

KFK 1691

Band 47

# Erste Hilfe bei Strahlenunfällen

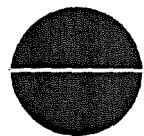
Herausgegeben von  
G. Möhrle

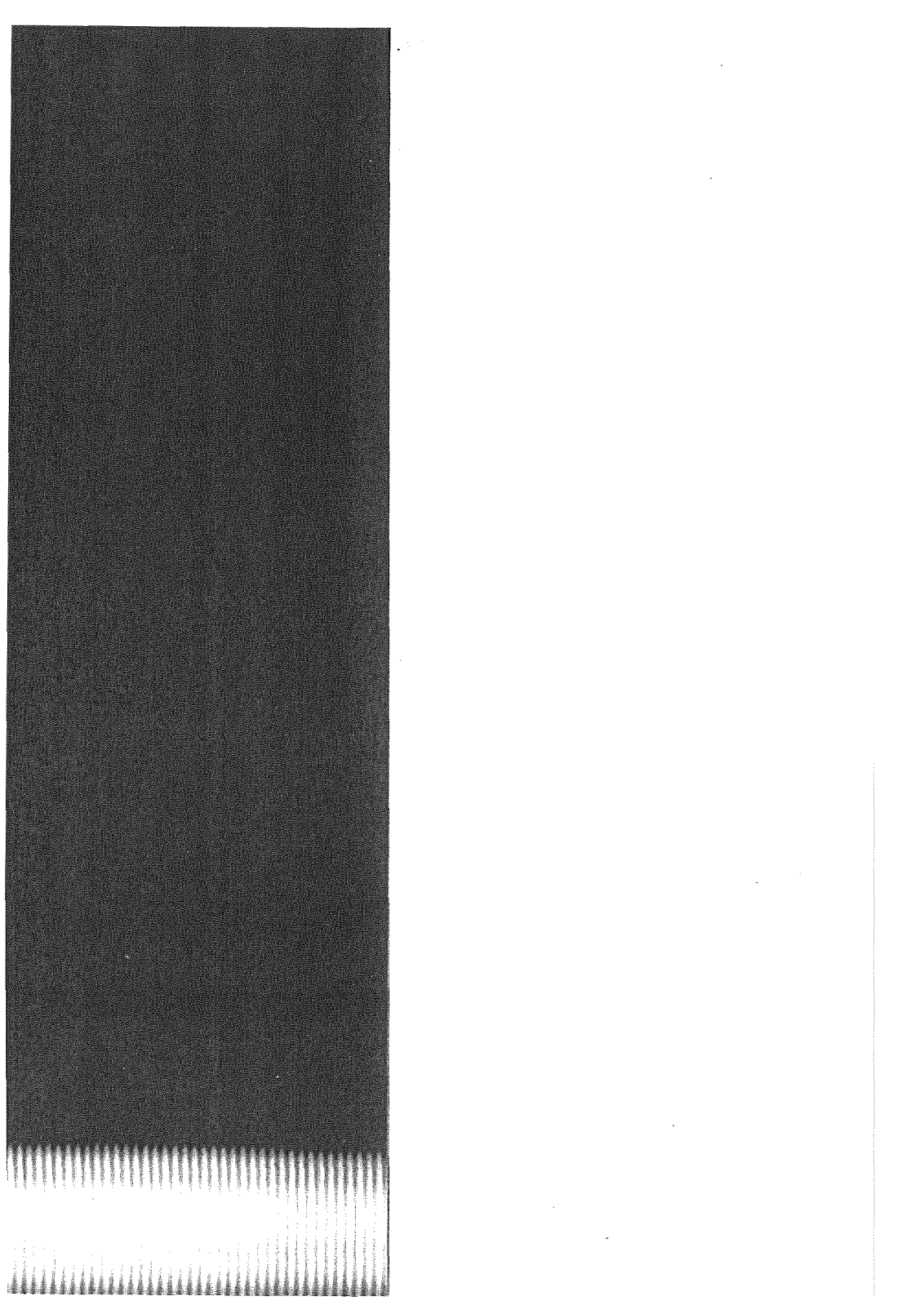
---

Schriftenreihe

Arbeitsmedizin  
Sozialmedizin  
Arbeitshygiene

A.W. Gentner Verlag  
Stuttgart





**Erste Hilfe  
bei Strahlenunfällen**

Herausgegeben von G. Möhrle



# Erste Hilfe bei Strahlenunfällen

Herausgegeben von G. Möhrle

Mit Beiträgen von  
A. Catsch  
T. M. Fliedner  
H. Kiefer  
G. Möhrle  
A. Müller  
L. Ohlenschläger  
H. Schieferdecker



A. W. GENTNER VERLAG STUTTGART

**Schriftleitung: Dr. med. Rolf-Detlev Berensmann, 7000 Stuttgart 70 (Degerloch),  
Hans-Neuffer-Weg 2 (Ärztehaus).**

**Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe  
und der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.**

**Copyright 1972 by A.W. Gentner Verlag, Stuttgart. Printed in Germany.**

**Satz: Aschenbroich, Composersatz, Stuttgart. Druck: Offsetdruckerei Reger, Stuttgart.**

**ISBN 3-87247-148-1**

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	9
<i>1. Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlenwirkung auf den Menschen (A. Müller)</i>	
1.1. Einleitung .....	11
1.2. Radioaktivität .....	11
1.2.1. Zerfallsarten	
1.2.2. Kernisomerie	
1.2.3. Halbwertszeit	
1.2.4. Spezifische Aktivität	
1.2.5. Dosisleistungskonstante	
1.2.6. Innere Strahlenquellen	
1.2.7. Natürliche und künstliche Strahlenquellen	
1.3. Strahlenarten und Wechselwirkung mit Materie .....	14
1.3.1. Röntgenstrahlen	
1.3.2. Gammastrahlen	
1.3.3. Neutronenstrahlen	
1.3.4. Elektronenstrahlen	
1.3.5. Protonenstrahlen	
1.3.6. Alphastrahlen	
1.4. Dosimetrie .....	18
1.4.1. Grundeinheiten	
1.4.2. Messung der Energiedosis	
1.4.3. Strahlenarten und Bewertungsfaktoren	
1.5. Strahlenwirkungen .....	21
1.5.1. Chemische Zwischenprodukte der Strahlenwirkung	
1.5.2. Charakteristika biologischer Strahlenwirkung	
1.5.3. Strahlenwirkung auf menschliche Zellen und Organe	
1.5.4. Genetische Schäden	
<i>2. Physikalische Ermittlung der Personendosis bei akuter Teil- bzw. Ganzkörperbestrahlung (H. Kiefer)</i>	
2.1. Was muß der Arzt wissen .....	27
2.2. Welche Daten kann der Strahlenschutzphysiker liefern .....	28

2.2.1.	Strahlenquelle	
2.2.2.	Strahlenfeld	
2.2.3.	Individualdosis	
2.2.3.1.	Taschenionisationskammern	
2.2.3.2.	Filmdosimeter	
2.2.3.3.	Glasdosimeter	
2.2.3.4.	Thermolumineszenzdosimeter	
2.2.3.5.	Kritikalitätsdosimeter	
2.2.3.6.	Individualdosimetrie durch Aktivierungsmessungen	
3.	<i>Ärztliche Maßnahmen bei akuter Ganz- bzw. Teilkörperbestrahlung (T.M. Fliedner)</i>	
3.1.	Einleitung: Formen der Strahlenunfälle . . . . .	35
3.1.1.	Allgemeine Vorbemerkung und pathophysiologische Prinzipien	
3.1.2.	Unkomplizierte Strahlenunfälle	
3.1.3.	Komplizierte Unfälle	
3.1.4.	Kontaminierungsunfälle	
3.1.5.	Inkorporationsunfall	
3.2.	Klinische Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms . . . . .	41
3.2.1.	Allgemeine Vorbemerkungen	
3.2.2.	Erholung unwahrscheinlich oder unmöglich	
3.2.3.	Erholung möglich bei Ausnutzung aller therapeutischer Möglichkeiten	
3.2.4.	Erholung wahrscheinlich	
3.2.5.	Erholung gesichert	
3.3.	Möglichkeiten der Früherkennung und Prognose bei Ganzkörperbestrahlung . . . . .	54
3.3.1.	Allgemeine Vorbemerkungen	
3.3.2.	Allgemeine Symptome	
3.3.3.	Laborbefunde in der Frühphase nach Ganzkörperbestrahlung	
3.3.3.1.	Blutbilduntersuchung	
3.3.3.2.	Knochenmarkuntersuchung	
3.3.3.3.	Zytogenetische Untersuchungen	
3.3.3.4.	Biochemische frühdiagnostische Methoden	
3.4.	Diagnose und Prognose bei Teilkörperbestrahlung . . . . .	66
3.4.1.	Allgemeine Vorbemerkungen	
3.4.2.	Bestrahlung im Kopf-Halsbereich	
3.4.3.	Bestrahlung im Thoraxbereich	
3.4.4.	Bestrahlung im Abdominalbereich	



3.4.5. Bestrahlung im Extremitätenbereich	
3.4.6. Zusammenfassung	
3.5. Ärztliche Frühmaßnahmen bei Strahlenunfällen . . . . .	69
3.5.1. Stufen der Handhabung von Strahlenunfällen bei Ganz- bzw. Teilkörperbestrahlung	
3.5.2. Diagnostische Frühmaßnahmen	
3.5.2.1. Feststellung des „Status praesens“	
3.5.2.2. Erste Laboratoriumsuntersuchungen	
3.5.2.3. Zuordnung des Betroffenen zu einer der Verlaufs- kategorien	
3.5.3. Vorarbeit der Therapie	
3.5.4. Logistik des Strahlenunfalles	
Anhang: Technische Hinweise für die notwendigen Laborunter- suchungen . . . . .	81
<i>4. Kontamination der Haut und Maßnahmen zur     Dekontamination (G. Möhrle)</i>	
4.1. Einleitung . . . . .	83
4.2. Anatomie und Permeabilität der normalen Haut . . . . .	84
4.3. Maximal zulässige Hautdosis und maximal zulässige Haut- kontamination . . . . .	86
4.4. Kontaminationsmessung und Dokumentation der Meßergebnisse	87
4.5. Dekontaminationseinrichtungen . . . . .	89
4.6. Allgemeine und spezielle Dekontaminationsmaßnahmen . . . . .	91
4.7. Haut-Dekontaminations-Schema . . . . .	94
<i>5. Maßnahmen bei kontaminierten Verletzungen (L. Ohlenschläger)</i>	
5.1. Pathophysiologie der kontaminierten Wunde . . . . .	99
5.2. Strahlenmeßtechnik einer kontaminierten Wunde . . . . .	100
5.3. Ärztliche Maßnahmen . . . . .	102
5.3.1. Erste Hilfe am Unfallort	
5.3.2. Die chirurgischen Interventionen bei einer kontami- nierten Verletzung	
5.3.2.1. Konservativ chirurgische Maßnahmen	
5.3.2.2. Aktiv chirurgische Maßnahmen	

5.4. Medikamentöse Zusatztherapie bei kontaminierten Wunden . . .	105
5.5. Betreuung kontaminierter Verletzter bei nicht vorhandener räumlicher und apparativer Ausrüstung . . . . .	106
5.6. Zusammenfassung der Erstmaßnahmen bei kontaminierten Verletzungen . . . . .	107
<b>6. Ermittlung der Körperbelastung bei Inkorporation von Radionukliden (H. Schieferdecker)</b>	
6.1. Grundlagen . . . . .	111
6.1.1. Maximal zugelassene Aktivitätsmengen im Körper	
6.1.2. Verhalten der Radionuklide im Körper	
6.1.3. Inkorporationsmechanismen	
6.2. Methoden zur Feststellung einer Inkorporation . . . . .	115
6.2.1. Nasen-Rachen-Abstrich	
6.2.2. Direktmessung der Körperaktivität	
6.2.2.1. Ganzkörperzähler	
6.2.2.2. Teilkörperzähler	
6.2.3. Ausscheidungsmessungen	
6.2.3.1. Direktmessung	
6.2.3.2. Radiochemische Methoden	
6.3. Abschätzung der Höhe einer Inkorporation . . . . .	120
<b>7. Erste ärztliche Maßnahmen bei Inkorporation von Radionukliden (A. Catsch)</b>	
7.1. Allgemeine Gesichtspunkte und Richtlinien . . . . .	125
7.2. Therapeutische Maßnahmen . . . . .	128
7.2.1. Einleitende Bemerkungen	
7.2.2. Chelatbildner	
7.2.3. Orale Antidote	
7.2.4. Isotopenverdünnung	
7.2.5. Abschließende Bemerkungen	
7.3. Zusammenfassende Übersicht . . . . .	136
<b>Verzeichnis der Referenten . . . . .</b>	<b>139</b>

## Vorwort

Die im letzten Jahrzehnt ständig zunehmende Bedeutung ionisierender Strahlen auf fast allen Gebieten der Forschung, Medizin und Technik sowie die Nutzung der Kernenergie machen es erforderlich, daß sich auch die Ärzteschaft mit den arbeits- und unfallmedizinischen Problemen und Risiken befaßt, die sich hieraus ergeben. Die Sicherheitsvorschriften und Schutzmaßnahmen beim Umgang mit ionisierenden Strahlen sind ein Musterbeispiel für eine gezielte normative Regelung eines Teilbereichs der Umweltgefahren auf nationaler und internationaler Ebene, doch kann nie die potentielle Unfallgefährdung für die auf diesem Sektor beruflich Tätigen ausgeschlossen werden. Dies gilt praktisch für alle Bereiche der friedlichen Anwendung der Kernenergie, für Herstellung, Bearbeitung, Handhabung, Verwendung, Besitz, Lagerung, Beförderung und Beseitigung natürlicher und künstlicher radioaktiver Stoffe sowie für jede andere Tätigkeit im Zusammenhang mit ionisierender Strahlung.

In diesem Band haben die Autoren, ausgehend von den physikalischen und biologischen Grundlagen der Strahlenwirkung auf den Menschen, den Versuch unternommen, die meßtechnischen und diagnostischen Möglichkeiten zur Abschätzung einer Strahlenbelastung sowie die einzuleitende Erste-Hilfe und ersten ärztlichen Maßnahmen bei verschiedenen Formen von Strahlenunfällen darzustellen. Der Grundgedanke dieser Übersicht war, dem bei einem Arbeitsunfall als Notfallarzt zugezogenen Kollegen – sei er als Werkarzt oder in der Praxis bzw. an einem Krankenhaus tätig – einen Leitfaden in die Hand zu geben, der ihm einen Einblick in diesen noch weithin unbekanntem arbeits- und unfallmedizinischen Bereich gibt, Mittel und Wege aufzeigt, sinnvolle erste Maßnahmen ergreifen zu können, aber auch die damit zusammenhängenden Probleme beleuchtet. Der Titel „Erste Hilfe bei Strahlenunfällen“ ist daher in diesem umfassenden Sinne zu verstehen. Die Autoren sind sich der Tatsache wohl bewußt, daß sie zu einigen sehr wesentlichen Punkten noch keine befriedigende Lösung geben können. Es handelt sich hierbei insbesondere um folgende noch mehr oder minder offene Fragen:

Wer kann dem im Notfall zugezogenen Arzt in Anbetracht der meist nur beschränkten lokalen ärztlichen Möglichkeiten helfen, die Auswirkung einer Strahlenbelastung abzuschätzen, und ihn im Einzelfall beraten, ob es sich um einen ambulant zu betreuenden Unfall handelt oder ob eine stationäre Überwachung erforderlich wird? Welches spezielle Krankenhaus ist für die Aufnahme eines schwereren Strahlenunfalls geeignet?

Für den Arzt am Unfallort wäre die Hilfe einer regionalen oder zentralen strahlenschutzärztlichen Beratungsstelle von Nutzen, die ihm neben den ersten Ratschlägen zur Abschätzung der Größenordnung des Unfalls und für einzuleitende Erste-Hilfe- und erste ärztliche Maßnahmen auch gegebenenfalls sachkundige und erfahrene Unterstützung vermitteln könnte. In Kapitel 3 wird grundsätzlich zu den erforderlichen speziellen Einrichtungen von Kliniken Stellung genommen, die zur Aufnahme von schwereren Strahlenun-

fällen geeignet erscheinen. Es ist die Ansicht der Autoren dieses Bandes, daß in der Bundesrepublik, von den sich abzeichnenden Ballungsräumen her gesehen, vier bis fünf Kliniken mit entsprechenden Einrichtungen zur möglichst keimfreien Unterbringung etc. zunächst ausreichen würden. Zusätzlich wäre erforderlich, daß für diese Zentren ein Expertenteam zur Verfügung steht, das im Bedarfsfalle kurzfristig erreichbar ist und die notwendigen diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen in Zusammenarbeit mit der jeweiligen Klinik einleitet und durchführt.

So lange diese Konzeption noch nicht verwirklicht ist, sollte sich jeder Kollege, der aufgrund seiner Ausbildung, seiner Tätigkeit oder seines Wohnsitzes bei Strahlenunfällen evtl. zugezogen werden kann, rechtzeitig vorinformieren, wo in seinem regionalen Bereich z.B. Inkorporationsmessungen (Body-Counter-Untersuchungen oder Ausscheidungsanalysen) durchgeführt werden können, wo eine radioaktiv kontaminierte Verletzung fachkundig versorgt werden kann, wo bei schwereren Strahlenunfällen eine geeignete Klinik zur Aufnahme bereit steht und wie ein eventueller Transport dorthin eingeleitet werden kann. Auskunft hierüber geben, mehr oder minder detailliert, die von den zuständigen Aufsichtsbehörden der Bundesländer aufgestellten Notfall-Pläne und die von ihnen zum Teil auch benannten Institute und Einrichtungen. Darüber hinaus wäre es aber u.E. vordringlich, über die Grenzen der Bundesländer hinweg eine einheitliche Rahmenkonzeption bezüglich einer optimalen Versorgung und stationären Unterbringung eventueller Strahlenunfälle sowie eine zentrale oder mehrere regionale strahlenschutzärztliche Beratungsstellen zu schaffen.

Der Dank des Herausgebers gilt insbesondere dem Hauptschriftleiter der ASA, Herrn Kollegen Berensmann, für seine Initiative und tatkräftige Mithilfe bei der Entstehung und Gestaltung dieses Buches, allen Mitautoren für ihre verständnisvolle Mitarbeit und viele wertvolle Anregungen, sowie dem Verlag für sein Entgegenkommen bei der Veröffentlichung.

Kernforschungszentrum Karlsruhe  
im April 1972

G. Möhrle

# 1. Physikalische und biologische Grundlagen der Strahlenwirkung auf den Menschen

A. Müller

## 1.1. Einleitung

Von den verschiedenen ionisierenden Strahlen sollen im Folgenden nur die behandelt werden, die wegen ihrer Verbreitung als mögliche Ursache von Strahlenunfällen in Frage kommen. Bei der Kerntechnik sind das in erster Linie Gamma- und Neutronenstrahlen. Da die Röntgenstrahlen sich von Gammastrahlen nur durch die Art ihrer Erzeugung unterscheiden, und in der Medizin in großem Umfang angewendet werden, sind sie ebenfalls in die Betrachtung eingeschlossen. Die genannten Strahlen erzeugen Folgestrahungen wie Elektronen- und Protonenstrahlen, die ebenfalls besprochen werden, sowie auch die von radioaktiven Quellen ausgesandten Strahlen. Ausgeschlossen sind dagegen elektromagnetische Strahlen größerer Wellenlänge wie Licht-, Ultraviolett- oder Wärmestrahlen sowie mechanische Strahlen wie Schall oder Ultraschall.

## 1.2. Radioaktivität

### 1.2.1. Zerfallsarten

Radioaktive Nuklide wandeln sich spontan in andere Arten von Atomkernen um. Beim Betazerfall ( $\beta^-$ ) werden Elektronen emittiert mit einem Energiespektrum, das sich von null bis zu einer Maximalenergie erstreckt. Der zerfallende Atomkern geht dabei in einen isobaren Kern mit gleicher Nukleonenzahl und einer um eins erhöhten Ordnungszahl über. Viele Nuklide zerfallen unter Aussendung von Positronen ( $\beta^+$ ) oder durch Einfang von Elektronen ( $\epsilon$ ). Dabei vermindert sich die Ordnungszahl um eine Einheit. Die Positronen besitzen ebenfalls ein Energiespektrum mit einer Maximalenergie. Ihre Strahlenwirkung unterscheidet sich nicht wesentlich von der der Elektronen. Bei der Vereinigung eines Positrons mit einem Elektron entsteht eine Gammastrahlung bestimmter Energie, die sogenannte Vernichtungsstrahlung. Gammastrahlung tritt bei den meisten Betazerfällen und neben charakteristischer Röntgenstrahlung auch beim Elektroneneinfang auf. Alphastrahler sind fast ausschließlich unter den sehr schweren Nukliden zu finden, unter anderen die natürlich vorkommenden Isotope von Uran, Thorium, Radium und Radon sowie künstlich erzeugtes Plutonium und andere Transurane. Beim Zerfall vermindert sich die Ordnungszahl um zwei und die Massenzahl um vier Einheiten. Auch bei dieser Zerfallsart treten gewöhnlich Gammastrahlen auf. Die Alphastrahlen sind biologisch sehr wirksam, wegen ihrer geringen Reichweite jedoch nur, wenn sie im Körperinnern entstehen. Die Inkorporation solcher Elemente bildet daher ein hohes gesundheitliches Risiko. Entsprechend niedrig sind die Freigrenzen, deren Überschreiten beim Arbeiten mit diesen Stoffen besondere Vorsichtsmaßnahmen erfordert (s. Kap. 6, Tab. 1).

Zerfallsarten, die nur bei sehr schweren Nukliden auftreten, sind die spontane und die induzierte Kernspaltung (Ks). Die letztere wird durch langsame oder schnelle Neutronen ausgelöst und läuft in großem Umfang in Kernreaktoren ab. Bei der Kernspaltung entstehen neben Gamma- und Neutronenstrahlen zwei annähernd gleich schwere Kernbruchstücke, die mit hoher Energie auseinanderfliegen und in den meisten Fällen radioaktiv sind.

Tab. 1 Einige medizinisch wichtige radioaktive Nuklide

Nuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart	Zerfallsenergie MeV	Prozentualer Anteil der Zerfallsart
$^3\text{H}$	12,26 a	$\beta^-$	0,018	
$^{14}\text{C}$	5730 a	$\beta^-$	0,156	
$^{24}\text{Na}$	15,0 h	$\beta^-, \gamma$	5,51	
$^{32}\text{P}$	14,3 d	$\beta^-$	1,710	
$^{35}\text{S}$	88 d	$\beta^-$	0,167	
$^{36}\text{Cl}$	$3,1 \cdot 10^5$ a	$\beta^-, \epsilon$	0,712 1,14	98,1 % 1,9 %
$^{40}\text{K}$	$1,28 \cdot 10^9$ a	$\beta^-, \epsilon, \gamma$	1,35 1,505	89 % 11 %
$^{45}\text{Ca}$	165 d	$\beta^-, \gamma$	0,252	
$^{54}\text{Mn}$	303 d	$\epsilon, \gamma$	1,379	
$^{59}\text{Fe}$	45 d	$\beta^-, \gamma$	1,57	
$^{60}\text{Co}$	5,26 a	$\beta^-, \gamma$	2,819	
$^{65}\text{Zn}$	244 d	$\beta^+, \epsilon, \gamma$	1,353	
$^{89}\text{Sr}$	52 d	$\beta^-, \gamma$	1,463	
$^{90}\text{Sr}$	28,1 a	$\beta^-$	0,546	
$^{90}\text{Y}$	64 h	$\beta^-, \gamma$	2,27	
$^{125}\text{I}$	60 d	$\epsilon, \gamma$	0,149	
$^{131}\text{I}$	8,07 d	$\beta^-, \gamma$	0,970	
$^{137}\text{Cs}$	30,2 a	$\beta^-, \gamma$	1,176	
$^{198}\text{Au}$	2,69 d	$\beta^-, \gamma$	1,374	
$^{210}\text{Po}$	138,4 d	$\alpha, \gamma$	5,408	
$^{222}\text{Rn}$	3,82 d	$\alpha, \gamma$	5,587	
$^{226}\text{Ra}$	1600 a	$\alpha, \gamma$	4,88	
$^{232}\text{Th}$	$1,41 \cdot 10^{10}$ a	$\alpha, \gamma$	4,08	
$^{238}\text{U}$	$4,51 \cdot 10^9$ a	$\alpha$	4,27	77 %
		Ks		23 %

### 1.2.2. Kernisomerie

Schließlich gibt es isomere Nuklide mit gleicher Massen- und Ordnungszahl aber verschiedenem Energieinhalt. Das Isomer im höheren Energieniveau

kann entweder spontan unter Aussendung von Gammastrahlen in ein tiefer liegendes übergehen, oder eine andere Zerfallsart erleiden. Die jeweiligen Übergangswahrscheinlichkeiten sind voneinander unabhängig.

### 1.2.3. Halbwertszeit

Halbwertszeit sowie Zerfallsart und -energie einiger medizinisch bedeutsamer natürlicher und künstlicher Nuklide sind in Tab. 1 aufgeführt.

Von einer gegebenen Menge eines radioaktiven Nuklids zerfällt ein bestimmter Bruchteil in einer für das Nuklid charakteristischen Zeit. Es ist üblich, die Halbwertszeit  $T$  anzugeben, in der die Hälfte der ursprünglich vorhandenen Menge zerfallen ist. Die Aktivität wird neuerdings in der Einheit  $s^{-1}$  gemessen. Für die bisher übliche Einheit Curie (Ci) gilt

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ ns}^{-1}$$

1 Ci ist angenähert der Aktivität von einem Gramm Radium.

### 1.2.4. Spezifische Aktivität

Die spezifische Aktivität ist die Aktivität eines Radionuklids pro Masseneinheit. Sie entspricht der maximalen Aktivität im trägerfreien Zustand und ist der Halbwertszeit umgekehrt proportional.

### 1.2.5. Dosisleistungskonstante

Die spezifische Gammastrahlenkonstante oder Dosisleistungskonstante ergibt sich aus der Gleichgewichts-Ionendosisleistung einer punktförmigen Strahlenquelle in einem bestimmten Abstand bezogen auf einheitliche Aktivität. Ist der Abstand zur Strahlenquelle groß im Verhältnis zu ihrer Ausdehnung, so nimmt die Dosisleistung im Vakuum proportional zum Quadrat des Abstandes ab.

### 1.2.6. Innere Strahlenquellen

Im Gegensatz zu anderen Strahlenquellen können radioaktive Stoffe sich auch im Körperinnern befinden. Die resultierende innere Strahlenwirkung hängt ab von Art, Konzentration und Verteilung der Radioaktivität, von der emittierten Strahlung, sowie von der Empfindlichkeit der betroffenen Organe. Zu therapeutischen Zwecken werden radioaktive Präparate in kontrollierter Weise für bestimmte Zeiten in das Körperinnere verpflanzt. Für den Umgang mit allen radioaktiven Nukliden sind Freigrenzen festgelegt worden, bei deren Überschreitung besondere Vorschriften zu beachten sind, um die schädliche biologische Wirkung in tragbaren Grenzen zu halten.

### 1.2.7. Natürliche und künstliche Strahlenquellen

Alle Lebewesen stehen unter der Einwirkung natürlicher Strahlenquellen. Die Höhenstrahlung entstammt der Sonne und dem Weltall, andere Strahlenarten der in der Natur vorhandenen Radioaktivität. Die kosmische Höhenstrahlung bewirkt eine zeitlich und örtlich nur wenig veränderliche äußere Strahlenbelastung. Die natürliche Radioaktivität kann dagegen sowohl als äußere wie als innere Strahlenquelle in sehr stark veränderlicher Stärke

auftreten. So ist etwa die innere Strahlenbelastung durch das natürlich radioaktive Nuklid  $^{40}\text{K}$  bei Milchtrinkern wesentlich höher als bei anderen Personen. Die äußere Bestrahlung durch natürliche Radioaktivität ist besonders hoch in Gebieten mit einem Untergrund aus Granit oder anderen Gesteinsarten mit relativ hohem Gehalt an Uran, Thorium, Kalium etc.

### *1.3. Strahlenarten und Wechselwirkung mit Materie*

Außer den Strahlenarten, die beim radioaktiven Zerfall auftreten, sind Röntgen- und Neutronenstrahlen von großer medizinischer Bedeutung. Alle Arten von Strahlen werden beim Durchgang durch Materie gestreut und absorbiert. Die bei der Streuung auftretende Ablenkung von Elementarteilchen der Strahlung aus ihrer geraden Bahn kann ohne oder mit begleitender Energieabgabe erfolgen. Im ersten Fall spricht man von elastischer, im zweiten von unelastischer Streuung. Die Gesamtenergie eines Elementarteilchens kann demgemäß in einem oder mehreren Einzelprozessen erfolgen.

Geladene Teilchenstrahlen wie Elektronen und Protonen geben ihre Energie vorwiegend in vielen kleinen Schritten an die durchstrahlte Materie ab. Dagegen sind bei ungeladenen Strahlen wie Photonen und Neutronen Einzelprozesse vorherrschend, bei denen die gesamte Energie oder ein großer Teil übertragen wird.

#### *1.3.1. Röntgenstrahlen*

Die Röntgen- oder X-Strahlen sind wie das Licht elektromagnetische Wellen, jedoch mit kleineren Wellenlängen, die im Bereich unterhalb 10 nm ( $10^{-8}$  m) liegen. Diesen entsprechen höhere Frequenzen und größere Quantenenergien. Die letztere hat einen Wert von 10 keV bei einer Wellenlänge von 12,4 nm.

##### *1.3.1.1. Erzeugung der Röntgenstrahlen*

Zur Erzeugung der Röntgenstrahlen dienen Röntgenröhren oder, bei höheren Energien, Elektronenbeschleuniger. Moderne Röntgengeräte enthalten eine evakuierte Röntgenröhre aus Metall. Im Inneren werden von einer Glühkathode Elektronen emittiert, die durch eine angelegte Hochspannung beschleunigt und auf eine wassergekühlte Antikathode aus Wolframmetall geleitet werden. Beim Aufprall entstehen die Röntgenstrahlen, die durch ein Fenster nach außen gelangen. Abstrahlung in unerwünschte Richtungen wird durch Abschirmungen und Blenden aufgefangen.

##### *1.3.1.2. Bremsstrahlung*

Die Energieverteilung der Röntgenstrahlen stellt ein breites, kontinuierliches Spektrum von Wellenlängen dar, dessen obere Grenze durch die maximale Röhrenspannung gegeben ist. Die untere Grenze wird durch Absorption der energiearmen, weichen Anteile in der Antikathode oder im Röhrenfenster bestimmt oder auch durch zusätzlich angebrachte Filter. Den Hauptanteil des Spektrums bildet gewöhnlich die uncharakteristische Bremsstrahlung, der einzelne charakteristische Linien überlagert sind. Im allgemeinen wird als Hochspannung eine pulsierende Gleichspannung benutzt. Gegenüber konti-



nuierlicher Gleichspannung liefert diese einen erhöhten Anteil an weicher Strahlung.

#### *1.3.1.3. Absorption der Röntgenstrahlen*

Die Intensität monochromatischer Röntgenstrahlen nimmt beim Durchgang durch Materie exponentiell ab. Jedes Material besitzt eine Halbwertschicht (HWS) bestimmter Dicke, die die einfallende Intensität unabhängig von ihrem Absolutwert um die Hälfte schwächt. Diese stellt ein Maß für die Durchdringungsfähigkeit oder „Härte“ der Strahlung dar. Die HWS hängt von der elementaren Zusammensetzung des durchstrahlten Materials sowie von der Photonenenergie ab. Sie vermindert sich mit steigender Ordnungszahl des Absorbers und mit abnehmender Strahlenenergie außer im Bereich höchster Energien.

Bei kleiner Photonenenergie beruht die Absorption hauptsächlich auf der Photoionisation, bei mittlerer auf dem Compton-Effekt und bei hoher Energie auf der Paarbildung. Die relativen Anteile der verschiedenen Prozesse, wie auch die Gesamtabsorption, ändern sich erheblich mit der Ordnungszahl des Absorbers. Bei wachsender Strahlenenergie nimmt die HWS besonders stark zu im Bereich des Photoeffekts. Im Bereich des Compton-Effekts steigt sie langsam bis zu einem Maximalwert an, um bei noch höheren Energien aufgrund der Paarbildung wieder schwach abzunehmen. Für Blei wird die maximale HWS von ca. 2 cm bei Photoenergien von etwa 4 MeV erreicht, für Wasser beträgt sie 50 cm bei 50 MeV und für Luft unter Normalbedingungen 500 m bei 40 MeV.

#### *1.3.1.4. Streustrahlen*

Während Photonen jeder Energie an schweren Atomkernen elastisch gestreut werden, tritt bei der Wechselwirkung im Bereich des Compton-Effekts vor allem bei leichten Elementen neben sekundärer Elektronenstrahlung auch gestreute Photonenstrahlung verminderter Energie auf. Die Wirkung der Streustrahlen, die stets weicher als die primären Strahlen sind, jedoch erhebliche Intensität haben können, darf bei Strahlenschutzmessungen nicht vernachlässigt werden.

#### *1.3.1.4. Strahlenhärte*

Beim Durchgang von Röntgenstrahlen mit einem breiten Energiespektrum durch Materie werden die weniger durchdringenden, weichen Anteile bevorzugt absorbiert. Mit zunehmender Schichtdicke wächst gleichzeitig der Anteil der harten Strahlung. Allerdings wird durch ein solches Filter gleichzeitig der harte Anteil abgeschwächt, wenn auch in geringerem Maß. Zur Erzielung einer optimalen Bestrahlung muß daher ein Kompromiß zwischen gewünschter Strahlenhärte und -intensität gefunden werden. Die Intensität kann auch durch Änderung des Röhrenstroms mit Hilfe der Kathodenheizung beeinflusst werden, die Strahlenhärte durch Variation der Röhrenspannung. Die maximale Röhrenleistung wird durch Konstruktion und Kühlung der Röhre, insbesondere der Antikathode begrenzt.

Bei der Anwendung von Röntgenstrahlen zur Diagnose wird die Strahlenhärte so gewählt, daß die beobachteten Organe möglichst kontrastreich

abgebildet werden. Die Strahlenhärte wird daher mit Hilfe der Röhrenspannung so gewählt, daß absorbierte und transmittierte Anteile vergleichbar sind. Mit der Dicke des durchstrahlten Gewebes nimmt gleichzeitig die Strahlenhärte zu. Das gilt auch dann, wenn dichteres Material, wie Knochen oder Zähne durchstrahlt werden. Zur Erzielung einer möglichst hohen Bildschärfe wird der Elektronenstrahl auf einen sehr kleinen Brennfleck der Antikathode fokussiert.

Für therapeutische Zwecke wird eine räumlich begrenzte und über einen bestimmten Querschnitt homogene Strahlung mit ausreichender Strahlenhärte benötigt. Weiche Röntgenstrahlen eignen sich nur zur Behandlung der Haut und hautnaher Gewebe. Zur Bestrahlung tiefliegender Gewebe werden Röhrenspannungen bis etwa 500 kV benutzt. Ultraharte Röntgenstrahlen bis etwa 100 MV können mit Elektronenbeschleunigern (Linearbeschleuniger, Betatron, Synchrotron) erzeugt und ebenfalls therapeutisch verwendet werden.

### *1.3.2. Gammastrahlen*

Anstelle von Röntgenstrahlen werden besonders in der Strahlentherapie vielfach Gammastrahlen verwendet, die sich von den ersteren nur durch die Art ihrer Erzeugung unterscheiden, nicht aber in ihren physikalischen Eigenschaften. Gammastrahlen mit Energien von 10 keV bis 10 MeV treten beim radioaktiven Zerfall von Atomkernen auf. Die in einem Kernreaktor entstehenden Gammastrahlen weisen ein breites Energiespektrum auf, während in den Spektren radioaktiver Präparate gewöhnlich nur wenige Linien erscheinen.

Beim Zerfall von radioaktivem  $^{60}\text{Co}$  wird Gammastrahlung von 1,17 MeV und 1,33 MeV ausgesandt. Kobaltquellen, die dieses Nuklid enthalten, sind für Bestrahlungszwecke weit verbreitet. Sie können sehr kompakt und einfach konstruiert werden. Die spezifische Aktivität von  $^{60}\text{Co}$  beträgt 1140 Ci/g und die zugehörige Dosiskonstante  $1,3 \text{ Rm}^2/\text{h Ci}$ . (1 R = Einheit der Standard-Ionendosis). Vergleicht man diesen Wert mit der Leistung eines Röntgengeräts von 5 kW elektrischer Röhrenleistung, so entspricht die Strahlungsleistung des letzteren ungefähr derjenigen von 4,5 g  $^{60}\text{Co}$  mit einer Aktivität von etwa 5 kCi.

### *1.3.3. Neutronenstrahlen*

#### *1.3.3.1. Erzeugung von Neutronenstrahlen*

Bei Kernreaktionen, wie sie in Kernreaktoren ablaufen, werden neben Gammastrahlen auch Neutronenstrahlen erzeugt. Im Gegensatz zu Röntgen- und Gammastrahlen, die sich als elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, bestehen Neutronenstrahlen aus Elementarteilchen, den Neutronen, die sich mit verschiedener Geschwindigkeit bewegen können. Sie durchdringen als neutrale Teilchen sehr leicht Materie.

#### *1.3.3.2. Wechselwirkung mit Materie*

Schnelle Neutronen mit Energien bis zu einigen MeV werden besonders wirkungsvoll durch Wasserstoff abgebremst, wobei Protonenstrahlen und

gestreute Neutronen vermindertener Energie auftreten. Die langsamen oder thermischen Neutronenstrahlen mit Energien von weniger als 1 eV werden von vielen Nukliden eingefangen, in organischer Materie weitgehend ebenfalls durch Wasserstoff.

Die große Durchdringungsfähigkeit und die bevorzugte Wechselwirkung mit Wasserstoff sind die Ursachen für die große biologische Wirksamkeit der Neutronen.

#### *1.3.3.3. Neutronenaktivierung*

Bei der Absorption langsamer Neutronen durch stabile Nuklide entstehen gewöhnlich radioaktive Nuklide. Da die Einfangwahrscheinlichkeiten sehr verschieden groß sind, kann diese Erscheinung zum Nachweis bestimmter Nuklide, deren Aktivierungswahrscheinlichkeit hoch ist, benutzt werden, indem die betreffenden Substanzen einem hohen Fluß thermischer Neutronen ausgesetzt werden.

Stoffe mit hoher Einfangwahrscheinlichkeit werden zur Dosismessung von Neutronen benutzt. Die Elemente Kadmium und Bor dienen zur Steuerung und Abschaltung von Kernreaktoren sowie zur Abschirmung thermischer Neutronenstrahlen.

#### *1.3.3.4. Kritikalität*

Zur Energieerzeugung in Kernreaktoren wird die Kernspaltung ausgenutzt, die durch langsame Neutronen induziert wird. Die Kritikalität gibt die Zahl thermischer Neutronen an, die pro Spaltprozess frei werden und für eine weitere Reaktion zur Verfügung stehen. Im stationären Betrieb eines Reaktors hat diese Größe demnach den Wert 1. Bei kleineren Werten kommt die Kettenreaktion zum Stillstand, während sie sich darüber zunehmend beschleunigt. Eine beträchtliche Erhöhung der Kritikalität für kurze Zeit kann technisch unerheblich sein, jedoch durch die gleichzeitige Steigerung des Neutronenflusses große biologische Wirkungen hervorrufen. Derartige Kritikalitätsunfälle können nicht nur an Kernreaktoren, sondern bei allen Ansammlungen spaltbaren Materials auftreten. Die medizinischen Gegenmaßnahmen bei einem Unfall müssen sich nach der Höhe der Neutronendosis richten.

#### *1.3.4. Elektronenstrahlen*

Die elektrisch ungeladenen Röntgen- und Gammastrahlen übertragen ihre Energie beim Durchgang durch Materie in erster Linie auf Elektronen, die sie in kleinen Bruchteilen bei einer großen Zahl von Elementarprozessen an die umgebende Materie abgeben. Die Elementarprozesse bestehen im wesentlichen aus Ionisationen und Anregungen von Molekülen entlang der Spur der Elektronen. Wegen der leichten Ablenkbarkeit eines Elektrons ist diese vielfach geknickt und gekrümmt, wodurch eine Bestimmung der Bahnlänge erschwert wird. Dennoch kann eine mittlere Reichweite der Elektronenstrahlen angegeben werden, die mit zunehmender Energie anwächst. In organischem Gewebe beträgt sie etwa 1 mm für Elektronen von 300 keV Energie und 10 cm für Elektronen von 20 MeV. Die große Reichweite macht

Elektronenstrahlen hoher Energie für die Strahlentherapie verwendbar. Sie werden mit den gleichen Elektronenbeschleunigern erzeugt, die auch zur Herstellung ultraharter Röntgenstrahlen dienen.

Elektronenstrahlen treten auch bei radioaktiven Zerfallsprozessen auf; sie werden dann als Betastrahlen bezeichnet. Diese besitzen gewöhnlich ein breites Energiespektrum mit einem Maximum, das bei jeder Zerfallsart verschieden ist und einige MeV erreichen kann.

### *1.3.5. Protonenstrahlen*

Protonenstrahlen sind beschleunigte Atomkerne des leichten Wasserstoffs. Sie entstehen bei der Abbremsung schneller Neutronenstrahlen in wasserstoffhaltigem Material. Bei jedem Elementarprozess übernimmt das Proton bis zu 100 % der Gesamtenergie eines Neutrons. Die Elementarladung des Protons ist im Gegensatz zur Elektronenladung positiv und an eine sehr viel höhere Masse gebunden. Es gibt seine Energie ebenfalls durch Ionisationen und Anregungen entlang seiner Bahn ab, doch ist diese wegen der höheren Masse weitgehend geradlinig. Dem entspricht eine gut definierte Reichweite. Sie beträgt in Gewebe etwa 1 mm bei 10 MeV. Die pro Wegstrecke abgegebene Energie, d.h. die Ionisationsdichte, ist wesentlich höher als bei Elektronen. Bei gleicher Strahlendosis ergibt sich daraus eine etwa zehnfach erhöhte biologische Wirksamkeit und somit auch eine entsprechend erhöhte Gefährlichkeit der primären Neutronenstrahlen.

### *1.3.6. Alphastrahlen*

Atomkerne des Heliums, die beim radioaktiven Zerfall schwerer Atomkerne mit Energien von einigen MeV ausgesandt werden, werden als Alphastrahlen bezeichnet. Sie besitzen die doppelte Ladung und die vierfache Masse der Protonen. Bei gleicher Energie beträgt die Reichweite der Alphastrahlen nur etwa ein Viertel der Protonenstrahlen, in Gewebe nur Bruchteile eines Millimeters und einige Zentimeter in Luft. Der Nachweis von Alphastrahlen kann daher schon durch sehr dünne Schichten verhindert werden. Ihre biologische Wirksamkeit beträgt wegen der hohen Ionisationsdichte annähernd das 20-fache von Gammastrahlen.

## *1.4. Dosimetrie*

### *1.4.1. Grundeinheiten*

Wird Materie von energiereichen Strahlen durchdrungen, so übt nur die auf das Material des bestrahlten Objekts übertragene, also die absorbierte, nicht aber die durchtretende Energie eine Wirkung aus. Die grundlegende Bezugsgröße der Strahlenwirkung ist die Energiedosis. Die absorbierte Energie ist definiert als die Differenz der aus einem Volumen ein- und austretenden Strahlenenergie, vermehrt um die Summe der Reaktionsenergien, die bei Kern- und Elementarteilchenprozessen während des Teilchendurchgangs frei werden. Die Energiedosis ist gleich dem Quotienten der absorbierten Energie und der Masse des betrachteten Volumens.

Die amtlich vorgeschriebene Einheit der Energiedosis ist das Joule pro Kilogramm (J/kg). Die ältere Einheit ist das Rad, das durch Zentijoule pro

Kilogramm ersetzt wird, und, soweit noch verwendet, mit rd bezeichnet wird, um Verwechslungen mit der Einheit des Winkelmaßes Radiant (rad) auszuschließen. Allerdings ist die Bezeichnung rad vorerst noch in vielen Veröffentlichungen zu finden.

Es gilt

$$1 \text{ rd} = 10^{-2} \text{ J/kg} = 1 \text{ cJ/kg.}$$

Aus der Definition des Rad ergibt sich ferner:

$$1 \text{ J/kg} = 2,388 \cdot 10^{-4} \text{ kcal/kg} = 6,242 \cdot 10^{15} \text{ eV/g}$$

Die Energiedosisleistung ist der Quotient aus der Energiedosis und der Zeit. Die früher gebräuchlichen Einheiten Rad/Sekunde (rd/s), Rad/Minute (rd/min) und Rad/Stunde (rd/h) entsprechen den neuen Einheiten Zentijoule/Sekunde (cJ/s), Zentijoule/Minute (cJ/min) und Zentijoule/Stunde (cJ/h).

Es gilt auch:

$$1 \text{ cJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ cW} \cdot \text{kg}^{-1}$$

#### *1.4.2. Messung der Energiedosis*

Die direkte Messung der Energiedosis mit Hilfe der Mikrokalorimetrie wird in erster Linie durch die geringe Größe der abgegebenen Energie erschwert und erfordert einen unverhältnismäßig hohen experimentellen Aufwand. In der Praxis werden deshalb indirekte Verfahren benutzt.

##### *1.4.2.1. Teilchenzähler*

Bei bekannter Energieverteilung kann aus der Teilchenzahl pro Raum- und Zeiteinheit und der räumlichen Anordnung die Energiedosis und ihre Ortsabhängigkeit berechnet werden. Dieses Verfahren ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet, die nur zum Teil durch umfangreiche Berechnungen wesentlich herabgesetzt werden können, so daß es nur in bestimmten Fällen angewandt wird, beispielsweise bei Kobaltstrahlen. Auch für Zwecke des Strahlenschutzes, bei denen Schnelligkeit und Mobilität oft wichtiger sind als hohe Genauigkeit, werden gelegentlich Zählgeräte eingesetzt, vor allem bei Überwachungsdosimetern.

##### *1.4.2.2. Ionisationsdosimeter*

Vielfach wird bei der Dosimetrie von Röntgen- und Gammastrahlen die Gleichgewichts-Ionendosis mit Hilfe von luftgefüllten Ionisations- oder Kondensatorkammern gemessen. Die Gleichgewichts-Ionendosis (früher Standard-Ionendosis, bisher in der Einheit Röntgen (R) gemessen) ist ein Sonderfall der Ionendosis, die von einer Photonenstrahlung in Luft erzeugt wird, wenn die sekundäre Elektronenstrahlung mit der Primärstrahlung im Gleichgewicht steht. Dies wird durch Kammerwände aus luftäquivalentem Material erreicht, deren Dicke größer als die Reichweite der Sekundärelektronen ist. Aus der Gleichgewichts-Ionendosis ergibt sich die Energiedosis in einem bestrahlten Material. Es ist zu beachten, daß sich die lokale Energiedosis beim Übergang von einem Material zum anderen nicht sprunghaft, sondern

in einem Bereich, der angenähert der Reichweite der Sekundärelektronen entspricht, stetig ändert. Taschendosimeter, wie z.B. Füllhalterdosimeter, die auf diesem Prinzip beruhen, haben daher eine entsprechend dicke Wand aus gewebeäquivalentem Material.

#### *1.4.2.3. Hohlraumdosimeter*

Eine direkte Bestimmung auch an solchen Stellen ist jedoch möglich mit Hilfe der Methode von Bragg-Gray. Dabei wird die Hohlraum-Ionendosis in einer gasgefüllten Kammer im Innern des bestrahlten Objekts gemessen.

In einem weiten Bereich primärer Photonenenergien (ca. 10 keV–3 MeV) ist das Verhältnis von Energiedosis zu Ionendosis energieunabhängig.

Mit Hilfe von Kondensator- oder Schlauchkammern kann die Hohlraum-Ionendosis in situ oder im Phantom bestimmt werden, das den Abmessungen und der atomaren Zusammensetzung des bestrahlten Objekts entspricht. Auch zur Dosimetrie von Neutronenstrahlen ist die Methode von Bragg-Gray benutzt worden. Die notwendigen Bedingungen werden von Kammern erfüllt, deren Wände und Füllgas dem umgebenden Material bezüglich der Wechselwirkung mit Neutronen, d.h. vor allem hinsichtlich des Wasserstoffgehalts äquivalent sind.

Schließlich kann die Bragg-Gray-Methode auch auf andere als luftgefüllte Hohlräume erweitert werden, so etwa auf Festkörperdosimeter, deren Größe und Zusammensetzung die Voraussetzungen des Verfahrens erfüllen.

#### *1.4.2.4. Festkörperdosimeter*

Für Zwecke des Strahlenschutzes werden vielfach Dosimetersysteme aus festen Stoffen verwendet. Darunter kann auch die Schwärzung von Filmplaketten eingeordnet werden, aber auch die viel verwendete Verfärbung von Gläsern und schließlich die Neutronenaktivierung fester Stoffe. Vor- und Nachteile der gebräuchlichsten Systeme für Zwecke des Strahlenschutzes werden in Kap. 2 behandelt.

#### *1.4.3. Strahlenart und Bewertungsfaktor*

Neben der Dosis sind Strahlenart sowie die zeitliche und räumliche Verteilung der Dosis von großer Bedeutung für die Strahlenwirkung. Ist die räumliche Verteilung nicht bekannt, so kann statt dessen die mittlere Energiedosis oder auch die absorbierte Gesamtenergie, die manchmal auch als integrale Energiedosis bezeichnet wird, angegeben werden. Große Abweichungen der biologischen Strahlenwirkung verschiedener Strahlenarten werden durch die unterschiedliche Ionisierungsdichte verursacht, die auch als linearer Energietransfer (LET) angegeben wird. Als Maß dient die relative biologische Effektivität (RBE), die auch als relative biologische Wirksamkeit (RBW) bezeichnet wird. Sie ist das Verhältnis der gegebenen Energiedosis einer Strahlenart und der Energiedosis einer Vergleichsstrahlung (zur Zeit hart gefilterte 200 kV-Röntgenstrahlung), mit der die gleiche Strahlenwirkung erzielt wird.

Anstelle des RBE-Faktors tritt bei Strahlenschutzmessungen der Bewertungsfaktor  $q$ , der mit der gegebenen Energiedosis multipliziert die Äqui-

valentdosis ergibt. Wie der RBE-Faktor ist  $q$  eine dimensionslose Zahl, die von der Strahlenart, der Teilchenenergie und den speziellen Bestrahlungsbedingungen abhängt. Der Einfluß der Strahlenart wird im Strahlenschutz gelegentlich durch den Qualitätsfaktor ( $Q$  oder  $QF$ ) berücksichtigt. Die Äquivalentdosis wird wie die Energiedosis in Einheiten von Joule pro Kilogramm ( $J/kg$ ) angegeben. Die Benutzung gleicher Einheiten für Energie- und Äquivalentdosis ohne zusätzliche Angaben kann leicht zu Verwechslungen führen, ist jedoch zur Zeit gesetzlich vorgeschrieben. Die bisher benutzte Einheit ist

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cJ/kg}$$

Der Bewertungsfaktor hängt in erster Linie von der Ionisierungsdichte ab. Für Photonen- und Elektronenstrahlen, die der minimalen Ionisierungsdichte nahekommen, gilt  $q = 1$ . Da  $q$  mit wachsender Ionisierungsdichte ansteigt, ergeben sich für Strahlen mit höherer Ionisierungsdichte Bewertungsfaktoren über eins. Für Neutronen- und Protonenstrahlen steigt er vom Wert 3 für thermische Neutronen bis auf 10 für Neutronen oder Protonen mit Energien von etwa 1 MeV. Bewertungsfaktoren bis zu 20 werden bei noch höheren Ionisierungsdichten etwa bei Alphastrahlen und Rückstoßteilchen der Kernspaltung erreicht.

Wirken mehrere Strahlenarten gleichzeitig, so ist die gesamte Äquivalentdosis gleich der Summe der Äquivalentdosen der einzelnen Strahlenarten.

## *1.5. Strahlenwirkungen*

### *1.5.1. Chemische Zwischenprodukte der Strahlenwirkung*

Die primär in Form von Ionisationen und Anregungen im Körper abgegebene Strahlenenergie bildet im weiteren Verlauf energiereiche chemische Zwischenprodukte, die ihrerseits die biologische Schädigung bewirken. Die einzelnen Elementarprozesse und ihre Bedeutung sind noch sehr wenig bekannt. Man weiß jedoch, daß freie Radikale und ihre Folgereaktionen dabei eine wichtige Rolle spielen. Wegen des hohen Wassergehalts lebenden Gewebes wurden vor allem die radikalischen Reaktionsprodukte des Wassers untersucht. Wahrscheinlich spielen Radikalreaktionen auch eine entscheidende Rolle bei gewissen Stoffen, die die Strahlenwirkung herabsetzen. Der hohe chemische Energiegehalt der Radikale ermöglicht die Zerstörung lebenswichtiger Moleküle und Zellstrukturen und erklärt damit die große Wirksamkeit sehr geringer Dosen absorbiertener Strahlenenergie, obwohl diese zum größten Teil in Wärme umgewandelt wird. Bei vollständiger Umwandlung in Wärme entspricht eine tödliche Gesamtkörperdosis von 1000 rd einer durchschnittlichen Erwärmung um nur  $2,4 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ .

### *1.5.2. Charakteristika biologischer Strahlenwirkung*

#### *1.5.2.1. Zeitliche Verzögerung der Strahlenwirkung*

Die Strahlenwirkung auf hohem Niveau biologischer Organisation zeigt im Gegensatz zu pharmakologischen Wirkungen gewöhnlich eine erhebliche zeitliche Verzögerung. So führt etwa die Applikation einer letalen Dosis auf den Gesamtkörper eines Säugetiers gewöhnlich erst nach vielen Tagen zum

Tode. Bei Bestimmungen der Letaldosis wird daher die Letalrate 30 Tage nach der Bestrahlung angegeben. Darüberhinaus sind Spätfolgen bekannt, die erst nach vielen Jahren in Erscheinung treten. Es ist zu unterscheiden zwischen somatischen Schäden, die sich nur auf das bestrahlte Individuum auswirken, und genetischen Schäden, von denen die Nachkommen betroffen werden.

### 1.5.2.2. Schwellwertdosis

Die Dosisabhängigkeit somatischer Strahlenschäden zeigt bei hoher Organisation eine große Ähnlichkeit mit der Wirkung von Drogen. Es existiert meist eine gut ausgeprägte Schwelle, unter der die gegebenen Dosen unwirksam sind, während darüber das beobachtete Ereignis mit Sicherheit eintritt (Abb. 1).

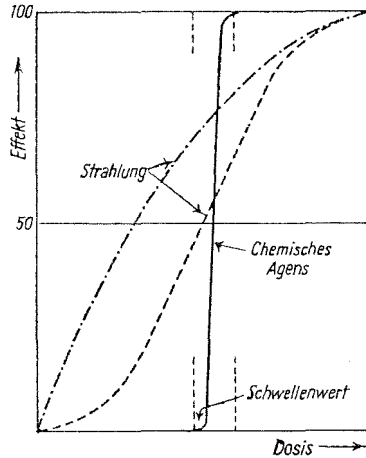


Abb. 1. Schematische Darstellung von Dosis-Effekt-Kurven für Gift- und Strahlenwirkungen (Zimmer 1960).

Als Schwellwertdosis wird gewöhnlich diejenige angegeben, bei der der interessierende Effekt mit 50 % Wahrscheinlichkeit eintritt. Die Höhe des Schwellenwerts, die ein Maß für die Strahlenresistenz darstellt, hängt stark vom beobachteten Effekt ab. Sie kann auch durch Änderung der äußeren Bedingungen in beträchtlichem Maß beeinflusst werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von strahlenschützender oder strahlensensibilisierender Wirkung. Temperaturerniedrigung sowie Entzug von Wasser oder Sauerstoff wirken im allgemeinen strahlenschützend, während unter verschiedenen Pharmaka sowohl schützende als auch sensibilisierende zu finden sind. Die Strahlenwirkungen auf vielzellige Organe und Organismen lassen sich weitgehend auf die Schädigungen bestimmter Zellen und diese wiederum auf strahlenbedingte Veränderungen elementarer Strukturen und Makromoleküle zurückführen. Bei eingehenden Untersuchungen solcher Prozesse haben sich folgende Hauptmerkmale herausgestellt.



#### *1.5.2.3. Schädigung der Zellteilung*

Zwar können alle Funktionen lebender Zellen durch Bestrahlung verändert und sogar zerstört werden, jedoch mit sehr unterschiedlicher Wirksamkeit. Im allgemeinen ist die Zellteilung der empfindlichste Prozess. In erster Linie wird dabei nicht der Teilungsvorgang selbst, sondern die ungestörte Teilung der Chromosomen beeinträchtigt. Schon bei geringen Dosen treten Chromosomenaberrationen auf, die meist nur wenige weitere Teilungen zulassen. Die Stoffwechselfunktionen werden dagegen durchweg erst bei sehr viel höheren Dosen geschädigt.

Bei der Inaktivierung einzelner Zellen sind im allgemeinen keine Schwellwertdosen zu beobachten. Vielmehr wächst die Inaktivierungswahrscheinlichkeit in einem sehr weiten Dosisbereich. Unter bestimmten Bedingungen wird sogar ein linearer Anstieg gefunden, der mit endlicher Steigung im Nullpunkt beginnt und sich dem Grenzwert von 100 % asymptotisch nähert (Abb. 1). Die Zahl der Nicht-Inaktivierten, also der Überlebenden, folgt bei halblogarithmischer Auftragung gegen die Dosis einer Geraden, deren Steigung die Strahlenempfindlichkeit wiedergibt.

#### *1.5.2.4. Treffertheorie der Strahlenwirkung*

Die verschiedenen Formen von Inaktivierungskurven werden durch die Treffertheorie erklärt. Eine lineare Dosisabhängigkeit wird danach durch voneinander unabhängige, stochastisch verteilte Ereignisse hervorgerufen, von denen jedes einzelne entweder mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit allein wirksam oder unwirksam ist. Eine kumulierende Wirkung fehlt bei solchen Ereignissen vollständig. Wird dagegen ein bestimmter Effekt durch das Zusammenwirken mehrerer Einzelereignisse hervorgerufen, so findet man eine umso deutlichere Ausbildung einer Schwellwertdosis, je höher die erforderliche Zahl von Einzelprozessen ist. Allerdings kann unter besonderen Bedingungen auch eine Eintrefferkurve durch Überlagerung mehrerer Inaktivierungskurven einer inhomogenen Population vorgetäuscht werden.

#### *1.5.2.5. Treffbereich*

Die Treffbereichstheorie befaßt sich mit der Natur der inaktivierenden Ereignisse. Es ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Strahlenempfindlichkeit und Größe des empfindlichen Treffbereichs. Die empirisch gefundenen Werte lassen sich teilweise unter der Annahme erklären, daß die Größe des Treffbereichs für die Inaktivierung der Vermehrung mit dem Gehalt an Desoxyribonukleinsäure zusammenhängt. Allerdings fügen sich eine Reihe von Ergebnissen nicht in diesen Rahmen ein, darunter die Inaktivierung einer Reihe von Mikroorganismen sowie die oben erwähnte Variabilität der Strahlenempfindlichkeit durch äußere Bedingungen.

### *1.5.3. Strahlenwirkung auf menschliche Zellen und Organe*

#### *1.5.3.1. Kritisches Organ*

Wegen der hohen Strahlenempfindlichkeit der Zellteilung sind Organe und Gewebe mit hoher natürlicher Teilungsrate, wie das Darmepithel, besonders

strahlenempfindlich. Im Gegensatz dazu sind Gewebe mit stark differenzierten, nicht mehr teilenden Zellen, wie das Gehirn, verhältnismäßig strahlenresistent. Die Rolle des kritischen Organs, dessen Schädigung die betrachtete somatische Wirkung in erster Linie verursacht, wird je nach den Bestrahlungsbedingungen von verschiedenen Organen übernommen.

#### *1.5.3.2. Pharmakologische Beeinflussung der Strahlenwirkung*

Die äußeren Bedingungen, die die Strahlenwirkung beeinflussen, sind bei Mikroorganismen, vor allem Bakterien und Bakteriophagen, eingehend untersucht worden. Für die Strahlenwirkung auf den Menschen haben sie dagegen nur begrenzte Bedeutung. Der wesentlichste Grund dafür ist, daß sich sowohl Temperaturänderungen als auch Wasser- und Sauerstoffkonzentration und ebenso die Konzentration von Drogen nur sehr schwer und in engen Bereichen ohne dauernde Schädigung des Organismus verändern lassen. In den dadurch gezogenen Grenzen ist allerdings in der Strahlentherapie die Sauerstoffkonzentration von Tumorgeweben durch Überführung der Patienten in Druckkammern erhöht worden, um die Strahlenempfindlichkeit der Tumorzellen zu erhöhen. Auch sind sensibilisierende als auch schützende Pharmaka erprobt worden.

#### *1.5.3.3. Erholungsvorgänge*

Sehr wichtig bei der Strahlenschädigung sind Erholungsvorgänge sowohl auf zellulärem als auch auf organischem Niveau. Die sehr verschiedenen Auswirkungen einmaliger und fraktionierter Bestrahlungen mit der gleichen Gesamtdosis sind in erster Linie auf solche Prozesse zurückzuführen.

#### *1.5.4. Genetische Schäden*

Strahlenschäden an menschlichen Keimzellen können zu genetischen Strahlenschäden führen. Diese wirken sich im Gegensatz zu somatischen Schäden auf die Nachkommen des Betroffenen aus. Es ist nicht sicher, ob auch für diese Art der Strahlenschädigung eine Schwellwertdosis existiert. Bis zum Beweis des Gegenteils ist daher jede Strahlendosis als genetisch schädlich und die Wirkung als kumulativ anzusehen. Die maximal zulässige Strahlendosis wird daher vor Beendigung der Fortpflanzungsfähigkeit eines Individuums durch den möglichen genetischen Strahlenschaden begrenzt. Dieser kann bei hohen Dosen zu Erbschäden der unmittelbaren Nachkommen führen. Bei niedrigen Dosen ist zwar eine Auswirkung auf die direkten Nachkommen wegen des rezessiven Charakters der meisten Schäden wenig wahrscheinlich, doch wirken sich auch Schäden dieser Art auf die Nachkommen der gesamten Population aus, wenn viele Individuen davon betroffen werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß jede menschliche Population einer natürlichen Strahlenbelastung ausgesetzt ist. Eine zusätzliche künstliche Strahlenbelastung kann sich daher erst schädlich auswirken, wenn sie den natürlichen Pegel wesentlich erhöht.

*Literaturhinweise*

1. *Jaeger, R.G.:* Dosimetrie und Strahlenschutz, Thieme, Stuttgart (1959)
2. *Bundesgesetzblatt:* Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 2.7.1969, Teil I, 55, 709 (1969)
3. *Bundesgesetzblatt:* Ausführungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 26.6.1970, Teil I, 62, 981 (1970)
4. *Zimmer, K.G.:* Studien zur quantitativen Strahlenbiologie, Steiner, Wiesbaden (1960)
5. *Lea, D.E.:* Actions of radiations on living cells, University Press, Cambridge (1946)
6. *Rajewsky, B. u. Mitarb.:* Strahlendosis und Strahlenwirkung, Thieme, Stuttgart (1956)



## 2. Physikalische Ermittlung der Personendosis bei akuter Teil- bzw. Ganzkörperbestrahlung

H. Kiefer

### 2.1. Was muß der Arzt wissen

Nach einem Unfall sind Kenntnisse über die Strahlenbelastung des Patienten für den Arzt eine wertvolle Hilfe bei Diagnose und Therapie. Er erwartet möglichst schnelle und möglichst genaue Angaben über die biologische Wirkungsdosis (Rem) in den einzelnen Organen des Patienten, vor allem in den kritischen Organen. Der Strahlenschutzphysiker wird in der Regel sofort nur grobe oder auch nur sehr unsichere Dosisangaben machen können, weil er anfangs aus irgendwelchen Daten extrapolieren muß und für genauere Angaben zusätzliche Rechnungen und Messungen notwendig sind. Außerdem sollte der Arzt daran denken, daß der Strahlenschutzphysiker unter Dosiswerten in Rem in der Regel die Äquivalentdosis versteht, deren Qualitätsfaktor nur von der Strahlenart und -energie abhängt, und nicht die RBW-Dosis, die sowohl effekt- als auch dosisabhängig ist.

Besser ist es, wenn sich der Arzt nicht mit einigen Zahlenwerten über die „Dosis“ begnügt, sondern sich vom Strahlenschutzphysiker Auskünfte einholt über

- die Strahlenquelle, wobei Strahlenart, Energie und Intensität und evtl. Betriebsart der Anlage, also Pulsbetrieb oder kontinuierliches Aussenden von Strahlung interessieren;
- das Strahlungsfeld, in dem sich der Unfall ereignete. Hier muß man wissen, welche Strahlenarten welcher Energien das gemessene Dosisfeld meist unterschiedlicher Intensität verursachen, wie die Streustrahlung nach Energie, Intensität und geometrischer Verteilung aussieht und ob evtl. Neutronen durch Kernreaktionen Sekundärstrahlung erzeugen;
- die Individualdosis, denen die Verunglückten ausgesetzt waren. Hierfür benötigt man Kenntnisse über Strahlenart, Energieverteilung und geometrische Verteilung der Dosis an der Körperoberfläche, um die Organdosis zu ermitteln. Wissen muß man hierzu nicht nur, mit welchen Dosimetersystemen gemessen wurde, sondern auch wo die Dosimeter getragen wurden und wie, also über oder unter der (Schutz-) Kleidung, blank oder in Plastiktaschen verpackt.

Auf Grund dieser Unterlagen kann zwischen Medizin und Strahlenschutz besprochen werden, welche genaueren Meßwerte für den Arzt noch von Nutzen wären, und der Strahlenschutzphysiker kann Zusatzberechnungen und -messungen liefern, in Sonderfällen sogar die Unfallsituation mit einem mit den notwendigen Meßgeräten bestückten Phantom wiederholen.

## 2.2. Welche Daten kann der Strahlenschutzphysiker liefern

### 2.2.1. Strahlenquelle

Hat der Unfall an einer intakten Strahlenquelle stattgefunden, das kann ein Kernreaktor, ein Beschleuniger, eine Hochcuriequelle oder auch nur eine Röntgenanlage sein, so kann in Sicherheitsberichten oder Betriebshandbüchern nachgelesen werden, welche Strahlenart bzw. Strahlenarten mit welcher Energieverteilung bei den eingestellten Betriebsbedingungen in welcher Intensität an repräsentativen Punkten der äußeren Abmessung zu erwarten sind. Nachmessungen der Strahlungsintensitäten sind relativ leicht mit Gasionisations- oder Szintillationsdetektoren möglich. Größer ist der Aufwand, wenn Energiemessungen der Strahlung notwendig sind. Ein  $\gamma$ -Spektrum mit einem NaJ(Tl)-Szintillationsdetektor läßt sich noch verhältnismäßig einfach aufnehmen, schwieriger, da Spezialdetektoren notwendig, ist ein Energiespektrum weicherer Strahlung, etwa von Streustrahlung einer Röntgenanlage zu bestimmen, und eine exakte Energieanalyse einer Neutronenquelle bleibt meist Spezialisten vorbehalten, wenn man sich nicht mit der Aufteilung in einige Energiebereiche begnügen kann.

Ist bei einem Unfall die Strahlenquelle durch irgendwelche technischen Fehler nicht intakt geblieben, kann zwar versucht werden, aus noch ablesbaren Betriebsdaten Auskünfte über die Strahlenquelle zu erhalten, im allgemeinen wird man aber in solchen Fällen ganz auf Messungen im Strahlenfeld angewiesen sein.

### 2.2.2. Strahlenfeld

Um Aufschluß zu erhalten, welcher Dosis jemand bei einem Unfall ausgesetzt war, kann die geometrische Dosisverteilung in der Umgebung des Unfallorts bestimmt werden, u.U. in Abhängigkeit von der Zeit bei Strahlungsfeldern schwankender Intensität. Oft liegen schon in den Sicherheitsberichten „Isodosenkurven“ für verschiedene Betriebszustände vor, sicher aber einige Dosiseinzelwerte. Die Ermittlung der Dosisverteilung wird in der Praxis eine Kombination aus Rechnung und Messung sein. Anhand der Daten über die Strahlungsquelle kann erst eine relative Dosisverteilung gerechnet werden, Meßwerte ergeben dann den Anschluß für „absolute“ Dosiswerte. Wenn während des Unfalls schreibende Monitore in Betrieb waren, können auch die dort abzulesenden Meßdaten schon den gesuchten Anschlußwert liefern. Andernfalls läßt sich die  $\gamma$ -Dosisleistung am besten mit Ionisationskammergeräten ermitteln, wobei für energiearme Strahlung – etwa von Röntgenanlagen – spezielle Weichstrahlionisationskammern notwendig sind. Die Neutronenäquivalentdosisleistung kann unabhängig von der Neutronenenergie mit einem Rem-Counter bestimmt werden. Aus Strahlenschutzgründen – hohe Dosisleistung – können solche Messungen mitunter nicht sauber ausgeführt werden. In solchen Fällen empfiehlt es sich, eine größere Zahl von Ortsdosimetern (z.B. Radiophotolumineszenz- oder Thermolumineszenzdosimeter) bei abgeschalteter oder abgeschirmter Strahlenquelle auszulegen, dann den Bestrahlungszustand während des Unfalls für eine definierte Zeit herzustellen und anschließend die Dosimeter auszuwerten. Diese wenig aufwendige Messung gibt ein gutes Bild über die Dosisverteilung.

Kritikalitätsunfälle sollen besonders erwähnt werden. Mit ihnen muß in erster Linie bei der Verarbeitung und Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen, bei der Herstellung und Lagerung von Kernbrennstäben und beim Experimentieren mit kritischen Anordnungen gerechnet werden, obwohl wegen der umfangreichen Sicherheitsvorkehrungen die Wahrscheinlichkeit hierfür gegenüber anderen Strahlenunfällen äußerst gering ist. Hier tritt praktisch ein Strahlenblitz gemischt aus  $\gamma$ - und Neutronenstrahlung auf, der sogar kurzzeitig oszillieren kann. Wenn mit  $\gamma$ -Detektoren bestückte, schreibende Kritikalitätswarnanlagen eingebaut waren, kann u.U. aus der  $\gamma$ -Anzeige die Zahl der Spaltungen abgeschätzt und damit auch die Neutronendosis überschlagen werden. Weitere Daten lassen sich durch die Messung neutroneninduzierter Aktivität in Elementen wie Gold, Kupfer, Kobalt, Natrium, Schwefel gewinnen, die sich im Strahlungsfeld befanden. Da bestimmte Neutronenreaktionen nur oberhalb einer bekannten Neutronenenergie möglich sind, ergeben derartige Aktivierungsmessungen nicht nur Auskünfte über die Neutronenfluenz (Neutronen/cm<sup>2</sup>), sondern auch grob über die Energieverteilung, so daß Dosisangaben möglich sind.

Selbst wenn man nun die gewebeäquivalente Dosisverteilung hat, was bei Wahl der richtigen Meßgeräte möglich ist, muß aus den Angaben über die Strahlenquelle Strahlenart und Energieverteilung berücksichtigt werden, damit man auf die Strahlenbelastung der kritischen Organe extrapolieren kann. Das Hauptfragezeichen, auch wenn die aufgezählten Daten über die Strahlenquelle und das Strahlenfeld vorliegen, bleibt aber, weil man genau wissen sollte, an welcher Stelle, in welcher Haltung und welcher Richtung zugewandt der Betroffene seine Strahlungsdosis über welche Zeit erhalten hat. Noch schwieriger wird das Problem, wenn sich die Strahlenbelastung nicht über eine oder wenige Sekunden, sondern über Minuten erstreckte und damit größere Bewegungen am Unfallort nicht auszuschließen sind. Hier hilft erst die Individualdosimetrie weiter.

### 2.2.3. Individualdosis

Auf Grund unserer Strahlenschutzgesetzgebung muß bei jedem, der sich in Kontrollbereichen aufhält, die „Strahlendosis“ am Rumpf gemessen werden. „Die Messungen am Körper sind nach zwei voneinander unabhängigen Verfahren vorzunehmen.“ Auch bei Erfüllung dieser Forderung werden wir bei Unfällen nicht ohne weiteres die notwendige Meßinformation über die Dosis in den kritischen Organen erhalten können. Denn das vorgeschriebene Personendosimeter mißt ja nur die Dosis an der Stelle, wo es getragen wird, sagt aber in der Regel nichts, in Sonderfällen wenig über die geometrische Dosisverteilung an der gesamten Körperoberfläche aus. Hier helfen erst zusätzliche Informationen aus den Daten über das Strahlungsfeld.

Zeigt ein Dosimeter gewebeäquivalent die Dosis an, was bei Dosimetern angestrebt wird, hat man keine Aussage über die Energie der Strahlung, kann also nicht sagen, um welchen Faktor die Dosis von der Stelle, wo sie gemessen wurde, bis zum interessierenden kritischen Organ geschwächt wurde. Hier helfen Daten über die Strahlungsquelle, manche Dosimetersysteme erlauben jedoch darüber gewisse Aussagen.

Lieferrn Dosimetersysteme keine gewebeäquivalenten Dosiswerte, zeigen sie

also „energieabhängig“ an, wird die  $\gamma$ - bzw. Röntgendosis bei Energien unter 100 keV deutlich überbewertet. Liefern dagegen Dosimetersysteme richtungsabhängige Meßwerte – dabei wird von der Richtungsabhängigkeit der Anzeige durch Schwächung der Strahlung im menschlichen Körper einmal abgesehen –, wird die Dosis unterbewertet.

Schließlich ist zu bedenken, daß der Meßbereich der im Routinestrahenschutz eingesetzten Dosimetersysteme nicht immer ausreicht, die bei Unfällen zu messenden hohen Dosen zu erfassen. Aus diesen Gründen sollen die verschiedenen Systeme und Meßmöglichkeiten kurz erläutert und kommentiert werden.

### 2.2.3.1. Taschenionisationskammern

Taschenionisationskammern, ihrer Form wegen auch Füllhalterdosimeter genannt, arbeiten nach dem Kondensatorprinzip. Die Kammer wird vor der Messung aufgeladen und verliert bei Bestrahlung durch die in der Kammerwand und im Gasraum entstehenden Ionen Ladung. Der Ladungsverlust ist als Maß für die Dosis ablesbar. Bei guten Geräten wird als Meßwert die gewebeäquivalente Dosis über einen weiten Energiebereich (hinter einem Flächengewicht, das der Kammerwand entspricht) abgelesen. Eine Aussage über die Strahlungsenergie läßt sich nicht machen. Fehlinterpretationen können durch  $\beta$ -Strahlung entstehen, die teilweise mitgemessen wird und eine zu hohe  $\gamma$ -Dosis vortäuscht. Eine Richtungsabhängigkeit – in diesem Fall Unterschätzung der Dosis – tritt auf, wenn der Strahleneinfall auf die Enden des Meßgerätes gerichtet ist. Die Taschenionisationskammer entlädt sich relativ leicht durch mechanische Stöße, es wird dann die maximal ablesbare Dosis vorgetäuscht.

In Unfallsituationen ist von Taschenionisationskammern selten eine interessante Information zu erwarten, weil der Meßbereich dieser Geräte nur etwa den Faktor 20 überdeckt, das Routinegerät also von 10 mrem bis 200 mrem mißt. Nur wenn mehrere Füllhalterdosimeter verschiedener Empfindlichkeit getragen werden, kann der im Strahlenschutz notwendige Dosisbereich voll erfaßt werden.

### 2.2.3.2. Filmdosimeter

Photographische Schichten werden durch ionisierende Strahlung geschwärzt. Eine Emulsion kann dabei einen Dosisbereich von  $1:10^2$  bis  $1:10^3$  erfassen, so daß ein Routedosimeter, das auch bei Unfallsituationen noch Meßwerte liefern soll, mindestens 2 verschieden empfindliche Filmemulsionen enthalten muß.

Wegen des unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten des Gewebes bzw. der Luft einerseits und der Photoemulsion andererseits zeigen Filme eine starke Energieabhängigkeit, d.h., daß 40 keV- $\gamma$ -Strahlung um den Faktor 15 bis 40 gegenüber 1 MeV- $\gamma$ -Strahlung zu hoch gemessen wird. Dieser Fehler kann auf 2 Wegen ausgeglichen werden:

- a) Der Film wird so mit Metall- und/oder Kunststoff-Filtern umgeben, daß die Intensität der Strahlung bis 80 keV um den gleichen Faktor im Film geschwächt wird, wie diese Strahlenenergie durch den Film überbewertet



wird. Viele Filmdosimeter, die im Ausland benützt werden, arbeiten nach diesem Prinzip. Da sie im Idealfall energieunabhängig anzeigen, erlauben sie keine Aussage über die Energieverteilung der registrierten Strahlung.

- b) Der Film liegt in der Filmplakette zwischen einigen, nebeneinander angeordneten, unterschiedlich dicken Metallfiltern. Da die Strahlung in den Metallfiltern unterschiedlich geschwächt wird, zeigt der entwickelte Film verschieden geschwärtzte Felder. Durch Differenzbildung der Schwärzung der einzelnen Felder läßt sich eine Aussage über die Strahlungsenergie gewinnen. Für verschiedene Strahlungsenergien liegen dann unterschiedliche Eichkurven über den Zusammenhang zwischen Filmschwärzung und Dosis vor. Bei Mischfeldern wird die Dosis überbewertet. Nach diesem Verfahren arbeitet die amtliche deutsche Filmplakette (Abb. 1). Sie liefert bei Unfällen die wichtige Zusatzinformation der Strahlenenergie, wenn auch mit beachtlichen Unsicherheiten behaftet, falls es sich wie meist um gemischte Strahlenfelder handelt, etwa um harte und weiche  $\gamma$ -Strahlung mit einem  $\beta$ -Anteil. Der Nachteil der Richtungsabhängigkeit (Unterbewertung der Dosis) kann in Sonderfällen eine Zusatzaussage über die Richtung, aus der die Strahlung kam, ermöglichen, also auch vorteilhaft sein.

Allerdings ist bei Unfällen eine Dosisbestimmung im oberen Schwärzungsbereich problematisch, weil dann die resultierende Schwärzung sehr stark von der Dosisleistung, der Strahlungsenergie und sogar von der Reihenfolge der vorkommenden Bestrahlungsarten abhängt. Außerdem liegen in der Regel keine mit so hohen Dosen belichteten Vergleichsfilme vor, die zu jedem Entwicklungsgang notwendig sind. In der deutschen Filmplakette ist deshalb Platz für ein zusätzliches Glas- oder Thermolumineszenzdosimeter, um daraus eine zuverlässigere Dosisinformation zu erhalten.

Der in der Routineüberwachung zusätzlich eingesetzt Kernspurfilm zum Nachweis schneller Neutronen ist bei Unfällen meist ohne Wert, da eine zusätzliche  $\gamma$ -Dosis von ca. 20 rd den Film schon so stark schwärzt, daß Kernspuren vom Untergrund nicht mehr zu trennen, also nicht mehr auszuwerten sind. In Abb. 1 ist deshalb zu sehen, daß in der amtlichen Neutronen-Filmplakette Aktivierungssubstanzen zum Neutronennachweis bei hohen Dosen vorgesehen sind.

### 2.2.3.3. Glasdosimeter

Glasdosimeter bestehen aus silberaktivierten Metaphosphatgläsern aus Alkali- und Erdalkaliphosphaten mit optimal 8 % Silbermetaphosphatzusatz. Sie zeigen nach Bestrahlung Radiophotolumineszenz (deshalb auch RPL-Dosimeter genannt), d.h., daß die durch Bestrahlung freigesetzten Elektronen Fluoreszenzzentren erzeugt haben, die, wenn sie – zur Auswertung – mit UV-Licht angeregt werden, ein Fluoreszenzlicht im gelb-orangen Bereich aussenden. Die mit einem Photomultiplier gemessene Lichtintensität ist proportional der Zahl der Fluoreszenzzentren, die wieder dosisproportional ist.

Glasdosimeter überstreichen einen Meßbereich von 5 bis 6 Zehnerpotenzen, so daß das Routinedosimeter für den Normalbetrieb auch bei allen Unfällen

ausreicht. Die Energieabhängigkeit des blanken Glases (Faktor 7) wird wie bei einigen Film dosimetersystemen dadurch eliminiert, daß das Glas in Filter zur Reduktion der Strahlungsintensität niederenergetischer  $\gamma$ -Strahlung verpackt wird. Das in Deutschland übliche Kugeldosimeter mit Metall- und Kunststoff-Filterung zeigt praktisch energie- und richtungsunabhängig die Gewebedosis an, wobei die  $\beta$ -Strahlung nicht mehr registriert wird.

Wenn bei Unfällen die Strahlenenergie ermittelt werden muß, läßt sich bei Gläsern durch differentielle Abtastung die Schwächung der Strahlungsintensität in der Glastiefe und damit die  $\gamma$ -Energieverteilung bestimmen. Sogar die Strahlungsrichtung ist auf diese Weise feststellbar, wenn das Dosimeter während des Unfalls in bekannter Position – z.B. unbeweglich in einen Kunststoffschlauch verpackt – getragen wurde.

Darüber hinaus kann das Glasdosimeter auch als Kritikalitätsdosimeter dienen, weil Neutronen oberhalb 2,5 MeV  $^{31}\text{P}$  in  $^{31}\text{Si}$  und die langsamen Neutronen  $^{31}\text{P}$  in  $^{32}\text{P}$  umwandeln. Die beiden Radionuklide senden so energiereiche  $\beta$ -Strahlung aus, daß eine Aktivitätsmessung über die Cerenkov-Strahlung in Glas möglich ist. Trennen lassen sich die beiden Radionuklide und damit der Anteil der langsamen von den schnellen Neutronen durch Halbwertszeitanalyse innerhalb von 24 Stunden.

In der Praxis haben sich Glasdosimeter vor allem deshalb so gut bewährt, weil sie sehr zuverlässig sind und Auswertungen beliebig oft möglich sind, ohne daß der Meßwert gelöscht wird.

#### 2.2.3.4. Thermolumineszenzdosimeter

Bestimmte Kristalle haben die Eigenschaft, nach Bestrahlung mit ionisierender Strahlung und anschließender Erhitzung Licht auszusenden. Diese Eigenschaft heißt Radiothermolumineszenz, Dosimeter nach diesem Prinzip Thermolumineszenzdosimeter (abgekürzt meist TLD). Ihr Meßbereich ist ähnlich groß wie der von Glasdosimetern, im Gegensatz zu ihnen wird jedoch bei der Auswertung der Meßwert gelöscht.

Verwendung finden vor allem Calciumfluorid und Lithiumfluorid, wobei das letzte von besonderem Interesse ist. Es zeigt nämlich auf Grund seiner niederen Ordnungszahl eine nur wenig vom Gewebe abweichende Energieabhängigkeit der Dosisanzeige und kann deshalb ohne Filterung in Form kleiner Plättchen oder Stäbchen am Körper getragen werden. Der erhaltene Meßwert ist die Summendosis aus  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung, wobei auch hier über die Strahlungsenergie keine Aussage gemacht werden kann, falls nicht mehrere, verschieden gefilterte TLD benutzt werden. TL-Dosimeter finden vor allem als Fingerringdosimeter zur Messung hoher Teilkörperdosen Anwendung.

#### 2.2.3.5. Kritikalitätsdosimeter

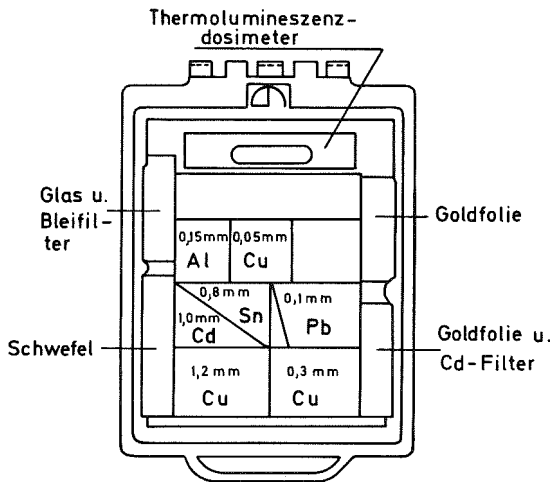
Falls die zur Routineüberwachung getragenen Personendosimeter bei Kritikalitätsunfällen zu wenig Information liefern, mit derartigen Unfällen aber zu rechnen ist, werden zusätzlich spezielle Dosimetersysteme, sog. Kritikalitätsdosimeter getragen. Solche Systeme – fast jede Einrichtung hat hier ein eigenes – bestehen meist aus einem unempfindlichen kleinen Festkörperdosimeter (TL- oder RPL-Dosimeter) für hohe  $\gamma$ -Dosen, einigen Aktivie-

rungs- und Schwellwertdetektoren zur Messung der Neutronenfluz und Grobbestimmung der Neutronenenergie. Auch Festkörperspurendetektoren finden Anwendung. Sie bestehen aus einer Kombination einer Kunststoffolie mit Spaltstoff. Die Neutronen spalten den Spaltstoff, die Spalttrümmer hinterlassen im Kunststoff Schäden, die durch Anätzen so vergrößert werden können, daß sie im Mikroskop auszählbar sind. Der Vorteil des Verfahrens ist der, daß auch bei beliebig hohem  $\gamma$ -Strahlenpegel das Meßverfahren nicht gestört wird.

2.2.3.6. Individualdosimetrie durch Aktivierungsmessungen

Durch Neutronen, aber auch durch andere Strahlenarten hoher Energie, wie sie bei Beschleunigern auftreten, kann der Körper selbst aktiviert werden. Solche Messungen sind besonders nach Kritikalitätsunfällen von Bedeutung, wo das Natrium im Blutserum des menschlichen Körpers schon durch langsame Neutronen aktiviert wird. Das entstehende  $^{24}\text{Na}$  kann mit einer Nachweisempfindlichkeit von 100 mrd im Menschen direkt mit einem Ganzkörperzähler gemessen werden. Die ermittelte Ganzkörperdosis muß noch auf das Neutronenspektrum korrigiert werden. Statt einer Direktmessung ist auch die Messung von Blutproben möglich, wo mit einer einfachen Anordnung und  $50\text{ cm}^3$  Blut eine Nachweisgrenze von 1 rd erreicht wird.

Außer Natrium kann an körpereigenen Elementen noch das bei der Reaktion  $^{32}\text{S}(n,p)^{32}\text{P}$  entstandene Phosphor gemessen werden. Schwefel als Ausgangssubstanz findet sich vor allem in den Haaren. Durch Messung der an verschiedenen Körperstellen entnommenen Haare läßt sich u.U. die Strahleneinfallrichtung bestimmen. Als untere Nachweisgrenze für diese Art



Abb, 1: Amtl. deutsche Neutronenfilmplakette. Die Beschriftung zeigt, wo auf Wunsch RPL- und TL-Dosimeter sowie Aktivierungsmaterial eingesetzt werden können.

der Messung gelten 10 rd. Neben körpereigenen Substanzen sollte auch an die Messung des Schwefels in der Wolle der Kleidung und in den dort verarbeiteten Gummizügen gedacht werden. Hier findet sich meist genügend Material, um die Strahleneinfallrichtung ermitteln zu können. Schließlich können auch noch verschiedene Metalle etwa in Form von Geldstücken, Schnallen, Ringen, Metallarmbändern, Manschettenknöpfen usw. weitere Aufschlüsse über Neutronenintensität und -Energie liefern.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß zur Feststellung der Unfalldosis in den kritischen Organen der Meßwert *eines* Meßinstrumentes selten ausreicht, daß aber aus Angaben über die Strahlenquelle, das Strahlenfeld und die gemessene „Personendosis“ die gesuchte Unfalldosis mit genügender Genauigkeit ermittelt werden kann.

#### *Übersichtsliteratur:*

- H. Kiefer, R. Maushart* Strahlenschutzmeßtechnik, Karlsruhe (1964)  
Nuclear Accident Dosimetry Systems, Proc. of IAEA-Panel,  
Wien (1970)

### 3. Ärztliche Maßnahmen bei akuter Ganz- bzw. Teilkörperbestrahlung

T. M. Fliedner

#### 3.1. Formen der Strahlenunfälle

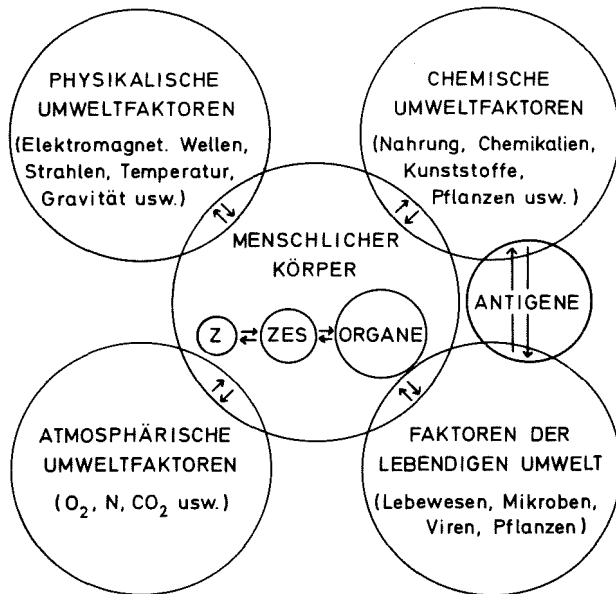
##### 3.1.1. Allgemeine Vorbemerkungen und pathophysiologische Prinzipien

Außergewöhnliche Strahlenbelastungen und ihre Konsequenzen sind im Prinzip seit der Entdeckung der Röntgenstrahlen bekannt. Viele Ärzte, Techniker und Schwestern haben in der Frühzeit der Radiologie an sich selbst erfahren müssen, welche Folgen die Belastung des Körpers oder eines Teiles mit ionisierenden Strahlen haben. Ihre Krankengeschichten sind mit großer Sorgfalt aufgezeichnet worden (1).

Der Grund für dieses Buch und für dieses Kapitel liegt in einer erfreulichen Entwicklung: Strahlenunfälle und außergewöhnliche Strahlenbelastungen sind durch die strengen Überwachungsrichtlinien und -maßnahmen beim Umgang mit strahlender Energie so selten geworden, daß die meisten Ärzte die Früh- und Spätfolgen einer ionisierenden Bestrahlung nicht aus eigener Erfahrung kennen. Dieses Kapitel ist für jene Ärzte geschrieben, die sich rasch über die ärztlicherseits zu treffenden Maßnahmen bei einem Strahlenunfall orientieren wollen und die sich auch über die pathophysiologischen Grundlagen für die gegebenen Empfehlungen informieren wollen.

Es ist daher die Aufgabe dieses Kapitels, zunächst die Formen der Strahlenunfälle zu erläutern. Daran schließt sich eine Schilderung der Folgen von akuten Ganzkörperbestrahlungen in verschiedenen Dosisbereichen an. Daraus ergeben sich die Möglichkeiten der Frühdiagnose, die für die zu treffenden Maßnahmen von großer Bedeutung sind. Da nur selten eine homogene Ganzkörperbestrahlung vorkommt, soll dann erörtert werden, wie sich gegebenenfalls die bevorzugte Strahlenbelastung eines Körperabschnittes auswirkt und welche Konsequenzen dieses für die Diagnose- und Prognosestellung hat. Das Kapitel schließt ab mit den Hinweisen auf die Maßnahmen, die bei Strahlenunfällen praktisch vorgenommen werden sollten, bis der Unfallpatient dann gegebenenfalls einer Spezialbehandlung zugeführt wird.

Humanökologisch betrachtet bedeutet eine außergewöhnliche Strahlenbelastung die plötzliche Änderung des Strahlenfeldes des Menschen. Der menschliche Organismus wird dann als „gesund“ empfunden, wenn er in sich selbst und mit seiner Umwelt in einem dynamischen Gleichgewicht steht (Abb. 1). Die Umwelt des Menschen ist charakterisiert durch bestimmte mikrobielle, chemische, atmosphärische und physikalische Faktoren. Ihre Bedeutung und ihr Vorhandensein wird erst dann empfunden, wenn sie über bestimmte Grenzen hinaus zu- oder abnehmen oder wenn der Organismus selbst sich in seinen Funktionen ändert: die Gegenwart von Bakterien „erleben“ wir dann, wenn diese überhand nehmen und/oder wenn der Körper ihnen nicht den gewohnten Widerstand entgegenzusetzen in der Lage



Z = Zelle  
 ZES = Zellerneuerungssystem

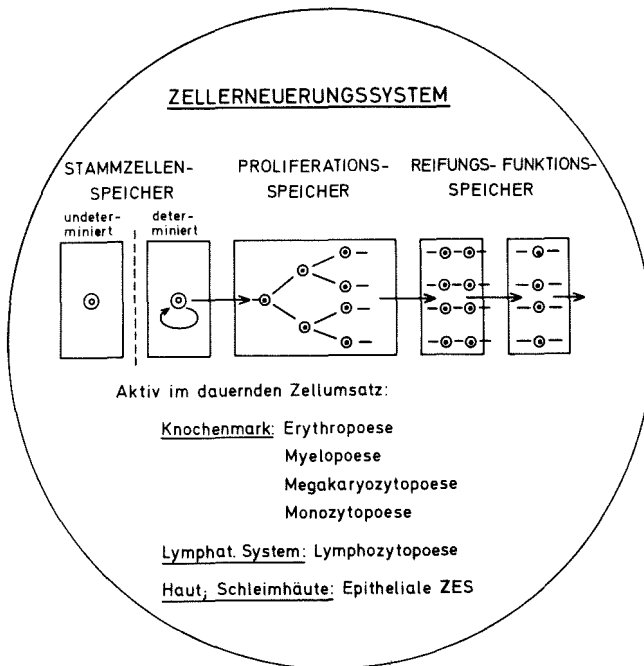
**Abb. 1:** Strahlenunfälle bedeuten eine plötzliche Steigerung des Strahlenfeldes. Das Strahlensyndrom ist eine Folge der Störung des Gleichgewichtes zwischen Körper und Umwelt, hervorgerufen durch die Schädigung der Zellerneuerungssysteme, die entscheidend an der Aufrechterhaltung des Gleichgewichtes normalerweise beteiligt sind.

ist. Es ist heute bekannt, daß die Abwesenheit jeglicher mikrobieller Umwelt beim Säugetierorganismus charakteristische Änderungen von bisher als „normal“ angesehenen physiologischen Fakten bewirkt. Die Konsequenzen einer Änderung der atmosphärischen Faktoren sind jedem Bergsteiger und jedem Fluggast geläufig: für die Sauerstoffversorgung der Gewebe ist ein hinreichender Sauerstoffpartialdruck erforderlich. Ist dieser plötzlich nicht mehr vorhanden, so muß künstlich mit Sauerstoff beatmet werden, um das Leben aufrecht zu erhalten. Bei allmählicher Sauerstoffverdünnung in der Umwelt kann sich bis zu gewissen Grenzen der Organismus adaptieren: er produziert mehr Erythrozyten, nachdem das erythrozytäre Zellsystem im Organismus entsprechend angeregt wurde. Zu den physikalischen Faktoren, mit denen unser Körper normalerweise in einem dynamischen Gleichgewicht steht, gehören beispielsweise die Schwerkraft, aber auch das Strahlenfeld. Gerade die Erfahrungen der Weltraummedizin haben gezeigt, in welcher Weise der Organismus reagiert, wenn das normale Schwerfeld nicht vorhanden ist. Seit Beginn seiner Geschichte lebt der Mensch im Feld ionisierender Strahlen: es ist bekannt, daß dieses Strahlenfeld von ca. 100 mrem pro Jahr im Süden der Bundesrepublik bis zu ca. 1200 mrem pro Jahr in bestimmten Berei-

chen der Erde schwanken kann. Der menschliche Organismus hat sich an seine Umwelt adaptiert. Die Erfahrung lehrt, daß die Adaptationsfähigkeit für einzelne Umgebungsbedingungen stark unterschiedlich ist.

Für die Adaptation an das Strahlenfeld sind im Organismus in erster Linie die sog. Mauserungsgewebe wichtig. Es ist heute bekannt, daß das Wesen der Mauserungsgewebe darin zu suchen ist, daß sie „Zellerneuerungssysteme“ unterhalten, die für das Leben des Organismus entscheidend sind. In diesem Zusammenhang interessieren vor allen Dingen die blutbildenden Gewebe des Knochenmarkes und der lymphatischen Organe und die Epithelzellsysteme der Haut und der Schleimhäute. Es ist von prinzipiellem Interesse, daß diese Zellerneuerungssysteme offensichtlich eine sehr ähnliche funktionelle Struktur aufweisen. Seine Kenntnis ist für das Verständnis der Vorgänge beim akuten Strahlensyndrom von zentraler Bedeutung und soll deshalb hier kurz erläutert werden (2).

Die Physiologie aller Zellerneuerungssysteme – ob sie sich im Knochenmark als die Erythrozyten-, Granulozyten- oder Thrombozyten-bildende Systeme



**Abb. 2:** Alle Zellerneuerungssysteme des Körpers besitzen die gleiche funktionelle Struktur. Bei ihnen ist normalerweise Zelluntergang mit Zellbildung im Fließgleichgewicht. Eine Bestrahlung führt durch Schädigung des Stammzellenspeichers zur Entleerung der Funktionsspeicher in zeitlicher Abhängigkeit von der Umsatzkinetik der einzelnen Zellspeicher der Zellsysteme. Folge der Funktionsspeicherentleerung z.B.: Entblößung der Darmoberfläche oder die Granulozytopenie.

finden oder als Epithel die Haut und die das gesamte Verdauungsrohr auskleidenden Schleimhäute bedecken – beruht auf dem Gleichgewicht zwischen Zelluntergang der Funktionszellen und der Zellneubildung in den Blutspeichern (Abb. 2). Die im Blut befindlichen Erythrozyten, Granulozyten und Thrombozyten gehen nach einer jeweils charakteristischen Lebenserwartung nach Wochen, Stunden bzw. Tagen zugrunde. Jede zugrundegehende Blutzelle wird ersetzt durch Nachlieferung aus den Reifungs- und Bildungsspeichern, die sich im Knochenmark befinden: bei jeder Zellteilung kommt es zum Nettozuwachs von einer Zelle. Das Zellsystem wird aufrecht erhalten von einem Stammzellenspeicher, bei dem im statistischen Mittel bei jeder Zellteilung eine Tochterzelle sich in eine Blutzell-Linie umwandelt, während die andere Tochterzelle wieder Stammzellfunktion übernimmt. Auf diese Weise wird normalerweise ein Gleichgewicht zwischen Zellbildung und Zelluntergang aufrecht erhalten. Im Prinzip finden sich in der Haut und in den Schleimhäuten entsprechende Verhältnisse. Zellen werden an der Oberfläche – sei es als Hautschuppen oder als Zellen in das Darmlumen – abgestoßen. Sie werden aus Bildungs- und Reifungsspeichern ersetzt, die sich in der Keimschicht der Haut und in den tiefen Lagen der Schleimhäute befinden.

Es ist seit den früheren Untersuchungen der Strahlenbiologen bekannt, daß gerade die teilungsfähigen Zellen in Knochenmark, lymphatischen Organen und in Haut und Schleimhäuten besonders strahlensensibel sind. Von den Stammzellen des Knochenmarkes beispielsweise gehen nach Bestrahlung mit ca. 100 R etwa 50 % irreversibel zugrunde (3). Es ist von Interesse, daß die Zellerneuerungssysteme des Knochenmarkes und der Haut und Schleimhäute den Zellverlust, der durch kleine Strahlenbelastungen hervorgerufen wird, durch entsprechende Zellneubildung ausgleichen können, sodaß mit groben Methoden lange Zeit kein Schaden nachweisbar ist. Eine Dauerbestrahlung von Ratten und Strahlendosen von ca. 16 R pro Tag führte über Wochen hinweg nicht zu nachweisbaren Blutbildveränderungen, obgleich die Untersuchung der Stammzellen mit Spezialmethoden erhebliche Schäden aufdeckte, die aber durch entsprechende Zellmehrbiildung in ihrer Wirkung kompensiert wurden (4).

Die Erhöhung der Belastung des Organismus mit ionisierenden Strahlen kann also innerhalb enger Grenzen zunächst kompensiert werden und zwar aufgrund der Tatsache, daß die strahlenempfindlichsten Gewebe des Körpers – Blutbildung, Haut, Schleimhäute – aufgrund ihrer funktionellen Struktur eines Zellerneuerungssystems strahleninduzierte Zellverluste durch entsprechende Erhöhung ihrer Zellproduktion ausgleichen können.

Unmittelbare und mittelbare Konsequenzen entstehen dann, wenn die natürliche Strahlenbelastung des Organismus in Höhe von ca. 100 mrd plötzlich auf ein Vielfaches (100- 10.000-fach) gesteigert wird. Deutliche somatische Wirkungen sind nach 10 rd Ganzkörperbestrahlung in Form von Chromosomenaberrationen nachweisbar. Nach 100 rd kommt es zu vorübergehenden Symptomen, die klinisch und laboratoriumsmäßig meßbar sind. Nach 1000 rd kommt es beim Menschen zu schwersten Symptomen und ein Überleben erscheint nur möglich bei Einsatz aller modernen therapeutischen Methoden.



Von außergewöhnlicher Strahlenbelastung oder von Strahlenunfällen wird also dann gesprochen, wenn sich das Strahlenfeld des Menschen plötzlich um den Faktor  $10^1$ – $10^5$  verstärkt, wobei es sich um eine Einbeziehung des gesamten Organismus oder eines Teiles (Ganzkörper- bzw. Teilkörperbestrahlung) handeln kann. Die spontane Erholungsfähigkeit des Organismus hängt im wesentlichen von der Zahl der in den jeweiligen Zellerneuerungssystemen übrig gebliebenen Stammzellen ab. Darauf basiert beispielsweise die Idee der Knochenmarktransfusion beim Strahlenunfall: ihr liegt der Wunsch zugrunde, dem Körper funktionsfähige Stammzellen der Blutbildung zuzuführen, um die entsprechenden Zellsysteme wieder aufzubauen und die Blutzellspiegel möglichst rasch wieder zu normalisieren. Letztlich ist es das Ziel jeder Frühdiagnose nach einer außergewöhnlichen Strahlenbelastung, so rasch wie möglich Aufschluß über die Restfunktion der Stammzellenspeicher der Zellerneuerungssysteme zu erhalten. Die auf das Überleben des akuten Strahlensyndroms hinzielenden Maßnahmen laufen alle darauf hinaus, den Körper über die Phase der vorübergehenden Schädigung der Stammzellenspeicher der blutbildenden Gewebe und ihrer Konsequenzen hinwegzubringen, oder diese bei zu starker Schädigung durch Transplantationsmaßnahmen aufzufüllen. Das ist der Grund, warum sinnvolle diagnostische und therapeutische Maßnahmen beim Strahlenunfall sich immer wieder an der Physiologie und Strahlenphysiologie, insbesondere der Zellerneuerungssysteme, orientieren müssen.

### *3.1.2. Unkomplizierte Strahlenunfälle*

Lassen sich die Krankheitserscheinungen nach einer Strahleneinwirkung ausschließlich auf die Exposition des Organismus mit ionisierenden Strahlen (z.B. harte Röntgenstrahlen, Gammastrahlen) zurückführen, so kann man von einem „*unkomplizierten Strahlenunfall*“ sprechen. Anders ausgedrückt: das reine „Strahlensyndrom“ ist nicht durch komplizierte Faktoren wie zusätzliche physikalische, chemische oder thermische Einwirkungen (Wunden durch herumfliegende Steine nach Explosionen, durch Säuren oder Laugen oder durch Hitzeeinwirkung bei Bränden) erschwert. In dieser Kategorie der Strahlenunfälle finden sich allerdings Strahlenbelastungen in jeder Höhe, also von einer minimalen Überschreitung der zulässigen Strahlenbelastung bis zu vielen Tausenden von rad. Es ist aus den Erfahrungen, die bisher bei Strahlenunfällen gesammelt wurden, bekannt, daß bei Belastungen des ganzen Körpers mit 200–500 rd in Abhängigkeit von der Dosis eine zunehmend schwere klinische Symptomatik auftritt, die eine Folge des Versagens der Blutzellbildung ist. Jenseits 500 bis etwa 1500 rd verkürzt sich die Lebenserwartung auch bei intensiver Therapie des zunehmend im Vordergrund des klinischen Bildes stehenden „gastrointestinalen Syndroms“ rasch bis auf wenige Tage (ca. 6–15), und jenseits 1500 rd ist die Lebenserwartung trotz aller therapeutischer Maßnahmen auf Stunden bis wenige Tage begrenzt, wobei die Folgen von Herz- und Kreislaufversagen und schließlich die Folgen der Strahleneinwirkung auf das Zentralnervensystem im Vordergrund des klinischen Erscheinungsbildes stehen. Für die Systematik der Strahlenunfall-Kunde ist es aber charakteristisch, daß das Erscheinungsbild und der Verlauf der Strahlenkrankheit in dieser Gruppe nicht

durch zusätzliche Einflüsse physikalischer, chemischer und thermischer Art kompliziert ist.

### 3.1.3. Komplizierte Unfälle

Ist das klinische Erscheinungsbild nicht nur durch die Einwirkung ionisierender Strahlen hervorgerufen, sondern auch durch die Folgen chemischer, thermischer oder anderer physikalischer Noxen, so kann man von „komplizierten Strahlenunfällen“ sprechen. Es hat sich mehrfach ereignet, daß zusätzlich zu einer Strahlenbelastung mit harten Strahlen gewisse Körperregionen weichen Strahlen ausgesetzt wurden und Verbrennungserscheinungen der Haut aller Stadien (I, II und III) zeigten. Bei anderen Strahlenunfällen in Strahlenbetrieben verschiedenster Art kann es zu Explosionen kommen, bei denen Personen nicht nur einer ionisierenden Strahlung ausgesetzt werden, sondern Hautverbrennungen durch Chemikalien erfahren, oder aber Wunden und Frakturen durch herumfliegende harte Gegenstände oder umstürzende Mauern. Die möglichen Komplikationen liegen auf der Hand. Es kann zu verstärkten Flüssigkeits- und Blutverlusten kommen in einem Körper, dessen zelluläre Regenerationsfähigkeit beschnitten ist. Es kann z.B. leichter zu Infektionen kommen, da die Abwehrkraft (Granulozyten, Monozyten) beeinträchtigt ist. Der Chirurg, welcher die Wunden zu versorgen hat, muß hinsichtlich des Zeitpunktes seiner Maßnahmen sehr stark auf den zu erwartenden Ablauf des akuten Strahlensyndroms mit seinen allgemeinen, seinen gastrointestinalen und hämatologischen Folgen Rücksicht nehmen. Die Erfahrungen zeigen, daß bei komplizierten Strahlenunfällen, also bei Kombinationsschäden, bei Wunden und Frakturen, die primäre Endversorgung anzustreben ist, während bei Verbrennungen abwartend behandelt wird. Die endgültige Versorgung drittgradiger Brandwunden ist erst nach Abklingen der Strahlenkrankheit möglich (5).

### 3.1.4. Kontaminierungsunfälle

Eine besondere Art des komplizierten Strahlenunfalles ist der Unfall, der mit einer radioaktiven Kontamination des Betroffenen einhergeht. Dabei kann es sich nur um eine äußere Kontamination handeln (häufigster Strahlenunfall), oder es kann gleichzeitig neben einer externen Strahleneinwirkung eine Inkorporation radioaktiver Substanzen durch Inhalation, durch den Verdauungskanal oder durch Wunden erfolgt sein. Darüber hinaus kann auch eine externe oder interne Kontamination mit radioaktiven Substanzen durch Einwirkung von physikalischen, chemischen oder thermischen Noxen kompliziert sein. Wie an anderer Stelle dieses Buches ausgeführt (Kapitel 3 und 4), wird eine unverzügliche Dekontamination anzustreben sein, um die Dauer der Strahleneinwirkung so kurz wie möglich zu machen.

### 3.1.5. Inkorporationsunfall

Wiederum ein Sonderfall des Strahlenunfalles ist der *Inkorporationsunfall*, bei dem größere oder kleinere Mengen von radioaktiven Nukliden Eingang in den Körper gefunden haben. Auf die Möglichkeiten und Grenzen der Maßnahmen bei dieser Unfallart wird in Kapitel 7 ausführlich eingegangen. Bei dieser Unfallart fürchtet man besonders die Radionuklide, die sich – wie

Strontium – in den Knochen ablagern, nur schwer zu entfernen sind und zu bösartigen Strahlenspätchäden führen können. Gefährlich sein können auch Radionuklide, die in wesentliche Körperbausteine (z.B. die Nukleinsäuren) eingebaut werden, entweder als Isotop (32 p wird z.B. in viele Zellbestandteile eingebaut), oder als radioaktive Verbindung (z.B.  $^3\text{H}$ , eingebaut in Thymidin oder Cytidin, findet direkten Eingang in die Desoxyribonukleinsäure als Träger der Erbsubstanz).

Aus der Erfahrung mit Strahlenunfällen ergibt sich, daß eine klinische Betreuung und Behandlung vor allem bei den unkomplizierten und komplizierten Strahlenunfällen (evtl. mit radioaktiver Kontamination) zu erwarten ist, während die Mehrzahl der Kontaminations- und Inkorporationsunfälle in entsprechend ausgestatteten Spezialambulatorien versorgt werden müssen. Auf die bei Kontaminations- und bei Inkorporationsunfällen zu treffenden Frühmaßnahmen wird in den Kapiteln 4, 5, 6 und 7 ausführlich eingegangen. Daher sollen die folgenden Abschnitte dieses Kapitels sich auf die klinischen Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms nach externer Strahlenbelastung konzentrieren. Ihre Kenntnis ist die Voraussetzung für die Durchführung sinnvoller erster ärztlicher Maßnahmen der Frühdiagnose und -therapie, welche für die erfolgreiche spätere Behandlung von entscheidender Bedeutung sein können.

### *3.2. Klinische Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms*

#### *3.2.1. Allgemeine Vorbemerkungen*

Es ist die Aufgabe dieses Abschnittes, die klinischen Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms beim Menschen zu schildern, um herauszuarbeiten, welche Frühsymptome gegebenenfalls auf den späteren Krankheitsverlauf hinweisen und deshalb von besonderer prognostischer Bedeutung sind. Die Wirkung ionisierender Strahlen bei Mensch und Tier ist im Prinzip die gleiche. Dennoch sind die Erfahrungen aus den tierexperimentellen Laboratorien für die Humanmedizin nur von begrenztem Wert. Der Grund dafür liegt in den enormen Unterschieden des detaillierten Ablaufes des Strahlensyndroms innerhalb der verschiedenen Tierarten und beim Menschen, die sich letztlich auf die Unterschiede der Physiologie der Zellsysteme in den einzelnen Säugetierarten zurückführen lassen. Ein weiterer Grund für die Schwierigkeiten der Übertragung tierexperimenteller Befunde auf die Situation beim Menschen liegt darin, daß in den Laboratorien stark kontrollierte Bedingungen (z.B. Strahlenart und Energie, Tierart, Genetik und Mikrobiologie der Tiere) vorliegen, während der Arzt individuelle Menschen zu versorgen hat. Bei Strahlenunfällen ist eben – aus der Natur der Sache – nichts „programmiert“: die Strahlenarten, die Expositionszeiten und Expositionsbedingungen können von Unfall zu Unfall stark schwanken und es mag Wochen und Monate intensiver physikalischer Arbeit dauern, bis die Unfallbedingungen hinreichend reproduziert werden können. Andererseits sind die betroffenen Personen eben nicht einheitlich: ihr Alter, ihr Geschlecht, ihre genetische Herkunft, ihre mikrobielle Besiedlung, ihre bisher durchgemachten Krankheiten sind ganz individuell und es ist nicht mit Sicherheit vorauszusagen, in welcher Weise derartige Faktoren schließlich das Verlaufsbild beeinflussen werden.

Dessen ungeachtet ergeben sich aus den Erfahrungen, die bei Menschen nach Einwirkung ionisierender Strahlen gemacht wurden, bestimmte klinische Verlaufsmuster, die eine gewisse Systematisierung erlauben und die jeweils auf charakteristische, pathophysiologische Mechanismen zurückzuführen sind.

Die Erfahrungen kommen aus 4 Quellen: Strahlenunfälle in der Industrie oder in Forschungslaboratorien; Strahlenbelastungen von Personen als Folge radioaktiven Niederschlages bei Atombombentesten im Pazifik; Beobachtungen bei Patienten in Hiroshima und Nagasaki nach den Atombombenabwürfen in Japan 1945 und Beobachtungen von Patienten, welche wegen einer bösartigen Geschwulsterkrankung ganz- oder teilkörperbestrahlt wurden. Hinsichtlich der Einzelheiten dieser Erfahrungen sei der Leser auf entsprechende Publikationen verwiesen (2, 6–8). Eine Auswertung der bisherigen Beobachtungen erlaubt, 4 Kategorien des Krankheitsverlaufes nach akuter Strahlenbelastung des Menschen zu unterscheiden, die jeweils bestimmte Frühsymptome zeigen und deren Unterscheidung aus der Sicht des therapeutischen Weges von Bedeutung ist:

1. Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich –
2. Erholung möglich bei Ausnutzung aller neueren therapeutischen Möglichkeiten –
3. Erholung wahrscheinlich – und
4. Erholung gesichert.

Diese Einteilung ist auch aus folgendem Grund von Bedeutung. Handelt es sich beispielsweise um einen Strahlenunfall, bei welchem viele Personen geschädigt wurden, so kann es notwendig werden, so rasch als möglich diejenigen herauszufinden, deren Leben durch den besonderen Einsatz ärztlicher Maßnahmen tatsächlich gerettet werden kann. Mit anderen Worten: frühe ärztliche Maßnahmen sollen sich vor allem auf die Personen der Gruppe 2 und 3 konzentrieren, da deren Überleben besonders von der Therapie abhängig ist, während die Personen der Gruppe 4 mindestens die akute Phase ohne ärztliche Hilfe aufgrund der spontanen Regenerationsfähigkeit des Organismus überstehen können, und bei den Personen der Kategorie 1 die ärztlichen Maßnahmen lediglich palliativ sein können nach dem gegenwärtigen Stand der therapeutischen Möglichkeiten.

Jede dieser Kategorien ist durch charakteristische klinische Befunde und Laboratoriumsdaten gekennzeichnet, obgleich die Übergänge von einer zur anderen Kategorie fließend sind. Dennoch erscheint es möglich, aufgrund der Frühsymptome in den ersten 2–5 Tagen nach einer unerwarteten Strahlenbelastung eine individuelle Prognose zu stellen und einen entsprechenden Therapieplan aufzustellen (Tabelle 1).

Exakte Daten für eine Dosis-Wirkungsbeziehung bei Ganzkörperbestrahlung des Menschen gibt es nicht. Die Erfahrungen basieren auf Ganzkörperbestrahlungen, bei welchen der gesamte Organismus sich mehr oder weniger im Strahlenfeld befand, die aber bei genauer Analyse letztlich doch inhomogen waren oder nur Teile des Körpers betrafen. Dennoch lassen sich folgende Feststellungen treffen: wenn die ionisierenden Strahlen, die von den Geweben des Organismus absorbiert werden, eine *Dosis von 500–600 rd* oder mehr erreichen, erscheint das *Überleben* des Betroffenen trotz der besten

ärztlichen Behandlung nahezu *unmöglich*. Es bleibt abzuwarten, ob die Hoffnung sich erfüllt, daß diese Grenze durch die im Tierexperiment effektive Therapie mit gezielter Verabreichung von Flüssigkeit, mit konsequenter Dekontamination des Organismus durch Antibiotika und Behandlung im Sterilzelt und mit Transfusion hämopoetischer Stammzellen wesentlich nach oben geschoben werden kann. Falls sich die Hoffnung erfüllt, würde die neue Grenze der Behandlungsfähigkeit bei ca. 1200–1500 rd zu erwarten sein. Erfahrungen beim Menschen liegen bisher mit den modernen therapeutischen Möglichkeiten bei Strahlenunfällen aber nicht vor. — Liegt die *Strahlendosis bei 200–450 rd*, so ist das „Überleben möglich“. Das bedeutet, daß man zwar vorhersagen kann, daß sich eine schwere Strahlenkrankheit entwickelt, jedoch der Einsatz aller modernen therapeutischen Maßnahmen die Aussicht bietet, daß der Organismus das Strahlensyndrom durch Regeneration seiner betroffenen Organsysteme überwindet. Eine Strahlenbelastung mit *100–200 rd* wird ein Syndrom hervorrufen, das klinisch deutlich hervortritt und erkennbar ist, wobei jedoch — mindestens in den ersten 60 Tagen — kein irreversibles Versagen der wesentlichen Organsysteme zu erwarten, sondern eine *spontane Erholung* wahrscheinlich ist. Strahlenbelastungen unter 100 rd

*Tabelle 1*  
*Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms*  
*(Ganzkörperbestrahlung)*

1. Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich
 

Belastung	3 000 rd	Tod innerhalb von 1– 3 Tagen
Belastung	500 – 3 000 rd	Tod innerhalb von 7–14 Tagen

 (ZNS-Schäden, Herz-Kreislaufversagen, Gastrointestinale Insuffizienz, Versagen der Granulozyten- und Plättchenbildung)
2. Erholung möglich bei Ausnutzung aller therapeutischen Möglichkeiten
 

Belastung	200 – 500 rd
-----------	--------------

 (Schäden der Blutbildung und des intestinalen Epithels mit Krankheitsmanifestationen im „Locus minoris resistentiae“)
3. Erholung wahrscheinlich
 

Belastung	100 – 200 rd
-----------	--------------

 (Reversible Schäden der Blutzellbildung, keine stationäre Behandlung notwendig)
4. Erholung gesichert
 

Belastung	1 – 100 rd
-----------	------------

 (Keine klinische Symptomatik, mögliche Chromosomenanomalien über lange Zeit)

*Tabelle 1:* Verlaufsformen des akuten Strahlensyndromes beim Menschen, aufgeschlüsselt nach Kategorie 1–4 mit Korrelation von Strahlendosen.

führen im allgemeinen nicht zu hervorstechenden klinischen Symptomen: Organschädigungen lassen sich nur im Labor feststellen mit besonderen Untersuchungsmethoden (z.B. Chromosomenanalysen).

Diese Einteilung wird immer dann verwischt, wenn es sich um „komplizierte Strahlenunfälle“ handelt. Dann ist es die Aufgabe, zunächst den prinzipiellen Grad der Strahlenschädigung zu ermitteln und danach den möglichen Einfluß der komplizierenden Faktoren (Verbrennung, Fraktur etc.) in Rech-

nung zu stellen. Gegebenenfalls wird jedoch die Komplikation zu der Notwendigkeit führen, den Patienten einer prognostisch ungünstigen Kategorie zuzuordnen und entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Trotz dieser Schwierigkeiten erscheint es sinnvoll, die prinzipiellen klinischen Merkmale und die zu erwartenden Laborbefunde der einzelnen Kategorien herauszuarbeiten. Ihre Analyse ergibt, daß sich viele klinische Befunde verstehen lassen als sekundäre Folge von Schäden, die primär durch eine Beeinträchtigung der Zellerneuerung in bestimmten Organsystemen entstehen.

### 3.2.2. Erholung unwahrscheinlich oder unmöglich

Die Zahl der klinischen Beobachtungen, auf die sich diese Beschreibung der Symptomatik und der Laborbefunde von Personen stützt, deren Überleben nach einem Strahlenunfall unwahrscheinlich oder unmöglich ist, ist klein. 3 Personen wurden nach Strahlenunfällen beobachtet (Los Alamos 1958 und 1946 je eine Person, Vinca 1958 eine Person (2,8)). In Hiroshima und Nagasaki wurden mindestens 5 Personen dieser Kategorie so beobachtet, daß sie zur Auswertung herangezogen werden konnten. Diese Beobachtungen und unser Wissen um die modernen therapeutischen Möglichkeiten der zumindest experimentellen Behandlung des „gastrointestinalen“ und des „hämatologischen“ Strahlensyndroms legen es nahe, die Patienten dieser Kategorie noch einmal zu differenzieren in solche, bei denen die Störungen

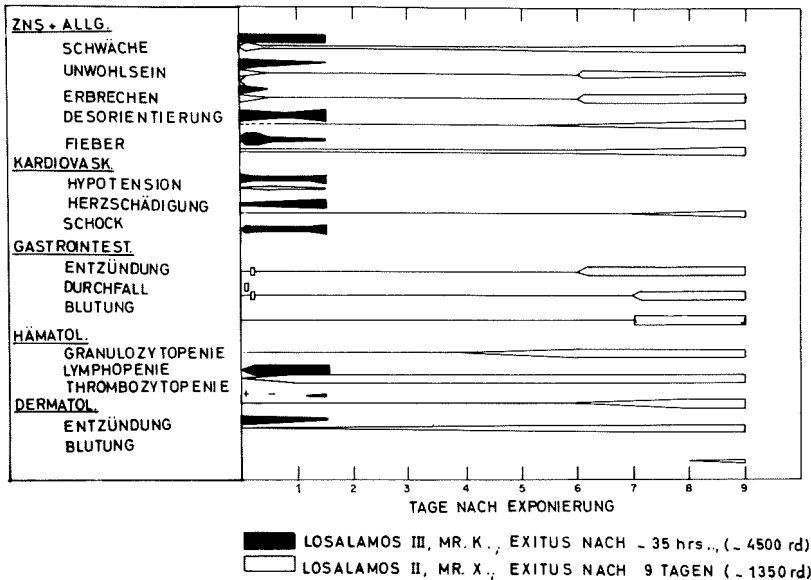
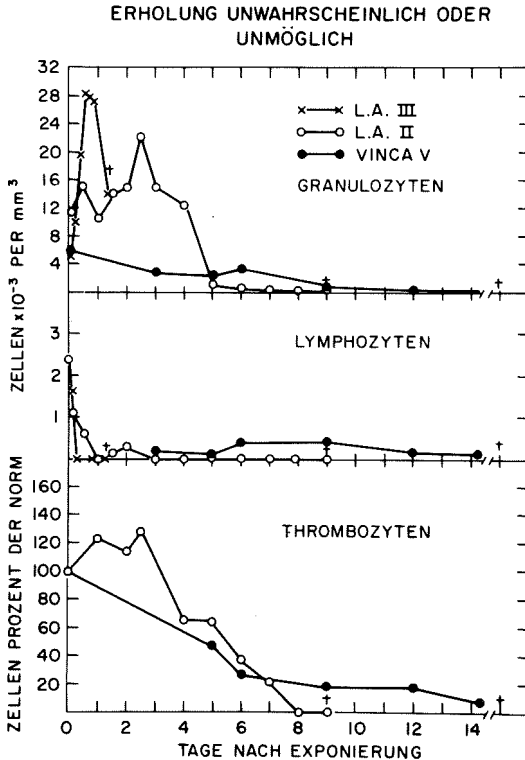


Abb. 3a: Auftreten und Verschwinden von Symptomen der Strahlenkrankheit bei 2 Personen, die einer letalen Ganzkörperbestrahlung ausgesetzt waren der Kategorie 1: Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich.

des Zentralnervensystems und des Herz-Kreislaufsystems im Vordergrund stehen und solche, bei denen – nach einem symptomarmen Intervall von mehreren Tagen – der Gastrointestinaltrakt im Vordergrund des klinischen Bildes steht (Tabelle 1).

Typisch für die Aussage „Erholung unmöglich“ ist die Symptomatik jenes Mannes, der 1958 in Los Alamos innerhalb von 35 Stunden nach einem Strahlenunfall starb. Die Rekonstruktion des Unfalles führte zu Schätzungen einer Strahlendosis, die in der Größenordnung von ca. 4500 rd gewesen sein muß. Derartige Strahlendosen (etwa ab 3000 rd) führen zu direkten Funktionsstörungen von an sich nicht oder nur begrenzt regenerationsfähigen Zellen und Zellsystemen (Nervenzellen, Bindegewebszellen, Herz-Kreislaufsystem, Nierengewebe etc.). so zeigte der Patient von Los Alamos 1958 (Abb. 3) schwerste Störungen des Zentralnervensystems, des Herzens und des Kreislaufes. Unmittelbar nach dem Unfall war er bereits desorientiert mit Phasen der Hypotension und Schock. Die Haut des ganzen Körpers war



**Abb. 3b:** Blutzellzahlen (Granulozyten, Lymphozyten und Thrombozyten) bei Strahlenunfallpatienten der Kategorie 1: Granulozytose mit zwischen 4. und 6. Tag auftretender maximalen Granulozytopenie. Thrombopenie nach 8–10 Tagen.

erythemartig verfärbt, und die von Händen und Armen ödematös geschwollen, was auf direkte Kapillarschädigung zurückzuführen sein dürfte. Bald nach dem Unfall wurde ein starker Temperaturanstieg festgestellt, der aber innerhalb von 12 Stunden wieder verschwand. Übelkeit und Erbrechen stand nicht besonders im Vordergrund des klinischen Bildes, gegebenenfalls wegen der Seditativa, die verabreicht wurden. Der Patient klagte über erhebliche abdominale Beschwerden und der ausgeschiedene Stuhl war wässerig.

Die Laboratoriumsuntersuchungen (Abb. 3 b) zeigten eine erhebliche initiale Granulozytose (Werte bis  $28\,000/\text{mm}^3$ , 14 Stunden nach dem Unfall und  $14\,000$ , 32 Stunden nach dem Unfall), sowie eine rasch hervorstechende Lymphopenie. Der bei diesem Patienten nach 35 Stunden eintretende exitus letalis wäre vermutlich ohne die symptomatischen therapeutischen Maßnahmen (Stütze des Herz- und Kreislaufsystems, Flüssigkeitsinfusionen, Schockbekämpfung) wesentlich früher eingetreten.

Typisch für die Aussage „Erholung unwahrscheinlich“ ist die Symptomatik jenes Patienten, der in Los Alamos 1946 bei einem Strahlenunfall zu Schaden kam und 9 Tage nach dem Unfall ad exitum kam. Es erscheint möglich, daß moderne therapeutische Maßnahmen (radikale Elektrolytinfusionstherapie, radikale bakterielle Dekontamination und Sterilbehandlung sowie Transfusion hämatopoetischer Stammzellen) aus dem „unwahrscheinlich“ gegebenenfalls ein „nicht unmöglich“ oder sogar ein „vielleicht“ machen. Daher ist die Frühbeobachtung eines Patienten mit Verdacht auf schwere Strahlenschädigung und seine rasche Überführung in eine Spezialbehandlung nach initialer „Spurensicherung“ von so großer Bedeutung.

Die wichtigsten Daten sind in Abb. 3 dargestellt. Bei Patienten dieses Expositionsbereiches (ca.  $600\text{--}3000\text{ rd}$ ) kommt es innerhalb von wenigen Stunden nach Strahleneinwirkung zu Schwächezuständen, Übelkeit und Erbrechen. Bei dem dargestellten Patienten dauerte Übelkeit und Erbrechen nur 12 Stunden und trat erneut nach 6 Tagen auf. Insgesamt aber war nach diesen initialen Allgemeinbeschwerden und abgesehen von erhöhten Temperaturen, einer deutlichen Hypotonie, der Zustand des Patienten 5 Tage lang recht gut. Danach allerdings verschlechterte sich dieser sehr rasch: die Granulozyten verschwanden zwischen dem 5. und 6. Tag nach Strahleneinwirkung nahezu vollständig aus der Blutbahn und die Blutplättchen am 8. Tag. Am 6. Tag entwickelte der Patient Fieber, Tachykardie, Steigerung der Atemfrequenz und Abdominalbeschwerden mit Ileus. Der Stuhl wurde stark wässerig und ließ Zeichen gastrointestinaler Blutung erkennen. Am 9. Tag starb der Patient. Von den Laboratoriumsdaten sind vor allem die hämatologischen Befunde zu erwähnen. Bei diesem Patienten kam es innerhalb der ersten 3 Tage nach Exposition zu einer erheblichen Granulozytose, mit Granulozytenwerten bis  $22\,000/\text{mm}^3$ . Am 4. Tag setzte ein rapider Abfall ein und am 6. Tag waren praktisch keine Granulozyten mehr im Blut nachweisbar.

Die Zahl der Beobachtungen an Personen, die in diese Gruppe des „Erholung unmöglich“ oder „unwahrscheinlich“ fallen, ist klein, und das Bild des „reinen“ Strahlensyndroms oft beeinflusst durch Komplikationen verschiedenster Art, insbesondere auch durch Wunden, welche durch eine intensive



Lokalbestrahlung mit weichen Röntgenstrahlen – wie beim Strahlenunfall Los Alamos 1946 (8) – hervorgerufen wurden. Dennoch lassen sich die Beobachtungen wie folgt zusammenfassen:

In allen Fällen führte das akute Strahlensyndrom in diesen Fällen zum exitus letalis innerhalb von 2 Wochen. In einem Fall (Vinca 1958,8) gelang es durch symptomatische Therapie, das Überleben auf ca. 5 Wochen zu erhöhen und der Patient starb dann an den Folgen des Versagens der Blutbildung. Die klinische Symptomatik der Patienten, die innerhalb der ersten 3 Tage sterben, unterscheidet sich von denen, welche zwischen dem 3. und 14. Tag vor allem an den im Vordergrund stehenden Organmanifestationen sterben. Bei der ersten Gruppe beherrschten die Folgen der direkten Strahlenschädigung des Zentralnervensystems und des Herz-Kreislaufsystems das Bild. Bei der zweiten Gruppe treten die entsprechenden Symptome (Schwäche, Übelkeit, Erbrechen, Hypotonie, Fieber etc.) auch auf, jedoch abgeschwächt, während das Bild beherrscht wird von der gastrointestinalen Symptomatik zwischen dem 5. und 12. Tag nach Strahleneinwirkung. Die histopathologische Untersuchung des Intestinaltraktes ergab einen Verlust des duodenalen Epithels und starke Erosionen des Epithels im Ileum und Jejunum.

Das „intestinale Syndrom“ hat aber offenbar *zwei* entscheidend wichtige Komponenten. Die *eine* ist die Entblößung des intestinalen Epithels, die zu schweren Störungen des Flüssigkeitshaushaltes führt. Die *zweite* Komponente ist die Granulozytopenie, in deren Folge es zur Manifestation bakterieller Infektionen kommt, gegebenenfalls auch mit Keimen des Darmtraktes, die normalerweise nicht oder nur fakultativ pathogen sind. Kompliziert wird das „gastrointestinale Syndrom“ schließlich durch die Blutungen, welche nach Strahlenbelastungen in dem hier diskutierten Dosisbereich etwa jenseits des 8. Tages durch die dann zu erwartende Thrombopenie massiv in Erscheinung treten und entsprechende therapeutische Konsequenzen verlangen.

### *3.2.3. Erholung möglich bei Ausnutzung aller therapeutischen Möglichkeiten*

Seit 1945 wurden eine ganze Reihe von Personen beobachtet, deren klinische Symptomatik und deren Krankheitsverlauf nach akuter Ganzkörperbestrahlung die Zuordnung zu dieser Kategorie erlaubt. Die Strahlendosis, welche bei diesen Personen vom größeren Teil des Körpers, insbesondere des Rumpfes, absorbiert wurde, liegt aufgrund der physikalischen Messungen nach der Rekonstruktion des jeweiligen Unfallgeschehens zwischen etwa 250 und 600 rd. In diese Gruppe gehören Personen, die nach Strahlenunfällen beobachtet und analysiert wurden (2), solche, welche in Hiroshima und Nagasaki zur Beobachtung kamen. Es gehören dazu Japanische Fischer und Bewohner der Marshall-Inseln, die 1954 durch radioaktiven Niederschlag einer Strahlenexposition ausgesetzt wurden und schließlich auch Patienten, die aus therapeutischen Erwägungen ganzkörperbestrahlt wurden. Daraus ergibt sich eine Gruppe von Personen, welche hinsichtlich der besonderen Bedingungen der Strahlenexposition völlig heterogen ist: die Strahlenarten, ihre Qualitäten und Energie, die Dosisraten und die im einzelnen

vorliegenden Komplikationen waren stark unterschiedlich. Dennoch zeigten alle Patienten einen relativ einheitlichen klinischen Verlauf ihrer Strahlenkrankheit, in deren Vordergrund die Folgen des Versagens der Blutzellbildung standen, wobei je nach Patient die Beeinträchtigung des einen oder anderen Organsystems das Erscheinungsbild individuell modifizierte. Dabei spielt offenbar die exakte Stellung des Patienten zur Strahlenquelle eine besondere Rolle. Je nach den Umständen waren verschiedene Körperabschnitte (Kopf-Halsbereich, Brustbereich, Abdominalbereich, Extremitäten) im Zentrum des Bestrahlungsfeldes und dadurch relativ zu anderen Körperabschnitten besonders stark strahlenbelastet, sodaß die Ganzkörperdosis von 250–600 rd lokal gegebenenfalls erheblich überschritten wurde. Als Beispiele seien hier nur der Strahlenunfall von Lockport genannt (9), bei dem 2 Personen im Rumpfbereich mit 300 R bestrahlt wurden, aber bei welchen der Kopf-Halsbereich eine Strahlendosis von ca. 1500 R erhielt. Bei diesen Personen wurde die „hämatologische Verlaufsform“ des akuten Strahlensyndroms entsprechend durch Störungen von Organen im Kopf-Halsbereich modifiziert. Ein anderes Beispiel ist der Vinca-Unfall 1958 (10), bei dem 5 Personen im Rumpfbereich mit ca. 207–426 rd strahlenbelastet wurden. Obwohl 5 Personen in Oak Ridge eine Ganzkörperbestrahlung in etwa der gleichen Größenordnung erhielten (236–365 rd) (11), war bei den Vinca-Patienten eine schwere gastrointestinale Phase in der 4. und 5. Woche zu beobachten, die das klinische Bild des „hämatologischen“ Strahlensyndroms entsprechend überlagerte und modifizierte.

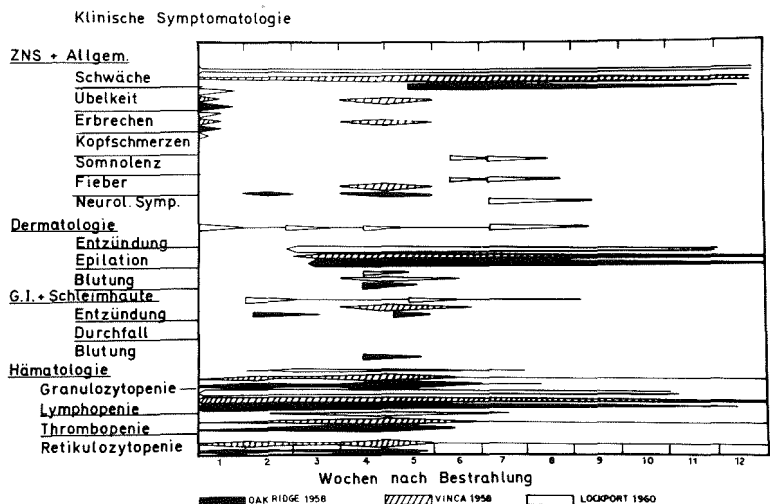
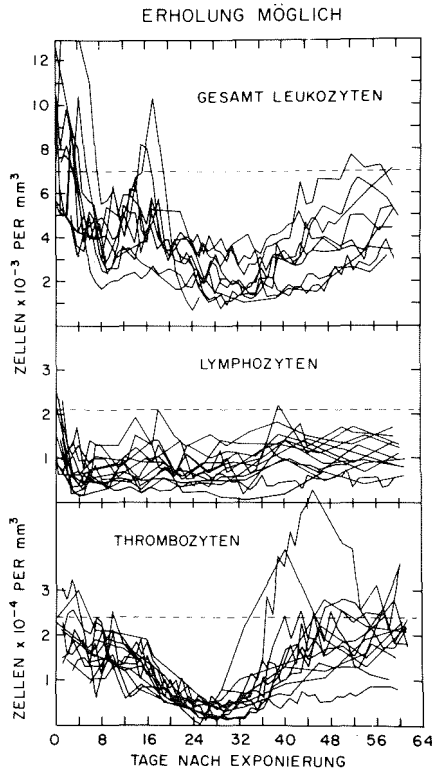


Abb. 4a: Auftreten und Verschwinden von Symptomen der Strahlenkrankheit bei 3 Strahlenunfällen: die Patienten gehören zur Kategorie 2: Erholung möglich. Kritische Phase der 4. und 5. Woche ist korreliert mit Granulozytopenie und Thrombopenie. Spontanregeneration ohne Knochenmarktransplantation.

Trotz der genannten Unterschiede, die sich aus der speziellen Unfallgeschichte des einzelnen Patienten ergeben, lassen sich bei allen Patienten dieser Kategorie entscheidende gemeinsame klinische Merkmale und Laboratoriumsbefunde feststellen, die den Weg zu entsprechenden therapeutischen Maßnahmen weisen. Diese sollen anhand der Abb. 4 erläutert werden, die auf der Auswertung der Beobachtungen von 12 Patienten nach Strahlenunfällen beruhen. 5 Personen wurden in Oak Ridge 1958 (11), 5 Personen nach dem Unfall in Vinca 1958 (10) und 2 Personen in Lockport 1960 (9) beobachtet.

In allen Fällen findet sich in den ersten Tagen nach dem Strahlenunfall eine Phase der Übelkeit und Erbrechen. In den meisten Fällen setzt diese innerhalb von Minuten bis Stunden nach der Strahlenexposition ein. Gelegentlich ist sie kompliziert durch Durchfall und endet innerhalb von Stunden und Tagen. In wenigen Fällen trat Übelkeit und Erbrechen erst nach 2 Tagen auf



**Abb. 4b:** Typische Blutzellzahlveränderungen bei Kategorie 2: Zunächst Granulozytose, dann Abfall, dann abortiver Wiederanstieg, dann massiver Abfall und schließlich Regeneration der Granulozytenzahlen. Thrombozyten fallen erst jenseits der ersten 14 Tage kritisch ab. Maximale Thrombopenie um den 30. Tag. Dann Erholung.

oder verschwand, um dann nach einigen Tagen vorübergehend erneut aufzutreten. In allen Fällen klagten die Patienten über eine anhaltende allgemeine Schwäche, die auch noch über Wochen und Monate vorhanden sein kann. Falls es lokal zu zusätzlichen Strahlenbelastungen kam – wie im Lockport-Unfall im Kopf-Halsbereich – komplizieren die Lokalbeschwerden mit entzündlichen Erscheinungen, auch mit Schmerzen, das klinische Bild. Die initiale allgemeine Symptomatik verschwindet aber in der zweiten Hälfte der ersten Woche und es geht den Patienten wieder recht gut. Eine zweite „kritische Phase“ tritt bei Patienten dieser Kategorie erst in der 4. und 5. Woche nach der Strahlenexposition auf. In allen Fällen wird die Symptomatik nun diktiert von den Folgen der Schädigung der blutzellbildenden Organe, insbesondere von den Folgen der Granulozytopenie und der Thrombopenie mit der Manifestation von Infekten und Blutungen. Die am meisten betroffenen Organe können von Patient zu Patient variieren, ob es sich um Wundinfektionen, um Infektionen des Nasen-Rachenbereiches, um Pneumonien, um intestinale Infektionen oder solche des Urogenital-Traktes handelt. Hier wirken sich dann besonders stark die individuellen Verhältnisse der Strahlenbelastung aus, und der „locus minoris resistentiae“ kann von Patient zu Patient stark variieren. Das Gleiche gilt für die Manifestation der Blutungsneigung. Die Thrombopenie erreicht um den 30. Tag ihren Höhepunkt. Blutungen können dann ebenfalls an den Orten der jeweils stärksten individuellen Strahlenbelastung zuerst und besonders stark auftreten. Aufgrund der langen Lebensdauer der Erythrozyten von ca. 120 Tagen ist die Anämie bei Patienten dieser Kategorie zunächst kein Problem, obwohl die Erythrozytenbildung, wie auch die Retikulozytenwerte zeigen, vorübergehend darnieder liegt. Sie wird gegebenenfalls erst dann zum Problem, wenn es zu schweren Blutungen kommt. Andere Folgen der Strahleneinwirkung, wie etwa Lymphopenie oder auch Haarausfall, oder die neurologischen Symptome, wie sie im Lockport-Unfall beobachtet wurden durch die starke Lokalbestrahlung des Kopfes, beeinflussen das Gesamtbild des klinischen Verlaufes nicht wesentlich, sind aber als Symptom wichtig und müssen registriert und natürlich gegebenenfalls auch behandelt werden. Der weitere Verlauf des Strahlensyndroms bei diesen Patienten ist durch die Erholung gekennzeichnet, die spontan möglich ist wenn es gelingt, die Patienten über die Folgen der Schädigung des blutzellbildenden Systems und die Folgen der gegebenenfalls komplizierenden Faktoren (Lokalbestrahlung, Wunden, Frakturen etc.) hinwegzubringen. Dieses sollte durch Einsatz der modernen Behandlungsmethoden (Infektionsprophylaxe durch bakterielle Dekontamination mit Antibiotika und Aufenthalt im Sterilbettssystem; Transfusion von gewebsgruppengleichen Thrombozyten; gegebenenfalls – als letzter Ausweg – Transfusion hämatopoetischer Stammzellen bei nachweisbar ausbleibender Regeneration der Blutzellbildung) möglich sein. Jenseits der 6. oder 7. Woche sollte der Patient bei erfolgreicher Therapie auf dem Wege der Besserung sein.

Aufmerksamkeit sollte auch der Zeit zwischen dem 5. und 14. Tag nach einer Strahlenexposition gewidmet werden. In dieser Zeit fallen die Granulozyten im Blut zunächst ab, um im Falle einer letalen Strahlenbelastung niedrig zu bleiben ohne Zeichen einer Regeneration. Bei den Patienten mit der Prognose „Erholung möglich“ kommt es um den 12. Tag zu einer

„abortiven“ Regeneration der Granulozytenzahlen, bevor es dann um den 20. Tag erneut zu schweren Granulozytopenien kommt. In dieser Phase der ersten, vorübergehenden Granulozytopenie ist der Patient ebenfalls – je nach Grad der Granulozytenverminderung – stark infekgefährdet.

*Zusammenfassend* kann festgestellt werden, daß klinische Symptomatologie der Patienten der Kategorie „Erholung möglich“ bestimmt wird durch die Strahlenreaktion des blutzellbildenden Systems, und daß alle übrigen Symptome, die sich aufgrund individueller Faktoren ergeben, seien sie durch die Bestrahlungsbedingungen gegeben oder durch die Vorgeschichte des Patienten bestimmt, Modifikationen der reinen „hämatologischen“ Form des akuten Strahlensyndroms bewirken können und entsprechend beachtet werden müssen.

### 3.2.4. Erholung wahrscheinlich

Die Kategorie der Patienten, bei denen eine Erholung nach einer Ganzkörperbestrahlung wahrscheinlich ist, erhielten aufgrund der später ermittelten Dosismessungen Strahldosen in dem Bereich von etwa 100–200 rd. Die Erfahrungen mit dem klinischen Verlauf und den Laboraten basieren auf einer recht großen Zahl von Beobachtungen von in diesem Dosisbereich strahlenbelasteten Personen. Bei den Strahlenunfällen von Argonne (12) und von Lockport (9) waren es insgesamt 3 Patienten dieser Kategorie. Nach dem durch einen Atombombentest 1954 hervorgerufenen radioaktiven Niederschlag wurden 64 Bewohner der Marshall-Inseln sowie einige Japanische Fischer einer entsprechenden Ganzkörperbestrahlung ausgesetzt (2). Unter den Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki waren eine größere Zahl, die „in der 6. Woche oder später starben oder die den mäßigen Strahlenschaden überlebten“ (Gruppe III der Hiroshima und Nagasaki Patienten (13)). Schließlich gibt es Verlaufsbeobachtungen bei 30 Patienten, welche aus therapeutischen Erwägungen zur Behandlung einer bösartigen Erkrankung einer Ganzkörperbestrahlung von 200 R Röntgenstrahlen ausgesetzt wurden (2). Wie schon für die Kategorie „Erholung möglich“ besprochen, zeigt die Betrachtung der Bestrahlungsbedingungen dieser Personen der Kategorie „Erholung wahrscheinlich“ eine sehr große Heterogenität. Obgleich die Ganzkörperdosis im Bereich von 100–200 rd gelegen hat, so waren doch erhebliche Unterschiede hinsichtlich Dosissraten, der Strahlenqualität und der Geometrie der Exposition (Position der betroffenen Menschen im Strahlenfeld und zur Strahlenquelle). Hinzu kommt, daß die Ganzkörperbestrahlung gegebenenfalls durch andere Faktoren beeinflusst wurde. Beim Lockport-Unfall war der milde klinische Verlauf, der insgesamt für diese Patienten-Kategorie typisch ist, kompliziert durch die Folgen der Lokalbestrahlung des Kopf-Halsbereiches mit 1200 R. Bei den Bewohnern der Marshall-Inseln wurde das klinische Bild durch die Hautkontamination mit dem Material des radioaktiven Niederschlages ergänzt. Bei den strahlenexponierten Japanern 1945 waren die Folgen der Ganzkörperbestrahlung durch Brandwunden und andere Wunden, durch Druckwellen oder durch mechanische Traumen modifiziert.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß der Gesamtverlauf des akuten Strahlensyndroms bei Personen dieser Kategorie charakterisiert ist durch die

milden Folgen der Ganzkörperbestrahlung im Dosisbereich 100–200 rd, und daß gegebenenfalls die individuellen Erscheinungsbilder durch zusätzliche Faktoren geprägt sind (Folgen einer radioaktiven Hautkontamination, Wunden verschiedenster Art durch physikalische, chemische, mechanische oder thermische Noxen).

Die Aussage „Erholung wahrscheinlich“ stützt sich auf die Beobachtung, daß die sehr strahlenempfindlichen blutzellbildenden Gewebe sowie die Epithelien des Intestinaltraktes, (deren Versagen im Mittelpunkt des Krankheitsbildes der Kategorien „Erholung unwahrscheinlich oder unmöglich“ und „Erholung möglich“ steht), sich bei allen Patienten dieser Kategorie rasch erholt haben. Unter modernen therapeutischen Möglichkeiten ist von daher kein letaler Ausgang in der Akutphase zu befürchten. Die Behandlung kann sich – unter Berücksichtigung des jeweiligen Zustandes der blutbildenden Gewebe und des Intestinaltraktes – stark auf die komplizierenden Faktoren konzentrieren.

Auch bei den Personen in dieser Kategorie waren Übelkeit und gelegentliches Erbrechen Frühsymptome, die schon kurze Zeit nach der Strahlenexposition (Stunden) auftraten. Bei 2/3 der Marshall-Insel Bewohner wurde Übelkeit innerhalb der ersten 2 Tage registriert. 1/10 der Personen zeigte Erbrechen und Durchfall. Bei den 30 ganzkörperbestrahlten Patienten wurde generell Schwäche, Schwindel und Appetitlosigkeit kurz nach der Bestrahlung, und bei 17 Patienten in den ersten Stunden Erbrechen beobachtet. Daraus läßt sich ableiten, daß es in einem Teil der betroffenen Personen dieser Kategorie zu allgemeinen Frühsymptomen (Schwindel, Übelkeit, Energieverlust) kommt, gelegentlich zu Erbrechen, daß aber diese Frühphase innerhalb von 2–4 Tagen abgeschlossen ist. Der weitere Verlauf kann – falls keine komplizierenden Momente vorhanden sind – völlig asymptomatisch verlaufen, wie etwa im Unfall in Argonne. Bei anderen Personen war der Verlauf durch die komplizierenden Faktoren gekennzeichnet. Im Lockport-Fall (hohe Strahleneinwirkung im Kopf-Halsbereich zusätzlich zur Ganzkörperbestrahlung) wurden 10–11 Tage nach dem Unfall Herpes-ähnliche Schleimhautläsionen beobachtet, es kam jenseits des 13. Tages zu einem starken Haarausfall im Kopfbereich verbunden mit einer Erythem-Welle. – Bei den Marshall-Insel Bewohnern war das klinische Bild letztlich geprägt durch die Hautläsionen als Folge der Kontamination durch radioaktive Partikel. Bei 28 % der Betroffenen waren zunächst (1–2 Tage nach Exposition) Jucken und Brennen festzustellen und bei diesen kam es später zu schweren Hautläsionen, die aber meist innerhalb von einer Woche bis 10 Tagen abzuheilen begannen. Bei den 1945 strahlenexponierten Japanern starben etwa 10 % der Personen dieser Gruppe. Die Analyse der Daten zeigt, daß der klinische Verlauf durch den schlechten Gesundheits- und Ernährungszustand der betroffenen Personen kompliziert war, und daß Infektionen auftraten, für welche die heute selbstverständliche Therapie fehlte.

Die hämatologischen Untersuchungen bei den Personen dieser Kategorie „Erholung wahrscheinlich“ ergaben folgende Gemeinsamkeiten (Abb. 5): die Granulozyten sinken langsam im schlimmsten Fall auf 1000–2000 pro  $\text{mm}^3$  innerhalb von 5 Wochen ab. Daran schließt sich eine Erholung an. In den meisten Fällen beträgt der Abfall der Granulozyten etwa 50 % der Ausgangswerte und es werden dann nach 3–6 Wochen Werte um 3000/ $\text{mm}^3$

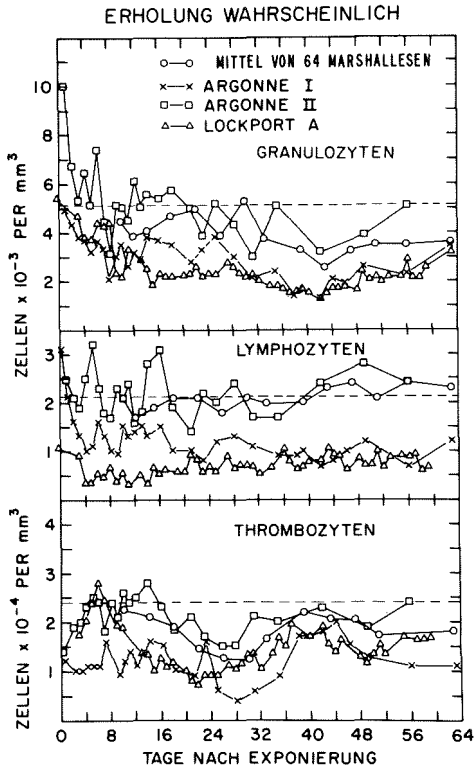


Abb. 5: Blutzellzahlen bei den Personen der Kategorie 3, bei denen eine klinische Symptomatik kaum auftritt. Granulozytenwerte minimal nach 30–40 Tagen, aber nie bedrohliche Granulozytopenie; Thrombozyten minimal nach 30 Tagen, da aber 50 000 oder mehr nur selten Blutungen. Lymphozyten variieren stark von Patient zu Patient.

gefunden. Diese Befunde erklären, warum es nur durch außergewöhnliche Komplikationen zu Infektionen kommt: an und für sich reicht die Granulozytenkonzentration aus, um die Abwehrkraft des Körpers aufrecht zu erhalten. Wesentlich ist das Wissen um die Zahl der Blutplättchen im Verlauf des Strahlensyndroms bei Personen dieser Kategorie. Die Blutplättchen bleiben zunächst im Normbereich von 200 000–300 000/mm<sup>3</sup>. Jenseits der 2. Woche zeigen sie eine abfallende Tendenz und im schlimmsten Fall erreichen sie um den 30. Tag nach Strahlenexposition Werte um 50 000/mm<sup>3</sup>. Dieser Wert reicht normalerweise noch völlig aus, um für eine Hämostase zu sorgen. Es kann aber im Zusammenhang mit den Komplikationen (Wunden der verschiedensten Art an verschiedensten Körperstellen) zu diesem Zeitpunkt (25–35 Tage nach Strahleneinwirkung) zu thrombopenischen Blutungen kommen, die dann durch entsprechende Maßnahmen (Thrombozytentransfusion) zum Stillstand gebracht werden können. Bei vielen Personen war

kein oder höchstens ein leichter Lymphozytenabfall zu beobachten. Bei einigen wenigen, insbesondere bei denen, deren Ganzkörperbestrahlung durch eine zusätzlich hohe Lokalbestrahlung kompliziert wurde, kam es zu schweren Lymphopenien, die jedoch keine erkennbare klinische Konsequenz hatten.

*Zusammenfassend* läßt sich hinsichtlich der Personen der Kategorie „Erholung wahrscheinlich“ feststellen, daß bei „unkomplizierten Unfällen“ der Verlauf ohne, oder nur mit geringfügigen klinischen Symptomen einhergeht und es zur Spontanerholung kommt, die Tatsache einer Strahleneinwirkung ergibt sich in erster Linie aus Laboruntersuchungen. Bei „komplizierten Unfällen“ dieser Kategorie wird der Verlauf durch die jeweiligen individuellen Komplikationen (Wunden verschiedenster Art) geprägt, die – unter Berücksichtigung des Regenerationszustandes von Intestinaltrakt und Blutbildung – entsprechend behandelt werden müssen.

### *3.2.5. Erholung gesichert*

Schließlich gibt es eine Gruppe von ca. 330 Personen, die bei Strahlenunfällen, bei den Folgen von Atombombenexplosionen im Pazifik und bei therapeutischen Ganzkörperbestrahlungen Strahlendosen zwischen 10 und 100 rd absorbiert haben (2). Auch in diesen Fällen unterschieden sich die Bestrahlungsbedingungen (Strahlenart und -Qualität, Dosisrate etc.) erheblich. Die biologischen Reaktionen jedoch waren einheitlich.

Klinische Symptome wurden bei den Personen dieser Kategorie nur sehr selten beobachtet. Nur bei 3 von 330 Personen wurde über Übelkeit berichtet und bei einer Person Erbrechen 3 Tage nach Strahlenexposition. Es fand sich also keine „Früh-Symptomatik“. Bei keinem der betroffenen Personen gab es klinisch beobachtbare Hinweise auf die Strahlenbelastung außer in den Fällen (z.B. Marshall-Insel Bewohner nach radioaktivem Niederschlag (14), in welchen zusätzliche Komplikationen (Hautwunden z.B.) vorhanden waren.

Bei den Personen dieser Kategorie fanden sich nur geringfügige Blutbildveränderungen. Die Gesamtleukozytenzahl blieb meist im Normbereich. Gelegentlich wurde ein leichter Lymphozytenabfall in den ersten Tagen nach der Strahlenexposition gefunden. Die Zahl der Blutplättchen blieb entweder ganz im Normbereich oder fiel höchstens geringfügig bis zum Ende der 4. Woche ab, um danach in den Normbereich zurückzukehren. Deutliche Veränderungen des roten Blutbildes wurden nicht beobachtet.

*Zusammenfassend* läßt sich feststellen, daß bei Personen, deren Strahlenbelastung unter 100 rd liegt, keine behandlungsbedürftige klinische Symptomatik auftritt, insbesondere nur selten eine Frühsymptomatik in den ersten Stunden oder Tagen nach Strahleneinwirkung.

## *3.3. Möglichkeiten der Früherkennung und Prognose bei Ganzkörperbestrahlung*

### *3.3.1. Allgemeine Vorbemerkungen*

Aus der Schilderung der klinischen Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms im Abschnitt 3.2. dieses Kapitels geht ihr Spektrum hervor, das



von kaum nachweisbaren klinischen Konsequenzen bei 10 rd über eine geringfügige Erkrankung mit vorübergehender Beeinträchtigung der Blutzellbildung bei 100 rd und schweren Krankheitsformen als Folge des Versagens des Verdauungsapparates und der Blutbildungsstätten mit letalem Ausgang innerhalb 1–2 Monaten bei 1000 rd zu den schwersten Erscheinungsbildern als Folge des Versagens des Zentralnervensystems, des Herz-Kreislaufsystems und des Gastrointestinaltraktes bei 10 000 rd reicht.

Die Schilderung der klinischen Verlaufsformen hat aber auch gezeigt, daß es innerhalb von Stunden, spätestens 5 Tagen, möglich ist, durch die genaue klinische Beobachtung und Befunderhebung sowie durch gezielte Laboratoriumsuntersuchungen prognostisch relevante Aussagen zu machen und den Therapieplan mit von Tag zu Tag zunehmender Präzision zu entwerfen. Das ist der Grund, warum es so sehr darauf ankommt, gerade in den ersten Stunden nach einer akzidentellen Ganz- oder erheblichen Teilkörperbestrahlung bestimmte Befunde zu erheben oder bewußt als nicht vorhanden zu verneinen, gezielte Materialentnahmen vorzunehmen und diese einer Laboruntersuchung zuzuführen. Es kommt also darauf an, daß der die betroffenen Personen zuerst untersuchende Arzt eine für die weitere Diagnostik und Therapie wichtige SPURENSICHERUNG durchführt. Aus diesem Grunde seien in diesem Abschnitt die allgemeinen Symptome und die Laborbefunde zusammengefaßt, welche es erlauben, die Schwere der Strahlenkrankheit bei den betroffenen Personen abzuschätzen als Grundlage einer sinnvollen Therapie.

### 3.3.2. Allgemeine Symptome

Die Schilderung der klinischen Verlaufsformen der Strahlenkrankheit hat gezeigt, daß es bestimmte allgemeine Symptome gibt, die in einer Relation zur absorbierten ionisierenden Strahlung stehen. Diese treten gegebenenfalls innerhalb von Minuten, spätestens Stunden auf, sollten sorgfältig registriert und gegebenenfalls natürlich symptomatisch behandelt werden.

In Tabelle 2 ist die Beziehung zwischen den allgemeinen Symptomen der betroffenen Personen und ihre Zuordnung zu den Prognosekategorien 1–4 für verschiedene Zeitabschnitte nach Strahleneinwirkung aufgetragen.

*Typisch für die Kategorie 1 (Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich)* ist das rasche Auftreten von Übelkeit, Erbrechen und gegebenenfalls Episoden von Durchfall. Diese Symptome sind offenbar immer vorhanden, wenn auch von unterschiedlicher Schwere bei den einzelnen betroffenen Personen. Je höher die Strahlenbelastung, umso mehr treten neurologische und cardiovaskuläre Symptome auf mit Verwirrungszuständen und Schock, wobei entzündliche Hautveränderungen (Erythem, Schwellung) auftreten können. Diese Symptome deuten darauf hin, daß hier schwerste Strahlenschäden vorliegen, daß eine sofortige Überführung in stationäre Behandlung angestrebt werden sollte, daß aber auch bei sachgerechter Therapie mit einem exitus letalis innerhalb weniger Stunden oder Tage zu rechnen ist. Insbesondere dann, wenn neurologische und schwerere cardiovaskuläre Symptome fehlen, besteht die Hoffnung, daß es sich um die „gastrointestinale Form“ des akuten Strahlensyndroms handelt. Auch hier sollte schnellstens eine Klinikaufnahme zur Einleitung sachgerechter therapeutischer Maßnahmen

erfolgen, da durch die modernen therapeutischen Möglichkeiten gegebenenfalls doch der letale Ausgang bei einem Teil derartig betroffener Personen verhindert werden kann.

*Typisch für Kategorie 2 (Erholung möglich)* ist das Fehlen von neurologischen und cardiovasculären Symptomen, aber das deutliche Vorhandensein von Übelkeit, Schwäche, Erbrechen und gegebenenfalls auch Durchfall von stark wechselnder Intensität und Dauer. Gewöhnlich treten diese Symptome in den ersten Stunden nach Strahleneinwirkung auf und vermindern sich stark nach 1–2 Tagen oder verschwinden ganz.

*Typisch für Kategorie 3 (Erholung wahrscheinlich)* ist das Fehlen von neurologischen und cardiovasculären Symptomen und das nur geringgradige Auftreten von Übelkeit und Erbrechen, das, wenn vorhanden, sich aber innerhalb von 1–2 Tagen verliert.

*Typisch für Kategorie 4 (Erholung gesichert)* ist das Fehlen praktisch jeder Frühsymptomatik, wobei gegebenenfalls Angstreaktionen, die mit der Strahleneinwirkung nichts zu tun haben, unter Umständen eine dem Strahlensyndrom ähnliche Frühsymptomatik hervorrufen können (Übelkeit, Erbrechen).

Für die Handhabung von Strahlenunfallpatienten ist es von besonderer Bedeutung, daß der Erst-Arzt am Unfallort *eine genaue Befunderhebung der allgemeinen Symptomatik durchführt* und dabei eine exakte Zeitangabe macht, (die dann in Beziehung gesetzt werden kann zum Zeitpunkt der Strahlenbelastung). Weiterhin ist erforderlich, daß jede Befundänderung registriert wird und bestimmte Befunde (z.B. Blutdruck, Puls, Temperatur) in regelmäßigen kurzen Abständen je nach Schwere des sich entwickelnden klinischen Zustandsbildes erhoben werden.

### *3.3.3. Laborbefunde in der Frühphase nach Ganzkörperbestrahlung*

Zur „Spurensicherung“, die in den ersten Stunden nach einer Ganzkörperbestrahlung im Interesse der Einleitung und Durchführung einer optimalen Therapie notwendig ist, gehören einige Laboratoriumsuntersuchungen, deren wichtigste hier erörtert werden sollen.

#### *3.3.3.1. Blutbilduntersuchung*

Die meisten Personen, die sich gegebenenfalls durch einen Unfall einer hohen Strahlenbelastung aussetzen, stehen in regelmäßiger Gesundheitskontrolle durch einen bevollmächtigten Arzt. Daher sollte im allgemeinen für jede Person das normale Blutbild-Profil bekannt sein, welches bei jedem Einzelnen normalerweise von Monat zu Monat und Jahr zu Jahr nur in engen Grenzen variiert. Dabei ist der normale Blutleukozytenpegel sowie der normale Pegel der Granulozyten- und Lymphozytenkonzentration pro mm<sup>3</sup>

**Table 2:** Allgemeine Symptome nach Ganzkörperbestrahlung und Auftreten und ►  
ggf. Verschwinden in verschiedenen Zeitabschnitten nach Ganzkörperbestrahlung. (1) Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich, (2) Erholung möglich bei Einsatz aller therapeutischer Möglichkeiten, (3) Erholung wahrscheinlich, (4) Erholung gesichert.

**Tabelle 2: Allgemeine Symptome nach Ganzkörperbestrahlung und ihre Beziehung zu den Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms**

Symptom	Stunde 1-6				Stunde 6-24				Tag 1-4				Tag 5-8				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	
Schock	+	bis	∅	∅	+	bis	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	
	+++	∅	∅	∅	+++	∅	∅	∅									
Verwirrung	∅	bis	∅	∅	∅	bis	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	
	+++	∅	∅	∅	+++	∅	∅	∅									
Allg. Entzündung der Haut (Rötung, Schwellung)	∅	bis	∅	∅	∅	bis	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	
	++	∅	∅	∅	+++	∅	∅	∅									
Übelkeit, Schwäche	++ +	∅			+	∅			∅	∅	∅		++	∅			
	bis bis bis	∅			++ bis bis	∅			bis bis bis	∅			bis bis	∅	∅		
	++++ ++				++ +				++++ +				++++				
Erbrechen	++ +	∅			+	∅			∅	∅	∅		++	∅			
	bis bis bis	∅			++ bis bis	∅			bis bis bis	∅			bis bis	∅	∅		
	+++ +++ ++				++ ++				++ + +				+++ +				
Durchfall	∅	++	bis	∅	∅	∅	bis	bis	∅	∅	bis	bis	∅	+	∅	∅	
	+	∅	∅	∅	+	+	∅	∅	+	+	∅	∅	+++	∅	∅	∅	
Temperaturanstieg	++	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	++	∅	∅	∅	
	+++												+++				

∅ Symptom fehlt  
 + Symptom geringgradig  
 ++ Symptom mittelschwer  
 +++ Symptom hochgradig

(1) : Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich (3) : Erholung wahrscheinlich  
 (2) : Erholung möglich bei Einsatz aller therapeutischer Möglichkeiten (4) : Erholung gesichert

Blut von vorrangigem Interesse ebenso wie der normale Thrombozytenpegel. Darüber hinaus ist ein Interesse vorhanden, die normale Erythrozytenkonzentration oder den Hämatokrit zu kennen, wenn möglich auch die Reticulozytenkonzentration pro  $\text{mm}^3$  Blut. Die Früherkennung und Beurteilung eines Strahlengeschädigten wird durch das Vorhandensein derartiger „Normalwerte“ außerordentlich erleichtert.

*Nach* einer Strahleneinwirkung sollte so rasch als möglich eine Blutprobe entnommen werden, möglichst durch EDTA ungerinnbar gemacht. Wesentlich ist die exakte Zeitangabe der Blutentnahme (Tag, Stunde, Minute), um die Befunde in eine genaue Relation zum Unfallgeschehen bringen zu können. Unabhängig von dieser ersten Blutprobe ist es wünschenswert, *in den ersten 6 Tagen alle 12 Stunden eine Blutprobe* zur Untersuchung der Blutzellkonzentrationen zu machen. Dabei sollen dann die Gesamtleukozyten, die Erythrozyten und Thrombozyten quantitativ bestimmt \*) und aus dem Blutausschlag die Granulozyten- und Lymphozytenkonzentration errechnet werden.

Welche Hinweise lassen sich aus diesen Blutbilduntersuchungen gewinnen? (Tabelle 3)

*Typisch für Kategorie I (Erholung unwahrscheinlich oder unmöglich)* ist das Verschwinden der Lymphozyten aus der Blutbahn innerhalb von Stunden nach der Strahleneinwirkung (Abb. 3b). Im Gegensatz dazu ist eine massive Granulozytose innerhalb von Stunden am ersten Tag nach Strahleneinwirkung (Granulozytenwerte bis ca.  $30\,000/\text{mm}^3$ ) zu erwarten. Nur eine exakte Bestimmung sowohl der *absoluten Zahl* neutrophiler Granulozyten als auch der *absoluten Zahl* der Lymphozyten (zu berechnen aus Gesamtleukozytenzahl pro  $\text{mm}^3$  Blut und durch Differenzierung der Leukozyten im Blutausschlag) erlaubt die hier notwendige prognostisch relevante Aussage. Weiterhin typisch für Personen, die dieser Kategorie zuzurechnen wären, ist der Befund, daß der Granulozytenpegel bis zum 4. Tag im oder gegebenenfalls weit über dem Normalbereich verbleiben kann, während der Lymphozytengehalt des Blutes nahezu gleich Null ist. Weiterhin ist typisch, daß es bei den zu dieser Kategorie gehörenden Personen zwischen dem 4. und 6. Tag plötzlich zu einer schwersten Granulozytopenie mit Werten schließlich unter  $500/\text{mm}^3$  kommt, sodaß dann höchste Infektionsgefährdung vorhanden ist. Wahrscheinlich kann sich der Organismus ohne Hilfe (Stammzelltransfusion) nicht oder nur nach vielen Wochen von einer solchen Agranulozytose spontan erholen.

Typisch für die Personen dieser Kategorie ist auch das Verhalten der Thrombozytenkonzentration im Blut in den ersten 10 Tagen. In den ersten 2–4 Tagen werden diese im Normalbereich liegen oder eine langsam abfallende Tendenz zeigen. Zwischen dem 4. und 10. Tag muß mit einem

---

\*) Praktische Hinweise im Anhang zu diesem Abschnitt

**Tabelle 3:** Hämatologische Symptomatik nach Ganzkörperbestrahlung: Verhalten der Zelländerungen in Blut und Knochenmark in verschiedenen Zeitabschnitten nach Ganzkörperbestrahlung. Kategorien (1) bis (4) wie in Tabelle 2. ▶

Tabelle 3: Hämatologische Symptomatik in der Frühphase nach Strahleneinwirkung

Laborbefund	Stunde 1-6				Stunde 6-24				Tag 1-4				Tag 5-8					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)		
<i>Blutbild</i>																		
Granulozyten	++	+	∅	∅	+++	++	+	∅	++	+	∅	∅	-	-	∅	∅	∅	Zahlen oder Erscheinung im Normbereich
Lymphozyten	-	-	bis	∅	-	-	bis	bis	-	-	bis	bis	-	-	bis	bis	+	geringgradig erhöht
Retikulozyten	∅	∅	∅	∅	-	∅	∅	∅	-	-	∅	∅	-	-	∅	∅	++	mittelgradig erhöht
Thrombozyten	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	bis	∅	∅	-	bis	∅	∅	+++	stark erhöht
<i>Knochenmark</i>																		
Zellgehalt	∅	∅	∅	∅	∅	bis	∅	∅	-	∅	∅	∅	-	∅	∅	∅	-	geringgradig erniedrigt
Karyorrhexis + Karyolyse	∅	∅	bis	bis	+	∅	bis	bis	++	∅	bis	bis	+++	∅	∅	∅	-	mittelgradig erniedrigt
Mitosebedingte Anomalien der Erythropoese	∅	bis	∅	∅	∅	+	∅	∅	∅	++	∅	∅	∅	+	∅	∅	-	stark erniedrigt
Myelopoese	∅	bis	∅	∅	∅	∅	∅	∅	∅	+	∅	∅	∅	++	∅	∅	□	Zellen verschwunden
	+				+	+	+		+	++	+		+	+++	+			

progressiven Abfall der Zahlen gerechnet werden mit stark thrombopenischen Werten zwischen dem 8. und 10. Tag und den Folgen starker thrombopenischer Blutungen.

Weiterhin typisch ist der Verlauf der Retikulozytenzahlen. Bei Personen dieser Kategorie 1 ist zu erwarten, daß diese progressiv aus dem Blut verschwinden und spätestens nach 5 Tagen kaum noch nachweisbar sind. Dagegen fallen die Erythrozytenzahlen (wegen ihrer langen Lebensdauer) kaum oder nur sehr langsam (über Wochen hinweg) ab.

*Typisch für die Personen der Kategorie 2 (Erholung möglich)* ist eine mittelgradige bis hochgradige Lymphopenie, die sich innerhalb von 2–3 Tagen entwickelt (Werte zwischen 100 und 1000 pro  $\text{mm}^3$ ), sowie eine normale oder mittelgradig erhöhte Granulozytenzahl (Werte zwischen 4000 und 12 000 pro  $\text{mm}^3$ ) in den ersten 2–4 Tagen (Abb. 4b). In dieser Frühphase bleiben die Thrombozyten im Normbereich, während die Retikulozyten leicht abfallen, der Hämatokrit und die Erythrozytenzahl konstant bleibt. Zwischen dem 4. und 8. Tag erreichen die Granulozyten erste Minimalwerte, die aber gewöhnlich nicht unter 2000 absinken. Die Lymphozyten bleiben konstant niedrig, ohne sich mehrere Wochen lang in ihrer Konzentration wesentlich zu ändern. Charakteristisch ist jedoch für die Granulozytenkonzentration bei den Personen dieser Kategorie ein sog. „abortiver Granulozytenanstieg“, der sich entweder zwischen dem 8. und 20. Tag in einem Anstieg der Granulozyten bis in den Normalbereich ausdrückt, oder nur in einem Konstantbleiben der Zellzahlen, aber eben nicht in einem weiteren Abfall unter das um den 8. Tag herum erreichte Niveau. Eine mit klinischen Konsequenzen belastete Granulozytopenie ist dann erst zwischen 20 und 30 Tagen nach der Bestrahlung zu erwarten. In dieser Zeit erst kommt es zu der Thrombozytopenie mit den Blutungsgefahren (siehe Abschnitt 3.2.).

*Typisch für die Personen der Kategorie 3 (Erholung wahrscheinlich)* ist das Fehlen ganz charakteristischer Blutbildveränderungen (Abb. 5). Die Granulozytenzahlen sind in den ersten Stunden und Tagen meist im Normbereich. Sie fallen langsam im Verlauf von 4–5 Wochen ab, ohne aber je schwere granulozytopenische Werte zu erreichen (gewöhnlich nie unter 2000 pro  $\text{mm}^3$ ). Je nach den Umständen können die Lymphozytenzahlen in den ersten Stunden und Tagen normal oder erniedrigt sein. Die Thrombozyten, Retikulozyten und Erythrozyten bleiben in den ersten Stunden bzw. Tagen im Normalbereich.

*Typisch für Personen der Kategorie 4 (Erholung gesichert)* ist das Fehlen auffälliger Blutbildveränderungen in den ersten Tagen nach Strahleneinwirkung. Trotz regelmäßiger Blutbildkontrolle werden erst zwischen dem 30. und 40. Tag leichte Zellzahlerniedrigungen bei Thrombozyten und Granulozyten festzustellen sein. Das ist der Grund, warum auf alle Fälle – auch bei Fehlen aller Symptome – am 25., 30., 35. und 40. Tag nach Strahleneinwirkung eine ausführliche Blutbildkontrolle gemacht werden sollte, deren Werte mit den Frühuntersuchungen und den Normalbefunden vor Bestrahlung zu vergleichen sind.

### 3.3.3.2. Knochenmarkuntersuchung \*)

Die Knochenmarkuntersuchung gehört neben der Blutbilduntersuchung zu den wichtigsten diagnostischen Maßnahmen zur Abschätzung der Prognose eines Strahlengeschädigten. Sie sollte möglichst 12, jedoch nicht später als 24 Stunden nach einer Strahlenexposition vorgenommen werden, wobei ein Teil des bei der Punktion aspirierten Materials zur Herstellung eines *Markbröckel-Ausstriches* verwendet werden sollte, während ein anderer Teil der *zytogenetischen Untersuchung* zuzuführen wäre. Wenn möglich sollte ein Speziallabor die DNS-Synthesefähigkeit der Knochenmarkzellen sowie ihren Gehalt an Stammzellen mit Hilfe moderner Kultivierungsmethoden testen (15). Die beiden letzten Untersuchungen sind aber für die Frühdiagnostik unerheblich und helfen gegebenenfalls später in der Leitung der therapeutischen Maßnahmen.

Der Knochenmarksausstrich nach 12, spätestens 24 Stunden nach dem Strahlensult erlaubt wichtige frühdiagnostische Schlüsse.

Typisch für Personen der Kategorie 1 (Erholung unmöglich oder unwahrscheinlich) ist ein 12–24 Stunden Markbild (Bröckelausstrich!), in welchem der Zellgehalt noch normal zu sein scheint, aber selten oder nie Mitosen gefunden werden (Tab. 3). Eine nähere Durchsicht der Präparate läßt aber einen von Stunde zu Stunde nach der Strahlenbelastung zunehmenden Zellzerfall erkennen; die Zellen werden pyknotisch, Kerne lösen sich auf oder zerfallen, das Markbild gleicht zunehmend einem zellulären Trümmerhaufen. Da die Strahlendosis so hoch war, daß praktisch jede Zellneubildung durch Zellteilung unterbunden ist, ist auch in den ersten 8 Tagen eine zunehmende Markaplasie mit schrittweisem Verschwinden der nur noch ausreifenden granulozytären Elemente zu erwarten. Die Erythropoese wird schon 2–3 Tage nach der Bestrahlung gänzlich aus der Markzellpopulation verschwunden sein. Megakaryozyten bleiben gegebenenfalls noch mehrere Tage erkennbar.

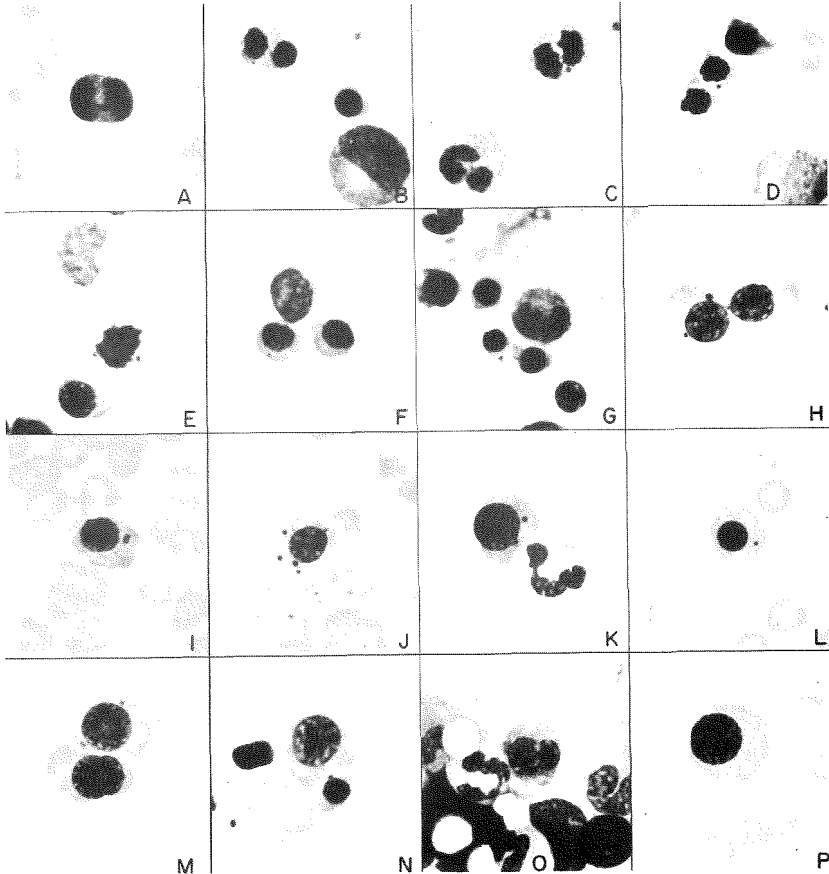
*Typisch für Personen der Kategorie 2 (Erholung möglich bei Ausnutzung aller therapeutischen Möglichkeiten)* ist in den ersten 6 Stunden ein Markbild, in dem lediglich die Abwesenheit von Mitosen auffällt sowie gegebenenfalls geringe Zeichen der Zellkernschwellung und der Karyorrhexis und Karyolyse. Zwischen 6 und 24 Stunden ist das zunehmende Auftreten von Erythroblasten mit Zeichen mitosebedingter Anomalien (insbesondere binukleare Zellen, Zellen mit Karyomeren) zu erwarten (Abb. 6). Das Maximum dieser erythropoetischen, mitosebedingten Anomalien ist 48 Stunden nach Strahleneinwirkung zu erwarten und sinkt dann ab, sodaß derartige Anomalien zwar nicht ganz verschwinden, aber doch seltener werden. Ebenfalls in der Zeit zwischen 6 und 24 Stunden ist bei recht normalem Zellgehalt das Auftreten erster mitosebedingter Störungen in der Myelopoese zu erwarten, die vor allem in unreifen Vorstufen (Promyelozyten, Myelozyten) zu erwarten sind (bi- oder multinukleare Zellen, Riesenzellen, Zellen mit Karyomeren) (Abb. 7). Derartige Zellanomalien der Myelopoese erreichen zwischen dem 4. und 8. Tag nach Bestrahlung Höchstwerte. Die Anomalien treten

---

\*) Methoden siehe Anhang

dann mehr und mehr in den reiferen Zellen auf und am 5.–8. Tag sind im Blut und Mark reife, abnormale Granulozyten (Riesenzellen, binukleare Zellen, Zellen mit Karyomeren) zu erwarten. Zusammen mit einer zunehmenden generellen Markhypo- oder Aplasie verschwinden diese typischen Anomalien und werden jenseits des 12.–16. Tages sehr selten (16).

*Typisch für die Personen der Kategorie 3 (Erholung wahrscheinlich)* ist ein normaler bis leicht erniedrigter Zellgehalt des Markes in den ersten 8 Tagen nach Strahleneinwirkung, ohne wesentliche Zeichen des erhöhten Zellunterganges. Nach 1–4 Tagen können einige *Erythroblasten* mit mitosebedingten

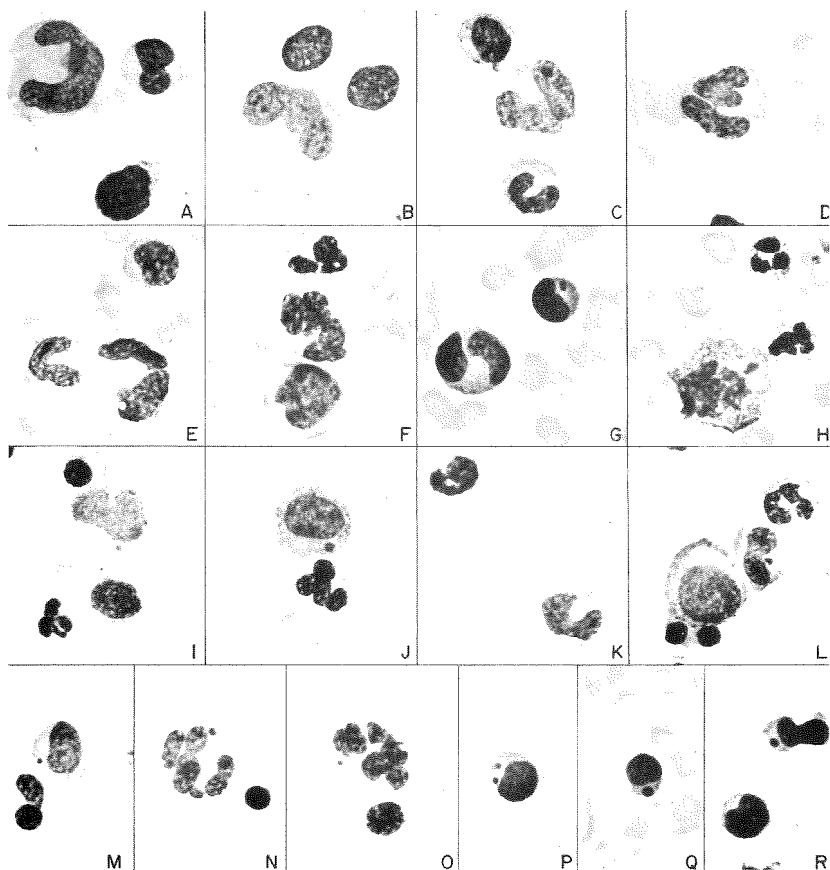


**Abb. 6:** Erythropoetische Anomalien im Knochenmarksausstrich nach Strahlenufall. In den ersten Tagen finden sich mitosebedingte Anomalien mit Chromosomenbrüche zwischen Teilungsfiguren (A), gestörte Mitosen mit Karyomeren (Kernabsprengung) (B–E), Karyomeren verschiedener Größe (F–N), Teilungsstörung (O), Reifungsdissoziation Kern/Plasma (P). Ihre Häufigkeit ist in weiten Bereichen dosisabhängig.



Anomalien erwartet werden (Abb. 6). Zwischen dem 4. und 8. Tag ist mit dem Auftreten von *myelozytären Zellen* (Myelozyten, Metamyelozyten, Granulozyten) mit mitosebedingten Anomalien (Riesenzellen, binukleare Zellen, Zellen mit Karyomeren) zu rechnen, aber deutlich weniger als zum gleichen Zeitpunkt bei Kategorie 2 (Abb. 7). Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Anomalien zuerst in den teilungsfähigen Zellen mit einem Maximum nach 2–4 Tagen, und dann erst in den reifen Zellen mit einem Maximum nach 8–10 Tagen auftreten dürften (16).

Typisch für die Personen der *Kategorie 4 (Erholung gesichert)* ist das normal erscheinende Markbild. Der Zellgehalt erscheint in den ersten 8 Tagen nicht wesentlich gegenüber der Norm verändert, Zeichen des Zellunterganges



**Abb. 7:** Myelozytäre Anomalien im Knochenmarksausstrich nach Strahlenunfall: myelozytäre Riesenzellen A–D, doppelkernige Zellen E–G, Karyomere in myelozytäre Zellen (H, I, J, K, L, M), abnorme granulozytäre Riesenzellen N, O, Karyomere in Lymphozyten P–R.

fallen nicht ins Auge. Mitosebedingte Anomalien der Erythropoese und der Myelopoese werden erst nach Auszählen von mehreren Hundert Markzellen deutlich und zwar vor allem zwischen dem 4. und 10. Tag nach Bestrahlung.

Aus dem Gesagten ergibt sich *zusammenfassend*, daß der Knochenmarksausstrich gerade in den ersten 12–24 Stunden nach Strahleneinwirkung gemeinsam mit den Blutbefunden (starke Granulozytose, starke Lymphopenie) und unter Berücksichtigung der klinischen Symptomatik einen sicheren Hinweis gibt auf die Schwere der zu erwartenden Strahlenkrankheit. Spätestens am 5. Tag kann eine Aussage darüber gemacht werden – bei sorgfältiger hämatologischer Untersuchung wie aufgezeigt – mit welchem weiteren Krankheitsverlauf zu rechnen ist und welche Maßnahmen zu ergreifen sind.

### 3.3.3.3. Zytogenetische Untersuchungen

Seit 1956 ist es möglich, durch geeignete Zellkulturverfahren und Präparationsmethoden, menschliche Chromosomen mikroskopisch sichtbar und auswertbar zu machen. Diese Methode der Chromosomendarstellung hat auch Eingang gefunden in die Diagnostik des akuten Strahlensyndroms. Allerdings erfordert die Chromosomendarstellung mehrere Tage Zeit und die Auswertung muß von Fachkräften vorgenommen werden. Aus diesem Grunde eignet sich die zytogenetische Untersuchung von Blut- und Knochenmarkzellen nach Bestrahlung nicht für eine unmittelbare Diagnostik. Sie ist aber aus anderen Gründen von großer Bedeutung und wurde deshalb in diesem Abschnitt erwähnt als eine Untersuchung, die möglichst 24 Stunden nach der Strahlenexposition erfolgen sollte und zwar aus Knochenmarkmaterial und Blutleukozyten.

Bei den Personen der Kategorie 1, 2 und 3 ist die Diagnostik des Strahlenschadens aufgrund der Kombination der allgemeinen Symptome sowie der Knochenmark- und Blutbefunde ohne weiteres auch mit hinreichender prognostischer Aussagekraft möglich. Bei den Personen der Kategorie 4 jedoch sind diese Untersuchungsmethoden nicht empfindlich genug. Es ist aber meist wünschenswert, die Frage einer Strahlenbelastung und ihres Ausmaßes eindeutig zu belegen, auch wenn sich zunächst keine Konsequenzen für die Frühbehandlung ergeben, da sich diese erübrigt. Da aber auch nach niedrigen Strahlenbelastungen Spätschäden (bösartige Geschwülste, Hämoblastosen, frühzeitiges Altern) nicht ausgeschlossen werden können, wird gegebenenfalls nach Wochen oder Jahren die Frage nach der tatsächlichen, biologisch relevanten Strahlenbelastung gestellt werden. Dann sollte der zytogenetische Frühbefund für die Zeit unmittelbar nach Bestrahlung vorliegen.

Der Zeitpunkt für eine zytogenetische Frühuntersuchung von 12–24 Stunden von Knochenmarkzellen und Blutlymphozyten ergibt sich aus der Umsatzkinetik der zu untersuchenden Zellen. Im menschlichen Knochenmark beträgt die Generationszeit der vorherrschenden erythrozytären und myelozytären Zellen ca. 20–40 Stunden und die DNS-Synthesezeit ca. 12–15 Stunden. Zwischen 12 und 24 Stunden nach der Strahlenbelastung kann also damit gerechnet werden, daß diejenigen Zellen sich zur ersten oder zweiten Zellteilung anschicken, die zum Zeitpunkt der Bestrahlung als ruhende Zellen in der postmitotischen Ruhephase vorhanden waren und

somit strahlenbelastet wurden. Ein Maximum der Chromosomenanomalien der sich stark teilenden Markzellen sollte daher nach 12–24 Stunden vorhanden sein und damit die beste Möglichkeit, den „Bestrahlungsstatus“ im Knochenmark festzulegen. Es muß Wert darauf gelegt werden, das Mark aus dem Körperabschnitt zu aspirieren, der wahrscheinlich die höchste Strahlenbelastung erhielt. Schon in den nachfolgenden Tagen ist ein zunehmender Abfall der Häufigkeit von Chromosomenaberration in Markzellen zu erwarten.

Auch die ersten Chromosomenpräparationen aus Blutleukozytenkulturen sollten 12–24 Stunden nach einer Strahlenbelastung als Ausgangswert angelegt und dann hergestellt werden. Da es sich um die Kultivierung von Blutlymphozyten handelt, die teilweise eine monate- bis jahrelange Lebenserwartung haben, ist in ihnen eine Strahlenbelastung des Organismus noch lange nachzuweisen. Ein Maximum ist aber auch hier als Ausgangswert für spätere Kontrolluntersuchungen in den ersten Tagen nach einer Strahlenbelastung zu erwarten.

Die Auswertung der Chromosomenpräparationen muß besonders vorgebildeten Fachleuten überlassen bleiben. Diese werten dann in den Chromosomenpräparaten die Häufigkeit bestimmter Chromosomenanomalien aus, von denen bekannt ist, daß sie durch eine Strahleneinwirkung erhöht sind. Durch Bestrahlung werden Brüche in den Chromosomen hervorgerufen, die zu einer Unterbrechung der Kontinuität der Chromosomen führen. Die Mehrzahl solcher Brüche verheilt vermutlich. Falls sie nicht verheilen, kann diese Lücke einfach offenbleiben, oder die Bruchflächen können sich mit anderen Bruchflächen in der gleichen Zelle vereinigen. Daraus entstehen dann die verschiedenartigsten Chromosomenaberrationen, deren Häufigkeit ein Maß für die Höhe der Strahlenbelastung ist. Einzelheiten über die Methode und die Interpretation ihrer Ergebnisse müssen aus der Fachliteratur entnommen werden (17, 18). Chromosomenuntersuchungen von Blut und Knochenmark sollten im ersten halben Jahr nach Strahleneinwirkung alle 4–6 Wochen durchgeführt werden, um einen Anhalt über den Ablauf der Reaktion nach einer Strahlenbelastung mit einer empfindlichen Methode verfolgen zu können.

#### *3.3.3.4. Biochemische frühdiagnostische Methoden*

Die bisherige Erfahrung hat gezeigt, daß eine Frühdiagnose des Strahlenschadens mit Hilfe der oben aufgezeigten Methoden mit hinreichender Genauigkeit gelingt; dem behandelnden Arzt wird es dadurch möglich, eine sachgerechte Therapie einzuleiten, auch wenn er über die physikalische Dosis keine abschließende oder auch nur annähernde Kenntnis hat. Es hat sich gezeigt, daß die biochemischen Methoden der Untersuchung bestimmter Stoffwechselprodukte im Blut, im Stuhl und im Urin keine weiteren Gesichtspunkte zur Diagnostik hinzufügen können (19). Dennoch ist es erforderlich, die Folgen einer Ganzkörperbestrahlung auch mit biochemischen Methoden zu analysieren, um weitere Anhaltspunkte für die Pathogenese der Strahlenkrankheit zu gewinnen, um daraus Hinweise für eine Verfeinerung der Diagnostik und für die Überwachung der therapeutischen Maßnahmen zu gewinnen.

Aus diesem Grunde wird ausdrücklich darauf hingewiesen, daß möglichst in regelmäßigen Abständen Blut und Exkreme (Stuhl und Urin) abgenommen und so aufbewahrt werden, daß sich das Material nicht zersetzt (sterile Entnahme von Blut, Abtrennung von Plasma unter sterilen Bedingungen und unter Vermeidung einer Hämolyse; Sammeln von Urin während bestimmter Zeiträume unter Zusatz von die Zersetzung verhindernden Substanzen und Einfrieren; Sammeln von Stuhlproben und Einfrieren). Gerade die ersten 10 Tage nach einer Strahlenexposition und insbesondere die ersten 2 Tage sind für die spätere Untersuchung der Stoffwechselstörungen nach Strahlenwirkung von besonderer Bedeutung und deshalb sollten möglichst alle Exkreme sorgfältig gesammelt und registriert werden, bis ein für jeden Patienten individueller Untersuchungs- und Behandlungsplan in Zusammenarbeit mit entsprechenden Fachlaboratorien erarbeitet ist.

### *3.4. Diagnose und Prognose bei Teilkörperbestrahlung*

#### *3.4.1. Allgemeine Vorbemerkungen*

Die Erfahrung hat deutlich gezeigt, daß echte Teilkörperbestrahlungen bei Strahlenunfällen selten sind, d.h., daß sich das Strahlenfeld nur auf einen Abschnitt des Körpers beschränkt unter Abschirmung des übrigen Organismus. Meistens handelt es sich – wenn es sich nicht um eine homogene Ganzkörperbestrahlung handelt – um eine stark inhomogene Ganzkörperbestrahlung, bei der zwar der gesamte Organismus im Strahlenfeld lag, aber einzelne Körperabschnitte besonders betroffen wurden. Eine solche Situation erfordert einige spezielle Hinweise, die im allgemeinen bereits im Abschnitt 3.2. mit erwähnt wurden.

Die starke Inhomogenität des Bestrahlungsfeldes kann für den Betroffenen Vor- und Nachteile haben. Von Vorteil ist beispielsweise, daß das blutbildende Knochenmark in allen Skelettabschnitten des Körpers verteilt ist. Wird nun ein Abschnitt mehr, der andere Abschnitt relativ weniger oder gar nicht strahlenexponiert, so ist bekannt, daß eine Regeneration des gesamten Markes von einem einzigen wenig oder nicht bestrahlten Markabschnitt ausgehen kann, sodaß eine solche Inhomogenität gegebenenfalls dem Patienten das Leben retten kann. Von Nachteil ist die Inhomogenität, wenn dadurch bestimmte Organe oder Organsysteme so stark bestrahlt werden, daß sie in ihrer Funktion irreversibel und so früh gestört werden, daß die Patienten eine allgemeine Erholung ihres Körpers mit Wiederherstellung des Verdauungsapparates und des blutzellbildenden Systems gar nicht erleben. Aus dieser Sicht ist es nur für jeden Einzelfall möglich, nach Abwägung aller Umstände prognostische Aussagen zu machen.

#### *3.4.2. Bestrahlung im Kopf-Halsbereich*

Erfahrungen über schwere Teilkörperbestrahlungen im Kopf-Halsbereich ergeben sich insbesondere aus dem Lockport-Unfall 1960, bei dem Techniker – wie im Abschnitt 3.2. erwähnt – zusätzlich zu einer Ganzkörperbestrahlung eine hohe Strahlenbelastung des Kopf-Halsbereiches durchmachten. Einzelheiten ergeben sich aus den entsprechenden Veröffentlichungen.

Im Zusammenhang mit der Frühdiagnose und mit der Prognose sind hier nur

folgende Fakten generell abzuleiten. Hohe Strahlendosen im Kopf-Halsbereich in der Größenordnung von 1000 bis 1500 R führen zu Komplikationen, die das klinische Bild ganz wesentlich beeinflussen können.

Zunächst seien die Haut- und Schleimhautläsionen erwähnt, die bald nach dem Unfall in Erscheinung traten. Zeitweilig kann dann das klinische Bild dem der akuten Entzündung der im Strahlenfeld liegenden Organe entsprechen. So kam es bei den Patienten des Lockport-Unfalles zu Bildern wie man sie bei der Parotitis und der Stomatitis findet. Derartige Läsionen sind für die Prognose im Zusammenhang mit der sonstigen Strahlenbelastung wichtig. Als „locus minoris resistentiae“ können sie Ort und Quelle von lokalen und generellen Infektionen sein, insbesondere in Abhängigkeit vom Granulozytenspiegel, der gegebenenfalls die Widerstandsfähigkeit des Körpers gegen bakterielle Infekte stark erniedrigt. Bei Thrombopenie können derartige Wunden zu Quellen besonderer Blutungsneigung werden.

Für die weitere klinische Symptomatik, insbesondere für den langfristigen Ablauf der Strahlenkrankheit, sind die Anteile des Zentralnervensystems, die im Strahlenfeld liegen (Gehirn, Sehapparat, Gehörapparat) und ihre Reaktionen auf Strahleneinwirkung von besonderer Bedeutung. Die 1200–1500 R, die im Falle des Lockport-Unfalles von den Organen des Kopfes absorbiert wurden, führten zu schweren neurologischen und ophthalmologischen Störungen, die gleich nach der Strahleneinwirkung begannen (schwerste, „tiefe“ Kopfschmerzen) und monatelang in immer neuen Wellen und Komplikationen auftraten.

Im Zusammenhang der Frühdiagnostik sei nur darauf hingewiesen, wie wichtig die Befunderhebung in den ersten Stunden und Tagen nach einer Strahlenbelastung ist, wenn möglich unter Zuhilfenahme der Farbphotographie, um den später hinzutretenden behandelnden Ärzten ihre Diagnosestellung und die Wahl der sachgerechten therapeutischen Mittel zu erleichtern.

### *3.4.3. Bestrahlung im Thoraxbereich*

Die Analyse der bisherigen Strahlenunfälle zeigt Fälle, bei denen es neben einer Ganzkörperbestrahlung zu einer besonders intensiven Strahleneinwirkung im Thoraxbereich kam. Ein bedeutendes Beispiel ist das des einen Patienten des Los-Alamos-Unfalles 1945/46 (Case I des Berichtes von Hempelman et. al. 8). Die hämatologischen Daten erlauben die Einordnung dieses Patienten in die Kategorie 2 (Erholung möglich bei Ausnutzung aller therapeutischer Möglichkeiten). Der Patient starb 25 Tage nach einer stark inhomogenen Ganzkörperbestrahlung, bei der der Thoraxbereich aber auch die Extremitäten besonders hohe Strahlendosen erhielten. Bei diesem Patienten war das klinische Bild durch die besonderen cardialen Symptome geprägt mit permanenter Tachycardie, sporadischen Anfällen einer akuten paroxysmalen Tachycardie und niedrigem Blutdruck. Die autoptischen Befunde wiesen auf eine schwere, fibrinöse Pericarditis hin. Die Dosis war aber nicht hoch genug gewesen, um eine direkte Herzmuskelschädigung hervorzurufen. Dafür bietet der Unfall von Los Alamos 1958 ein Beispiel. Bei diesem Patienten, der 32 Stunden nach dem Strahlenunfall ad exitum kam, wurde die Ganzkörperdosis auf ca. 4500 rd geschätzt, die im Thoraxbereich dagegen auf 12000 rd. Die histologische Untersuchung des Herzmuskels zeigte

das Vorliegen eines schweren Ödems, eine beginnende Degeneration der Muskelfasern sowie eine interstitielle Myocarditis.

Aus diesen Beispielen läßt sich wiederum der Schluß ziehen, daß das klinische Bild des akuten Strahlensyndroms geprägt wird durch die durchschnittliche Strahlenbelastung des Gesamtorganismus und mehr oder weniger stark durch die Strahlenempfindlichkeit und die Dosis modifiziert werden kann, der Teile des Körpers ausgesetzt werden.

Bei besonders hoher Teilkörperbestrahlung im Thoraxbereich kann das Bild somit einerseits durch entzündliche und gegebenenfalls degenerative Veränderungen des Herzens, andererseits durch die Reaktionen des Lungengewebes (Entzündungen und später Fibrosen) charakterisiert sein und es letztlich entscheidend beeinflussen.

#### *3.4.4. Bestrahlung im Abdominalbereich*

Auch bei Ganzkörperbestrahlung mit besonderer Beeinflussung des Abdominalbereiches gelten ähnliche Überlegungen, wie sie im Abschnitt 3.4.2. und 3.4.3. angestellt wurden. Die im Strahlenfeld liegenden Organe können durch ihre besonderen Reaktionen das allgemeine Bild des akuten Strahlensyndroms prägen. Dabei ist besonders der Verdauungstrakt und seine Strahlensensibilität zu erwähnen, aber auch Nieren und ableitende Harnwege. Je nach der Höhe der Lokaldosis werden sich die klinischen Folgen wandeln. Zunächst stehen auch hier die entzündlichen Veränderungen, später die degenerativen Strahlenschäden im Vordergrund. Da der Verdauungstrakt mit Keimen besiedelt ist, kann eine besonders starke Strahlenbelastung des Intestinaltraktes mit einer Entblößung der intestinalen Oberfläche besonders zu Zeitpunkten schwerer Granulozytopenien (z.B. zwischen dem 6. und 12. Tag oder in der 4. und 5. Woche nach Ganzkörperbestrahlung) zum Ausgangspunkt gefährlicher bakterieller Infektionen werden. Beispiele dafür sind Patienten der Unfälle in Los Alamos 1945/46 (8) und in Vinca 1958 (10).

Für die Frühdiagnose gilt auch hier die Bedeutung einer genauen Befunderhebung in den ersten Stunden und Tagen und eine möglichst genaue Anamneseerhebung (Position des Patienten im Verhältnis zur Strahlenquelle).

#### *3.4.5. Bestrahlungen im Extremitätenbereich*

Es gibt unter den bisher beschriebenen Strahlenunfällen eine Reihe von Personen, bei denen es neben einer Ganzkörperbestrahlung insbesondere zu einer hohen Strahlenbelastung der Extremitäten kam. Als Beispiel sei ein Patient des Los Alamos-Unfalles 1945/46 erwähnt, bei dem in einem Fall (Case 3: Hempelman et. a. (8)) der rechte Arm (einschließlich Hand) 3 000–10 000 R und der linke Arm 15 000–30 000 R weicher Röntgenstrahlen erhielt. Im anderen Fall (Case 1) lagen die Strahlenbelastungen der Arme zwischen (links) 5–15 000 und (rechts) 20–40 000 R. Der eine Patient (Case 1) starb 26 Tage nach dem Unfall in der Phase der Manifestation der Insuffizienz der blutzellbildenden Organe, der andere Patient (Case 3) starb 9 Tage nach dem Unfall unter den Zeichen des „gastrointestinalen“ Syndroms.

Die Krankengeschichten lassen deutlich erkennen, daß die „hämatologische“

bzw. „gastrointestinale“ Form des akuten Strahlensyndroms aufgrund der durchschnittlichen Strahlendosis des Körpers insgesamt durch diese schweren Strahlenschäden der Extremitäten modifiziert und geprägt wurden. Die klinischen Bilder entsprachen denen schwerster Verbrennungen.

Für die Frühdiagnose ist wiederum die exakte Befunderhebung wichtig sowie eine erste Hilfe, die der bei schweren Verbrennungen der Haut entsprechen sollte. Wichtige Hinweise sind für therapeutische Maßnahmen an anderer Stelle gegeben (5).

### *3.4.6. Zusammenfassung*

Kommt es bei einer Ganzkörperbestrahlung zu einer besonderen Strahlenbelastung eines oder mehrerer Körperabschnitte, so kann dadurch der klinische Verlauf des akuten Strahlensyndroms geringfügig, mittelstark oder erheblich verändert werden. Je nach der Lokaldosis kommt es zunächst zu entzündlichen Reaktionen des besonders bestrahlten Gewebes, später zu schweren bis schwersten degenerativen Erscheinungen und Nekrosen. Besondere Beobachtung verdienen diese Lokalveränderungen in den besonders kritischen Phasen des Ablaufes des allgemeinen Strahlensyndroms, wenn die Granulozytenzahl oder die Thrombozytenzahl des Blutes sehr niedrige Werte erreichen, sodaß eine besondere Infektionsanfälligkeit oder Blutungsneigung besteht. Für die Frühmaßnahmen nach einem Strahlenunfall ist besonderer Wert auf die Erhebung einer detaillierten Anamnese zu legen, die alle Organe erfassen muß, sowie eine exakte „Spurensicherung“, d.h. eine genaue Befunderhebung in allen Körperregionen, gegebenenfalls mit photographischer Dokumentation, die aber gerade in den ersten Tagen nach dem Unfall häufig gegebenenfalls stündlich fortgeschrieben werden muß.

## *3.5. Ärztliche Frühmaßnahmen bei Strahlenunfällen*

### *3.5.1. Stufen der Handhabung von Strahlenunfällen bei Ganz- bzw. Teilkörperbestrahlung*

Der zuerst zu einem Strahlenunfall gerufene Arzt muß sich darüber im klaren sein, daß er ein entscheidend wichtiges Anfangsglied einer Kette von Ärzten ist, die gegebenenfalls die betroffene Person direkt oder indirekt im Laufe der nächsten Tage, Wochen und Jahre betreuen werden. Eine Ganz- oder Teilkörperbestrahlung löst eine Serie von Reaktionen aus, die im Organismus konsequent und programmiert ablaufen und die sich gegenseitig beeinflussen können. Von Stunde zu Stunde und von Tag zu Tag ändert sich das Befundmuster und der Kundige kann aufgrund der pathophysiologischen Grundlagen aus bestimmten Befundsänderungen als Funktion der Zeit nach dem Strahlenunfall bestimmte Vorhersagen machen, die dann zu konkreten therapeutischen Konsequenzen führen. Aus diesem Grunde kommt der Tätigkeit des den Unfallgeschädigten zuerst behandelnden Arztes eine besondere Bedeutung zu. Er muß nicht nur „Erste-Hilfe“ leisten, sondern er muß vor allem für eine möglichst genaue Anamnesen- und Befunderhebung sorgen, damit die später hinzugezogenen Spezialärzte sich ein genaues Bild gerade der ersten Stunden nach dem Unfall machen können.

Es erscheint sinnvoll, drei Stufen der ärztlichen Maßnahmen bei Strahlenunfällen zu unterscheiden.

Jedem, der mit ionisierenden Strahlen umgeht, muß eine rasch erreichbare „*Erste Hilfe-Station*“ zur Verfügung stehen und bekannt sein (Stufe I). Eine solche Station muß vor allem für Ballungsgebiete der Erzeugung und Verwendung ionisierender Strahlen verlangt werden. Sie muß ständig besetzt sein (bzw. ein Strahlenschutzarzt oder Strahlenschutztechniker muß durch Alarmzeichen erreichbar sein). In ihr muß „*Erste Hilfe*“ im üblichen Sinne einer Unfallstation möglich sein. Sie muß darüber hinaus zur gründlichen äußeren Dekontamination eingerichtet sein. Es müssen Vorrichtungen vorhanden sein, damit das Dusch- und Waschwasser, Urin und Exkrememente möglichst für jeden Betroffenen gesondert aufgefangen und physikalisch sowie chemisch untersucht werden können. Von dieser Station aus erfolgt die Überweisung zur „*Spezial-Strahlenunfall-Ambulanz*“ (Stufe II), oder gleich zur klinischen Strahlenunfallbehandlung (Stufe III).

Die „*Spezial-Strahlenunfall-Ambulanz*“ (Stufe II) wird in größeren Strahlenbetrieben mit einem betriebsärztlichen Dienst mit der „*Ersten-Hilfe-Station*“ identisch sein. Auf jeden Fall sind in ihr Spezialkräfte hauptamtlich tätig, welche in der Lage sind, Strahlenunfall-Geschädigte ambulant zu behandeln und zu überwachen. Diese Ambulanz sollte über die Möglichkeit einer Ganzkörper-Radioaktivitätszählung verfügen und ganz allgemein natürlich alle jenen Strahlen nachweisen können, mit welchen die im Überwachungsbereich tätigen Personen umgehen (z.B. Plutonium, Uran, seltene Erden etc.). Die meisten Strahlenunfälle können in Einrichtungen der Stufe I oder II versorgt werden. Allerdings sollte die „*Spezial-Strahlen-Ambulanz*“ über einige Betten verfügen, die für Unfallgeschädigte bereit zu halten sind, bevor sie im Bedarfsfall zur klinischen Behandlung weiter geleitet werden. Insbesondere muß diese „*Spezial-Strahlen-Ambulanz*“ über Dekontaminierungsmöglichkeiten von Geschädigten verfügen und demgemäß sich der Hilfe chirurgisch geschulter Ärzte versichern. Falls die Strahlenbetriebe nicht groß genug sind, um mehr als eine gut eingerichtete „*Erste Hilfe-Station*“ für Strahlenunfälle zu haben, sollten in Ballungsgebieten solche „*Spezial-Strahlenunfall-Ambulanzen*“ eingerichtet werden. In Universitätsstädten sollten die chirurgischen bzw. internen Kliniken ihre Ambulanzen mit den notwendigen Spezialeinrichtungen zur Strahlenunfallbehandlung ambulanter oder präklinischer Art versehen.

In eine *klinische Strahlenunfall-Station* (Stufe III) werden Personen eingeliefert (entweder direkt von der „*Ersten Hilfe-Station*“ oder durch die „*Spezial-Strahlenunfall-Ambulanz*“), bei denen die Entwicklung eines Strahlensyndroms aufgrund der ersten diagnostischen Maßnahmen evident oder zu erwarten ist. Diese Unfall-Station muß in sich die Einrichtungen einer „*Intensiv-Pflege-Station*“ mit einer „*Beobachtungsstation*“ und „*Isolierstation*“ vereinigen. Der Versorgungstyp ist überwiegend internistisch mit der Notwendigkeit der Zuziehung von Konsiliaren (Chirurg, Dermatologe, Toxikologe, Ophthalmologe, Röntgenologe etc.). Die notwendigen Einrichtungen dieser Station ergeben sich in erster Linie aus der Betrachtung der klinischen Gegebenheiten beim „*unkomplizierten Strahlenunfall*“. Bei hohen Strahlendosen (jenseits 1500 R) sind Erscheinungen zu erwarten, die auf ein Versagen der zentralnervösen und kardiovaskulären Regulation zu-



rückzuführen sind. Hier handelt es sich also um Behandlung von schwersten Schockzuständen, wie sie auf einer Intensiv-Pflege-Station bzw. Wachstation geläufig sind (Reanimations-Station). Zwischen 500 und 1500 rd sind Übelkeit und Erbrechen in den ersten 2–3 Tagen im Vordergrund und verlangen ebenfalls zunächst die Einrichtungen vom Typ „Reanimations-Station“. Jenseits des 5. Tages werden schwerste Durchfälle, jenseits des 7. Tages schwerste fieberhafte Infekte und jenseits des 10. Tages Komplikationen durch thrombopenische Blutungen zu erwarten sein. Notwendig ist daher die Möglichkeit entsprechender Behandlung: Elektrolyt- und Stoffwechselstörungen, massive generalisierte Infekte – vom Darm ausgehend – und Blutungen. Bei den Strahlenbelastungen zwischen 200 und 500 R stehen die klinischen Erscheinungen im Zeichen von Infekten, Magendarm-Störungen und Blutungen, insbesondere in der dritten bis fünften Woche nach Bestrahlung. Berücksichtigt man, daß Strahlenunfallgeschädigte neben den Folgen einer externen Bestrahlung mit harten Strahlen womöglich auch die eines komplizierten Unfalles, eines Kontaminierungsunfalles oder eines Inkorporationsunfalles durchzumachen haben, so kommt man hinsichtlich der *Klinischen Strahlenunfall-Station* zu folgenden Forderungen:

Als Strahlenunfall-Station eignet sich jede Station, die für *internistische Intensiv-Pflege* gerüstet ist, wenn ihr folgende Spezialeinrichtungen ständig zur Verfügung stehen:

- a) Möglichkeiten der „*umgekehrten Isolation*“, die eine aseptische Behandlung erlauben (konsequent und radikale Abschirmung des Patienten gegenüber seiner mikrobiellen externen Umwelt), bzw. gezielte, vorübergehende bakterielle Dekontamination des Geschädigten in Spezial-Isolierzelten („Life-Islands“, „Ulmer Bett“).
- b) *Leistungsfähige Blutbank*, die für eine Substitutionstherapie mit Blutzellen, in erster Line Thrombozyten, später mit Leukozyten, bei komplizierten Unfällen mit Erythrozyten eingerichtet ist. Hier muß auf die Fähigkeit zur Durchführung von Histokompatibilitätsproben (Gewebs- und Zellübertragung) gedrungen werden. Diese Blutbank muß in der Lage sein, pro Unfallgeschädigten 60–70 Spender (Thrombozytentransfusionen) heranzuziehen und auf Histokompatibilität zu testen. Die normal A-B-0 Gruppen- und Untergruppenbestimmung muß selbstverständlich gewährleistet sein.
- c) *Klinische Laboratorien* auf dem Gebiete der *Hämatologie* (laufende Blutbildüberwachung mit Bestimmung von allen Blutzelltypen, einschließlich Thrombozyten sowie qualifizierte Knochenmarkausstrich-Diagnostik), der *Bakteriologie* (laufende bakteriologische Kontrolle aller Exkrememente und Abstriche), der *klinischen Chemie* (Elektrolyt-Bestimmung, Bilirubin, Albumin, Globuline, Rest-N, Transaminasen etc.) sowie der *Kardiologie* (EKG).

Dazu kommen die Konsiliardienste aus dem Klinikum seitens der verschiedenen Spezialgebiete, die jeweils gerufen sind, vor allem Chirurgie, Dermatologie, Ophthalmologie, Otolaryngologie, Röntgenologie, Toxikologie etc..

Alles in allem zeigt sich, daß der Strahlenunfall – wie kaum eine andere klinische Situation – eine wirkliche Aufgabe für ärztliche Gruppenarbeit ist.

### 3.5.2. Diagnostische Frühmaßnahmen

#### 3.5.2.1. Feststellung des „Status praesens“

Eine der ersten Aufgaben des zu einem Strahlenunfall hinzugezogenen Arztes ist, dafür zu sorgen, daß die besonderen Umstände des Unfallgeschehens festgehalten werden. Dabei ist z.B. die genaue Position des Betroffenen zur Strahlenquelle von ärztlichem Interesse ebenso wie die Frage, ob gegebenenfalls zwischen Person und Strahlenquelle irgendwelche abschirmenden Gegenstände (Mauern, Schränke etc.) gewesen sind. Diese Angaben erlauben später, die Frage besser beantworten zu können, inwieweit es sich um eine homogene oder inhomogene Strahlenbelastung gehandelt hat. Bei der *Befunderhebung* ist vor allem die genaue Zeit der ersten Untersuchung (Tag, Stunde, Minute) festzuhalten, damit der Befund später in Relation zum Zeitpunkt des Unfallgeschehens gesetzt werden kann. Im übrigen muß der „Status praesens“ umfassend erarbeitet werden, um möglichst rasch eine erste Antwort auf die Frage zu finden: „In welche Kategorie der klinischen Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms gehört der Betroffene?“. Es kann sich als nützlich erweisen, für jeden Patienten ein zeitliches Protokoll anzulegen, das dem Befundblatt angefügt wird (Tabelle 4). Falls bereits eine kürzere oder längere Zeit seit dem Strahlenunfall vergangen ist, muß die Frühanamnese besonders sorgfältig erhoben werden (Schwächegefühl, Schwindel, Schmerzen, Übelkeit, Erbrechen etc.) für die Zeit seit dem Unfall und dem Zeitpunkt der ersten ärztlichen Untersuchung.

Aufgrund dieser Befunderhebung sollte eine erste grobe Zuordnung des Betroffenen zu einer der Verlaufskategorien möglich sein, wobei zunächst nur eine Frage beantwortet werden sollte: „Gibt es irgendwelche allgemeine Zeichen oder Symptome einer Strahlenschädigung?“. Die Frage verneinen bedeutet, daß bei dem Patienten keinerlei Störungen gefunden wurden, die auf eine unmittelbare Beeinträchtigung irgend eines Organsystems hinweisen, und daß insbesondere keine Übelkeit und Erbrechen beobachtet wurden. Die Konsequenz ist – nach der Einleitung bestimmter Laboruntersuchungen (s. 3.5.2.2.) – die weitere ambulante Beobachtung für 1–2 Tage oder die Entlassung aus der Betreuung. Wird die Frage bejaht, so wurden entweder Zeichen einer Funktionsstörung eines Organs oder Organsystems, Übelkeit und/oder Erbrechen beobachtet. In diesem Falle sollte der Betroffene entweder zur Stufe II oder zur Stufe III der Strahlenunfallbehandlung gebracht werden, um weitere diagnostische Untersuchungen durchführen und erste therapeutische Maßnahmen einleiten zu können.

#### 3.5.2.2. Erste Laboratoriumsuntersuchungen

Es ist im Abschnitt 3.2. und 3.3. herausgestellt worden, welche Bedeutung bestimmte Laboratoriumsuntersuchungen für die Diagnose des Strahlenschadens und für prognostische Aussagen haben.

Im Vordergrund stehen *hämatologische Untersuchungen*, wobei es gut ist, wenn eine 5–10 ml *Blutprobe* sobald wie möglich abgenommen und zur Untersuchung gebracht wird. Von besonderer Bedeutung ist es, den genauen Zeitpunkt der Blutentnahme (Tag, Stunde, Minute) festzuhalten und die Leukozyten-, Granulozyten- und Lymphozytenzahl pro mm<sup>3</sup> Blut *rasch*

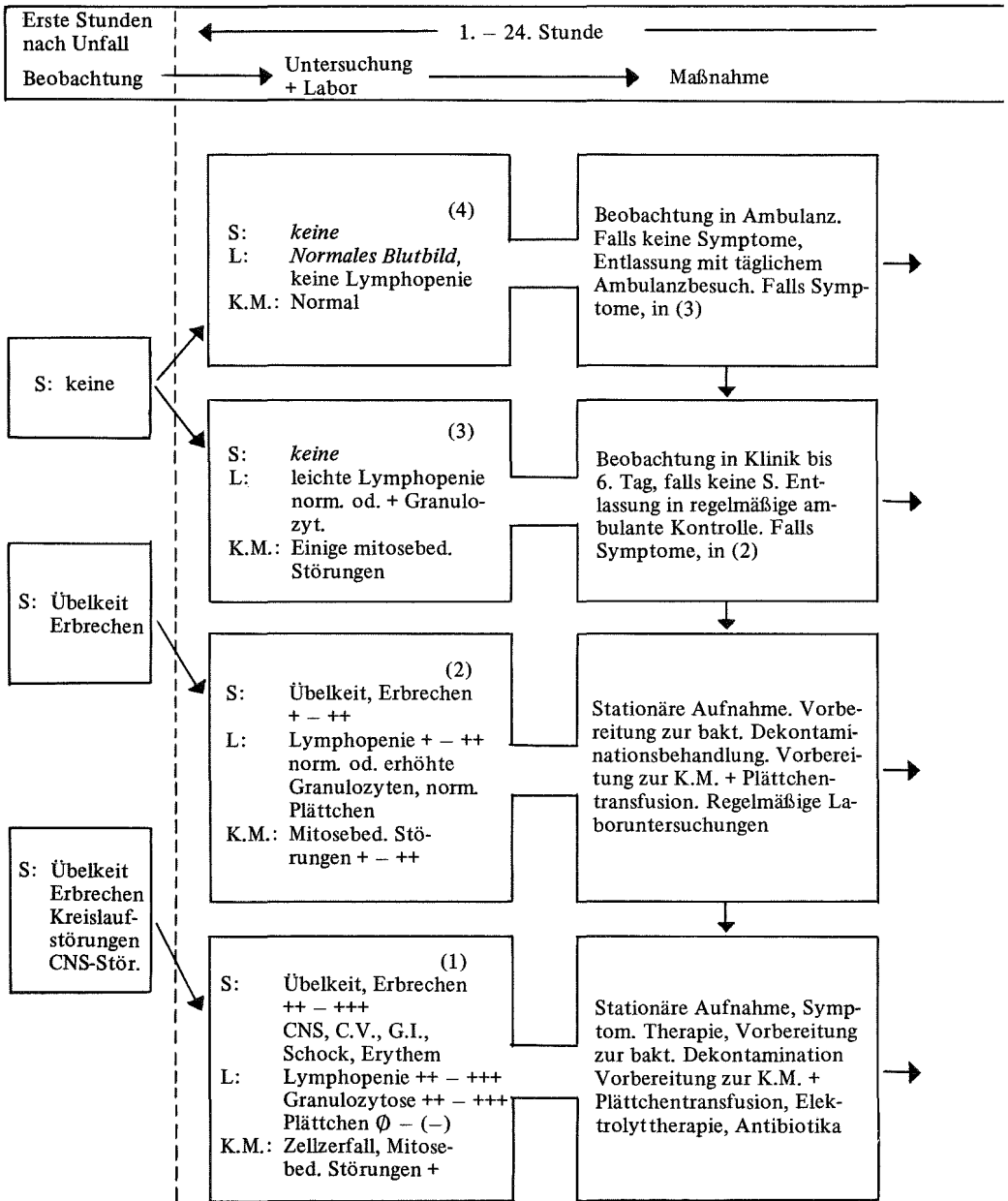
**Tabelle 4: Muster eines allgemeinen Frühprotokolls für einen Strahlenunfallgeschädigten**

Name: Tag, Stunde und Minute  
 Vorname: des Strahlenunfalles:  
 Alter:  
 Geschlecht: Ort:  
 Gewicht:

Diagnostische Maßnahmen	1. Untersuchung		2. Untersuchung		3. Untersuchung	
	Tag	Stunde u. Min.	Tag	Stunde u. Min.	Tag	Stunde u. Min.
z.B.	10.7.71	17.35	10.7.71	23.35	11.7.71	08.30
<i>Feststellung des „Status praesens“</i>						
(1. Schock 2. Verwirrung 3. Zeichen der Entzündung 4. Übelkeit, Schwäche 5. Erbrechen 6. Durchfall 7. Temperatur- anstieg)						
<i>Laborunter- suchungen</i>						
1. Blutbild 2. Knochenmark 3. Bakteriologie der Haut u. des Darmes 4. Urinuntersuchung 5. Urinsammlung 6. Konservierung von Stuhlproben						
Sonstige:						
7. ....						
8. ....						
9. ....						

**Tabelle 4:** Muster eines Frühprotokoll mit „Check-Liste“ eines Strahlenpatienten, um an die Elemente der „Spurensicherung“ zu denken. Die Befunde werden in ein gesondertes Krankenblatt eingetragen.

**Tabelle 5**  
**Frühmaßnahmen nach Strahlenunfall**



1. – 6. Tag

Untersuchung

Maßnahme

Beobachtung in Ambulanz  
B.B. + K.M. Kontrolle:  
normale Werte  
Falls Symptome, in (3)

Weitere ambulante Kontrolle  
Ausführliche Untersuchung  
am 30. Tag nach Bestrahlung

Beobachtung in Klinik  
keine S, aber leichte  
Lymphopenie, K.M. Anoma-  
lien, gering, keine Granu-  
lozytopenie am 5. od. 6. Tag

Kontrolle, keine Therapie  
Falls bis 6. Tag keine S und  
keine charakt. Blutbefunde für  
Kategorie (2), Entlassung in  
ambulante Kontrolle. Sonst in (2)

S: Übelkeit, Erbrechen  
klingt ab.  
L: Granulozyt.  $\emptyset$  od. +,  
am 5.–6. Tag – bis --  
Lymphozyt. – bis --  
K.M.: Mitosebedingte  
Anomalien + – +++

Bakt. Dekontamination,  
Einleitung der Steriltherapie  
Vorbereitung von Spendern für  
Transfusionsbehandlung (K.M. +  
Blutzellen) Sonstige Symptomat.  
Therapie

A: Patient stirbt innerhalb  
2–3 Tagen  
B: Patient erholt sich kli-  
nisch  
L: Granulozyten ++ – +++  
ab 5. Tag -- bis ----  
Lympho ----  
K.M.: Aplasie, mitosebed.  
Anomalien

B: Rasche Einleitung einer  
Steriltherapie mit intensi-  
ver bakt. Dekontamination  
Intensive Elektrolyt + Flüss-  
igkeitstherapie

Vorbereitung von Spendern  
f. K.M. + Blutzelltransfusion

feststellen zu lassen. (Auf die übrigen Werte dieser Probe: Erythrozyten- und Retikulozytenzahl sowie Thrombozytenzahl, kommt es erst später an). Falls das nicht gleich möglich ist, sollte das Blut auf alle Fälle abgenommen werden, (ungerinnbar gemacht durch EDTA), kühl aufbewahrt werden zur späteren Zählung (auch noch 4–6 Stunden danach möglich) („Spurensicherung“). Weitere Blutentnahmen erfolgen im Abstand von 12 Stunden, 5 Tage lang, bei Verdacht auf Strahlenbelastung aufgrund der Symptome „Übelkeit“, „Erbrechen“, oder gar schwererer Symptome „CNS-Beteiligung“, „Schock“. Wenn irgend möglich, sollte eine *Knochenmarkaspiration* zwischen der 12. und 24. Stunde nach dem Strahlenunfall durchgeführt werden (s. technischer Anhang). Früher nach dem Unfall gibt der Markausstrich zu wenig Information und jenseits 24 Stunden sind bereits wichtige Schlußfolgerungen nicht mehr möglich. Das Material sollte für Markbröckel-ausstriche und für zytogenetische Studien ausreichend sein. Falls Speziallaboratorien zur Verfügung stehen, sollten der  $^3\text{H}$ -Thymidin-Index der Markzellen sowie der Gehalt an hämatopoetischen Zellkolonien in der Agrarkultur („ACU-Technik“) des aspirierten Knochenmarkes bestimmt werden. Weiterhin sollte der *Urin* gesammelt werden zur Untersuchung von Stoffwechselprodukten des Zellerfalls nach Strahleneinwirkung. Es sollten Material (Haut-, Rachenabstriche, Stuhlproben) zu bakteriologischen Untersuchungen entnommen werden, damit bei Vorliegen einer stärkeren Strahlenexposition möglichst rasch mit einer gezielten bakteriellen Dekontaminationsbehandlung durch Antibiotika begonnen werden kann. Im übrigen sollten natürlich alle jene *Laboruntersuchungen* eingeleitet werden, die dem Erst-Arzt aufgrund seiner Beurteilung des klinischen Zustandes (z.B. EKG, Serumuntersuchungen auf Transaminasen etc.) geboten erscheinen.

### 3.5.2.3. Zuordnung des Betroffenen zu einer der Verlaufskategorien

In Tabelle 5 ist ein Schema der Diagnostik und Therapie nach akuter Ganzkörperbestrahlung aufgeführt. Daraus läßt sich entnehmen, daß es aufgrund der in 3.5.2.1. und 3.5.2.2. eingeleiteten oder durchgeführten Untersuchungen möglich sein muß, den Betroffenen einer der großen Kategorien der Verlaufsformen des akuten Strahlensyndroms zuzuordnen.

1. Ließ der Patient keine allgemeinen Zeichen und Symptome erkennen, die auf eine Strahlenkrankheit schließen lassen, und sind Granulozyten- und Lymphozytenwerte in den ersten 4 Tagen nach dem Unfall normal, so erscheint es berechtigt, den Patienten höchstens ambulant zu betreuen oder ihn aus der Frühkontrolle zu entlassen.
2. Ließ der Patient irgendwelche allgemeinen Zeichen erkennen, insbesondere Übelkeit und/oder Erbrechen, die auch bei einer Strahlenkrankheit

◀ **Tabelle 5:** Vorschläge für therapeutische Maßnahmen in den ersten 6 Tagen nach einem „unkomplizierten“ Strahlenunfall für die Kategorien des Strahlensyndroms (1) – (4). S = allgemeine Symptomatik, L = hämatologische Laboruntersuchungen. K.M. = Knochenmarkuntersuchung. B.B. = Blutbild. Über die möglichen therapeutischen Details geben andere Publikationen Auskunft (2, 7, 8, 19).

auftreten können, so ist eine weitere, mindestens ambulante, wenn möglich stationäre Beobachtung für wenigstens 10 Tage erforderlich, er kann dann in die Kategorie 1, 2 oder 3 fallen. Dieses muß durch Beobachtung und weitere Untersuchungen erhärtet werden.

Falls die Knochenmarkuntersuchung am 1., 2. oder 3. Tag nach Strahleneinwirkung Zeichen einer Schädigung (Zelluntergang, mitosebedingte Störungen) aufweist, so sollte eine Dekontaminationsbehandlung der intestinalen Mikroflora so rasch als möglich eingeleitet werden und der Patient in ein Sterilzelt eingeschleust werden, da es dann entweder nach 6 Tagen oder spätestens jenseits des 21. Tages zur Gefahr der Manifestation bakterieller Infekte kommt. Das ist der Grund, warum bei Verdacht auf Strahlenschädigung der Kategorie 1, 2 oder 3 die rasche Einweisung in eine „klinische Strahlenunfall-Station“ erfolgen sollte.

Die späteren (jenseits des 4. Tages) diagnostischen Zeichen und die möglichen therapeutischen Konsequenzen sind in Tabelle 5 und Abb. 3 und 4 im Detail an anderer Stelle behandelt worden (19).

### *3.5.3. Vorarbeit der Therapie*

Der zuerst zugezogene Arzt muß naturgemäß neben der Befunderhebung („Spurensicherung der ersten Stunden“) die jeweils notwendigen therapeutischen Maßnahmen einleiten – wie bei jedem anderen Unfall auch. Handelt es sich um einen unkomplizierten Unfall, wird je nach der Schwere des klinischen Bildes keine symptomatische Therapie erforderlich, oder aber der Patient entsprechend zu behandeln sein (Übelkeit, Erbrechen bis hin zum Kreislaufkollaps und Schock). Dabei gelten dann alle Richtlinien der üblichen „Hilfe am Unfallort“. Der Patient soll, so rasch es sein Zustand erlaubt, zur „Spezial-Strahlenunfall-Ambulanz“ oder zur „klinischen Strahlenunfall-Station“ gebracht werden.

Ist es ein „komplizierter Unfall“, so müssen alle jene Maßnahmen getroffen werden, die auch sonst bei Unfällen mit thermischen, chemischen oder mechanischen Komplikationen notwendig sind, um den Patienten zur fachgerechten Behandlung zu überweisen.

Über die Maßnahmen beim Kontaminations- und Inkorporierungsunfall ist ausführlich in Kapitel 4, 5, 6 und 7 eingegangen worden.

### *3.5.4. Logistik des Strahlenunfalles*

#### *3.5.4.1.*

Wie in allen Betrieben, so müssen insbesondere in „Strahlenbetrieben“ Sicherheitsbeauftragte vorhanden sein, denen die Aufgaben des Strahlenschutzes vertraut sind. Es sollte festgelegt werden, pro wieviel „Strahlenbeschäftigte“ ein Sicherheitsbeauftragter notwendig ist, der immer wieder neu für seine Aufgaben in der „Ersten Hilfe bei Strahlenunfällen“ geschult wird. Je mehr Personen intensiv mit den Problemen des praktischen Strahlenschutzes vertraut sind, desto besser.

Insbesondere sollte diesen Beauftragten folgende Informationen stets gegenwärtig sein:

- a) Nächste „Erste Hilfe-Station“ für Strahlenunfälle
- b) Nächste „Spezial-Ambulanz für Strahlenunfälle“
- c) Nächste „Klinische Station für Strahlenunfälle“
- d) Transportmittel und Möglichkeiten ihrer Anforderung
- e) Möglichkeiten der direkten, einfachen Dekontamination
- f) Transport von radioaktiv verseuchten Personen falls keine Möglichkeit unmittelbarer Dekontamination
- g) Sicherung des Unfallortes (zwecks Rekonstruktion des Unfalles und um weitere Verbreitung strahlender Substanz etc. zu verhindern)
- h) Benachrichtigung vorgesetzter Stellen und der Gewerbeaufsicht bzw. Strahlenschutzbeauftragter des Betriebes.

#### 3.5.4.2.

Während „Erste Hilfe-Stationen“ für Strahlenunfälle in Geh-Weite von den Stätten der Verwendung ionisierender Strahlen liegen müssen, können die Spezial-Ambulanzen für Strahlenunfallgeschädigte etwas weiter entfernt sein (innerhalb 10–15 Autominuten). Die „Klinischen Stationen zur Aufnahme von Strahlenunfällen“ können viele Kilometer entfernt sein. Die Unfallgeschädigten sollten in der Spezialambulanz solange verbleiben, bis ein Transport per Wagen oder bei Transport „über Land“ per Hubschrauber (Autobahn- und Straßenverstopfung!) wirklich möglich ist. Auch und gerade bei schweren Fällen ist eine Wartezeit vor dem Transport in eine klinische Station von 6–12 Stunden durchaus gerechtfertigt. Die Spezial-Ambulanz muß für die chirurgische Erst-Versorgung und weitgehende Dekontamination eingerichtet sein. War die Dosis so hoch, daß ein Exitus letalis innerhalb von 12 Stunden eintritt, wäre jeder ärztlichen Maßnahme die Aussicht auf Erfolg sowieso genommen. Gewöhnlich hat sich bei behandlungsfähigen Fällen das Bild (Übelkeit, Erbrechen) soweit gebessert (evtl. durch antiemetische Therapie), daß der Transport mit Überlegung und in Ruhe zum klinischen Spezial-Zentrum möglich ist.

#### 3.5.4.3.

Von besonderer Bedeutung ist das Vorhandensein eines „nationalen“ und eines „internationalen“ Strahlen-Unfall-Rates. Ihm sollten Fachkräfte angehören, die jeweils besondere Kenntnisse auf dem Gebiet der Diagnostik und Therapie von Strahlenunfällen haben.

Bei jedem Strahlenunfall, der zur Aufnahme in die Spezial-Ambulanz führt, sollte der nationale Rat obligatorisch in eine Bereitschaftsstufe I gerufen werden (telefonisch). Innerhalb von 6 Stunden sollte die Bereitschaft entweder aufgehoben werden, oder es sollte festgelegt werden, ob in der Bereitschaftsstufe II ein Erscheinen der Betroffenen bei den Geschädigten notwendig ist. Auf alle Fälle muß durch behördliche Anordnungen sichergestellt werden, daß eine optimale Auswertung des verfügbaren Materials in wissenschaftlicher Weise erfolgen kann.

Bei besonders schweren Strahlenunfällen sollte die Mitarbeit internationaler Fachkräfte in der Diagnostik und Therapie sichergestellt werden. Ihre Namen und Anschriften sollten in allen „Spezial-Ambulanzen“ und den „Klinischen Stationen“ bekannt sein.

Schließlich sei noch das Problem der Unterrichtung der Öffentlichkeit



erwähnt. Es sollte ein Pressereferent mit ärztlicher Kompetenz bestellt werden, der in der Lage ist, eine sachliche Unterrichtung der Öffentlichkeit sicherzustellen. Sicherlich brauchen nie alle Details in der allgemeinen Presse erscheinen. Aber eine im sachlichen einfache und wahrheitsgetreue Darstellung der Fakten ist notwendig, und beugt unliebsamen Richtigstellungen, die schließlich doch erforderlich sind, vor.

*Literatur:*

1. *H. Holthusen, H. Meyer und W. Molineus:*  
Ehrenbuch der Röntgenologen und Radiologen aller Nationen.  
Verlag Urban u. Schwarzenberg, München - Berlin (1959).
2. *V.P. Bond, T.M. Fliedner and J.O. Archangeau:*  
Mammalian Radiation Lethality, A Disturbance in Cellular Kinetics.  
AIBS Monograph. Academic Press, New York and London (1965).
3. *E.A. McCulloch and J.I. Till:*  
The sensitivity of cells from normal mouse bone marrow to gamma radiation in-vitro and in-vivo.  
Radiation Research 16, 822-832 (1962).
4. *L.F. Lamerton, H.H. Pontifex, N.M. Blackett and K. Adams:*  
Effects of protracted irradiation on the blood forming organs of the rat. Part I: Continuous exposure.  
Brit. Journal of Radiology 33, 287 (1960).
5. *H.I. Köhnlein:*  
Dringliche Chirurgie bei Strahlenunfällen.  
In: T.M. Fliedner u. W. Hauger (Hrsg.): Ärztliche Maßnahmen bei außergewöhnlicher Strahlenbelastung.  
Georg Thieme Verlag, 1-43 (1967).
6. *Europäische Atomgemeinschaft:*  
Les irradiations accidentelles en milieu de travail.  
Euratom-Bericht EUR 3666 - d-f-i-n/e, December 1967.
7. *International Atomic Energy Agency:*  
Manual on Radiation Haematology, A Joint Undertaking by IAEA and WHO.  
Technical Reports Series No. 123, Vienna (1971).
8. *World Health Organization:*  
Diagnosis and Treatment of Acute Radiation Injury.  
Geneva (1961).
9. *J.W. Howland, M. Ingram, H. Mermagen and C.L. Hansen, Jr.:*  
The Lockport incident: Accidental partial body exposure of humans to large doses of X-irradiation.  
In: Diagnosis and Treatment of Acute Radiation Injury.  
World Health Organization, Geneva (1961).
10. *H.P. Jammet:*  
Treatment of Victims of the Zero-Energy Reactor Accident at Vinca.  
In: Diagnosis and Treatment of Acute Radiation Injury.  
World Health Organization, Geneva (1961).
11. *M. Brucer (Edit.):*  
The acute radiation syndrome. A medical report on the Y-12 accident, June 16, 1958 Oak Ridge.  
United States Atomic Energy Commission,  
Report ORINS - 25, (1959).

12. *R.J. Hasterlik and L.D. Merinelli:*  
Physical dosimetry and clinical observations on four human beings involved in an accidental critical assembly excursion.  
Proc. Intern. Conf. Peaceful Uses,  
At. Energy Geneva 2, 25–34 (1955).
13. *G.V. LeRoy:*  
Hematology of atomic bomb casualties.  
Arch. Intern. Med. 86, 691 – 710 (1950).
14. *E.P. Cronkite, V.P. Bond and C.L. Dunham:*  
Some effects of ionizing radiation on human beings.  
USAEC Report, TID 5358, July (1956).
15. *D. Metcalf and M.A.S. Moore:*  
Haemopoietic cells.  
North-Holland Publishing Company, Amsterdam, London (1971).
16. *T.M. Fliedner, G. Andrews, E.P. Cronkite and V.P. Bond:*  
Early and late cytological effects of whole body irradiation on human marrow.  
Blood 23, 471 – 487 (1964).
17. *M.A. Bender and P.C. Gooch:*  
Cytogenetic methods: somatic chromosome aberrations in occupationally irradiated humans.  
In: Les Irradiations Accidentelles en Milieu de Travail.  
European Atomic Energy Community, Euratom (1967).
18. *S. Kelly and C.D. Brown:*  
Chromosome aberrations as a biological dosimeter.  
Am J. Public Health 55, 9, 1419 – 1429 (1965).
19. *T.M. Fliedner und W. Hauger (Hrsg.):*  
Ärztliche Maßnahmen bei außergewöhnlicher Strahlenbelastung.  
Georg Thieme Verlag Stuttgart (1967).
20. *H. Begemann und H.G. Harwerth:*  
Praktische Hämatologie. Differentialdiagnose, Therapie, Methodik.  
Georg Thieme Verlag Stuttgart, 3. Aufl. (1967).

## Anhang: Technische Hinweise für die notwendigen Laboruntersuchungen

### 1. Blutbilduntersuchung

- 1.1. Alle Blutbilduntersuchungen werden an Blut vorgenommen, das aus einer Vene mit Hilfe von einer Nadel und Spritze entnommen wurde. Das Blut wird in ein entsprechend vorbereitetes Röhrchen, das getrocknetes EDTA<sup>+</sup> enthält, gegeben und leicht geschüttelt, um es ungerinnbar zu machen. Es kann nunmehr, falls erforderlich, bei Kühlschranktemperaturen für mehrere Stunden aufbewahrt werden, bevor es weiter verarbeitet wird.  
(+ Äthylendiamintetraessigsäure Dinatriumsalz = Titriplex III).
- 1.2. Die *Leukozytengesamtzahl* und die *Erythrozytenkonzentration* pro mm<sup>3</sup> Blut wird mit dem elektronischen Zählgerät nach Coulter oder mit der Zählkammer (Methodenbeschreibung s. (20)) durchgeführt.
- 1.3. Die Retikulozytenzahl wird nach der Methode bestimmt, die in (20) beschrieben wird.
- 1.4. Die absolute Zahl der einzelnen Leukozyten (insbesondere Granulozyten und Lymphozyten) wird aus dem nach May-Grünwald-Giemsa gefärbten Blutausstrich durch Ausdifferenzierung von mindestens 200 Leukozyten und unter Berücksichtigung der Leukozytengesamtzahl pro mm<sup>3</sup> Blut berechnet. (Methode bei 20).
- 1.5. Die Thrombozytenzahl wird mit Hilfe der Neubauer-Zählkammer im Phasenkontrastmikroskop nach der Methode von Brecher und Cronkite (s. 20) bestimmt.
- 1.6. Alle Blutausstriche müssen als Dokument aufbewahrt werden. Auf ihre besonders sorgfältige Herstellung (nicht zu dick austreichen!) ist besonders zu achten.
- 1.7. Es kann sich als nützlich erweisen, *Leukozytenkonzentrate* herzustellen und die Zellen auszustreichen und mikroskopisch zu untersuchen. Dieses ist vor allem bei starker Leukozytopenie erforderlich.

### 2. Knochenmarkuntersuchung

#### 2.1. Ort der Markaspiration:

Handelt es sich um eine homogene Ganzkörperbestrahlung, so ist es im Prinzip gleichgültig, ob eine Sternalpunktion oder eine Beckenkamm-punktion durchgeführt wird.

Der Autor führt routinemäßig eine Beckenkammpunktion durch, da diese – bei richtiger Technik – den Patienten weniger belastet.

Falls der Verdacht auf eine starke Inhomogenität der Strahleneinwirkung besteht, sollte zu initialen diagnostischen Eingriffen in der vermutlich am stärksten bestrahlten Körperregion aspiriert werden. In der späteren Regenerationsphase sollte zur Überwachung des Verlaufes in der vermutlich am schwächsten bestrahlten Region aspiriert werden (gegebenenfalls auch Dornfortsatzpunktion!).

- 2.2. Der Autor verwendet für die Sternalpunktion die Klima-Rosegger-Nadel, für die Beckenkammpunktion eine Bier'sche Nadel.  
Die Aspiration erfolgt in eine 20 ml Ultrasept-Spritze, die sich wegen ihrer hohen Ansaugkraft und wegen der Möglichkeit, sie ganz auseinandernehmen zu können, besonders bewährt hat. Sie enthält ca. 1 ml einer 1.104 %igen EDTA Lösung in 0.7 %igem NaCl als Antikoagulans.
- 2.3. Die Markaspiration bei Strahlenunfällen muß unter absolut sterilen Kautelen durchgeführt werden (Infektionsrisiko!). Die Haut wird sorgfältig desinfiziert, die Aspirationsstelle steril abgedeckt, und der Arzt muß unter sterilen Bedingungen (Handschuhe, Maske etc.) arbeiten.  
Die Lokalanästhesie von Haut und Periost ist mit einer 2 %igen Novocainlösung sorgfältig durchzuführen. Der Arzt muß absolut sicher sein, daß das Periost an der geplanten Aspirationsstelle ohne Schmerzempfindung ist. Er muß durch geeignete Maßnahmen (Nadel der Novocainlösung stecken lassen!) sicherstellen, daß die Aspirationsnadel dann tatsächlich den empfindungslosen Periostbereich trifft.
- 2.4. Die Markaspirationsnadel wird mit Hilfe einer Drehbewegung um ihre zentrale Achse in den Knochen „hineingedreht“. Sobald die Nadel eben fixiert ist und im Knochen steckt, wird das Mark, nach Aufsetzen der Spritze auf die Nadel mit weit vorgeschobenen Kolben (es darf nur die EDTA-Flüssigkeit, jedoch keine Luft in der Spritze sein), durch eine kräftige Ansaugbewegung in die Spritze plötzlich hineingezogen. Die Aspiration von ca. 2–3 ml Markblut resultiert meist in einer hinreichenden Zahl von Markbröckeln.
- 2.5. Das Markblut wird Tropfen für Tropfen auf eine schräg gestellte Glasscheibe getropft, an welcher es ablaufen kann. Dabei bleiben die Markbröckel hängen und können mit einem Deckgläschen aufgenommen und auf einem Objektträger ausgestrichen werden (als schräggestellte Glasscheibe eignet sich z.B. ein Objektträger, der in einer Petrischale schräg angelehnt ist, sodaß das Blut gesammelt wird).
- 2.6. Der Markausstrich wird an der Luft getrocknet und nach May-Grünwald-Giemsä gefärbt. (Nicht den Namen und den genauen Zeitpunkt der Aspiration vergessen!).
- 2.7. Die Auswertung der Markausstriche hinsichtlich der mitosebedingten Anomalien erfolgt nach den Vorschlägen, die an anderer Stelle veröffentlicht wurden (16).

## 4. Kontamination der Haut und Maßnahmen zur Dekontamination

G. Möhrle

### 4.1. Einleitung

Die bisherigen Erfahrungen bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie haben gezeigt, daß eine unfallbedingte ernstere Ganzkörper- bzw. Teilkörperbestrahlung ausgesprochen selten ist, ebenso eine gefährlichere Inkorporation. Die äußere Kontamination dagegen, d.h. die Verunreinigung der Körperoberfläche durch radioaktive Stoffe, läßt sich trotz aller Vorsichtsmaßnahmen beim Umgang mit offenen radioaktiven Substanzen nie ganz vermeiden. Darüber hinaus muß z.B. bei Wartungs- und Reparaturphasen in Kernkraftwerken immer wieder mit einer deutlich erhöhten Anzahl äußerer Kontaminationen (bis zu 80 %) des dabei eingesetzten Personals gerechnet werden. Wenn es sich dabei auch im wesentlichen um leichtere Kontaminationen handelt, so müssen dennoch immer entsprechende Dekontaminationsmaßnahmen eingeleitet werden und Dekontaminationseinrichtungen vorhanden sein. In kerntechnischen Betrieben werden diese Dekontaminationsmaßnahmen meist routinemäßig von dem entsprechend ausgebildeten Strahlenschutz-Personal durchgeführt bzw. überwacht, ohne daß dies als eigentliche Erste-Hilfe-Maßnahme angesehen wird, da es mehr oder weniger zum betrieblichen Alltag gehört. Nur wenn die durchgeführten Dekontaminationsmaßnahmen keinen befriedigenden Effekt aufweisen oder die Haut durch die bisherigen Maßnahmen mehr oder minder lädiert ist, wird häufig erst geschultes Sanitätspersonal bzw. der jeweils zuständige Strahlenschutzarzt verständigt, insbesondere dann, wenn kein hauptberuflicher Betriebs- bzw. Strahlenschutzarzt vorhanden ist.

Eine Abgrenzung, wann eine Dekontamination von der kontaminierten Person selbst durchgeführt, vom Strahlenschutzpersonal veranlaßt oder vom Arzt überwacht werden muß, ist kaum möglich und wird zudem von den gegebenen örtlichen und personellen Verhältnissen sehr stark beeinflusst. Andererseits muß jedoch bei jeder Maßnahme zur Beseitigung einer Hautkontamination darauf geachtet werden, daß die Haut nicht mehr als zuträglich strapaziert wird. Alle über das normalerweise zunächst durchzuführende Waschen mit Seife und Bürste hinausgehenden Hautreinigungsmaßnahmen haben meist mehr oder weniger mechanisch oder chemisch abrasiv wirkende Effekte, so daß sie nicht ohne weiteres willkürlich angewendet werden dürfen. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß die abrasive Verdünnung der obersten Hornschichten der Epidermis zu einer Reihe von Funktionsänderungen der Haut, wie z.B. höheren Wasserverlust, raschere Alkalinneutralisation (damit schnelleres Eindringen von Lösungen) und vor allem erhöhte Rauigkeit der Hautoberfläche führt. Daneben kommt es, vorwiegend mechanisch bedingt, auch zu einer leichten, an der Hauttemperaturerhöhung ablesbaren Irritation bis in die sogenannte Lederhaut, selbst

wenn diese und die Oberhaut nicht verletzt sind. In ausgeprägteren Fällen können eine erst nach Stunden wieder abklingende Rötung und ein Ödem der Haut auftreten. Eine ganz oberflächliche Verletzung, wie z.B. eine Hautabschürfung, die nur von Serumaustritt und Schmerzen (Nervenendigungen der Epidermis) gefolgt ist, betrifft anatomisch nur die Epidermis und wird narbenlos abheilen; ist jedoch eine Verletzung mit einer noch so geringen Blutung verbunden, so ist zumindest schon das Stratum papillare der Lederhaut betroffen. Damit ist jedoch die natürliche Barriere, die die gesunde und intakte Epidermis gegen das Eindringen radioaktiver Stoffe in den Körper bildet, durchbrochen.

Abgesehen von der hieraus abzuleitenden Vorsicht bei der Anwendung aller die Haut stark angreifenden Dekontaminationsverfahren, erkennt man gleichfalls eindeutig, wie wichtig es ist, daß bei den strahlenschutzärztlichen Überwachungsuntersuchungen bei allen akuten und chronischen Hauterkrankungen, insbesondere an Händen, Unterarmen, Gesicht und Kopf, sofort gesundheitliche Bedenken gegen den Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen und gegen jede sonstige Tätigkeit in Kontrollbereichen, bei der eine Kontaminationsmöglichkeit besteht, erhoben werden. Auch das Strahlenschutzpersonal muß immer wieder darauf hingewiesen werden, daß Beschäftigte mit Anzeichen einer akuten oder chronischen Hauterkrankung bzw. einer Hautverletzung zuerst dem Strahlenschutzarzt vorgestellt werden, bevor sie den Kontrollbereich betreten dürfen.

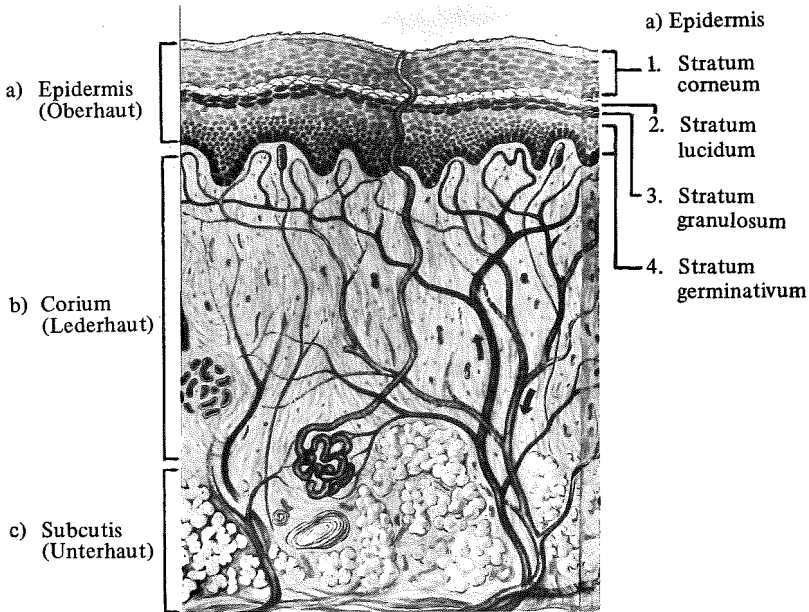
#### *4.2. Anatomie und Permeabilität der normalen Haut*

Die Haut ist in ihrer geweblichen Zusammensetzung uneinheitlich. Man unterscheidet als epithelialen Anteil die Epidermis (Oberhaut) und den darunter liegenden bindegewebigen Anteil, das Corium (Lederhaut); dieses geht allmählich in das subcutane Fettgewebe (Subcutis) über. Die Oberhaut ist, wenn man von Fußsohlen, Handinnenflächen und Teilen von Fingern und Zehen absieht, etwa 0,07–0,17 mm dick, während die Lederhaut zwischen 1,7–2,0 mm stark ist.

Die wichtigste Aufgabe der Lederhaut und speziell ihrer sogenannten Papillarschicht ist es, die gefäßlose Oberhaut zu ernähren und Stoffwechselprodukte aus ihr abzuführen. Durch ihre dichtstehenden kuppelförmigen Ausstülpungen (Papillen), die in ihrem Innern die feinmaschigen Kapillargefäße mit den sie begleitenden Lymphräumen enthalten, reicht sie wellenförmig in die unterste Schicht der Oberhaut, in das sogenannte Stratum basale der Keimschicht (Stratum germinativum). Von dieser Keimschicht erfolgt die ständige Erneuerung der ganzen Oberhaut. Da in dieser Schicht viele Zellteilungen erfolgen, ist sie gegenüber ionisierenden Strahlen besonders empfindlich.

An diese Keimschicht grenzt die Körnerschicht (Stratum granulosum). Diese Schicht besteht aus nur wenigen Zellagen und hat ihre Bezeichnung von der im Zellprotoplasma auftretenden aus Keratohyalin bestehenden Körnchen. Diese eiweißartigen Gebilde leiten den Verhornungsvorgang ein. Über dieser Körnerschicht erscheint ein heller lichtbrechender Streifen – das Stratum lucidum (Glanzschicht). Hier haben sich die Keratohyalinkörner verflüssigt und bilden eine die ganze Schicht durchtränkende Masse. Die oberste, für

das Auge sichtbare Schicht der Oberhaut ist die eigentliche Hornzellschicht (Stratum corneum), die im Mittel etwa 0,007 mm dick ist, aber z.B. an den Handinnenflächen und den Fußsohlen bis zu 20 mal so stark sein kann. Sie besteht aus abgestorbenen, aber noch fest zusammenhängenden Epithelzellen.



Haut der Fingerbeere (Querschnitt)

Die verschiedenen Zellagen der Oberhaut rücken als Ausdruck einer fortwährenden Erneuerung in ständigem Werden und Vergehen von unten nach oben auf und werden an der Hautoberfläche als Hornplättchen ständig abgestoßen. Dies geschieht gewöhnlich unsichtbar, bei pathologischen Veränderungen tritt es als Schuppung hervor.

Zur Oberhaut gibt es keine Blutzufuhr. Nährstoffe werden durch Diffusion aus der Lederhaut zugeführt. Umgekehrt wurde ebenfalls festgestellt, daß z.B. auch das Eindringen von radioaktiven Substanzen durch die Haut in den Körper durch Diffusion bestimmt wird, wobei die Diffusionsgeschwindigkeit dem Konzentrationsgefälle proportional ist. Der sogenannte Diffusionskoeffizient hängt von der diffundierenden Substanz, der betrachteten Gewebsschicht und dem Zustand, in dem sich diese Schicht befindet, ab. In eine Haut, die genügend feucht ist, können lösliche Substanzen viel schneller eindringen als in trockene Haut. Die Geschwindigkeit kann um eine Größenordnung differieren. Dies ist auch der Grund, weswegen als Kontaminationsprophylaxe neben dem Tragen der allgemein üblichen Gummihandschuhe beim Umgang mit offenen radioaktiven Substanzen empfohlen wird, die

Hände mit Talkum einzureiben und/oder zusätzlich dünne Stoffhandschuhe unter den Gummiarbeitshandschuhen zu tragen. Diese Maßnahmen zielen darauf hin, die Entstehung einer Feuchtigkeitsschicht auf der Haut infolge Transpiration möglichst zu verhindern.

Eine radioaktive Verunreinigung der menschlichen Körperoberfläche kann durch Staub, Gase, wässrige oder organische Lösungen erfolgen. Die percutane Resorption von Radionukliden kann bei staubförmiger Kontamination praktisch ausgeschlossen werden, weitgehend das gleiche gilt für wässrige Lösungen, deren mangelnde Aufnahmefähigkeit zum Teil auf dem Fettüberzug der Hornzellschicht beruht. Sind jedoch in wässrigen Lösungen lipoidlösliche Substanzen enthalten, so kann eine langsame Resorption erfolgen, dies gilt ebenfalls für in organischen Lösungsmitteln gelöste Radionuklide. Sehr rasch dagegen können gasförmige Verbindungen von der Haut resorbiert werden.

Man ist heute allgemein der Ansicht, daß die Diffusion durch die Hornzell- und die Glanzschicht relativ schnell verläuft, andererseits aber die Körnerschicht auf Grund ihrer histologischen Struktur einen sehr niedrigen Diffusionskoeffizienten hat und somit eine natürliche Barriere bildet gegen das Eindringen von Substanzen in tiefere Hautschichten.

Lösliche radioaktive Substanzen können sich allmählich in der Körnerschicht ansammeln und von hier aus gegebenenfalls weiter diffundieren. Die Diffusion erfolgt teilweise in den Körper und – wenn die Zufuhr von der Hautoberfläche genügend abgenommen hat – auch wieder nach außen. Auf letzteren Vorgang soll später bei den Dekontaminationsmaßnahmen nochmals zurückgekommen werden. Eine Substanz, die einmal durch die Körnerschicht hindurchdiffundiert ist, verschwindet rasch im Körper, es sei denn, daß sie infolge ihrer chemischen Zusammensetzung gebunden wird.

Die Permeabilität der Haut nimmt außerdem erheblich zu, wenn gleichzeitig mit der Kontamination eine chemische oder thermische Beanspruchung erfolgt. Im allgemeinen kann man jedoch sagen, daß bei den am häufigsten verwendeten radioaktiven Substanzen die Resorption durch die intakte Haut zwar gering, aber nicht vernachlässigbar ist, zumindest nicht, wenn es sich um hochradiotoxische Stoffe handelt.

#### *4.3. Maximal zulässige Hautdosis und maximal zulässige Hautkontamination*

Die biologische Wirkung der radioaktiven Strahlung im menschlichen Gewebe, und damit auch in der Haut, ist abhängig von der Art der Strahlung und deren Energie. Die Eindringtiefe z.B. von  $\alpha$ -Strahlen ist klein (maximal etwa 0,04–0,06 mm), so daß die  $\alpha$ -Teilchen die strahlenempfindliche Keimschicht nicht erreichen, falls keine Diffusion stattfindet. Kommt es dagegen zu einer Anreicherung in der Körnerschicht, so wird die Keimschicht einer bestimmten Dosisleistung ausgesetzt. Unter der Annahme, daß 10 % einer Alpha-Oberflächenkontamination von  $1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  in die Haut eindringen und sich alle eingedrungene Aktivität in der Körnerschicht angesammelt hat, errechnet man eine Dosisleistung für die Keimschicht von 1000 rem/h. Für Beta-Strahler ist die Dosisberechnung komplizierter, weil Strahlung verschiedener Energien emittiert wird und die maximale Reichweite in vielen Fällen sehr viel größer ist als bei  $\alpha$ -Strahlern (bis zu 1–2 cm). Behält man das für



$\alpha$ -Strahler verwendete Modell einer Oberflächenkontamination von  $1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  und einer angenommenen 10 %igen Durchdringung der Haut auch für  $\beta$ -Strahler bei, so errechnet sich die Dosisleistung der Keimschicht stark vereinfacht mit etwa 10 rem/h.

Da Gamma-Strahler bekanntlich fast immer auch Beta-Strahler sind, zeigte sich anhand von Berechnungen mit verschiedenen Radionukliden, daß, bei der angenommenen Oberflächenkontamination von  $1 \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ , für die Dosis in der Keimschicht die  $\gamma$ -Strahlung gegenüber der  $\beta$ -Strahlung vernachlässigt werden kann.

Bei den international akzeptierten maximal zulässigen Werten für eine Oberflächenkontamination der Haut wurde der Tatsache Rechnung getragen, daß die ganze Oberhaut in drei bis vier Wochen neu gebildet wird. Im weiteren ist als Ausgangspunkt eine Hautdiffusion von ungefähr 10 % der Kontamination angenommen worden. Die allgemein gültigen Werte für eine maximal zulässige  $\alpha$ -Kontamination betragen  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ , für  $\beta$ -Kontamination  $10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$ , solange es sich um örtlich begrenzte Kontaminationen handelt.

Aus praktischen Gründen sollen hier noch die Zahlen angegeben werden, die in der Strahlenschutzregelung für das Kernforschungszentrum Karlsruhe als maximal zulässige Werte für eine kontaminierte Hand (ca.  $150 \text{ cm}^2$ ) festgelegt wurden.

Für  $\alpha$ -Aktivität 666 Zerfälle/min. Hand bzw.  $3 \times 10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{Hand}$

Für  $\beta$ -Aktivität 66 600 Zerfälle/min. Hand bzw.  $3 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{Hand}$

( $2,22 \times 10^6$  Zerfälle/min. =  $1 \mu\text{Ci}$ ).

Diese Angaben pro Hand stellen Mittelwerte dar, wobei für die orientierende Erstmessung kein wesentlicher Unterschied besteht, ob die ganze Aktivität auf einem Punkt lokalisiert oder diffus über die ganze Fläche verteilt ist.

#### 4.4. Kontaminationsmessung und Dokumentation der Meßergebnisse

Grundsätzlich muß bei jeder Messung der Wirkungsgrad der Meßanordnung berücksichtigt werden, d.h., die von einer Meßanordnung registrierten Ereignisse pro Zeit (Impulse/min.) sind zum Teil erheblich niedriger als die tatsächlich von den kontaminierten Hautstellen ausgesandten Kernstrahlenteilchen bzw. Quanten pro Zeit.

Bei den handelsüblichen Großflächenproportionalzählern liegt der Wirkungsgrad für eine  $\alpha$ -Messung bei etwa 10–15 %, für die ( $\alpha + \beta$ )-Messung bei ca. 30–40 %. Die oben angegebenen maximal zulässigen Werte für die Hand betragen demnach für  $\alpha$ -Aktivität 60–90 Impulse/min. und für  $\beta$ -Aktivität 20 000–26 000 Impulse/min.

Generell muß jedoch festgehalten werden, daß diese maximal zulässigen Werte nicht nur unterschritten werden sollen, sondern daß jede meßbare Aktivität oberhalb der Nachweisgrenze eines empfindlichen Monitors eine Kontamination bedeutet, die möglichst vollständig zu beseitigen ist. Die Intensität der Dekontaminationsmaßnahmen hängt jedoch weitgehend von dem Ausmaß der Kontamination ab.

Bei der Dokumentation der Meßergebnisse hat die Erfahrung gezeigt, daß es – zumal bei nicht besonders geschultem Personal – notwendig ist, eine

interne einheitliche Nomenklatur festzulegen. Zu häufig entstehen sonst Mißverständnisse und Umrechnungsfehler bei gleichzeitiger Verwendung der Begriffe Zerfälle/min.,  $\mu\text{Ci}$  und Impulse/min. Es ist empfehlenswert, wenn man von den registrierten Impulsen/min. ausgeht. Diese können auch von angelerntem Personal festgestellt und aufnotiert werden. Hierbei muß insbesondere der unterschiedliche Wirkungsgrad verschiedener Meßgeräte und die daraus resultierenden verschiedenen Grenzwertempfindlichkeiten in Impulsen/min. beachtet werden, wozu eine entsprechende Kalibrierung notwendig ist. Anhand eines Vordrucks (Muster siehe Abb.) soll bei jeder erforderlichen Dekontamination zunächst Name, Vorname, Geburtsdatum, Abteilung, Datum, Uhrzeit und Kontaminationshergang kurz festgehalten werden, das gleiche gilt für den jeweiligen Nulleffekt der Meßanordnung und, falls bekannt, das Radionuklid bzw. die Strahlenart. Anschließend können dann die verschiedenen Kontaminationsmessungen an den einzelnen Körperstellen (z.B. rechte Hand innen, außen usw.), die Häufigkeit der Waschungen, die angewandten speziellen Dekontaminationsverfahren sowie das Ergebnis der laufenden Nachmessungen eingetragen werden. Bei bestehendem Inkorporationsverdacht evtl. durchgeführte Nasen- bzw. Rachenabstriche und deren Meßergebnisse sowie die gegebenenfalls zu veranlassende Body-Counter-Untersuchung bzw. Ausscheidungsanalysen werden gleichfalls auf dem Vordruck vermerkt. Auf diese Weise hat man jederzeit einen Überblick über den Dekontaminierungseffekt und gleichzeitig eine Dokumentation über den gesamten Dekontaminationsvorgang.

Zweifellos bedeutet diese Art der Dokumentation einen zusätzlichen Arbeitsaufwand, der bei Bagatellkontaminationen häufig überflüssig ist. Han-

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE / MEDIZINISCHE ABTEILUNG				DEKONTAMINATIONS-PROTOKOLL				
Name:	Datum:	Zeit:	Kontaminationshergang:					
geb.:	Institut/Abt.:	Inkorporation: ja / nein						
Meßgerät:		Strahlenart:						
Wirkungsgrad, $\alpha/\beta$ :	$\alpha$ :	Nuklid:	Bisherige Deko-Versuche:					
Nulleffekt, $\alpha/\beta$ :	$\alpha$ :	flüssig, staub-, gasförmig						
Messungen: Imp./min.	$\alpha/\beta$	$\alpha$	$\alpha/\beta$	$\alpha$	$\alpha/\beta$	$\alpha$	$\alpha/\beta$	$\alpha$
Kopfhaare	vorne / hinten / rechte / links							
Gesichtshäufte, re/li								
Hand, re/li								
Necken								
Innenhand, re								
Außenhand, re								
Innenhand, li								
Außenhand, li								
Unterarm, re/li								
Oberarm, re/li								
Schulter, re/li								
Brustkorb/Bauch/Rücken etc., re/li								
Oberschenkel, re/li								
Unterschenkel re/li								
Fuß, re/li								
Angewandte Dekontaminations-Mittel:								
Nasenabstrich/Papiertaschentuch:			Body-Counter - Untersuchung erforderlich: ja/nein			Unterschrift:		
Rachenabstrich:			Ausscheidungsanalyse erforderlich: ja/nein					

(Muster eines Dekontaminations-Protokolls)

delt es sich aber um stärkere bzw. ausgedehntere Kontaminationen, so ist ein solches Protokoll sowohl für den Strahlenschutzverantwortlichen als auch für den Strahlenschutzarzt die einzige Möglichkeit, zu einem späteren Zeitpunkt präzise über den Kontaminationsgrad und die angewandten Dekontaminationsverfahren eine Aussage machen oder auch, falls erforderlich, eine Hautdosisberechnung durchführen zu können.

#### *4.5. Dekontaminationseinrichtungen*

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, daß am häufigsten die unbedeckten Körperteile, d.h. Hände, Kopfhare und Gesicht kontaminiert werden. Eine ausgedehnte, großflächige Hautkontamination oder eine Ganzkörperkontamination sind dagegen relativ selten. Für diese am meisten vorkommenden lokalen Kontaminationen ist aber eine Duscheinrichtung denkbar ungeeignet, weil zwangsläufig damit zu rechnen ist, daß lokalisierte Aktivität z.B. von den Kopfharen oder dem Gesicht, wenn auch mehr oder minder stark verdünnt, auf den ganzen Körper verteilt wird und andererseits eine eingehende gründliche und gezielte Dekontamination lokaler radioaktiver Verunreinigungen z.B. der Hände unter einer Dusche nur sehr schwer möglich sein dürfte und nicht gerade sinnvoll erscheint.

Deswegen sind für diese überwiegend auftretenden lokalen Kontaminationen an Händen, Kopfharen und Gesicht Handwaschbecken, jedoch breiter und vor allem tiefer als die üblicherweise verwendeten – etwa ähnlich den sogenannten Laborbecken – wesentlich geeigneter. Muß auf Grund der betrieblichen Erfordernisse eine ganze Reihe von Handwaschbecken installiert werden, so empfiehlt es sich, immer nur zwei Handwaschbecken direkt nebeneinander anzubringen und dann einen freien Raum von etwa 50–60 cm zu lassen, um im Bedarfsfall einer Hilfsperson die Möglichkeit zu geben, jeweils seitlich dem Kontaminierten zusätzliche Reinigungsmittel zu reichen oder ihn, falls erforderlich, bei der Dekontamination unterstützen zu können. Dies bezieht sich insbesondere auch auf das eventuelle Waschen der Haare, das grundsätzlich nach rückwärts erfolgen soll, um eine sekundäre Kontamination des Gesichtes zu vermeiden. Der Kontaminierte kann hierbei auf einem niederen Schemel mit dem Rücken zum Waschbecken sitzen und seinen Nacken auf den Waschbeckenrand legen und sich von einer Hilfsperson die Kopfhare waschen lassen. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, daß zumindest an den hierfür vorgesehenen Handwaschbecken die Armaturen seitlich beweglich sind und zusätzlich eine bewegliche Schlauchbrause montiert wird. Besser sind noch spezielle Haarwaschvorrichtungen für das Rückwärtswaschen der Haare, wie sie über den entsprechenden Fachhandel zu beziehen sind.

Da man heute allgemein lauwarm, d.h. ca. 30–32° C als geeignetste und hautschonendste Wassertemperatur für die Dekontamination ansieht, ist es ratsam, bei Neuinstallationen zentrale Mischbatterien vorzusehen, um unnötige Kontaminationen einzelner Armaturen durch Selbstbedienung Kontaminierter zu vermeiden. Das gleiche gilt auch für die Duscheinrichtung. Ein Verhältnis von 4–6 Handwaschbecken zu je 1 Dusche dürfte zumindest in kerntechnischen Betrieben den Gegebenheiten am ehesten gerecht werden. Auch bei den Duscheinrichtungen sollen folgende Hinweise beachtet wer-

den. Oben an der Dusche ist ein möglichst großer und flacher Brauseteller, der einen weitgehend senkrechten Wasserstrahl ermöglicht, vorzusehen. Zusätzlich soll seitlich eine Handbrause mit einem etwa 1 m langen Schlauch vorhanden sein, die es ermöglicht, lokale stärkere Kontaminationen am Körperstamm oder den Beinen gezielt anzugehen. Außerdem empfiehlt sich für die sogenannte Duschwanne am Fußboden ein etwa 6–10 cm hoher siebartig perforierter Kunststoffrost, um bei dem meist unvermeidlichen Rückstau des abfließenden Wassers zu verhindern, daß die Füße in dem kontaminierten Spülwasser verbleiben.

Am besten hat sich eine Duscheinrichtung bewährt, die, neben dem schon erwähnten flachen Brauseteller und dem Kunststoffrost, an den beiden Seitenwänden je drei bis vier bewegliche Brauseköpfe bei etwa 40–50 cm Bodenhöhe beginnend übereinander mit ebenfalls demselben Abstand aufweist. Die sogenannte Einweg-Durchgangsdusche, bei der der Kontaminierte seine Kleidung ablegt, duscht und zur anderen Seite sozusagen sauber herausgeht, ist leider eine Wunschvorstellung, die den tatsächlichen Gegebenheiten keinesfalls entspricht. Jeder Großflächig- bzw. Ganzkörper-Kontaminierte muß nach dem ersten gründlichen Duschvorgang den Dekontaminationseffekt an einem Meßgerät kontrollieren und gegebenenfalls das Duschen und die Kontrollmessung mehrmals wiederholen, bis eine befriedigende Dekontamination erreicht ist.

Zu beachten ist außerdem, daß die erforderlichen Kontrollmessungen im Hinblick auf die feuchtigkeitsempfindlichen Folien der Meßgeräte nur nach gründlichem Abtrocknen der Haut durchgeführt werden dürfen. Hierfür gibt es relativ reißfeste, feuchtigkeitsaufsaugende Handtücher aus textilem Vliesstoff, die nach Gebrauch in entsprechend gekennzeichnete Abfallbehälter abzulegen sind. Zum Trocknen der Haare eignet sich am besten ein Warmluftfön.

Es hat sich gezeigt, daß abgesehen von Bagatell-Kontaminationen der Dekontaminationsvorgang – d.h. gründliches Waschen, Abtrocknen, Kontrollmessung – mehrmals wiederholt werden muß und öfters Dekontaminationszeiten von einer halben bis zu zwei Stunden und mehr pro Person erforderlich werden können. Dies bedeutet jedoch gleichzeitig, daß genügend Meßgeräte in dem Dekontaminationsraum vorhanden sein müssen, da unnötige Wege und möglichst auch das Zusammentreffen mit nichtkontaminiertem Betriebspersonal vermieden werden sollen. Es bedarf wohl nur am Rande des Hinweises, daß in der Dekontaminationseinrichtung auch Behälter zum Ablegen kontaminierter Arbeitskleidung und Schuhe vorhanden sein müssen und gleichfalls eine Art Ersatzkleidung (Arbeitskittel, Unterwäsche, Schuhe u.ä.), die von den Betroffenen bis zu ihrer eigentlichen Umkleide getragen werden können.

Nicht vergessen werden sollte, in größeren Dekontaminationsräumen eine Toilette einzuplanen. Ein zeitweiliger Aufenthalt in Räumen mit fließendem Wasser erhöht zwangsläufig das Bedürfnis zur Benutzung einer Toilette und es gibt keinen ersichtlichen Grund, dies, falls erforderlich, auch bei Kontaminierten nach einer ersten sorgfältigen Dekontamination nicht zu gestatten. Eine behördlicherseits gelegentlich hierfür geforderte getrennte Fäkalienleitung wegen der eventuell Radioaktivität enthaltenden Fäkalien entspricht keinesfalls den Gegebenheiten, da selbst bei stärksten Inkorpora-

tionen in den Faeces in den ersten 6–8 Stunden keine radioaktive Ausscheidung erfolgt und wenn evtl. im Urin, dann so stark verdünnt, daß sich spezielle Maßnahmen erübrigen.

Ärztlicherseits ist schließlich darauf zu bestehen, daß im Bereich jeder größeren Dekontaminationseinrichtung ein Erste-Hilfe- bzw. Sanitätsraum vorhanden ist, wo sowohl für konventionelle als auch kontaminierte Verletzte und andere Strahlenschwefenfälle die ersten Hilfeleistungen und die Vorbereitungen für den gegebenenfalls erforderlichen schonenden Weitertransport eingeleitet und durchgeführt werden können.

#### *4.6. Allgemeine und spezielle Dekontaminationsmaßnahmen*

Läßt sich an den Ganzkörper- oder den Hand-Fuß-Kontaminationsmonitoren eine radioaktive Verunreinigung feststellen, so ist es zunächst wichtig, deren Ausdehnung und Intensität abzuschätzen. Liegt eine Kontamination der Hände vor, muß neben diesen auch den übrigen unbedeckten Körperstellen, d.h. insbesondere den Kopfharen und dem Gesicht, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Ist die Arbeitskleidung nicht kontaminiert, so kann angenommen werden, daß sich auch keine Aktivität auf der von der Kleidung bedeckten Körperoberfläche befindet. Bei kontaminierter Bekleidung muß vermieden werden, daß beim Ausziehen dieser Kleidungsstücke lokalisierte Aktivität auf weitere Bezirke oder die Haut verteilt wird. Nach Ablegen der Oberkleidung ist die Unterwäsche auf Kontamination auszumessen und gegebenenfalls ebenfalls zu entfernen. Besonders ist darauf zu achten, daß durch all diese Vorgänge die auf Kleidung oder/und Haut befindliche Aktivität nicht zusätzlich in Mund oder Nase gelangt und inkorporiert wird. Wenn die Gegebenheiten des Arbeitsplatzes es möglich erscheinen lassen, daß, insbesondere bei staub- oder gasförmigen Verbindungen, gleichzeitig eine Inkorporation eingetreten ist, so soll möglichst rasch vom Arzt oder geschultem Sanitätspersonal Nasen- und Rachenabstriche mit Stieltupfern vorgenommen werden, die dann wie Wischtestes auszumessen sind. Sind Arzt- oder Sanitätspersonal nicht anwesend, soll das Strahlenschutzpersonal die Inkorporationsverdächtigen in Papiertaschentücher schnutzen lassen und diese ausmessen. Alle diese Proben, ob Nasen- oder Rachenabstriche oder Papiertaschentücher, sind in Reagenzgläsern, Bechern oder Plastiktüten aufzubewahren, die mit Namen, Datum und Uhrzeit zu versehen sind. Wird auf Grund der Ausmessung dieser Proben ein Inkorporationsverdacht bestätigt, müssen gegebenenfalls nach erfolgter Dekontamination Body-Counter-Untersuchungen oder Ausscheidungsanalysen zur Abschätzung einer Inkorporation veranlaßt werden.

Die Wirksamkeit jeder Dekontaminationsbehandlung hängt wesentlich von der Schnelligkeit, aber auch von der Sorgfalt ab, mit der man vorgeht. Das Strahlenschutzpersonal muß deshalb speziell ausgebildet werden und auch jeder im Kontrollbereich Beschäftigte sollte wissen, was er im Falle einer Kontamination zu tun hat bzw. nicht tun darf. Nur durch ständige Aufklärung und Schulung können kopflose Handlungen vermieden werden.

Die beste Maßnahme für eine Entaktivierung der Hautoberfläche ist noch immer das gründliche Waschen unter fließendem, lauwarmem Wasser mit einer milden Seife und einer weichen Bürste. Die gesamte kontaminierte

Hautoberfläche soll mit dichtem Schaum bedeckt und danach ausgiebig mit Wasser abgespült werden. Dieses Waschen ist mehrmals mehrere Minuten lang zu wiederholen. Bürsten nur mit leichtem Druck, jegliche Schürfung der Haut ist zu vermeiden. Bei kontaminierten Händen z.B. ist auf besonders sorgfältige Säuberung von Hautfalten, Nagelfalz und Fingernägeln zu achten. Die Fingernägel müssen evtl. kurzgeschnitten werden.

Nachdem dieser ausgedehnte Waschvorgang mehrmals durchgeführt wurde, ist nach gründlichem Abtrocknen – am besten mit relativ reißfestem, textilem Vliesstofftuch – eine Kontrolle am Meßgerät erforderlich. Meistens läßt sich nach dem ersten gründlichen Waschen der größte Dekontaminationseffekt feststellen. Die weitere Dekontamination bis zum Erreichen des Nulleffektes oder zumindest vertretbarer Restkontaminationen kann aber sehr langwierig verlaufen. Immer wieder muß das Waschen unter fließendem lauwarmem Wasser mit Seife und Bürste geduldig wiederholt werden, auch wenn die Monitorkontrolle keinen weiteren Dekontaminationseffekt zeigt. Anstelle von Seife können bei unbefriedigenden Ergebnissen auch die im Handel erhältlichen Feinwasch- und Netzmittel benutzt werden. Ferner gibt es verschiedene Handelspräparate, die bei der Beseitigung stärkerer konventioneller Hautverschmutzungen Verwendung finden, die durchaus auch bei Kontaminationen eingesetzt werden können und meist auf dem Abriebprinzip beruhen. Zusätzlich hat sich auch die Anwendung von 3%iger Zitronensäure bewährt. Das gleiche gilt auch für die Decontacoll-Paste, während es bei der Anwendung des sogenannten Decontacoll-Steines bei empfindlicher Haut und zu starkem Reiben häufig zu Hautverletzungen kommen kann.

Bei stärkeren Hautkontaminationen haben sich einige weitere zusätzliche Maßnahmen gut bewährt. Sie sollen jedoch, da sie alle die Haut mehr oder minder intensiv angreifen, möglichst nur unter ärztlicher Aufsicht angewandt werden. So wurde u.a. festgestellt, daß sich die Wirkung einer Kombination eines Netzmittels mit einem Komplexbildner und einem Reagenz zur Einstellung des pH-Wertes ausgesprochen additiv verhält. Diese sogenannte Komplexierungslösung setzt sich wie folgt zusammen: 5 g Titriplex III (Äthylendinitrilotetraessigsäure Dinatriumsalz=EDTA), 5 g Natriumlaurylsulfat, 5 g Stärke, 35 g Natriumkarbonat (wasserfrei), in 1000 ml Wasser gelöst. Diese Lösung hält sich in Plastikflaschen monatelang und muß nur vor Gebrauch geschüttelt werden. Mit dieser Komplexierungslösung werden die Hände gründlich gewaschen und gebürstet und anschließend unter fließendem, lauwarmem Wasser abgespült. Dieser Vorgang wird 2 bis 3 mal wiederholt, dann die Hände getrocknet und der Dekontaminationseffekt am Monitor kontrolliert.

Es hat sich als praktisch erwiesen, diese und die noch anschließend erwähnten Lösungen aus Plastikspritzflaschen auf die kontaminierte Haut zu geben. Eine weitere bewährte Möglichkeit ist die Verwendung von 4-%igem Kaliumpermanganat. – Mit gutem Erfolg läßt sich z.B. auch eine zu gleichen Teilen gesättigte Lösung von Kaliumpermanganat mit einer 1-%igen Schwefelsäurelösung verwenden. Da sich Kaliumpermanganat mit 1-%iger Schwefelsäure bei längerem Stehen nicht hält und Braunstein abgesetzt wird, kann die Kaliumpermanganatlösung aus 65 g Kaliumpermanganat und 1 Liter 1-%iger Schwefelsäurelösung für den Gebrauch kurzfristig angesetzt werden. Diese

schwach sauer reagierende Mischung ist über die angefeuchtete Haut, z.B. die Hände, zu schütten, wobei auch die Nägel und die Nagelhäute gründlich zu bedecken sind. Die ganze Handoberfläche, auch zwischen den Fingern, wird mit einer Handbürste leicht abgerieben. Nach etwa 2 Minuten werden die Hände unter fließendem Wasser abgespült. Auch dieser Vorgang kann 2 bis 3 mal wiederholt werden. — Die dabei zurückbleibende dunkelbraune Hautfärbung wird anschließend mit einer ebenfalls frisch zubereiteten 5-%igen Natriumbisulfidlösung behandelt und kann innerhalb 2 Minuten nach mehrmaligem leichten Reiben und Bürsten durch Abspülen wieder beseitigt werden. Es hat sich dabei als vorteilhaft erwiesen, je 18–20 g Natriumpyrosulfit in Plastikpäckchen eingeschweißt auf Vorrat zu haben, um es bei Bedarf nur in 400 ml Wasser zu lösen und die frische 5-%ige Natriumbisulfidlösung zu erhalten.

Zur Beseitigung hartnäckiger Kontaminationen kann auch 5-%ige Natronbleichlauge eingesetzt werden. Dieses Natriumhypochlorit ist im Handel erhältlich und muß auf eine Konzentration von 5 % verdünnt werden. Die Haut wird zwar intensiv angegriffen und es kommt bei zu langer Verweildauer auf der Haut zu einem leichten Brennen, jedoch ist der Dekontaminationseffekt häufig sehr günstig.

Alle diese Dekontaminationslösungen sind am besten in der angegebenen Reihenfolge zu verwenden, d.h. wenn eine Lösung keinen befriedigenden Dekontaminationseffekt aufweist, ist auf die nächstfolgende überzugehen. Nötigenfalls müssen diese Dekontaminationsmittel in der beschriebenen Reihenfolge mehrmals hintereinander angewendet werden, so lange die Haut dadurch nicht zu stark beansprucht wird. Die meisten dieser Dekontaminationslösungen, mit Ausnahme der Komplexbildungslösung und der Zitronensäure, haben keinen spezifischen Effekt, sondern sie wirken wie die vorher verwendeten mechanischen Mittel rein abrasiv. Wie schon eingangs erwähnt können lösliche radioaktive Substanzen bis in die Körnerschicht (Stratum granulosum) der Epidermis gelangen, wo sie zunächst wie von einem Schwamm aufgesaugt werden. Manchmal tritt deshalb der entscheidende endgültige Dekontaminationseffekt erst auf, wenn diese Schicht erreicht ist. Dies bedeutet aber gleichzeitig die Grenze der Belastbarkeit der Haut, wenn man vermeiden will, daß auch die Keimschicht, die für die Regeneration der Epidermis verantwortlich ist, und die darunterliegenden gefäßführenden Schichten der Lederhaut betroffen werden. Dies würde eine rasche Inkorporation in das Unterhautfettgewebe und von da in den ganzen Körper bedeuten.

Ist der Dekontaminationseffekt trotz aller Maßnahmen noch unbefriedigend oder läßt der Zustand der Haut keine weitere Beanspruchung zu, so muß die Dekontamination abgebrochen und nach Stunden oder am nächsten Tag fortgesetzt werden. Dies ist durchaus vertretbar, da eine Weiterverbreitung der Kontamination nach all den bisherigen Dekontaminationsmaßnahmen äußerst unwahrscheinlich ist. Außerdem kommt der Umstand hinzu, daß bis in die Körnerschicht der Oberhaut eingedrungene Aktivität auch zu einem Teil wieder nach außen diffundieren kann. Jedenfalls ist es oft überraschend, daß nach Stunden oder am nächsten Tag mit der Wiederholung schon der einen oder anderen Dekontaminationsmaßnahme häufig ein Effekt erzielt werden kann, welcher vorher einfach nicht mehr zu erreichen war.

Zur Dekontamination von Gesicht und Haaren soll versucht werden, neben Wasser und Seife bzw. Shampoo mit 3 %iger Zitronensäure und gegebenenfalls der Komplexierungslösung auszukommen. Kaliumpermanganatlösung bzw. Natronbleichlauge sollen keinesfalls benutzt werden. Bei besonders empfindlichen Hautpartien können die erstgenannten Lösungen nach entsprechender Abdeckung der Umgebung mit einer leicht absorbierenden Watte aufgetragen werden. – Bei Kontamination der Mundschleimhäute und Zähne ist der Mund mit Zahnbürste, Zahnpasta und evtl. 3 %iger Zitronensäure gründlich zu reinigen. – Bei Rachenkontamination kann evtl. mit 3,6 %igem Wasserstoffsuperoxid gegurgelt werden. Spül- und Gurgelflüssigkeit muß selbstverständlich ausgespuckt werden. – Bei Nasenkontamination empfiehlt sich eine Nasendusche mit Wasser oder physiologischer Kochsalzlösung; der Gehörgang kann mit einer Ohrenspritze gespült werden. – Bei Augenkontaminationen sind die Augenlider mittels Daumen und Zeigefinger breit zu spreizen und das Auge unter fließendem Wasser gründlich zu spülen; dies immer vom inneren Augenwinkel (Nasenseite) zum äußeren, um eine Kontamination der Tränenkanäle zu vermeiden.

Zur Beseitigung kleiner umschriebener Hautkontaminationen kann gegebenenfalls die Anwendung von Heftpflaster bzw. Tesafilm und ähnlichem empfohlen werden. Nach sorgfältigem Abrasieren evtl. vorhandener Haare werden diese Klebestreifen auf die kontaminierte Hautstelle angedrückt und dann wieder abgezogen. Dies kann erforderlichenfalls mehrmals wiederholt werden. (Vorsicht vor zu intensiver Hautschädigung).

All diese angeführten Dekontaminationsmaßnahmen beziehen sich selbstverständlich auf die intakte gesunde Haut. Nach Abschluß der Dekontamination soll die Haut mit einer hautschonenden Creme (Eucerin, Lanolin o.ä.) behandelt werden. Bei anhaltender stärkerer Kontamination kann man zwischenzeitlich evtl. Stoffhandschuhe anziehen lassen oder mit einer Mullbinde einen Verband anlegen.

#### *4.7. Haut-Dekontaminations-Schema*

Grundsätzlich ist jede meßbare Aktivität, d.h. eine Impulszahl, die über dem Nulleffekt eines empfindlichen Monitors liegt, als Kontamination anzusehen, die beseitigt werden soll. Die Intensität der Dekontaminationsmaßnahmen hängt weitgehend von dem Ausmaß der Kontamination ab.

Nachstehendes Dekontaminations-Schema enthält sowohl allgemeine als auch spezielle Dekontaminationsmaßnahmen und soll in dieser Form nur unter ärztlicher Kontrolle bzw. unter Aufsicht speziell ausgebildeten Strahlenschutz- bzw. Sanitätspersonals zur Anwendung kommen.

##### *4.7.1. Lokalisierte Kontamination*

Nachstehend aufgeführte Maßnahmen (4.7.1.1.–4.7.1.3.3.) sind bis zur erfolgreichen Dekontamination in der genannten Reihenfolge durchzuführen und gegebenenfalls zu wiederholen.

4.7.1.1. Betreffenden Körperteil (z.B. Hände) mit milder Seife und weicher Kunststoffbürste unter lauwarmem, fließendem Wasser 2 bis 3 Minuten sorgfältig waschen und bürsten. Gesamte kontaminierte Hautoberfläche mit



dichtem Schaum bedecken und danach ausgiebig mit Wasser abspülen. Waschvorgang mindestens 3 bis 4 mal wiederholen, abtrocknen, Kontrollmessung.

4.7.1.2. Abriebpaste auf kontaminierte Hautstellen bringen und unter Waschbewegungen gründlich auf der Haut verreiben. Nach etwa 2 Minuten Waschmittelreste unter Verwendung einer weichen Kunststoffbürste und lauwarmem fließendem Wasser von der Haut entfernen. Waschvorgang mindestens 3 bis 4 mal wiederholen, abtrocknen, Kontrollmessung.

4.7.1.3. Wie bei 4.7.1.2. beschrieben, folgende Dekontaminationslösungen einsetzen: (Zusammensetzung siehe 4.7.4.1. bis 4.7.4.4.)

4.7.1.3.1. Kaliumpermanganatlösung (4.7.4.1.) über angefeuchtete Hautstellen gießen und kontaminierte Oberfläche mit weicher Kunststoffbürste etwa 2 Minuten kräftig bürsten, mit lauwarmem Wasser abspülen. Braune Hautverfärbung mit Natriumbisulfidlösung (4.7.4.2.) abwaschen und bürsten. Erneutes Waschen mit Seife und lauwarmem Wasser, abtrocknen, Kontrollmessung.

Gegebenenfalls gesamten Waschvorgang maximal 2 bis 3 mal wiederholen.

4.7.1.3.2. Komplexierungslösung (4.7.4.3.)

Lösung wie unter 4.7.1.2. beschrieben anwenden.

4.7.1.3.3. Natronbleichlauge (4.7.4.4.)

Lösung über kontaminierte Haut gießen, kräftig mit der Hand reiben bzw. bürsten. Nach 1 Minute gründlich abwaschen, abtrocknen, Kontrollmessung. Vorgang soll nicht mehr als 1 bis 2 mal wiederholt werden.

4.7.1.4. Kleine umschriebene Hautkontaminationen mit Heftpflaster oder Tesafilm kleben und Pflaster wieder abreißen. Dieser Vorgang kann maximal 5 bis 6 mal wiederholt werden. (Vorsicht!). Behaarte Hautpartien vorher behutsam rasieren.

4.7.1.5. Kontamination der Haare

Haare mit nach hinten geneigtem Kopf mit Shampoo von Hilfsperson waschen lassen. Anschließend mit 3 %iger Zitronensäure waschen, nochmals mit Shampoo waschen und abspülen, mit Heißluft trocknen, Kontrollmessung.

Falls noch erforderlich, ist eine Haarwäsche mit Komplexierungslösung (siehe 4.7.4.3.) durchzuführen.

Bei sehr starker und hartnäckiger Kontamination müssen die Haare evtl. abrasiert werden.

4.7.1.6. Bei Augenkontaminationen mit gespreizten Augenlidern das Auge unter fließendem Wasser immer vom inneren Augenwinkel (Nasenseite) zum äußeren gründlich spülen.

4.7.1.7. Im Bedarfsfalle können Schleimhäute, Rachen und Nase mit Wasser und 3 %iger Zitronensäure gespült werden. Mundschleimhäute und Zähne gegebenenfalls mit Zahnbürste und Zahnpasta gründlich säubern. Zum Gurgeln kann 3,6 %iges Wasserstoffsuperoxid verwendet werden. Die äußeren Gehörgänge können mit Hilfe einer Ohrenspritze gespült werden.

4.7.1.8. Nach Dekontamination sind behandelte Hautpartien mit Lanolin-Creme, Eucerin o.ä. einzureiben.

4.7.1.9. Müssen bei zu stark angegriffener Haut die Dekontaminationsmaßnahmen ohne befriedigenden Effekt abgebrochen werden, ist gegebenenfalls eine weitere Dekontamination nach 12 bis 24 Stunden durchzuführen. Bei anhaltender stärkerer Kontamination evtl. Stoffhandschuhe überziehen oder Mullbinde anlegen.

#### 4.7.2. Diffuse Kontamination

Gesamte Kleidung entfernen, ohne weitere Verzögerung lauwarm duschen, gründlich waschen und bürsten mit milder Seife, anschließend abspülen. Vorgang mindestens 3 bis 4 mal wiederholen, abtrocknen, Kontrollmessung. Verbleibende stärkere lokale Kontamination evtl. wie unter 4.7.1.1. bis 4.7.1.3.2. beschrieben, behandeln.

#### 4.7.3. Maßnahmen bei Inkorporationsverdacht

Besteht neben der Hautkontamination auch Inkorporationsverdacht, soll vorsorglich in ein Papiertaschentuch geschneuzt und dieses auf Aktivität ausgemessen werden. Eventuelle weitere Maßnahmen wie Nasen-Rachen-Abstriche, Body-Counter-Messungen und Ausscheidungsanalysen werden vom Strahlenschutzarzt bzw. vom Strahlenschutz veranlaßt.

#### 4.7.4. Zusammensetzung der Dekontaminationslösungen

##### 4.7.4.1. Kaliumpermanganatlösung:

65 g Kaliumpermanganat in 1000 ml 1 %iger Schwefelsäure auflösen.

##### 4.7.4.2. Natriumbisulfidlösung:

18 g Natriumpyrosulfid in 400 ml Wasser lösen.

##### 4.7.4.3. Komplexierungslösung

in 1000 ml Wasser folgende Substanzen lösen:

5 g Titriplex III (Äthylendinitril-tetraessigsäure Dinatriumsalz)

5 g Natriumlaurylsulfat

5 g Stärke

35 g Natriumkarbonat (wasserfrei).

##### 4.7.4.4. Natronbleichlauge:

Lösung ist im Handel erhältlich und muß auf eine Konzentration von 5 % Natriumhypochlorit verdünnt werden.

#### Literaturhinweise:

- Dunster, H.J.:* Maximum Permissible Levels of Surface Contamination. Radioactive Contamination of Workers EUR 2210, 135 (1964)
- Möhrle, G.:* Ärztliche Überlegungen und Richtlinien für die Personendekontamination und Dekorporierung. *Atompraxis* 14, 69 (1968)
- Scheel, H.:* Dekontamination der Haut. *Kernenergie* 7, 197 (1964)

- Wijker, H.:* External Decontamination. Radioactive Contamination of Workers. EUR 2210, 791 (1964)
- Wijker, H.:* Skin Contamination, Accidental Irradiation at Place of Workers. EUR 3666, 571 (1967)
- Wray, E.T.:* Radiation and Skin. Proceedings of Symposium Winfrieth, 14. XI. 63. AHSB (RP) R 39



## 5. Maßnahmen bei kontaminierten Verletzungen

L. Ohlenschläger

### 5.1. Pathophysiologie der kontaminierten Wunde

Die mit radioaktiven Substanzen kontaminierte Wunde nimmt im Vergleich zur konventionellen Verletzung hinsichtlich der zu ergreifenden diagnostischen und therapeutischen Maßnahmen eine Sonderstellung ein. Dies ergibt sich aus der potentiellen Gefährdung des Gesamtorganismus infolge Aszension des Radionuklids über eröffnete Lymph- und Blutgefäße mit nachfolgender Organablagerung und möglicher innerer Strahlenüberexposition.

Der Weg des radioaktiven Materials bis hin zur Organablagerung ist dabei, verglichen mit einer Inkorporation per inhalation oder ingestion, wesentlich kürzer und der Zeitfaktor entsprechend kleiner.

Für die prognostische Einschätzung einer kontaminierten Wunde ist neben Art, Ausdehnung und Sitz der Verletzung auch die Kenntnis des Radionuklids, sowie sein chemischer Zustand von Bedeutung.

Darüberhinaus ist die Radiotoxizität eines Radionuklids, das heißt, die durch Strahlung verursachte Schädigung des Organismus, ein wichtiges Kriterium für die zu ergreifenden chirurgischen Maßnahmen.

Wir unterscheiden die mittel- und kurzlebigen Radioisotope, wie sie größtenteils in der Medizin, Biologie und Technik Verwendung finden von den langlebigen und hochradiotoxischen Transuranen, die vorwiegend in der kernbrennstoffverarbeitenden Industrie und im Rahmen der Wiederaufarbeitung bestrahlter Kernbrennstoffe eine Rolle spielen.

Außerdem finden die unter dem Begriff der „Knochensucher“ zusammengefaßten Radioisotope besondere Beachtung [1].

Es sind dies Radionuklide, die vorwiegend in der mineralischen oder kollagenen Knochensubstanz abgelagert werden [2]. Hierzu zählen in erster Linie die Erdalkalien  $^{47}\text{Ca}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{226}\text{Ra}$ , von den Seltenen Erden  $^{90}\text{Y}$ , die Transurane  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$ .  $^{32}\text{P}$  und  $^{14}\text{C}$  werden zwar in fast allen Geweben abgelagert, in konzentrierter Form dagegen im Knochenmineral. Das radioaktive Material kann in gelöster, festlöslicher oder festunlöslicher Form an oder in die Wunde gelangen.

In der gelösten und festlöslichen Form erfolgt relativ schnell nach der Wundkontamination eine Aszension über eröffnete Blutgefäße in den Blutkreislauf mit konsekutiver Organablagerung. Die Verweildauer des Isotops im Blut ist dabei verhältnismäßig kurz.

Man unterscheidet eine schnelle Phase der Ablagerung für gelöste und festlösliche Substanzen von einer langsamen Phase der Ablagerung bei unlöslichem Material.

Liegt eine Wundkontamination in gelöster Form vor, so muß davon ausgegangen werden, daß innerhalb von 15 bis 30 Minuten das Radionuklid in die Blutbahn aszendiert. Ein Teil des radioaktiven Materials wird dabei wieder direkt über die Nieren ausgeschieden [3].

Die weitaus größere Menge gelangt über zum Teil körpereigene Komplexierung an die Organe und zur Ablagerung. Bei den Transuranen  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Am}$  ist in erster Linie der Knochen betroffen, wo die Isotope in die Glyko- und Mucoproteine der endostalen und periostalen Trabekeloberfläche eingelagert werden.  $^{90}\text{Sr}$  dagegen wird vorwiegend in das Knochenmineral eingebaut, während  $^{131}\text{J}$  zu einer Anhäufung in der Schilddrüse führt.

Als kritisches Organ gilt jeweils das Organ, welches als Folge einer strahleninduzierten Schädigung eine erhebliche Beeinträchtigung des Gesamtorganismus bewirkt.

Nach einer Inkorporation erfolgt wiederum ein kontinuierlicher minimaler Rückfluß des radioaktiven Materials in den extrazellulären und intravasalen Raum mit nachfolgender Ausscheidung über die Nieren und den gastroenteralen Trakt.

Liegt eine Wundkontamination in festunlöslicher Form vor, dann setzt die langsame Phase des Transports ein. Das Radioisotop kann dabei über einen längeren Zeitraum (Tage, Wochen oder Monate) stationär im Wundgebiet verbleiben oder teilweise in die regionalen Lymphdrüsen eingelagert werden. Durch Phagozytose wird darüberhinaus ein Teil der Substanz in das retikuloendotheliale System abgelagert. Durch langsames in Lösung gehen erfolgt dann auch hier die Abgabe kleinerer Mengen in die Blutbahn mit konsekutiver Ablagerung in Organe und partieller Ausscheidung durch Nieren und gastroenteralen Trakt.

Wenngleich sich die tierexperimentellen Untersuchungen nur auf das Verhalten einzelner Radionuklide in Wunden beziehen und nicht unmittelbar auf den Menschen übertragen werden können, stellen sie doch eine wertvolle Hilfe für das Verständnis eines so komplexen Vorganges wie den einer Wundkontamination dar. Insbesondere haben es die Erkenntnisse über Art und Schnelligkeit der Ablagerung ermöglicht, die chirurgische Indikationsstellung zu differenzieren und die medikamentöse Therapie gezielter in Anwendung zu bringen.

### *5.2. Strahlenmeßtechnik einer kontaminierten Wunde*

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgversprechende Therapie einer kontaminierten Wunde ist die Feststellung von Höhe, Art und Ausdehnung der Wundaktivität. Hierzu bedarf es einer empfindlichen Meßapparatur, durch die der behandelnde Arzt in die Lage versetzt wird, selbst kleinste Aktivitäten statistisch hinreichend gesichert nachweisen zu können. Diese Forderung muß insbesondere bei Wundkontaminationen mit hochradioxischen Substanzen erhoben werden, wo bereits kleinste Aktivitäten von beispielsweise  $4 \text{ nCi } ^{239}\text{Pu}$  einen Grenzwert darstellen. Als Begründung für eine solche Empfehlung wird unter anderem die hohe lokale Strahlenbelastung angegeben [4,5].

Während Röntgen- und Gammastrahlen sowie harte Betastrahlung infolge ihrer größeren Reichweiten im Gewebe meßtechnisch mit genügender Sicherheit erfaßt werden können, gestaltet sich der Nachweis der Alphastrahlung an der kontaminierten Wunde erheblich schwieriger.

Die Reichweite der  $\alpha$ -Strahlung beträgt in Luft in Abhängigkeit von der Energie bis zu 7,5 cm.

In festen und flüssigen Medien dagegen verringert sie sich infolge Strahlenabsorption ganz erheblich.

Bei der kontaminierten Wunde wird die Messung der  $\alpha$ -Strahlung noch zusätzlich durch Strahlenabsorption infolge Blutung, Blutkoagula und Blut-schorf erschwert. Im ungünstigsten Falle kann bei einer kontaminierten Stichverletzung mit Verlagerung des Aktivitätsdepots in die Subcutis die  $\alpha$ -Strahlung an der Hautoberfläche gar nicht mehr gemessen werden.

Es empfiehlt sich deshalb bei tiefen mit  $\alpha$ -Strahlern kontaminierten Wunden, insbesondere bei Stichverletzungen, auch die Röntgen- und Gammastrahlung solcher Isotope auszumessen. Dieser Tatsache muß ein Wundmeßplatz Rechnung tragen.

Der radiochirurgische Meßplatz besteht in seiner Grundausrüstung aus drei Detektoren:

Einem mit Argon-Methan gespülten  $\alpha/\beta$ -Handzählrohr, einem  $\alpha$ -Halbleiterdetektor und einem Szintillationszähler, der aus einem 2 mm dicken Natriumjodidkristall mit Berylliumfenster besteht. Hinzu kommt noch ein tragbarer Vielkanalanalysator zur Identifizierung unbekannter Spaltproduktgemische in Wunden.

Jede im Kontrollbereich entstandene Wunde sollte so lange als kontaminiert angesehen werden, bis das Gegenteil durch Wundaussmessung erwiesen ist.

Die Ausmessung erfolgt an und nicht in der Wunde. Sie gliedert sich in drei eventuell fünf Standardmessungen, mit dem Ziele, die Höhe der Aktivität und eine möglichst genaue Lokalisation derselben vorzunehmen und wenn notwendig, die Identität unbekannter Radioisotope zu ermitteln:

5.2.1. Messung an der Wunde mit dem  $\alpha/\beta$ -Handzählrohr (ca. 150 cm<sup>2</sup>) unter Abschirmung der Wundumgebung mit ausgeschnittenen Plexiglasplatten.

5.2.2. Bei kleineren Stich-, Reiß- oder Schnittverletzungen unmittelbare Messung an der Wunde mit dem  $\alpha/\beta$ -Halbleiterdetektor (ca. 1 cm<sup>2</sup> Fläche).

5.2.3. Ausmessung der weiteren Wundumgebung zwecks Feststellung des Gesamtausmaßes der Kontamination.

5.2.4. Bei Wundkontaminationen mit Plutonium und Americium zusätzliche Wundaussmessung mit dem Szintillationszähler über die 17 keV bzw. 60 keV-Linie dieser Isotope.

5.2.5. Bei Wundkontaminationen mit unbekanntem Spaltproduktgemischen Aufnahme eines Energiespektrums mit dem Vielkanalanalysator zwecks Identifizierung der einzelnen Radioisotope, insbesondere im Hinblick auf Plutonium und Americium.

Das Ergebnis der unter 2.5. durchgeführten Messungen wird mit dem X/Y-Schreiber graphisch zur Darstellung gebracht (Abb.: 2, 3, 4). Die Messungen werden am sitzenden oder liegenden Verletzten bei angelegter wundnaher Stauung durchgeführt. Die Meßzeit beträgt 1 Minute, um den Gesamt-ablauf der Behandlung nicht so sehr in die Länge zu ziehen. Kontrollmessungen vor und nach jeder chirurgischen Intervention sind erforderlich, um den Erfolg oder Mißerfolg der eingeleiteten Maßnahmen zu überprüfen. Alle Meßdaten werden in ein Dekontaminationsprotokoll eingetragen, in dem auch neben den Personalien des Verletzten Unfallhergang, Ort und Zeit des

Unfalls sowie Lokalisation der Verletzung vermerkt werden. Außerdem sollte das Dekontaminationsprotokoll Auskunft geben über den Namen des Radionuklids, seine chemische Form (flüssig, fest, staubförmig) und über die Strahlungsart. Das Meßprotokoll ist eine wichtige Unterlage im Rahmen der Dokumentation einer kontaminierten Verletzung und muß immer wieder bei Nachfragen der Versicherungen und Berufsgenossenschaften herangezogen werden [6] (Abb.: 1).

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE - MEDIZINISCHE ABTEILUNG

Kontaminationshergang:

Deko-Protokoll bei kontaminierten Verletzungen

Name : Datum :  
 geb. : Zeit :  
 Institut : Nuklid :  
 Meßgerät-Wirkungsgrad: % Strahlungsart :  
 % staub, flüssig, gasförmig

Aktivitätsanalyse bei:  
 Gewebsexzidat: Blut: Urin: Stuhl:

R	L	messung	$R_{\alpha} \text{ d} =$	$R_{\alpha} \text{ a} =$	$R_{\beta} \text{ 17 KeV} =$	$R_{\beta} \text{ 60 keV} =$	Therapie
		1					
		2					
		3					
		4					
		5					
		6					
		7					
		8					

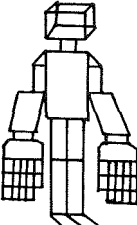


Abb. 1: Dekontaminationsprotokoll für Verletzte

Den Abschluß des meßtechnischen Vorganges bildet die Ausmessung des primären Wundverbandes, sowie der eventuellen Gewebsexzidate samt allen Instrumenten, die mit der kontaminierten Verletzung Kontakt hatten.

### 5.3. Ärztliche Maßnahmen

Ziel der ärztlichen Maßnahmen ist es, möglichst die gesamte Wundaktivität zu eliminieren. Um eine kontaminierte Verletzung erfolgreich und lege artis versorgen zu können, ist ein erheblicher apparativer und technischer Aufwand erforderlich. Dies wird um so deutlicher, wenn man bedenkt, daß selbst kleinste, kaum wägbare Mengen von beispielsweise  $^{239}\text{Pu}$  in der Haut von Tieren zur Ausbildung von Malignomen führen können.

Knochenbelastungen im Mikrocuriebereich führen im Tierversuch ebenfalls zur Ausbildung maligner osteotroper Tumoren [7].

Der maximal zulässige Wert für Wundkontaminationen mit Transuranen sollte 1/10 der maximal zulässigen Körperbelastung, bezogen auf das kritische Organ, nicht überschreiten.

An einem Beispiel erörtert heißt das: Die maximal zulässige Körperbelastung für  $^{239}\text{Pu}$  beträgt bezogen auf das kritische Organ Knochen 40 nCi.

Die maximal zulässige Wundkontamination würde in diesem Falle 1/10 dieser 40 nCi betragen.



Werden an einer Wunde 4 nCi  $^{239}\text{Pu}$  gemessen, so könnte die tatsächliche Wundaktivität im ungünstigsten Falle bei Verlagerung in etwa 1 cm Gewebstiefe 40 nCi betragen, da ein Strahlenabschwächungsfaktor durch Strahlenabsorption im Gewebe und Selbstabsorption von rund 10 in Anwendung gebracht werden muß [8,9].

Für die ärztlichen Maßnahmen bedeutet diese Überlegung, daß eine mit hochradiotoxischen Substanzen kontaminierte Verletzung durch geeignete Maßnahmen so schnell wie möglich dekontaminiert werden muß. Erst dann kann der Eingriff als erfolgreich bezeichnet werden. Die Werte für die maximal zulässigen Körperbelastungen sind in der ICRP (International Commission on Radiological Protection) Nr. 2 aus dem Jahre 1959 niedergelegt [10].

Um zu verhindern, daß gelöstes radioaktives Material durch Aszension in die Blutbahn gelangt, müssen die Erstmaßnahmen bereits am Unfallort beginnen.

### *5.3.1. Erste Hilfe am Unfallort*

Es empfiehlt sich, den mit offenen radioaktiven Stoffen umgehenden Personenkreis in erweiterter Erster Hilfe, das heißt unter besonderer Bezugnahme auf die kontaminierte Verletzung, auszubilden. Auf diese Weise kann das Verantwortungsbewußtsein des Mitarbeiters sich selbst und anderen gegenüber gestärkt werden, was erfahrungsgemäß zu einer Senkung der Unfallhäufigkeit führt. An jeder exponierten Arbeitsstelle (Handschuhboxen) sollte ein weicher Stauschlauch mit Kocherklemme gut sichtbar an leicht zugänglicher Stelle angebracht werden.

Da der Arzt in den seltensten Fällen zum Zeitpunkt des Unfalls anwesend ist, bleibt die erste Hilfe am Unfallort eine Domäne des geschulten Laien. Um den Zeitfaktor bis zur ärztlichen Versorgung so klein wie möglich zu halten, ist rasches und gezieltes Handeln das Gebot des Augenblicks. Es besteht in der sofortigen Anlage einer wundnahen Stauung. Hierdurch kann einerseits infolge einer vermehrten venösen Blutung ein Teil der in die Wunde gelangten Aktivität wieder ausgeschwemmt werden, andererseits eine Aszension in die Blutbahn mit der Gefahr einer Organablagerung weitgehend verhindert werden. Die Anlage eines sterilen Wundverbandes sowie die Einleitung bzw. Durchführung des Transportes zum behandelnden Arzt beenden die Erste Hilfe am Unfallort. Sie stellt ein wichtiges Glied in der Behandlung der kontaminierten Verletzung dar.

### *5.3.2. Die chirurgische Intervention bei einer kontaminierten Verletzung*

Die chirurgische Behandlung einer kontaminierten Wunde setzt voraus, daß die räumliche, meßtechnische und instrumentelle Einrichtung vorhanden ist. Um einer Verschleppung radioaktiven Materials in konventionelle Operationsräume vorzubeugen, ist es angebracht, die Versorgung solcher Verletzungen in einem nur für diese Zwecke vorgesehenen Raum vorzunehmen. Instrumentarium, Abdecktücher, Beistelltische, Op-Handschuhe etc. sollten ebenfalls nur der kontaminierten Verletzung vorbehalten bleiben.

Dem chirurgischen Eingriff muß stets eine die Diagnose sichernde und abklärende Wundausmessung vorausgehen.

Während der Ausmessung und der ärztlichen Versorgung wird die wundnahe Stauung belassen oder aber während des Eingriffs durch eine Blutsperre ersetzt.

Handelt es sich um eine zusätzliche Kontamination der die Wunde umgebenden Hautbezirke, so muß diese zuerst beseitigt werden (siehe Kapitel 4). Um dabei eine Kontamination der Wunde durch Spülflüssigkeit zu vermeiden, wird die Verletzung vor der Hautdekontamination mit einem Leukoflexverband oder einem synthetischen Wundverband (Scan Spray) wasserdicht verschlossen. Durch die primäre Säuberung der die Wunde umgebenden Hautoberfläche kann eine Verschleppung der Aktivität auf Abdecktücher und Beistelltische verhindert und die nachfolgende Kontrollmessung an der Wunde erleichtert werden.

Das chirurgische Vorgehen richtet sich nach Art und Schwere der Verletzung, sowie nach der Radiotoxizität des radioaktiven Materials in der Wunde.

Daraus ergeben sich zwei Möglichkeiten der Behandlung.

#### *5.3.2.1. Konservativ chirurgische Maßnahmen*

Sie finden Anwendung bei allen kleineren und oberflächlichen Verletzungen, die mit kurz- und mittellebigen Radionukliden von geringer Radiotoxizität kontaminiert sind.

Im einfachsten Falle reicht die wundnahe Stauung mit anschließender Spülung unter fließendem Wasser aus. Darüberhinaus kann zusätzlich eine aktive Auswaschung bei liegender Stauung mit physiologischer Kochsalzlösung oder Zephirolwasser oder aber eine Spülung mit 3 %iger  $H_2O_2$ -Lösung vorgenommen werden. Eine sich anschließende Kontrollmessung der Wunde ist angezeigt. Aseptischer Anstrich mit Mercurochrom und Anlage eines antibakteriellen Puder- oder Salbenverbandes sowie Tetanusprophylaxe beschließen die konservativ chirurgischen Maßnahmen. Spülflüssigkeiten sowie Tupfermaterial sollten gegebenenfalls aufbewahrt und einer Ausmessung beziehungsweise einer Aktivitätsanalyse unterzogen werden.

#### *5.3.2.2. Aktiv chirurgische Maßnahmen*

Bei allen Wundkontaminationen mit hochradiotoxischen Substanzen einschließlich der langlebigen knochensuchenden Radioisotope wird dem aktiv chirurgischen Vorgehen der Vorzug gegeben. Die Mehrzahl solcher Verletzungen lokalisiert sich entsprechend der Tätigkeiten in Handschuhboxen in den Bereich der Finger und Hände. Sofern es sich um gelöste radioaktive Substanzen handelt und versäumt worden ist, eine wundnahe Stauung anzulegen, muß mit einer Aszension in die Blutbahn gerechnet werden.

Die Erstmaßnahme besteht in diesen Fällen in der Anlage einer Stauung mit nachfolgender Wundausmessung. Daran anschließend erfolgt in Leitungs- oder Lokalanästhesie die Wundrandexzision. Die Erfahrung hat gezeigt, daß es bei der überwiegenden Anzahl der Fälle gelingt, auf diese Weise die Aktivität in toto aus der Wunde zu entfernen [11].

Mitunter kann jedoch insbesondere bei kontaminierten Stichverletzungen die Lokalisation der Aktivität Schwierigkeiten bereiten. In solchen Fällen ist eine mehrmalige Wundrandexzision, verbunden mit Kontrollmessungen bis

zur völligen Entfernung der Aktivität, nicht auszuschließen. Darüberhinaus können auch zusätzlich Wundauswaschungen mit physiologischer Kochsalzlösung oder Zephirolwasser versucht werden [12].

Gelingt es trotz aller Maßnahmen nicht, die Wundaktivität vollständig zu entfernen, so kann man sich mit dem Erreichen des Wundgrenzwertes von 1/10 der Körperbelastung, bezogen auf das kritische Organ, zufrieden geben. Handelt es sich im Falle von Transuranen um höhere noch verbleibende Restaktivitäten, beispielsweise im Mikrocuriebereich, so könnte nach sorgfältigem Abwägen aller gegebenen Fakten, einschließlich der Abschätzung der Gesamtkörperbelastung und den sich daraus ergebenden Folgen für den Gesamtorganismus, auch eine Amputation aus vitaler Indikation indiziert sein.

Exzidierte Gewebstücke, Wund- und Venenblut sowie Spülflüssigkeiten und Erstverband sollten zur Kontrolle einer Aktivitätsanalyse unterzogen werden.

Bei Verdacht auf Aszension und Inkorporation des radioaktiven Materials müssen zusätzlich Blut, 24-h-Urin und Faeces Aktivitätsanalysen unterzogen werden und dies nötigenfalls über einen längeren Zeitraum. Bei schweren Kombinationsverletzungen (Kontamination mit schwerem allgemeinem Trauma) richten sich die Primärmaßnahmen nach den Kriterien der Ersten Hilfe. In der Reihenfolge der zu treffenden Handlungen steht die Therapie der schweren konventionellen Verletzung aus vitaler Indikation an erster Stelle.

Die Verletzten werden in Ermangelung eines besseren Verfahrens der Berufsgenossenschaft unter Nr. 27 der Berufskrankheiten (Erkrankung durch ionisierende und Röntgenstrahlen) gemeldet und vom Hausarzt, wenn erforderlich, arbeitsunfähig geschrieben. Da mitunter Nachmessungen und Aktivitätsanalysen in biologischem Material notwendig sind und gegebenenfalls eine medikamentöse Zusatztherapie indiziert ist, wird es zweckmäßig sein, den Kontakt zum Patienten aufrechtzuerhalten.

#### *5.4. Medikamentöse Zusatztherapie bei kontaminierten Wunden*

Die medikamentöse Zusatztherapie wird immer dann in Betracht gezogen werden müssen, wenn mit einer Inkorporation größeren Ausmaßes gerechnet werden muß.

Dies kann der Fall sein, wenn der reibungslose Ablauf der Maßnahmen vom Zeitpunkt des Unfalls bis zur ärztlichen Versorgung nicht gewährleistet werden kann und damit die Gefahr einer Ablagerung im Körper erhöht wird. Die frühzeitige und sachgerechte Durchführung der ärztlichen Wundversorgung vermag eine Inkorporation des radioaktiven Materials durch Aszension aus der Wunde weitgehend zu verhindern. Vor Beginn der initialen medikamentösen Therapie wird die Abnahme von 50 ml sanguis empfohlen, um durch eine Aktivitätsanalyse einen Basiswert für eine eventuell schon vorhandene Blutaktivität zu erhalten. Dadurch kann die Indikation für zusätzliche Maßnahmen erleichtert werden. In diesem Zusammenhang wird auf Kapitel 7 verwiesen, wo in einem Beitrag von Catsch ausführlich über die Möglichkeiten der medikamentösen Therapie bei Inkorporationen berichtet wird.

5.4.1. Im Rahmen der ersten ärztlichen Hilfsmaßnahmen kann bei begründetem Verdacht auf Wundkontaminationen mit Transuranen neben der Anlage einer wundnahen Stauung die initiale Applikation von 0,5 g Ditripentat Heyl® in 10 ml aqua bidestillata langsam intravenös vorgenommen werden. Dies gilt insbesondere für solche Fälle, bei denen aus welchen Gründen auch immer die sofortigen meßtechnisch-diagnostischen und chirurgisch-therapeutischen Maßnahmen nicht möglich sind.

Da es bei Wundkontaminationen mit gelöstem radioaktivem Material bereits innerhalb der ersten fünfzehn bis dreißig Minuten zur Aszension in die Blutbahn kommen kann, sollte die Initialinjektion möglichst unmittelbar nach dem Unfall erfolgen.

Nach Beendigung der durch den Werksarzt vorgenommenen Erstmaßnahmen am Unfallort wird zur weiteren Abklärung des Befundes die Weiterleitung des kontaminierten Verletzten in ein geeignetes Krankenhaus veranlaßt. Das für die Durchführung der Aktivitätsanalyse entnommene Blut sollte dabei gleich mitgeschickt werden.

Hier wird dann unter Zuhilfenahme aller in Frage kommenden diagnostischen Verfahren auch die Abschätzung der Körperbelastung vorgenommen, was eine Zeitspanne von ca. 8 Tagen in Anspruch nimmt. Danach kann die Entscheidung über eventuelle weitere therapeutische Maßnahmen getroffen werden.

5.4.2. Ist trotz sofortiger Wundrandexzision und Wundauswaschung eine befriedigende Senkung der Aktivität auf mindestens 1/10 der maximalen Körperbelastung nicht möglich, so kann ebenfalls eine medikamentöse Zusatztherapie erforderlich werden. Der weitere Ablauf ist wie unter 4.1. beschrieben.

5.4.3. Bei allen stark kontaminierten Wunden, bei denen eine Inkorporation über das Ausmaß der maximal zulässigen Körperbelastung zu erwarten ist, muß die intermittierende Langzeittherapie in Erwägung gezogen werden (siehe Kapitel 7) [13].

### *5.5. Betreuung kontaminierter Verletzter bei nicht vorhandener räumlicher und apparativer Ausrüstung*

Es muß davon ausgegangen werden, daß die räumliche und apparative Ausrüstung zur Behandlung kontaminierter Verletzter derzeit noch nicht zum Standard eines niedergelassenen oder an der Klinik tätigen Chirurgen gehört.

Daraus ergibt sich zwangsläufig ein Schwerpunkt für die Erste Hilfe am Unfallort durch den geschulten Laien und die erste ärztliche Notversorgung. Der mit offenen radioaktiven Stoffen umgehende Personenkreis sollte daher im Rahmen der Ersten Hilfe-Ausbildung auch speziell mit den Erstmaßnahmen bei einer kontaminierten Verletzung vertraut gemacht werden. Hinzu kommt die zusätzliche Ausrüstung des Arbeitsplatzes mit Stauschlauch und Kocherklemme.

Die erste ärztliche Versorgung richtet sich nach der Art der kontaminierenden Substanz und deren Radiotoxizität. Da der Behandlung in jedem Falle eine Ausmessung der Wunde vorangehen sollte, ergibt sich eine enge Zusammenarbeit zwischen Arzt (Werksarzt) und Strahlenschutzphysiker des be-

treffenden Betriebes. Für die chirurgische Versorgung der kontaminierten Wunde empfiehlt es sich, mit einem niedergelassenen und bei schweren Verletzungen mit einem am Krankenhaus tätigen Chirurgen eine Vereinbarung zu treffen, die es ermöglicht, unter den Voraussetzungen der nuklearen Asepsis die erforderlichen Maßnahmen durchzuführen, wobei die meßtechnische Überwachung mittels tragbarer Geräte vorgenommen werden kann. Die Praxis hat gezeigt, daß unter diesen Umständen der reibungslose Ablauf vom Zeitpunkt des Unfalls bis zur ersten ärztlichen Versorgung gewährleistet werden kann. Bei schweren kontaminierten Verletzungen sollte auch an eine isolierte vorübergehende Unterbringung im nächstgelegenen Krankenhaus gedacht werden.

Für schwerstverletzte Kontaminierte mit zusätzlicher äußerer Ganzkörperüberexposition ist die Unterbringung in modernen Unfallkliniken, beispielsweise für Schwerstbrandverletzte zu empfehlen, da hier die räumlichen und pflegerischen Voraussetzungen gegeben sind.

Umfang und Ausmaß werksärztlicher Tätigkeit bei kontaminierten Verletzungen ergibt also schwerpunktmäßig drei Möglichkeiten.

5.5.1. Werksärztliche Betreuung im Ambulanzraum bei Bagatellverletzungen mit kurz- und mittellebigen Radioisotopen.

5.5.2. Ärztliche Versorgung einer mit hochradiotoxischen Substanzen kontaminierten Wunde in einer entsprechend eingerichteten Ambulanz, unter Mitwirkung eines Strahlenschutzphysikers und nötigenfalls in Zusammenarbeit mit einem interessierten Chirurgen.

5.5.3. Bei größeren Unfällen und Katastrophen Durchführung der Ersten Hilfe am Unfallort sowie Einleitung und Ausführung des Transportes Schwerverletzter in ein geeignetes Krankenhaus.

## 5.6. *Zusammenfassung der Erstmaßnahmen bei kontaminierten Verletzungen.*

5.6.1. Erste Hilfe am Unfallort durch den geschulten Laien.

5.6.1.1. Anlage einer wundnahen Stauung und Ausspülen der Wunde unter fließendem Wasser.

5.6.1.2. Anlage eines sterilen Wundverbandes und unmittelbarer Transport zum Werksarzt, der über die weiteren Maßnahmen entscheidet.

5.6.2. Erste ärztliche Maßnahmen.

5.6.2.1. Konservativ chirurgische Maßnahmen bei Wundkontaminationen mit kurz- und mittellebigen nicht hochradiotoxischen Isotopen.

5.6.2.1.1. Auswaschung der Wunde mit Zephirolwasser oder physiologischer Kochsalzlösung oder Spülung mit 3 %iger Wasserstoffsperoxydlösung.

5.6.2.1.2. Antibakterieller Puder- oder Salbenverband, Tetanusprophylaxe. Einbehalten von Primärverband und Spülflüssigkeiten zwecks Ausmessung auf Aktivität.

5.6.2.2. Aktiv chirurgisches Vorgehen bei allen mit hochradiotoxischen und langlebigen Radionukliden kontaminierten Verletzungen.

5.6.2.2.1. In Leitungs- oder Lokalanästhesie Wundexzision mit anschließender Kontrollmessung der Wunde.

Gegebenenfalls Zweitexzision mit nachfolgender Wundauswaschung.

5.6.2.2.2. Steriler Wundverband und Tetanusprophylaxe.

5.6.2.3. Nach Beendigung der chirurgischen Maßnahmen und vor Beginn der medikamentösen Therapie Abnahme von 50 ml sanguis zur Durchführung einer Aktivitätsanalyse.

5.6.2.4. Bei begründetem Verdacht auf Wundkontamination mit hochradioaktiven Transuranen und fehlender chirurgischer Intervention am Unfallort, langsame intravenöse Applikation von 0,5 g Ditripentat Heyl<sup>®</sup>, verdünnt in 10 ml aqua bidestillata.

5.6.2.5. Einbehalten von Primärverband, Wundexzidat und Spülflüssigkeit zwecks Durchführung von Aktivitätsanalysen.

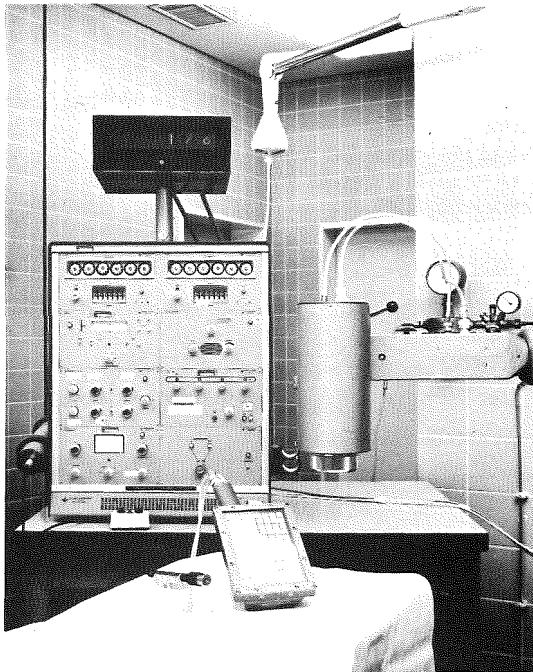
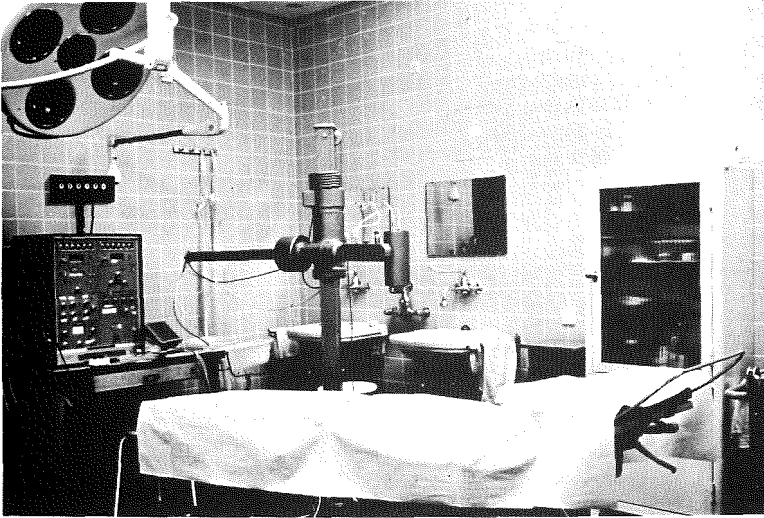
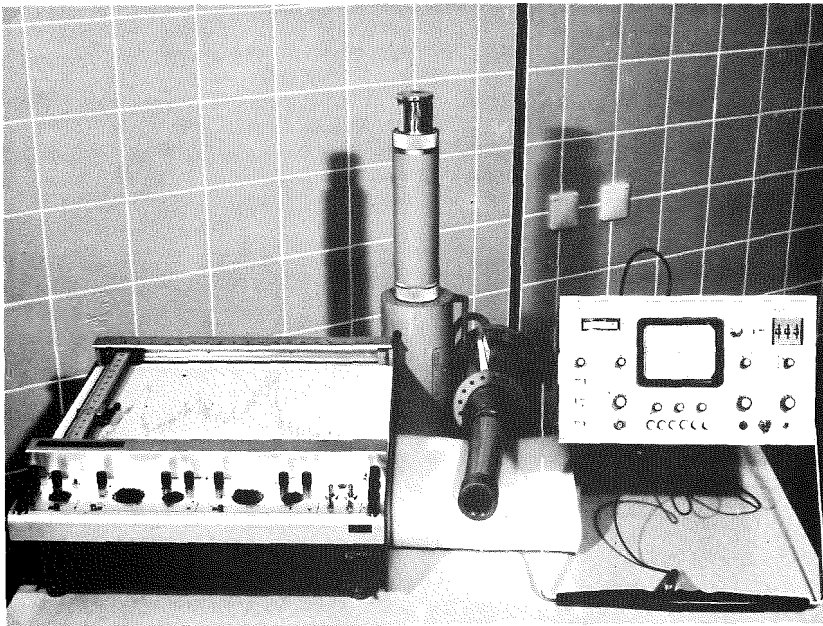


Abb. 2: Radiochirurgischer Meßplatz mit Detektoren



*Abb. 3:* Deko-Operationsraum



*Abb. 4:* Gammaskpektrometrischer Meßplatz mit Detektoren, Vielkanalanalysator und X/Y-Schreiber

*Literatur:*

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 11 (1967) Pergamon Press
2. *Taylor, D.M., Chipperfield, A.R.*: The Binding of Transplutonium Elements to Proteins of Bone. Radiation Protection Problems Relating To Transuranium Elements. EUR 4612, 187-202 (1971)
3. *Dolphin, G.W.*: The Biological Problems in the Radiological Protection of Workers Exposed to  $^{239}\text{Pu}$ . Health Physics 20, 549-557 (1971)
4. *Guzak, St. V.*: Rocky Flats Methods of Treating Acute Plutonium Cases. RFP-453 (1964)
5. *Norwood, W.D.*: Removal of Plutonium and other Transuranic Elements from Man. Diagnosis and Treatment of Radioactive Poisoning. IAEA, Vienna, 307-317 (1963)
6. *Ohlenschläger, L.*: Erste-Hilfe-Maßnahmen bei Strahlenunfällen unter besonderer Berücksichtigung radioaktiv kontaminierter Verletzungen, Atompraxis 16, 236-241 (1970)
7. *Bensted, J.P.M., Taylor, D.M., Sowby, F.D.*: The Carcinogenic Effects of Americium 241 and Plutonium 239 in the Rat. The British Journal of Radiology, 38, 456 (1965)
8. *Tyler, G.R.*: Self-Absorption of X-rays by Plutonium Particles, UKAEA TRG 896 (D)
9. *Ehret, R.*: Zur Messung von Plutonium in Wunden. Direct Information, Atompraxis 9 (1966)
10. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 2 (1959) Pergamon Press
11. *Ohlenschläger, L.*: Beitrag zur chirurgischen Versorgung radioaktiv kontaminierter Wunden. Schriftenreihe: Arbeitsmedizin, Sozialmedizin, Arbeitshygiene, Band 24.
12. *Ohlenschläger, L.*: Bericht über eine mit Americium-241 kontaminierte Stich-Schnittverletzung am linken Zeigefinger. Strahlentherapie 142, 73-79 (1971)
13. *Catsch, A.*: Dekorporierung radioaktiver und stabiler Metallionen. Therapeutische Grundlagen, München: K. Thiemig KG (1968)



## 6. Ermittlung der Körperbelastung bei Inkorporation von Radionukliden

H. Schieferdecker

### 6.1. Grundlagen

Unter einer Inkorporation von Radionukliden versteht man die Aufnahme von radioaktiven Stoffen in den menschlichen Körper. Sie erfolgt unerwünscht als Folge eines Zwischenfalls beim Umgang mit Radionukliden und unterscheidet sich dadurch von der therapeutischen oder diagnostischen Applikation von Radionukliden.

In jedem Fall verbleiben die aufgenommenen radioaktiven Stoffe eine gewisse Zeit im Körper. Während dieser Zeit wird die beim radioaktiven Zerfall emittierte Strahlung ganz oder zum Teil vom Körpergewebe absorbiert, wodurch der Körper eine gewisse Strahlungsdosis empfängt, die im folgenden als Körperbelastung bezeichnet wird.

#### 6.1.1. Maximal zugelassene Aktivitätsmengen im Körper

Der Schutz des Menschen vor radioaktiver Strahlung geht von dem Grundsatz aus, daß der menschliche Körper nur einer begrenzten Strahlungsdosis ausgesetzt werden darf. Beruflich strahlenexponierte Personen dürfen im Verlauf ihres Lebens nur eine bestimmte Äquivalentdosis empfangen. Dabei ist es gleichgültig, ob diese Strahlung von außen auf den Körper trifft oder von einer Strahlenquelle im Innern des Körpers herrührt. Eine Grenzdosis ergibt sich aus der zulässigen Belastbarkeit einzelner besonders strahlenempfindlicher Organe. Von ihr leiten sich sekundäre Richtwerte ab, die für eine zugelassene jährliche, wöchentliche oder tägliche Belastung gelten. So sind z.B. die wöchentlichen Grenzwerte (nach [1])

- |  |               |
|--|---------------|
| – für die Gonaden und den Gesamtkörper | 0.1 rem/Woche |
| – für die Haut und die Schilddrüse     | 0.6 rem/Woche |
| – für alle anderen weichen Organe      | 0.3 rem/Woche |

Die Äquivalentdosen lassen sich leicht direkt ermitteln, wenn die Strahlung von außen auf den Körper auftrifft. In Kapitel 2 wird darüber berichtet. Die Ermittlung der Äquivalentdosis bei einer Inkorporation von Radionukliden ist dagegen schwieriger. Die ungleiche Verteilung der Radionuklide im Körper und ihre unterschiedlichen Strahlungseigenschaften machen eine direkte Dosisbestimmung unmöglich.

Man bezieht sich daher bei der Inkorporationsmessung nicht auf den primären Richtwert der Lebenszeitdosis, sondern vielmehr auf den von ihm abgeleiteten Richtwert der maximal zugelassenen Aktivitätsmenge eines Radionuklids im Körper, in Organen oder in speziellen Körpergeweben.

Diese maximal zugelassenen Werte sind so berechnet worden, daß unter Berücksichtigung der Verteilung der Radionuklide im Körper und ihrer Strahlungseigenschaften keine höheren Äquivalentdosen als zugelassen absorbiert werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen wurden von der Inter-

nationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) tabellarisch erfaßt [1] [2]. Diese Berechnungen stützen sich auf bekannte biologische Daten der Radionuklide und sind z.T. nur in Tierexperimenten untersucht. Es ist zu erwarten, daß im Laufe der Zeit diese Daten auch für den Menschen weiter erforscht werden und daß dadurch eine geringfügige Korrektur der Werte notwendig werden könnte [5].

Für ein spezielles Radionuklid lag zur Zeit, als die Berechnungen erfolgten, bereits ein so umfangreiches Datenmaterial vor, daß man sich auf diese Ergebnisse beziehen konnte. Man konnte sicher sein, daß die maximal zugelassene Menge an  $^{226}\text{Ra}$  0.1  $\mu\text{Ci}$  beträgt [1]. Dieser Wert wurde im Verlauf der Jahrzehnte nicht verändert und wurde seinerseits als Richtwert für alle die Radionuklide benutzt, die ein ähnliches biologisches Verhalten aufweisen wie das Radium. Radium lagert sich bevorzugt in den Knochen ab und so wurden die maximal zugelassenen Werte für alle Radionuklide auf diesen Wert bezogen, die sich ebenfalls im Knochen ablagern. Die effektive Energie der emittierten Strahlung wurde dabei berücksichtigt.

Die maximal zugelassenen Aktivitätsmengen von Radionukliden werden in  $\mu\text{Ci}$  angegeben. Für eine Auswahl von Radionukliden sind die Maximalwerte in der Tabelle 1 angegeben [1] [2]. Sie stellen sekundäre Richtwerte dar, die sich auf den primären Standard der Lebenszeitdosis beziehen.

Von diesen sekundären Richtwerten leiten sich weitere Richtwerte ab, die im Strahlenschutz bedeutungsvoll sind. Die maximal zugelassenen Konzentrationen von Radionukliden im Trinkwasser, in der Luft und in Nahrungsmitteln sind so berechnet worden, daß die ständige Ingestion bzw. Inhalation dieser Konzentrationen keine Überschreitung der maximal zugelassenen Körperbelastung verursacht [1] [2]. Grundlage dieser Berechnungen ist das biologische Verhalten der Radionuklide im Organismus. Weitere sekundäre Standards sind maximal zugelassene Konzentrationen von Radionukliden im Urin, Stuhl, Sputum oder auch in den oberen Atemwegen. Alle diese abgeleiteten Richtwerte beziehen sich auf das besondere metabolische Verhalten der Radionuklide [3] [4].

### *6.1.2. Verhalten der Radionuklide im Körper*

Das physiologische Verhalten der Radionuklide im Körper wird durch deren chemische und physikalisch-chemische Eigenschaften bestimmt. Ausschlaggebend braucht dabei nicht die bestimmte Eigenschaft des Einzelelements zu sein, sondern in vielen Fällen gibt die Form der chemischen Verbindung an, wie das Radionuklid im Körper verteilt wird.

So wird Tritium in der Form seines Oxides, dem tritiierten Wasser, vom Körper sehr rasch und vollständig aufgenommen und in allen Körperflüssigkeiten gleichmäßig verteilt, während es in elementarer Form als Tritiumgas nur geringfügig im Körper verbleibt. Wird es dagegen in Form von tritiierten organischen Verbindungen inkorporiert, dann ist ein bestimmter Stoffwechsel mit diesen Verbindungen möglich, der schließlich dazu führen kann, daß ein Abbau zum Tritiumwasser erfolgt.

Ein gänzlich unterschiedliches physiologisch-chemisches Verhalten zeigt als weiteres Beispiel auch das Plutonium, wenn es in den Körperflüssigkeiten in verschiedener chemischer Form vorliegt. So gelangt monomeres Plutonium

in weit stärkerem Maße in die Knochen als polymeres kolloides Plutonium, das sich bevorzugt in der Leber ablagert.

Aus diesem Grunde sind die Organe, die bei der Inkorporation von Radionukliden betroffen werden, von der chemischen Form der inkorporierten Radionuklide abhängig. Ganz allgemein bezeichnet man diese betroffenen Organe als kritische Organe und macht sie für die Strahlenschutz-betrachtungen zum Bezugsorgan. Die Strahlendosis, die die kritischen Organe von den Radionukliden erhalten, hängt von der Verweildauer der Radionuklide in diesen Organen ab.

Als Maßzahl für die Verweildauer eines Radionuklids im Körper ist eine Zeitspanne gewählt worden, die in Anlehnung an den Begriff der physikalischen Halbwertszeit eines radioaktiv zerfallenden Radionuklids als „biologische Halbwertszeit“ bezeichnet wird. Man versteht unter der biologischen Halbwertszeit diejenige Zeit, in der die Hälfte der ursprünglichen Menge des Radionuklids ausgeschieden wurde. Dabei ist die Abnahme durch radioaktiven Zerfall in dieser Zeit nicht berücksichtigt. Berücksichtigt man den radioaktiven Zerfall, dann erhält man die sogenannte effektive Halbwertszeit eines Radionuklids im Körper <sup>†</sup>). Mit dieser Halbwertszeit werden die Dosisberechnungen und die Festlegung maximal zugelassener Mengen vorgenommen.

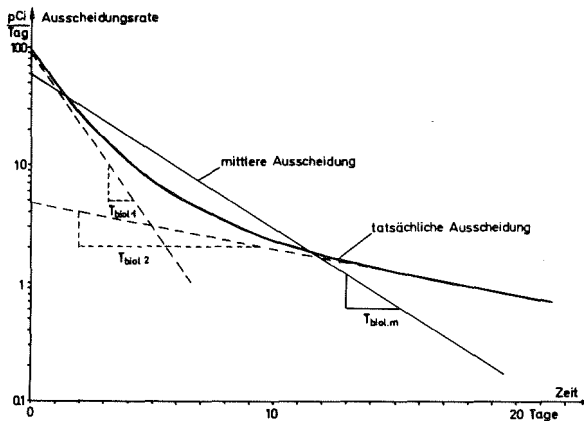


Abb. 1 Ausscheidung von Radionukliden aus dem menschlichen Körper

Bisher ist man dabei von der Annahme ausgegangen, daß die biologische Halbwertszeit mit einer einfachen Exponentialfunktion darstellbar ist. Man hat den Körper oder das kritische Organ als ganzes gesehen und nicht berücksichtigt, daß der Stoffwechsel zwischen mehreren Organen oder funktionellen Kompartimenten des menschlichen Körpers ablaufen kann. Dies

<sup>†</sup>) Die effektive Halbwertszeit  $T_{\text{eff}}$  errechnet sich aus der physikalischen Halbwertszeit  $T_{\text{phys}}$  und der biologischen Halbwertszeit  $T_{\text{biol}}$  nach folgender Gleichung

$$T_{\text{eff}} = \frac{T_{\text{phys}} \cdot T_{\text{biol}}}{T_{\text{phys}} + T_{\text{biol}}}$$

führt dazu, daß die Verteilung eines Radionuklids komplexer ist, als bisher angenommen wurde, und das hat zur Folge, daß die Retentions- und Ausscheidungsfunktionen multiexponentielle oder sogar Potenzfunktionen darstellen (Abb. 1).

Mit Hilfe der modernen Datenverarbeitung wurde es möglich, komplizierte Stoffwechselforgänge zu berücksichtigen, die im Laufe der Zeit als Versuchsergebnisse bei Tieren und als Erfahrungswerte beim Menschen bekannt wurden.

Im Jahre 1973 sollen die Ergebnisse dieser Rechnungen in Form überarbeiteter Strahlenschutzrichtwerte bei der Inkorporation von Radionukliden als neues Handbuch der ICRP publiziert werden und es ist zu erwarten, daß in Einzelfällen eine Revision der in der Tabelle 1 aufgeführten Daten nötig wird [5].

### 6.1.3. Inkorporationsmechanismen

Die Verteilung eines inkorporierten Radionuklids im Körper hängt nicht nur von seiner chemischen Form ab, wie oben beschrieben wurde, sondern zu einem gewissen Maße auch von dem Inkorporationsweg. Man kann drei Hauptaufnahmewege unterscheiden:

- Ingestion
- Inhalation und die
- Aufnahme durch die intakte oder verletzte Haut.

Eine *Ingestion* ist als Folge einer Nichtbeachtung des Rauch- und Eßverbots sowie eines unvorschriftsmäßigen Pipettierens radioaktiver Lösungen in Kontrollbereichen recht selten. Schäden können hauptsächlich durch eine direkte Bestrahlung des Magen-Darm-Trakts während der Passage verursacht werden. Durch Ingestion inkorporierte Radionuklide werden von Nahrungsresten umhüllt und verlassen den Körper im Stuhl, ohne daß eine größere Resorption erfolgt. Ausnahmen sind Radionuklide wie  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{131}\text{J}$ , die unter Umständen vom Magen-Darm-Trakt fast völlig resorbiert werden.

Die wahrscheinliche Aufenthaltsdauer der Radionuklide im Magen-Darm-Trakt eines Standardmenschen bestimmt die Höhe des Schadens.

Bisher wurden keine maximal zugelassenen Radionuklidmengen für den Magen-Darm-Trakt als kritisches Organ angegeben, jedoch wurden die maximal zugelassenen Trinkwasserkonzentrationen (MZK<sub>w</sub>) für ingestierte Radionuklide auf die Schädigung dieses Organs bezogen. In Tabelle 1 sind die derzeitigen Richtwerte der ICRP aufgeführt.

Ein häufiger Inkorporationsweg ist die *Inhalation* von radioaktiven Aerosolen. Kritisches Organ ist hierbei für unlösliche Verbindungen die Lunge oder die regionalen Lymphknoten.

Bereits im Nasen-Rachen-Raum beginnt die Resorption von inhalierten Aerosolteilchen. Die chemische Form und auch die Größe des inhalierten Teilchens bestimmt die Resorptionsrate. Sie liegt in der Größenordnung von 1 % der inhalierten Menge und ist deshalb gefährlich, weil der Übergang in die Körperflüssigkeiten sehr schnell erfolgt.

Abgelagerte unlösliche Aerosolteilchen im Atemtrakt stellen primär noch

keine große Gefahr dar, weil sie zu einem großen Teil durch die Ciliarbewegung des Flimmerepithels der Atemwege wieder in den Nasen-Rachenraum transportiert und verschluckt werden. Diese Menge kann bis zu 75 % der inhalierten Aktivität betragen. Sie wird in den ersten 4–6 Tagen wieder aus der Lunge entfernt und im Stuhl ausgeschieden. Man muß daher zwischen der ursprünglich aufgenommenen Menge und der letztlich resorbierten Radionuklidmenge unterscheiden.

Das im Alveolarraum abgelagerte unlösliche Aktivitätsdepot verbleibt in der Lunge oder wird durch Phagozytose in die pulmonalen Lymphknoten transportiert. Aus der Lunge oder den Lymphknoten geht der radioaktive Stoff langsam (mit einer biologischen Halbwertszeit von ca. einem Jahr) in die Körperflüssigkeiten über. Von dort erst wird er in spezifische kritische Organe verteilt und lagert sich hier für bestimmte Zeit ab.

Leicht resorbierbare Verbindungen von Radionukliden gehen schneller in die Körperflüssigkeiten über und stellen dadurch eine größere Gefahr für den Menschen dar.

Das Aufnahmerisiko, Radionuklide durch die *intakte Haut* zu inkorporieren, ist relativ gering anzusetzen, da die Haut eine gute Barriere gegen von außen eindringende Stoffe ist. Ausnahme ist dabei die völlige und schnelle Aufnahme von Tritiumwasser durch die Haut.

Schwieriger zu beurteilen ist die Inkorporationswahrscheinlichkeit durch die *verletzte Haut*. Im allgemeinen muß damit gerechnet werden, daß die radioaktive Substanz, wenn sie längere Zeit im Wundbereich verbleibt, vom Körper resorbiert und mit den Körperflüssigkeiten in die kritischen Organe transportiert wird. Dieser Vorgang wird bei löslichen, oder besser: in Körperflüssigkeiten transportablen Verbindungen schnell ablaufen, während unlösliche oder nicht transportable Verbindungen für längere Zeit weitgehend unbeeinflusst in der Wunde verbleiben. Es muß jedoch damit gerechnet werden, daß auch chemisch unlösliche Verbindungen in Körperflüssigkeiten transportabel sein können. Aus dem subkutanen Gewebe ist somit eine Verlagerung in andere Organe wahrscheinlich. Die Behandlung dieser Fälle wird in Kapitel 5 beschrieben.

## 6.2. Methoden zur Feststellung einer Inkorporation

Eine Inkorporation stellt, wie aus oben Gesagtem hervorgeht, keinen stationären Zustand dar. Mit Hilfe geeigneter Meßmethoden kann nur die derzeitige inkorporierte Menge festgestellt und diese mit maximal zugelassenen Aktivitätsmengen verglichen werden. Da diese Mengen kurz nach einer Inkorporation in jedem Fall höher liegen als spätere Zeit danach, geben Inkorporationsmessungen sofort nach einem Zwischenfall Werte an, die auf der sicheren Seite der Betrachtungen liegen.

Methoden zur Feststellung sind

- die Direktmessung der Körperaktivität
- die Ausscheidungsanalyse

Als Hilfsmittel für die grobe Feststellung einer Inhalation von Radionukliden erweist sich auch die Messung der Kontamination des Nasen-Rachenraums als nützlich.

### 6.2.1. Nasen-Rachen-Abstrich

Die meisten Inkorporationen beim Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen erfolgen durch Inhalation. In gefährlichen Bereichen werden daher von den Personen Luftprobensammler in der Nähe der Atemwege getragen. Wo dies nicht der Fall ist, kann der Nasen-Rachen-Raum als Luftprobensammler herangezogen werden. Mit Hilfe eines Stieltupfers aus Mullgaze kann ein Teil der inhalierten Aktivität aus der Nase und dem Rachen entfernt und ausgemessen werden. Zur Messung der  $\alpha$ -Strahler ist die radiochemische Aufarbeitung dieser Proben unerlässlich, da ein großer Teil der  $\alpha$ -Strahlung durch den feuchten Mulltupfer absorbiert wird. Zur groben Abschätzung einer Inhalation ist diese Methode ausreichend empfindlich genug.

Anstelle von Nasen-Rachen-Abstrichen können auch Schneuztücher ausgemessen und aus dem Meßergebnis auf eine eventuelle Inkorporation rückgeschlossen werden. In der folgenden Tabelle sind von K.R. Heid et al. <sup>†</sup>) Erfahrungswerte für die Inhalation von Plutoniumoxid zusammengestellt, die als Faustregel für die grobe Abschätzung herangezogen werden können.

Schnuezprobe	Anfängliche alveolare Belastung	Anfängliche Lungenbelastung	Endgültige Körperbelastung
1 nCi	1 nCi	3 nCi	0.1 nCi

### 6.2.2. Direktmessung der Körperaktivität

Die schnellste und einfachste Methode zur Feststellung einer Inkorporation ist die Direktmessung der aus dem Körper austretenden Strahlung. Sie ist für eine große Anzahl von Radionukliden anwendbar. Vor allem  $\gamma$ -Strahler mit durchdringender Strahlung oberhalb 100 keV sind gut meßbar.

Zu diesem Zweck wurden spezielle Meßanordnungen entwickelt, die als Teil- oder Ganzkörperzähler (Human-Body-Counter) bezeichnet werden [7].

#### 6.2.2.1. Ganzkörperzähler

Ein Ganzkörperzähler hat die Aufgabe, die Radioaktivität des Gesamtkörpers möglichst unabhängig von der Verteilung im Körper zu bestimmen. Diese Aktivitätsmengen sind im allgemeinen so gering, daß deren Messung durch die natürliche Untergrundstrahlung gestört wird. Der Strahlungsdetektor und die Untersuchungsperson müssen daher vor dieser Umgebungsstrahlung durch eine geeignete Abschirmung geschützt werden. Stahl-, Blei- oder Betonschichten bilden einen ausreichenden Schutz, durch den eine Reduktion der Störstrahlung um den Faktor 50–100 möglich ist. Die Abschirmungskammer ist für einen Ganzkörperzähler umfangreich und auch teuer, weil man nur besonders ausgesuchtes radioaktivitätsarmes Material verwenden kann.

Als Strahlungsdetektoren werden Szintillationszähler eingesetzt, mit denen in Verbindung mit geeigneter Meßelektronik nicht allein die Strahlungsin-

<sup>†</sup>) K. R. Heid, J. J. Jech, B. V. Andersen "Interpretation of Data on Internal Plutonium Contamination"; Seminar Radiation Protection Problems Relating to Transuranium Elements, EUR 4612 (1971) S. 437–465

tensität, sondern auch die Energie der Strahlung bestimmt werden kann. Durch Analyse des gemessenen  $\gamma$ -Spektrums kann auf ein bestimmtes Radionuklid im Körper geschlossen werden, und nach entsprechender Kalibrierung der Meßanordnung kann auch die Menge dieses Radionuklids ermittelt werden. Die Meßanordnung besteht aus Szintillationszählern, die entweder in flüssiger oder fester Form Verwendung finden.

Flüssige Szintillationszähler aus organischem Material können in Form eines Zylindermantels ausgebildet werden. Die Untersuchungsperson befindet sich bei der Messung im Innern dieses Zylinders. Dadurch wird eine maximale Zählausbeute erreicht und die Messung ist sehr empfindlich. Die Energiebestimmung der Strahlung ist jedoch nicht sehr genau, so daß ein Gemisch unbekannter  $\gamma$ -Strahler nicht gut unterschieden werden kann. Dieser Typ des Ganzkörperzählers ist daher besonders dort gut einsetzbar, wo bekannt ist, welches Radionuklid inkorporiert wurde.

Eine bessere Unterscheidungsmöglichkeit für verschiedene Strahlungsenergien bieten feste Szintillationszähler aus anorganischem Material. Allerdings lassen sich diese NaJ(Tl)-Kristalle nicht in beliebiger Größe herstellen, so daß man gezwungen ist, mehrere gleichartige Detektoren in einer bestimmten Geometrie zum Körper anzuordnen, um einen möglichst hohen Meßeffect zu erreichen. In der Abb. 2 sind einige diese Anordnungen zusammengestellt.

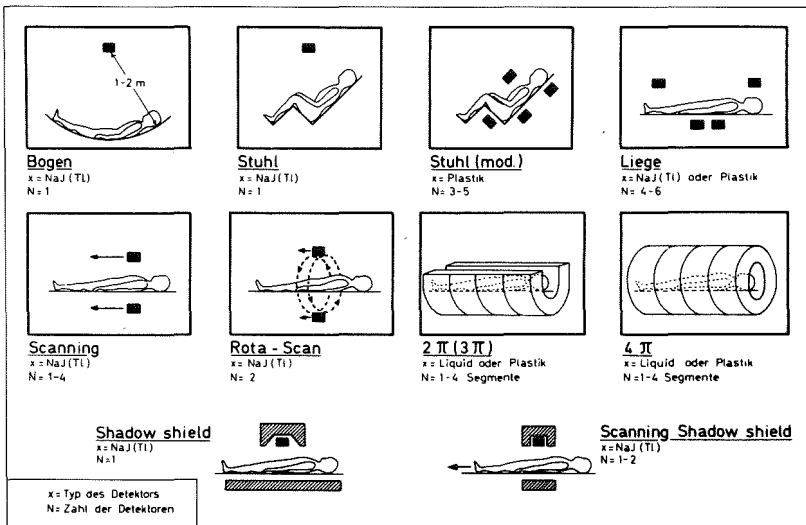


Abb. 2 Verschiedene Typen von Ganzkörperzählern  
(aus: P. Koepp, Habilitationsschrift FU Berlin (1969))

Die Zählausbeute ist wegen der ungünstigen Geometrie relativ gering, dennoch kann die Körperaktivität bei guter Abschirmung in 10–20 Minuten gemessen werden. Die kleinsten nachweisbaren Aktivitätsmengen sind für viele Radionuklide erheblich kleiner als die maximal zugelassenen Körperbe-

lastungen, so daß mit dem Ganzkörperzähler noch Bruchteile dieser Grenzwerte nachweisbar sind (s. Tabelle 2).

#### 6.2.2.2. Teilkörperzähler

In vielen Fällen reicht es aus, die Aktivität nur in einem Teil des Körpers zu bestimmen. Dies trifft in überwiegendem Maße bei Unfällen zu, da eine Inhalation von Radionukliden zu einer primären Belastung des Brustraums führt. Es ist daher ausreichend, die Aktivität in diesem Bereich des Brustkorbs und des Magen-Darm-Trakts zu messen.

Dazu stehen Teilkörperzähler zur Verfügung, die im allgemeinen aus einem Szintillationszähler bestehen, der vor der natürlichen Umgebungsstrahlung kollimatorartig durch Blei oder Stahl abgeschirmt ist. Die auszumessende Person wird nur in dem Bereich abgeschirmt, der von dem Detektor erfaßt wird. Der Meßvorgang ist der gleiche wie bei den oben beschriebenen Ganzkörperzählern. Diese Meßanordnung benötigt jedoch weniger Abschirmungsmaterial und kann daher sogar in einem entsprechend ausgerüsteten Fahrzeug untergebracht werden. Die Messung kann, wenn notwendig, an Ort und Stelle ausgeführt werden. Der Kerntechnische Hilfszug (KTH) des Kernforschungszentrums Karlsruhe und die Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung Neuherberg verfügen über je einen solchen fahrbaren Teilkörperzähler.

Spezielle Teilkörperzähler werden in Sonderfällen zur Messung inkorporierter Radionuklide eingesetzt.

Eine Inkorporation von  $^{131}\text{J}$  läßt sich leicht durch die Messung der Schilddrüsenaktivität feststellen. Man benutzt dazu einen durch Blei abgeschirmten Szintillationszähler, der auf die Schilddrüse gerichtet wird.

Eine Inhalation von Plutonium kann mit einem Teilkörperzähler festgestellt werden, der speziell für den Nachweis der von diesem Radionuklid ausgesandten Röntgenstrahlung entwickelt wurde. Er besteht aus zwei Proportionalzählern, die über beiden Lungenflügeln angebracht werden. Die störende Umgebungsstrahlung wird durch zwei weitere Schutzzähler weitgehend ausgeschaltet. Dadurch ist es möglich, Plutoniumaktivitäten in der Lunge festzustellen, die in der Größenordnung der maximal zugelassenen Lungenbelastung liegen. Durch elektronische Verbesserung der Meßanordnung und Verwendung bestimmter Zählgase ist sogar der Nachweis noch geringerer Mengen möglich.

In letzter Zeit werden für die Lungenmessung auch dünne Szintillationszähler benutzt, die den Nachweis auch anderer Transurane in der Lunge gestatten.

#### 6.2.3. Ausscheidungsmessungen

Die Inkorporationsbestimmung einer Reihe von Radionukliden ist durch Direktmessung der emittierten Strahlung nicht möglich, weil deren Strahlung im Körpergewebe restlos absorbiert wird und außerhalb des Körpers nicht mehr nachweisbar ist. Das sind alle die Radionuklide, die extrem weiche  $\beta$ -Strahlung oder nur  $\alpha$ -Strahlung emittieren.

Eine indirekte Inkorporationsmessung dieser Radionuklide ist erreichbar, indem die Ausscheidungsprodukte auf die entsprechenden Radionuklide



untersucht werden. Die gefundene Aktivitätsmenge kann dann mit Hilfe der Ausscheidungsfunktion (s. 6.1.2.) des betreffenden Radionuklids in die ursprüngliche Körperbelastung umgerechnet werden. Da die emittierte Strahlung auch in den Ausscheidungsprodukten absorbiert wird, kann sie in vielen Fällen nicht direkt gemessen werden. Es ist eine zeitraubende und umständliche Aufarbeitung der Ausscheidungsprodukte notwendig [9].

#### 6.2.3.1. Direktmessung

Eine Direktmessung der radioaktiven Strahlung ist in den Fällen möglich, in denen die maximal zugelassenen Konzentrationen in den Ausscheidungsprodukten so hoch sind, daß bereits wenige ml Urin zur Feststellung einer Inkorporation ausreichen. Dies ist z.B. beim Tritium, Kohlenstoff-14 und Promethium-147 der Fall.

Zur Messung wird 1 ml Urin direkt mit einer bestimmten Szintillatorlösung vermischt und die Aktivität dieser Mischung in einem Flüssigszintillationszähler gemessen. Mit dieser Methode kann z.B. noch weniger als 1 %o der maximal zugelassenen Tritiumaktivität im Körper bestimmt werden.

Die Bestimmung des Radiumgehalts im Menschen kann über die Direktmessung des ausgeatmeten Radons erfolgen. Das Radon wird in Kühlfallen absorbiert und in geeigneten Ionisationszählern direkt ausgemessen.

Auf gleichem Wege ist die Inkorporationsbestimmung von  $^{14}\text{C}$  über Exhalationsmessungen des  $\text{CO}_2$  möglich.

#### 6.2.3.2. Radiochemische Methoden

In den meisten Fällen ist eine radiochemische Abtrennung des betreffenden Radionuklids notwendig. In Einzelfällen ist die Benutzung inaktiver Träger-substanzen anwendbar.

So kann z.B. Urin zur Bestimmung von  $^{90}\text{Sr}$  mit einer bestimmten Menge inaktiven Strontiums versetzt werden und das Gemisch von inaktivem und aktivem Strontium durch Ausfällen eines Strontiumniederschlags abgetrennt werden. Die Messung wird zwar durch Selbstabsorption der Strahlung in der Trägersubstanz verfälscht, sie kann jedoch korrigiert werden, indem die absorbierende Menge durch Auswägen ermittelt und ein entsprechender Korrekturfaktor eingesetzt wird. Zur Strahlenmessung werden Proportionalzähler benötigt, die speziell für den Nachweis kleinster Aktivitätsmengen konstruiert wurden. Diese Methode ist allgemein bei  $\beta$ -Strahlern mit Energien oberhalb 500 keV anwendbar, weil die Absorption im Trägermaterial relativ gering ist.

Die radioaktive Abtrennung von  $\alpha$ -Strahlern muß dagegen ohne Trägermaterialien erfolgen, weil die  $\alpha$ -Strahlung bereits durch geringe Mengen Materie absorbiert wird und damit nicht mehr nachweisbar ist.

Diese Radionuklide müssen zur Messung trägerfrei präpariert werden und das setzt eine sehr sorgfältige Abtrennung voraus. Diese Abtrennung erfolgt auch hierbei durch Zusatz eines Fällungsmittels, das jedoch im Verlauf der weiteren Trennoperationen wieder entfernt werden muß. Der Endschritt der Präparation ist in den meisten Fällen die elektrolytische Abscheidung des Radionuklids auf Platin-, Silber- oder Stahlplättchen.

Die Aktivitätsmengen, die bei der routinemäßigen Inkorporationsüber-

wachung auf  $\alpha$ -strahlende Radionuklide noch festgestellt werden müssen, liegen im Bereich von 0.1 pCi. Um eine solch kleine Aktivitätsmenge statistisch gesichert messen zu können, sind Meßanordnungen notwendig, die hohe Zählausbeuten und einen extrem niedrigen Nulleffekt aufweisen. Auch dann sind Zählzeiten von mehreren Stunden erforderlich. Um bei Zwischenfällen schnell zu einem Meßergebnis zu kommen, sind Schnellmethoden entwickelt worden, die unter Einbuße an Empfindlichkeit das Meßergebnis einschließlich Trennoperation im Verlauf von ein bis zwei Stunden liefern.

### *6.3. Abschätzung der Höhe einer Inkorporation*

Zur Abschätzung der Höhe einer Inkorporation sind die Meßwerte von Inkorporationsmessungen heranzuziehen, die in 6.2. beschrieben wurden. Welche der Methoden benutzt werden, hängt von dem Radionuklid ab, das nachgewiesen werden soll.

Da die Abschätzung einer inkorporierten Menge möglichst rasch erfolgen soll, sind Methoden anzuwenden, die schnell ein Meßergebnis bringen. Das sind vor allem Messungen mit dem Ganz- oder Teilkörperzähler und vor allem Nasen-Rachen-Abstriche. Aus ihnen können die ersten Aussagen über das Ausmaß einer Inkorporation gemacht werden, die dann gegebenenfalls notwendige Interventionen (s. Kapitel 7) erforderlich machen.

Diese Aussagen geben jedoch noch nicht die endgültige Körperbelastung an, da die inkorporierte Aktivität zum Teil wieder ohne Resorption ausgeschieden wird. Zur genauen Abschätzung sind daher immer eine gewisse Anzahl von Meßergebnissen notwendig.

Zur groben Abschätzung der Körperbelastung bei Unfällen sollten jedoch auch andere Daten aus dem Unfallgeschehen herangezogen werden. Zwischenfälle mit Freisetzung großer Mengen radioaktiver Stoffe und hoher Inkorporationswahrscheinlichkeit zeigen sich durch äußere Ursachen an. Explosionen, ausströmende Gase oder beschädigte Teile sind deutlich erkennbar und die Auswirkungen meßbar. Erhöhte Luftaktivität wird in einer Luftüberwachungsanlage einen Alarm auslösen und es wird ein Meßwert registriert werden, der im Zusammenhang mit der betroffenen Person bereits einen ersten Anhaltspunkt für eine eventuelle Inkorporationshöhe gibt. Wischtests im betroffenen Bereich können weitere Anhaltspunkte für das Ausmaß der erwarteten Inkorporation geben.

Sind die maximal zugelassenen Konzentrationswerte der Luftaktivität und Kontamination nicht überschritten, brauchen weitere Inkorporationsmessungen nicht übereilt gemacht zu werden, da dann auch nicht mit unzulässig hohen Inkorporationen zu rechnen ist. Die maximal zugelassenen Luftaktivitäten sind für eine Auswahl von Radionukliden in Tabelle 1 zusammengestellt.

Besteht aufgrund der ersten Meßergebnisse der Verdacht einer Inhalation, dann sind Nasen-Rachen-Abstriche auf eventuelle Aktivität auszumessen. Im Groben kann daraus abgeschätzt werden, wie groß die eventuelle Inkorporation sein könnte. Die Tabelle in Kap. 2.1. gibt ein Beispiel für die zu erwartenden Werte. Die sofortige Ausmessung der Körperaktivität in einem Ganz- oder Teilkörperzähler ergibt für eine Reihe von Radionukliden sehr

schnell einen Meßwert. Zu beachten ist jedoch, daß jede äußere Kontamination der Haut vorher beseitigt ist (s. Kapitel 4).

Läßt sich das Radionuklid mit Hilfe des Ganzkörperzählers nicht nachweisen, sind zur genaueren Abschätzung der Körperaktivität Urin- und Stuhlproben über mehrere Tage hinweg lückenlos zu sammeln.

Aus den Ergebnissen der Ausscheidungsanalysen läßt sich unter Zuhilfenahme der Retentionsfunktion auf die Körperbelastung zur Zeit des Zwischenfalls schließen.

Urinproben sollen den gesamten Tagesurin umfassen. Sie werden zweckmäßigerweise in Polyäthylenflaschen von 2 Liter Inhalt gesammelt. Zur Konservierung der Urinprobe sind pro 500 ml Urin 30 ml einer 2 N-Salpetersäure zuzugeben.

Stuhlproben werden am besten in Plastikbeuteln gesammelt, die in geruchsdicht schließenden Behältern transportiert werden können.

Zeigen Nasenabstriche oder Wundmessungen einen unzulässig hohen Wert an, wird im allgemeinen sofort mit therapeutischen Maßnahmen zur beschleunigten Dekorporierung begonnen werden müssen (s. Kapitel 7 und 5). In diesen Fällen ist zu beachten, daß dadurch die Retentions- und Ausscheidungsfunktionen beeinflußt werden und daß die Bestimmung der tatsächlichen Inkorporationsmenge z.B. durch nachträgliche Urin- und Stuhlanalysen erheblich beeinträchtigt wird. Da die therapeutische Gabe von Komplexbildnern die Ausscheidung intensiviert, wird die Abschätzung der Inkorporationsmenge zu überhöhten Werten führen. Bei nachweislich geringem Inkorporationsverdacht sollte daher im Hinblick auf eine exakte Abschätzung der Körperbelastung die prophylaktische Gabe von Komplexbildnern unterlassen werden.

#### *Literatur:*

1. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 2 (1960) Pergamon Press
2. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 6 (1964) Pergamon Press
3. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 10 (1968) Pergamon Press
4. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection ICRP Pub. 10A (1971) Pergamon Press
5. *K.Z. Morgan*: "Proper Use of Information on Organ and Body Burdens of Radioactive Material"; Symposium on the Assessment of Radioactive Organ and Body Burdens, Stockholm, 1971
6. *H. Schieferdecker*: „Bestimmung von Radionukliden in biologischem Material (T,  $^{14}\text{C}$ , Po, U, Pu, Am, Cm und Cf)“ KFK 810 (1968)

Radionuklid	Kritisches Organ	maximal zugelassene Werte für		
		Körperbelastung [ $\mu\text{Ci}$ ]	Wasser- konzentration [ $\mu\text{Ci/ml}$ ]	Luft- konzentration [ $\mu\text{Ci/ml}$ ]
H-3 (HTO)	Körpergewebe	1000	$3 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-6}$
C-14	Fett	300	$8 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-6}$
Na-22	Gesamtkörper	10	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-9}$
Na-24	(Gesamtkörper)	(7)	$3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-8}$
P-32	Knochen	6	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$
S-35	Hoden	90	$6 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-8}$
Cl-36	Gesamtkörper	80	$6 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-9}$
Ca-45	Knochen	30	$9 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-8}$
Cr-51	Gesamtkörper	800	$2 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-7}$
Mn-54	Leber	20	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-8}$
Mn-56	(Bauchspeicheldrüse)	(2)	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-7}$
Fe-55	Milz	1000	$8 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-7}$
Fe-59	Milz	20	$5 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$
Co-60	Gesamtkörper	10	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-9}$
Ni-59	Knochen	1000	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-7}$
Ni-63	Knochen	200	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$
Cu-64	(Milz)	(10)	$2 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-7}$
Zn-65	Gesamtkörper	60	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-8}$
Sr-85	Gesamtkörper	60	$1 \times 10^{-3}$	$4 \times 10^{-8}$
Sr-89	Knochen	4	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
Sr-90 *	Knochen	2	$4 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-10}$
Y-90	(Knochen)	(3)	$2 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-8}$
Zr-95	Gesamtkörper	20	$6 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
Nb-95	Gesamtkörper	40	$1 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-8}$
Tc-99	(Nieren)	(10)	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-8}$
Ru-103	(Nieren)	(20)	$8 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-8}$
Ru-106	(Nieren)	(3)	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-9}$
Rh-103	(Nieren)	(200)	$1 \times 10^{-1}$	$2 \times 10^{-5}$
Ru-105	(Nieren)	(40)	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-7}$
Ag-110m	(Nieren)	(10)	$3 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-9}$
Cd-115m	Leber	3	$3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
Sb-125	Lungen	40	$1 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-9}$
J-131	Schilddrüse	0.7	$2 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-9}$
Cs-137	Gesamtkörper	30	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-9}$
Ba-140	Knochen	4	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
La-140	(Leber)	(9)	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-8}$
Ce-141	Leber	30	$9 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-8}$
Ce-144	Knochen	5	$1 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-9}$
Pm-147	Knochen	60	$2 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-8}$
Hf-181	Milz	4	$7 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
Ir-194	(Nieren)	(7)	$3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-8}$
Au-198	(Nieren)	(20)	$5 \times 10^{-4}$	$8 \times 10^{-8}$
Hg-203	Nieren	4	$2 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$

Radionuklid	Kritisches Organ	maximal zugelassene Werte für		
		Körperbelastung [ $\mu\text{Ci}$ ]	Wasserkonzentration [ $\mu\text{Ci/ml}$ ]	Luftkonzentration [ $\mu\text{Ci/ml}$ ]
Tl-204	Nieren	10	$6 \times 10^{-4}$	$9 \times 10^{-9}$
Pb-210	Nieren	0.4	$1 \times 10^{-6}$	$4 \times 10^{-11}$
Pb-212	Nieren	0.02	$2 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-9}$
Bi-210	Nieren	0.04	$4 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-9}$
Po-210	Milz	0.03	$7 \times 10^{-6}$	$7 \times 10^{-11}$
Ra-226	Knochen	0.1	$1 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-11}$
Ra-228	Knochen	0.06	$3 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-11}$
Ac-227	Knochen	0.03	$2 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-13}$
Th-232	Knochen	0.04	$2 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-13}$
Th-234	Knochen	4	$2 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-8}$
Th-nat	Knochen	0.01	$1 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-13}$
U-234	Knochen	0.05	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-11}$
U-235 *	Nieren	0.03	$4 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-11}$
U-238 *	Nieren	0.005	$6 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-11}$
U-nat *	Nieren	0.005	$6 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-11}$
Np-237	Knochen	0.06	$3 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-12}$
Pu-238	Knochen	0.04	$5 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-13}$
Pu-239	Knochen	0.04	$5 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-13}$
Pu-241	Knochen	0.9	$2 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-11}$
Pu-244 *	Knochen	0.04	$4 \times 10^{-5}$	$6 \times 10^{-13}$
Am-241	Knochen	0.05	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$
Am-242 *	Leber	0.06	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-8}$
Am-243	Knochen	0.05	$4 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$
Cm-242	Leber	0.05	$2 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-11}$
Cm-244	Knochen	0.1	$7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-12}$
Cf-252	Knochen	0.01	$7 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-12}$

\* nach Lit. [2]

Angaben in Klammern beziehen sich bei fehlender Nennung des kritischen Organs auf die niedrigste Körperbelastung des Radionuklids

**Tabelle 2**

*Nachweisgrenzen eines typischen Ganzkörperzählers mit einem 20 cm  $\Phi$  x 10 cm NaJ-Kristall nach J. Mehl und J. Rundo "Preliminary Results of a World Survey of Whole-Body monitors" Health Physics 9 (1963) 607-614*

**Tabelle 1**

*Maximal zulässige Richtwerte häufig vorkommender Radionuklide für beruflich strahlenexponierte Personen (für 168-h-Woche)*

- 10<sup>-5</sup> bis 10<sup>-4</sup>-fache der höchstzulassenen Körperaktivität:  
<sup>7</sup>Be, <sup>18</sup>F, <sup>47</sup>Sc, <sup>51</sup>Cr, <sup>54</sup>Mn, <sup>57</sup>Co, <sup>58</sup>Co, <sup>65</sup>Zn, <sup>74</sup>As, <sup>85</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr(D), <sup>95</sup>Nb,  
<sup>103</sup>Ru, <sup>113m</sup>In, <sup>125</sup>Sb, <sup>134</sup>Cs, <sup>136</sup>Cs, <sup>196</sup>Au, <sup>198</sup>Au, <sup>199</sup>Au, <sup>202</sup>Tl, <sup>203</sup>Pb,  
<sup>233</sup>Pa.
- 10<sup>-4</sup> bis 10<sup>-3</sup>-fache der höchstzulassenen Körperaktivität:  
<sup>22</sup>Na, <sup>24</sup>Na, <sup>42</sup>K, <sup>47</sup>Ca(D), <sup>46</sup>Sc, <sup>48</sup>Sc, <sup>48</sup>V, <sup>52</sup>Mn, <sup>59</sup>Fe, <sup>60</sup>Co, <sup>64</sup>Cu, <sup>72</sup>Ga,  
<sup>76</sup>As, <sup>77</sup>As, <sup>82</sup>Br, <sup>86</sup>Rb, <sup>97</sup>Zr(D), <sup>105</sup>Rh, <sup>110m</sup>Ag, <sup>110</sup>Ag, <sup>122</sup>Sb, <sup>124</sup>Sb,  
<sup>132</sup>Te(D), <sup>137</sup>Cs, <sup>140</sup>La, <sup>141</sup>Ce, <sup>154</sup>Eu, <sup>159</sup>Gd, <sup>160</sup>Tb, <sup>171</sup>Er, <sup>175</sup>Yb,  
<sup>186</sup>Re, <sup>192</sup>Ir, <sup>203</sup>Hg, <sup>239</sup>Np.
- 10<sup>-3</sup> bis 10<sup>-2</sup>-fache der höchstzulassenen Körperaktivität:  
<sup>56</sup>Mn, <sup>65</sup>Ni, <sup>69m</sup>Zn, <sup>97</sup>Nb, <sup>106</sup>Ru/<sup>106</sup>Rh, <sup>129m</sup>Te/<sup>129</sup>Te, <sup>126</sup>I, <sup>131</sup>I, <sup>132</sup>I,  
<sup>133</sup>I, <sup>140</sup>Ba(D), <sup>144</sup>Ce(D), <sup>142</sup>Pr, <sup>147</sup>Nd, <sup>170</sup>Tm, <sup>182</sup>Ta, <sup>188</sup>Re, <sup>207</sup>Bi/  
<sup>207m</sup>Pb.
- 10<sup>-2</sup> bis 10<sup>-1</sup>-fache der höchstzulassenen Körperaktivität:  
<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y, <sup>135</sup>I(D), <sup>166</sup>Ho, <sup>212</sup>Pb(ThB)(D), <sup>224</sup>Ra(ThX)(D), <sup>226</sup>Ra(D),  
<sup>228</sup>Ra (MsThI) (D), <sup>228</sup>Th(RdTh) (D), <sup>235</sup>U, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am(D), <sup>249</sup>Cf.
- 10<sup>-1</sup> bis 10<sup>0</sup>-fache der höchstzulassenen Körperaktivität:  
<sup>210</sup>Pb(RaD), <sup>223</sup>Ra(AcX)(D), <sup>228</sup>Ac(MsTh2)(D), <sup>227</sup>Th(RdAc)(D),  
<sup>237</sup>Np(D), <sup>243</sup>Cm, <sup>245</sup>Cm.

## 7. Erste ärztliche Maßnahmen bei Inkorporation von Radionukliden

A. Catsch

### 7.1. Allgemeine Gesichtspunkte und Richtlinien

Der Arzt sieht sich bei einer akuten Inkorporation eines radioaktiven Stoffes zunächst mit der Frage konfrontiert, ob eine Behandlung überhaupt notwendig ist. Eine absolute Indikation zu einem therapeutischen Eingreifen ist natürlich dann gegeben, wenn mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit das Auftreten akuter oder chronischer Strahlenschäden erwartet werden kann. Liegt die inkorporierte Radioaktivität in der Größenordnung des von der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) angegebenen Richtwerts für den maximal zulässigen Gehalt des jeweiligen Radionuklids im Körper (vgl. Tabelle 1 im Beitrag von *Schieferdecker*), dürfte die Einleitung therapeutischer Maßnahmen ebenfalls indiziert, zumindest in Erwägung zu ziehen sein, obwohl in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit der Strahlenschäden als vernachlässigbar klein anzusehen ist.

Die Antwort auf die eingangs gestellte Frage scheint somit auf den ersten Blick eindeutig und problemlos zu sein. In Wirklichkeit jedoch ergeben sich gewisse Schwierigkeiten:

a) Die oben erwähnten Richtwerte der ICRP beziehen sich auf den Radionuklidgehalt im sog. *kritischen Organ*, d.h. demjenigen Organ bzw. Gewebe, dessen Schädigung durch die aufgenommene Radioaktivität sich am nachteiligsten für den Gesamtzustand des Betroffenen auswirkt. In der Regel wird hierbei angenommen, daß die Resorption des Radionuklids abgeschlossen ist, indem der Richtwert sich auf die Verteilung der *resorbierten* Fraktion bezieht. Bezüglich der maximal zulässigen Konzentration in umschriebenen Gewebsabschnitten (wie z.B. bei kontaminierten Verletzungen) oder bezüglich der Retention inhalierter und schwer resorbierbarer Partikel in der Lunge dagegen werden keine oder nur unzureichend begründete Angaben gemacht. Es wird allerdings damit gerechnet, daß die ICRP zu diesem Fragenkomplex 1973 Richtwerte vorschlagen wird.

b) Wie in einem späteren Zusammenhang noch ausgeführt wird, ist die therapeutische Effektivität aller Antidote ausnahmslos umso größer, je kürzer die Zeitspanne zwischen ihrer Verabfolgung und der Inkorporation des Radionuklids ist. Eine relativ schnelle Bestimmung der Menge der inkorporierten Radioaktivität ist nur mit Hilfe externer Strahlendetektoren möglich. Unerläßliche Voraussetzungen hierbei sind eine ausreichend hohe Nachweisempfindlichkeit der Meßanordnung sowie eine geeignete Strahlungscharakteristik des inkorporierten Radionuklids (vg. hierzu den Beitrag von *Schieferdecker*). Diese Bedingungen sind jedoch oft nicht erfüllt, und in diesen Fällen ist man darauf angewiesen, den Gehalt des Radionuklids im Körper aufgrund einer Analyse der Zeitabhängigkeit der Ausscheidungsrate

abzuschätzen. Eine solche Analyse der Ausscheidungskinetik setzt jedoch voraus, daß Ausscheidungsdaten für eine Zeitspanne von mindestens einer Woche zur Verfügung stehen. Man wäre folglich gezwungen, einen Verlust an therapeutischer Effizienz in Kauf zu nehmen.

c) Die von parenteral verabfolgten Antidoten bewirkte Intensivierung der Radionuklidausscheidung beeinflußt in der Regel auch das Verteilungsmuster des Radionuklids, damit aber auch den Charakter der Ausscheidungsfunktion. Es werden somit Verhältnisse geschaffen, die sich von denen bei einem unbehandelten Inkorporationsfall wesentlich unterscheiden. Durch diesen Sachverhalt wird jedoch eine *nachträgliche* Abschätzung des Radionuklidgehalts im Körper mittels einer Analyse der Ausscheidungsfunktion unmöglich, zumindest jedoch erschwert.

Es soll nun im folgenden versucht werden, Richtlinien für das Vorgehen in der Praxis unter Berücksichtigung der unter a)–c) dargelegten Verhältnisse zu formulieren. Diese Empfehlungen betreffen zunächst nur die Frage, ob therapeutische Maßnahmen überhaupt indiziert sind, während die Art der Maßnahmen bzw. Antidote später besprochen wird.

Der Arzt muß zunächst versuchen, möglichst schnell zu einer Abschätzung des Risikos zu gelangen, das sich für den Betroffenen aus der Inkorporation ergibt. Daß hierbei den mit externen Strahlendetektoren erhaltenen Meßergebnissen eine wesentliche Bedeutung zukommt, versteht sich von selbst. Wegen des unter a) dargestellten Sachverhalts werden sie jedoch häufig die gewünschte Information nicht liefern können, so daß man in diesem Fall und erst recht, wenn eine externe Strahlungsmessung aus grundsätzlichen oder äußeren Gründen nicht durchführbar ist, gezwungen ist, sich auf anderem Wege eine Vorstellung über die Größe des Risikos zu verschaffen. In der Regel sollte es möglich sein, den Hergang und die Begleitumstände des Zwischenfalls, der die Inkorporation von Radioaktivität zur Folge hatte, zu rekonstruieren und Aussagen zu folgenden Punkten machen zu können:

1. Der genaue Zeitpunkt des Zwischenfalls,
2. der sog. Inkorporationsmodus, d.h. Inhalation und/oder Kontamination einer Verletzung und/oder Aufnahme über den Magen-Darmtrakt (Ingestion),
3. Art und chemische Verbindung des Radionuklids,
4. Menge des beim Unfall freigesetzten radioaktiven Materials (Lösung, Substanz) und/oder die Konzentration des Radionuklids in dem Material, mit dem der Betroffene während des Zwischenfalls arbeitete.

Es gilt *ceteris paribus*, daß Nuklide, die a) eine Strahlung mit hohem LET, wie  $\alpha$ -Teilchen, emittieren (vgl. hierzu den Beitrag von Müller), b) eine große effektive Halbwertszeit im Körper besitzen und c) sich bevorzugt in besonders strahlenempfindlichen Geweben ablagern, eine höhere Radiotoxizität besitzen als Radionuklide mit niedrigem LET, kurzer effektiver Halbwertszeit bzw. mit anderem Verteilungsmuster. Bezüglich weiterer Einzelheiten wird auf monographische Darstellungen (e.g. Catsch 1966) verwiesen. In diesem Zusammenhang genügen die in der Tabelle 1 (Beitrag von Schiefer-decker) angeführten Richtwerte für den maximal zulässigen Gehalt von Radionukliden im menschlichen Körper, bei denen die Unterschiede in ihrer Toxizität sehr klar zum Ausdruck kommen.



Der Inkorporationsmodus hängt mit der Frage der Resorption eng zusammen. Gelangt die Radioaktivität primär in den Magen-Darmtrakt, ist das kritische Organ, wenn man von dem extremen Fall der Ingestion sehr großer Aktivitätsmengen absieht, nicht der Intestinaltrakt, sondern ein Organ, in dem die *resorbierte* Fraktion des Radionuklids abgelagert wird. Dies bedeutet, daß die Toxizität eines Radionuklids – wiederum *ceteris paribus* – proportional zu seiner enteralen Resorptionsrate ist. Die Resorption von  $^3\text{H}_2\text{O}$ , der radioaktiven Isotope von J, Cs und anderer Alkalimetalle ist annähernd 100 %, die der radioaktiven Isotope der Erdalkalien  $\geq 10$  %, während sie im Falle der Lanthanide und Transurane  $< 0,01$  % beträgt. Diese Werte können insofern nicht mehr als nur grobe, orientierende Angaben angesehen werden, als die Resorptionsrate von biologischen Faktoren, wie z.B. dem Alter, abhängt, vor allem aber davon, in welcher chemischen Verbindung das inkorporierte Radionuklid vorliegt. Dies sei durch ein Beispiel belegt: Die Resorption von Pu(IV)-Nitrat beträgt  $\sim 0,003$  %, kann aber, falls Pu in einer komplexierten Form, z.B. als Citrat, vorliegt, um 2–3 Größenordnungen höher liegen.

Bei radioaktiv kontaminierten Verletzungen wird ein unlösliches und/oder schlecht resorbierbares „Depot“ im Gewebe günstiger als die Kontamination mit einem leicht resorbierbaren Radionuklid zu bewerten sein; allerdings nur dann, wenn eine vollständige chirurgische Entfernung des kontaminierten Gewebes möglich ist und auch vorgenommen wird. Anderenfalls muß mit der Möglichkeit lokaler Strahlenschäden gerechnet werden und es liegt auf der Hand, daß in einem Fall, bei dem die Exzision des Depots nicht möglich ist, die Inkorporation eines schnell resorbierbaren Radionuklids die weniger gefährliche Situation darstellt, da uns hier Antidote zur Verfügung stehen, mit deren Hilfe eine Dekorporation des resorbierten Radionuklids erreicht werden kann.

Bei Inhalation radioaktiver Stoffe stehen uns keine Möglichkeiten zur Verfügung, die in den tieferen Abschnitten des Atemtrakts abgelagerten und schwer resorbierbaren Partikel zu entfernen. (Es ist überaus fraglich, ob die in der letzten Zeit in diesem Zusammenhang diskutierte „Lungenspülung“ sich als eine risikofreie praktikable Maßnahme erweisen wird.) Es liegt somit auf der Hand, daß die Inhalation leicht resorbierbarer Radionuklide, die mittels entsprechender Antidote aus den Organen und Geweben mobilisiert werden können, ein geringeres Risiko darstellt als ein persistierendes „Depot“ in der Lunge mit einer entsprechenden lokalen Strahlenschädigung. Bei Inhalationszwischenfällen ist schließlich zu beachten, daß es obligat auch zu einer Aufnahme des Radionuklids in den Magen-Darmtrakt kommt. Dies hängt damit zusammen, daß Partikel mit einem Durchmesser von  $> 2 \mu\text{m}$  im Nasenrachenraum bzw. in den oberen Abschnitten des Atemtraktes zurückgehalten und aus den letzteren durch das Flimmerepithel relativ schnell nach oben befördert und verschluckt werden.

Unter Berücksichtigung der vorstehend dargelegten allgemeinen Gesichtspunkte sowie der jeweiligen konkreten Situation kann nun die Einstufung eines Inkorporationsfalles in eine der drei nachstehenden Gruppen vorgenommen werden:

a) Bagatellfälle, bei denen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit

angenommen werden kann, daß die inkorporierte Radioaktivitätsmenge sehr niedrig ist und weit unterhalb des maximal zulässigen Grenzwertes liegt. Dementsprechend erübrigen sich therapeutische Maßnahmen.

b) Fälle, bei denen mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit die Inkorporation einer eindeutig über dem maximal zulässigen Grenzwert liegenden Menge vorliegt. Hier, aber bereits auch bei dem begründeten Verdacht, daß der Grenzwert geringfügig überschritten oder erreicht sein könnte, sind sofort therapeutische Maßnahmen einzuleiten. Dies gilt auch für diejenigen Fälle, bei denen osteotrope und deshalb im Hinblick auf Strahlenspät Schäden potentiell besonders gefährliche Radionuklide (Sr, Lanthanide, Y, Pu und andere Transurane) in einer Menge inkorporiert werden, die nur 50 % der maximal zulässigen Dosis ausmacht.

c) Fälle, die sich weder in a) noch b) einordnen lassen, d.h. die inkorporierte Radioaktivität erreicht aller Wahrscheinlichkeit nach zwar nicht den Grenzwert bzw. macht eine Gefährdung des Betroffenen wenig wahrscheinlich, ist aber auf der anderen Seite auch als nicht vernachlässigbar zu bezeichnen, indem sie beispielsweise 1/10 der maximal zulässigen Dosis ausmacht. Bei so gelagerten Fällen halten wir therapeutische (besser gesagt, prophylaktische) Maßnahmen zwar für indiziert, sehen jedoch keine zwingende Notwendigkeit für ein *sofortiges* Eingreifen. Anders ausgedrückt, halten wir es für zweckmäßiger, hier den Belangen der „Diagnostik“ zunächst den Vorrang zu geben und unter Heranziehung aller zur Verfügung stehender Methoden, wie z.B. der Analyse der Ausscheidungsfunktion, einen Schätzwert für die inkorporierte Menge zu erhalten. Erst dann sollte die Entscheidung getroffen werden, ob eine Therapie erforderlich ist.

## 7.2. Therapeutische Maßnahmen

### 7.2.1. Einleitende Bemerkungen

Das Ziel der therapeutischen Maßnahmen ist die möglichst vollständige und schnelle Entfernung des inkorporierten Radionuklids aus dem Körper, die sog. *Dekorporation*. Bevor wir auf Einzelheiten eingehen, halten wir es für zweckmäßig, einige allgemein gültige Hinweise zu geben.

Unabhängig davon, welche Antidote im einzelnen und zu welchem Zeitpunkt sie verabfolgt werden, sollten die 24 Stunden-Ausscheidungen, d.h. Urin und Faeces, gesammelt und auf ihren Radionuklidgehalt hin untersucht werden. Da die Wirkung der Antidote sich unter Umständen über mehrere Tage erstrecken kann, ist es wichtig, daß die Ausscheidungen ebenfalls über mehrere Tage untersucht werden; auch dann, wenn das Antidot nur einmalig verabreicht wird. Die Meßwerte werden benötigt, um sowohl die Größe des therapeutischen Effekts als auch der inkorporierten Radioaktivitätsmenge abschätzen zu können. Falls die Untersuchungen wegen Fehlens der notwendigen Apparaturen nicht an Ort und Stelle durchgeführt werden können, sollten die Ausscheidungen entsprechend ausgerüsteten Laboratorien eingesandt werden (zu erfragen bei der zuständigen Genehmigungsbehörde des jeweiligen Landes).

Wir beschränken uns im folgenden auf die Empfehlungen nur solcher Antidote, für die bereits humanmedizinische Erfahrungen vorliegen und die als pharmazeutische Spezialpräparate kommerziell erhältlich sind bzw. vom



Unwirksam bzw. anderen Antidoten eindeutig unterlegen ist DTPA bei allen oben nicht angeführten Metallen, insbesondere bei den Radioisotopen der Alkalimetalle (z.B. Cs) und Erdalkalien (Ba, Sr, Ra).

Unabhängig davon, um welches Radionuklid es sich im einzelnen handelt, lassen sich bezüglich des Wirkungsmusters von DTPA einige allgemein gültige Charakteristika herausstellen. Die Wirksamkeit, d.h. der zur Ausscheidung gebrachte Bruchteil des inkorporierten Radionuklids nimmt in mehr oder weniger starkem Maße mit zunehmender Zeitspanne zwischen DTPA-Verabfolgung und Inkorporation ab, wobei die Zeitabhängigkeit der Effektivität für das im Skelett abgelagerte Radionuklid in der Regel stärker ausgeprägt ist als bei den anderen Organen. Entsprechend dem oben kurz charakterisierten Verhalten von DTPA im Organismus, werden die durch DTPA mobilisierten Radionuklide überwiegend mit dem Urin und der größte Teil innerhalb von 24 Stunden ausgeschieden. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß auch die faecale Ausscheidung von Radionukliden durch DTPA intensiviert wird und daß die Steigerung der Ausscheidung sowohl durch die Nieren als auch mit den Faeces sich nicht nur auf die ersten 24 Stunden beschränkt, sondern – allerdings in erheblich geringerem Maße – auch während der darauffolgenden 2–3 Tage anhält. Die Abhängigkeit der Wirksamkeit von der DTPA-Dosis ist – dies gilt vor allem für die uns hier interessierende *erste* und *frühzeitige* Verabfolgung – relativ stark ausgeprägt, so daß man im Rahmen der „Ersten Hilfe“ möglichst hoch dosieren wird. DTPA ist ein gut verträgliches Arzneimittel, und unerwünschte Nebenwirkungen stellen die Ausnahme dar. Es handelt sich um unspezifische und wieder schnell verschwindende Symptome im Sinne einer „Unverträglichkeitsreaktion“, wie sie auch bei anderen Medikamenten auftreten können. Im einzelnen wurden Müdigkeit, Unwohlsein, Durst, Parästhesien, Rhinitis vasomotorica, Fieber, Myalgien, Ex- und Erantheme beobachtet. Bei chronischer Verabfolgung von DTPA liegen die Verhältnisse insofern etwas anders, als in diesem Fall bei sehr hoher Dosierung Schäden der Darmmucosa und der Nieren (vom nephrotischen Typ) ausgelöst werden, so daß nach allgemein vorherrschender Ansicht Erkrankungen der Nieren als Kontraindikation im Falle einer DTPA-Therapie angesehen werden. Wir halten es deshalb für angezeigt, nachdrücklich zu betonen, daß bei einem *akuten* Unfall und bei Einordnung in die Risikogruppe b) (s. Abschnitt 7.1., S.125) etwaige Bedenken gegen eine DTPA-Verabfolgung entfallen und es *keine* Kontraindikationen gibt. Als optimal wirksame und gleichzeitig sichere Dosierung empfehlen wir 2 g  $\text{Na}_3\text{Ca-DTPA}$  pro Tag und, was die Applikationsart betrifft, in der Regel die intravenöse Verabfolgung. Zur Vermeidung thrombophlebitischer Reaktionen und der oben erwähnten unspezifischen Symptome ist es zweckmäßig, die Gesamtdosis von 2 g in physiologischer Kochsalzlösung oder 5 %iger Glucose verdünnt und relativ langsam zu injizieren. Die Dauer der Infusion sollte mindestens 30 Minuten und höchstens 3 Stunden betragen. Die DTPA-Konzentration in der Infusionslösung und das Gesamtvolumen werden sich nach den örtlichen apparativen Möglichkeiten richten und sind im Prinzip unwesentlich; zu fordern ist nur, daß die DTPA-Konzentration nicht größer als 3 % ist. Ist eine intravenöse *Infusion* aus technischen oder äußeren Gründen nicht durchführbar, so daß man auf die intravenöse *Injektion* angewiesen ist, sollte die Gesamtdosis auf 0,5 g (maximal 1 g) reduziert und,

in 20 ml 5 %iger Glucose verdünnt, möglichst langsam injiziert werden. Ist auch die intravenöse Injektion nicht durchführbar, kommt nur die intramuskuläre Injektion in Frage; mindestens 1 g und maximal 2 g (das entspricht 5 bzw. 10 ml Ditripentat-Heyl<sup>®</sup>) werden ohne weitere Verdünnung tief intraglutäal injiziert. Wegen der Schmerzhaftigkeit der DTPA-Lösung empfiehlt sich der Zusatz von Procain. Eine weitere Applikationsmöglichkeit (allerdings, wie weiter unten ausgeführt, mit nur einer speziellen Indikationsstellung) ist die Verabreichung von DTPA als Aerosol. Die Dosis pro Inhalation beträgt 2 g; eine Verdünnung des Ditripentat-Heyl<sup>®</sup> ist nicht erforderlich. Die meisten handelsüblichen Aerosolgeneratoren, die Tröpfchen mit einem Durchmesser von 0,5–5  $\mu\text{m}$  zu erzeugen imstande sind, können verwendet werden.

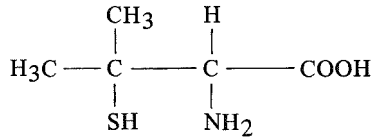
Das Behandlungsschema im einzelnen hängt vom Inkorporationsweg ab, nicht aber von der Art des inkorporierten Radionuklids (vgl. hierzu die Aufzählung auf S.137).

*Ingestion:* Solange das Radionuklid sich noch im Magen-Darm-Trakt befindet, ist sowohl die orale als auch die parenterale Verabreichung von DTPA kontraindiziert. Die orale deswegen, weil die enterale Resorption der Metallchelate mit rund 5 % größer ist als die des nicht komplexierten Radionuklids. Auch bei parenteraler Verabfolgung besteht die Gefahr, daß eine höhere DTPA-Konzentration im Blutplasma und im extracellulären Wasser die Resorption des Radionuklids begünstigen könnte.

*Kontamination von Verletzungen:* Wir verweisen hier auf die ausführliche Behandlung dieses Fragenkomplexes in dem Beitrag von *Ohlenschläger*, demzufolge die Exzision des radioaktiv kontaminierten Gewebes im Vordergrund der therapeutischen Maßnahmen steht und der Verabfolgung von DTPA eine nur unterstützende Bedeutung zukommt. Ist die chirurgische Entfernung des Depots nicht möglich oder nur unvollständig durchführbar, ist eine DTPA-Therapie jedoch der einzige Weg, die Radioaktivität aus dem Körper zu entfernen. Man muß sich hier allerdings darüber im klaren sein, daß parenteral appliziertes DTPA im wesentlichen nur die resorbierte Fraktion des Radionuklids zur Ausscheidung bringt, während die Beschleunigung der Resorption aus dem Depot selbst nach bisherigen tierexperimentellen Daten umstritten ist bzw. bei einer einmaligen DTPA-Dosis praktisch nicht ins Gewicht fällt. Mit anderen Worten, liegt in so gelagerten Fällen eine absolute Indikation für eine länger dauernde DTPA-Behandlung vor.

*Inhalation:* Als Sofortmaßnahme empfehlen wir die Inhalation eines DTPA-Aerosols mit anschließender intravenöser Injektion. Obwohl von der inhalierten DTPA-Dosis nur ein kleinerer und nicht genau bekannter Bruchteil in den Lungenalveolen zurückgehalten und resorbiert wird, dürfte es doch zweckmäßig sein, die Dosierung bei der intravenösen Injektion auf 1 g zu reduzieren. Besteht keine Möglichkeit der DTPA-Inhalation, werden initial 2 g DTPA injiziert.

Bei einigen Metallionen ist DTPA unwirksam bzw. eindeutig schwächer wirksam als Chelatbildner mit einer oder mehreren Sulfhydrylgruppen. Von der Vielzahl entsprechender Verbindungen hebt sich wegen seines hohen therapeutischen Index und wegen der Möglichkeit einer oralen Applikation besonders vorteilhaft das *D-Penicillamin* hervor:



Es ist als apothekenpflichtiges Arzneimittel unter der Bezeichnung Metalcaptase<sup>®</sup> (Heyl & Co. – Knoll AG.) erhältlich, und zwar für orale Verabfolgung als Tabletten zu 0,3 g D-Penicillamin. Für intravenöse Injektion stehen Flaschen zu 1,23 g D-Penicillamin und Ampullen mit 10 ml Lösungsmittel zur Verfügung.

Über das Verhalten von D-Penicillamin im Organismus ist bisher nur bekannt, daß es aus dem Magen-Darmtrakt zu etwa 60 % resorbiert wird. Die resorbierte Fraktion bzw. intravenös injiziertes D-Penicillamin werden praktisch vollständig und vorwiegend mit dem Urin ausgeschieden.

D-Penicillamin ist bei Inkorporation folgender Metallionen wirksam und indiziert:

Co, Cu, Hg, Po.

Im Rahmen der Ersten-Hilfe sollte die Dosierung hoch gewählt werden, und zwar bei intravenöser Injektion 1,23 g, während bei oraler Applikation pro Tag 1,8 g gegeben werden, und zwar in zwei Fraktionen zu je 0,9 g mit einem Zeitintervall von 3 bis 5 Stunden.

In allen anderen Beziehungen, die das Behandlungsschema in Abhängigkeit vom Inkorporationsweg betreffen, können die Überlegungen und Schlußfolgerungen für DTPA ohne Änderungen übernommen werden. D-Penicillamin ist gut verträglich, und unerwünschte Nebenwirkungen sind relativ selten; sie treten überdies nur im Laufe einer Langzeittherapie auf. Es bestehen somit in dem hier zur Diskussion stehenden Rahmen keine Kontraindikationen gegen die Verabfolgung von D-Penicillamin.

### 7.2.3. Orale Antidote

Unter „oralen Antidoten“ werden hier solche Verbindungen subsumiert, die radioaktive Metallionen im Magen-Darmtrakt durch Adsorption, Copräzipitation oder Ionenaustausch binden und damit deren Resorption hemmen. Daß die Antidote hierzu peroral verabfolgt werden müssen, ergibt sich aus der Zielsetzung von selbst. Ihre Anwendung ist natürlich auch nur dann sinnvoll und indiziert, wenn das Radionuklid durch Ingestion inkorporiert wird und wenn das Antidot frühzeitig nach Inkorporation verabfolgt werden kann. Ein vorheriges sorgfältiges Ausspülen des Rachenraums und Aushebern des Mageninhalts sind angezeigt. Ist das letztere aus äußeren Gründen nicht durchführbar, sollte Erbrechen durch mechanische Irritation oder Injektion eines Emetikums (z.B. Apomorphin) provoziert werden. Gleichzeitig mit den weiter unten angeführten Antidotien sollte als Laxans (zur Herabsetzung der lokalen Strahlenbelastung des Darms) Magnesium sulfuricum (20 g in 1/2 l Wasser) oder 1 Teelöffel Magnesia usta verabfolgt werden. Wir hatten in einem früheren Zusammenhang (S.127) erwähnt, daß auch nach Inhalation mit dem Auftreten von Radionukliden im Magen-Darmtrakt gerechnet werden muß. Dies bedeutet, daß die oralen Antidote auch bei

Inhalationszwischenfällen gegeben werden sollten; auf die anderen Maßnahmen dagegen kann verzichtet werden.

Bezüglich der Transurane ist ein Hinweis angezeigt. Ihre Resorption aus dem intestinalen Trakt ist so niedrig (im Falle von Pu beispielsweise  $\sim 0,003\%$ ), daß die Verabfolgung oraler Antidote als unnötig angesehen werden könnte. Dem ist jedoch die sehr hohe Toxizität der Transurane entgegenzuhalten, so daß auf eine Herabsetzung der Resorption nur bei eindeutigen Bagatellfällen verzichtet werden darf.

Bei bestimmten Radionukliden sind orale Antidote generell und von dem Inkorporationsweg unabhängig angezeigt, und zwar bei Isotopen von solchen Elementen, die einen sog. enteralen Zyklus aufweisen, d.h. in den Darm ausgeschieden werden, hier aber einer Rückresorption unterliegen. Unter der Voraussetzung, daß sowohl die Ausscheidungs- als auch Rückresorptionsrate groß sind, kann durch über längere Zeit verabfolgte orale Antidote ein beachtlich hoher Dekorporationseffekt erzielt werden. Nach bisher vorliegenden Erfahrungen sind die obigen Voraussetzungen bei Cs, Rb und Tl erfüllt, und es liegen auch entsprechend positive Befunde vor.

Die Wahl des oralen Antidots hängt von der Art des inkorporierten Radionuklids ab, und im einzelnen kommen folgende Verbindungen in Frage:

*Barium sulfuricum purissimum ad usum internum* ( $\text{BaSO}_4$ ) bei Ingestion von Ra und radioaktiven Isotopen von Sr. Für die Einzeldosis werden 100 g  $\text{BaSO}_4$  (erhältlich als Röntgenkontrastmittel) in 250 ml Wasser suspendiert. Um die Wirksamkeit des  $\text{BaSO}_4$  zu erhöhen, hat es sich als zweckmäßig herausgestellt, in dem für die Suspension verwendeten Wasser vorher Natrium sulfuricum zu lösen, und zwar 0,5 g des kristallischen  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$  (Glaubersalz). Die Erhöhung der Wirksamkeit beruht nicht allein auf der abführenden Wirkung von  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , sondern – wie aus in vitro-Versuchen hervorgeht – auf einer echten Erhöhung der Adsorptionskapazität des  $\text{BaSO}_4$ . In diesem Fall erübrigt sich die Verabfolgung anderer Laxativa. Eine nur geringfügig schwächere Wirkung auf die Sr-Resorption zeigen *Alginate*. Während man im Falle einer Ingestion dem  $\text{BaSO}_4$  den Vorzug geben sollte, sind bei Inhalation, welche die Verabfolgung eines oralen Antidots über mehrere Tage erforderlich macht, zur Vermeidung einer Obstipation und aus geschmacklichen Gründen *Alginat-Präparate* vorzuziehen. Die verschiedenen kommerziell erhältlichen Alginate unterscheiden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und in ihrer biologischen Wirksamkeit. Nach bisherigen Erfahrungen zeigt ein unter der Bezeichnung Manucol SS/LD/2 erhältliches Na-Alginat einen besonders stark ausgeprägten Effekt; es wird von Alginate Industries Ltd., London, hergestellt und kann von K.D. Feddersen, Hamburg 11, Postfach 1760, bezogen werden. Die Einzeldosis, die zweimal täglich verabfolgt wird, beträgt 10 g in 200 ml Aqu. destill. aufgeschwemmt (evtl. Zusatz von Geschmackskorrigentien).

Ein äußerst wirksamer Ionenaustauscher für einwertige Metallionen und das Antidot der Wahl für Rb, Cs und Tl ist *Ferrihexacyanoferrat (II)*, als apothekenpflichtiges Spezialpräparat (Kapseln zu je 0,5 g) als Radiogardase-Cs<sup>®</sup> bzw. Antidotum Thallii<sup>®</sup> (Heyl & Co.) erhältlich. Ferrihexacyanoferrat (II) ist, wenn man von einer gelegentlich auftretenden Obstipation absieht, sehr gut verträglich und frei von jeglichen unerwünschten Nebenwir-

kungen. Die Dosis sollte im Falle einer akuten Ingestion 6 g betragen; die Kapseln werden mit reichlich Flüssigkeit (etwa 100–200 ml) eingenommen. Im Falle der Dauerbehandlung, die, wie oben erwähnt, bei *jedem* Inkorporationsmodus indiziert und absolut unproblematisch ist, wird 3 mal täglich je 1 g eingenommen.

Bei Ingestion von Lanthaniden und Transuranen ist zu berücksichtigen, daß sie im Magen-Darmtrakt sowohl in kationischer als auch anionischer Form vorliegen können. Diesem Umstand ist bei der Wahl der als orales Antidot zu verabreichenden *Ionenaustauscher-Harze* Rechnung zu tragen. Wir empfehlen die Einnahme von je 10 g von: a) Dowex 50 W X 12 100–200 mesh, b) Dowex 1 X 8 100–200 mesh und c) Dow Chelating Resin A 1 50–100 mesh. In allen Fällen sollten Harze vom p.a.-Reinheitsgrad verwendet werden (zu beziehen über Serva GmbH. & Co., Heidelberg). Die Gesamtmenge, d.h. insgesamt 30 g, wird mit reichlich Flüssigkeit eingenommen.

#### 7.2.4. Isotopische Verdünnung

Die Tatsache, daß Radionuklide in der Regel in sog. trägerfreier Form oder in relativ hoher spezifischer Aktivität vorliegen, eröffnet die Möglichkeit, durch isotopische Verdünnung, d.h. durch Verabfolgung des nichtradioaktiven Isotops des gleichen Elements, die Ablagerung des Radionuklids in den Geweben herabzusetzen und seine Ausscheidung aus dem Körper zu intensivieren. Der Wirkungsmechanismus der isotopischen Verdünnung besteht darin, daß die für die Bindung des jeweiligen Elements verantwortlichen Akzeptorgruppen in beschränkter Konzentration vorliegen und leicht abgesättigt werden können oder daß die physiologische Konzentration eines Elements bzw. seine Einbaurate in eine bestimmte biologische Verbindung durch homeostatische Regulation weitgehend konstant gehalten werden. Voraussetzung dafür, daß das Prinzip der isotopischen Verdünnung therapeutisch wirksam werden kann, ist, daß bei der Dosierung des stabilen Isotops keine toxischen Wirkungen auftreten und daß infolge Überschreitung bestimmter Löslichkeitsprodukte keine unlöslichen Verbindungen entstehen.

Positive Erfahrungen mit isotopischer Verdünnung wurden bisher bei Inkorporation radioaktiver Isotope von H, Na, Sr und J erzielt.

Wird *Tritium* in Form von  $^3\text{H}_2\text{O}$  inkorporiert, so kann seine biologische Halbwertszeit durch reichliche Zufuhr von Flüssigkeit (etwa das 5-fache des normalen Konsums) verkürzt werden.

Eine Verkürzung der biologischen Halbwertszeit von *Radionatrium* resultiert auch bei Anreicherung der Nahrung mit etwa 20 g Kochsalz pro Tag, das die oberste Grenze darstellen dürfte.

Unter der Voraussetzung einer frühzeitigen Verabfolgung bewirkt Sr-Gluconat eine gewisse Hemmung der Retention von *Radiostrontium* durch das Skelett. Sr-Gluconat ist bisher noch nicht als medizinisches Präparat erhältlich, kann aber durch Ca-Gluconat ersetzt werden, dessen Wirksamkeit allerdings etwas schwächer als die des Sr-Präparats ist. Die intravenöse Einzeldosis entspricht 10 mg Ca; das apothekenpflichtige Präparat (Calcium-Sandoz®) enthält 9 mg Ca pro 1 ml einer 10 % Lösung. Die Dosis kann innerhalb von



24 Stunden 2 mal wiederholt werden. Zur Potenzierung des Effekts empfiehlt sich die orale Verabfolgung von 8 g Ammonium chloratum.

Um die Anreicherung von *Radiojod* in dem kritischen Organ, der Schilddrüse, zu reduzieren und seine Ausscheidung aus dem Körper zu intensivieren, hat sich die orale Verabfolgung von Kalium jodatum („MBK“<sup>®</sup>-Compretten) bewährt, und zwar in einer Dosis von 3 mal tgl. 0,3 g. Bei Vorliegen einer J-Unverträglichkeit sollte anstelle KJ Natriumperchlorat (Irenat<sup>®</sup>-Troponwerke) verabreicht werden. Das Perchlorat-Anion fungiert als Konkurrent zum J. Die Dosierung des Irenat beträgt 3 mal tgl. 15 Tropfen mit Wasser verdünnt. Die Bindung des Radiojod durch die Schilddrüse erfolgt relativ schnell, und bei bereits erfolgter Fixierung, d.h. bei nachträglicher Verabfolgung der Antidote, zeigen weder Kaliumjodid noch Natriumperchlorat einen gesicherten Einfluß auf die biologische Halbwertszeit von Radiojod in der Schilddrüse. Dagegen scheint die Verabfolgung von Thyreostatica (Thyreostat<sup>®</sup>=Methylthiouracil) die Verweilzeit des Radiojod zu verkürzen. Die Dosierung beträgt 2 mal täglich 0,025 g.

#### 7.2.5. Abschließende Bemerkungen

Entsprechend der Thematik dieses Bändchens beschränkten wir uns in den Abschnitten 7.2.2.–7.2.4. auf die Darstellung der als „Erste Hilfe“ zu bezeichnenden Maßnahmen. Es sollte deshalb hier nachdrücklich unterstrichen werden, daß in der Regel eine einmalige bzw. kurzfristige Verabfolgung von Antidotem für die Erzielung eines voll befriedigenden therapeutischen Effekts nicht ausreichend ist und somit eine länger dauernde Medikation erforderlich wird. Für den letzteren Fall kommen zwar nur die gleichen Antidote in Betracht, jedoch ergeben sich dabei spezifische Probleme, welche die Optimierung des Behandlungsschemas und insbesondere die Vermeidung unerwünschter Nebenwirkungen betreffen. Bezüglich dieses Fragenkomplexes verweisen wir auf die detaillierte Darstellung bei *Catsch* (1968). Ob die länger dauernde Behandlung an Ort und Stelle durchgeführt werden kann oder eine Überweisung an eine Spezialabteilung notwendig ist, kann generell nicht entschieden werden, doch dürfte in der Regel dem letzteren der Vorzug gegeben werden. Auf jeden Fall ist es empfehlenswert, die Medikation der Antidote bis zur Überweisung fortzusetzen.

Inkorporationszwischenfälle sind bisher relativ selten gewesen. Auf der anderen Seite muß eine werksärztliche Abteilung, um ohne Verzögerung die notwendigen therapeutischen Maßnahmen einleiten zu können, immer über einen Mindestvorrat aller Antidote verfügen. Die Haltbarkeit einiger Antidote bei längerer Lagerzeit ist noch nicht genau bekannt. Es dürfte deshalb zweckmäßig sein, alle Antidote, die als Lösung in Ampullen vorliegen, sowie Metalcaptase regelmäßig jedes zweite Jahr und Ferrihexacyanoferrat (II) jährlich durch frische Chargen zu ersetzen. Empfehlenswert ist weiterhin, im Falle von bestimmten oralen Antidotem sich rechtzeitig einen Bestand von einzeln abgepackten Mengen (je einer Einzeldosis entsprechend) anzulegen, um bei einem akuten Zwischenfall keine Zeit mit Wägen und Herstellung von Mischungen zu verlieren.

### 7.3. Zusammenfassende Übersicht

Obwohl Abschnitt 7.2. bereits die notwendige Information über die einzelnen therapeutischen Maßnahmen vermittelt, ist es zweckmäßig, sie noch einmal für die praktisch wichtigsten Radionuklide schlagwortartig aufzuzählen und hierbei auch kurz auf die Größe des therapeutischen Effekts einzugehen (s. Tabelle 1, Seite 137). Ein quantitatives Maß für die Wirksamkeit ist die mobilisierte Menge des Radionuklids, ausgedrückt in Prozent der vor der Behandlung im Körper vorhandenen Menge. Hierbei muß natürlich differenziert werden, ob es sich

- a) um die Entfernung von Radioaktivität aus einem sog. Depot (kontaminierte Verletzung),
- b) oder aus der Lunge nach Inhalation,
- c) um die Hemmung der enteralen Resorption oder
- d) um die Mobilisation der resorbierten Fraktion aus Organen und Geweben

handelt. Die Situationen a) und b) beziehen sich auf die therapeutische Wirksamkeit im Fall von unlöslichen Radionuklidverbindungen. Für Inhalation von leicht resorbierbaren Nukliden bzw. für kontaminierte Verletzungen gelten die Angaben unter d). Die Angaben beschränken sich weiterhin nur auf solche praktisch wichtigen Radionuklide bzw. Situationen, für die bereits Erfahrungen tierexperimenteller und/oder humanmedizinischer Art vorliegen.

Einige Radioisotope wurden in diesem Kapitel nicht erwähnt:  $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$  und  $^{35}\text{S}$ , obwohl ihnen wegen ihrer breiten Verwendung in Biochemie, Physiologie und Pharmakologie eine große praktische Bedeutung zukommt. Der Grund hierfür ist, daß bisher keine effektiven Dekorporationsmöglichkeiten für diese Radionuklide bekannt sind.

#### *Schrifttum mit ausführlicher Bibliographie*

- Catsch, A.: Biologie der Radionuklide. In: Handbuch der Medizinischen Radiologie, Band II/2, S. 372. Berlin, Heidelberg, New York: J. Springer 1966
- Catsch, A.: Dekorporierung radioaktiver und stabiler Metallionen. Therapeutische Grundlagen. München: K. Thieme KG. 1968

Tabelle 1 *Übersicht über die Dekorporation einiger praktisch wichtiger Radionuklide*

Isotope	Situation	Antidote	Therapeutische Wirksamkeit
Transurane, Lanthanide und Yttrium	Wunddepot Lunge nach Inhalation Hemmung enteraler Resorption Mobilisation aus Organen und Geweben	DTPA DTPA Austauscherharze  DTPA	>90 % * ca. 20 % > 90 %  ca. 50–90 %
Polonium	Mobilisation aus Organen und Geweben	D-Penicillamin	ca. 20 %
Strontium Radium	Hemmung enteraler Resorption  Mobilisation aus Organen und Geweben	BaSO <sub>4</sub> , Alginat  Ca-Gluconat und Ammoniumchlorid	>90 %  ca. 20 %
Caesium	Hemmung enteraler Resorption Mobilisation aus Organen und Geweben	Ferrihexacyano- ferrat (II)	> 90 %
Cobalt	Mobilisation aus Organen und Geweben	D-Penicillamin	> 90 %
Jod	Mobilisation aus Organen und Geweben	Kaliumjodid	ca. 50–90 %
Tritium	Mobilisation aus Organen und Geweben	Flüssigkeit	ca. 50–90 %

\* Nur wenn Exzision des Depots möglich; sonst ca. 20 %



## Mitarbeiter-Verzeichnis

- Catsch, A., Prof. Dr. med.*, Universität Karlsruhe (T.H.) und Direktor am Institut für Strahlenbiologie, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Fliedner, T.M., Prof. Dr. med.*, Leiter der Abteilung für Klinische Physiologie, Zentrum für Klinische Grundlagenforschung, Universität Ulm, 79 Ulm/Donau, Parkstraße 10/11
- Kiefer, H., Prof. Dr. rer. nat.*, Leiter der Abteilung Strahlenschutz und Sicherheit, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Möhrle, G., Dr. med.*, Leiter der Medizinischen Abteilung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Müller, A., Prof. Dr. rer. nat.*, Lehrstuhl für Physik, Fachbereich Biologie, Universität Regensburg, 84 Regensburg, Universitätsstraße 31
- Ohlenschläger, L., Dr. med.*, Leiter der Ambulanz der Medizinischen Abteilung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640
- Schieferdecker, H., Dr. rer. nat.*, Leiter des Radiotoxikologischen Labors der Medizinischen Abteilung, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 75 Karlsruhe 1, Postfach 3640

# Notfälle Diagnostik Therapie

in der  
ärztlichen  
Praxis



Priv.-Doz. Dr. med. S. Häussler  
u. a.

180 Seiten, zahlreiche Abbildungen und Tabellen, Stichwortverzeichnis, Taschenbuchformat 90 × 150 mm, Kunststoffeinband, 19,60 DM.

In einer nach Inhalt und Methode ganz auf die praktischen Bedürfnisse des ärztlichen Notfalldienstes zugeschnittenen Broschüre werden die vorher ermittelten häufigsten Notfälle aus den Bereichen der Gynäkologie/Geburtshilfe – Chirurgie – Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde – Augenheilkunde – Hautkrankheiten – Neurologie und Psychiatrie – Inneren Medizin – Kinderheilkunde dargestellt.

Außerdem wird bildhaft und einprägsam Theorie und Praxis der Schockbekämpfung und des Herzanfalls sowie die Strategie des Vorgehens bei unklarer Diagnose beschrieben.

Es wird dargestellt, daß es im Notfalldienst nicht darauf ankommt, die Ätiologie und Pathogenese einer Gesundheitsstörung mit letzter Sicherheit zu klären, sondern Gefahr für Leib und Leben abzuwenden, subjektiv und/oder objektiv vorhandene bedrohliche oder schmerzhaftes Gesundheitsstörungen möglichst ohne zu schaden selbst dann zu behandeln, wenn sich die Diagnose nicht klären läßt.

Die Lösung dieses Problems ist in Kurzform auf 180 Seiten im Taschenbuchformat mit einem ausführlichen Stichwortverzeichnis hervorragend gelungen.



**A.W. Gentner Verlag 7 Stuttgart 1 Postfach 688**