstanden, mit einer Obergrenze von solchen Dosen, bei denen stochastische Effekte eher feststellbar sind. Bei diesem Wert, der sich 5 cGy (50 mGy) annähert, würden auch andere subtile (nicht stochastische) zelluläre Effekte feststellbar werden. Diese Definition niedriger Dosen ist selbstverständlich willkürlich.

Konventionelle Risikoabschätzungen stochastischer Effekte wurden bislang aus der Rückextrapolation von Daten aus intermediären und hohen Strahlenexpositionen erhoben, wobei man sich ausschließlich auf RERF-Befunde verlassen hat. Da die Dosisermittlungen in Hiroshima und Nagasaki mit großen Unsicherheiten verbunden sind, dürften diese im niedrigen Dosenbereich nach Extrapolation mit noch größerer Unsicherheiten zu erwarten sein. Eine Annäherung der Lösung des Problems wurde durch die Entwicklung von Modellen für die Rückextrapolation erreicht, um Risikoabschätzungen zu ermöglichen. Es liegen 5 verschiedene Modelle vor, und es besteht Konsens darin, daß die Dosis-Wirkungsbeziehung, die von 0 ausgeht, für solide Tumore linear bzw. für Leukämien linear-quadratisch ist. Das jüngste der Modelle befürwortet eine supra-lineare Beziehung, d.h. höhere Effekte bei niedrigen Dosen, wobei die Kurve anfangs einen konvexen Verlauf nimmt – entspricht einem spiegelbildlichen Verlauf des linear-quadratischen Modells – der bezüglich niedriger Dosen gegensätzlich zum linear-quadratischen Modell steht. Die übrigen zwei Modelle finden bei den meisten Strahlenbiologen keine Beachtung. Dies sind die Schwellen- bzw. "Hormesis"-Modelle. Das erstere Modell tritt für das Vorhandensein sicherer Dosen ein, während das letztere behauptet, daß geringe Dosen sogar positive gesundheitliche Effekte hervorrufen. Extrapolationen von epidemiologisch erhobenen Daten mögen aus formaler Sicht problematisch sein, sind aber andererseits die einzige Quelle menschlicher Daten.

Biologische Effekte niedriger LET-Strahlung werden durch die Dosisleistung wirksam modifiziert. Damit dieser Tatsache Rechnung getragen wird, hat die ICRP für den Zweck der Risikoabschätzung den DDREF mit einem Wert von 2 eingeführt, welcher zur Halbierung der berechneten Risiken für Dosen unter 20 cGy (0,2 Gy) bzw. höhere Dosen bei Dosisleistungen unter 10 cGy/h (0,1 Gy/h) führt. Dieser Korrekturfaktor ist für Hoch-LET-Strahlung nicht anwendbar. Bei niedrigen Dosen, wie in diesem Gutachten definiert, hat die Dosisleistung keinen

<sup>153</sup>UNSCEAR 1994: Sources and effects of ionising radiation, UNO, New York 1994.

Einfluß auf stochastische Effekte, aufgrund von mikrodosimetrischen Überlegungen, die die Querschnittsinteraktion von Ionisationsspuren zugrundelegen. Damit besteht der Unterschied zwischen Niedrig- und Hoch-LET-Strahlung darin, daß die erstere aus diskreten, einzelnen Spuren besteht und letztere aus der Häufung von Spuren. Ein weiterer erforderlicher Korrekturfaktor ist die RBW, welche ein Ausdruck der Effizienz der Hoch-LET-Strahlung gegenüber der Niedrig-LET-Strahlung (Referenzstrahlung) ist. Da die RBW von der Dosis und Dosisleistung abhängig ist - insbesondere bei Niedrig-LET - stellt sie keine konstante Größe dar. Folglich sollte die maximale RBW oder  $RBW_m$ , ermittelt durch den Vergleich der linearen Komponente der beiden Dosiswirkungskurven, angewandt werden.

Ein evtl. weiterer derzeit diskutierter Korrekturfaktor ist der experimentell erhobene Adaptive Response von Zellen auf niedrige Strahlendosen. Ein entsprechendes Dosisfenster wurde ermittelt, welches bei vorheriger Applikation zur Resistenzsteigerung gegenüber Bestrahlung führt. Die aufgezeigte Verminderung von Effekten wurde jedoch nicht bei allen Zelltypen und allen Individuen festgestellt. Zu beachten unter den Zelltypen, die keine Adaptive Response aufweisen, sind frühembryonale Zellen und Spermatozyten. Dosen über oder unter dem genannten Fenster für die Konditionierung sind unwirksam hinsichtlich einer Auslösung des Adaptive Response, und wiederholte Verabreichungen entsprechender Dosen führen nicht zu einer weiteren Steigerung der Strahlenresistenz. Vor der Auslösung des Adaptiven Responses sind Zellen etwa 20mal empfindlicher und wurden als hypersensibel bezeichnet. Der untersuchte Parameter war die Auslöschung der Replikationsfähigkeit. Die eigentliche Frage stellt sich, ob dieses auch für stochastische Effekte Geltung hat. Weiterhin ist ungeklärt, ob bei sehr niedriger Strahlenexposition die höhere Effektivität von Strahlungen niedriger LET mit der Hypersensitivität der Zellen interagieren und somit kanzerogene Ereignisse fördern.

### Bezug

- Anhang O: Beitrag von Wolfgang Köhnlein
- Anhang Q: Beitrag von Jürgen Kiefer
- Anhang P: Beitrag von Michael C. Joiner

## IV. 2. Zellbiologie der Strahlenwirkung

Im vorherigen Abschnitt wurden in allgemeiner Form einige der wichtigsten Aspekte niedriger Strahlenexposition mit Risikoabschätzungen stochastischer Effekte behandelt. In diesem Abschnitt wird versucht, eine Übersicht aktueller experimenteller Befunde aus dem Bereich der zellulären Strahlenbiologie darzulegen, um diese neueren Erkenntnisse für eine Erklärung des derzeitigen Rätsels der Strahlenbiologie, der Karzinogenität niedriger Strahlenexposition, anzuwenden. Seit der Formulierung der Treffertheorie durch Timoféeff-Ressovsky *et al.* in den 30er Jahren gilt die Vorstellung, daß die Strahlenwirkung durch Inaktivierung kritischer Targets



durch Treffer zustandekommt, und beherrscht das Denken physikalisch orientierter Strahlenbiologen bis zum heutigen Tage. Die zellulären Targets sind nie bestimmt worden, aber mit der Entdeckung der DNA wurde ein bestmöglicher Kandidat dafür geboten. Daraus entfachte sich eine bis vor kurzem übermäßige Beschäftigung mit der Wirkung ionisierender Strahlung auf isolierte DNA, zelluläres Chromatin, Gene und den Zellkern. Das Zytoplasma mit allen darin enthaltenen Organellen und Funktionen wurde vernachlässigt (darunter auch die extrazelluläre Matrix (ECM) und sogar das Gerüst des Zellkerns (Nuclear Scaffold), obwohl diese Zellkomponenten bekanntlich an der Regulierung von Zellfunktionen, einschließlich Genexpression beteiligt sind). Im Gegensatz dazu wußten die Biologen in der Krebsforschung die Bedeutung der interzellulären Kommunikation besser einzuschätzen (der ECM und anderer zellulärer Bestandteile, zusätzlich zu den Genen im Hinblick auf onkogene Ereignisse). Der beschränkende Faktor für den hiesigen Zweck ist der Mangel an Daten über die Wirkung niedriger Strahlenexposition (wie hier definiert) im Sinne meßbarer experimenteller Endpunkte. Die Bedeutung einer kürzlich erschienenen wegweisenden Arbeit (von Wu *et al.*, 1999) über Alphateilchen wird später behandelt.

#### IV. 2. 1. DNA-Schäden als klassische Grundlage der Strahlensensitivität

Ionisierende Strahlungen verursachen ein ganzes Spektrum von Schäden an der DNA, die keineswegs spezifisch sind, d.h. die gleichen Schäden können auch von anderen Agenzien hervorgerufen werden. Kennzeichnend ist jedoch, daß ionisierende Strahlungen alle diese Arten von Schäden gleichzeitig verursachen. Andere Agenzien weisen eher Spezifitäten bei den Schäden auf. Abhängig von LET dürfte auch die räumliche Nähe von Schäden zueinander eine Besonderheit ionisierender Strahlungen sein. Die Hauptarten von Schäden an DNA bestehen aus: veränderten Basen, fehlenden Basen, fehlerhaften Basen, Beulenbildung im DNA-Rückgrat aufgrund von Eliminierung bzw. Einfügung von Nukleotiden, Bildung von Pyrimidinquerverbindungen, Strangbrüchen, Strangquerverbindungen, DNA-Proteinquerverbindungen und Desoxyribosefragmenten. Jede dieser Läsionen kann von DNA-Reparatursystemen behoben werden.<sup>154</sup> Obwohl alle diese Läsionen repariert werden können sind für das Fortbestehen einer Zelle entscheidend: a) die Replikationstreue der Reparatur b) die Wahrscheinlichkeit unvollständiger Reparatur c) die Wahrscheinlichkeit der Fehlreparatur und d) die Lokalität des Fehlers (b,c), falls vorhanden. Die Folgen von Reparaturungenauigkeiten sind Mutationen und/oder der Zelltod (gewöhnlich Verlust der Replikationsintegrität). Für die Karzinogenese ist das zugrundeliegende Problem die Fehlreparatur und die darauffolgende

---

<sup>154</sup>Dieses Forschungsgebiet war und ist immer noch eines der am meist bearbeiteten Bereiche der Strahlenbiologie, und hierzu liegt eine umfangreiche Literatur vor. Hinweise auf Übersichtsartikel können im Anhang S, dem Beitrag von Christopher S. Lange, entnommen werden.

Mutagenese, eventuell gefolgt von weiteren Mutationen, welche insgesamt darauf hinwirken, die Zelle aus den normalen Regulierungszwängen zu befreien, um dem programmierten Zelltod<sup>155</sup> (Apoptose) zu entgehen und neoplastisch, möglicherweise auch invasiv/metastatisch zu werden.

Neoplasien sind monoklonalen Ursprungs, d.h. aus einer einzigen Zelle entstehend, die sich den normalen Mechanismen der Zellproliferation und Zelldifferenzierung nicht unterwirft. Neoplastische Zellen unterscheiden sich auch in den normalen Zell-Zell-Interaktionen, was letztlich zur Invasion und Metastasierung führt. Nach derzeitiger theoretischer Vorstellung sind immer multiple Ereignisse (bspw. Mutationen) erforderlich, um Malignität hervorzurufen. Es können bei Menschen Jahrzehnte zwischen derartigen Ereignissen liegen. Die normale Zellregulierung besteht aus einem Gleichgewicht zwischen der Exprimierung von Genen, die das Wachstum fördern und denjenigen, die das Wachstum inhibieren. Erstere können im allgemeinen als Onkogene und letztere als Suppressorgene bezeichnet werden. Die Mechanismen (Primärereignis) der Krebsprädisposition können klassifiziert werden als a) Inaktivierung der Suppressorgene der Keimbahn b) Aktivierung der Onkogene der Keimbahn c) DNA-Reparaturdefekte d) ökogenetische Merkmale (d.h. geerbte Störungen, die sich als Hypersensitivität gegenüber gewöhnlichen Karzinogenen äußern). Die ersten zwei Klassen bestehen aus vererbaren Anlagen, die zu familiären Krebserkrankungen führen deren Mechanismen allerdings weitgehend unaufgeklärt sind.

Hier beschränkend auf die Defekte der DNA-Reparatur, die sich zu lebensfähigen Mutanten weiter entwickeln oder zur Krebsentwicklung prädisponieren, ist jetzt bekannt, daß eine große Anzahl von Genen (und ihrer Produkte) im normalen "Haushalt" der DNA involviert sind. Defekte bzw. das Ausfallen von Produkten dieser Gene können zur neoplastischen Entwicklung führen, aufgrund neuer Mutationen, die aus der fehlerhaften DNA-Replikation entstehen. Die Persistenz von DNA-Schäden aufgrund des Fehlens eines Reparaturszympfades kann Fehlreparaturen oder Fehler anderer Art nachsichziehen. Eine Mehrzahl genetisch bedingter Erkrankungen als Folge von DNA-Reparaturdefekten sind untersucht worden. Die erstuntersuchte davon war *Xeroderma pigmentosum* (XP), Zellen solcher Patienten sind überempfindlich auf UV-Licht, weil ein Defekt bei den Exzisionsenzymen für die Entfernung von Thymidindimeren, eine Läsion typisch für die Wirkung von UV-B-Licht ist, besteht. *Ataxia telangiectasia* (AT) und *Cockayne'sches Syndrom* (CS) Patienten sind überempfindlich auf ionisierende Strahlung. Es wurde gezeigt, daß die Zellen von AT-Patienten die Reparatur von Schäden durch UV-Licht normal reparieren, aber nicht in der Lage sind, andere DNA-Läsionen, insbesondere Strangbrüche, verursacht durch Röntgenstrahlen, zu reparieren. Menschen, die an *Fanconi'scher Anämie* (FA) leiden, sind auch auf ionisierende Strahlung überempfindlich, der

---

<sup>155</sup>Die Bezeichnung "programmierter Zelltod" wurde ursprünglich benutzt für die zelluläre Seneszenz ("Zellalterung") und das darauffolgende Absterben von Zellkulturen aufgrund der Ausschöpfung des replikativen Potentials, welches als genetisch prädeterniniert angesehen wird.

Grund dafür ist, daß ihre Zellen prädisponiert sind, DNA-Querverbindungen zu bilden. Im Falle des *Bloom'schen Syndroms* (BS) sowie *Fragilen X-Syndroms* (FXS) sind die Zellen hohen Inzidenzen spontaner chromosomaler Brüche ausgesetzt, welche die Personen prädisponieren, auf ionisierende Strahlung überempfindlich zu reagieren. Bei all den genannten Erkrankungen sowie einigen weiteren, weniger verstandenen Störungen sind die Menschen stark prädisponiert, Krebs zu entwickeln. Diese genetischen Störungen werden im allgemeinen autosomal rezessiv vererbt. Die molekulare Charakterisierung der Defekte, vielleicht mit Ausnahme von XP, befindet sich in der Anfangsphase, und folglich sind die Mechanismen nicht bekannt.<sup>156</sup> Über die Empfindlichkeit der Träger dieser rezessiven Merkmale in einer Bevölkerung (Heterozygote) – sowie deren Allel-Frequenzen – ist nichts bekannt.

Gesundheitliche Störungen, die auf Defekte der DNA-Reparatur zurückzuführen sind, können als ein spezielles und besser untersuchtes Beispiel – aufgrund der übermäßigen Beschäftigung der Strahlenbiologen mit DNA als Kandidat für den gesuchten "Target" (Zielort) der Strahlenwirkung – eines generalisierten Phänomens ökogenetischer Merkmale gelten. Genetische Faktoren beeinflussen die Reaktionen einzelner Menschen auf kanzerogene Agenzien in der Umwelt. Ein typisches Beispiel ist *Epidermodysplasia verruciformis*, eine Erkrankung, bei der ultraviolette Strahlen und ein Papillomvirus als Co-Karzinogene wirken, um Plattenepithelkarzinome in erblich veranlagten Personen hervorzurufen. Genetische Faktoren, die die Antwort von Individuen auf Karzinogene in der Umwelt beeinflussen, können auch in Stoffwechselwegen, die zu De-Toxifizierung der Karzinogene führen, festgestellt werden. Ein Beispiel wäre der Polymorphismus des Zytochrom-P450-Gens: CYP1A1, CYP2D6 und CYP2E1 und seine Rolle bei der Suszeptibilität auf Lungenkrebs. Ein weiteres Beispiel wäre das Glutathion-Transferase (GST)-Gen. Dieser Gen-Polymorphismus bei den Kaukasiern wurde als GST M 1 (40%), GST T 1 (25%) und GST P 1 (16%) aufgezeichnet. Der Verlust eines dieser Gene führt zur besonderen Empfindlichkeit auf oxidativen Streß. Studien über Genpolymorphismus als Basis der Hypersensitivität auf verschiedene Umweltnoxen sowie der Prädisposition für neoplastische Entwicklungen haben begonnen, so daß in Zukunft mit zahlreichen neuen Erkenntnissen zu rechnen ist. Bei der Anzahl der Enzyme, die für die DNA-Überwachung und Wiederherstellung nach Schäden verantwortlich sind, ist zu erwarten, daß ein gewisser Anteil der allgemeinen Bevölkerung Mutationen in diesem System in sich trägt. Derartige Defizite prädisponieren und führen zu höheren Risiken bei Exposition auf Noxen einschließlich Strahlungen. Dieser Aspekt hat bislang auch bei der Festsetzung von Dosisgrenzwerten im Strahlenschutz noch keine Berücksichtigung gefunden. Allerdings mangelt es an Daten über den Anteil der Bevölkerung für eine differenzierte Betrachtung des Risikoausmaßes.

---

<sup>156</sup>Es ist zu erwähnen, daß etwa 8 XP-Gene sowie Gene von AT-Zellen kloniert worden sind, und ihre Aktivitäten werden noch *in vitro* analysiert. Daher ist ein Fortschritt im Verständnis dieser genetischen Störungen/Erkrankungen zu erwarten.

#### IV. 2. 2. Zytoplasmatische Reaktion auf Strahlenwirkung

Die Wirkung von Strahlung auf Zellmembranen war in früheren Jahren von größerem Interesse, geriet aber aufgrund der vorherrschenden Entwicklungen der Strahlenwirkungen auf Zellkern und DNA in Vergessenheit. Die Vorstellung, daß zytoplasmatische Effekte unbedeutend seien, wurde dadurch bekräftigt, daß die erforderlichen Strahlendosen, um die untersuchten Parameter (Membranfunktionen) zu quantifizieren, im allgemeinen wesentlich höher lagen als in Zellkern- bzw. DNA-Studien. Die derzeitige Wiederbelebung der Aufmerksamkeit für das Zytoplasma und sogar die extrazelluläre Matrix (ECM) ist auf den Fortschritt im Verständnis der Reaktionen biologischer Systeme auf toxische Stress-Faktoren zurückzuführen. Es ist inzwischen klar geworden, daß die Reaktion von Zellen auf ionisierende Strahlung – oder andere toxische Agenzien – vom Organisationsgrad abhängt, d.h. ob Zellen isoliert oder Bestandteil dichter interagierender Populationen sind und ob die Populationen homogen oder heterogen sind. Zell-Zell-Interaktionen sind von größter Wichtigkeit und ihrerseits wiederum abhängig von der Intaktheit der ECM, die einen integralen Teil des Zellmikromilieus ausmacht. Die Karzinogenese wird häufig als ein Mehrschritt-Prozeß dargestellt, und es wird gegenwärtig anerkannt, daß der Ablauf dieses Prozesses vom Mikromilieu abhängt, d.h. der Interaktionen betroffener Zellen mit den Nachbarzellen und mit der ECM, die aus einem makromolekularen, polymeren Maschenwerk besteht, an das die Zellen sich mittels Anhaftungsproteinen befestigen. Die Zwischenräume sind mit einer wässrigen Lösung verschiedenster Moleküle gefüllt, die erforderlich für die Aufrechterhaltung grundphysiologischer sowie zellregulatorischer Vorgänge sind. Bei normaler Funktion ist die Genexpression kein autonomes Ereignis, sondern Ergebnis der Wechselbeziehung zwischen Genom, Zytoplasma und der ECM.<sup>157</sup>

Strahleninduzierte stochastische Effekte müssen zunächst der Apoptose<sup>158</sup> entgehen, bevor

---

<sup>157</sup>Aufgrund ihrer Äquipotenz ist die ECM in der Lage, die Expression von Genen einzuleiten, wie dies oft bei Differenzierungsvorgängen etc. als Änderung im Zellphänotyp wahrgenommen werden kann. Es gibt Beispiele für die Auslösung der Kanzerogenese aufgrund einer unnatürlichen Zusammensetzung der Zelltypen im Mikromilieu oder anderer epigenetischer Faktoren. Die Umkehrsituation der Induktion von Normalität in potentiell maligne, transformierte Zellen wurde beispielhaft durch den Transfer von Maus-Teratokarzinomzellen in Blastozysten demonstriert. [Brinster, RL: Participation of teratocarcinoma cells in mouse embryo development. *Cancer Research* 36 (1976) 3412-341]

<sup>158</sup>Bei der Apoptose, welche den physiologischen Zellentod bedeutet, folgt das Absterben von Zellen nicht aufgrund einer Nekrose oder offensichtlicher toxischer Einwirkung. Apoptotische Zellen durchlaufen ultrastrukturell definierte Ereignisse, die zur Zell-Lyse führen. Dieses wird durch die Aktivierung bestimmter Gene herbeigeführt. Die Apoptose ist ein universales, in der Evolution konserviertes Phänomen und offensichtlich für die Eliminierung potentieller Krebszellen (transformierter Zellen) angedacht. Dies kommt in verstärktem Maße bei solchen Geweben vor, die hohem Zellumsatz unterworfen sind.

sich weitere Schritte einer Kanzerogenese ereignen können, da die Apoptose einen Kontrollmechanismus darstellt, der zur Eliminierung solcher Zellen führt. Sobald diese umgangen ist, müssen wachstumsregelnde (suppressive) Mechanismen im Zellmikromilieu ausgeschaltet werden, welches durch geeignete genomische Änderungen, d.h. die nicht planmäßige Umschaltung von Genaktivitäten, geschehen kann. Theoretisch ist jede Strahlendosis über 0 potentiell kanzerogen. Es ist nur eine Frage der Wahrscheinlichkeit, die bei niedriger Dosis entsprechend gering ist. Epidemiologische Studien haben gezeigt, daß niedrige Strahlenexpositionen vergleichbare Risiken hervorrufen wie hohe Expositionen (siehe Abschnitt III.1.2.1). Neuere experimentelle Befunde an Zellkulturen liefern die ersten Grundsteine fehlender biologischen Grundlagen. Die Anwendung von Alphateilchen als Mikrostrahlen (alpha particle microbeams) ist ein wichtiges Hilfsmittel für die Verabreichung von diskreten niedrigen Dosen (Anzahl des Teilchendurchtritts) auf definierte Bereiche einer Zelle. Damit wurde es möglich zu zeigen, daß die Bestrahlung des Zytoplasmas DNA-Mutationen hervorruft, die ein Profil aufweisen, das dem natürlichen Hintergrundtyp entspricht, während die Bestrahlung des Zellkerns grobe Multiloci-Mutationen erzeugt, wie es für Strahlenwirkung generell bekannt ist. Die Überlebensfähigkeit der Zellen im letzteren Fall ist gering, während ersterer durch hohe Überlebenschancen gekennzeichnet ist und damit eine höhere Krebswahrscheinlichkeit gegeben ist.<sup>159</sup> Im allgemeinen nimmt bei hohen Strahlendosen, wenn die Bestrahlung nicht auf einen Bereich der Zelle eingeschränkt ist, das Ausmaß der Zelltötung (Verlust an Replikationsintegrität) mit zunehmender Dosis logarithmisch zu. Damit wird der größte Teil der Dosis sozusagen "verschwendet". Andernfalls, bei niedrigen Dosen, ist die Zelltötung vernachlässigbar, obwohl der Zelltod durch Apoptose einen gewissen Ausgleich herbeiführt. Entscheidend ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich überlebensfähige fehlerhafte DNA-Reparaturen in die nachkommenden Zellgenerationen fortpflanzen.

Es ist bis heute nicht eindeutig festgestellt, ob im Zellgenom suprasensitive Stellen vorhanden sind, die als Trefferziele (Targets) einer Strahlenwirkung prädestiniert sind. Dennoch haben einige Untersuchungen nahe gelegt, daß die Anhaftungsstellen des Chromatins an der Membran des Zellkerns sowie am Gerüst des Zellkerns (nuclear scaffold) besonders empfindlich gegenüber Strahlenwirkungen sind.<sup>160</sup> Ob diese vorgestellten empfindlichen Stellen auch bei der Auslösung kanzerogener Ereignisse beteiligt sind, ist nicht bekannt. Diese Stellen der Chromatinanhaftung sind mit dem Zytoskelett der Zelle durch die Mikrofilamente und damit

---

<sup>159</sup>Wu, LJ *et al.*: Targeted cytoplasmic irradiation with alpha particles induces mutations in mammalian cells. Proceedings of the National Academy of Science, USA. 96 (1999) 4959-4964.

<sup>160</sup>Oleinick, NL *et al.*: Nuclear structure and the microdistribution of radiation damage in DNA. International Journal of Radiation Biology 66 (1994) 523-529.

mittelbar auch mit dem EMC durch bestimmte Membranproteine verbunden.<sup>161</sup> Die direkte Wirkung von Strahlung auf Hauptbestandteile des Cytoskeletts (Mikrofilamente, Mikrotubuli und intermediäre Filamente) ist an sich ohne merkbare Effekte, wobei nicht bekannt ist, welche Auswirkung diese auf dynamische Prozesse der De- bzw. Repolymerisation hat. Hierfür gibt es lediglich indirekte Indizien durch die Wirkung einiger Cytoskelettgifte auf die Strahlenempfindlichkeit von Zellen (Koloniebildungsfähigkeit). In gleichem Maße kann durch Modulation der ECM die Strahlenempfindlichkeit von Zellen beeinflusst werden.<sup>162</sup> In der vorher erwähnten Arbeit über die Mutagenität nach dem Durchtritt von Alphateilchen durch das Cytoplasma haben die Autoren als möglichen Wirkungsmechanismus die Bildung von freien Radikalen als Erklärung gesehen. Diese Erklärung wurde durch die Gabe von Dimethylsulfoxid (DMSO) belegt, das bei der Bestrahlung des Zellkerns wirkungslos blieb. Berechnungen der HWZ der freien Radikale sowie die Berücksichtigung der Entfernung der bestrahlten Stelle vom Zellkern unterstützten das Konzept der freien Radikale nicht. Eine evtl. Beteiligung des Cytoskeletts bei der Transduktion eines fernen Effektes berücksichtigten die Autoren nicht, obwohl dies wahrscheinlich ist.<sup>161</sup> Die vorgestellten Effekte auf das Cytoskelett an der bestrahlten Stelle innerhalb des Wirkungsbereiches der freien Radikale hatten ein deutliches Maximum im Dosisseffekt gezeigt. Dies steht im Einklang mit dem Postulat von Petkau (sog. Petkau-Effekt),<sup>163</sup> welches einen überproportionalen radiotoxischen Effekt für niedrige Strahlenfluenz aufgrund der niedrigeren gegenseitigen radikalen Vernichtung voraussagt.

Wie schon erwähnt, wird sowohl die Exprimierung von Mutagenität als auch die Karzinogenität vom Zell-Mikromilieu beeinflusst. Die Tiefe seiner Bedeutung zeigt sich am deutlichsten in den zwei komplementären Phänomenen, die "Bystander Effekt" bzw. "Good Samaritan Effekt" genannt worden sind, wobei letzterer in der Wirkung eigentlich das Gegenteil des ersteren ist. Beide Effekte unterstreichen die Fähigkeit von Zellen, negative (bystander) bzw. positive (good samaritan) Einflüsse auf Nachbarzellen zu übertragen. Die Fähigkeit von Zellen, unter toxischer Einwirkung erlittene Schäden mit nicht betroffenen Nachbarzellen zu teilen, wird

---

<sup>161</sup>Die Molekularbiologie des Zytoplasmas ist ein derzeit schnell wachsender Forschungsbereich. Verschiedene Eiweiße, die mit dem dynamischen Zytoskelettsystem verbunden sind, wurden charakterisiert, und es kommen ständig neue hinzu. Molekularbiologen haben – wie die Strahlenbiologen – sich übermäßig auf die DNA konzentriert. Ein stärkeres Bewußtwerden, daß eine ganzheitliche Annäherung unerlässlich ist für das Verständnis der Zellfunktion auf der Zell- bzw. Gewebsebene, einschließlich der Exprimierung von Genen. Bei dieser Bemühung ist es klar geworden, daß die Molekularbiologie des Zytoplasmas (einschließlich ECM) weitaus komplexer ist, als man sich je vorgestellt hat.

<sup>162</sup>Stevenson, AFG & Lange, CS: Extracellular matrix (ECM) and cytoskeletal modulation of cellular radiosensitivity. *Acta Oncologica* 36 (1997) 599-606.

<sup>163</sup>Graeb, R: The Petkau Effect: The devastating effect of nuclear radiation on human health and the environment. Four Wales Eighth Windows Co., New York, 1994.

als Bystander effekt genannt. Umgekehrt ist der Good Samaritan Effekt, wenn sich unbetroffene Nachbarzellen für die Rettung stark beschädigter, ansonsten nicht überlebensfähiger Zellen einsetzen. Der Bystander Effekt wurde bei niedriger Strahlenexposition mit Alphapartikeln beobachtet, da die Fluenz im Sinne der Anzahl des Partikeldurchtritts geregelt werden konnte. Little und Mitarbeiter<sup>164</sup> demonstrierten, daß zytogenetische Effekte, verursacht durch Alphapartikel im Dosisbereich von 0,03- 0,25 cGy (0,3-2,5 mGy), von getroffenen Zellen auf ihre Nachbarn übertragen wurden. Es wurde festgestellt, daß 30-50% der Zellen der gesamten Population erhöhte Raten von Schwesterchromatid-Austausch (SCE)<sup>165</sup> aufwiesen, obwohl weniger als 1 % der Zellen von den Alphapartikeln getroffen waren. Dieser Effekt konnte durch die Gabe von Lindan (Gammaisomer von Hexachlorcyclohexan), einem Gap-Junction-Hemmer,<sup>166</sup> verhindert werden. Da der Bystander Effekt in nicht konfluent (dicht) gewachsenen Zellkulturen ausbleibt, wird dadurch die Bedeutung der Zell-Zell-Interaktion hervorgehoben. Die Relevanz dieses Effekts hinsichtlich der Zelltransformation und neoplastischer Ereignisse wurde an einem System der *in vitro*-Mutagenese unter Verwendung von C3H10T1/2 (immortalisierter) Zellen nachgewiesen, die mit Beta-Partikeln bestrahlt wurden. Die unmittelbar benachbarten Zellen wurden mit einer 10fachen Häufigkeit als weiter entfernte Zellen transformiert, bei denen der Kontakt mit bestrahlten Zellen ausgeschlossen werden konnte.<sup>167,168</sup> Somit können epigenetische Effekte bei der Kanzerogenese in Zell-Zell-Interaktionen und anderen zellulären Mikromilieueinflüssen ihre Erklärung finden, zu denen biologisch aktive humorale Faktoren, wie Eicosanoide (Prostaglandine und Leukotriene), Zytokine und Chemokine zählen.

Obwohl bekannt ist, daß Eicosanoide und Cytokine als Antwort auf Strahleneinwirkung produziert werden<sup>169</sup> und bei Bystander- und Good Samaritan-Effekten Mitwirkung zugemutet

---

<sup>164</sup>Nagasawa, H & Little, JB: Induction of sister chromatid exchanges by extremely low doses of alpha-particles. *Cancer Research* 52 (1992) 6394-6396.

<sup>165</sup>Austausch von chromatischem Material zwischen den Tochterchromosomen als Folge genotoxischer Einwirkung.

<sup>166</sup>Azzam, EI *et al.* & Little, JB: Intercellular communication is involved in the bystander regulation of gene expression in human cells exposed to very low fluences of alpha particles. *Radiation Research* 150 (1998) 497-504.

<sup>167</sup>Sigg, M *et al.*: Enhanced neoplastic transformation in an inhomogenous radiation field: An effect of the presence of heavily damaged cells. *Radiation Research* 148 (1997) 543-547.

<sup>168</sup>Nagasawa H & Little JB: Unexpected sensitivity to the induction of mutations by very low doses of alpha-particle radiation: Evidence for a Bystander Effect. *Radiation Research* 152 (1999) 552 - 557.

<sup>169</sup>Siehe Radioprotectors: Chemical, Biological and Clinical Perspectives by Bump, EA & Malaker, K (Editors). CRC Press LLC, Boca Raton FL, USA. 1998.

wird, sind die Mechanismen unbekannt. Epigenetische Effekte zu begreifen, setzt ein fundiertes Verständnis der Zellbiologie komplexer Säugetiergewebe voraus.

Endogene Eicosanoide sind bioaktive Lipidprodukte der membrangebundenen Arachidonsäuren (AA) und werden in zwei hauptmetabolischen Pfaden synthetisiert: der eine ist der Cyclooxygenase(COX)-Pfad, der zu Prostaglandinen (PG) führt; der andere ist der Lipoxygenase-Pfad, der zu Leukotrienen (LT) führt. Obwohl interne sowie externe Stimuli, einschließlich Strahlungen, die Freisetzung von AA aus Membranen hervorrufen können, haben diese weder Einfluß auf den Metabolismus von AA noch auf die physiologische Wirkung der Eicosanoide. Die Eicosanoide sind an autokrinen Wirkungen beteiligt und bei sehr geringen Konzentrationen verantwortlich für eine Reihe zellphysiologischer Effekte. Die Bezeichnung "zytoplasmatischer Schutz" (cytoprotection) wurde zur Beschreibung der Schutzeffekte der PG eingeführt, die auch Strahlenschutz<sup>170</sup> verleihen. Eine Studie hat gezeigt, daß Strahlenschutz durch PG nur bei Zellen in Sphäroiden<sup>171</sup> und nicht in Monolayerkulturen wirksam ist.

Cytokine sind Polypeptide, die eine Reihe hormonähnlicher Substanzen einschließen. Sie beteiligen sich an zellulären Regulierungsprozessen und tragen letztendlich zur Homeostase (physiologische Gleichgewicht) bei<sup>172</sup>. Konstitutive und induzierte Cytokine üben autokrine, juxtakrine und/oder parakrine Funktionen aus<sup>173</sup>. Es wurde festgestellt, daß mehrere Cytokine den Verlauf der Strahlenschäden beeinflussen können. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, zwischen einem echten Strahlenschutzeffekt, wie er für PG bestimmt wurde, und einem positiven Einfluß aufgrund Erholungs- oder regenerativer Prozesse nach Strahlenwirkung zu unterscheiden. Einige Cytokine (Interleukine) verleihen tatsächlich echten Strahlenschutz, obwohl der größte Teil davon die Erholungs- oder regenerativen Prozesse positiv beeinflussen kann. Die meisten Untersuchungen haben sich schwerpunktmäßig mit solchen Cytokinen befaßt, die Relevanz bei der Regulierung der Hämatopoese aufweisen, aufgrund der Möglichkeiten der klinischen Anwendung im Bereich der Knochenmarktransplantation. Weitere Cytokine werden in der Zukunft entdeckt

---

<sup>170</sup>Die meisten Strahlenschutzsubstanzen vermindern DNA-Schäden, und somit wird die verbesserte, clonogene Fähigkeit erklärt. Obwohl PG Vergleichbares leistet, wurde festgestellt, daß die Strahlenschäden an DNA dadurch nicht vermindert wurden.

<sup>171</sup>Diese sind in Kultur hergestellte Zellaggregate, die Tumore simulieren sollen. Der springende Punkt ist, daß sich Zellen in Sphäroiden unter dreidimensionalen Wachstumsbedingungen finden, die natürlichen Situationen eher entsprechen – mit Ausnahme von Epithelzellen – verglichen mit dem zweidimensionalen Monolayer.

<sup>172</sup>Cytokines in health and disease, Second Edition. Remick, D.G. & Friedland J.S. (Eds.), Marcel Dekker Inc., New York, 1997.

<sup>173</sup>Zellregulierende Botenstoffe (Zytokine) werden von Zellen abgegeben, die auf die Zelle selbst wirken (Autokrin), auf nebenstehende Zellen wirken (Juxtakrin) oder auf andere benachbarten Zellen wirken (Parakrin).



werden, und ihre Fähigkeit, Strahlenwirkungen zu modulieren, insbesondere in Zusammenhang mit kanzerogenen Effekten niedriger Strahlenexposition, werden noch zu prüfen sein.

#### IV. 2. 3. Strahlen-Hypersensitivität embryonaler Zellen

Alle Organismen weisen unterschiedliche Empfindlichkeiten gegenüber Noxen in verschiedenen Stadien ihres Lebens auf. Maximale Toleranz ist bei Erwachsenen zu beobachten, vorausgegangen (Kindheit) und gefolgt (Senilität) von relativen Empfindlichkeiten. Die embryonale Phase weist sogar eine noch geringere Toleranz als im frühkindlichen Alter auf, d.h. maximale Intoleranz oder Empfindlichkeit. Obwohl dies Allgemeinwissen ist, ist es keine einfache Aufgabe, wissenschaftliche Erklärungen, unterstützt mit Beweisen, vorzulegen<sup>174</sup>. Folglich ist die hier angeführte Vorstellung, daß embryonale Zellen empfindlicher auf Strahlung reagieren – eine Behauptung, basierend auf einer logischen Schlußfolgerung der bekannten Empfindlichkeit von Embryonen – eine Sache, die unter Beweis gestellt werden muß. Zelluläre Strahlenempfindlichkeit wurde konventionell in Dosis-Wirkungstests charakterisiert, wobei die Inaktivierung der Koloniebildungsfähigkeit als Endpunkt diente. Ein gravierender Schwachpunkt dieses Testsystems ist die Voraussetzung, daß die Testzellen hohe klonogene Aktivitäten (plating efficiencies)<sup>175</sup> aufweisen müssen. Damit ist der Test kaum anwendbar für die Charakterisierung der Strahlenempfindlichkeiten euploider Zellen, d.h. Zellen gewonnen aus Gewebeexplantaten oder Biopsien. Aus diesem Grund sind keine Daten über vergleichende Strahlenempfindlichkeiten menschlicher Embryonen und Erwachsenengewebe zugänglich. Es können daher keine strahlenbiologischen Daten im Sinne von  $D_0$ ,  $D_q$  und  $n$  angegeben werden. Bei näherer Überlegung ist dieser Mangel nicht allzu schwerwiegend, weil das Testsystem selbst nicht einwandfrei ist. Es gibt keinen Beweis dafür, daß die *in vitro* ermittelten Werte denen *in vivo*

---

<sup>174</sup>Damarowski, M., Stevenson, A.F.G. & Wassermann, O.: Größte Gefahr für unsere Kleinsten, S. 56-65. Im Jahrbuch Ökologie 1997, Hrsgb Altner G. *et al*, Verlag C.H. Beck

<sup>175</sup>Die "plating efficiency" ist der Anteil der Klonogene in einer Zellpopulation. Eine hohe Anzahl Klonogene wird nur in immortalisierten und/oder transformierten Zellen vorgefunden, welche als Zelllinien bezeichnet werden. Die Immortalisation und Transformation wird in der Regel von cytogenetischer Änderung im Chromosomenkomplement begleitet und damit als aneuploid bezeichnet. Normale Zellen, die aus einem Gewebeexplantat anwachsen (Primärkultur), weisen keine chromosomalen Anomalien auf und werden als euploid oder diploid – hinweisend auf den normalen Chromosomensatz von  $2n$  somatischer Zellen – bezeichnet. Solche Zellen haben eine begrenzte Lebensdauer, d.h. sie haben ein definitives Replikationspotential *in vitro* und werden als Zellstämme bezeichnet. Menschliche Zellen sind gegen Transformation *in vitro* ziemlich resistent, und Vogelzellen sind noch resistenter. Andererseits durchlaufen Zellen von Nagetieren in der Regel *in vitro* spontane Transformationen.

entsprechen.<sup>176</sup> Schlimmer noch ist, die Erfahrung, daß es eine experimentelle Herausforderung ist, menschliche Zellen *in vitro* durch Bestrahlung zu transformieren. Daher müssen experimentelle Daten aus *in vitro*-Systemen mit genügend Zurückhaltung betrachtet und interpretiert werden. In den letzten Jahren wurden grundlegend verbesserte dreidimensionale Zellkultursysteme unter Verwendung natürlicher oder synthetischer ECM entwickelt (eine Disziplin, die als Tissue Engineering bezeichnet wird). Sie werden zur Zeit für toxikologische Untersuchungen erprobt. Strahlenbiologische Testmethoden haben sich diese Innovationen noch nicht zu eigen gemacht.

Der größte Teil der klassischen strahlenbiologischen Studien über den Embryo haben sich mit teratogenen Wirkungen beschäftigt. Trotz einer Fülle von Literatur hierüber, sind die Erkenntnisse keineswegs erschöpfend, da die embryonale Entwicklung bekanntlich einer der kompliziertesten Lebensvorgänge ist: Die Empfindlichkeit gegenüber toxischen Einwirkungen (Strahlung, Chemikalien usw.) ändert sich von Stadium zu Stadium, in Zusammenhang mit Differenzierungsvorgängen. Ferner können Unterschiede zwischen den Arten erheblich sein. Teratogene Studien sind seit einigen Jahrzehnten außer Mode geraten und die veröffentlichten Studien haben meist hohe Strahlendosen angewandt. Das Bewußtsein über biologische Effekte und begleitende gesundheitliche Risiken bei niedrigen Strahlenexpositionen ist eine neuere Entwicklung, und stochastische Effekte stehen dabei im Vordergrund. Dennoch können niedrigen Strahlendosen auch bestimmte deterministische Effekte hervorrufen, wie bspw. Entwicklungsstörungen des Gehirns, die durch Anwendung geeigneter Methoden zur Erfassung der Hirnfunktionen (z.B. Lernfähigkeit) quantitativ erfaßt werden können. Oft liegt der Schwellenwert dabei sehr niedrig. Weiterhin ist der Zeitfaktor kritisch bei der Induktion von Hirnschäden. Die RERF verfolgt eine Kohorte von Individuen, die *in utero* exponiert waren<sup>177</sup> (siehe auch Beitrag W von W.J. Schull). Insgesamt kann gesagt werden, daß sich geistige Behinderungen und/oder Mikroencephalien schon bei anfänglichen Dosen wie 1 cGy (10 mGy) manifestieren. Die empfindlichste Phase ist während der 8. bis 15. Woche postkonzeptioneller Entwicklung. Diese RERF-Befunde wurden in Tierversuchen bestätigt. Eine Studie an Meerschweinchen zeigte Verminderungen des Hirngewichtes schon bei einer Strahlendosis von 4 cGy (40 mGy).<sup>178</sup> Weitere Studien dieser Autoren gaben Hinweise auf einen Verlust an Hirngewicht von etwa 1 mg pro mGy. Die Entwicklung der Hirnrinde bei Säugetieren ist ein

---

<sup>176</sup>Mögliche Ausnahmen des klonogenen Testsystems sind diejenigen, die bestrahlte Wirtstiere als *in vivo*-Kultur anwenden, z.B. Assaysysteme hämatopoetischer Stammzellen (HSC) bzw. Leberstammzellen im Fettpolster, die sich in einem entsprechenden, natürlichen Mikromilieu befinden, besonders im Falle des HSC-Assays (Koloniebildung in der Milz).

<sup>177</sup>Schull, JW: Effects of Atomic Radiation: A half century of studies from Hiroshima and Nagasaki. John Wiley & Sons Ltd., New York, 1995.

<sup>178</sup>Wagner, KL *et al.*: Radiation induced microencephaly in guinea pigs. Radiation Research 132 (1992) 54-60.

komplexer Prozeß, der komplizierte Zell-Zell-Interaktionen zwischen Neuronen und Gliazellen sowie interneuronale Interaktionen während der sog. "Vernetzung" (connections) umfaßt. Während dieser Phase sind die Zellen äußerst empfindlich auf Strahlungen oder andere Toxika. Ein konservativer Meinungskonsens sieht einen Schwellenwert für offensichtliche Hirnschäden bei 10 cSv (0,1 Gy), aber keine untere Grenze für funktionelle Störungen (immer von der Empfindlichkeit der Endpunkte abhängig). Im Gegensatz zur hohen Empfindlichkeit embryonaler Hirnzellen ist neuronales Gewebe bei Erwachsenen hoch strahlenresistent.

Die Diskussion über die Hypersensitivität embryonaler Zellen verschärft sich, wenn über die perinatale Mortalität in Zusammenhang mit Umweltstrahlenexpositionen berichtet wird; dies sollte angemessene Berücksichtigung finden. Ein Vorreiter in epidemiologischen Untersuchungen dieser Art war Sternglass,<sup>179</sup> der solche Daten in den Neu-Englandstaaten in USA nach den oberirdischen Atombombentesten in Nevada erhob. Studien dieser Art wurden und werden noch immer von der Mehrheit wissenschaftlicher Kreise als "schlichtweg ketzerisch" angesehen, weil die ermittelten Dosen für die Bevölkerung unzureichend seien um den genannten Effekt hervorzurufen, welcher in konventionellem Sinne ein deterministischer Effekt ist mit Mortalität als Endpunkt! Zudem habe Sternglass selbst keine Dosisermittlungen<sup>180</sup> durchgeführt – und hätte er dies getan, wäre es - aufgrund tradierter strahlenbiologischer Vorstellung - wenig hilfreich gewesen!

Auch wenn die strahlenbiologische Erfahrung aus Erkenntnissen an erwachsenen Tieren stammt, bildet sie die Grundlage für deterministische Effekte sowie für die geschätzten LD<sub>50</sub>-Werte. Auch der niedrigste dieser Werte fällt in den Bereich hoher Dosen. Da die errechneten Expositionen aus Umweltkontaminationen in der Regel am unteren Ende des Niedrig-Dosisbereiches (wie oben definiert) liegen, halten Experten es für unmöglich, den enormen Dosisunterschied über einige Größenordnungen anzuerkennen, um die perinatale Mortalität auf die Strahlenexposition zurückzuführen. Eine schwerwiegende Vernachlässigung (mangels Erhebung) liegt in dem vollständigen Mangel an Autopsien und pathologischer Daten.

Die Strahlenbiologie in der heutigen Zeit kann es sich nicht länger leisten, die Befunde von

---

<sup>179</sup>Sternglass, EJ: Radioactivity. Chapter 15 of Environmental Chemistry, Seite 477-515. Hrsg. JO'M Bockris, Plenum Press, New York 1977. Der Beitrag beinhaltet viele publizierte Daten von Sternglass.

<sup>180</sup>Hierzu muß angemerkt werden, daß das US-Department of Energy (DOE) zuständig war und Informationen über die meteorologischen Verhältnisse im Zusammenhang mit Fallout innerhalb der Vereinigten Staaten geheimgehalten hat. Erst kürzlich sind Auszüge in Berichten des National Cancer Institutes veröffentlicht worden: Estimated Exposures and Thyroid Doses Received by the American People from Iodine-131 in Fallout following the Nevada Atmospheric Nuclear Bomb Tests. Die Karten zeigen, daß die radioaktive Wolke über die Neu-Englandstaaten zog, aus denen Sternglass seine Befunde erhob.

Sternnglass beiseite zu schieben, denn vergleichbare Ergebnisse wurden in Großbritannien<sup>181</sup> und nach der Tschernobyl-Katastrophe auch in Deutschland<sup>182, 183</sup> und anderen europäischen Ländern, die meßbare Kontaminationen erlitten, erhoben.<sup>184</sup> Die Untersuchung von Körblein und Küchenhoff in Deutschland hat nach Trendanalysen der Daten zur perinatalen Mortalität zwei signifikante Abweichungen aufgezeigt, die mit den zwei Spitzenwerten des radioaktiven Cäsiums in der Umwelt aus Messungen der Milch übereinstimmen. Kritisiert wurde diese Studie aufgrund einer fehlenden Darstellung der Dosis-Wirkungsbeziehung. Zwei darauffolgende Studien, durchgeführt von Scherb und Mitarbeitern, haben erstens die Studie von Körblein und Küchenhoff für Deutschland bestätigt<sup>183</sup> und zweitens verglichen sie die Jahres-Totgeburtsraten in vom Tschernobyl-Fallout radioaktiv kontaminierten Ländern (Schweden, Polen, Ungarn und Griechenland) mit nicht kontaminierten Ländern (Portugal, Spanien, Irland, Frankreich und die Benelux-Länder) nach dem Tschernobylunfall<sup>184</sup>. Sie entdeckten eine signifikante, anhaltende Zunahme der Totgeburten in den kontaminierten Ländern seit 1986 bis zum Ende der Studienzeit 1993. Wie schon ausgeführt, ist diese Situation vergleichbar mit den epidemiologischen Studien zur Strahlenonkogenese. Diese Daten über die perinatale Mortalität weisen auf die hohe Wirksamkeit niedriger Strahlendosen hin, die fötale Überlebensfähigkeit (analog zum onkogenen Potential niedriger Strahlendosen) herabzusetzen.

Es ist nicht bekannt, ob ein Schwellenwert für diesen Effekt existiert und über eine adäquate Zuordnung dieses Effektes – deterministisch bzw. stochastisch – im Rahmen der Strahlenbiologie nachgedacht werden muß. Grundsätzlich müssen die Zellen betroffen sein und an Funktionstüchtigkeit verlieren, ehe ein Organ bzw. Organsystem zugrundegeht und der Tod des Organismus eintreten kann. Da die hier infrage kommenden Dosen sehr niedrig sind, spiegeln sie die extreme Empfindlichkeit der embryonalen Zellen wider. Die Doktrin der Dosis-Wirkungsbeziehung behält seine Gültigkeit solange, wie die betrachteten Effekte auf dem gleichen Wirkungsmechanismus beruhen. Da die biologischen Reaktionen auf niedrige Strahlenexpositionen wahrscheinlich auf anderen Mechanismen beruhen als auf direkte genomische Effekte, ist das persistente Verlangen nach Hinweisen auf eine Dosis-Wirkungsbeziehung nicht unbedingt so wissenschaftlich wie es erscheint.

Eine andere, zuvor erwähnte Situation, welche auch die Hypersensitivität embryonaler

---

<sup>181</sup>Whyte, RK: First day neonatal mortality since 1955: Re-examination of the Cross hypothesis. *British Medical Journal* 304 (1992) 343-346.

<sup>182</sup>Körblein, A & Küchenhoff, H: Perinatal mortality in Germany following the Chernobyl accident. *Radiation and Environmental Biophysics* 36 (1997) 3-7.

<sup>183</sup>Scherb, H. *et al.*: Regression analysis of time trends in perinatal mortality in Germany 1980 - 1993. *Environmental Health Perspectives* 108 (2000) 159 -165.

<sup>184</sup>Scherb, H *et al.*: European still birth proportions before and after the Chernobyl accident. *International Journal of Epidemiology* 28 (1999) 932 - 940.

Zellen widerspiegelt, ist die *in utero*-Induktion von Krebs. Die Krebse (insbesondere Leukämie) manifestieren sich im frühkindlichen Alter. Abgesehen von medizinischen Expositionen *in utero*, wurde über die Korrelation zur natürlichen Hintergrundstrahlung berichtet.<sup>185</sup> Vor kurzem wurde über die Assoziation kindlicher Leukämien mit dem Fallout aus Tschernobyl in einer radioaktiv verseuchten Region in Griechenland berichtet.<sup>186</sup> Eine Überprüfung dieses Sachverhaltes durch das Kinderkrebsregister an der Universität Mainz bestätigte diesen Befund auch für Deutschland.<sup>187</sup> Die Autoren erhoben jedoch Zweifel an der Richtigkeit der Aussage wegen fehlender Dosis-Wirkungsbeziehungen, d.h. die stärker kontaminierten Gegenden wiesen keine höhere Risiken auf. Diese Autoren sind jedoch der Frage nicht nachgegangen, ob in den stärker kontaminierten Gegenden Aborte bzw. perinatale Mortalitäten in erhöhtem Maße auftraten. Dies ist ein Versäumnis und geschah vermutlich aufgrund der derzeit herrschenden strahlenbiologischen Fachmeinung, daß derartige Dosen grundsätzlich zu niedrig seien, um die genannten Effekte hervorzurufen. Die Prinzipien und Mechanismen solcher biologischer Reaktionen auf Strahlung sind kaum aufgeklärt. Da in der Evolution das Leben stets ionisierender Strahlung ausgesetzt war – und anfangs sicherlich wesentlich intensiver – haben biologische Systeme komplizierte Mechanismen entwickelt, um den Effekten entgegenzuwirken. Einige davon, wie die DNA-Reparatursysteme, Apoptose etc., sind aktuelle Forschungsthemen. Auch das Zytoplasma ist mit Reparatursystemen ausgestattet, die sich noch im Frühstadium der Forschung befinden (wie z.B. die Hitze-Schock-Proteine). Derzeitige Erkenntnisse weisen gerade auf die Spitze des Eisbergs. In der Zukunft werden mehr Mechanismen ans Licht kommen und zur Erhellung der gegenwärtig als unmöglich erklärten Sachverhalte beitragen.

#### IV. 2. 4. Strahlenhypersensitivität der Gametozyten

Bei Menschen und anderen Säugetieren wird die Oogenese während der foetalen Entwicklung initiiert, sodaß bei der Geburt die Gesamtzahl der Oozyten, die bis ins Erwachsenenleben bestehenbleiben, feststeht, arretiert in der Meiose mit einem chromosomalen Komplement von  $4n$ . Die Eizelle oder der weibliche Gamet mit haploidem Chromosomensatz ( $1n$ ) entsteht durch zwei hormonell gesteuerte Reifeteilungen, wobei das erste und zweite Polkörperchen abgesondert werden. Das erste Polkörperchen wird beim Eisprung abgesondert

---

<sup>185</sup>Kneale, GW & Stewart, AM: Chapter 16. Childhood cancers in the UK and their relation to background radiation, pages 203-220. In Radiation and Health by R. Russel and R. Southwood, Eds., John Wiley & Sons Ltd., 1987.

<sup>186</sup>Petridou, E *et al.*: Infant leukaemia after *in utero* exposure to radiation from Chernobyl. Nature 382 (1996) 352-353.

<sup>187</sup>Michaelis, J *et al.*: Infant leukaemia after the Chernobyl accident. Correspondence. Nature 387 (1987) 246.

und das zweite beim Eindringen eines Spermiums durch die *Zona pellucida* ins Ooplasma. Die erhöhte Strahlenempfindlichkeit von Zellen während der mitotischen Phase ist seit langem bekannt, und die Induktion numerischer Chromosomenaberrationen wurde bei niedrigen Strahlenexpositionen an somatischen Zellen<sup>188</sup> sowie an den besonders empfindlichen Oozyten der Maus<sup>189</sup> demonstriert. Als zugrundeliegender Mechanismus wird die Strahlenwirkung auf den Spindelapparat gedacht, der für die gleiche Teilung der Chromosomen zwischen den Tochterzellen verantwortlich ist. Der Spindelapparat in reifenden Oozyten – zur Zeit der Polkörperbildung – scheint besonders empfindlich zu sein im Zusammenhang mit der Entstehung von Trisomie 21 beim Menschen, wie in einigen umwelttoxikologischen Studien dokumentiert. Ein erhöhtes Vorkommen von Trisomie 21 wurde in geographischen Gegenden mit höherer Hintergrundstrahlung, wie in den Küstengebieten von Kerala<sup>190</sup> in Indien und einigen Gegenden in China<sup>191</sup>, festgestellt. Diese älteren Studien wurden aus verschiedenen Standpunkten kritisiert. Eine zufällige Beobachtung am Institut für Humangenetik der Freien Universität in Berlin<sup>192</sup> und die daraufhin veranlaßte Nachfrage bei allen humangenetischen Einrichtungen in Deutschland führten zu der Aufdeckung, daß etwa 9 Monate nach der Tschernobyl-Katastrophe die Häufigkeit von Trisomie 21 in Berlin sowie anderen kontaminierten Teilen Deutschlands erhöht vorkam. Sorgfältiges Recherchieren wies darauf hin, daß etwa zur Zeit der Ovulation über Berlin eine Jod-131-radioaktive Wolke zog. Wie vorher schon erwähnt, wird elementares Jod-131 hocheffizient durch Inhalation aufgenommen. Die Strahlendosen der Ovarien konnten nicht ermittelt werden und müssen als sehr niedrig (sicherlich unter 1 cGy) angenommen werden, auch unter Berücksichtigung der reichlichen Versorgung der Ovarien mit Blut. Der wahrscheinliche Mechanismus (Schaden am Spindelapparat) ist nichts weiter als ein zytoplasmatischer Effekt, da der Spindelapparat lediglich eine vorübergehende Konstellation des Zytoskeletts ist, mit der Aufgabe der gleichmäßigen Verteilung der Chromosomen. Es ist nicht bekannt, ob der

---

<sup>188</sup>Waldren, C *et al.*: Measurement of low levels of X-ray mutagenesis in relation to human disease. Proceedings of the National Academy of Science, USA, 83 (1986) 4834-4839.

<sup>189</sup>Tease, C & Fischer, G: X-ray induced chromosome aberrations in immediately pre-ovulatory oocytes. Mutation Research 173 (1986) 211-215.

<sup>190</sup>Kochupillai, N *et al.*: Down's syndrome and related abnormalities in an area of high background radiation in coastal Kerala. Nature 262 (1976) 60-61. Die in der Fußnote 139 zitierte neuere Veröffentlichung von Cheriyan *et al* zu Chromosomen-Veränderungen in der Bevölkerung der Küstengegend von Kerala geht nicht in die Problematik der Trisomie 21 ein.

<sup>191</sup>High Background Radiation Research Group: Health survey in high background radiation areas in China. Science 209 (1980) 877-880.

<sup>192</sup>Sperling, K *et al.*: Significant increase in trisomy 21 in Berlin nine month after the Chernobyl reactor accident: Temporal correlation or causal relation? British Medical Journal 309 (1994) 158-162.

Spindelapparat als solcher oder nur an den Verbindungsstellen so extrem empfindlich ist.

Die Produktion der männlichen Gameten (Spermien, im Gegensatz zum weiblichen Gameten) ist ein kontinuierlicher Prozeß, der bei der Pubertät anfängt und sich, später vermindert, bis ins hohe Alter fortsetzt. Durch den Zellenumsatz ist eine hierarchische Organisation des Gewebes in Stammzellen, Vorläufer und Reifungsstadien die biologische Konsequenz. Die Stammzellen (Spermatogonien) bestehen aus zwei Subpopulationen, die als A und B bezeichnet werden, die eine ist strahlenresistenter als die andere. Die weiteren proliferativen und differenzierenden Schritte werden in zwei Hauptstadien unterteilt, obwohl der Prozeß kontinuierlich ist. Die direkten Nachkommen der Spermatogonien haben wie jede andere somatische Zelle einen  $2n$ -Chromosomensatz. Nach einer Anzahl von Replikationen gehen die Zellen in die Meiose über. Die Primärspermatozyten ( $4n$ ) stellen den Ausgangspunkt der Meiose dar. Sämtliche proliferativen Schritte, vom Spermatogonium bis zu primären Spermatozyten, wurde als Spermatozytogenese bezeichnet. Die primären Spermatozyten stellen die sekundären Spermatozyten ( $2n$ ) her, und nach der Reduktionsteilung entstehen die haploiden ( $1n$ ) Spermiozyten, die komplizierte, zeitlich präzise Differenzierungsschritte mit etwa 14 oder 15 morphologisch deutlich charakterisierte Stadien durchlaufen, um zum Schluß in die morphologisch transformierten Spermatiden, die weiter zu Spermien reifen, führen. Dieser Prozeß wird als Spermio-genese bezeichnet. Spermatozytogenese und Spermio-genese dauern ca. 70 Tage beim Menschen, bevor reife Spermien aus den *Tubuli seminiferi* (Samenkanälchen) abgesondert werden. Bei Mäusen beträgt diese Zeit etwa die Hälfte.<sup>193</sup>

Die Strahlenempfindlichkeit (hinsichtlich Zelltötung) der verschiedenen Zelltypen von Spermatogonien bis zu reifen Spermien schwankt erheblich. Besser untersucht unter den verschiedenen Zelltypen sind die spermatogonialen Stammzellen, die insgesamt als relativ strahlenresistent gelten, nach der Beurteilung aus Regenerationsstudien nach Strahleneinwirkung (Entleerung der Samenkanälchen) und durch quantitative Stammzellen-Untersuchungen aus *in toto*-Präparaten der regenerierenden Samenkanälchen. Spermien werden auch als strahlenresistent angesehen, weil sie in ihrer Beweglichkeit nicht leicht inaktiviert werden und damit ihre Befruchtungsfähigkeit beibehalten. Diese Eigenschaft der Spermien sollte jedoch nicht verwechselt werden mit der Fähigkeit, DNA- bzw. Chromatinschäden zu beseitigen. Da sie haploide Zellen sind, haben sie von Natur aus eine verminderte Reparaturfähigkeit, DNA-Schäden durch ionisierende Strahlungen zu eliminieren, und das gleiche gilt auch für alle anderen haploiden Reifungsstadien. Die Strahlenempfindlichkeit dieser Stadien ist nicht bekannt. Die vorher

---

<sup>193</sup>Ein erheblicher Teil der früheren Studien über die Strahlenempfindlichkeit der Zelltypen und die Kinetik der Regeneration bei der Maus wurde durch Oakberg und Clermont durchgeführt. Darauf folgende Studien wurden durch Meistrich und quantitative Arbeiten über Stammzellen durch de Ruiter-Bootsma durchgeführt. Für wichtige Publikationen dieser Autoren sowie eine modifizierte, schematische Darstellung der differenzialen Strahlenempfindlichkeit und Zellkinetik bei der Maus, siehe Meistrich, ML *et al.*: Gradual regeneration of mouse testicular stem cells after exposure to ionising radiation. *Radiation Research* 74 (1987) 349-362.

genannten Fälle kindlicher Leukämien, die in Zusammenhang mit der väterlichen Exposition mit niedrigen Strahlendosen, entweder durch medizinische Maßnahmen oder durch Exposition am Arbeitsplatz, gebracht wurden, werden mit verschiedenen Fragen konfrontiert. Da diese Möglichkeit der Leukämieinduktion aufgrund väterlicher Exposition nicht ausgeschlossen werden kann, muß auch nach einer biologischen Erklärung gesucht werden. Es besteht kein Zweifel daran, daß Spermien als Träger von Mutationen dienen. Die herausfordernde Frage ist, ob ein bestimmtes Stadium in der Zellhierarchie (Spermatozytogenese/Spermiogenese) besonders empfindlich ist und sich für die Fixierung einer Mutation bei sehr niedriger Strahlenexposition eignet, die zur Entwicklung kindlicher Leukämien führt.

#### IV. 2. 5. Strahleninduzierte Genominstabilität

Die Genominstabilität wurde seit längerem als eine Eigenschaft von Krebszellen erkannt, und die Systematisierung zytogenetischer Änderungen, die bestimmte Krebsarten entweder als Ergebnis einer Behandlung oder spontan durchmachen, wurde genutzt, um Voraussagen über den Erfolg einer Therapie und über die Progression der Malignität zu machen. Obwohl dieses Phänomen in letzter Zeit die Aufmerksamkeit von Strahlenbiologen und Onkologen auf sich zog, wurde seine Manifestierung in einigen älteren Studien aufgezeichnet, ohne daß die Bedeutung erkannt wurde.<sup>194</sup> Das Verdienst, dieses grundlegende Phänomen durch zwei bedeutsame Arbeiten ins Rampenlicht aktuellen Forschungsinteresses gebracht zu haben, geht an Kadhim *et al.*<sup>195, 196</sup> Von diesen Autoren beobachtet und jetzt als Basis für die Definition genomischer Instabilität, ist die *de novo* Zunahme, erworbener Genomänderungen in den Nachkommen betroffener Zellen, welche sich als Mutationen, Genamplifikationen oder chromosomale Aberrationen äußern können. Dieses plötzliche Auftreten erhöhter chromosomaler Aberrationen konnte in den Nachkommen

---

<sup>194</sup>Genealogische Untersuchungen an Nachkommen bestrahlter Zellen haben das plötzliche halbsymmetrische Absterben von Zellen festgestellt [Trott, KR & Hug, O: Intraclonal recovery of division probability in pedigrees of single x-irradiated cells. *Int. J. Radiat. Biol.* 17 (1970) 483-486]. Weissenborn & Streffer waren eigentlich die ersten, die eine Zunahme chromosomaler Aberrationen nach einigen Zellteilungen demonstrieren konnten, aber weil sie Mäusezygoten bestrahlten, konnten sie nur die ersten paar Zellteilungen untersuchen. Ihre Beobachtungen konnten nicht weitergeführt werden aufgrund der natürlichen Einschränkung des Modells. [Weissenborn, U & Streffer, C.: The one cell mouse embryo: Cells cycle dependent radiosensitivity and development of chromosomal anomalies in post-irradiation cell cycles. *Int. J. Radiat. Biol.* 54 (1988) 659-674].

<sup>195</sup>Kadhim, MA *et al.*: Transmission of chromosomal instability after plutonium alpha particle irradiation. *Nature* 355 (1992) 738-740.

<sup>196</sup>Kadhim, MA *et al.*: Radiation-induced genomic instability: Delayed cytogenetic aberrations and apoptosis in primary human bone marrow cells. *International Journal of Radiation Biology* 67 (1995) 287-293.



bestrahlter Zellen in Zellkulturen sogar 30 bis 40 Zellgenerationen später nachgewiesen werden. Analog hierzu sind Experimente an Mäusen, in denen Zygoten (eine Stunde nach Konzeption) *in utero* bestrahlt und kurz vor der Geburt Haut-Explantate von den Föten entnommen worden sind. Aus den Explantaten wurden Zellkulturen angelegt und aus Fibroblasten die Chromosomen analysiert. Die Zellen von den bestrahlten Zygoten wiesen erheblich mehr chromosomale Veränderungen im Vergleich zu den nicht bestrahlten Kontrollen.<sup>197</sup> Es ist bekannt geworden, daß genetisch bedingte gesundheitliche Störungen bei Menschen, die auf ionisierende Strahlungen hypersensibel reagieren, zusätzliche Genominstabilitäten aufweisen. Die Arten der chromosomalen Aberrationen, beobachtet bei den Nachkommen bestrahlter Zellen, werden als vergleichbar mit denen in Krebszellen während des Krankheitsverlaufes bescheinigt, eine Entwicklung, die auf Genominstabilität zurückgeführt wird.<sup>198</sup> Die vorher zitierten Arbeiten von Kadhim *et al.* zeigen, daß die genomische Destabilisierung, provoziert durch Strahlung, – zumindest bei Alphateilchen – unabhängig von der Dosis war, d.h. geringe Dosen hatten das gleiche Potential oder waren vergleichbar wirksam wie höhere Dosen. Diese Befunde unterstützen die zuvor beschriebene Vorstellung (siehe oben), daß niedrige Strahlendosen eine höhere onkogene Wirksamkeit vorweisen. In einer gerade veröffentlichten Arbeit konnte von Kadhim *et al.* weiterhin gezeigt werden, daß die Einwirkung eines einzigen Alpha-Teilchens, bei den Nachkommen von menschlichen Zellen (nach 12 - 13 Populationsverdoppelungen) vermehrte Chromosomenveränderungen auftreten.<sup>199</sup> Dieses gibt Anstoß, über alternative Wirkungsmechanismen nachzudenken, andere als die konventionellen Konzepte der DNA-Schädigung, gefolgt von Genmutationen. Epigenetische Mechanismen spielen vermutlich eine wesentlich größere Rolle, als zur Zeit angenommen wird.

Die Genominstabilität bietet eine neue Grundlage für das Verständnis der strahleninduzierten Onkogenese und der Ätiologie verschiedener genetisch bedingter gesundheitlichen Störungen beim Menschen. Ein wenig verstandener Aspekt der Strahlenätiologie von Leukämien und anderen Krebsen sind die Latenzzeiten. Auf die Leukämien beschränkt, muß angenommen werden, daß abhängig vom Typus entweder Stammzellen oder Vorläuferzellen der jeweiligen Zellkompartimente transformiert werden müssen. Sollten multipotente Stammzellen involviert sein, ist es eine Frage der Stochastik, ob eine Stammzelle die erforderlichen genomischen Impulse für eine Transformation erhält. Sollte diese zustandekommen, ist es dann

---

<sup>197</sup>Wright, E.G: Inherited and inducible chromosomal instability: A fragile bridge between genome integrity mechanisms and tumorigenesis. *Journal of Pathology* 187 (1999) 19 - 27.

<sup>198</sup>Dieses ist eine weiterer Hinweis auf ein grundlegendes Prinzip der Strahlenwirkung – besonders im Hinblick auf die Kanzerogenese – daß Strahlungen natürlich vorkommende stochastische Vorgänge verstärken.

<sup>199</sup>Kadhim, M. A. *et al.*: Long-term genomic instability in human lymphocytes induced by single-particle irradiation. *Radiation Research* 155 (2001) 122 - 126.

wiederum eine Frage der Wahrscheinlichkeit, ob eine betroffene Stammzelle zur Zellteilung angeregt wird. Es gibt offensichtlich keine Einschränkung über die Anzahl der Mitosen, die erforderlich wären, damit ein eingeleitetes destabilisierendes Ereignis ein kritisches Stadium erreicht und die Zelle und ihre Nachkommen Eigenschaften akquirieren, die zur Befreiung von örtlichen Regulierungsfaktoren führen und zur offensichtlichen Manifestation der Transformation, im Sinne von unkontrollierter Zellproliferation (klinisch jetzt als präleukämisch erkennbar), führt. Die andere Möglichkeit, daß die betroffenen Zellen Vorläuferzellen sein könnten, stellt ein Problem der Erklärung der Latenzzeit dar, weil Vorläuferzellkompartimente normalerweise nicht selbsterhaltend sind. Derartige Vorläuferzellen können daher nicht uneingeschränkt verweilen. Als alternative Möglichkeit ist es vorstellbar, daß Zellen des Mikromilieus (Stromazellen) Strahlenschäden erhalten, die nicht beseitigt werden können und dadurch der Einheit des Mikromilieus die Fähigkeit verleihen, destabilisierende Impulse auf hämatopoetische Vorläuferzellen während der Differenzierungsvorgänge zu übertragen. Die initialen Schäden an den Mikromilieuzellen könnten unbestimmte Zeit bedürfen, um das induktive onkogene Potential zu erlangen. Die wenigen Studien, die direkte Hinweise liefern, wurden mit Alphateilchen durchgeführt, um dieses Postulat der Latenzzeit zu erklären und tragfähig zu machen. Es ist somit ein offenes Feld für Strahlenbiologen, dieses in Zusammenhang mit Strahlungen anderer Qualitäten zu untersuchen.

### Fazit

Zusätzlich zu Strahlenqualität, Dosis, Dosisleistung und Zellzyklusstadium, die bekanntlich alle die Antwort von Zellen und Gewebe auf Strahlung beeinflussen, müssen weitere biologische Aspekte berücksichtigt werden, bevor eine Bewertung über die Empfindlichkeit von Zellen oder Gewebe auf ionisierende Strahlung vorgenommen werden kann. Dieses wurde in den letzten 5 Unterabschnitten ausgeführt. Die natürliche Streuung der Strahlenempfindlichkeit in der Bevölkerung ist nicht bekannt. In jüngster Zeit sind eine Mehrzahl genetisch bedingter gesundheitlicher Störungen in Zusammenhang mit Defekten im DNA-Reparatursystem gebracht worden, welche oft Ergebnis eines oder mehrerer Defekte durch Mutationen sind, die sich als Verlust von Reparaturenzymen äußern. Eine Hypersensitivität gegenüber Strahlung mit korrelierter Prädisposition zur Krebsentwicklung ist das Nettoergebnis. Die verantwortlichen Gene werden rezessiv vererbt, und es gibt keine Informationen über die Strahlenempfindlichkeiten der jeweiligen Heterozygoten, mit Ausnahme einiger weniger Daten, die auf eine normale Empfindlichkeit für die *Ataxia telangiectasia*-Heterozygoten hinweisen. Generell unbermerkt in der medizinischen Praxis sind Menschen, die subtilere genetische Defizienzen anderer Enzymsysteme in sich tragen, welche für die Verminderung toxischer Stresse verantwortlich sind, z.B. die Glutathiontransferase, die für die Inaktivierung freier Radikale wichtig ist. Schätzungen zufolge tragen etwa 25 % der Bevölkerung Mutationen dieses Enzymsystems in sich. Es liegen keinerlei Daten über die Strahlenempfindlichkeit dieser Menschen vor. Man geht lediglich davon aus, daß

diese Menschen anfälliger für Erkrankungen und empfindlich gegenüber Expositionen mit Toxika sind.

Die klassischen Konzepte der Strahlenonkogenese durch genotoxische Effekte, d.h. überlebensfähige Mutationen aufgrund von Fehlreparatur oder chromosomalen Aberrationen etc., sind nicht vereinbar mit einigen neueren experimentellen Befunden, die indirekte genomische Effekte, vermittelt durch das Zytoplasma, nahelegen. Kurz gesagt, epigenetische Faktoren sind gleichbedeutend bei der Kanzerogenese. Obwohl Hinweise für epigenetische Effekte bei der Verursachung von Krebs aus Arbeiten aus anderen Bereichen (wie die Krebsinduktion durch Fasern und Partikel) schon länger existierten, sind vergleichbare Befunde aus experimentellen strahlenbiologischen Arbeiten gerade erst erhoben worden. Die Verzögerung ist teilweise aufgrund von technischen Einschränkungen zu erklären, die durch neuere technische Entwicklungen (z.B. das "Alpha-Microbeam") behoben wurden. Diese Möglichkeit, Mikrostrahlen von Alphateilchen zu erzeugen, ist eine neue Errungenschaft, die es ermöglicht, bestimmte Bereiche einer Zelle (z.B. unter Schonung des Zellkerns) zu bestrahlen. Abgesehen von dieser technischen Innovation verursachen Alphastrahlen ganz generell inhomogene Bestrahlungen. Unter Ausnutzung dieser Eigenschaft ist es auch möglich geworden den Bystander-Effekt zu demonstrieren, wobei genomische Effekte bestrahlter Zellen auf benachbarte, nicht bestrahlte Zellen übertragen werden. Die Zugabe von Lindan, einem Gap-Junction-Hemmer, unterdrückt den Effekt. Weiterhin wurde gezeigt, daß Bestrahlung einer Stelle im Zytoplasma – wobei die Möglichkeit einer Diffusion freier Radikale in den Zellkern ausgeschlossen war – Mutationen im Genom verursachen konnte, die im Profil denen der spontanen Mutationen entsprachen. Die Quintessenzen dieser Studien sind: 1) daß zytoplasmatische Bestandteile genomische/genotoxische Effekte vermitteln und daß die genomische Funktion durch eine komplizierte Kooperation mit zytoplasmatischen Bestandteilen, und umgekehrt, stattfindet; 2) daß zelluläre Funktionen (sei es die Herauf- oder Herabregulierung der Funktionen von Genen) unter Mitwirkung benachbarter Zellen und des Mikromilieus zustandekommen und daß toxische Effekte durch ein Prinzip des Teilens (Bystander and Good Samaritan Effekte!) moduliert werden. Die onkogenen Effekte von Strahlungen können nur zum Ausdruck kommen, wenn inhärente ablative Mechanismen, wie die Apoptose und die Heraufregulierung von Supressorgenen, außer Wirkung gesetzt werden. Die derzeitige Beweislage suggeriert, auch wenn eingeschränkt, daß eine Umgehung dieser Mechanismen durch zytoplasmatische Vermittlung geschehen könnte. Die Wirkung niedriger Strahlendosen – mit ihrer rätselhaften, hohen Wirksamkeit – kommt wahrscheinlich über diesen Weg zustande.

Abgesehen von den Mechanismen der Strahlenwirkung, muß die inhärente zelluläre Strahlenempfindlichkeit grundsätzlich berücksichtigt werden. Die inhärente Strahlenempfindlichkeit hängt vom Zell- oder Gewebetyp, dem Alter des Organismus<sup>200</sup> und

---

<sup>200</sup>Geschlechtsunterschiede können nicht ausgeschlossen werden, und von äußerster Wichtigkeit sind selbstverständlich die genotypischen Variationen, welche sich anhand

Interspeziesunterschieden ab. Obwohl Embryonen und Foeten bekanntlich äußerst empfindlich auf ionisierende Strahlung und andere Toxika reagieren, liegt keine Erklärung für diese lang bekannte Tatsache vor. Konventionelle strahlenbiologische Daten ( $D_{50}$ ,  $D_q$  und  $n$ ) für foetale Zellen existieren nicht. Weil die biologische Aufgabe embryonalen Gewebes primär in der Proliferation und Differenzierung liegt, werden eine große Anzahl von Genen heraufreguliert um diese Ziele zu erreichen, und dieses findet auf Kosten derjenigen Gene statt, die für die Reparatur und zusammenhängenden Aufgaben zuständig sind. Die Chancen, genomische Veränderungen unbemerkt zu überstehen, werden enorm erhöht. Die weitreichenden Effekte embryonaler Exposition mit niedrigen Strahlendosen wurden durch epidemiologische Assoziationen von *in utero*-medizinischen Expositionen mit kindlichen Krebsen im Kleinkindalter, insbesondere Leukämien, sowie durch Assoziationen von Expositionen durch radioaktiven Fallout von Populationen mit der Häufigkeit perinataler bzw. neonataler Mortalitäten belegt.

Frühkindliche Leukämien können auch das Ergebnis väterlicherseits übertragener genomischer Mutationen sein, welche bei Vätern durch niedrige Strahlenexposition, entweder durch medizinische Maßnahmen oder durch Exposition am Arbeitsplatz, ausgelöst wurden. Die Gametozyten beider Geschlechter sind als hoch strahlenempfindlich erkannt worden. Derzeitige Erkenntnisse über die Expression von Schäden bei Nachkommen beschränken sich auf zwei Störungen, welche die qualitativen Unterschiede zwischen der Art der Schäden an den männlichen bzw. weiblichen Gametozyten widerspiegeln. Der menschliche Oozyt ist äußerst empfindlich zur Zeit der Polkörperbildung, und niedrige Strahlenexposition verursacht eine ungleichmäßige Verteilung der Chromosomen und damit die Entstehung von Trisomie 21. Das empfindlichste Stadium des männlichen Gametozyten ist nicht bekannt. Dennoch ist der männliche Gamet im Vergleich zum weiblichen Gameten, der sich nur vorübergehend im haploiden Stadium befindet (als weiblicher Pronukleus), vergleichsweise sehr viel langlebiger, als reifes Spermium innerhalb des Hodens und extrakorporal als ejakulierter Samen. Aufgrund der längeren Verweildauer haben Spermien größere Chancen, toxischen Expositionen ausgesetzt zu werden. Da der Chromosomensatz haploid ist und sich die DNA in einer hochkompakten Form befindet, sind die Reparaturmöglichkeiten sehr stark eingeschränkt.

Feststellbarer Krebs ist die Kulmination eines komplexen Mehrschrittprozesses, welcher durch eskalierende genomische Instabilität gefördert wird. Diese Eigenschaft wurde durch zytogenetische Charakterisierung für die Voraussagbarkeit der Progression des Krebses, in Zusammenhang mit dem therapeutischen Erfolg, genutzt. Strahlenexposition wurde – auch bei niedrigen Dosen – als Auslöser genomischer Instabilität nachgewiesen, welche äußerst variable Latenzen aufweisen kann, gemessen an der Anzahl von Zellgenerationen bis zum Auftreten destabilisierender Ereignisse. Zelluläre Mikromilieufaktoren – direkte Zell-Zell-Kommunikation, Zytokine, bioaktive Lipide etc. – sind sicherlich an dem Prozeß beteiligt. Bislang wurden lediglich die angenommenen, direkten genotoxischen Effekte ionisierender Strahlung als Auslöser der

---

bestimmter o.g. gesundheitlicher Störungen manifestieren.

Genominstabilität aufgezeigt. Eine Verbindung, die gegenwärtig nicht explizit demonstriert ist – weil es nicht das Ziel der Versuche war – ist die Translation zytoplasmatischer Effekte niedriger Strahlendosen als Auslöser genomischer Instabilität.

Konsequenz einer reduktionistischen Haltung ist die Vernachlässigung von Studien über die zelluläre Antwort auf Strahlenwirkung im Sinne von interagierenden Zellpopulationen untereinander und mit dem natürlichen Mikromilieu, trotz Fortschritte in anderen Bereichen der Biologie (z.B. experimentelle Embryologie/Histologie etc.), die auf die Wichtigkeit dieser Aspekte hinweisen. Eine allgemeine Fehlkonzeption bei der Bemühung, die Mechanismen der Strahlenwirkung zu verstehen, ist, dem Grad der zellulären Organisation der angewandten, experimentellen Modelle keine Bedeutung hinsichtlich der Strahlenreaktion beizumessen<sup>201</sup>. Die wenigen Bemühungen in dieser Richtung (siehe Bystander- bzw. Good-Samaritan-Effekte) weisen bereits auf die Bedeutung dieses neuen Forschungsansatzes hin.

### Bezug

- Anhang S: Beitrag von Christopher S. Lange
- Anhänge T1 und T2: Beiträge von Bozidar Djordjevic
- Anhang U: Beitrag von Wayne R. Hanson
- Anhang N: Beitrag von Bernd Grosche
- Anhang M: Beitrag von Edmund Lengfelder
- Anhang V: Beitrag von P. Virsik-Peuchert

### IV. 3. Kombinierte Strahlenwirkungen

Die biologischen Effekte ionisierender Strahlungen können durch das Vorhandensein anderer Agenzien, wie Chemikalien, Pharmaka, bioaktive Substanzen sowie andere, physikalische Agenzien (Wärme, inkorporierte Fasern, Teilchen und andere Kategorien des elektromagnetischen Spektrums – UV-Licht, Mikrowellen, Radiowellen, ELF) modifiziert werden. Der größte Teil der Studien auf diesem Gebiet wurde in Verbindung mit Bemühungen, die Strahlentherapie zu verbessern, durchgeführt. Hierbei sind strahlensensibilisierende Substanzen von Interesse, welche die therapeutische Effizienz durch verbesserte Abtötung der Krebszellen steigern, während zugleich diejenigen, die vor gefährlichen Strahleneffekten das normale Gewebe schützen, als nützlich angesehen werden. Strahlensensibilisierende und Strahlenschutz-Substanzen sind daher

---

<sup>201</sup>Die reduktionistische Annäherung ist besonders ausgeprägt in der strahlenbiologischen Forschung aufgrund des Dominierens physikalisch-orientierter Wissenschaftler in diesem Fach. Während dieses zum wissenschaftlichen Fundament des Faches beigetragen hat, hat es gleichzeitig die holistische, biologische Annäherung an die Probleme der Kanzerogenese verhindert.

die zwei Seiten einer Medaille. Von den physikalischen Agenzien wurde Wärme (Hyperthermie) intensiv als Adjuvans zur Strahlentherapie getestet. Die Methoden der Hyperthermie-Applikation sind verschieden, wobei Mikrowellen für die Tiefen-Hyperthermie angewandt werden.

Die Frage zur Krebsinduktion durch ionisierende Strahlung in Zusammenhang mit anderen in der Umwelt vorkommenden Agenzien wurde nur in einer sehr begrenzten Anzahl von Studien angesprochen. Einige experimentelle Studien haben die Frage des evtl. verstärkenden Einflusses von Röntgenstrahlen auf die Induktion von Hautkrebs durch UV-Licht untersucht, und einige arbeitsmedizinisch orientierte Studien sind der Frage nach der Häufigkeit von Lungenkrebs bei Uranbergarbeitern in Zusammenhang mit Rauchgewohnheiten, nachgegangen. Einige wenige Studien haben die Wechselwirkung zwischen der Exposition von Asbestfasern mit radioaktiven Stäuben untersucht und haben supra-additive Effekte festgestellt. Einige andere haben versucht, die kombinierte Wirkung von Schwermetallen mit Strahlung zu bewerten. Im allgemeinen muß gesagt werden, daß weitaus zu wenig über die kombinierte Wirkung von ionisierender Strahlung in Zusammenhang mit Umwelttoxika bekannt ist.

Hinsichtlich der Sachfrage dieses Gutachtens nämlich der kindlichen Leukämie, sind Informationen über den onkogenen Effekt niedriger Strahlenexposition in Zusammenhang mit gewöhnlichen Umwelttoxinen, bei Dosen die realistisch genug sind, um vergleichbar mit der Umweltverschmutzung in einer Industriegesellschaft zu sein, von Bedeutung. Informationen dieser Art sind nicht zugänglich, da es an entsprechenden experimentellen Studien mangelt. Gleichzeitig muß darauf aufmerksam gemacht werden, daß derartige Studien sorgfältig durchgeführte Langzeittierversuche beanspruchen. Multifaktorielle Studien sind von der Natur der Sache her nicht nur schwierig durchzuführen, sondern auch schwierig bei der Analyse der Ergebnisse, da komplizierte, biometrische Verfahren angewandt werden müssen. Derartige Studien werden deshalb aus Arbeits- und Kostengründen vermieden. Angesichts dieser gegenwärtigen Situation bleibt nur die Möglichkeit, hier einige offene Fragen anzusprechen und über mögliche Ergebnisse zu spekulieren.

Die Verschmutzung der Umwelt hat globale Ausmaße in Bezug auf eine rasch wachsende Anzahl von anthropogenen Chemikalien angenommen. Die schwerwiegendsten davon sind Abgase aus Verbrennungsvorgängen, Pestizide, Produkte und Abfälle der chlor-/Halogenchemie und Schwermetalle. Alle diese beeinträchtigen die Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanzen. Obwohl in jüngster Zeit bestimmte Krankheitssyndrome beschrieben wurden (z.B. Multiple Chemikalien-Überempfindlichkeit, MCS) und die Ursache auf chronische, niedrige Exposition mit Chemikaliengemischen in der Luft am Arbeitsplatz oder in der Wohnung zurückgeführt, fehlen direkte Beweise dafür mangels experimenteller Möglichkeiten. Es gibt starke Hinweise auf eine individuelle Empfänglichkeit für MCS, und einige Studien vermuten, daß bei den Betroffenen Defizienzen des Glutathiontransferase-Enzymsystems bestünden. Es ist keine Voraussage aufgrund wissenschaftlicher Ergebnisse möglich – weil es keine gibt – wie sich eine Erhöhung der Hintergrundstrahlenbelastung auf diese Menschen auswirkt. Risikoabschätzungen über Strahlenbelastungen, verursacht durch Umweltverschmutzungen, berücksichtigen schon

bestehende gesundheitliche Belastungen nicht, weil solche gegenwärtig nicht durchführbar sind, aber die Umweltbelastungen sind real und dürfen nicht ignoriert werden. Um ein anderes Beispiel anzuführen: bestimmte Krebsarten sind in ihrer Progression von Hormonen abhängig, und auch die Strahlenempfindlichkeit eines Organismus wird durch den endokrinen Status beeinflusst. Eine Vielzahl von Chemikalien in der Umwelt werden gegenwärtig als "Endocrine Disrupters" erkannt, Substanzen in den unterschiedlichsten chemischen Verbindungen die zu endokrinen Störungen führen<sup>202</sup>. Es gibt keinerlei Informationen über Wechselwirkungen dieser "Endocrine Disrupters" mit Strahlungen. Es ist aus klinischer Erfahrung bekannt, daß einige Hormone Strahleneffekte steigern können. Eine Auflistung der möglichen Kombinationen von Agenzien könnte beliebig fortgesetzt und lediglich mit Fragezeichen versehen werden. Es sollte dennoch darauf aufmerksam gemacht werden, daß magnetische sowie elektromagnetische Felder ubiquitär sind, und Expositionen mit dem technischen Fortschritt Schritt halten. Ob und in welcher Weise diese mit ionisierenden Strahlungen und der bestehenden Schadstoff Belastung interagieren, ist nicht bekannt.

Die Empfindlichkeit von Zellen und Geweben ist daher von einer Reihe von Faktoren abhängig. Zusätzlich zu allen erwähnten physikalischen und biologischen, inhärenten Faktoren<sup>203</sup>, muß das Vorkommen von Umweltfaktoren, die mit dem betrachteten biologischen System interagieren und dadurch die Wirkungen von ionisierender Strahlung modifizieren können, Berücksichtigung finden, für realistische Voraussagen über die Nettoauswirkung einer gegebenen Strahlenbelastung. Dieses kann in der Praxis nicht erfüllt werden aufgrund riesiger Erkenntnislücken. Als logische Folge, wäre die Frage der Verdoppelungsdosis für Leukämie experimentell zu ermitteln, wären eine große Anzahl von Variablen zu berücksichtigen und die Ergebnisse mit geeigneten Methoden auszuwerten. Die Verdoppelungsdosen (DD) für kindliche Leukämien können nur aus epidemiologischen Daten abgeschätzt werden. Sollten diese Daten spezifische Realitäten widerspiegeln, bleibt dennoch der inhärente Nachteil, daß keine Information über das Vorhandensein oder den Einfluß modulierender Faktoren abgelesen werden können. Dieses wird bei Analysen der RERF-Daten deutlich, die eine DD für CML eines jungen Mannes von 7 mSv und für ein männliches Kind, geschätzt bei 1 mSv (siehe Anhang L, Seite 23-26, Beitrag von H. Kuni) ergaben! Dieses sind Abschätzungen, die aus einer sehr spezifischen und speziellen Situation, ohne Angaben über andere simultane Faktoren, einschließlich der Inkorporation von Radionukliden, erhoben wurden. Es ist auch nicht bekannt, ob diese beiden Fälle eine Selektion besonders prädisponierter Personen waren. Zu einer relativ konservativen Abschätzung der DD frühkindlicher Leukämie, resultierend aus Pionierarbeit und mehreren Dekaden an Erfahrung, gelangt Alice Stewart mit 1 cGy (10 mGy) (siehe Anhang I, Beitrag von

---

<sup>202</sup>Hormonally Active Agents in the Environment. Report of the National Research Council. National Academy Press. Washington DC, 1999.

<sup>203</sup>Stevenson, A.F.G: Haemopoietic recovery during radiation disease: Comments on combined-injuries. Radiation & Environmental Biophysics 20 (1981) 29 - 36.

Alice Stewart). Da diese Abschätzung auf *in utero*-Exposition basiert, kann begründbar angenommen werden, daß die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins anderer evtl. interagierender Faktoren sehr niedrig sein muß aufgrund mütterlicher Vorsicht und der natürlichen Blut-Plazenta-Barriere.

### **Fazit**

Erkenntnisse über kombinierte Strahlenwirkungen beschränken sich auf die gesammelten Erfahrungen aus dem Bereich der Strahlentherapie. Diese Erfahrungen basieren auf der Anwendung bestimmter Substanzen, die entweder Strahlenschutz- oder strahlensensibilisierende Effekte hervorrufen, um dabei die Wirksamkeit der Strahlentherapie zu verbessern. Die Anwendung der Hyperthermie dient dem gleichen Zweck. Es besteht eine enorme Wissenslücke, wenn es sich um umweltorientierte Probleme der niedrigen Strahlenexposition handelt, insbesondere inkorporierter Radionuklide in Zusammenhang mit anderen, in der Umwelt vorkommenden, toxischen Agenzien. Diese sind nie in Abhängigkeit von der Empfindlichkeit einzelner Individuen untersucht worden aufgrund der technischen Schwierigkeiten derartiger Studien, die diese mit sich bringen. Bei der Verdoppelungsdosis kindlicher Leukämie kann aus guten Gründen erwartet werden, daß sie vor allem durch zuvor erwähnte Faktoren beeinflusst wird, und zusätzlich angenommen werden muß, daß das Zusammenwirken von Strahlung mit anderen Umwelttoxinen evtl. miteinander agieren, und damit kanzerogene Ereignisse steigern. Bei Nichtvorhandensein von Daten spricht der gesunde Menschenverstand für die Berücksichtigung solcher Möglichkeiten, anstatt sie zu leugnen aufgrund mangelnder Daten. Die überraschende, extrem niedrige Verdoppelungsdosis, errechnet aus den RERF-Daten (siehe Anhang L, Beitrag von H. Kuni), unterstreicht diesen Punkt in beispielhafter Weise.

### **Bezug**

- Anhang X: Beitrag von W.-U. Müller
- Anhang L: Beitrag von Horst Kuni

### **V. Zusammenfassung**

Der derzeitige Grenzwert für beruflich exponierte Personen und der Grenzwert für die Allgemeinbevölkerung leiten sich von den ursprünglichen ICRP-Empfehlungen von 1958 ab. Die Basis dafür war die "genetische Dosis", da das Hauptanliegen damals - und weiterhin im Jahre 1965 - die Minimierung von vererbaren Schäden an nachfolgenden Generationen war, wobei der Fortgang der Entwicklung von Kernenergie-Programmen frei von Hindernissen bleiben sollte. In der Zwischenzeit hat das LSS unwiderlegbare Hinweise somatisch-stochastischer Effekte in Form von verschiedenartigen Krebsen erbracht, deren Häufigkeit in linearer Beziehung zu den



ermittelten Dosen standen. Danach war das Strahlenrisiko wesentlich höher zu bewerten, als vorher angenommen. Diese Erkenntnisse haben zu Konsequenzen bei den zuständigen britischen Behörden geführt, die die Grenzwerte für beruflich exponierte Personen herabsetzten. Entsprechende Konsequenzen hat es in Deutschland bislang nicht gegeben. Im Gesamturteil kann gesagt werden, daß die Grenzwerte der deutschen StrlSchV sowohl für die allgemeine Bevölkerung als auch für beruflich strahlenexponierte Personen den Stand der Erkenntnis über die schädlichen Folgen einer Exposition nicht Angemessen berücksichtigen. Eine Neufassung der Strahlenschutzverordnung ist zwar angekündigt aber bis jetzt noch nicht verabschiedet.

In der Praxis verfehlt die AVV ihr Ziel, die Allgemeinbevölkerung ohne Ausnahme zu schützen, da Dosis-Unterschätzungen nicht auszuschließen sind. Die AVV beinhaltet Unzulänglichkeiten aufgrund der angewandten Modelle und läßt Variabilitäten menschlicher Aktivitäten und Eßgewohnheiten unberücksichtigt. Es muß dennoch anerkannt werden, daß es Situationen gibt, wo die AVV die Expositionen überschätzt, aber der Sicherheitsgewinn wird durch eine ganze Reihe von Unzulänglichkeiten aufgehoben, die hier in Kürze zusammengefaßt werden. Die Anwendung einer Standard-Referenzperson ist in der internationalen Praxis für die Festsetzung von toxikologischen Grenzwerten für beruflich exponierte Personen üblich. Der Bezug auf eine solche Referenzperson für die Festlegung von Grenzwerten für die Allgemeinbevölkerung begründet sich in der Handhabbarkeit, stellt jedoch aus biologischer Sicht eine schwerwiegende Verfälschung dar, da einer Bevölkerung Mitglieder vom Ungeborenen bis hin zum Greisen angehören (siehe Kap. II.4.). Auch wenn für Folgedosis-Berechnungen Kinder gesondert berücksichtigt werden, sind dies Schätzungen, die weder Entwicklungsstufen noch der genetisch bedingten Individualität der Strahlenempfindlichkeit gerecht werden können.

Die Anwendung des Gauß-Modells zur Ausbreitungsberechnung von Emissionen ist mit schwerwiegenden Einschränkungen verbunden, da es für Situationen komplexer Orografie und der damit verbundenen komplexen meteorologischen Lage nicht vorgesehen ist. Die Verwendung von Langzeitausbreitungsfaktoren, die durch Mittelung bei Kurzzeitemission eingesetzt werden, führt zu Fehlern in der Konzentrationsbestimmung, die nach Schumacher einen Faktor von 5,5 ausmachen können.

Radioaktivität lagert sich nicht homogen ab. Auf dem Boden abgesetzte Radioaktivität kann wieder aufgewirbelt werden und als Resuspension erneut in die Kette von Geschehnissen eintreten. Obwohl die ICRP auf dieses Problem eingegangen ist und es vom EURATOM (Europäische Union) in ihren Richtlinien aufgenommen wurde, hat die AVV das Problem bislang ignoriert. Schließlich werden von der AVV die mögliche Anreicherung von Radionukliden in Nahrungsmitteln wie z.B. Pilzen nicht berücksichtigt und damit für diese Fälle zu kleine Dosiswerte ermittelt; statt dessen bevorzugt die AVV vereinfachte Modelle, basierend auf Nahrungsprodukten aus Kuhmilch und Fleisch.

Hinrichsen (Anhang D) betrachtet ein Fallbeispiel für die Jod-131-Emission beim KKK, in dem bei Anwendung der AVV die Einhaltung der Grenzwerte für die Effektive Ganzkörperdosis und Teilkörperdosis für die Schilddrüse überschritten werden können. Die genehmigte Jod-131-

Jahresemission beträgt  $9,62 \times 10^9$  Bq/a und die Tagesemission (24 h) wurde auf 1 % der Jahresemission (ohne weitere Einschränkungen) begrenzt. Die Nichteinhaltung kann sich bei Ausnutzung des Grenzwerts für die Kurzzeitemission aufgrund der unter bestimmten Bedingungen vorliegenden meteorologischen Parameter ergeben. Derartige Situationen können aufgrund der großen Variationsbreite der meteorologischen Verhältnisse entstehen.

Die Exposition durch AKW wird unter normalen Betriebsbedingungen auf Gamma- und Betasubmersionen zurückgeführt. Dagegen hat der TÜV auch darauf hingewiesen, daß unter besonderen Umständen, wie ein Störfall in Form von Wasserleckagen, die Gamma- und Betasubmersionen unwesentlich sein können, da bei deutlicher Überschreitung der Grenzwerte die Strahlenbelastung durch Bodenkontamination verursacht wird. Da das KKK seit Inbetriebnahme erhebliche chronische Wasserleckagen bis an die Toleranzgrenze hin aufweist, stellt sich die Frage, ob die halbjährlichen Freisetzungen mit Luftspülungen über das zusätzliche Ableitsystem gewissermaßen dem Szenario der TÜV-Experten entspricht. Ist dies der Fall, dann sollte die Exposition logischerweise höher liegen als die theoretisch berechneten Expositionen unter Annahmen von Bedingungen, die der betrieblichen Realität nicht entsprechen. Dieser Verdacht wird gestützt durch die fehlende Überwachung niederenergetischer Beta- und nuklidspezifische Alpha-Strahlungen. Die Beobachtungen in Sellafield bestätigen die Existenz dieses Problems. Die Umgebungsüberwachung (Immission) ist nicht auf die Erfassung dieser Strahlungen ausgerichtet, sondern prinzipiell auf die Messung von Gammastrahlung eingestellt. Dies wird mit der vollständigen Nukliderfassung am Fortluftkamin begründet. Tatsache ist jedoch, daß die redundante Erfassung von niederenergetischen Beta- und Alpha-Strahlungen in der Umwelt nicht gegeben ist, obwohl der TÜV in seiner radiologischen Bewertung die strahlenbiologische Bedeutung dieser Strahlungen hervorgehoben und deswegen orientierende Richtwerte für entsprechende Nuklide festgelegt hat. In diesem Zusammenhang muß erwähnt werden, daß das Zielorgan derartiger Strahlenbelastung das rote Knochenmark ist. In einem gerade erschienenen Bericht wird behauptet, daß Teilchen, die aus der "Crud"-Bildung entstehen, mit der Kaminfortluft freigesetzt werden können<sup>204</sup>.

Die Strahlenbelastung aus inkorporierten Radionukliden bringt aber spezielle Probleme mit sich, welche im Zusammenhang mit den physiko-chemischen Eigenschaften, den chemischen Verbindungen und der physiologischen Relevanz der betrachteten Nuklide stehen. Diese bestimmen wiederum die Biokinetik oder die zeitlich-räumliche Verteilung der Radionuklide. Weiterhin bestimmt das Zerfallscharakteristikum, d.h. die ausgestrahlte Strahlenart, die radiotoxikologische Auswirkung. Von den vier Radionukliden, die für die Strahlenbelastung in der Umgebung von kerntechnischen Anlagen und an Menschen maßgebend verantwortlich sind, mit Ausnahme von Cäsium-137, weisen die anderen drei gewebe- bzw. organspezifische Affinitäten

---

<sup>204</sup>Hirsch, H. & Becker O: Atomstrom 2000: sauber, sicher, alles im Griff? Aktuelle Probleme und Gefahren bei deutschen Atomkraftwerken. Erstellt im Auftrag des BUND, Bonn, Im Rheingarten 7, November 1999.

auf. Die Strahlenbelastung ist dadurch in bestimmten Körperteilen lokalisiert. Diese Spezifität wird im Fall von Alphastrahlern verstärkt (Plutonium-239), weil durch Alphastrahlen nur eine begrenzte Zahl von Zellen in einem Gewebe getroffen wird. Damit wird die Zellpopulation eines Gewebes aus stark bestrahlten und nicht bestrahlten Zellen bestehen. Es stellt sich die Frage, ob die für die Regeneration kritischen Zellen (Targetzellen) eher getroffen werden oder nicht. Die Stammzellen eines jeden Gewebes könnten die kritische Subpopulation und damit die Targetzellen sein. Die physikalischen Berechnungen von Dosen nach Inkorporation von Radionukliden gehen davon aus, daß die Energiedeposition gleichmäßig ist. Besonders bei Alphastrahlern ist dieses ein schwerwiegender Fehler, der eine Dosisunterschätzung bis zu zwei Größenordnungen bedeuten kann (siehe Zitat in Fußnote 58). Der Gebrauch der Extrapolation von Daten aus Niedrig-LET-Strahlungen in Situationen, in denen es sich um Alphastrahler hoher LET handelt, muß daher mit äußerster Vorsicht betrachtet werden. Aufgrund der mikrodosimetrisch stark inhomogenen Energiedeposition kommt es zu Anstieg der RBW bei niedriger Dosis, d.h. daß der Dosiswirkungsverlauf überlinear ist<sup>69</sup>. Bei der Ermittlung der Schadensfolgen pro Doseinheit wird nach ICRP jedoch ein linearer Zusammenhang und ein konstanter Q-Faktor vorausgesetzt, so daß es bei inkorporierter Alphaaktivität zu einer Unterschätzung der Wirkung kommt. Der wichtigste Pfad der Inkorporation von Alphastrahlern ist die Inhalation.

Ergänzend zur AVV sind die KTA (Kerntechnischer Ausschuß)-Regeln diejenigen, die Leistungseigenschaften der Geräte für die Bestimmungen und die Überwachung der mit Luft und Wasser freigesetzten Radioaktivität vorschreiben. Diese sollen als Garanten für die Einhaltung der Zielsetzungen der StrlSchV dienen, welche den Schutz der Bevölkerung ohne Ausnahmen vorsieht, und fordern eine verantwortungsvolle, gründliche Bewertung der Entwicklung in Wissenschaft und Technologie, gefolgt von gewissenhaftem Handeln. Eine Prüfung der Regeln und Bestimmungen ergab, daß dieses nicht der Fall ist. Als logische Konsequenz daraus kann ein AKW (hier das KKK), auch bei voller Einhaltung der Betriebsbestimmungen nicht automatisch von der Schuld einer möglichen Gesundheitsgefährdung freigesprochen werden. Die Unzulänglichkeiten der AVV und KTA-Regeln 1503.1 sind vielseitig und wurden ausgeführt. Das Risiko kindlicher Leukämien wurde hierzulande für Einwohner innerhalb eines 5 km-Radius um ein AKW als signifikant erhöht festgestellt. Gleiches gilt für Großbritannien und in den Vereinigten Staaten. Die erwähnte Studie in der BRD wies auf eine definitive Umkehrbeziehung hin zwischen dem Alter der Kinder und dem Leukämierisiko, im Zusammenhang mit der Dauer des Betriebes eines AKW hin.

Ein häufig vorgelegtes kritisches Argument gegen eine Assoziierung der kindlichen Leukämiefälle mit dem Betrieb des AKW war immer die Frage nach der erforderlichen Dosis, die Erkrankungsfälle hervorzurufen vermag. Die Annahme dabei ist für gewöhnlich, daß die angewandten Methoden der Dosisberechnung einwandfrei sind. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß die Immissionsüberwachung prinzipiell auf Gammastrahlen ausgerichtet ist. Luftgetragene Niedrigenergie-Beta- und Alphastrahler werden nicht nuklidspezifisch gemessen,

und folglich würden die Dosisabschätzungen falsch liegen<sup>205</sup>. Dies ist gerade deshalb äußerst unbefriedigend, weil bei einer Inkorporation von Radionukliden Kenntnislücken in der Radiobiologie und Unsicherheiten in der Berechnung der Strahlenbelastung bestehen. Die angewandten Methoden für die Berechnung der absorbierten Dosis aus korpuskularen Strahlen führen zu groben Unterschätzungen. Weiterhin muß berücksichtigt werden, daß in den Biowissenschaften, sei es auf der molekularen, zellulären oder Gewebesebene, in den letzten drei Jahrzehnten erhebliche Fortschritte erzielt wurden, welche zum besseren Verständnis z.B. der Kanzerogenese beigetragen haben. Erkenntnisse auf diesem Gebiet haben noch keinen Niederschlag in den Konzepten des Strahlenschutzes gefunden, insbesondere das Problem der Suszeptibilität (hier individuelle Strahlenempfindlichkeit) oder genetischen Prädisposition einzelner Individuen.

Ionisierende Strahlungen sind zweifelsfrei effektive Leukämogene. Sie sind vollständige Karzinogene, die weder eingeschränkt im Induktionspotential noch bevorzugend in der Art der induzierten Krebse wirken. Im Falle der Leukämien ist die beschriebene Prädominanz für einen bestimmten Leukämietyp das Ergebnis mitwirkender biologischer und/oder anderer Faktoren. Die RERF-Daten haben eindeutig gezeigt, daß Geschlecht, Alter zur Zeit des Bombenabwurfes (ATB) und die Zeitdauer nach dem Atombombenabwurf (TSE) alles kritische Faktoren sind, die die ätiologische Entwicklung bestimmen. Weil Leukämie eine seltene Erkrankung ist, wird das absolute Risiko (Fallzahl) immer klein sein im Vergleich zu den soliden Tumoren. Die niedrige Verdoppelungsdosis und die kurze Latenzzeit, insbesondere kindlicher Leukämien, eignet sich als kardinaler Indikator einer zurückliegenden Strahlenexposition. Die Aufmerksamkeit bei der Risikoabschätzung sollte auf das relative Risiko (RR) gerichtet sein, worin es sich deutlicher als das Absolutrisiko hervorhebt. Die RERF-Daten über ALL zeigen, daß bis zu einem Alter von 20 Jahren das RR höher ist als für AML. Wenn jedoch der Schnitt beim Alter von 15 Jahre gesetzt wird, steigt das RR für ALL weiter um einen Faktor von 3.

Obwohl die Kohorte der Atombombenüberlebenden ohne Zweifel eine der wichtigsten Informationsquellen der Auswirkung von Strahlung auf Menschen darstellt, sind diese Daten aus verschiedener Hinsicht einzigartig. Risikoabschätzungen seitens der Strahlenschützer (insbesondere internationale Organisationen wie die ICRP) basieren fast ausschließlich auf RERF-Daten was spezifische Unzulänglichkeiten mit sich bringt. Die schwerwiegendste davon ist die Unterschätzung der Risiken für kindliche Leukämien. Die RERF hat die Daten der ersten 5 Jahre, die kritisch hinsichtlich der Sterblichkeit von Säuglingen, jungen Kindern und Menschen im hohen Alter waren, nicht erfaßt (siehe auch Fußnote 94 bezgl. Daten von Folley *et al.*, die während dieser

---

<sup>205</sup>Seit Januar d. J. wurde durch eine von der BI gegen Leukämie (Elbmarsch) finanzierte Boden- und Dachbodenstaub-Radioaktivitätsuntersuchung von der Fa. ARGE PhAM, Weinheim, (Projektleiter Dipl. Ing. H.W. Gabriel) durchgeführt. Dabei wurde bekannt, daß in der Umgebung der beiden kerntechnischen Anlagen KKK und GKSS-Forschungszentrum transuran- (Alpha-Strahler) und tritium- (schwache Beta-Strahler) -haltige Mikrokügelchen zu finden seien. Dieses Material könne ausschließlich von kerntechnischen Anlagen freigesetzt werden.

erhoben wurden). Eine Analyse der Altersstruktur der Kohorte bestätigt dies. Die neueste Bewertung der RERF-Daten weist darauf hin, daß es aufgrund der jeweiligen, deutlichen ätiologischen Reaktion auf ionisierende Strahlung unsachgemäß ist, die verschiedenen Leukämietypen (ALL, AML und CML) als eine Entität zur Risikoabschätzung (oder jeder anderen Analyse) zusammenzufassen. ALL kommt typischerweise bei Säuglingen und Kindern vor, während AML typischerweise bei Erwachsenen vorkommt, mit Ausnahme von Menschen im hohen Alter, wo CLL in der Häufigkeit zunimmt und im Greisenalter prädominiert. Die Inzidenzen der malignen Lymphome CLL und Plasmazytome sollten für eine umfassende Bewertung von Strahlenauswirkungen ebenfalls berücksichtigt werden<sup>206</sup>.

Abgesehen von der natürlichen Hintergrundstrahlung ist ein erheblicher Teil der Strahlenexposition auf medizinische Maßnahmen zurückzuführen. Starke Expositionen bei hohen Dosisleistungen werden im Bereich der Strahlentherapie angewandt. Sekundäre Krebse entstehen in der Regel in benachbarten Geweben außerhalb des Strahlenfeldes. Da die Krebstherapie häufig aus kombinierten Modalitäten besteht, ist es nicht einfach, Kohorten von Patienten zu finden, die ausschließlich strahlentherapiert wurden, und eine derartige Kohorte aus Kindern stellt eine Rarität dar. Folglich ist AML derjenige Leukämietyp, der im allgemeinen als Sekundärkrebs bei therapierten Krebspatienten vorkommt. Um vergangene Erfahrungen zwecks qualitativer Risikobetrachtung bei Leukämien (Leukämietyp) nützlich einzusetzen, welche mit höherer Wahrscheinlichkeit bei Kindern ausgelöst werden, kann dies am besten bei Kindern geschehen die aus anderen Gründen Strahlentherapien erhielten (z.B. *Tinea capitis*), wobei ALL beobachtet wurde, ganz im Einklang mit den RERF-Daten. Eine bekannte Kohorte von Erwachsenen (im Alter zwischen 20 bis 40 Jahren), die ebenfalls aus anderen Gründen strahlentherapiert wurden, waren solche, die gegen *Morbus Bechterew* behandelt wurden. In dieser Patientengruppe wurde AML beobachtet. Die Strahlenbelastung bei Röntgenaufnahmen ist im allgemeinen sehr niedrig, und von speziellem Interesse sind Kohorten von Kindern, die *in utero* exponiert waren. Solche Kinder haben erhöhte Risiken, im Kindesalter an Leukämie zu erkranken. Als Leukämietyp kommt fast ausschließlich ALL vor.

Berufliche Exposition mit ionisierender Strahlung ist bei Arbeitern in nuklearen Industrien gegeben. Das Krebsrisiko ist im allgemeinen niedrig, auch wenn positive Assoziationen festgestellt wurden. Eindrucksvoller als das Krebsrisiko ist eigentlich die generell niedrige Mortalitätsrate aufgrund von Krebserkrankungen, verglichen mit der allgemeinen Bevölkerung. Dieses weist deutlich auf den "Healthy Worker Effekt" hin und deutet auf die Selektion der Arbeitnehmerschaft

---

<sup>206</sup> Auch wenn die Analyse der RERF-Daten durch Preston et al<sup>93</sup> keine Korrelation mit Exposition für diese beide Leukämiearten ergab, ist die Situation nicht absolut klar aufgrund von anderen Arbeiten, wie diese Autoren selbst erwähnen (siehe auch S.81). Aus strahlenbiologischer Sicht besteht kein Grund warum CLL bzw. Plasmazytome nicht durch Bestrahlung hervorgerufen werden können. Die induzierten Krebsarten sind u.a. eine Funktion von biologischen Parametern. Weil mangelnde Korrelation nicht als Nichtinduzierbarkeit verstanden werden darf, ist es wichtig, daß diese beiden Leukämien mit erfaßt werden.

nach gesundheitlichen Kriterien. Ein weiterer, interessanter Aspekt dieser Gruppe ist die Exposition zukünftiger Väter, insbesondere mit Radionukliden wie Plutonium. Die Häufung kindlicher Leukämien bei Seascale wurde dadurch erklärt, daß die Väter dieser Kinder in der nuklearen Wiederaufbereitungsanlage in Sellafield beschäftigt waren und, wie sich durch die Fallkontrollstudie herausstellte, mehrere Monate vor Konzeption ihrer erkrankten Kinder höheren Strahlenexpositionen ausgesetzt wurden. Dieses Konzept des Leukämierisikos in Zusammenhang mit präkonzeptioneller Strahlenexposition wurde in anderen epidemiologischen Studien über väterliche Expositionen durch Röntgenaufnahmen, Monate vor der Konzeption, belegt und bestätigt durch experimentelle Untersuchungen an Mäusen. Der Leukämietyp bei den Kindern war ALL.

Künstliche Erhöhungen der Umweltstrahlenbelastung kommen in manchen geografischen Regionen vor. Diese können auf Fallout aus den Atomwaffentests bzw. aus nuklearen Katastrophen, wie Tschernobyl, oder auf das Vorhandensein von kerntechnischen Anlagen, insbesondere Wiederaufbereitungsanlagen, zurückzuführen sein. In derartigen Regionen können Erhöhungen der Krebshäufigkeit erwartet werden und wurden auch gefunden. Die Tschernobyl-Katastrophe ist gekennzeichnet durch den drastischen Anstieg des Schilddrüsenkrebses bei Kindern aufgrund des freigesetzten Radiojods (60 bis 80% des Jodinventars). Die Inzidenz kindlicher Leukämien im Umfeld von La Hague bzw. Dounreay ist höher als erwartet, und der Aufenthalt an den jeweiligen Stränden wurde als Risikofaktor identifiziert. Das Leukämierisiko (SIR) von Kindern in der Umgebung von britischen bzw. deutschen AKW wurde in zwei separaten Studien als erhöht festgestellt.

Das Postulat von den Professoren Gaßmann und Löffler ist aus fachlicher Sicht (Strahlenbiologie und Epidemiologie) nicht haltbar. Die epidemiologischen Befunde der RERF - und dies trotz der bereits erwähnten spezifischen Unzulänglichkeiten - und anderer stehen im Einklang mit den Prinzipien der Strahlenleukämogenese. Die Studien, die Gaßmann und Löffler ausgewählt haben, um ihr Postulat zu untermauern, sind zum überwiegenden Teil ungeeignet. Es sollte hierbei zugegeben werden, daß Kohorten von Kindern, die ausschließlich strahlentherapiert wurden, äußerst selten sind. Dennoch können aufgrund dieser Datenlage diese beiden Kliniker, Gaßmann und Löffler, nicht entschuldigt werden. Epidemiologen haben schon darauf hingewiesen, daß die Chemotherapie vorzugsweise AML (auch bei Kindern) induziert und daß ionisierende Strahlung diesen Prozeß fördert. Krebspatienten erhalten in der Regel kombinierte Behandlungsmodalitäten und sind deswegen ungeeignet für die Bewertung von reinen Strahlenwirkungen. Wie schon erwähnt, ist das Alter zur Zeit der Bestrahlung der allerwichtigste von einer Mehrzahl von Parametern, der die Art der Leukämie bestimmt. ALL ist der prädominante Leukämietyp im frühkindlichen Alter.

Bei Betrachtung der stochastischen Effekte ionisierender Strahlung begegnet man einem strahlenbiologischen Rätsel, welches vergleichbare erwartete Risiken von Expositionen sowohl niedriger als auch hoher Strahlendosen, mit großen Dosisunterschieden, aufzeigt. Der Effekt der natürlichen Hintergrundstrahlung bezüglich Krebserkrankungen ist umstritten. Offizielle

Abschätzungen führen etwa 11% der Leukämien und 4% aller soliden Tumoren auf die Hintergrundstrahlung zurück<sup>207</sup>. Für diese Berechnungen sind die RERF-Daten zugrunde gelegt worden. Einige Studien aus geographischen Regionen mit höherer Hintergrundstrahlung haben auf erhöhte Krebsraten hingewiesen. Eine gesicherte Feststellung von Krebsrisiken durch Hintergrundstrahlung bleibt dennoch ein schwieriges Unterfangen aufgrund der erforderlichen statistischen Power, die bei derartigen epidemiologischen Studien sehr große Kohorten voraussetzt. Als niedrige Strahlendosen werden in diesem Gutachten Expositionen über dem natürlichen Hintergrund verstanden, mit einer Obergrenze von solchen Dosen, bei denen stochastische Effekte eher feststellbar sind. Bei diesem Wert, der sich 5 cGy (50 mGy) annähert, würden auch andere subtile (nicht stochastische) zelluläre Effekte feststellbar werden. Diese Definition niedriger Dosen ist selbstverständlich willkürlich.

Konventionelle Risikoabschätzungen stochastischer Effekte wurden bislang aus der Rückextrapolation von Daten aus intermediären und hohen Strahlenexpositionen erhoben, wobei man sich ausschließlich auf RERF-Befunde verlassen hat. Da die Dosisermittlungen in Hiroshima und Nagasaki mit großen Unsicherheiten verbunden sind, dürften diese im niedrigen Dosenbereich nach Extrapolation mit noch größerer Unsicherheiten zu erwarten sein. Eine Annäherung der Lösung des Problems wurde durch die Entwicklung von Modellen für die Rückextrapolation erreicht, um Risikoabschätzungen zu ermöglichen. Es liegen 5 verschiedene Modelle vor, und es besteht Konsens darin, daß die Dosis-Wirkungsbeziehung, die von 0 ausgeht, für solide Tumore linear bzw. für Leukämien linear-quadratisch ist. Das jüngste der Modelle befürwortet eine supra-lineare Beziehung, d.h. höhere Effekte bei niedrigen Dosen, wobei die Kurve anfangs einen konvexen Verlauf nimmt – entspricht einem spiegelbildlichen Verlauf des linear-quadratischen Modells – der bezüglich niedriger Dosen gegensätzlich zum linear-quadratischen Modell steht. Die übrigen zwei Modelle finden bei den meisten Strahlenbiologen keine Beachtung. Dies sind die Schwellen- bzw. "Hormesis"-Modelle. Das erstere Modell tritt für das Vorhandensein sicherer Dosen ein, während das letztere behauptet, daß geringe Dosen sogar positive gesundheitliche Effekte hervorrufen. Extrapolationen von epidemiologisch erhobenen Daten mögen aus formaler Sicht problematisch sein, sind aber andererseits die einzige Quelle menschlicher Daten in diesem Zusammenhang.

Biologische Effekte niedriger LET-Strahlung werden durch die Dosisleistung wirksam modifiziert. Damit dieser Tatsache Rechnung getragen wird, hat die ICRP für den Zweck der Risikoabschätzung den DDREF mit einem Wert von 2 eingeführt, welcher zur Halbierung der berechneten Risiken für Dosen unter 20 cGy (0,2 Gy) bzw. höhere Dosen bei Dosisleistungen unter 10 cGy/h (0,1 Gy/h) führt. Dieser Korrekturfaktor ist für Hoch-LET-Strahlung nicht anwendbar. Bei niedrigen Dosen, wie in diesem Gutachten definiert, hat die Dosisleistung keinen Einfluß auf stochastische Effekte, aufgrund von mikrodosimetrischen Überlegungen, die die Querschnittsinteraktion von Ionisationsspuren zugrundelegen. Damit besteht der Unterschied

---

<sup>207</sup>UNSCEAR 1994: Sources and effects of ionising radiation, UNO, New York 1994.

zwischen Niedrig- und Hoch-LET-Strahlung darin, daß die erstere aus diskreten, einzelnen Spuren besteht und letztere aus der Häufung von Spuren. Ein weiterer erforderlicher Korrekturfaktor ist die RBW, welche ein Ausdruck der Effizienz der Hoch-LET-Strahlung gegenüber der Niedrig-LET-Strahlung (Referenzstrahlung) ist. Da die RBW von der Dosis und Dosisleistung abhängig ist - insbesondere bei Niedrig-LET - stellt sie keine konstante Größe dar. Folglich sollte die maximale RBW oder  $RBW_m$ , ermittelt durch den Vergleich der linearen Komponente der beiden Dosiswirkungskurven, angewandt werden.

Ein evtl. weiterer derzeit diskutierter Korrekturfaktor ist der experimentell erhobene Adaptive Response von Zellen auf niedrige Strahlendosen. Ein entsprechendes Dosisfenster wurde ermittelt, welches bei vorheriger Applikation zur Resistenzsteigerung gegenüber Bestrahlung führt. Die aufgezeigte Verminderung von Effekten wurde jedoch nicht bei allen Zelltypen und allen Individuen festgestellt. Zu beachten unter den Zelltypen, die keine Adaptive Response aufweisen, sind frühembryonale Zellen und Spermatozyten. Dosen über oder unter dem genannten Fenster für die Konditionierung sind unwirksam hinsichtlich einer Auslösung des Adaptive Response, und wiederholte Verabreichungen entsprechender Dosen führen nicht zu einer weiteren Steigerung der Strahlenresistenz. Vor der Auslösung des Adaptiven Responses sind Zellen etwa 20mal empfindlicher und wurden als hypersensibel bezeichnet. Der untersuchte Parameter war die Auslöschung der Replikationsfähigkeit. Die eigentliche Frage stellt sich, ob dieses auch für stochastische Effekte Geltung hat. Weiterhin ist ungeklärt, ob bei sehr niedriger Strahlenexposition die höhere Effektivität von Strahlungen niedriger LET mit der Hypersensitivität der Zellen interagieren und somit kanzerogene Ereignisse fördern.

Die natürliche Streuung der Strahlenempfindlichkeit in der Bevölkerung ist nicht bekannt. In jüngster Zeit sind eine Mehrzahl genetisch bedingter gesundheitlicher Störungen in Zusammenhang mit Defekten im DNA-Reparatursystem gebracht worden, welche oft Ergebnis eines oder mehrerer Defekte durch Mutationen sind, die sich als Verlust von Reparaturenzymen äußern. Eine Hypersensitivität gegenüber Strahlung mit korrelierter Prädisposition zur Krebsentwicklung ist das Nettoergebnis. Die verantwortlichen Gene werden rezessiv vererbt, und es gibt keine Informationen über die Strahlenempfindlichkeiten der jeweiligen Heterozygoten, mit Ausnahme einiger weniger Daten, die auf eine normale Empfindlichkeit für die *Ataxia telangiectasia*-Heterozygoten hinweisen. Generell unbemerkt in der medizinischen Praxis sind Menschen, die subtilere genetische Defizienzen anderer Enzymsysteme in sich tragen, welche für die Verminderung toxischer Stresse verantwortlich sind, z.B. die Glutathiontransferase, die für die Inaktivierung freier Radikale wichtig ist. Schätzungen zufolge tragen etwa 25 % der Bevölkerung Mutationen dieses Enzymsystems in sich. Es liegen keinerlei Daten über die Strahlenempfindlichkeit dieser Menschen vor. Man geht lediglich davon aus, daß diese Menschen anfälliger für Erkrankungen und empfindlich gegenüber Expositionen mit Toxika sind.

Die klassischen Konzepte der Strahlenonkogenese durch genotoxische Effekte, d.h. überlebensfähige Mutationen aufgrund von Fehlreparatur oder chromosomalen Aberrationen etc., sind nicht vereinbar mit einigen neueren experimentellen Befunden, die indirekte genomische



Effekte, vermittelt durch das Zytoplasma, nahelegen. Kurz gesagt, epigenetische Faktoren sind gleichbedeutend bei der Kanzerogenese. Obwohl Hinweise für epigenetische Effekte bei der Verursachung von Krebs aus Arbeiten aus anderen Bereichen (wie die Krebsinduktion durch Fasern und Partikel) schon länger existierten, sind vergleichbare Befunde aus experimentellen strahlenbiologischen Arbeiten gerade erst erhoben worden. Die Verzögerung ist teilweise aufgrund von technischen Einschränkungen zu erklären, die durch neuere technische Entwicklungen (z.B. das "Alpha-Microbeam") behoben wurden. Diese Möglichkeit, Mikrostrahlen von Alphateilchen zu erzeugen, ist eine neue Errungenschaft, die es ermöglicht, bestimmte Bereiche einer Zelle (z.B. unter Schonung des Zellkerns) zu bestrahlen. Abgesehen von dieser technischen Innovation verursachen Alphastrahlen ganz generell inhomogene Bestrahlungen. Unter Ausnutzung dieser Eigenschaft ist es auch möglich geworden den Bystander-Effekt zu demonstrieren, wobei genomische Effekte bestrahlter Zellen auf benachbarte, nicht bestrahlte Zellen übertragen werden. Die Zugabe von Lindan, einem Gap-Junction-Hemmer, unterdrückt den Effekt. Weiterhin wurde gezeigt, daß Bestrahlung einer Stelle im Zytoplasma – wobei die Möglichkeit einer Diffusion freier Radikale in den Zellkern ausgeschlossen war – Mutationen im Genom verursachen konnte, die im Profil denen der spontanen Mutationen entsprachen. Die Quintessenzen dieser Studien sind: 1) daß zytoplasmatische Bestandteile genomische/genotoxische Effekte vermitteln und daß die genomische Funktion durch eine komplizierte Kooperation mit zytoplasmatischen Bestandteilen, und umgekehrt, stattfindet; 2) daß zelluläre Funktionen (sei es die Herauf- oder Herabregulierung der Funktionen von Genen) unter Mitwirkung benachbarter Zellen und des Mikromilieus zustandekommen und daß toxische Effekte durch ein Prinzip des Teilens (Bystander and Good Samaritan Effekte!) moduliert werden. Die onkogenen Effekte von Strahlungen können nur zum Ausdruck kommen, wenn inhärente ablative Mechanismen, wie die Apoptose und die Heraufregulierung von Supressorgenen, außer Wirkung gesetzt werden. Der derzeitige Kenntnisstand suggeriert, auch wenn eingeschränkt, daß eine Umgehung dieser Mechanismen durch zytoplasmatische Vermittlung geschehen könnte. Die Wirkung niedriger Strahlendosen – mit ihrer rätselhaften, hohen Wirksamkeit – kommt wahrscheinlich über diesen Weg zustande.

Abgesehen von den Mechanismen der Strahlenwirkung, muß die inhärente zelluläre Strahlenempfindlichkeit grundsätzlich berücksichtigt werden. Die inhärente Strahlenempfindlichkeit hängt vom Zell- oder Gewebetyp, dem Alter des Organismus<sup>208</sup> und Interspeziesunterschieden ab. Obwohl Embryonen und Foeten bekanntlich äußerst empfindlich auf ionisierende Strahlung und andere Toxika reagieren, liegt keine Erklärung für diese lang bekannte Tatsache vor. Konventionelle strahlenbiologische Daten ( $D_0$ ,  $D_q$  und  $n$ ) für foetale Zellen existieren nicht. Weil die biologische Aufgabe embryonalen Gewebes primär in der Proliferation und

---

<sup>208</sup> Geschlechtsunterschiede können nicht ausgeschlossen werden, und von äußerster Wichtigkeit sind selbstverständlich die genotypischen Variationen, welche sich anhand bestimmter o.g. gesundheitlicher Störungen manifestieren.

Differenzierung liegt, werden eine große Anzahl von Genen heraufreguliert um diese Ziele zu erreichen, und dieses findet auf Kosten derjenigen Gene statt, die für die Reparatur und zusammenhängenden Aufgaben zuständig sind. Die Chancen, genomische Veränderungen unbemerkt zu überstehen, werden enorm erhöht. Die weitreichenden Effekte embryonaler Exposition mit niedrigen Strahlendosen wurden durch epidemiologische Assoziationen von *in utero*-medizinischen Expositionen mit kindlichen Krebsen im Kleinkindalter, insbesondere Leukämien, sowie durch Assoziationen von Expositionen durch radioaktiven Fallout von Populationen mit der Häufigkeit perinataler bzw. neonataler Mortalitäten belegt.

Frühkindliche Leukämien können auch das Ergebnis väterlicherseits übertragener genomischer Mutationen sein, welche bei Vätern durch niedrige Strahlenexposition, entweder durch medizinische Maßnahmen oder durch Exposition am Arbeitsplatz, ausgelöst wurden. Die Gametozyten beider Geschlechter sind als hoch strahlenempfindlich erkannt worden. Derzeitige Erkenntnisse über die Expression von Schäden bei Nachkommen beschränken sich auf zwei Störungen, welche die qualitativen Unterschiede zwischen der Art der Schäden an den männlichen bzw. weiblichen Gametozyten widerspiegeln. Der menschliche Oozyt ist äußerst empfindlich zur Zeit der Polkörperbildung, und niedrige Strahlenexposition verursacht eine ungleichmäßige Verteilung der Chromosomen und damit die Entstehung von Trisomie 21. Das empfindlichste Stadium des männlichen Gametozyten ist nicht bekannt. Dennoch ist der männliche Gamet im Vergleich zum weiblichen Gameten, der sich nur vorübergehend im haploiden Stadium befindet (als weiblicher Pronukleus), vergleichsweise sehr viel langlebiger, als reifes Spermium innerhalb des Hodens und extrakorporal als ejakulierter Samen. Aufgrund der längeren Verweildauer haben Spermien größere Chancen, toxischen Expositionen ausgesetzt zu werden. Da der Chromosomensatz haploid ist und sich die DNA in einer hochkompakten Form befindet, sind die Reparaturmöglichkeiten sehr stark eingeschränkt.

Feststellbarer Krebs ist die Kulmination eines komplexen Mehrschrittprozesses, welcher durch eskalierende genomische Instabilität gefördert wird. Diese Eigenschaft wurde durch zytogenetische Charakterisierung für die Voraussagbarkeit der Progression des Krebses, in Zusammenhang mit dem therapeutischen Erfolg, genutzt. Strahlenexposition wurde – auch bei niedrigen Dosen – als Auslöser genomischer Instabilität nachgewiesen, welche äußerst variable Latenzen aufweisen kann, gemessen an der Anzahl von Zellgenerationen bis zum Auftreten destabilisierender Ereignisse. Zelluläre Mikromilieufaktoren – direkte Zell-Zell-Kommunikation, Zytokine, bioaktive Lipide etc. – sind sicherlich an dem Prozeß beteiligt. Bislang wurden lediglich die angenommenen, direkten genotoxischen Effekte ionisierender Strahlung als Auslöser der Genominstabilität aufgezeigt. Eine Verbindung, die gegenwärtig nicht explizit demonstriert ist – weil es nicht das Ziel der Versuche war – ist die Translation zytoplasmatischer Effekte niedriger Strahlendosen als Auslöser genomischer Instabilität.

Konsequenz einer reduktionistischen Haltung ist die Vernachlässigung von Studien über die zelluläre Antwort auf Strahlenwirkung im Sinne von interagierenden Zellpopulationen untereinander und mit dem natürlichen Mikromilieu, trotz Fortschritte in anderen Bereichen der

Biologie (z.B. experimentelle Embryologie/Histologie etc.), die auf die Wichtigkeit dieser Aspekte hinweisen. Eine allgemeine Fehlkonzeption bei der Bemühung, die Mechanismen der Strahlenwirkung zu verstehen, ist, dem Grad der zellulären Organisation der angewandten, experimentellen Modelle keine Bedeutung hinsichtlich der Strahlenreaktion beizumessen<sup>209</sup>. Die wenigen Bemühungen in dieser Richtung (siehe Bystander- bzw. Good-Samaritan-Effekte) weisen bereits auf die Bedeutung dieses neuen Forschungsansatzes hin.

Erkenntnisse über kombinierte Strahlenwirkungen beschränken sich auf die gesammelten Erfahrungen aus dem Bereich der Strahlentherapie. Diese Erfahrungen basieren auf der Anwendung bestimmter Substanzen, die entweder Strahlenschutz- oder strahlensensibilisierende Effekte hervorrufen, um dabei die Wirksamkeit der Strahlentherapie zu verbessern. Die Anwendung der Hyperthermie dient dem gleichen Zweck. Es besteht eine enorme Wissenslücke, wenn es sich um umweltorientierte Probleme der niedrigen Strahlenexposition handelt, insbesondere inkorporierter Radionuklide in Zusammenhang mit anderen, in der Umwelt vorkommenden, toxischen Agenzien. Diese sind nie in Abhängigkeit von der Empfindlichkeit einzelner Individuen untersucht worden aufgrund der technischen Schwierigkeiten derartiger Studien, die diese mit sich bringen. Bei der Verdoppelungsdosis kindlicher Leukämie kann aus guten Gründen erwartet werden, daß sie vor allem durch zuvor erwähnte Faktoren beeinflusst wird. Zusätzlich muß angenommen werden, daß das Zusammenwirken von Strahlung mit anderen Umwelttoxinen kanzerogene Ereignisse steigern kann. Bei Nichtvorhandensein von Daten spricht der gesunde Menschenverstand dafür, derartige Möglichkeiten in Betracht zu ziehen, anstatt sie kategorisch mit den Hinweis auf die defizitäre Datenlage zu leugnen. Die überraschende, extrem niedrige Verdoppelungsdosis, errechnet aus den RERF-Daten (siehe Anhang L, Beitrag von H. Kuni), unterstreicht diesen Punkt in beispielhafter Weise.

## VI. Schlußfolgerung

Die Häufung kindlicher Leukämien kommt in der Umgebung von Kernkraftwerken oft und in der Umgebung von nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen ohne Ausnahme vor. Sie unterscheidet sich in der Umgebung des KKK nur in ihrer Größe. Die entstandene Kontroverse – nicht nur hier (KKK) sondern auch überall dort, wo ein Cluster identifiziert wurde – ist aufgrund der Unvereinbarkeit vorherrschender Konzepte der Strahlenkanzerogenese mit den ermittelten Umgebungsstrahlenbelastungen, anhand klassischer Dosis-Wirkungsbeziehungen, zu erklären. Danach wird die erforderliche Dosis, um Leukämiefälle hervorzurufen, mehrere Größenordnungen

---

<sup>209</sup>Die reduktionistische Annäherung ist besonders ausgeprägt in der strahlenbiologischen Forschung aufgrund des Dominierens physikalisch-orientierter Wissenschaftler in diesem Fach. Während dieses zum wissenschaftlichen Fundament des Faches beigetragen hat, hat es gleichzeitig die holistische, biologische Annäherung an die Probleme der Kanzerogenese verhindert.

höher geschätzt, als die konventionell ermittelten Dosen an der Bevölkerung in der Umgebung kerntechnischer Anlagen vorweisen. Dieses veranlaßt die Aufsichtsbehörden wie auch Wissenschaftler in gleicher Weise, die Möglichkeit einer Assoziation zwischen dem Vorkommen von Leukämien und dem Betrieb von AKW zu leugnen. Diese Haltung ist sicherlich auch z.T. auf den guten Glauben an Grenzwerte zurückzuführen. Ein häufig vorkommendes Mißverständnis ist die Verwechslung von Grenzwerten mit einer "Sicherheitsgrenze". Tatsache ist, daß Grenzwerte aus Kompromissen entstehen. Daher sind sie nicht zuletzt ein Maß für die Höhe "zumutbarer" Risiken und damit ein Ergebnis politisch motivierter Überlegungen. Die nationalen Strahlenschutzstandards richten sich nach den Empfehlungen der ICRP. Die geltenden Grenzwerte in der BRD sind von Empfehlungen der ICRP abgeleitet worden, die zurückgehen auf Formulierungen aus dem Jahre 1958, einer Zeit, in der die Erkenntnisse über die Entstehung von stochastischen somatischen Effekten der Strahlenwirkung noch nicht begriffen wurden; die vordergründigste Sorge jener Zeit waren vererbare Schäden an die Nachkommen und künftige Generationen. In Anerkennung der Fakten aus den RERF-Daten hat die ICRP in ihren Empfehlungen von 1990 die Dosisgrenze für beruflich Exponierte ( $2 \text{ cSv/a} = 20 \text{ mSv/a}$ ) und 1997 die Grenzwerte für die allgemeine Bevölkerung ( $0,03 \text{ cSv/a} = 0,3 \text{ mSv/a}$ ) herunterkorrigiert. Diese Entwicklung sollte in der deutschen Strahlenschutzverordnung Berücksichtigung finden. Eine Novellierung der Strahlenschutzverordnung wurde zwar angekündigt, ist bis jetzt aber noch nicht verabschiedet.

Es ist ein Irrtum die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte schließe die Möglichkeit jeglicher Assoziation zwischen dem Vorkommen eines Leukämieclusters und dem Betrieb eines AKW (KKK) aus, weil umgekehrt dieses bedeuten würde, daß die Grenzwerte Schwellenwerte darstellen, unterhalb derer Sicherheit gewährleistet wäre. Für stochastische Effekte wurden keine Schwellenwerte festgestellt. Es wurde argumentiert, daß anhand der Emissionsdaten des KKK die errechnete Dosis an der Bevölkerung der Elbmarsch (wo der überwiegende Teil des Clusters identifiziert wurde) etwa drei Größenordnungen unterhalb des Expositionsgrenzwertes läge, und daß ein Zusammenhang damit unvorstellbar sei, und weiterhin, daß dieser aufgrund von etwaigen Fehlern bei der Berücksichtigung von Mikroklimaeffekten nicht nachzuweisen wäre. Die Argumentation als solche ist zumindest naiv, wenn nicht perfid, weil sie voraussetzt, daß die angewandten Methoden und Meßtechniken der Dosisermittlung einwandfrei sind. Das derzeit angewandte Gauß'sche Modell für die Ausbreitung der mit Luft abgeleiteten Radioaktivität ist, wie schon erörtert, nur unter bestimmten idealisierten Bedingungen gültig. In Situationen komplexer Orografie, insbesondere wenn Wasserkörper größeren Ausmaßes zusätzlich vorhanden sind, welche auf das Mikroklima Einfluß nehmen, ist obiges Modell unbrauchbar. Die Einführung von sechs vereinfachten Ausbreitungskategorien in der AVV, und schließlich das Zusammenwirken dieser beiden Fehlerquellen können zu Bestimmungsfehlern von drei Größenordnungen führen. Ferner wurden die Koeffizienten für die Berechnung von Kurzeitenausbreitungen aus gemittelten 5-Jahres-Langzeitausbreitungsdaten abgeleitet und sind daher nicht fehlerfrei. Die Dosisberechnungen beziehen sich auf eine meteorologische

Aufpunktstelle, die fiktiv ist, weil sie stets veränderlich ist. Damit ist das Argument, daß Fehler von drei Größenordnungen unvorstellbar seien, aus rein formalen Gründen widerlegt. Die Berechnungsmethoden für die Strahlenbelastung aus inkorporierten Radionukliden sind aufgrund der Vernachlässigung der nuklidspezifischen Biokinetik eine weitere Fehlerquelle, da allgemein angenommen wird, daß Radionuklide in einem Organ bzw. Gewebe gleichmäßig verteilt seien. Die Mehrzahl hoch radiotoxischer Nuklide weist Spezifitäten der Einbaustellen innerhalb von Organen und sogar innerhalb des Gewebes auf. Diese Unsicherheiten können zu Fehlbestimmungen der Strahlenbelastung auf Zielzellen von bis zu zwei Größenordnungen führen.

Die vom KTA propagierte Redundanz in der Umgebungsüberwachung der Radioaktivität wird nur zum Teil erfüllt, da die vorgeschriebene technische Ausstattung für die Immissionüberwachung prinzipiell auf die Messung von Gammastrahlen ausgerichtet ist. Luftgetragene schwache Beta- bzw. Alphastrahler werden nicht nuklidspezifisch erfaßt. Folglich verläßt sich das System gänzlich auf die Überwachung der Emissionen am Reaktorkamin. In Boden- und Bewuchsproben aus der Umgebung vom KKK sind Reaktornuklide wiederholt aufgetaucht. Somit wurde das KKK als Herkunftsquelle verdächtigt. Nach der AVV sollen derartige Nuklide unterhalb der Nachweisgrenze liegen.

Es wird argumentiert, daß der diagnostizierte prädominante Leukämietyp (ALL) bei den betroffenen Kindern nicht typisch für eine strahleninduzierte Leukämie sei. Daher entbehre jegliche Verbindung der Leukämieerkrankungen mit dem Betrieb des AKW jeder Grundlage. Es gibt jedoch keinerlei Hinweise, die für onkogene Spezifitäten ionisierender Strahlungen sprechen. Tatsache ist, daß ionisierende Strahlungen grundsätzlich alle in der Natur vorkommenden Neoplasien hervorrufen können. Die provozierte Art der Neoplasie hängt von den biologischen Eigenschaften der jeweiligen Neoplasien ab. Dieses bedeutet schlechthin, daß Faktoren wie Alter zur Zeit der Exposition, Geschlecht und Latenzzeit entscheidend mitwirken. Das Vorhandensein eines konkurrierenden Agens (z.B. chemisches Karzinogen) könnte mit der Strahlung und anderen Faktoren interagieren, um das Endresultat zu modifizieren.

Die zwei Professoren der Medizinischen Onkologie Gaßmann und Löffler haben für ihre Beurteilung epidemiologische Kohortenstudien über die Entstehung sekundärer Krebse (Leukämie) nach Strahlentherapie herangezogen. Da die überwiegende Anzahl dieser Kohorten kombinierte Behandlungsmodalitäten erhielten, ist es nicht zulässig, diese Kohorten für eine Analyse der Auswirkung ionisierender Strahlung zu verwenden. Die Literatur bietet nur wenige Kohortenstudien über Krebsentstehung nach einer Strahlentherapie bei jüngeren Kindern. Diese Studien weisen darauf hin, daß, vollständig im Einklang mit den Befunden der RERF, ALL überwiegt. Gaßmann und Löffler argumentierten, basierend auf dem absoluten Risiko für AML, gegen ALL. Gerade dieses ist irreführend, da ALL eine äußerst seltene Erkrankung und typisch für die Frühkindheit ist. Das Risikoindiz für wissenschaftliche Zwecke darf deshalb niemals das Absolut- sondern muß das Relativrisiko sein, welches in den RERF-Befunden an höchster Stelle steht. Dies bedeutet nicht, daß das Risiko, ausgedrückt in absoluten Zahlen, bedeutungslos sei; es ist ein Wert, der für politische Überlegungen gebraucht wird.

Die Dosis-Wirkungsbeziehung ist ein konventionelles toxikologisches Prinzip, welches auch für die Strahlenwirkung gültig ist. Strahlenbiologische Erkenntnisse sind hauptsächlich aus der Wirkung hoher, akuter externer Expositionen gewachsen. Voraussagen über die Wirkungen niedriger Strahlendosen werden durch Rückextrapolationen erreicht und sind daher mit großen Unsicherheiten behaftet. Neuere Forschungsergebnisse weisen darauf hin, daß niedrige Strahlendosen (etwa über dem Hintergrundwert) höhere Effektivitäten, d.h. eine Umkehr der Dosis-Wirkungsbeziehung, verursachen können. Dieses Arbeitsfeld befindet sich jedoch noch im Anfangsstadium. Da die Verdoppelungsdosis eine Größe ist, die bei der Abschätzung stochastischer Effekte Anwendung findet, ist die Frage der Verdoppelungsdosis für kindliche Leukämien von Relevanz, um eine Bewertung der Dosisvoraussetzung für das Cluster in der Umgebung von KKK vorzunehmen. Es ist gebräuchlich, die RERF-Daten für derartige Berechnungen heranzuziehen. Dieses wurde von H. Kuni (Anhang L) durchgeführt, indem er eine Verdoppelungsdosis von 0,7 cSv (7 mSv) für CML bei männlichen Erwachsenen errechnete und annimmt, daß die Verdoppelungsdosis für männliche Kinder unter 0,1 cSv (1 mSv) liegt. Diese Werte sind sicherlich weitaus niedriger als die generelle Vorstellung einer Verdoppelungsdosis. Konkurrierende Faktoren bei den Atombombenopfern könnten evtl. eine Erklärung für die niedrigen Werte sein, und es sollte nicht außer acht gelassen werden, daß bei jeder umweltbedingten Verursachung von Erkrankungen eine Kombination von mehreren Faktoren erwartet werden muß. Nach Erfahrungen aus dem Bereich röntgendiagnostischer Expositionen während der Schwangerschaft schätzt A. Stewart 1 cSv (10 mSv) als eine vorsichtige Verdoppelungsdosis kindlicher Leukämien (Anhang I). Die Verdoppelungsdosis ist ein statistischer Mittelwert. Abweichungen davon müssen erwartet werden und werden von verschiedenen konkurrierenden, sowie inhärenten Faktoren abhängig sein. Beispielsweise kann die genetische Konstitution eines Individuums erhebliche Abweichungen verursachen. Eine Mehrzahl genetisch bedingter gesundheitlicher Störungen (sichtlich identifizierbar nur bei den Homozygoten), die eine starke Empfindlichkeit gegenüber Strahlungen verursachen, wurden in jüngster Zeit dokumentiert. Die natürliche Häufigkeit von Heterozygoten (und ihre Reaktionen auf Strahlungen und andere Toxika) in einer Bevölkerung ist nicht bekannt. Frühkindliche Leukämien werden wahrscheinlich in utero induziert. Da embryonale Zellen generell hoch empfindlich gegenüber Strahlungen und anderen Toxika sind, muß die Verdoppelungsdosis für Leukämie entsprechend als äußerst niedrig erwartet werden. Neuerdings sind überzeugende Hinweise für die präkonzeptionelle Induktion kindlicher Leukämien durch väterliche Strahlenexposition erhoben worden. Es liegen zur Zeit keine Abschätzungen über eine Verdoppelungsdosis dafür vor.

Wie schon erwähnt, sind Berechnungen der absorbierten Dosis in Organen bzw. Geweben nach Inkorporation von Radionukliden äußerst unzulänglich. Die Strahlentoxikologie alpha-emittierender Nuklide ist besonders kompliziert wegen der inhomogenen Dosisverteilung innerhalb der Gewebe aufgrund der geringen Reichweite der Alphateilchen. Da getroffene Zellen hohe Dosen erhalten, können sie ihr Replikationspotential verlieren und je nach Schadensstelle

zugrunde gehen. Da hämatopoetische Zellen ein großes Zellkern/Cytoplasma-Verhältnis vorweisen, würden Strahlentreffer überwiegend im Zellkernbereich liegen, und die Wahrscheinlichkeit des Zelltodes (evtl. über den apoptotischen Pfad) dürfte sehr hoch sein. Dieses könnte eine Erklärung sein für das generelle Ausbleiben von Leukämien unter Personen, die chronische Kontaminationen durch Alphastrahler am Arbeitsplatz erlitten haben. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, daß wenn die Apoptose in einer getroffenen Zelle umgangen wird (Treffer im Zytoplasma), die klonogene Fähigkeit der Zelle erhalten bleibt und genotoxische Endpunkte (Mutationen und/oder chromosomale Aberrationen) dennoch zustandekommen. In der Umwelt können Kontaminationen von Personen mit Alphastrahlern nur zu extrem niedrigen Inkorporationen führen (die auf der Basis konventioneller Dosisberechnungen keine Beachtung finden), sie sind jedoch aus toxikologischer Sicht hoch relevant aufgrund der Möglichkeit zellulärer Transformation. Dies zusätzlich zu der Tatsache, daß völliges Unwissen über die Interaktion inkorporierter Radionuklide mit anderen Umwelttoxinen jedes Argument unterstützt, daß die Verdoppelungsdosis für Leukämie sogar niedriger, als zur Zeit angenommen, liegen kann. Insgesamt betrachtet ist die Möglichkeit, daß die Häufung kindlicher Leukämien in der Elbmarsch strahlenbedingt sei, nicht auszuschließen. Der aktuelle Bericht des Gutachters Dipl. Ing. H.W. Gabriel der Fa. ARGE PhAM, Weinheim, in Zusammenarbeit mit den Professoren R. Brandt und W. Ensinger (Universität Marburg) und A. Scharmann (Universität Giessen) über die Verseuchung der Elbmarsch und Elbgeest im Umfeld der kerntechnischen Anlagen (KKK und GKSS-Forschungszentrum) mit transuran- und tritiumhaltigen radioaktiven Mikrokügelchen (PAC-Mikrosphären), verstärkt den Verdacht einer Strahlenätiologie dieses Leukämieclusters.