

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

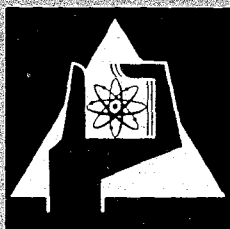
April/Mai 1968

KFK 777

Medizinische Abteilung

Ärztliche Überlegungen und Richtlinien für die  
Personendekontamination und Dekorporierung

G. Möhrle



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE



Internationale Monatsschrift für angewandte Atomenergie in Technik, Industrie, Naturwissenschaften, Medizin, einschließlich Biophysik und Strahlenschutz unter besonderer Berücksichtigung der Raumfahrtforschung und -technik

Hauptschriftleiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. E. H. Graul, 355 Marburg/Lahn, Lahnstraße 4a

Verlag G. Braun, 75 Karlsruhe 1, Karl-Friedrich-Straße 14—18 · Postfach 1709 · Telefon: \* 26951 · Telex: 7826 904 vgb d

## Ärztliche Überlegungen und Richtlinien für die Personen- dekontamination und Dekorporierung

Aus der Medizinischen Abteilung  
des Kernforschungszentrums  
Karlsruhe

Von G. Möhrle

### I. Personendekontamination

#### 1. Hautkontamination

##### a) Kontaminationsmechanismus

Eine radioaktive Verunreinigung der menschlichen Körperoberfläche kann durch Staub, Gase, wäßrige oder organische Lösungen erfolgen. Die gesunde, intakte Haut ist an sich eine ausgezeichnete natürliche Barriere gegen das Eindringen radioaktiver Stoffe in den Körper. Die Resorption von Plutonium-239 durch die unverletzte Haut z. B. ist in Tierversuchen und beim Menschen untersucht worden. Der Prozentsatz des durch die Haut resorbierten Plutoniums erwies sich als unabhängig von der exponierten Hautfläche und der Plutoniumkonzentration, hing jedoch von der Acidität der verwendeten Plutoniumlösung ab. Ein Versuch am Menschen, bei dem  $10 \mu\text{g } ^{239}\text{Pu}$  ( $\approx 0,64 \mu\text{Ci}$ ) in Form von Pu-Nitrat auf die Handinnenfläche aufgetragen wurde und dort 8 Stunden lang einwirkte, ergab eine Resorptionsrate von ca. 0,0002%/Stunde [18]. Dagegen wird z. B. Tritium als Tritiumwasser von der Haut fast vollständig resorbiert, tauscht sich mit den  $\text{H}^+$ -Ionen der Körperflüssigkeiten innerhalb einer Stunde vollständig aus und ist dann gleichmäßig im Körper verteilt.

Die perkutane Resorption von Radionukliden kann bei staubförmiger Kontamination praktisch ausgeschlossen werden; weitgehend das gleiche gilt für Kontaminationen durch wäßrige Elektrolytlösungen. Sind jedoch in wäßrigen Lösungen gut oder teilweise lipidlösliche Substanzen enthalten, so kann bei genügend langer Einwirkungszeit eine — wenn auch geringe — Resorption erfolgen. Das gleiche gilt für in organischen Lösungsmitteln

gelöste Stoffe. Die Permeabilität der Haut nimmt zu, wenn gleichzeitig mit der Kontamination eine chemische oder thermische Beanspruchung erfolgt. Im allgemeinen kann man sagen, daß bei den am häufigsten verwendeten radioaktiven Substanzen die Resorption durch die intakte Haut zwar gering, aber nicht unbedingt vernachlässigbar ist, zumindest nicht, wenn es sich um höhere Aktivitäten handelt [22, 33, 43, 44].

Bei fast allen Radionukliden liegt ein komplexes Strahlungsgemisch vor. Die biologische Wirkung im organischen Gewebe ist abhängig von der Strahlenart und deren Energie. Alphastrahlen haben im organischen Gewebe nur eine Reichweite von  $40 \mu\text{m}$ . Sie vermögen demnach bei einer Kontamination die obersten Hornhautschichten (ca. 80 bis  $150 \mu\text{m}$ ) nicht zu durchdringen.

Bei Betastrahlen muß im organischen Gewebe mit einer Reichweite bis zu 1 bis 2 cm gerechnet werden. Innerhalb dieser Schicht können sie schwerwiegende Schäden verursachen. Besonders gefährdet sind vor allem die Schleimhäute und das ungeschützte Auge.

##### b) Maximal zulässige Hautkontaminationswerte

Wie hoch sind nun die maximal zulässigen Werte für die Oberflächenkontamination der Haut? Es ist schwierig, hierfür einheitliche Zahlen anzugeben, da in den meisten Staaten unterschiedliche maximal zulässige Grenzwerte gelten. Mangels einer einheitlichen Regelung sollen hier die Zahlen angegeben werden, die in der Strahlenschutzregelung für das Kernforschungszentrum Karlsruhe als maximal zulässige Werte festgelegt wurden:

Es sind dies bei kontaminierten Händen (ca.  $150 \text{ cm}^2$ ) für  $\alpha$ -Aktivität 666 Zerfälle/min · Hand bzw.  $3 \cdot 10^{-4} \mu\text{Ci/Hand}$ , für  $\beta$ -Aktivität 66 600 Zerfälle/min · Hand bzw.  $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{Ci/Hand}$ .

Bei der übrigen Haut liegen die maximal zulässigen Werte, solange es sich um örtlich begrenzte Kontaminationen handelt, für  $\alpha$ -Aktivität bei  $10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  und für  $\beta$ -Aktivität bei  $5 \cdot 10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^2$  ( $2,22 \cdot 10^6$  Zerfälle/min =  $1 \mu\text{Ci}$ ).

#### c) Spezielle Meßanordnung für die Kontaminationsüberwachung

Als Meßplatz hat sich eine spezielle Alpha-Beta-Gamma-Meßanordnung bewährt. Sie besteht aus einem Großflächenproportionalzähler für Alpha- und Alpha- $\beta$ -Nachweis, einem kleinen Halbleiterdetektor zur besseren Lokalisierung von Alpha- und Betastrahlern und einer Szintillationssonde mit einem NaJ(Tl)-Kristall mit 1" Durchmesser und 2 mm Dicke für den Nachweis von Bremsquanten. Die Impulse dieser drei Sonden können jeweils mittels Wahlschalter wechselweise von einem akustischen Anzeigergerät, einem Ratemeter oder einem Zählgerät registriert werden.

Es ist im Rahmen dieser Übersicht nicht möglich, auf die verschiedenen Strahlenmeßgeräte und die Meßtechnik bei äußerer Kontamination und deren Lokalisierung einzugehen. Hingegen erscheint es angebracht, einige Hinweise für eine zweckmäßige Dokumentation der Meßergebnisse zu geben.

#### d) Dokumentation der Meßergebnisse

Grundsätzlich ist bei jeder Messung der Wirkungsgrad der Meßanordnung zu berücksichtigen. Da die von der Meßanordnung registrierten Ereignisse pro Zeiteinheit [Impuls/min] meist erheblich geringer sind als die tatsächlich von der kontaminierten Hautstelle ausgesandten Teilchen bzw. Quanten pro Zeit, bedeutet dies z. B. bei den meisten handelsüblichen Alphamonioren, daß dem obengegebenen Grenzwert von 666 Zerfällen/min  $\cdot$  Hand bei einem Wirkungsgrad von 10 bis 15% etwa 60 bis 90 Impulse/min entsprechen.

Die Erfahrung hat nun gezeigt, daß es — zumal bei nicht besonders qualifiziertem Personal — notwendig wird, eine interne einheitliche Nomenklatur festzulegen. Zu häufig entstehen sonst Mißverständnisse und Umrechnungsfehler bei gleichzeitiger Verwendung der Begriffe Zerfälle/min,  $\mu\text{Ci}$  und Imp/min. Es erscheint empfehlenswert, wenn man von den registrierten Ereignissen pro Zeiteinheit, also den Impulsen pro Minute (Imp/min), ausgeht. Nach entsprechender Kalibrierung der jeweiligen Meßanordnungen, d. h. Bestimmung des Wirkungsgrades, können die Imp/min auch von angelerntem Personal festgestellt und aufnotiert werden. Nur wenige Richtwerte müssen dabei im Gedächtnis behalten bzw. können tabellarisch zusammengestellt werden. Hierbei ist besonders der unterschiedliche Wirkungsgrad der verschiedenen vorhandenen Meßgeräte und die daraus resultierende verschiedene Grenzempfindlichkeit in Imp/min wichtig. Gerade bei der gleichzeitigen Dekontamination mehrerer Personen hat sich dieses vereinfachte Verfahren bestens bewährt.

Anhand eines Vordruckes soll bei jeder erforderlichen Dekontamination zunächst Name, Vorname, Geburtstag, Institut, Datum, Uhrzeit und Kontaminationshergang kurz festgehalten werden, das gleiche gilt für den jeweiligen Nulleffekt der Meßanordnung und, falls bekannt, für das Radionuklid und die Strahlenart. Anschließend können dann die verschiedenen Kontaminationsmessungen an den einzelnen Körperstellen (z. B. rechte Hand außen, innen usw.), die Häufigkeit der Waschungen, die angewandten speziellen Dekontaminationsverfahren, sowie die laufenden Nachmessungen eingetragen werden. Eventuell durchgeführte Nasen- bzw. Rachenabstriche und deren Meßergebnisse werden ebenfalls auf dem Vordruck vermerkt. Auf diese Weise hat man jederzeit einen Überblick über den Dekontaminierungseffekt und gleichzeitig eine Dokumentation über den gesamten Dekontaminationsvorgang. Anhand dieser Meßnotizen lassen sich zwischenzeitlich oder später die ermittelten Impulswerte bei Kenntnis des Radionuklids in Zerfälle/min bzw. in  $\mu\text{Ci}$  umrechnen.

## 2. Dekontaminationseinrichtungen

In jeder Isotopenabteilung einer Klinik oder in jedem größeren radiochemischen Labor oder nuklearen Forschungsinstitut ist eine sogenannte Dekontaminationspassage vorhanden. Diese besteht meist lediglich aus ein oder zwei normalen Duschen auf relativ engem Raum. Diese Einrichtungen sind sicher gut ge-

meint, aber keinesfalls gut durchdacht. Schon eine kleinere, unkomplizierte Kontamination, z. B. der Hände, erfordert für Messen und Waschen etc. einen Zeitaufwand von mindestens einer halben bis einer Stunde pro Person, zum Teil erheblich mehr. Hinzu kommt, daß die am häufigsten kontaminierten Körperstellen neben den Händen erfahrungsgemäß die Haare und die freiliegenden Gesichtspartien sind. — Wie stellt man sich nun eine Dekontamination der Haare, des Gesichtes und der Hände unter einer Dusche vor? — Die radioaktive Verunreinigung wird zwangsläufig, wenn auch verdünnt, über den ganzen Körper verteilt und die Füße stehen ebenso zwangsläufig in der abgespülten kontaminierten Flüssigkeit. Eine Dekontamination kleinerer umschriebener Bereiche und die eventuelle vorherige Abdeckung der benachbarten Partien ist von vornherein unmöglich. Laufende Kontrollmessungen zur Feststellung des Dekontaminationseffektes würden ein Heraustreten aus der Dusche, ein Bespritzen des ganzen Raumes und jedesmal auch bei an sich lokalisierter Kontamination eine Ganzkörpermessung bedingen. — Der einzige Fall, in dem eine Dusche angebracht wäre, ist der einer Ganzkörperkontamination. Aber auch hier müßte mindestens neben dem an der Decke befindlichen Brausekopf eine zusätzliche Handbrause vorhanden sein und außerdem ein mindestens 3 bis 4 cm hoher Kunststoffrost auf dem Fußboden für die Füße, um diese wenigstens einigermaßen aus dem kontaminierten Spülwasser herauszuhalten. Als beste Lösung für eine Ganzkörperdekontamination hat sich eine spezielle Duschanordnung bewährt, die neben einem beweglichen Brausekopf an der Decke noch je 4 bewegliche Brauseköpfe an den sich gegenüber liegenden Seitenwänden, jeweils mit einem Abstand von 42 cm übereinander, vorsieht. Die Wassertemperatur während des Duschens läßt sich dabei über eine zentrale Mischbatterie regulieren.

Nachstehende zwei Abbildungen sollen als Beispiel für sinnvolle und spezielle lokale Dekontaminationseinrichtungen dienen.

Abbildung 1 zeigt einen Doppelwaschtisch aus Kunststoff, der mit dem Fußboden verschweißt ist. Der Kontaminierte kann mit dem Fußpedal die Wasserzufuhr, die über eine Mischbatterie auf eine konstante Temperatur eingestellt werden kann, bedienen. Mit einem einfachen Hebel läßt sich der Brausekopf auf „Brause“ oder „Strahl“ einstellen, und im Bedarfsfalle kann die an einem Gummischlauch befestigte Handbrause auch beliebig im Bereich des Waschbeckens bewegt werden.

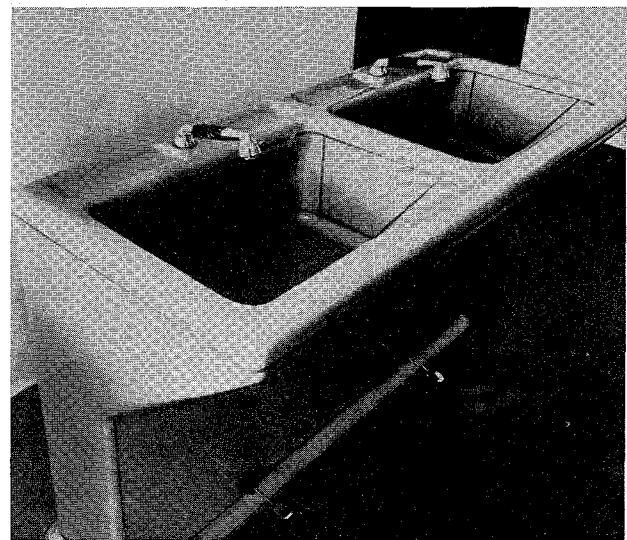


Abbildung 1

Ähnlich praktisch ist der in Abbildung 2 gezeigte sogenannte Haarwascher. Er ermöglicht eine optimale Haarwäsche, nämlich nach dorsal, wodurch eine Sekundärkontamination des Gesichtes vermieden werden kann. Durch umgekehrtes Sitzen kann aber auch jederzeit eine lokalisierte oder flächenhafte Kontamination des Gesichtes gezielt angegangen werden. Gleichzeitig läßt sich anhand der Abbildung 2 erkennen, wie man eventuell das dekontaminierende Personal gegen eine Sekundärkontamination durch Spritzer schützen kann.

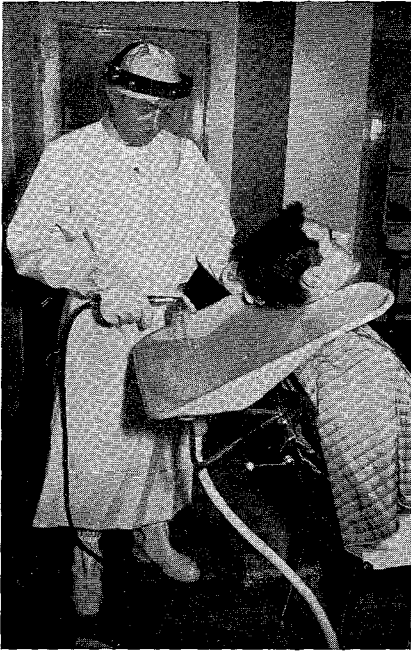


Abbildung 2

Nicht überall wird es erforderlich oder möglich sein, die gezeigten Einrichtungen zu beschaffen. Die Abbildungen sollen aber eine Anregung sein, bessere und praktikablere Einrichtungen, als meist vorhanden, zu finden.

### 3. Allgemeine und spezielle Dekontaminationsmaßnahmen

Die bisherigen Erfahrungen bei der friedlichen Nutzung der Kernenergie haben gezeigt, daß ein Strahlunfall eine ausgesprochene Seltenheit ist, ebenso eine bedenklichere Inkorporation, und wenn es einmal zu dem einen oder andern kommt, so ist häufig zusätzlich auch eine externe Kontamination vorhanden. Die äußere Kontamination allein dagegen ist meist der Alltag im Strahlenschutz.

Wie kann nun am besten einer Kontamination vorgebeugt werden? Neben dem Beachten der Strahlenschutzvorschriften und der regelmäßigen Belehrung aller Mitarbeiter, die mit offenen radioaktiven Stoffen umgehen oder in Kontrollbereichen tätig sind, ist eine laufende Überwachung der Arbeitsplätze das wichtigste. Das klare Abgrenzen von Kontrollbereichen, die kontinuierliche und eventuelle diskontinuierliche Raumluftüberwachung, laufende Wischteste an den Arbeitsplätzen, die routinemäßige Kontrolle von Kleidung sowie Händen und Füßen beim Verlassen der aktiven Bereiche sind eine unbedingte Voraussetzung zur Vermeidung einer Verbreitung der Kontamination. Vor Hautabschürfungen mit Verletzungen und Stichwunden muß man sich besonders in acht nehmen. Das Arbeiten mit radioaktiven Präparaten soll schon bei kleineren Hautläsionen unterbleiben. Wird die Haut von einem kontaminierten Gegenstand geritzt, müssen sofort Schritte zur Beseitigung der Hautkontamination unternommen werden.

Wenn eine Kontamination der Hände festgestellt werden konnte, muß zunächst damit gerechnet werden, daß auch noch andere Körperstellen kontaminiert sind. Das gleiche gilt auch für die Feststellung kontaminierter Laborkleidung. Ist die Kleidung dagegen nicht kontaminiert, so kann angenommen werden, daß sich auch keine Aktivität auf der von der Kleidung abgedeckten Körperoberfläche befindet.

Besondere Aufmerksamkeit muß neben den Händen den übrigen unbedeckten Körperstellen, d. h. insbesondere den Haaren und dem Gesicht, gewidmet werden. Ein etwas schwacher Punkt sind auch bei weiblichen Beschäftigten die Beine, da die hauchdünnen Nylonstrümpfe keinen nennenswerten Schutz gegen eine Kontamination bilden.

Die ersten zu treffenden Maßnahmen nach Feststellung einer Kontamination sind vorbeugender Art. Zunächst ist es wichtig, die Ausdehnung und Intensität der Kontamination festzustellen. Es muß vermieden werden, daß beim Abstreifen kontaminierter Kleidungsstücke oder beim Säubern der Haut lokalisierte Aktivität auf weitere Bezirke verteilt wird. Besonders ist darauf zu achten, daß durch die Dekontaminationsmaßnahmen die auf der Haut befindliche Aktivität nicht durch perkutane Resorption oder durch Mund und Nase in den Körper gelangt. Wenn die Gegebenheiten des Arbeitsplatzes es als möglich erscheinen lassen, daß insbesondere bei staub- oder gasförmigen Verbindungen gleichzeitig eine Inkorporation durch die Atemwege eingetreten ist, so sollen möglichst rasch vom Sanitätspersonal Nasen- und Rachenabstriche mit Stieltupfern vorgenommen werden, die dann wie Wischteste auszumessen sind.

Die Wirksamkeit jeder Dekontaminationsbehandlung hängt von der Schnelligkeit ab, mit der man vorgeht. Das Strahlenschutzpersonal muß deshalb entsprechend ausgebildet sein und auch jeder im Kontrollbereich Beschäftigte sollte wissen, was er in einem solchen Fall zu tun hat. Nur durch ständige Aufklärung und Schulung können kopflose Handlungen vermieden werden.

Die beste Maßnahme für eine Entaktivierung der Hautoberfläche ist immer noch gründliches Waschen unter fließendem, lauwarmem Wasser, eventuell mit einer milden Seife. Die gesamte kontaminierte Hautfläche soll mit dichtem Schaum bedeckt und danach großzügig mit Wasser abgespült werden. Dieser Vorgang ist mehrmals mehrere Minuten lang zu wiederholen. Mit einer weichen Bürste, am besten aus Nylon, kann dieses Waschen noch unterstützt werden. Bürsten nur mit leichtem Druck, jegliche Schürfung der Haut ist zu vermeiden! Bei kontaminierten Händen ist auf besonders sorgfältige Säuberung von Hautfalten, Nagelbett, Nägel usw. zu achten. Die Nägel müssen evtl. kurzgeschnitten werden.

Nachdem dieser ausgedehnte Waschvorgang mehrmals durchgeführt wurde, ist eine Kontrolle an einem Meßgerät erforderlich. Zum Abtrocknen der Hände gibt es reißfeste Zellstoffhandtücher, die nach Gebrauch in einen Behälter für kontaminierte Gegenstände zu werfen sind. Hierfür haben sich z. B. normale Treteimer, die durch eine besondere Farbe gekennzeichnet sind und in denen sich eine als Sack geschweißte Plastikfolie befindet, gut bewährt.

Meistens ist nach dem ersten gründlichen Waschen der größte Dekontaminationseffekt festzustellen. Die weitere Dekontamination bis zum Erreichen der maximal zulässigen Werte kann aber dann sehr langwierig verlaufen. Immer wieder muß das Waschen unter fließendem lauwarmem Wasser mit Seife und Bürste geduldig wiederholt werden, auch wenn die Monitorkontrollen manchmal kaum einen weiteren Dekontaminationseffekt zeigen. Anstelle von Seife können bei unbefriedigenden Ergebnissen auch die im Handel erhältlichen Feinwasch- und Netzmittel genommen werden. Es gibt verschiedene Handelspräparate, die zur Beseitigung stärkerer konventioneller Hautverschmutzungen benutzt werden, die durchaus auch bei Kontaminationen angewendet werden können und meist auf dem Abriebprinzip beruhen. Zusätzlich hat sich auch die Anwendung von 3%iger Zitronensäure bewährt. Diese eignet sich insbesondere auch zur Dekontamination der Schleimhäute und des Rachens. Auch bei kontaminierten Haaren kann sie nach gründlichem Waschen mit Shampoo verwendet werden. Bei Augenkontaminationen sind die Augenlider zu spreizen und unter fließendem Wasser gründlich zu spülen, dieses immer vom inneren (Nasenseite) zum äußeren Augwinkel, um eine zusätzliche Kontamination der Tränenkanäle zu vermeiden.

Handelt es sich bei der Kontamination um Isotope von sehr hoher Radiotoxizität oder um größere Aktivitäten, so sollen schon nach den ersten gründlichen Waschvorgängen, möglichst unter ärztlicher Aufsicht, weitere Dekontaminationsmaßnahmen eingeleitet werden. Es konnte z. B. festgestellt werden, daß sich die Wirkung einer Kombination aus Wasser mit einem Netzmittel, einem Komplexbildner und einem Reagenz zur Einstellung des pH-Wertes ausgesprochen additiv verhält. Diese Lösung nach Nosek und Chmelar [28] besteht aus 5 g Dinatriumsalz der EDTA (gemahlen), 5 g Natriumsalz der Laurylsulfonsäure, 5 g elektrophoretisch gereinigter Stärke und 85 g kristallinem Natriumkarbonat (gemahlen) in 1000 cm<sup>3</sup> Wasser.

Diese Lösung hält sich in Plastikflaschen monatelang und muß eventuell im Bedarfsfall gründlich durchgeschüttelt werden. Es hat sich als praktisch erwiesen, diese und die noch später angeführten 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 (0,2 n) verwenden. Diese schwach sauer reagierende Mischung ist über die feuchten Hände zu schütten, wobei auch die Nägel und Nagelhäute gründlich zu bedecken sind. Die ganze Handoberfläche, auch zwischen den Fingern, wird mit einer Handbürste leicht abgerieben, und nach etwa 2 Minuten wird das ganze unter fließendem lauwarmem Wasser abgespült. Die aufgetretene dunkelbraune Hautfärbung wird anschließend mit einer frisch zubereiteten 5%igen Natriumsulfidlösung behandelt und kann innerhalb 2 Minuten nach leichtem Reiben und Bürsten durch Abspülen wieder beseitigt werden. Da sich das erwähnte Kaliumpermanganat mit 1%iger Schwefelsäure bei längerem Stehen nicht hält und Braunstein abgesetzt wird, hat es sich als sehr praktisch erwiesen, jeweils 1 Liter 1%iger Schwefelsäure (0,2 n) in einer Kunststoff-Flasche abgefüllt bereit zu stellen und zusätzlich getrennt davon 65 Gramm kristallines Kaliumpermanganat. Im Bedarfsfalle wird das Kaliumpermanganat zur 1%igen Schwefelsäure gegeben und nach einigen Minuten hat man unter kräftigem Umrühren das Gemisch gebrauchsfertig. Ebenso kann man in Plastik eingeschweißte Päckchen mit je 20 Gramm  $\text{NaHSO}_3$  bereitlegen, die bei Bedarf nur in 400  $\text{cm}^3$  Wasser zu lösen sind, um die 5%ige Natriumsulfidlösung zu erhalten.

Von den Amerikanern [14] wurde in den letzten Jahren mit ausgezeichnetem Erfolg, insbesondere auch bei Plutoniumkontaminationen, 5%iges Natriumhypochlorit (Natronbleichlaug) empfohlen. Die Haut wird zwar intensiv angegriffen und es kommt bei zu langer Verweildauer auf der Haut zu einem leichten Brennen, jedoch ist der Dekontaminationseffekt sehr günstig. Es ist überhaupt zu empfehlen, daß nach gründlicher Anwendung eines dieser Dekontaminationsmittel bei Ausbleiben eines befriedigenden Effektes anschließend die anderen verwendet werden.

Zum Waschen anderer Körperteile wie z. B. Hals, Gesicht, Ohren können die angeführten Lösungen, insbesondere die nach Nosek und Chmelar [28], nach entsprechender Abdeckung der Umgebung mit einer leicht absorbierenden Watte aufgetragen werden.

Bei all diesen Dekontaminationsmaßnahmen ist aber immer sorgfältig darauf zu achten, daß die Haut nicht zu stark in Mitleidenschaft gezogen wird. Ist der Dekontaminationseffekt trotz aller Maßnahmen noch unbefriedigend, so muß manchmal die Dekontamination abgebrochen und nach Stunden oder am nächsten Tag fortgesetzt werden. Dies ist durchaus vertretbar, da eine Weiterverbreitung der Kontamination nach all dem bisherigen Waschen äußerst unwahrscheinlich ist, dagegen aber eine Hautschädigung bei Fortsetzung der Dekontamination befürchtet werden muß.

Eine andere Methode zur Beseitigung kleinerer umschriebener Hautkontaminationen ist die Anwendung von Heftpflastern bzw. Tesafilm u. ä., die Born [1] im einzelnen untersucht hat. Ein Heftpflasterstreifen wird auf die kontaminierte Haut gedrückt und dann abgerissen. (Natürlich sollen eventuell vorhandene Haare vorher abrasiert werden). Nach diesem ersten Pflasterstreifen wird ein zweiter, dritter und auch ein vierter auf die gleiche Stelle geklebt und wiederum abgerissen. Die Maßnahme erfordert wenig Zeit. Nach drei bis vier derartigen Schritten ist die Kontamination bereits zu über 90% entfernt. Noch besser lassen sich radioaktive Teilchen von der Haut dadurch entfernen, daß man eine Lackschicht auf die Hautstelle sprüht und sie dann mit Klebestreifen abzieht.

Eine andere Methode ist das Überstreichen kleinerer Flächen mit Kollodium. Wenn die äußeren Hornhautschichten nach einigen Tagen abblättern, nehmen sie die Aktivität mit.

In Harwell schließlich verwendet man noch eine andere Variante. Der kontaminierte Finger oder die Hand werden in warmes, geschmolzenes Wachs getaucht, herausgezogen und dann der Wachsüberzug abgezogen. Dadurch wird die Haut weniger verletzt als durch die Heftpflastermethode. In Frankreich wurde

schließlich noch mit der Ionophorese experimentiert. Es handelt sich dabei darum, die kontaminierten Ionen von der Haut und ihren Falten durch ein elektrisches Feld abziehen [10, 43].

#### 4. Hinweise für die Versorgung kontaminierter Wunden

Alle diese angeführten Maßnahmen zur Hautdekontamination beziehen sich selbstverständlich auf die intakte Haut.

Der Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen beinhaltet aber auch die Möglichkeit einer Hautverletzung durch mechanische, thermische und chemische Einwirkungen, wobei radioaktive Substanzen durch die Haut dringen und vom Körpergewebe resorbiert werden können. (Stichverletzungen beim Hantieren mit Glasgeräten, Säure- oder Laugenverätzungen, Verbrennungen). Die Resorption der radioaktiven Substanzen wird entscheidend beeinflusst von der Löslichkeit ihrer Verbindungen. Im allgemeinen kann man sagen, daß Metalloxyde größtenteils schwer löslich sind und in den Körperflüssigkeiten deswegen sehr schlecht resorbiert werden. In Wasser schwer löslich sind auch die Carbonate, Sulfate und Phosphate der Erdalkalimetalle. Zu den gut löslichen Verbindungen gehören dagegen ihre Chloride und Nitrate [22, 33, 43].

Infolge der schlechten Löslichkeit und der daraus sich ergebenden langsamen Resorption verbleibt ein Teil der radioaktiven Partikel über längere oder kürzere Zeit in der Wunde und wird teilweise von den Geweben absorbiert, die die Wundbegrenzung bilden. Die dagegen in der Gewebsflüssigkeit leicht löslichen radioaktiven Substanzen werden sehr rasch in den Körper aufgenommen. Eine besonders intensive Resorption radioaktiver Stoffe erfolgt bei Muskelwunden, eine langsamere, wenn nur Unterhautzellgewebe verletzt ist. Es ist bekannt, daß die Resorption schon in den ersten Minuten nach der Verletzung beginnen kann und die höchste Aktivität im Blut schon nach etwa 2 bis 3 Stunden nachweisbar ist.

Wie Beobachtungen, u. a. von Chromow [7], gezeigt haben, entwickeln sich unter der Einwirkung der radioaktiven Substanzen in den Zellen der Wundoberfläche die verschiedensten degenerativen, nekrobiotischen und nekrotischen Prozesse, und es kommt häufig zu Komplikationen durch Wundinfektionen. Wegen der schädlichen Wirkung der radioaktiven Teilchen auf die Wundzellen und wegen der Gefahr der Resorption in den Organismus kommt einer zweckmäßigen und möglichst frühzeitigen chirurgischen Wundversorgung besondere Bedeutung zu. Es konnte nachgewiesen werden, daß bei größeren Aktivitätsmengen die Zellschädigung in der Wunde so stark sein kann, daß sogar die völlige Entfernung der radioaktiven Partikel aus der Wunde schon wenige Stunden nach der Verletzung die Entwicklung degenerativer und besonders nekrotischer Prozesse nicht mehr verhindern kann.

Nach tierexperimentellen Versuchen von Salak und Mitarbeitern [31, 32] ist die Absorption durch eine frische Wunde — wahrscheinlich durch die Reflex- und Vasokontraktion — 50 bis 60% geringer als durch eine 24 Stunden alte offene Wunde. In späteren Stadien ist die Absorption wieder kleiner.

Aus dem soeben Angeführten lassen sich eine ganze Reihe praktischer Maßnahmen ableiten. Jede kontaminierte Wunde muß möglichst rasch unter fließendem Wasser ausgewaschen werden. Die Wundränder soll man dabei spreizen, um die Blutung anzuhalten und um eine größere Spülwirkung des Wassers zu gewährleisten. Zum Anregen des Blutflusses ist mitunter auch das Anlegen einer leichten Stauung von Nutzen, die den Rückfluß in der Vene staut ohne den Blutzustrom in der Arterie zu behindern. Gleichzeitig kann durch diese Stauung, wenn sie möglichst wundnah angelegt wird, auch erreicht werden, daß selbst bei rascher Resorption der radioaktiven Verbindungen die Aktivität nur allmählich in den Blutkreislauf gelangt. Diese Verzögerung gibt eventuell dem Arzt die Möglichkeit, noch in einem relativ frühen Resorptionsstadium und bevor die Aktivität im ganzen Organismus verteilt ist, eine intravenöse Dekontaminationsbehandlung einzuleiten. Jedoch soll auch die leichte Stauung nicht länger als 10 bis 15 Minuten ohne ärztliche Aufsicht ausgeführt werden.

Als weitere erste Hilfe für die gespülte kontaminierte Wunde ist allenfalls zum Abtransport zur zentralen Dekontaminationsanlage ein trockener steriler Verband anzulegen.

Die wichtigste Frage für den behandelnden Arzt ist es dann, ob sich in der Wunde noch Aktivität findet. Zur Klärung dieser Frage sind die üblichen Strahlenmeßgeräte wegen ihrer relativ großen Fläche meist nicht ausreichend. Hier sind Szintillationszähler mit sehr kleinen Kristallen von etwa 1 mm Stärke sehr geeignet, um eine genaue Wundmessung vornehmen zu können. Es gibt auch schon sogenannte Szintillationssonden, deren Sondenkopf nötigenfalls steril direkt in die Wunde gebracht werden kann. Natürlich leidet die Meßgenauigkeit unter der zu geringen Ansprechempfindlichkeit. Bei den Alphastrahlern ist eine Direktmessung mit kleinen Halbleiterdetektoren zwar möglich, aber auch hier ist die Ansprechempfindlichkeit infolge der hohen Selbstabsorption der Alphastrahlen durch Wundsekret, Blut, Gewebszellen etc. nur sehr gering. — Bei Plutonium-239 z. B. verwendet man die schwache Röntgenstrahlung mit Energien um 17 keV, um Wundmessungen und Aktivitätslokalisierungen durchzuführen. Es lassen sich hierbei Aktivitäten bis etwa 0,001  $\mu\text{Ci}$  noch nachweisen; das entspricht weniger als 0,05  $\mu\text{g}$  Plutonium [9, 11, 12].

Eine andere Möglichkeit einer Aktivitätsbestimmung in nicht ganz kleinen Wunden ist das Einführen eines sterilen Filterpapiers in die Wunde und das Ausmessen dieses mit Wundsekret vollgesogenen Filterpapiers, wie bei den normalen Wischtesten. Bei größeren Wunden kann auch mittels einer sterilen Pipette Wundsekret aus der Wunde entnommen werden, um den Kontaminationsgrad zu bestimmen.

Infolge der schon früher erwähnten Notwendigkeit einer schnellen und möglichst vollständigen Entfernung der radioaktiven Partikel aus der Wunde ändern sich auch die Indikationen zur primären chirurgischen Wundversorgung insofern, als alle Wunden, die über die maximal zulässigen Werte hinaus kontaminiert sind, einer primären chirurgischen Versorgung (Spülung, Exzision) unterzogen werden müssen. Es bedarf wohl keiner besonderen Erwähnung, daß bei der chirurgischen Behandlung kontaminierter Wunden alle Regeln der Asepsis strengstens beachtet und Kontaktkontaminationen des medizinischen Personals vermieden werden müssen. Zur Versorgung radioaktiv verunreinigter Wunden scheint die Leitungsanästhesie die Methode der Wahl zu sein. Russische Autoren [7] haben anhand von Versuchen festgestellt, daß die Anwendung von Novocain die Geschwindigkeit und den Charakter der Resorption radioaktiver Partikel aus Unterhautzellgewebe und Muskulatur nicht beeinflusst. Darüber hinaus soll sogar die Anwendung von Novocainlösungen in destilliertem Wasser die Resorption radioaktiver Stoffe für etwa 30 bis 60 Minuten verringern.

Bevor die Wunde chirurgisch angegangen wird, muß die Umgebung sorgfältig dekontaminiert und von Schmutz etc. gereinigt werden. Um dabei eine zusätzliche Kontamination der Wunde zu vermeiden, kann eventuell die Wunde mit einem Pflasterstreifen zugeklebt werden. Die eigentliche Wundversorgung soll mit der mechanischen Wundreinigung, d. h. der Entfernung aller oberflächlich liegenden Fremdkörper, Blutkoagula etc. beginnen. Danach ist die Wunde reichlich zu spülen (z. B. Aqua dest., physiologische Kochsalzlösung, schwache Lösung von Antiseptika, Rivanol oder die schon erwähnte Lösung nach Nosck und Chmelar). Es ist dabei zu beachten, daß die gesamte Spülflüssigkeit radioaktiv sein kann und deshalb in einem entsprechenden Gefäß aufgefangen werden muß. Diese aufgefangene Spülflüssigkeit kann zur Messung des Dekontaminationseffektes verwendet werden. Die eigentliche chirurgische Intervention erfordert eine Spaltung und breitere Excision der Wundränder und des Wundbodens als normalerweise üblich. Auf diese Weise soll versucht werden, die radioaktiven Partikel, die sich in den Geweben an den Wundrändern festgesetzt haben, möglichst restlos aus der Wunde zu entfernen. Anschließend sollen erneut wiederholte Spülungen der angefrischten Wunde mit den schon erwähnten Lösungen durchgeführt werden. Kontrollmessungen der Spülflüssigkeit lassen erkennen, ob die chirurgische Intervention ausreichend war. Nach möglichst genauer Messung der noch in der Wunde verbliebenen Aktivität werden die Spülungen fortgesetzt, bis sich keine Senkung des Meßniveaus mehr ergibt. Wenn nach dieser Behandlung die Restaktivität in der Wunde die höchst zulässigen Werte nicht überschreitet, ist eine primäre Wundnaht indiziert. Diese muß mit frischem Instrumentar und nach Dekontamination der Hände des Chirurgen durchgeführt werden. Überschreitet die Restaktivität der Wunde noch das zulässige Maß, so ist eine primär dichte Naht kontraindiziert. Man kann entweder weite Nähte anbringen und in die Wunde ein Drain-

röhrchen zum weiteren Spülen und Installieren von Antibiotica einlegen oder die nicht vernähte Wunde mit feuchten Wundtampons tamponieren.

Häufige Verbandwechsel und Auswechseln der Tampons über das übliche Maß hinaus ist in der ersten Zeit angezeigt, da jeder neue Verband wieder eine gewisse Menge radioaktiven Materials aus der Wunde aufsaugt. Um dieses Aufsaugen zu fördern, werden feuchte Verbände, z. B. hypertonische Kochsalzlösung, Magnesiumsulfatlösung etc. empfohlen [7].

Ist eine chirurgische Wundversorgung erforderlich und muß angenommen werden, daß Radioaktivität in den Körper gelangt ist, soll unabhängig von dem Lokalbefund gleichzeitig eine intravenöse Infusionsbehandlung mit Komplexbildnern eingeleitet werden. Verschiedene Autoren vertreten auch die sofortige lokale Anwendung geeigneter Komplexbildner bei jeder kontaminierten Verletzung.

## II. Dekorporierung

### 1. Inkorporationsüberwachung

Im Falle einer Inkorporation radioaktiver Stoffe durch die verletzte oder geschädigte Haut tritt die externe Personendekontamination gegenüber dem Problem der Dekorporierung zwangsläufig etwas in den Hintergrund. Im folgenden soll nun auf eine möglichst optimale Inkorporationsüberwachung, die Kriterien zur Abschätzung eines Strahlenschadens durch Aufnahme radioaktiver Stoffe in den Körper und die Möglichkeit der Dekorporierung dieser Stoffe näher eingegangen werden.

Die Inkorporationsüberwachung ist zwangsläufig abhängig von der Art und der Menge der Radionuklide und ihrer Anwendungsweise. So sollen die verschiedenen Möglichkeiten am Beispiel des Karlsruher Kernforschungszentrums zusammenfassend erläutert werden.

#### 1. *In-vivo*-Messung

Alle mit offenen radioaktiven Stoffen umgehenden Mitarbeiter werden routinemäßig halbjährlich im Human Body Counter untersucht. Darüber hinaus werden bei Erhöhung der Luftaktivität, in Fällen ausgedehnter externer Kontamination oder bei sonstigen Zwischenfällen mit Gammastrahlern oder höherenergetischen Betastrahlern sofortige zusätzliche Body-Counter-Untersuchungen veranlaßt.

Bei Verdacht einer Plutoniuminkorporation wird außerdem sofort eine Untersuchung im Plutonium-Lung-Counter [8] vorgenommen.

#### 2. Ausscheidungsmessung

Entsprechend den Gegebenheiten des Kernforschungszentrums wird eine routinemäßige Überwachung durch Ausscheidungsanalysen bei folgenden Radionukliden durchgeführt:

a) *Plutonium*: Routinemäßige Ausscheidungsmessungen eines 24-h-Urins in dreimonatigem Abstand. Außerdem sofort bei Zwischenfällen (gegebenenfalls auch in Blut und Faeces). Nachweisgrenze 0,1 pCi/24-h-Urin.

b) *Uran (fluorimetrisch)*: Bei Natururan halbjährliche Routineüberwachung, gemessen im 24-h-Urin. Nachweisgrenze 5  $\mu\text{g/l}$  24-h-Urin.

c) *Uran (Alpha-Aktivität)*: Routinemäßige monatliche Kontrolle im 24-h-Urin, außerdem sofort nach Zwischenfällen. Nachweisgrenze 0,3 pCi/l 24-h-Urin.

d) *Tritium*: Bei laufenden Arbeiten wöchentlich, sonst nach jedem Umgang mit tritiumhaltigem Material. Nachweisgrenze 8 pCi/ml Urin.

e) *Weitere Ausscheidungsbestimmungen* auf Americium, Strontium-90, Kohlenstoff-14 oder Spaltprodukte etc. können im Bedarfsfalle jederzeit durchgeführt werden.

f) Bei Zwischenfällen (Überschreitung der maximal zulässigen Raumluftkonzentration, externer Kontamination etc.) werden außerdem routinemäßig Nasen- und Rachenabstriche durchgeführt, die entweder direkt im Bohrlochkristall oder im Großflächenproportionalzähler ausgemessen bzw. insbesondere bei Verdacht auf Alphakontamination im Radiotoxikologischen Labor chemisch aufgearbeitet werden. Das gleiche gilt für Wundkontamination, wo die exzidierten Gewebsteilchen zur Kontrolle ebenfalls wie die Nasen- und Rachenabstriche direkt ausgemessen bzw. aufgearbeitet werden. Bei Verdacht auf eine mit Plutonium oder anderen Transuranen kontaminierte Wunde wird durch sofortige Untersuchung von Venenblut ein eventuell erfolgtes Eindringen von Alphastrahlern in den Körper festgestellt.

## 2. Inkorporationsmechanismus

Im Falle einer Inkorporierung von Radioisotopen sind vor allem folgende Kriterien von Bedeutung:

1. Effektive Halbwertszeit des Radioisotops bzw. der Isotope, z. B. in einem inkorporierten Spaltproduktengemisch;
2. Charakteristik der emittierten Strahlung (Strahlungsart, Energie);
3. Inkorporierungsmechanismus (Aufnahmeweg, Resorption);
4. Art der Verteilung im Körper.

Von diesen verschiedenen Kriterien, die eine Abschätzung eines Strahlenschadens infolge Inkorporierung radioaktiver Stoffe ermöglichen, soll im folgenden anhand des Inkorporierungsmechanismus, d. h. an Aufnahmeweg und Resorption, gezeigt werden, wie vielseitig die Voraussetzungen und Überlegungen sein müssen und wie unterschiedlich das Verhalten der einzelnen Radionuklide ist.

Als Aufnahmeweg radioaktiver Stoffe in den menschlichen Körper ergeben sich grob schematisiert folgende grundsätzliche Möglichkeiten: 1. Magen-Darm-Trakt; 2. Atemwege; 3. Haut; 4. kontaminierte Wunden.

Bei oraler Aufnahme von Radioisotopen, wie überhaupt für das Problem der Resorption, spielen die Löslichkeit des radioaktiven Materials und die Resorptionsmöglichkeit eine wesentliche Rolle. Während z. B. Strontium und Radium, sowie vor allem Jod und Caesium ausgesprochen gut über den Magen-Darm-Kanal resorbiert werden, ist z. B. die Resorption für die seltenen Erden und die Transurane vernachlässigbar niedrig.

Dieses verschiedene Resorptionsverhalten im Magen-Darm-Trakt spielt nun für den am häufigsten vorkommenden Inkorporierungsweg, der Inhalation radioaktiven Materials durch den Respirations-trakt, eine wesentliche Rolle. In erster Linie handelt es sich hier um das Einatmen von radioaktivem Staub, Dämpfen und Aerosolen. Größere Partikel werden bereits im Nasen-Rachen-Raum und in den oberen Abschnitten der Luftwege abgefangen. Die in der Luftröhre und den größeren Bronchien zurückgehaltenen Partikel werden dann im Rahmen der sogenannten physiologischen Bronchialtoilette (Ciliarwirkung) innerhalb von Stunden bis zu einigen Tagen wieder in den Rachenraum befördert und größtenteils gemeinsam mit den schon im Nasen-Rachen-Raum haften-gebliebenen Teilchen verschluckt und im Magen-Darm-Kanal resorbiert bzw. mit den Faeces ausgeschieden. Dies alles macht das Problem der Absorption, Retention und Ausscheidung von eingeatmetem radioaktivem Material in der Lunge fast hoffnungslos kompliziert. Zahlreiche Faktoren wie Teilchengröße, Löslichkeit, Teilchendichte sowie Atmungsrythmus spielen eine wichtige Rolle.

Allgemein nimmt man als Faustregel [17] folgende Verteilung eingeatmeter Partikel im Atemtrakt an (Tabelle 1):

Anhand zweier Beispiele soll dieses Problem noch einmal verdeutlicht werden. Im Falle einer angenommenen Inhalation einer mäßig löslichen Radiostrontiumverbindung ergibt sich eine direkte Lungenresorption von maximal 10 bis 12% der eingeatmeten Menge. Hinzu kommt nun eine zusätzliche Magen-Darm-Resorptionsrate von etwa 30 bis 70% der verschluckten 62,6% des eingeatmeten Strontiums, also insgesamt eine Resorption von mindestens 40 bis 50% der ursprünglich eingeatmeten Strontiummenge.

Tabelle 1. Verteilung eingeatmeter Partikel im Atemtrakt

Verteilung	Leicht lösliche Verbindungen %	Andere Verbindungen %
ausgeatmet	25	25
In den oberen Atemwegen abgelagert und später verschluckt	50	50
In der Lunge abgelagert (untere Atemkanäle)	25 (dies wird in den Gesamtkörper aufgenommen)	25*

\* Hiervon wird die Hälfte von der Lunge wieder abgegeben, infolge der Ciliarwirkung in die oberen Luftwege zurückgeschafft und verschluckt, so daß also insgesamt 62,5% der ursprünglich eingeatmeten Partikel schließlich in den Magen-Darm-Trakt gelangen und nur 12,5% in der Lunge verbleiben. Je nach Löslichkeit werden dann etwa bis zu 10% relativ schnell in die Blutbahn aufgenommen und entsprechend dem Verteilungsmuster und dem kritischen Organ des entsprechenden Radionuklids abgelagert. Die unlöslichen Partikel in den Lungenalveolen und Bronchiolen werden phagozytiert und vorwiegend in den Lymphknoten der Lunge abgelagert, wobei man durchschnittlich von einer biologischen Halbwertszeit von etwa 120 Tagen in der Lunge ausgeht. Bei relativ schwerlöslichen bzw. unlöslichen Verbindungen dürfte die Absorption in die Blutbahn näher bei 1% als bei 10% der ursprünglich eingeatmeten Mengen liegen.

Ganz anders sind z. B. die Verhältnisse bei einer Inhalation von mäßig löslichem Plutonium. Hier werden ebenfalls maximal etwa 10% der eingeatmeten Menge direkt über die Lunge in den Körper aufgenommen. Da aber die Resorptionsrate des Plutoniums seitens des Magen-Darm-Trakts extrem niedrig ist und etwa zwischen 0,01 bis 0,003% liegt, werden die gleichfalls über die Atemwege in den Magen-Darm-Trakt gelangten 62,5% nahezu vollständig mit den Faeces ausgeschieden, so daß die Gesamtresorption der Plutoniuminhalation bei maximal 10% der eingeatmeten Menge gegenüber mindestens 40 bis 50% beim Einatmen von Radiostrontium liegt.

## 3. Therapeutische Möglichkeiten zur Dekorporierung verschiedener Radionuklide

Welche therapeutischen Möglichkeiten bestehen nun zur Dekorporierung dieser in den Körper gelangten radioaktiven Stoffe? Bei den praktisch wichtigeren Radionukliden handelt es sich um Metallionen. Ihre geringe Ausscheidungsrate und ihre Speicherung ist wohl im wesentlichen durch Adsorptionsprozesse, Ionenaustausch und komplexchemische Reaktionen mit hochmolekularen körpereigenen Stoffen (Proteinen, Nukleinsäuren etc.) ursächlich bedingt. Es wurde deshalb angestrebt, eine Intensivierung ihrer Ausscheidung dadurch zu erreichen, daß man diese Reaktionen durch Verabfolgung löslicher Ionenaustauscher oder niedermolekularer Komplexbildner zu verhindern oder rückgängig zu machen sucht. Entscheidend ist dabei, daß diese Ionenaustauscher und niedermolekularen Komplexbildner eine höhere Affinität zu dem zu dekorporierenden Radionuklid aufweisen als körpereigene Substrate. Für eine ausreichend starke Dekorporierung der gewissermaßen „maskierten“ Radionuklide ist es von entscheidender Bedeutung, daß die betreffende Substanz nicht in Stoffwechselfvorgänge einbezogen, d. h. weder eingebaut noch gespeichert wird. Für Dekorporierungszwecke kommen vornehmlich Chelatbildner in Betracht, da die Effektivität von Komplexbildnern in erster Linie von der Stabilität ihrer Verbindungen mit den in Frage stehenden radioaktiven Metallionen abhängt und die Komplexstabilität im Falle der Chelatbildner besonders hoch ist. Metallchelate stellen einen speziellen Fall von Komplex-Verbindungen dar, bei dem das Metallion Teil eines oder mehrerer Ringstrukturen ist. Die Fähigkeit von Chelatbildnern, einige Schwermetalle im Körper zu binden und damit ihre Ausscheidung zu mobilisieren, zeigte sich in den ausgedehnten Erfahrungen mit EDTA<sup>1</sup> bei den konventionellen Schwermetallvergiftungen.

<sup>1</sup> EDTA = ethylen-diaminetetraacetic acid



Aufgrund der Untersuchungen von Catsch [3] u. a. zeigte es sich, daß ein anderer Chelatbildner, die DTPA<sup>2</sup>, der EDTA überlegen ist. Die höhere Wirksamkeit der DTPA bei einer großen Anzahl von Metallionen ist darauf zurückzuführen, daß die entsprechenden Stabilitätskonstanten größer sind als bei der EDTA, während die Stabilitätskonstanten der Calciumchelate für beide Komplexbildner annähernd identisch sind. — Die Stabilitätskonstante ist ein quantitatives Maß der Bindungsaffinität. — Die Berücksichtigung der Stabilitätskonstanten der Calciumchelate ist insofern erforderlich, als Calcium das wichtigste endogene Kation darstellt, das mit dem zu dekorporierenden Metallion um den therapeutischen Chelatbildner konkurriert. Sowohl bei den stabilen Metallen, wie Blei, Cadmium, Zink, Mangan und Eisen, als auch bei den Radionukliden der seltenen Erden, Yttrium, Ruthenium, Zirkonium, Thorium, Uran, Plutonium, Americium, Curium, Neptunium und Californium, konnte eine erheblich größere Wirksamkeit der DTPA festgestellt werden als durch andere bisher bekannte Verbindungen. Bei oraler Applikation hat sich entsprechend der niedrigen Resorptionsrate (ca. 5%) ein wesentlich geringerer Effekt als bei i. v.-Verabfolgung gezeigt.

In verschiedenen Veröffentlichungen [2, 3, 13, 19, 20, 21, 27, 29, 30, 37 bis 40] über Behandlungen mit Na<sub>3</sub> (Ca-DTPA) bei Inkorporationsfällen konnte festgestellt werden, daß DTPA sowohl in den ersten Tagen, als auch noch nach mehreren Jahren nach erfolgter Inkorporation eine deutlich vermehrte Radionuklid-ausscheidung, sowohl im Urin als auch im Stuhl, bewirkte.

Neuere Untersuchungen von Catsch und Mitarbeitern [4, 5, 15], in denen das Calcium durch Zink ersetzt wurde, zeigten insofern einen Vorteil des angewandten Na<sub>3</sub> (Zn-DTPA) im Vergleich zum Na<sub>3</sub> (Ca-DTPA), als das Zinkchelat einen höheren therapeutischen Index aufweist und die Möglichkeit gibt, die Therapie über längere Zeit auszudehnen. Bisher liegen nur tierexperimentelle Untersuchungen vor, die jedoch eine klinische Erprobung rechtfertigen.

Ein weiterer Komplexbildner, der speziell bei Plutonium im Tierversuch eine etwas höhere Effektivität als DTPA zeigt, ist das Na<sub>4</sub> (Ca-TTHA)<sup>3</sup>. In toxikologischer Beziehung bestehen keine Unterschiede zwischen TTHA und DTPA [3, 42].

Im Falle einer Inkorporation von Radiostrontium erwiesen sich jedoch alle bisher erwähnten Komplexbildner als nur sehr schwach oder überhaupt nicht wirksam. Weitere Untersuchungen, insbesondere von Catsch und Spencer u. a. [3, 34, 36] ergaben jedoch speziell für Strontiuminkorporationen einen anderen Chelatbildner. Spencer hat an Ausscheidungsversuchen an Menschen nach i. v.-Gabe von Strontium-85 einen ausgesprochen günstigen Effekt mit der BADE<sup>4</sup> bzw. dem Calciumdinatriumchelate derselben erzielt.

Catsch [3] hat in Tierversuchen unabhängig von Spencer anstelle des Calcium das Strontiumchelate der BADE untersucht. Er konnte nachweisen, daß die Wirkung eines Chelatbildners sich zu der einer isotopischen Verdünnung weitgehend additiv verhält, was im Endeffekt zu einer nicht unwesentlichen Intensivierung der Radiostrontiumausscheidung führt. In Tierversuchen zeigt es sich, daß die frühzeitige Verabreichung des Na<sub>2</sub>Sr-Chelats eine erheblich stärkere Reduktion der Radiostrontiumablagerung im Skelett als nach Verabfolgung der Na<sub>2</sub>Ca-Verbindung der BADE bewirkte.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen scheint jedoch der günstige Effekt von BADE vorwiegend auf die ersten Tage nach einer Strontiuminkorporation beschränkt zu sein, d. h. solange das inkorporierte Strontium noch nicht endgültig im Knochen abgelagert ist. Bei einem Dekorporierungsversuch 5 Monate nach erfolgter Inkorporation konnte trotz mehrmaliger Infusionen von BADE kein erhöhter Ausscheidungseffekt mehr festgestellt werden. Sollte der hier angeführte Chelatbildner nicht verfügbar sein, so haben Spencer und Mitarbeiter [6, 35] am Menschen nach i. v.-Gaben von Strontium-85 nachgewiesen, daß auch eine Kombination von i. v.-Calciumglukonat mit oralen Gaben von Ammoniumchlorid eine beschleunigte Strontiumausscheidung bewirken kann. Spencer nimmt an, daß die Wirksamkeit des NH<sub>4</sub>Cl bei der Herabsetzung der Retention von Strontium auf der Stoffwechselladose beruht, welche Calcium aus dem Skelett mobilisiert und die Ausscheidung von Calcium und Strontium auf dem

Nierenweg verstärkt. Auf diese Weise wird die Ablagerung von aktivem Strontium in den Knochen herabgesetzt. Die Steigerung der Strontiumausscheidung ist besonders groß, wenn bei gleichzeitiger i. v.-Infusion von Calciumglukonat NH<sub>4</sub>Cl möglichst rasch nach der Inkorporation von Strontium gegeben wird, d. h. wenn noch keine Fixierung im Knochen stattgefunden hat. Spencer hat im weiteren, analog den Versuchen von Catsch beim BADE, versucht, anstelle des Calciumglukonats Strontiumglukonat zu injizieren und dabei ebenfalls einen günstigen Effekt erzielt.

Volf [41] berichtet über gute Erfolge mit oralen Gaben von Bariumsulfat nach oraler Strontiuminkorporation, wenn Bariumsulfat innerhalb der ersten 30 Minuten verabfolgt werden kann. In Anlehnung an tierexperimentelle Untersuchungen anderer Autoren konnten Hesp und Mitarbeiter [16] zeigen, daß orale Verabfolgung von Natriumalginat die enterale Resorption von Radiostrontium in starkem Maße hemmt. Nachdem G. E. Harrison [45] nachweisen konnte, daß eine Verfütterung von 10% Natriumalginat an Ratten zu keinen unerwünschten Nebenwirkungen führt, liegt die prophylaktische Verabfolgung von Natriumalginat an radiostrontiumgefährdete Personen oder Bevölkerungsgruppen nahe. J. F. Stara [45] zeigte weiterhin, daß bereits inkorporiertes Radiostrontium durch eine dauernde Verfütterung von Natriumalginat an Katzen in stärkerem Maße ausgeschieden wird. Allerdings wurden diese günstigen Ergebnisse von H. Smith [45] an Mäusen nicht bestätigt.

Ganz anders wiederum sind z. B. die therapeutischen Möglichkeiten bei radioaktivem Caesium, bei dem sich ebenfalls keiner der erwähnten Komplexbildner als wirksam erwies. Anhand von Tierversuchen konnte festgestellt werden, daß das in den Körper gelangte Caesium weniger über die Nieren als vielmehr in den Darm ausgeschieden wird. Gleichzeitig aber wird das wie immer in den Darm gelangte Caesium von jenem auch wieder in Form eines enteralen Kreislaufs rückresorbiert. Es kommt also darauf an, während der Verweilzeit des Caesiums im Darm diesen Ausscheidungs- und Rückresorptionszyklus zu unterbrechen.

Nigrovic und Mitarbeiter [23 bis 26] konnten seit 1963 in ausgedehnten Versuchen an Ratten und Hunden, schließlich auch am Menschen, zeigen, daß die orale Applikation von Ferri-Cyanoferrat-II (Berliner Blau) durch seine Kaliumabsättigung und praktische Unlösbarkeit die fackale Exkretion von Caesium beträchtlich erhöht. Berliner Blau fungiert im Darm vermutlich als Ionenaustauscher mit besonderer Affinität zu Caesium, nimmt dieses im Austausch mit K<sup>+</sup> auf und scheidet es so mit den Faeces aus. Hierbei ist es gleichgültig, ob Caesium oral oder parenteral verabfolgt wurde. Es gelang, jeweils die biologische Halbwertszeit um mehr als die Hälfte zu senken. Von besonderer praktischer Bedeutung ist die Unabhängigkeit der Dekorporierungseffektivität von Berliner Blau vom zeitlichen Intervall zwischen der Aufnahme von Caesium und dem Beginn der Behandlung.

#### 4. Schematische Zusammenfassung von Behandlungsmöglichkeiten bei Inkorporation einiger wichtiger Radionuklide

Unter Mitverwertung der Dosierungsangaben in den bisherigen Veröffentlichungen über experimentelle Dekorporierungsversuche am Menschen und über erfolgte Behandlungen bei Strahlenunfällen werden im folgenden die therapeutischen Möglichkeiten bei Inkorporation verschiedener Radionuklide zusammengestellt, die nach dem derzeitigen Stand der Erfahrungen für eine erfolgversprechende Behandlung geeignet erscheinen.

##### A. Inkorporationen über den Magen-Darm-Trakt

###### I. Allgemeine Sofortmaßnahmen

- Magenspülungen mit verdünnter Tierkohlenaufschwemmung (eventuell Apomorphinjektion);
- anschließend Carbo-animalis mit viel Wasser und Natriumsulfuric (Glaubersalz);
- Ionenaustauscher.

###### II. Speziellere Maßnahmen

- Caesium: „Radiogardase-Cs“ (mit Kalium abgesättigtes praktisch unlösliches Berliner Blau). — Dosierung: Täglich 3 g in sechs gleichmäßig verteilten Einzeldosen unzerkaut mit reichlich

<sup>2</sup> DTPA = diethylenetriaminepentaacetic acid

<sup>3</sup> TTHA = triethylenetetraaminehexaacetic acid

<sup>4</sup> BADE = 2:2'-bis[di(carboxymethyl)amino]diethyl-ether

Wasser schlucken. Keine Kontraindikationen bekannt. — Arzneiform: Gelatinekapselform zu je 0,5 g. — Hersteller: Chemisch-pharmazeutische Fabrik Heyl & Co., Berlin 37.

b) *Strontium*: 1. Möglichst innerhalb der ersten 30 Minuten nach oraler Inkorporation 150 bis 200 g Bariumsulfat in Wasser gelöst. — 2. Intravenöse Infusion von 10%igem Calciumgluconat 50,0 ml in 500 ml 5%iger Glukoselösung. Tropfdauer 2 bis 4 Stunden. 3 Tage hintereinander je 1 Infusion. Gleichzeitig oral Ammoniumchlorid  $3 \times 3$  g/die. — 3.  $\text{Na}_2$  (Ca-BADE), falls vorhanden (anstatt von 1. und 2.). Dosierung: 1 bis 3 g als i. v.-Infusion in 500 ml physiologischer NaCl-Lösung. Tropfdauer etwa 2 bis 4 Stunden. 3 Tage je 1 Infusion. Kontraindikationen wie bei DTPA. Arzneiform: Ampullen mit 1 g/4 ml. Hersteller: z. Z. nicht im Handel (Geigy/Basel).

c) *Seltene Erden, Y, Ru, Zr, Th, U, Pu, Am, Np, Cf und die stabilen Metalle Pb, Cd, Zn, Mn, Fe*:  $\text{Na}_3$  (Ca-DTPA). — Behandlungsschema: 1. *Akute Situation*: Tagesdosis mindestens 1 bis maximal 3 g. Tägliche Behandlung an 3 bis 5 aufeinanderfolgenden Tagen, dann 5 behandlungsfreie Tage. — 2. *Chronische Behandlung*: Jeden 2. bis 4. Tag je 0,5 bis 1 g. Applikationsart: Intravenöse Infusion. Tagesdosis in physiologischer NaCl-Lösung, wobei die Konzentration von 3% nicht überschritten werden soll. Infusionsdauer: 1 bis 4 Stunden. Intramuskuläre Injektion nur, wenn i. v.-Applikation nicht durchführbar. Tiefe intraglutale Injektion von 1 g als 25%ige Lösung mit Zusatz von Lokalanästheticum. Inhalation von 2%iger Lösung als akute Maßnahme nach Inhalation von Radionukliden und Metallen (tierexperimentell höherer therapeutischer Effekt, klinische Erfahrungen liegen noch nicht vor). — *Kontraindikationen*: Nephritis, Nephrose. Absetzen der Behandlung bei dem an sich seltenen Auftreten von Nebenerscheinungen (Albuminurie, Zylinder und Erythrocyten im Urin, erhöhter Rest-N, Exantheme, Fieber, u. a. m.). Eine Weiterführung der Therapie ist auch dann kontraindiziert, wenn sie keine Wirkung mehr erkennen läßt, d. h. das zu deponierende Radionuklid bzw. Metall im Urin nicht mehr nachweisbar ist. Arzneiform: Ampullen mit 1 g  $\text{Na}_3$  (Ca-DTPA) als 25%ige wäßrige Lösung mit pH = 7,4. Hersteller: z. Z. nicht im Handel (Geigy/Basel und eventuell in Kürze Heyl/Berlin).

## B. Inkorporation über den Respirationstrakt

### I. Allgemeine Maßnahmen

- Mund-, Nasen-, Rachen-Spülungen mit 3%iger Zitronensäure;
- Verabfolgung von Expektorantien.

### II. Spezielle Maßnahmen

Siehe A. II. a) bis c).

## C. Inkorporation infolge Hautverletzung

### I. Allgemeine Maßnahmen

- Wundsäuberung und Wunddekontamination;
- gegebenenfalls chirurgische Intervention.

### II. Spezielle Maßnahmen

- Lokale Anwendung von geeigneten Komplexbildnern;
- siehe A. II. a) bis c).

Bei dieser Zusammenstellung therapeutischer Maßnahmen bei Inkorporationen einiger Radionuklide kann jedoch nicht eindringlich genug darauf hingewiesen werden, daß eine Dekorporationstherapie nur dann erfolgreich sein kann, wenn über entsprechende Kenntnisse und Erfahrungen verfügende Strahlenschutzphysiker, Radiotoxikologen und Ärzte eng zusammenarbeiten, um erforderlichenfalls möglichst rasch feststellen zu können, was, wie und wieviel inkorporiert wurde. Die Anwendung von Komplexbildnern erscheint nur angezeigt, wenn der

Nuklidgehalt im Körper den von der ICRP [17] als maximal zulässig angesehenen Wert überschreitet. Im Falle kontaminierter Verletzungen ist ein therapeutisches Eingreifen insbesondere auch lokal bei niedrigeren Aktivitäten indiziert.

Es ist deshalb dringend zu empfehlen, alle entsprechenden Inkorporationsfälle möglichst rasch einem geeigneten ärztlichen Behandlungszentrum zuzuführen, welches alle Voraussetzungen sowohl radiotoxikologischer- als auch meßtechnischerseits einschließlich eines Human Body Counters erfüllt.

## Literatur

- Born, W. C.: *Strahlentherapie* 106, 435 (1958)
- Brugsch et al.: *New Engl. J. Med.* 272, 933 (1965)
- Catsch, A.: "Radioactive Metal Mobilization in Medicine", Charles C. Thomas, Springfield 1964
- Catsch, A.: *Arch. exp. Path. Pharm.* 246, 316 (1964)
- Catsch, A. et al.: *Int. J. Rad. Biol.* 8, 35 (1964)
- Charles, M. L. et al.: *Int. J. Appl. Rad. Isotop.* 5, 253 (1959)
- Chromow, B. M.: „Kombinierte Strahlenschädigungen“, Akademie-Verlag, Berlin 1964
- Ehret et al.: "Assessment of Radioactivity in Man", Vol. I, IAEA, Wien 1964, S. 141
- Epstein, R. J. et al.: *Health Phys.* 12, 29 (1966)
- Faes, M. H.: *J. Belg. Rad.* 47, 178 (1964)
- Fessler, H. et al.: "Personal Dosimetry for Radiation Accidents", Proceedings, IAEA, Wien 1965
- Foreman: "Diagnosis and Treatment of Radioactive Poisoning", IAEA, Wien 1963, S. 387
- Fuqua: *Industr. Med. Surg.* 34, 335 (1965)
- Guzak, St. V.: *RFP-453* (1964)
- Harmuth-Hoene et al.: *Int. J. Rad. Biol.* 10, 479 (1966)
- Hesp, R. et al.: *Nature* 208, 1341 (1965)
- ICRP Publikation 2, Report of Committee II, Pergamon Press, 1959
- Langham, W. H.: *Health Phys.* 2, 172 (1959)
- Lagerquist et al.: *Health Phys.* 11, 117 (1965)
- Lagerquist et al.: *Health Phys.* 13, 1 (1967)
- McDonald: *Clin. Pediatr.* 5, 457 (1966)
- Moldenhawer, H. F.: *Kernenergie* 5, 585 (1962)
- Nigrovic, V.: *Int. J. Rad. Biol.* 7, 307 (1965)
- Nigrovic, V.: *Phys. Med. Biol.* 10, 81 (1965)
- Nigrovic, V. et al.: *Strahlentherapie* 130, 413 (1966)
- Nigrovic, V. et al.: *Int. J. Rad. Biol.* 10, 519 (1966)
- Norwood: *Arch. Environ. Health* 9, 529 (1964)
- Nosek, J. et al.: *Health Phys.* 2, 306 (1960)
- Plotnikova et al.: *Mediz. Radiol. (Moskau)* 9, (No. 1) 49, (1964)
- Rosoff et al.: *Int. J. Appl. Rad. Isotopes* 16, 479 (1965)
- Salak, W. W. et al.: *Surg. Forum* 14, 30 (1963)
- Salak, W. W. et al.: *J. Trauma* 3, 453 (1963)
- Scheel, H.: *Kernenergie* 7, 197 (1964)
- Spencer, H. et al.: *Clin. Sci.* 17, 291 (1958)
- Spencer, H. et al.: *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 108, 308 (1961)
- Spencer, H. et al.: *J. Lab. Clin. Med.* 59, 445 (1962)
- Spencer, H. et al.: *Health Phys.* 11, 1181 (1965)
- Spencer, H. et al.: *Health Phys.* 12, 475 (1966)
- Swanberg et al.: *J. Occup. Med.* 6, 174 (1964)
- Tisher et al.: *Clin. Res.* 14, 142 (1966)
- Volf, V.: *Phys. Med. Biol.* 6, 287 (1961)
- v. Wedelstaedt, E. et al.: *Strahlentherapie* 128, 385 (1965)
- Wijker, H.: *EUR* 2210, 393 (1964)
- Wijker, H.: *EUR/C/1605/66*
- Vorträge anlässlich des "Symposium on Diagnosis and Treatment of Deposited Radionuclides", Session IV, in Richland/USA, vom 15. bis 17. Mai 1967

Anschrift des Verfassers: Dr. med. Günther Möhrle, Leiter der Medizinischen Abteilung, Gesellschaft für Kernforschung mbH, 75 Karlsruhe, Postfach 3640

**Ärztliche Überlegungen und Richtlinien für die Personendekontamination und Dekorporierung**

**I. Personendekontamination**

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen wird auf praktische Dekontaminations-Einrichtungen hingewiesen und über allgemeine und spezielle Dekontaminationsmaßnahmen sowie über die ärztliche Versorgung kontaminierter Wunden zusammenfassend berichtet.

**II. Dekorporation**

Dieser zweite Teil der Arbeit befaßt sich einleitend mit einer sinnvollen Inkorporationsüberwachung und geht anschließend auf den Inkorporationsmechanismus und die therapeutischen Möglichkeiten zur Dekorporierungsintensivierung näher ein. Den Abschluß bildet eine schematische Zusammenfassung von Behandlungsmöglichkeiten bei Inkorporation einiger wichtiger Radionuklide.

**Medical Considerations and Guide Lines on Personnel Decontamination and Decorporation**

**I. Personnel Decontamination**

In the light of previous experience attention is drawn to practical decontamination facilities and a summary review is given of general and specific decontamination measures as well as the medical treatment of contaminated wounds.

**II. Decorporation**

This second part of the author's paper in its introduction deals with a appropriate control of incorporation mentioning in greater detail the mechanism of incorporation and the therapeutic possibilities of decorporation intensification. The paper is concluded by a schematic summary of possibilities of treatment in case of incorporation of some major nuclides.

**Réflexions et directives médicales en matière de décontamination de personnes et de décorporation**

**I. Décontamination de Personnes**

Compte tenu des expériences acquises, l'auteur rappelle des installations pratiques de décontamination et présente un résumé de mesures de décontamination d'ordre général et spécial, ainsi que des soins médicaux apportés aux blessures contaminées.

**II. Décorporation**

La deuxième partie traite en préambule d'un contrôle utile de l'incorporation pour passer ensuite à une étude détaillée du mécanisme d'incorporation et des possibilités thérapeutiques en vue de l'intensification de la décorporation. Pour terminer, il donne un aperçu schématique des possibilités de traitement en cas d'incorporation de certains radionuclides importants.