

Der Strahlenunfall

Informationsschrift zur Behandlung von Strahlenverletzten

Zum Titelbild:

Chromosomenaberrationen nach Bestrahlung

In dieser Zelle sind die Chromosomen 2, 3 und 5 grün, die übrigen blau fluoreszierend gefärbt. Alle Zentromeren (Einschnürungen) kommen rötlich zur Darstellung. Sichtbar ist eine reziproke Translokation zwischen einem grün und einem blau gefärbten Chromosom. Erkennbar ist auch ein dizentrisches Chromosom (2 Einschnürungen) mit zugehörigen Fragmenten.

Das Bild wurde uns freundlicherweise von Dr. D. Lloyd, National Radiological Protection Board (NRPB), Chilton, Didcot, Oxon (England) zur Verfügung gestellt.

Chirurgische Versorgung einer leicht kontaminierten Wunde

Die übliche chirurgische Kleidung genügt zum Selbstschutz. Kleidung, Operationsmaterial und Débridement sollen jedoch in Plastiksäcke verpackt und einem Strahlenphysiker zur Dosimetrie zugestellt werden.

Suva
Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
Arbeitsmedizin
Postfach, 6002 Luzern
Telefon 041 419 51 11
Fax 041 419 59 17 (für Bestellungen)
Internet www.suva.ch

Der Strahlenunfall

Informationsschrift zur Behandlung von Strahlenverletzten

Autoren: Dr. med. Ulrich Weickhardt
Suva, Abteilung Arbeitsmedizin
Überarbeitung durch Dr. med. Johannes Meier
Suva, Abteilung Arbeitsmedizin

Nachdruck mit Quellenangabe gestattet.

1. Auflage – April 1992

2. überarbeitete Auflage – Juli 2001 – 25 000 bis 30 000

Bestellnummer: 2869/21.d

Herrn Dr. E. Stoll, HSK Würenlingen, sei an dieser Stelle für seine wertvolle Mitarbeit gedankt.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	2
2.	Wichtige Begriffe	3
3.	Dosisgrößen und Doseinheiten	6
4.	Unfallereignisse	8
5.	Definition und Einteilung des Strahlenunfalls	23
6.	Externe Bestrahlung	24
6.1	Ganzkörper	25
6.2	Teilkörper	34
6.3	Kombinationsverletzungen	36
7.	Kontamination	38
7.1	Externe	38
7.2	Interne (Inkorporation)	44
7.3	Spurensicherung	48
8.	Diverses	49
8.1	Iodprophylaxe	49
8.2	Schwangerschaft und Strahlenunfall	55
8.3	Fertilität	57
9.	Vorgehen beim Strahlenunfall (Zusammenfassung)	58
	Anhänge	
I	Kontaktadressen	61
II	Chromosomenanalyse	63
III	Wichtige Radionuklide	64
IV	Notfallorganisation KKW-Unfall	66
V	Literaturverzeichnis	68

1. Einleitung

Unfälle mit ionisierenden Strahlen, im Folgenden der Einfachheit halber Strahlenunfälle genannt, sind äusserst seltene Ereignisse. Die wenigsten Ärzte in unserem Lande haben deshalb Erfahrung mit der Behandlung von Strahlenverletzungen.

Trotz ihrer Seltenheit ist es wünschenswert, dass jeder praktizierende Arzt grundsätzlich über das Vorgehen bei Strahlenunfällen Bescheid weiss, könnte doch bei einem Grossunfall, mit zahlreichen Strahlenverletzten, auch der Nichtspezialist einmal bei Ersthilfemassnahmen gefordert werden. Ausserdem leistet ein gutes Basiswissen über Strahlenunfälle dem praktizierenden Arzt auch bei der Beratung seiner Patienten gute Dienste.

Die vorliegende Broschüre ist in ihrer Erstauflage auf Wunsch der EKS (Eidg. Kommission für Strahlenschutz) entstanden.

2. Wichtige Begriffe

Ionisierende Strahlung

Energiereiche Strahlung, die in der Lage ist, Atome in positiv und negativ geladene Teilchen (Ionen) aufzuspalten. Es wird zwischen Korpuskularstrahlung (Alpha-Teilchen, Elektronen usw.) und elektromagnetischer Wellenstrahlung (Röntgen- und Gamma-Strahlen) unterschieden.

Radioaktivität

Eigenschaften eines Nuklids unter **spontanem Zerfall** und Emission von **ionisierender Strahlung** in ein anderes überzugehen. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem instabilen Nuklid, im Gegensatz zu den nicht radioaktiven und damit stabilen Nukliden. Von zirka 1700 bekannten Nukliden sind nur zirka 280 stabil. Natürliche radioaktive Nuklide sind z.B. Uran-238, Radium-226 und Thorium-232.

Strahlenarten (ionisierende)

Alpha-Strahlen

Doppelt positiv geladene Heliumkerne. Sehr energiereich, haben aber im Gewebe nur eine sehr kurze Reichweite von wenigen μm . Abschirmung bereits mit einem Blatt Papier möglich.

Beispiel eines Alpha-Strahlers: Plutonium-242.

Beta-Strahlen

Einfach negativ geladene Elektronen. Je nach Erzeugungsart unterschiedlich energiereich. Reichweite im Gewebe einige Millimeter bis einige Zentimeter. Abschirmung mit Plexiglasscheibe möglich. Beispiel für Beta-Strahler: Tritium.

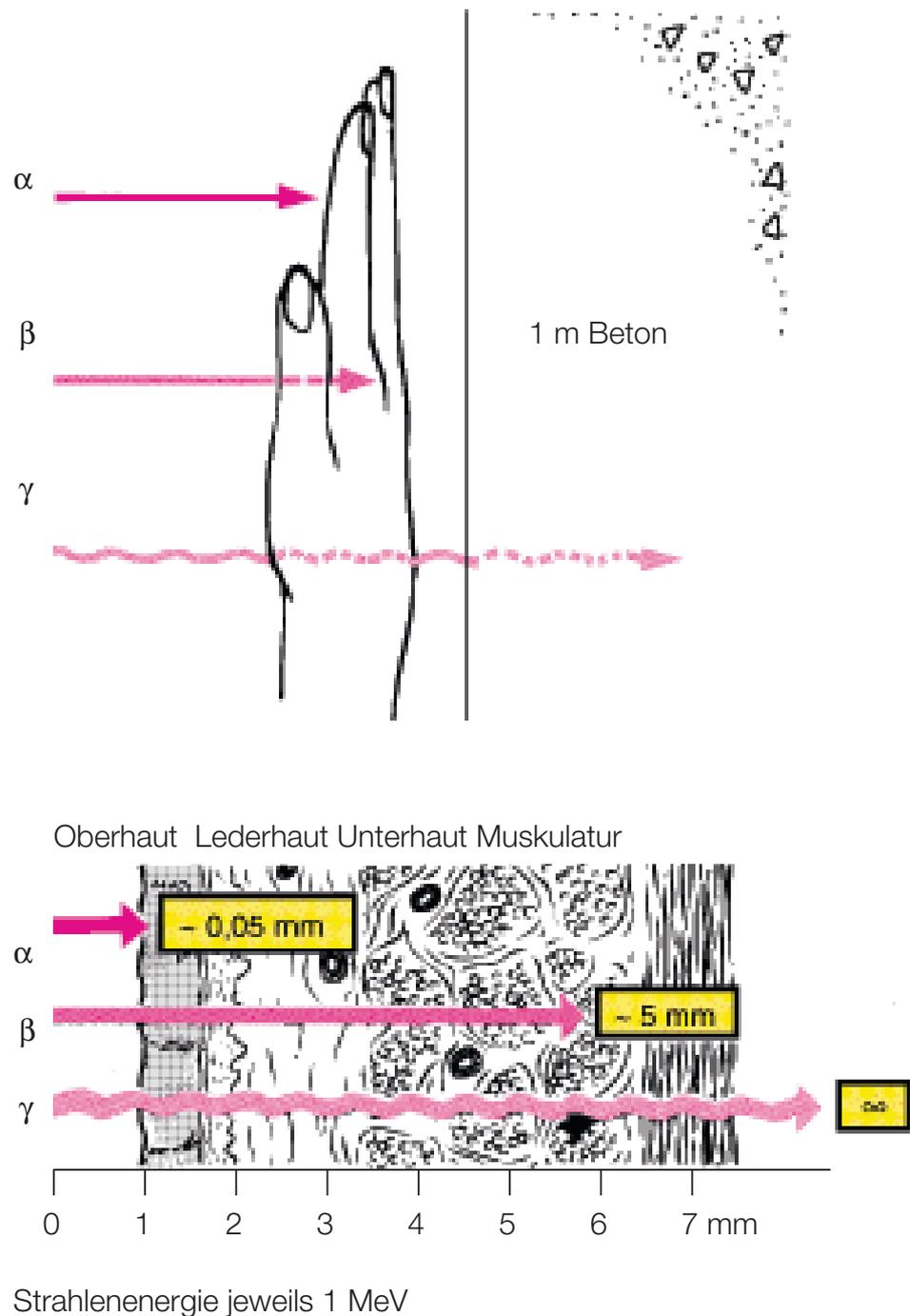


Abbildung 1: Eindringtiefe verschiedener Strahlenarten

Neutronen-Strahlen

Neutronen sind Bestandteile des Atomkerns, besitzen keine elektrische Ladung und haben zirka ein Viertel der Masse eines Heliumkerns (Alpha-Teilchen). Je nach Erzeugungsart unterschiedlich energiereich und mit verschiedenen Eindringtiefen. Neutronenstrahlung kommt praktisch nur im Kernenergiebereich vor.

Röntgen-Strahlen

Meist relativ wenig energiereiche elektromagnetische Wellenstrahlung. Entsteht beim Aufprall von Elektronen auf Materie (Röntgenröhre). Keine definierte Reichweite. Exponentieller Abfall im Gewebe.

Gamma-Strahlen

Sehr energiereiche elektromagnetische Wellenstrahlung. Entsteht beim Zerfall radioaktiver Atome. Sehr durchdringend. Keine definierte Reichweite. Exponentieller Abfall im Gewebe. Beispiel für Gamma-Strahler: Technetium-99m.



Strahlenquelle

Apparat oder radioaktiver Stoff welcher ionisierende Strahlung abgeben kann.

offene Strahlenquelle

Strahlenquelle, die radioaktive Stoffe enthält, welche austreten und damit zu Kontaminationen führen können. Beispiel: Tritium-Leuchtfarbe in der Uhrenindustrie.

geschlossene Strahlenquelle

Strahlenquelle, die radioaktive Stoffe enthält, welche aber in einem Behälter derart eingeschlossen sind dass sie keine Kontaminationen verursachen können. Beispiel: Telekobalt-Therapieeinheit.

3. Dosisgrössen und Dosisseinheiten

Grösse	SI-Einheit	Grössen- definition	alte Einheit	Einheits- zeichen	Umrech- nung
Energie- dosis	Gray Einheiten- zeichen: Gy 1 Gy = 1 J/kg	Gesamte absorbierte Strahlungs- energie in der Masseinheit	Rad	rd	1 Gy = 100 rd
Äquivalent- dosis	Sievert Einheiten- zeichen: Sv 1 Sv = 1 J/kg	Energiedosis multipliziert mit dem dimensi- onslosen Bewer- tungsfaktor der vorliegenden Strahlenart	Rem	rem	1 Sv = 100 rem
Aktivität	Becquerel Einheiten- zeichen: Bq 1 Bq = 1 s ⁻¹	Anzahl radio- aktiver Kern- umwandlungen pro Zeiteinheit	Curie	Ci	1 Ci = 3,7x10 ¹⁰ Bq

Tabelle 1: Die für den Arzt wichtigsten Dosisgrössen

Bemerkungen zur Energiedosis und Äquivalentdosis

Es ist selbstverständlich, dass nur die im Gewebe absorbierte Energie zu Schäden führt. Das Mass der im Gewebe absorbierten Energie ist das Gray. Trotz gleich grosser Energieabsorption kann jedoch der Schaden je nach

Strahlenart (Alpha, Beta, Gamma usw.) verschieden sein, und zwar deshalb, weil die Energie im Gewebe räumlich-zeitlich verschieden deponiert wird: Alpha-Strahlen z.B. geben ihre Energie **konzentriert** und räumlich eng begrenzt ab, Röntgenstrahlen hingegen **diffus**, «verdünnt». Dies spielt vor allem bei niedrigen Dosen und für Langzeitwirkungen eine Rolle (Kanzergenität). Um die Wirkung verschiedener Strahlenarten diesbezüglich miteinander vergleichen zu können, braucht es daher einen «Bewertungsfaktor» (= Qualitätsfaktor). Nach Multiplikation der Energiedosis (in Gray) mit diesem Faktor erhalten wir die Äquivalentdosis (in Sievert). Da der Qualitätsfaktor als solcher dimensionslos ist, haben Sievert und Gray die gleiche Grössenbezeichnung (J/kg)

Für die Beurteilung der akuten Strahlenschäden ist die Energiedosis (in Gray) ausschlaggebend. Die Äquivalentdosis in Sievert ist dagegen vorwiegend ein Mass für die onkogene Wirkung (siehe oben) und spielt deshalb bei Unfallereignissen, wo nur die akute Strahlenverletzung beurteilt werden muss, keine wesentliche Rolle. Im Folgenden werden wir uns deshalb vorwiegend mit der Energiedosis (Gray) befassen. Nur im Kapitel Iodprophylaxe, wo es im Prinzip um die Verhütung von Strahlenkrebs geht, werden wir die Äquivalentdosis (Sievert) benutzen.

In praxi ist die Situation übrigens verhältnismässig einfach: Die meisten unfallmässigen Strahlenverletzungen gehen auf Bestrahlungen mit Beta-, Gamma- und Röntgenstrahlen zurück. Für diese Strahlenarten beträgt der Qualitätsfaktor 1. Somit ist die Energiedosis in Gray gleich gross wie die Äquivalentdosis in Sievert!

Bemerkungen zur Aktivität

Die Aktivität gibt, für sich alleine betrachtet, noch keinen Anhaltspunkt für die Gefährlichkeit einer radioaktiven Substanz! Wichtig ist hier die Art der beim Kernzerfall entstehenden Strahlung (Alpha, Beta, Gamma usw.) und die Energie sowie Reichweite derselben.

4. Unfallereignisse

Offene oder geschlossene Strahlenquellen werden heute in vielen Bereichen unseres täglichen Lebens verwendet: In Industrie und Technik, in der Medizin und in der Energiewirtschaft.

In der Industrie, in der Forschung und in der Medizin weisen die Strahlenquellen ein beschränktes Gefahrenpotential auf (z.B. Anlagen zur Erzeugung von ionisierender Strahlung wie Röntgengeräte und Linearbeschleuniger. Telekobalt zur Tumorbehandlung. Gammagraf [z.B. mit Iridium-192] zur Schweissnahtprüfung. Tritium-Leuchtfarben in der Uhrenindustrie). Trotz ihrer häufigen Anwendung kommen Unfälle nur selten vor. Betroffen sind im allgemeinen einzelne Personen oder kleine Personengruppen.

Im Gegensatz dazu haben die Strahlenquellen im Kernenergiebereich ein enormes Gefahrenpotenzial. Unfälle sind allerdings noch bedeutend seltener als im oben erwähnten medizinischen und industriellen Bereich. Falls etwas passiert, drohen allerdings katastrophale Auswirkungen mit vielen Strahlenopfern.

Was für Strahlenunfälle sind bis heute tatsächlich vorgekommen?

Im Bericht der Vereinten Nationen «Sources and Effects of Ionizing Radiation». Band I (UN 2000) sind die publizierten Strahlenunfälle aufgeführt. Die Zusammenstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, die umfassendsten Angaben stammen aus den USA und umfassen die Jahre 1944–1999. Es werden folgende Zahlen aufgeführt:

Art des Unfalls	Zahl der Unfälle
Kritikalitätsunfälle (Kritische Anordnungen, Reaktoren und chemische Aufarbeitung)	22
Unfälle mit Bestrahlungsgeräten (primär verschlossene Quellen, Röntgengeräte, Beschleuniger)	305
Unfälle mit Radioisotopen (Industrie, Forschung und Medizin)	84
Total	411

Tabelle 2: Anzahl Ereignisse

Die Zahl der betroffenen Personen wird dabei nicht angegeben. Der grösste Unfall war sicher derjenige von Tschernobyl. Für die Periode 1975–1994 werden 98 Arbeitsunfälle gemeldet (ohne Tschernobyl) mit 144 Betroffenen, wobei 8 Personen umkamen.

Im Folgenden nun kurz zusammengefasst einige typische Unfallereignisse.

Einzelunfälle

① Am 20.2.1999 führte ein Schweisser in einem Druckleitungsrohr eines Wasserkraftwerkes in Yanango/Peru Reparaturarbeiten aus. Da die Reparatur sehr dringend war, wurde die komplette Bestrahlungseinheit mit darin abgeschirmt aufbewahrter Iridium-Strahlenquelle zur Schweissnahtprüfung bereitgestellt und dann aber unbeaufsichtigt stehen gelassen. Aus nicht geklärter Ursache lag die Strahlenquelle später am Boden, wurde vom

Schweisser nachmittags um etwa 16.00 Uhr aufgelesen und in die rechte Gesässtasche gesteckt. Am späteren Abend bemerkte der Schweisser in der Gesässregion eine leichte Rötung, die vorerst als Folge eines Insektenstiches interpretiert wurde. Um Mitternacht wurde das Fehlen der Iridium-Strahlenquelle durch die Prüfequipe bemerkt und rund eine Stunde später beim Schweisser zu Hause die Strahlenquelle gefunden. In den folgenden Tagen kam es am rechten Gesäss, bis in die Oberschenkelregion reichend, zu Blasenbildung. Ulcerationen und tiefe Nekrosen führten 6 Monate später im August 99 schliesslich zu einer Oberschenkelamputation. Die Rekonstruktion des Unfallhergangs und Dosisberechnungen lassen lokal für den Femur eine Dosis von 10 Gy, für die Femoralarterie 12 Gy und für den Ischiasnerv 25 Gy vermuten.

② Am 11.7.1985 musste eine Arbeiterin in einem Schweizer Leuchtfarbenbetrieb Tritiumgas in Glaskapillaren abfüllen. Die Kapillaren wurden zuerst evakuiert und, nach Einfüllen des Gases, mit der offenen Flamme (Bunsenbrenner) abgeschmolzen (Abb. 8, 9).

Plötzlich liessen sich die Röhrchen nicht mehr zuschmelzen, sondern bars-ten jeweils an der abzuschmelzenden Stelle.

In der Folge stellte sich heraus, dass eine falsche Manometerablesung zu einem Überdruck an Tritiumgas geführt hatte (normalerweise wird bei leichtem Unterdruck gearbeitet).

Die betroffene Arbeiterin und ein Nebearbeiter haben grosse Mengen Tritium inhaliert. Parallel durchgeführte physikalische Urinmessungen und Chromosomenanalysen in Lymphozytenkulturen liessen auf eine Ganzkörperbestrahlung von 0,4 Gy bei der betroffenen Arbeiterin und wenigen cGy beim Nebearbeiter schliessen.

Hospitalisation zwecks forcierter Diurese mit i.v. Flüssigkeitszufuhr und Lasix während 5 Tagen. Keine Allgemeinsymptome, keine Blutbildveränderungen.

③ Im März/April 1974 ereignete sich folgender Unfall in den USA: An einem Fluoreszenz-Spektrometer (Röntgenstrahlen) mussten Reparaturarbeiten durchgeführt werden. Wegen Ausfall des Warnlichts manipulierte der Reparatuer bei laufender Anlage (!) mit seinen Händen im Bereich des Röntgenstrahls. Dies während einer Stunde an verschiedenen Tagen (21. und 29. März sowie am 2. und 4. April).

Am 4. April kam es erstmals zu Rötung, später auch Blasenbildung und Hautnekrosen an den Händen. Wegen äusserst starken Dauerschmerzen sowie einem chronischen Strahlenulcus musste das Endglied des linken Zeigefingers amputiert werden.

206390



Abbildung 2: Strahlenverbrennung mit Cs-137-Quelle
1 Monat nach Unfall

206391

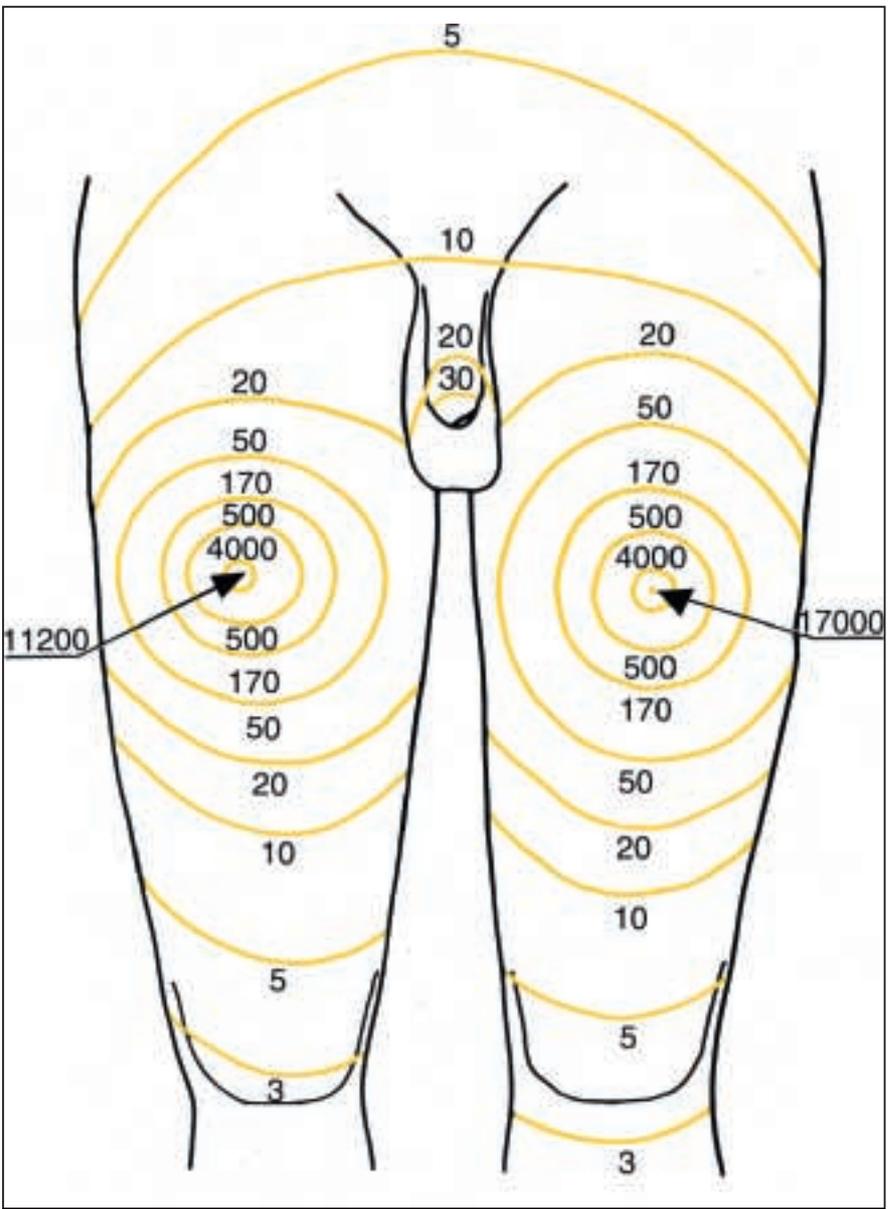


Abbildung 3: Strahlenverbrennung mit Cs-137-Quelle
4 Monate nach Unfall



Abbildung 4: Strahlenverbrennung mit Cs-137-Quelle
9 Monate nach Unfall

206393



206394

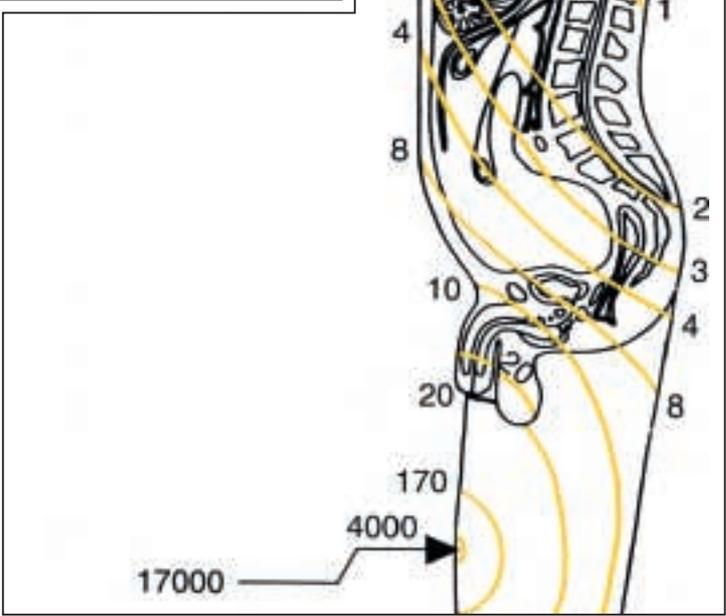


Abbildung 5 + 6: Dosisberechnung (Gy)

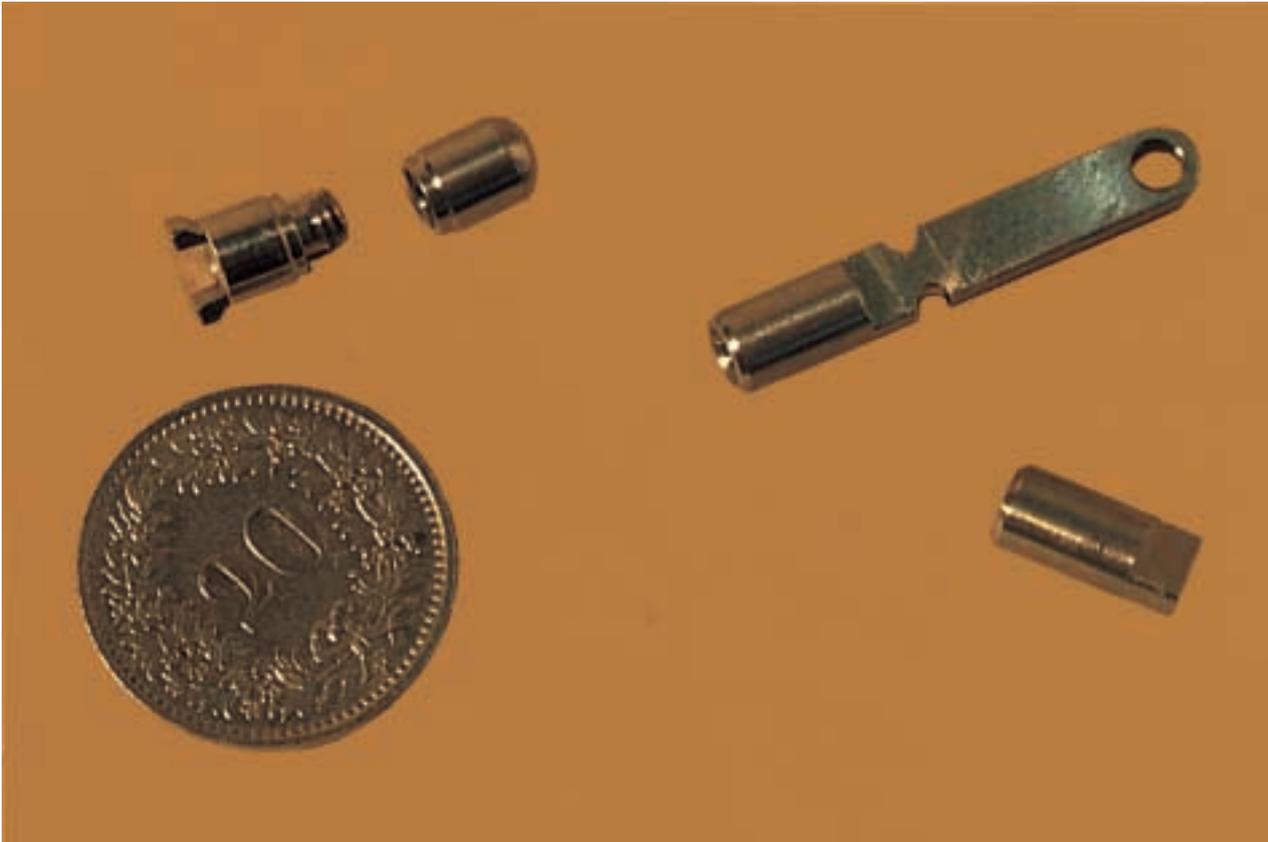


Abbildung 7: Strahlenquellen für Materialprüfung

206396



206397



Abbildung 8 + 9: Abschmelzen der mit Tritium gefüllten Kapillaren

Grossunfälle

① Am 6.12.1983 ist in Ciudad Juarez, Mexiko, eine stillgelegte Kobalt-60-Therapie-Einheit gestohlen worden. Das Gerät wurde auf einem Lastwagen abtransportiert. Die Quellenkapselung wurde dabei beschädigt. Kleine Kobalt-60 enthaltende Metallkügelchen wurden freigesetzt. Der beladene Lastwagen war während mehreren Wochen in einem Wohngebiet der Stadt parkiert. Das Therapiegerät wurde als Schrott verkauft. Bei all den Manipulationen war ein Teil der Kobalt-60-Kügelchen verloren gegangen. Das verschrottete Gerät wurde eingeschmolzen und kam als kontaminierter Stahl in den Handel!

Man nimmt an, dass etwa 200 Personen Dosen zwischen 0,01 bis 0,5 Gy erhalten haben. Zwei Personen wurden an Händen und Füßen so stark bestrahlt, dass akute Hautschäden aufgetreten sind. 4 Personen erhielten Ganzkörperdosen von mehr als 3 Gy.

② Am 26.4.1986 kam es in Tschernobyl, in der Ukraine, bei einem Experiment im dortigen Kernkraftwerk, nach verschiedenen groben Missachtungen der Betriebsvorschrift zu einem Kritikalitätsexkurs (mit explosionsartigem Bersten des Brennstoffs). Der Reaktor wurde dabei zerstört, ein langanhaltender Graphitbrand konnte nur mit Mühe unter Kontrolle gebracht werden. Der betroffene, spezifisch russische Reaktortyp war nicht mit einem Containment umgeben!

Es wurden insgesamt zwischen $5-8 \times 10^{18}$ Bq Spaltprodukte freigesetzt. 30 Personen kamen beim Unfall ums Leben, 28 davon als Folge der Strahlenexposition. 134 Personen wurden zur Behandlung eines akuten Strahlensyndroms hospitalisiert. Bei den betroffenen Personen handelte es sich vorwiegend um Leute, die zur Brandbekämpfung eingesetzt waren.

116'000 Personen rund um den Reaktor wurden 1986 evakuiert. Für sie wurden durchschnittliche Dosen von etwa 0,06 Sv berechnet. Weitere Evakuierungen folgten später. Viele Personen verliessen das kontaminierte Gebiet aus eigenem Antrieb. Grosse Gebiete gelten auch heute noch als stark kontaminiert. Die Auswirkungen auf die Bevölkerung waren gravierend. Viele Personen, welche zur Zeit des Unfalls im Kindesalter exponiert wurden, sind unterdessen an Schilddrüsenkrebs erkrankt. Hingegen wurde bis heute kein Anstieg der Leukämierate festgestellt. Ob eine epidemiologisch feststellbare Zunahme anderer Krebserkrankungen eintreten wird, kann erst die Zukunft zeigen.

③ Am 13.9.1987 fanden Altwarenhändler in einer leerstehenden ehemaligen Radiotherapieklinik in Goiânia, Brasilien, eine zurückgelassene Cäsium-137-Therapie-Einheit. Die Quelle wurde von ihrer Schutzhülle entfernt. Die Kap-

selung des Cäsium-137-Chloridpulvers aufgebrochen. Die Metallteile der Quelle wurden zum Teil weiterverkauft. Da das Cäsium-137-Pulver in der Dunkelheit blau fluoreszierte, wurde es zur Attraktion des dortigen Wohnviertels. Das Pulver wurde an zahlreiche Verwandte und Bekannte der Altwarenhändler in kleinen Mengen abgegeben. Diese rieben das Pulver oft in die Haut ein (was später zu lokalen Verbrennungen führte). Das Essen mit kontaminierten Händen führte zu Inkorporationen. Erst als gastrointestinale Symptome auftraten, wurde ein Arzt aufgesucht. Nachdem Teile der gestohlenen Therapie-Einheit dem Arzt in die Praxis mitgebracht worden waren, wurden die richtigen Schlüsse bezüglich Unfallursache gezogen und die nötigen Gegenmassnahmen ergriffen (Abb. 12, 13).

Beim Unfall in Goiânia handelt es sich um den grössten Strahlenunfall (mit Ausnahme von Tschernobyl) der je publiziert worden ist. Über 112 000 Personen sind dosimetriert worden. 249 waren entweder intern oder extern kontaminiert (Abb. 14). Ein grosser Teil dieser Personen wurde zuerst in Zelten in einem Fussballstadion untergebracht. 20 Personen wurden hospitalisiert, 4 kamen ad exitum (innert 4 Wochen, geschätzte Ganzkörperdosen von 4,5 bis 6 Gy). Die Aufräum- und Dekontaminationsarbeiten dauerten bis März 1988. Die Grösse des kontaminierten Stadtviertels betrug zirka 1 km². Dekontaminiert, zum Teil sogar aufgebrochen wurden: Häuser, Plätze, Fahrzeuge usw. Ein Endlager für den radioaktiven Abfall ist noch nicht gefunden.

4 Am 20. 9.1999 ereignete sich in der Konversionsanlage in Tokaimura in Japan ein Kritikalitätsunfall mit angereichertem Uran. Zwei Angestellte waren mit dem Verarbeiten von Uranoxid im Batch-Betrieb beschäftigt. Dabei wurden die Arbeitsvorschriften nicht eingehalten und mehr als die erlaubte Menge Uran pro Charge verarbeitet. Dies führte zu einer unkontrollierten, sich selbst erhaltenden nuklearen Kettenreaktion mit starker Emission von Neutronen und Gamma-Strahlen während rund 20 Stunden. Die betreffenden Angestellten verliessen den Raum, als sie den Alarm des installierten Gamma-Monitors hörten. Zu einer Explosion oder Gebäudebeschädigung kam es nicht. Die 3 unmittelbar betroffenen Angestellten erhielten Strahledosen von 10–20 GyEq, 6–10 GyEq und 1.2–5.5 GyEq¹. Der am meisten betroffene Angestellte verstarb am 21. Dezember 1999. Die Auswirkung auf die Umwelt bestand in erster Linie in Direktstrahlung (Gamma und Neutronen) mit annähernd exponentieller Abnahme bis in eine Distanz von 800 m während der Zeit der Kritikalität². Die höchsten Dosen am Zaun des Fabrikationsareals betrugen 4.5 mSv/h für die Neutronen- und 0.84 mSv/h für die Gammastrahlung. Evakuiert wurden rund 160 Personen aus 39 Haushaltungen, wobei für Anwohner von einer Strahlenbelastung von rund 2.6–9 mSv ausgegangen werden muss.

1 GyEq: Beim Neutronenanteil der Dosis wird deren biologische Wirksamkeit berücksichtigt um ihn mit dem Gamma-Anteil in Beziehung setzen zu können.

2 Kritikalität: Zustand, bei dem eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion mit Energiefreisetzung abläuft.



Abbildung 10: Aufräumarbeiten auf dem Dach
des zerstörten Reaktors

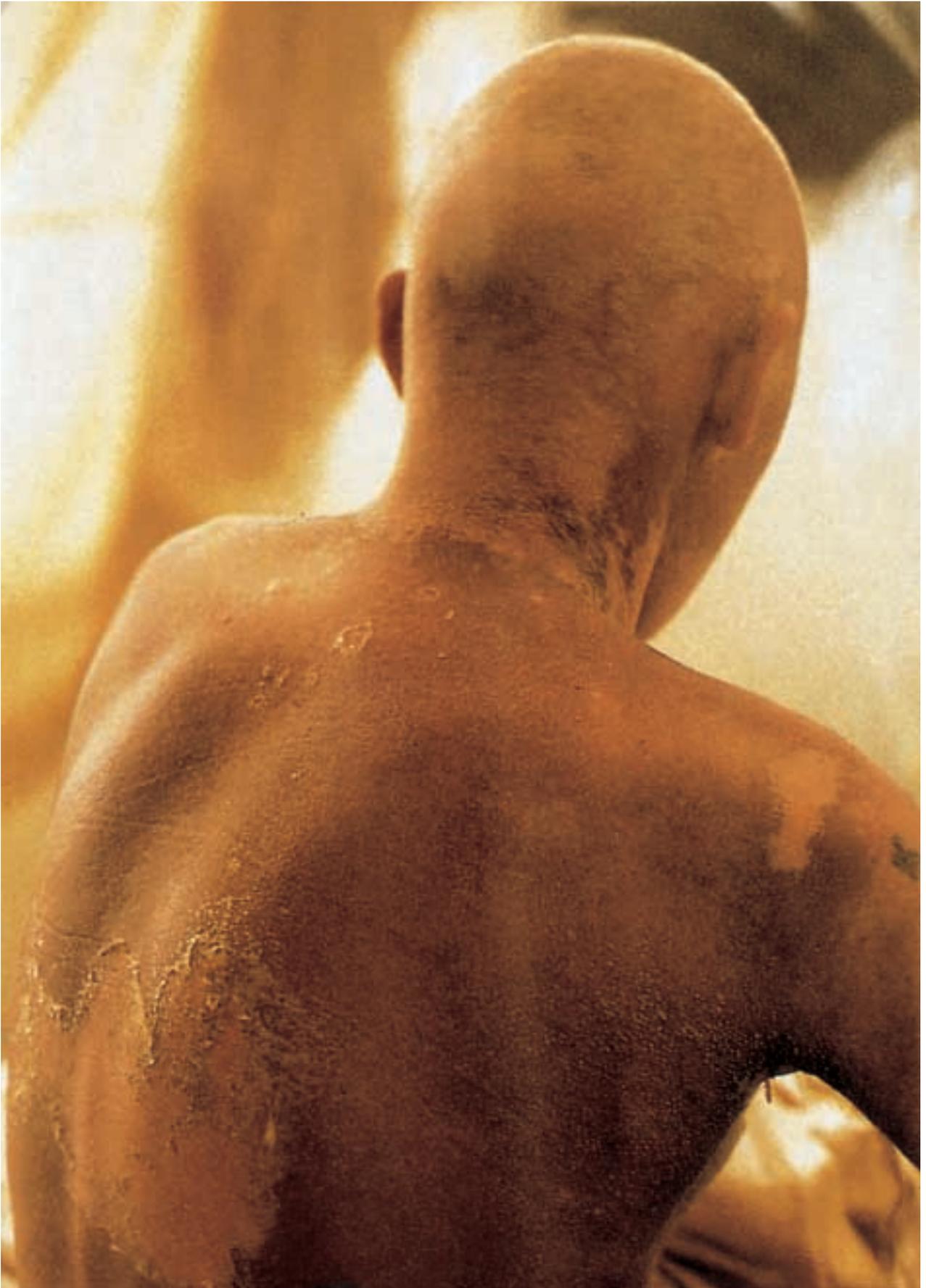


Abbildung 11: Strahlendermatitis und Epilation bei Strahlenopfer



Abbildung 12: Die verlassene Radiotherapie-Klinik in Goiânia



Abbildung 13: Strahlenverbrennung bei Unfallopfer



Abbildung 14: Überprüfung von Quartierbewohnern auf Kontamination (Olympia-Stadion)

Einige Lehren aus den vorangehend geschilderten Unfallereignissen

- 1 Bei Einzelunfällen sind häufig bereits strahlenexponierte Personen betroffen. Diese können dem Arzt zumeist wichtige Basisinformationen mitliefern. Bei den Verletzungen handelt es sich häufig um lokale Strahlenverbrennungen.
- 2 Der Verlust von Strahlenquellen stellt eine ganz besondere Gefahr für die Allgemeinbevölkerung dar. Häufig tappen Ärzte und Untersuchungsbehörden lange im Dunkeln.
- 3 Fast alle Unfälle mit Todesfolgen sind auf starke externe Bestrahlungen zurückzuführen, und nicht auf Inkorporationen! Auch bei den Todesopfern von Tschernobyl trug die interne Bestrahlung durch resorbierte radioaktive Substanzen nur ganz unwesentlich zum tödlichen Ausgang bei. Schwere Kontaminationen, die für sich allein zum Tode geführt hätten, sind bis heute keine bekannt.
- 4 Die Verhütung von Strahlenunfällen ruht auf zwei Pfeilern: Erstens der Förderung des Sachverstandes von Leuten, die beruflich mit ionisierender Strahlung zu tun haben. Zweitens der baulichen und apparativen Sicherheit von Anlagen und Apparaten, die mit Strahlenquellen bestückt sind bzw. ionisierende Strahlen erzeugen.

5. Definition und Einteilung des Strahlenunfalls

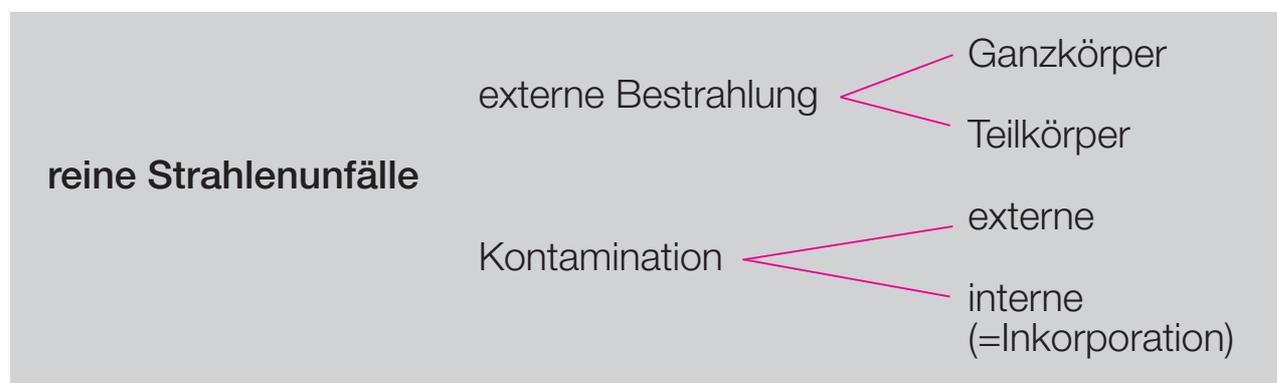
Unter einem Strahlenunfall verstehen wir eine plötzliche, ungewollte Exposition zu ionisierender Strahlung von relativ kurzer Dauer.

Akute intensive Bestrahlungen wirken sich biologisch ganz anders aus als chronische Low Level-Bestrahlungen.

Der Zeitraum, in dem eine bestimmte Strahlendosis appliziert wird, ist ausschlaggebend für deren Wirkung: Ein Gy über ein Jahr verteilt, bleibt klinisch unwirksam, ein Gy akut akkumuliert führt zum Strahlensyndrom.

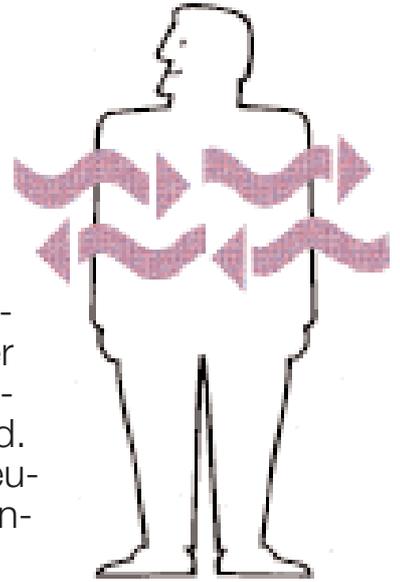
Die Strahlenunfälle werden in zwei Hauptgruppen unterteilt: Unfall durch externe Bestrahlung und Unfall durch Kontamination. Diese Unterteilung ist wichtig, da im ersten Fall, nach Verlassen des Strahlenfelds, die Bestrahlung abgeschlossen ist, im zweiten Fall aber andauert (Verschmutzung der Körperoberfläche mit radioaktiven Substanzen oder Inkorporation von solchen). Ausserdem müssen Arzt und Helfer beim Umgang mit kontaminierten Patienten stets besondere strahlenhygienische Massnahmen ergreifen, was bei der externen Bestrahlung nicht nötig ist. Strahlenunfälle können mit Unfallverletzungen «konventioneller» Art kombiniert sein (Verbrennung, Verätzung, mechanische Traumatisierung). Man spricht dann von Kombinationsverletzung.

Einteilung der Strahlenunfälle



«Kombinationsverletzung» = akute Strahlenexposition + «konventionelle» Verletzung

6. Externe Bestrahlung



Um die Bedeutung der externen Bestrahlung bei Strahlenunfällen aufzuzeigen, genügt die Feststellung, dass alle bisher bekannten schweren Strahlenverletzungen praktisch ausnahmslos auf eine externe Bestrahlung zurückgegangen sind. Kontaminationen und Inkorporationen können zwar therapeutisch grosse Probleme aufgeben, zu schweren akuten Strahlenschäden führen sie jedoch erfahrungsgemäss selten.

Die externen Bestrahlungen werden in zwei Untergruppen eingeteilt: Die Ganzkörper- und Teilkörperexposition. Diese Unterteilung ist notwendig, weil Klinik und Therapie recht unterschiedlich sind. Für Strahlenschäden bei Ganzkörperbestrahlungen genügen schon geringe Dosen (über 1 Gy). Solche Dosen führen bei lokalisierten Extremitätenbestrahlungen noch zu keinen Symptomen.

Für den Arzt und das Pflegepersonal besteht bei der Behandlung von Patienten, die nur extern bestrahlt worden sind, keine Strahlengefahr.

6.1 Die externe Ganzkörperbestrahlung

6.1.1. Formen, Schweregrade, Symptome

Je nach Dosis kommt es zu verschiedenen Krankheitsbildern, den sogenannten Strahlensyndromen. Es werden heute 3 Formen unterschieden.

1. Die hämatologische Form, bei Dosen von 1 bis 6 Gy.
2. Die gastrointestinale Form, bei Dosen von 6 bis 20 Gy.
3. Die zentral-nervöse (bzw. kardio-zirkulatorische) Form, bei Dosen über 20 Gy.

Unter 1 Gy bleiben die Bestrahlten symptomfrei.

Ähnlich wie bei einem viralen Infekt unterscheidet man jeweils eine **Prodromalphase**, eine **Latenzzeit**, eine **Phase der manifesten Erkrankung** und eine **Erholungsphase**.

6.1.1.1. Das hämatologische Strahlensyndrom (1–6 Gy)

Prodromalphase

Dauer 24 bis 48 Stunden. Bereits 15 bis 60 Minuten nach der Bestrahlung kommt es zu Salivation, Nausea und Erbrechen. Je höher die Dosis, desto schneller treten die Symptome auf und desto länger halten sie an.

Latenzzeit

Dauer 2 bis 3 Wochen. Die Patienten fühlen sich in dieser Zeit relativ wohl.

Manifeste Erkrankung

Dauer 2 bis 4 Wochen. Fieber, Schwäche, Unwohlsein, Infektionen, Blutungsneigung. Ab 3 Gy zudem: Haarausfall, Radiodermatitis und Schleimhautulzera.

Erholungsphase

Je nach Schwere des Krankheitsbildes von unterschiedlicher Dauer. Bei Dosen von 3–4 Gy sterben zirka 50% der Patienten innert 4 bis 6 Wochen an Knochenmarksinsuffizienz.

6.1.1.2 Das gastrointestinale Strahlensyndrom (6–20 Gy)

Prodromalphase

Vgl. hämatologische Form. Dauer evtl. bis 72 Stunden.

Latenzzeit

Dauer 3 bis 5 Tage.

Manifeste Erkrankung

Massive Diarrhoe, evtl. blutig, mit Flüssigkeits- und Elektrolytverlust. Schock. Dazu kommen Infektionen und Blutungen wie bei der hämatologischen Form. Der Organismus wird wegen der intestinalen Schleimhautschäden mit Darmbakterien überschwemmt.

Erholungsphase

Nur im untersten Dosisbereich ist heute, auch unter optimaler Therapie, ein Überleben möglich. Bei schlechtem Verlauf: Tod zirka 2 bis 3 Wochen nach dem Unfall.

6.1.1.3. Das zentral-nervöse Strahlensyndrom (über 20 Gy)

Eine Prodromalphase oder ein Latenzzeit ist nicht mehr erkennbar. Der Patient erleidet praktisch sofort einen Bewusstseinsverlust mit kardio-zirkulatorischem Schock. Exitus innert 2 Tagen.

Während man früher der Meinung war, die Schädigung des Zentralnervensystems sei Ursache dieser Verlaufsform, neigt man heute dazu, aufgrund histologischer Untersuchungen (Herzmuskelnekrosen), das Herzversagen dafür verantwortlich zu machen.

6.1.2. Diagnostik

6.1.2.1. Anamnese

Nausea und Erbrechen in den ersten Stunden nach dem Unfallereignis sind die Leitsymptome. Bei Vorhandensein dieser Symptome muss eine Dosis von über 1 Gy angenommen werden. Je rascher diese Symptome auftreten und je länger sie anhalten, desto grösser die zu vermutende Dosis. Cave: «Falsch positive» Reaktionen psychischer Natur! Auch isolierte Abdominalbestrahlungen können zu Nausea und Erbrechen führen!

6.1.2.2. Status

In der Prodromalphase sind die klinisch fassbaren Zeichen der Strahleneinwirkung gering. Ein Erythem der Haut in den ersten zwei Tagen weist auf eine massive Strahleneinwirkung hin (über 3 Gy). Dieses Erythem geht auf Gefässreaktionen der Haut zurück (vasoaktive Amine?) und kann wellenförmig verlaufen. Nach einer Latenz von 2 bis 3 Wochen kommt es zu Radiodermatitis mit Haarausfall (über 3 Gy). Auch die Schleimhäute zeigen Entzündungszeichen, evtl. Ulzerationen (Konjunktiven, Mundhöhle, Zahnfleisch, Zunge, Tonsillen). Da unfallmässige Ganzkörperbestrahlungen häufig inhomogen sind, kann die Lokalisation der Hautveränderungen wesentlich zur Klärung der Bestrahlungssituation beim Unfall mithelfen.

In der Phase der manifesten Erkrankung wird die Klinik im übrigen durch die Auswirkungen der Knochenmarkinsuffizienz bzw. der Schädigung des Darmepithels bestimmt (Blutungen und Infektionen mit Fieber, Prostration, evtl. Diarrhoe und Schock).

6.1.2.3. Labor

Blutbild

Die Abschätzung des Strahlendosis, und damit die Zuordnung zu den verschiedenen Formen des Strahlensyndromes, erfolgt auch heute noch, zumindest in den ersten Tagen, mittels Blutbildkontrollen.

Die Lymphozyten sind die strahlensensibelsten Blutzellen. Sie fallen bereits bei Dosen von über 0,5 Gy ab, und zwar schon in den ersten 24 Stunden. Aufgrund der Erfahrungen mit den Opfern von Tschernobyl kann etwa folgende Dosiswirkungsbeziehung angenommen werden:

Ganzkörperdosis (in Gy)	Lymphozytenzahl (nach 4–7 Tagen)
1,0	~ 1000/mm ³
3,0	~ 400/mm ³
6,0	~ 100/mm ³

Bei hohen Dosen ist der Abfall schneller und kann schon wenige Stunden nach dem Unfall ein erhebliches Ausmass annehmen. Werte von 100 bis 200 Lymphozyten pro mm^3 in den ersten 24 Stunden weisen auf letale Bestrahlungen hin.

Die **Granulozyten** sind meistens in den ersten 24 Stunden erhöht, als Ausdruck einer Stressreaktion. Danach kommt es bei Dosen von über 1 Gy zu einem kontinuierlichen Abfall. Bei Dosen von 2 bis 5 Gy zeigt sich nach 2 Wochen ein leichter, vorübergehender Anstieg (sogenannter «abortive rise»). Fehlt dieser, muss mit Dosen über 5 Gy gerechnet werden. Die kritische Phase mit den tiefsten Granulozytenwerten liegt zwischen der zweiten bis fünften Woche.

Der **Thrombozytenabfall** geht parallel zum Granulozytenabfall. Im Gegensatz zu den Granulozyten zeigen die Thrombozyten aber keinen «abortive rise». Nach Dosen von 1 Gy kann man einen Abfall auf Werte von zirka 100 000/ mm^3 nach 30 Tagen erwarten. Je grösser die Dosis, desto schneller der Abfall. Bei 6 Gy kommt es bereits nach 10 bis 15 Tagen zu einer Thrombozytopenie von zirka 10 000/ mm^3 .

Wegen der langen Lebenszeit der strahlenresistenten, reifen **Erythrozyten** von 120 Tagen ist eine Anämie anfänglich kein Problem, es sei denn, es komme, als Ausdruck der thrombopenischen hämorrhagischen Diathese zu Blutverlust (bei Thrombozytenzahlen 20 000/ mm^3 zu erwarten).

Der **Reticulozytenabfall** geht parallel zum Granulo- und Thrombozytenabfall.

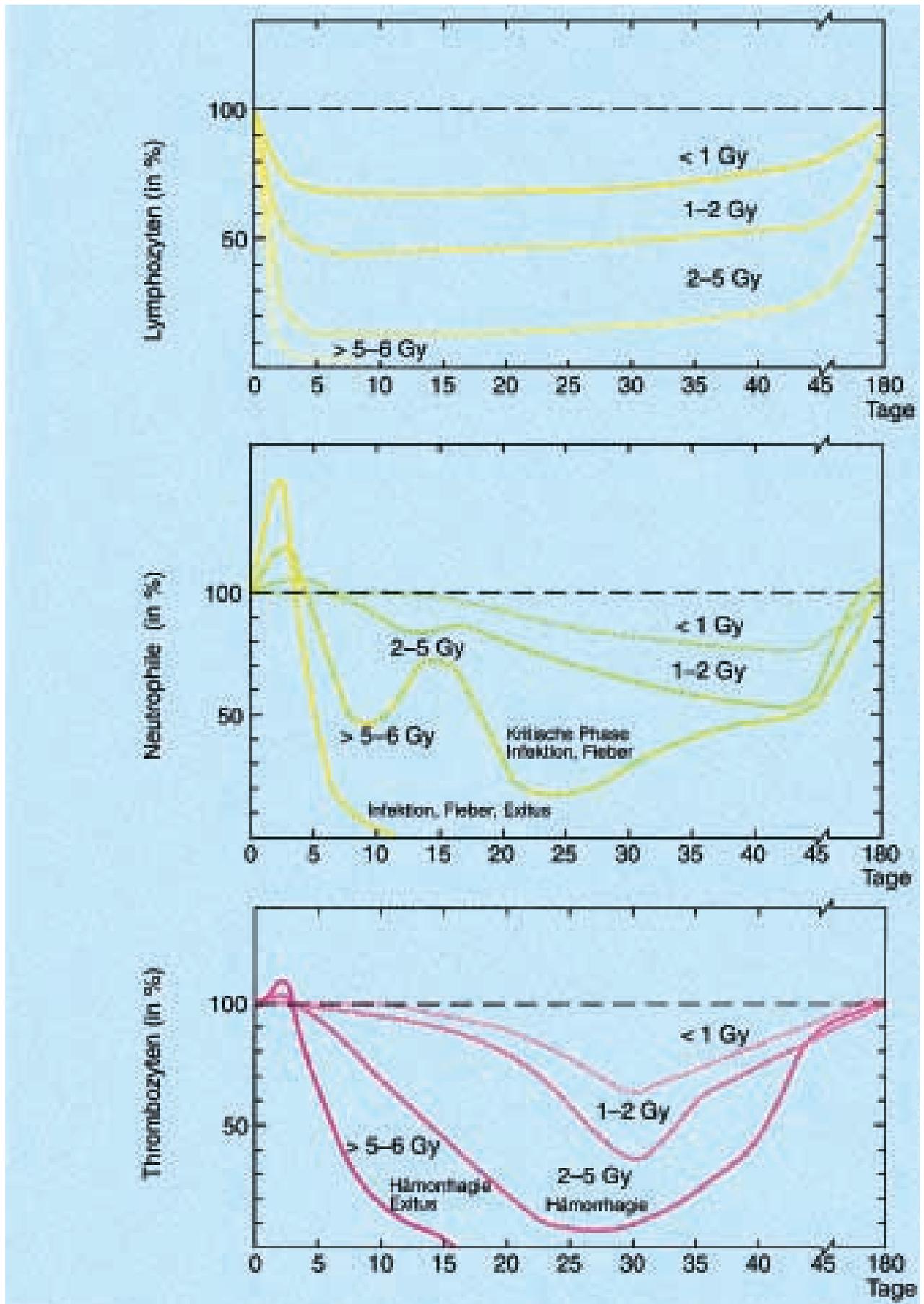


Abbildung 15: Blutbildveränderungen nach Ganzkörperbestrahlung

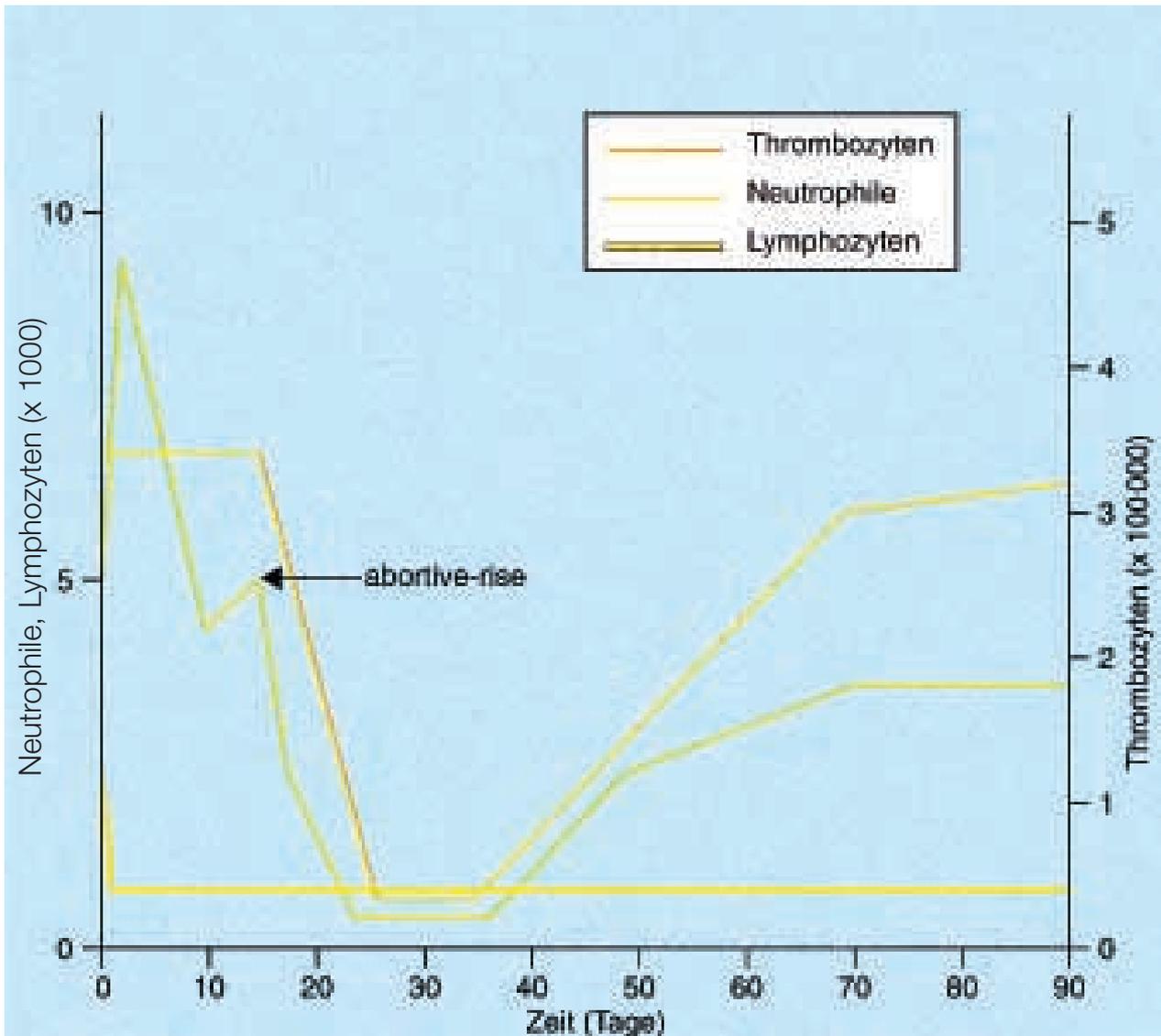


Abbildung 16: Typischer Blutbildverlauf nach akuter Ganzkörperbestrahlung von 2–3 Gy

Biologische Dosimetrie

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Stärke der Strahleneinwirkung an biologischem Material direkt zu «messen» oder zumindest abzuschätzen. Nach wie vor die beste Methode, was Sensitivität und Spezifität angeht, ist die Chromosomenanalyse anhand von Lymphozytenkulturen. Nach Bestrahlungen kommt es zu Chromosomenbrüchen mit Neuformationen. Letztere können ausgezählt und mittels Eichkurven entsprechenden Dosen zugeordnet werden. Charakteristische Chromosomenaberration ist dabei der «Dizenter» (2 Zentromere) (vgl. Abb. 17). Die Empfindlichkeitsschwelle

der Methode liegt bei 0,1 Gy. Erste Resultate können frühestens 3 bis 4 Tage nach der Blutabnahme erwartet werden. Über das genaue Vorgehen: Vgl. Anhang II.

Die Blutentnahme sollte bald nach dem Unfall vorgenommen werden, da die zur Kultur benötigten Lymphozyten bei starker Bestrahlung rasch aus der Blutbahn verschwinden.

Auch bei Teilkörperbestrahlung empfiehlt sich häufig eine Chromosomenanalyse; nicht zuletzt zum Ausschluss einer zusätzlichen nennenswerten Ganzkörperexposition!

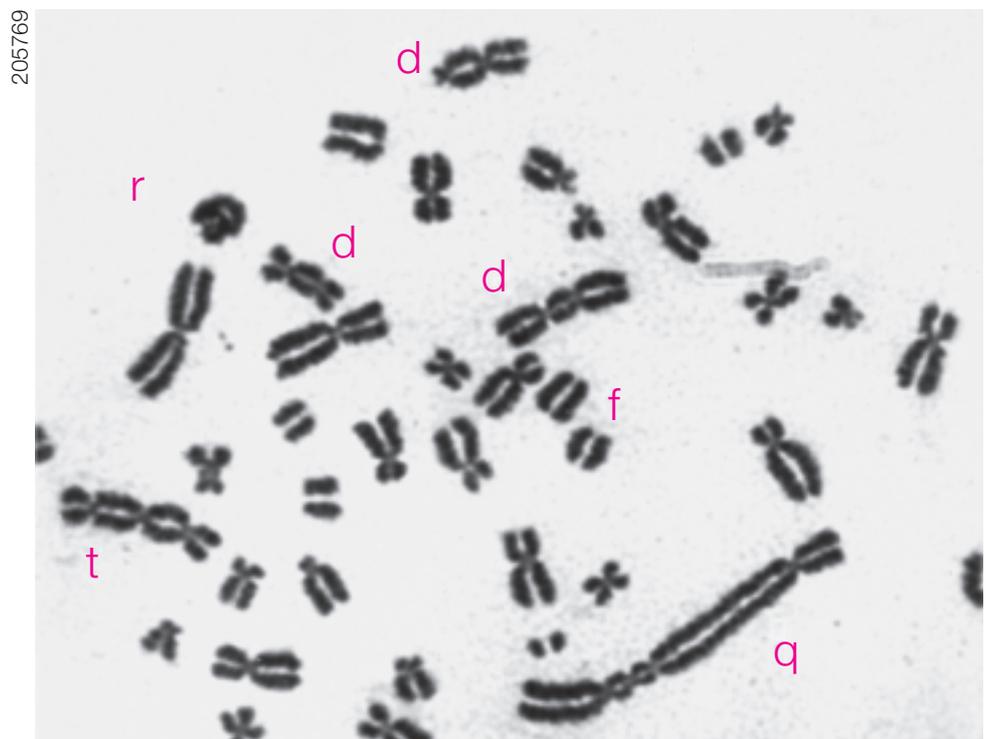


Abbildung 17: Chromosomenaberrationen nach Bestrahlung

(Dr. D. Lloyd, NRPB Chilton, Didcot, GB)

d = Dicenter

f = Fragment

t = Tricenter

r = Ring (mit Center)

q = Quadricenter

Sperma

Obwohl die Spermatogenese bereits ab Dosen von 0,15 Gy nachweislich zurückgeht, ist die Spermaanlyse kaum sehr hilfreich bei der Evaluation einer Ganzkörperbestrahlung. Relativ lokalisierte Teilkörperbestrahlungen der unteren Rumpfpattie können gleiche Veränderungen hervorrufen. Zudem

benötigt man zwei Spermaproben: Eine erste zwischen dem 1 und 40. Tag nach Unfall, eine zweite nach dem 60. Tag. So spät werden aber diagnostische Entscheidungshilfen (Triage) nicht mehr benötigt.

Sonstiges

Bei Verdacht auf Bestrahlungen mit Dosen über 2 Gy sollte eine Blutgruppen- und HLA-Typisierung vorgenommen werden, da eine später notwendig werdende Therapie mit Blutzellkomponenten (Granulozyten) oder gar eine Knochenmarktransplantation eine HLA-Typisierung erfordert. Die Typisierung hat möglichst bald nach dem Unfall zu erfolgen, da auch für sie Lymphozyten benötigt werden.

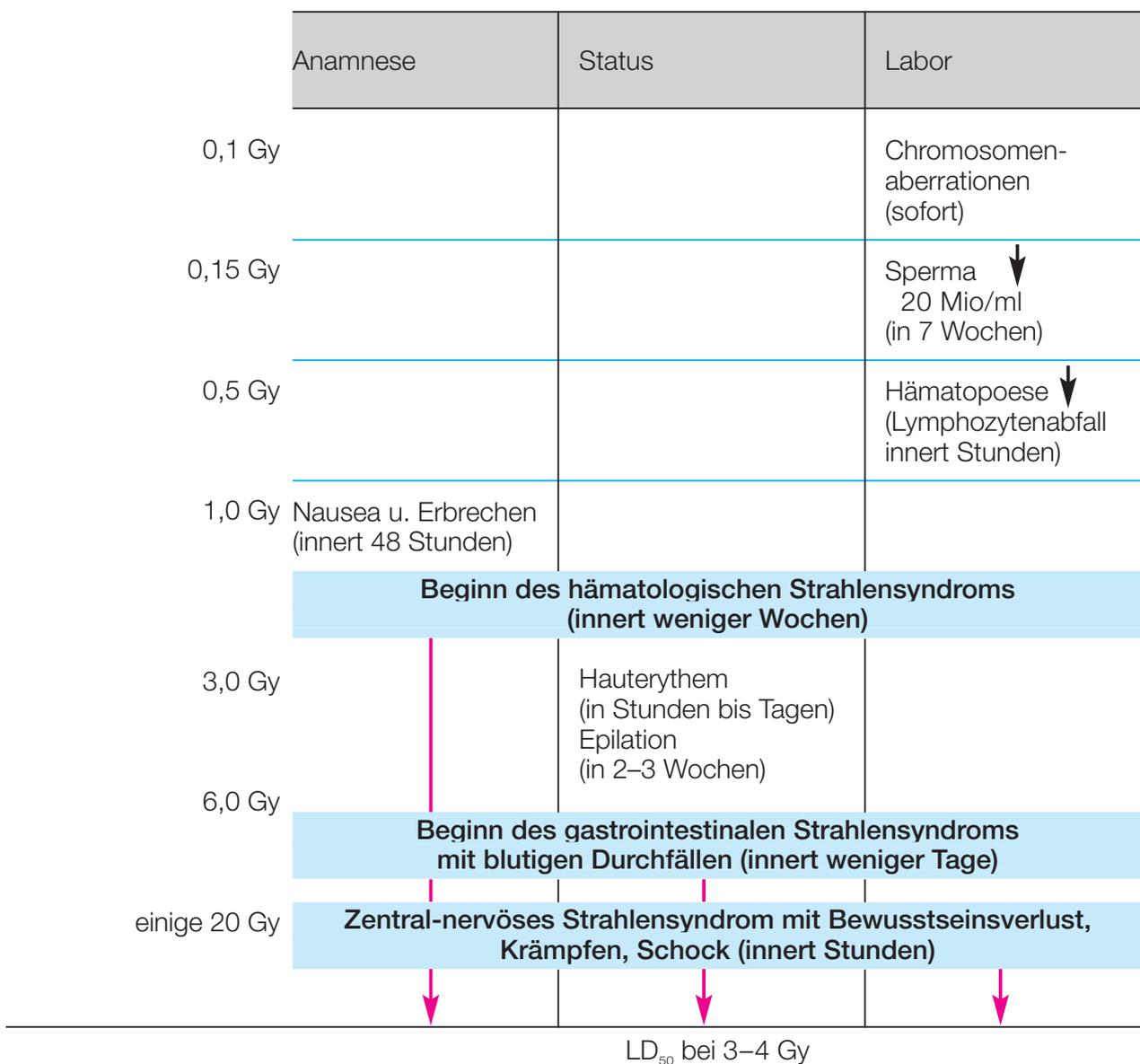


Abbildung 18: Akute Ganzkörperbestrahlung – Symptomatologie

6.1.3. Vorgehen, Therapie

Das therapeutische Vorgehen richtet sich nach der Form und dem Schweregrad des Strahlensyndroms. Die Behandlung ist rein symptomatisch. Überstürzte Eile ist nicht am Platz, da die Organschäden erst nach Tagen oder Wochen zu erwarten sind.

Bei zusätzlichen «konventionellen» Verletzungen (Verbrennung, Verätzung, mechanische Traumata) stehen immer lebensrettende Sofortmassnahmen zur Aufrechterhaltung der vitalen Funktionen wie Atmung und Kreislauf an allererster Stelle.

In jedem Fall: Blutentnahme für ein komplettes Blutbild mit Bestimmung des Hämoglobins, der Leukozytenzahl (+ Differenzierung), der Thrombozytenzahl sowie für die Chromosomenanalyse bzw. die HLA-Typisierung. Die Blutbilder sollten im Abstand von einigen Stunden wiederholt werden.

Bei Frauen im gebärfähigen Alter Schwangerschaftstest veranlassen.

Patienten mit Dosen von 1 bis 12 Gy sollten stationär behandelt werden, falls genügend Spitalbetten zur Verfügung stehen. Gerade solche Patienten haben von einer optimalen Behandlung am meisten zu erwarten. Als Faustregel gilt, dass Patienten, die in den ersten Stunden nach dem Unfall unter Nausea und Erbrechen leiden (>1 Gy), hospitalisiert werden sollten.

Dosen von über 12 Gy verlaufen auch unter optimaler Therapie letal. Ob Patienten mit derartig grossen Dosen trotzdem hospitalisiert werden sollen, muss von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Spitalbetten abhängig gemacht werden. In einer Katastrophensituation werden solche Patienten nicht hospitalisiert werden können. Die Schmerzbekämpfung steht hier an allererster Stelle.

Die Spitalbehandlung hat folgende drei Ziele:

- Die Schockbekämpfung
- Die Infektionsprophylaxe/-bekämpfung
- Den Blutzellersatz

Der Wert einer Knochenmarktransplantation ist heutzutage sehr umstritten. Da der Patient häufig inhomogen bestrahlt ist, bleiben meistens kleine lebensfähige Knochenmarksnester zurück. Um eine Abstossung des Transplantats zu verhindern, müsste der Patient zur Konditionierung zuerst zusätzlich mit Letaldosen bestrahlt oder chemisch (mit Zytostatica) behandelt werden! Zu einer solchen Massnahme wird man sich aber kaum je durchringen können. Falls man sich dennoch zur Knochenmarktransplantation entscheidet, sollte sie in den ersten 7 bis 10 Tagen vorgenommen werden, damit die Zellregeneration in der Phase der tiefsten Granulozytenwerte (2–5 Wochen) bereits spielt.

6.2 Externe Teilkörperbestrahlung

Bei Strahlenunfällen mit Exposition nur kleiner Körpervolumina bleiben die beschriebenen Strahlensyndrome aus. Es kommt zu Strahlenverbrennungen der direkt betroffenen Körperpartien. Je nach Eindringtiefe der Strahlung wird nur die Haut oder auch darunterliegendes Gewebe geschädigt. Beta-Strahlung, mit ihrer geringen Reichweite, wird vorzugsweise in der Haut absorbiert und führt dort zu Verbrennung. Auch weiche Röntgenstrahlung wird vorwiegend in der Haut absorbiert (Röntgenverbrennung). Gamma-Strahlung und harte Röntgenstrahlung hingegen schädigen neben der Haut vor allem tieferliegendes Gewebe. Alpha-Strahlung führt im allgemeinen nicht zu Hautverbrennung (Eindringtiefe zu gering). Die Grenzdosis für Hautschäden liegt bei 3 Gy. (Ablauf der Hautreaktion: vgl. Abb. 19)

6.2.1 Diagnostik

6.2.1.1 Anamnese

Bei ausgesprochen starker Bestrahlung (über 10 Gy) kann der Patient am Ort der Einwirkung ein unbestimmtes Wärmegefühl verspüren. – Eine Befragung zum Unfallhergang kann wertvolle Daten zur Abschätzung des Umfangs und der Höhe der Bestrahlung liefern.

6.2.1.2. Status

Bereits in den ersten Stunden nach dem Unfall kann vorübergehend ein Hauterythem auftreten. Nach zwei bis drei Wochen kommt es dann zur Ausbildung der Radiodermatitis mit fixiertem Erythem, Blasenbildung, Epilation und Nekrose. Bei relativ geringen Bestrahlungen wird das Erythemstadium nicht überschritten. Bei Dosen von 3 bis 7 Gy ist die Epilation transitorisch (Regeneration des Haarwuchses nach weiteren 2 bis 4 Wochen), bei Dosen von über 7 Gy permanent.

Strahlenverbrennungen sind im allgemeinen schmerzhafter als thermische, weil sie tiefer gehen und auch unter der Haut liegende Gefässe und Nervenenden schädigen.

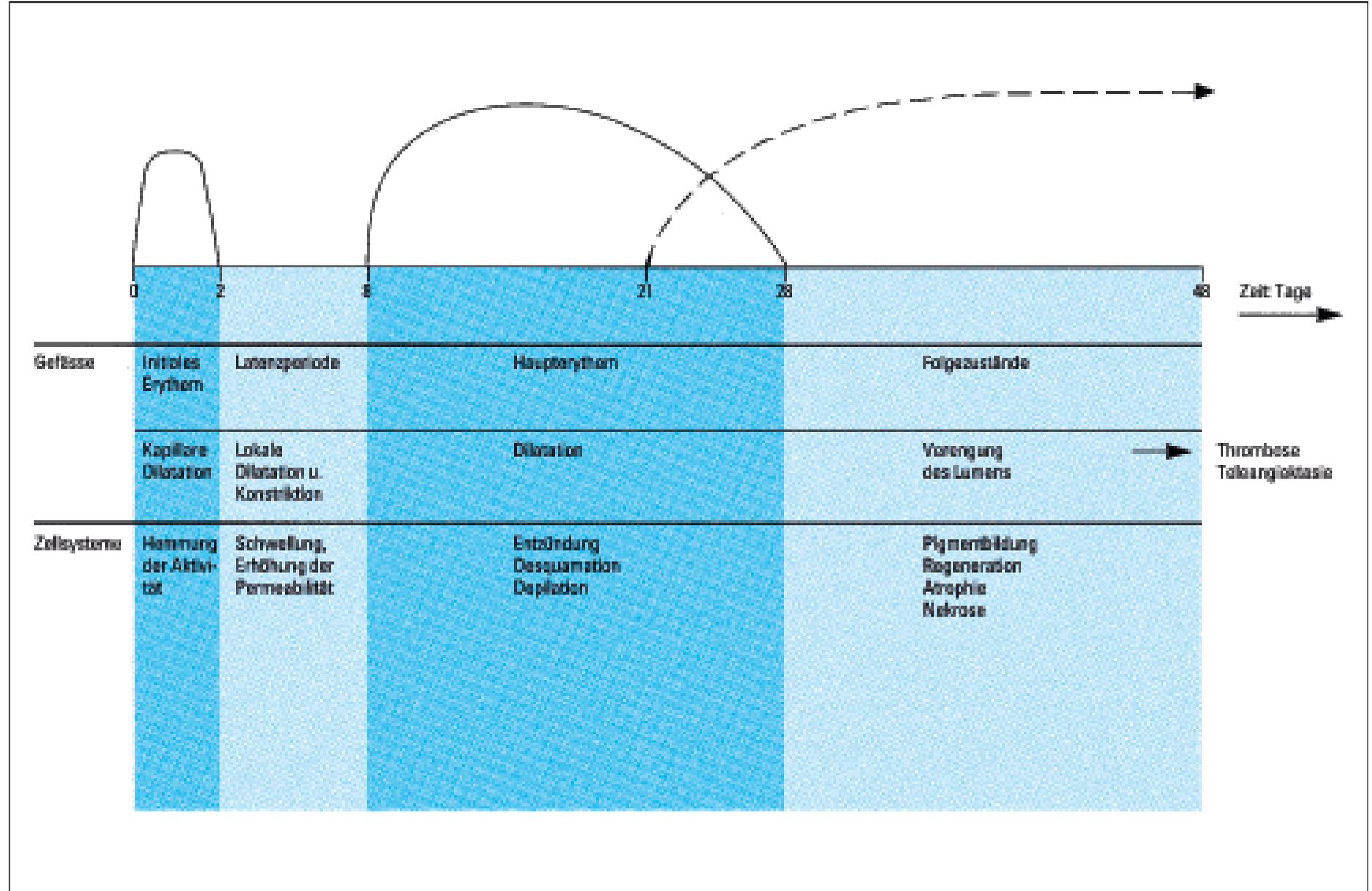


Abbildung 19: Akute Strahlenreaktion der Haut

6.2.1.3 Labor

Es gibt keinen Labortest, der lokale Strahleneinwirkungen nachweisen könnte. Trotzdem empfiehlt sich, zum Ausschluss ausgedehnter Bestrahlung, eine Blutentnahme zur Blutbildkontrolle und Chromosomenanalyse.

Bei Frauen im gebärfähigen Alter ist ein Schwangerschaftstest vorzunehmen (abhängig von Lokalisation der Bestrahlung).

6.2.2 Therapie

Direkt lebensbedrohend sind Teilkörperbestrahlungen praktisch nie (Ausnahme: isolierte Bestrahlungen von Schädel oder Herz). Bei umschriebenen, örtlichen Bestrahlungen steht die Behandlung der Strahlenverbrennung der Haut im Vordergrund. Da die Radiodermatitis im Gegensatz zur thermischen Verbrennung nicht sofort, sondern erst zwei bis drei Wochen nach dem Unfall in Erscheinung tritt, ist primär darauf zu achten, das betroffene Hautareal nicht zusätzlich zu schädigen. Mechanische (enge Kleidung) und chemische Irritationen (aggressive Seifen) sind zu vermeiden. Die Strahlenverbrennung selbst wird wie eine thermische Verbrennung behandelt. Da die Strahlenverbrennung aber meistens tiefer geht als die thermische, und das Gefässbett des darunterliegenden Gewebes mitgeschädigt ist, ist mit Schwierigkeiten beim Angehen von Hauttransplantaten zu rechnen.

6.3 Kombinationsverletzungen

Unfällmässige Strahleneinwirkungen sind häufig mit zusätzlichen konventionellen Traumata kombiniert. Verbrennungen, Verätzungen oder mechanische Traumata verschlechtern dabei die Prognose. Die Strahleneinwirkung kann nämlich das Risiko für einen kardiozirkulatorischen Schock, für Infektionen sowie für Blutungen erhöhen, und sie bewirkt ausserdem eine verzögerte Wund- und Frakturheilung.

Wichtig: Bei einer Kombinationsverletzung hat in der Regel die Behandlung der konventionellen Verletzung den Vorrang.

Wenn eine chirurgische Behandlung nötig ist, gilt Folgendes:

- So früh wie möglich.
- So einfach wie möglich.
- Nur Noteingriffe.
- Rechtzeitige Schock- und Infektionsprophylaxe.

Fazit: Vorgehen bei externen Bestrahlungen

1. Lebensrettende Ersthilfemassnahmen für «konventionelle» Verletzungen stehen an allererster Stelle. Die Auswirkungen von externen Bestrahlungen zeigen sich praktisch immer erst nach Tagen oder Wochen. Ihre Behandlung ist nicht dringlich.
2. Zu diagnostischen Zwecken ist sofort ein komplettes Blutbild (mit Thrombozytenbestimmung) anzufertigen. Ausserdem empfiehlt sich in den allermeisten Fällen eine Chromosomenanalyse und evtl. die HLA-Typisierung.
3. Bei Ganzkörperdosen von mehr als 1 Gy ist eine Spitaleinweisung angezeigt. Nausea und Erbrechen in den ersten zwei Tagen nach dem Unfall bzw. ein Lymphozytenabfall unter $1000/\text{mm}^3$ weisen auf eine Dosis in dieser Grössenordnung hin.
4. Bei Frauen im gebärfähigen Alter ist ein Schwangerschaftstest vorzunehmen.
5. Die Behandlung von extern Bestrahlten ist rein symptomatisch: Schockbekämpfung, Infektionsprophylaxe, Blutzellersatz. Lokal evtl. Verbrennungsbehandlung.

Besonderes: Für Arzt und Helfer besteht bei externen Bestrahlungen keine Strahlengefahr.

7. Kontamination

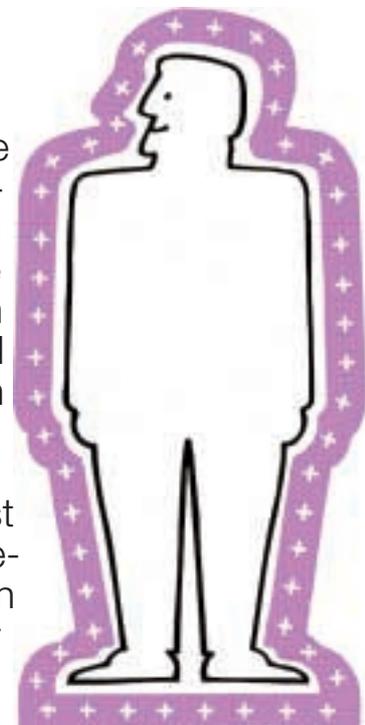
Unter Kontamination versteht man eine «Verschmutzung» des menschlichen Körpers mit radioaktiven Substanzen. Werden die radioaktiven Substanzen in den Körper selbst aufgenommen, z.B. peroral, perkutan oder per inhalationem, spricht man von interner Kontamination oder Inkorporation. Bleibt die radioaktive Verschmutzung auf die Haut beschränkt, spricht man von externer Kontamination (häufig einfach «Kontamination» genannt).

7.1 Externe Kontamination

7.1.1 Allgemeines

Externe Kontaminationen haben praktisch nie direkte gesundheitliche Auswirkungen (Ausnahme: Kontamination mit Beta-Stahlen → Beta-Burns). Die Gefahr bei einer Kontamination besteht vielmehr darin, dass die radioaktive Substanz von der Körperoberfläche in den Körper selbst gelangt, damit zur Inkorporation wird und nur noch schwer wieder entfernt werden kann («Dekorporation»).

Starke, unfallmässige Kontaminationen sind äusserst selten. Kleine, unbedeutende Kontaminationen hingegen kommen relativ häufig vor, z.B. in nuklearen Anlagen oder Forschungslabors. Sie werden in der Regel vom Betriebssanitäter ohne ärztliches Zutun fachkundig entfernt. Sollte ein Patient aus einem Betrieb obgenannter Art spezifischer ärztlicher Hilfe bedürfen, so wird man davon ausgehen können, dass evtl. vorhandene Kontaminationen bereits im



Betrieb entfernt worden sind, bzw. dort mindestens eine Grobdekontamination stattgefunden hat. Der Allgemeinpraktiker wird deshalb kaum je in die Lage kommen einen kontaminierten Patienten behandeln zu müssen. Ganz ausgeschlossen ist dies allerdings nicht, vor allem wenn aus vitaler Indikation eine ärztliche Soforthilfe zwingend ist, oder bei einer Wundkontamination.

7.1.2 Beurteilung von Kontaminationen

Ausmass und Ausdehnung von Kontaminationen der Körperoberfläche können ohne spezielle Messgeräte mit nuklidspezifischer Anzeige nicht beurteilt werden. Der behandelnde Arzt ist also auf die Zusammenarbeit mit Strahlenphysikern angewiesen, die über die entsprechenden Geräte verfügen. Häufig ist der Betrieb, aus dem der kontaminierte Patient stammt, in der Lage, die gewünschten Messungen vorzunehmen. Auch die Suva, die HSK¹, sowie das PSI² stellen ihre Dienste gerne zur Verfügung. Evtl. können auch nuklearmedizinische Abteilungen eines nahe gelegenen Spitals behilflich sein.

Je nach Stärke der Kontamination gilt es zu entscheiden, ob überhaupt dekontaminiert werden soll, und wenn ja, wie (nur Grobdekontamination mit Wasser und Seife oder zusätzliche Feindekontamination mit chemischen Hilfsmitteln?). Es empfiehlt sich auch hier, die obgeannten Institutionen um Rat zu fragen.

7.1.3. Dekontamination

Ein guter Grundsatz ist, sowohl was die Behandlung des Patienten angeht, als auch bezüglich Selbstschutz, wie bei einer bakteriellen Verunreinigung vorzugehen. Gummihandschuhe, eine chirurgische Gesichtsmaske und eine geeignete Schürze sind durchaus genügend. Eine akute Strahlengefahr für den behandelnden Arzt besteht nicht (derart starke Kontaminationen sind kaum denkbar!). Die Schutzkleidung ist ganz einfach dazu da, eine Selbstkontamination zu vermeiden!

Die Behandlung von Kontaminationen im Bereich von Körperöffnungen (Nase, Mund) hat Priorität (Gefahr von Inkorporation).

1 HSK = Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
(Adresse siehe Anhang)

2 PSI = Paul-Scherrer-Institut (Adresse siehe Anhang)

Kontaminationen, die lose auf Kleidern und Haut sitzen, sollten durch einfache Massnahmen, wie Entfernung der Kleidung und Waschen der Haut mit Wasser und Seife beseitigt werden. Bei der Entfernung der Kleider ist darauf zu achten, dass kontaminierter Staub z.B. durch Schütteln nicht aus denselben herausgeschleudert wird. Es wird deshalb in einzelnen Fällen nichts anderes übrig bleiben, als die Kleider aufzuschneiden. Kontaminierte Schleimhäute können mit Wasser oder physiologischer Kochsalzlösung gespült werden.

Es ist unbedingt zu verhindern, dass bei der Dekontamination bisher nicht befallene Hautareale zusätzlich kontaminiert werden! Nichtkontaminierte Wunden oder Hautabrasionen müssen deshalb **vor** der Dekontamination mit wasserundurchlässigem Material (Plastik, impermeablem Schnellverband) abgedeckt werden. Bei lokalisierten Kontaminationen an den Extremitäten und am Kopf muss dafür gesorgt werden, dass das Waschwasser nicht über andere Körperteile läuft. Haare müssen mit der Schere weggeschnitten werden. Bei umschriebenen Hautdekontaminationen ist prinzipiell von aussen gegen innen vorzugehen.

Oberstes Prinzip ist, die Haut durch das Dekontaminationsprozedere nicht zusätzlich zu schädigen: Insbesondere eine Abrasio ist unbedingt zu vermeiden (Gefahr der Inkorporation). Kann die Kontamination durch einfache Waschvorgänge nicht mehr weiter entfernt werden, spricht man von einer **fixierten** Kontamination. In den allermeisten Fällen stellen solche Kontaminationen weder für den Arzt noch den Patienten ein Problem dar. Fixierte Kontaminationen werden nicht weiter verschleppt! Auch bei hartnäckigen Kontaminationen bewirkt der rasche Zellumsatz der Haut eine Abstossung des kontaminierten Areals in wenigen Tagen.

Radioiodisotope und Tritium können durch die Haut resorbiert werden. Die Kontamination wird damit auch zur Inkorporation. Bei einer massiven Kontamination mit I-131 oder I-125 mit Aktivitäten im Bereich von 500 000 Bq und mehr sollten möglichst rasch Iodid-Tabletten verabreicht werden (siehe auch Kapitel Iodprophylaxe). Personen mit massiver Tritiumkontamination sollten unter die Dusche gestellt werden. Dabei ist aber anzumerken, dass Tritium relativ kleine Inkorporationsdosen verursacht. Für Dosen im mSv-Bereich braucht es eine Inkorporation von rund 10^8 Bq.

Bei Kontamination von Wunden ist folgendermassen vorzugehen: «Ausbluten» der Kontamination durch Anlegen eines Stauschlauches fördern (Extremitäten). Wunde mit physiologischer Kochsalzlösung reichlich spülen. Grosszügiges Débridement.

Die Verkehrswege kontaminierter Patienten sollten möglichst kurz gehalten werden (Gefahr der räumlichen Verschleppung). Muss ein kontaminierter Patient aus vitalen Gründen, ohne vorherige Dekontamination verlegt wer-

den, sollte er mit Tüchern gut abgedeckt werden.

Kontaminierte Materialien wie Kleider, Haare, Waschwasser usw. sollten nach Möglichkeit in Plastikbehältern gesammelt und später einem Strahlenphysiker zur Messung zugeleitet werden.

Es besteht die Möglichkeit bei der Suva, der HSK oder dem PSI Dosimeter für das medizinische Hilfspersonal anzufordern. Auch die Kernkraftwerke sind in der Lage, das beizuziehende medizinische Personal mit Dosimetern auszurüsten. Eine Ausrüstung mit Dosimetern hilft häufig mit, unbegründete Strahlenängste zu zerstreuen.

In Katastrophensituationen kann obgenanntes, reichlich aufwendiges Vorgehen natürlich nicht angewandt werden. Es wird der Katastropheneinsatzleitung vorbehalten bleiben, das generelle Vorgehen zu bestimmen. **Eine Grobdekontamination mit Wasser und Seife aber ist immer am Platz.**

Fazit: Vorgehen bei Kontaminationen

1. Beurteilung der Ausdehnung und Stärke der Kontamination:
Nur in Zusammenarbeit mit einem Spezialisten, der über die nötigen Messgeräte verfügt, möglich (Unfallbetrieb, Suva, HSK, PSI. Evtl. nuklearmedizinische Abteilung).
2. Behandlungsziel: Entfernen der Kontamination um Hautschädigungen und Inkorporationen zu vermeiden. Zudem sollen Folgedosen und Verschleppung auch von kleinen Mengen Radioaktivität möglichst verhindert werden.
3. Dekontamination: **Die Behandlung von Kontaminationen im Bereich von Nase und Mund hat Priorität!**
Schleimhäute mit Wasser oder physiologischer Kochsalzlösung spülen.
Kontaminierte Kleider entfernen und Haut mit Wasser und Seife waschen.
Unbedingt vermeiden, bisher nicht kontaminierte Hautbezirke (Wunden usw.) durch das Dekontaminationsprozedere zusätzlich zu kontaminieren. Nicht kontaminierte Wunden deshalb mit wasserundurchlässigem Schnellverband abdecken. Schonend vorgehen. Hautabrasionen vermeiden.
Haare evtl. mit Schere wegschneiden.
Fixierte Kontaminationen belassen (nachkontrollieren, messen).
Kontaminierte Wunden durch Anlegen eines Stauschlauchs «ausbluten». Mit physiologischer Kochsalzlösung reichlich spülen und grosszügiges Débridement vornehmen.
Kontaminierte Materialien wie Kleider, Haare, Waschwasser in Plastikbehälter auffangen und vom Strahlenphysiker ausmessen lassen.
4. Bei massiven Kontaminationen mit Radioiod sofort Iodid-Tabletten verabreichen (Iodprophylaxe).
5. Verkehrswege von kontaminierten Patienten kurz halten. Beim Transport von Patienten die evtl. noch nicht dekontaminierten Körperareale mit Impermeable abdecken.

Besonderes:

Zum Selbstschutz genügen Gummihandschuhe, eine chirurgische Gesichtsabdeckung sowie eine wasserundurchlässige Schürze (Abb. 20). Grundsätzlich ist wie bei einer bakteriellen Verunreinigung vorzugehen. Bei Bedarf können Dosimeter für das ärztliche Personal bei der Suva, HSK oder dem PSI angefordert werden.



Abbildung 20: Operationsschwester mit «Schutzkleidung».

7.2 Interne Kontamination (Inkorporation)

7.2.1 Allgemeines

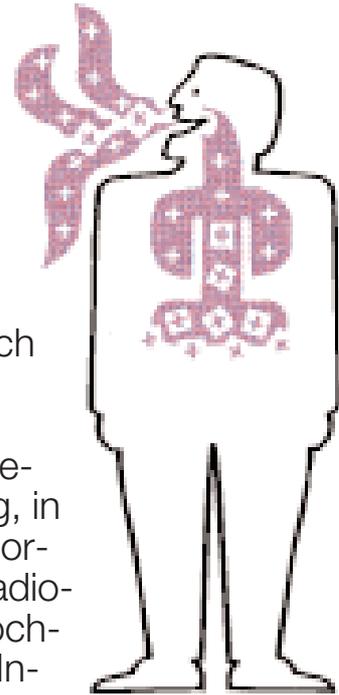
Unter Inkorporation versteht man die Aufnahme von radioaktiven Substanzen in den Körper selbst (via Atemwege, peroral oder über Wunden). Gewisse Radionuklide (z.B. gewisse Iodverbindungen sowie Tritium) können auch durch die intakte Haut, also perkutan, resorbiert werden.

Inkorporierte Radionuklide verhalten sich pharmakokinetisch sehr unterschiedlich, je nach chemischer Verbindung, in der sie vorliegen. Wichtig ist primär, ob sie überhaupt resorbierbar sind oder nicht (Löslichkeit!). Nicht resorbierbare Radionuklide passieren den Magendarmtrakt und wirken allerhöchstens dann schädlich, wenn die Strahlung eine derartige Intensität aufweist, dass das Darmepithel geschädigt wird.

In der Lunge können nicht resorbierbare Partikel recht lange zurückgehalten werden und zu gefährlichen Lungenbestrahlungen führen. Dies gilt speziell für schwer lösliche Alpha-Strahler wie Plutonium.

Inkorporierte und in den Blutstrom aufgenommene Radionuklide werden je nach Verbindung in den sogenannten Zielorganen abgelagert (Iod: Schilddrüse, Radium: Knochen, Phosphor: Knochen), wo sie je nach biologischer und physikalischer Halbwertszeit zu Strahlenschäden Anlass geben können (Parenchymfibrose, Kanzerogenese).

Inkorporationen sind erfahrungsgemäss kaum derart stark, dass akute Strahlenschäden befürchtet werden müssten (es ist bisher kein Strahlenunfall bekannt, bei dem durch eine Inkorporation allein ein akutes Strahlensyndrom aufgetreten wäre). **Dennoch sind es gerade die Inkorporationen, die vom Arzt ein schnelles Vorgehen verlangen.** Es gilt nämlich zu verhindern, dass sich das betreffende Radionuklid im Zielorgan überhaupt festsetzen kann. Eine nachträgliche Entfernung aus dem Organ ist zumeist nicht oder höchstens unvollständig möglich.



7.2.2 Beurteilung von Inkorporationen

Die Behandlung von Inkorporationen ist ohne genaues Wissen um Art der Substanz, Grösse der aufgenommenen Menge, Art (peroral, via Atmung usw.) und Zeit der Aufnahme nicht möglich. Die Zusammenarbeit mit einem Strahlenphysiker (Suva, HSK, PSI, nuklearmedizinische Abteilung) ist wie bei der äusserlichen Kontamination Voraussetzung.

Inkorporationen können häufig mittels Ganzkörperzähler ausgemessen werden. Solche Messgeräte gibt es in der Schweiz im PSI, im Kantonsspital Basel und im Kantonsspital Genf.

Zur Bestimmung einer Radioiodinkorporation genügt ein Schilddrüsenmessgerät, welches vielerorts, z.B. auf nuklearmedizinischen Abteilungen, vorhanden ist. Ist eine direkte Messung nicht möglich, sind Urin- und Stuhlanalysen nötig.

Bei Inkorporationen muss, immer zugleich mit der Bestimmung der Menge des aufgenommenen Radionuklids, auch dessen Zielorgan funktionsanalytisch untersucht werden, um einen evtl. Schaden erfassen zu können (z.B. Iod Schilddrüse/Phosphor und Tritium Knochenmark [Blutbild]). Nachkontrollen in regelmässigen Abständen sind nötig.

7.2.3 Dekorporation

Ob überhaupt, und wenn ja, wie man dekorporieren will, hängt von vielen Faktoren ab, die es zu berücksichtigen gilt. Allgemeine Richtlinien können hierzu kaum gegeben werden. Bei den diesbezüglichen Überlegungen müssen die Nebenwirkungen der Dekorporationsmittel stets mit dem Nutzen verglichen werden. Insbesondere bei älteren Personen ist zu bedenken, dass die Gefahr der Tumorbildung relativ gering ist, braucht es doch für die Radiokarzinogenese häufig Jahrzehnte. (Kontaktnahme mit Nuklearmediziner oder Abteilung Arbeitsmedizin Suva.)

Bei peroraler Aufnahme ist die Gabe eines Emeticums sowie eines Laxans praktisch immer angezeigt. Durch die damit erreichte kürzere Verweildauer im Darm wird die Bestrahlung des Darmepithels verringert und bei resorbierbaren Substanzen zudem die Aufnahme in den Körper verhindert.

Es gilt zu bedenken, dass die Chemotoxizität gewisser Radionuklide (z.B. Uran) die Radiotoxizität bei weitem übertrifft! Dekorporationsmassnahmen sind hier allein schon wegen der Chemotoxizität angezeigt.

Es gibt eine ganze Reihe von speziellen Dekorporationsmitteln für die einzelnen Radionuklide. In Tabelle 3 sind einige Mittel (Wirkstoffe) aufgeführt.

Dekorporationen können über Tage und Wochen andauern. Nach den Ersthilfemassnahmen ist deshalb eine Behandlung auf einer nuklearmedizinischen Abteilung anzustreben.

Schon beim Verdacht auf starke Inkorporationen ($\geq 37 \times 10^4$ Bq) von radioaktiven Iodisotopen ist sofort und ohne vorherige Schilddrüsenmessung die «Iodprophylaxe» durchzuführen (vergleiche auch Kapitel Iodprophylaxe). Der Zeitpunkt der Gabe von sogenanntem stabilem (im Gegensatz zu radioaktivem und damit instabilem) Iod ist hier für den Erfolg von besonderer Wichtigkeit.

Es versteht sich von selbst, dass Urin und Faeces sowie andere Körperexkrete (z.B. Erbrochenes) stets in Plastikbehältern zu sammeln und dem Strahlenphysiker zur Ausmessung zuzusenden sind.

Radionuklid	Antidot (Wirkstoff)
Caesium	Berlinerblau
Iod	Kaliumiodid
Kobalt	Cobaltglaucouit
Plutonium generell Transurane und Lanthanide	Calcium-DTPA
Radium	Aluminiumphosphat
Strontium	Alginate
Strontium	Aluminiumphosphat
Strontium, Radium	Bariumsulphat
Uran	Natriumbicarbonat

Tabelle 3: Beispiele von Antidota (Wirkstoffe) zur Dekorporation von Radionukliden. Antidot-Bezug vgl. Anhang I.

Fazit: Vorgehen bei Inkorporationen

1. Beurteilung der Art und des Ausmasses der Inkorporation:
Eine genaue Diagnose (Art und Grösse der Inkorporation, Lokalisation) ist nur zusammen mit dem Strahlenphysiker möglich.
→ Kontaktnahme mit Suva, HSK, PSI oder nuklearmedizinischer Abteilung.
2. Behandlungsziel:
Inkorporationen von Radionukliden sind praktisch nie von direkt lebensbedrohlichem Ausmass. Dennoch ist eine **rasche** Dekorporation vonnöten, da ein Radionuklid, das sich einmal im Zielorgan festgesetzt hat, im allgemeinen nur noch schwer von dort wieder entfernt werden kann. Eine chronische, wenn auch geringe Bestrahlung des Zielorgans, kann zu einer Strahlenfibrose desselben, bzw. zu Kanzerogenese Anlass geben.
3. Therapie:
Bei peroraler Aufnahme kann im allgemeinen ohne weiteres ein Emeticum, evtl. ein Laxans gegeben werden, ohne dass weitere diagnostische Schritte erst abzuwarten wären. Im übrigen empfiehlt sich allerdings zuerst eine genaue Diagnose.
Bei Verdacht einer Radioiodinkorporation ist ohne Verzug die «Iodprophylaxe» einzuleiten.
Die Zielorgane sollten funktionsanalytisch kontrolliert werden (Ausgangs- und Kontrollwerte, z.B. Iod-131 – Schilddrüse).
Je nachdem, um welches Radionuklid es sich handelt, stehen verschiedene Dekorporationsmittel (Antidota) zur Verfügung. Mittel für die wichtigsten Substanzen können Tabelle 3 entnommen werden.
Alle Exkrete (Urin, Faeces, Erbrochenes usw.) sind zu sammeln und in Plastikbehältern dem Strahlenphysiker zur Ausmessung zuzusenden.

7.3. Spurensicherung

Bei der Abklärung von Strahlenverunfallten hat der behandelnde Arzt immer auch die Aufgabe der «Spurensicherung». Darunter hat man eine Sicherstellung und korrekte Bezeichnung von Materialien zu verstehen, deren physikalische Dosimetrie bei der Evaluation der tatsächlich stattgehabten Strahlenexposition dienlich sein kann. Dabei muss auch auf die Mitwirkung der Fachleute des betreffenden Betriebes gezählt werden.

Kontaminierte Kleider usw. oder Stuhl, Urin und Schleimhautabstriche (Nase, Mund) sollten in Plastikbehälter verpackt und dem Strahlenphysiker zugesandt werden (vergleiche Kapitel Kontamination/Inkorporation).

Aber auch bei Unfällen, bei denen weder Kontaminationen noch Inkorporationen vorgekommen sind, sondern nur eine Bestrahlung von aussen stattgefunden hat, ist eine «Spurensicherung» unter Umständen sinnvoll. Auf der Haut getragene Gegenstände wie Schmuck und Uhren können evtl. dosimetriert werden (via Thermolumineszenz usw.). Bei Neutronenstrahlung (kommt praktisch nur in Kernanlagen vor) kann primär nicht radioaktives Material radioaktiv gemacht werden (man spricht in diesem Zusammenhang von «aktivieren»). Hat eine Bestrahlung mit Neutronen stattgefunden, können deshalb Blutproben, Haare und Fingernägel vom Strahlenphysiker ausgemessen werden.

Wichtig ist, dass bei all diesen Proben neben Name, Geburtsdatum und Adresse des Patienten, das Datum, die genaue Uhrzeit und die Entnahmestelle am Körper auf dem Probebehälter angegeben werden.

Kontaktstellen: Suva, HSK, PSI evtl. Nuklearmedizinische Abteilung.

8. Diverses

8.1 Iodprophylaxe

Spätestens seit der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl ist die sogenannte «Iodprophylaxe» auch für den Nichtspezialisten ein Begriff geworden. Wird rechtzeitig und im Überschuss «stabiles» Iod verabreicht, so kann damit die Aufnahme und Speicherung von unfallmässig freigesetztem radioaktivem «instabilem» Iod verhindert oder stark reduziert werden («Iodblockade» der Schilddrüse). Radioaktive Iodisotope («instabiles» Iod, das gesetzmässig in Tochternuklide zerfällt) spielen nicht nur im Kernenergiebereich eine Rolle, wo sie als Spaltprodukte von Uran anfallen, sie werden auch häufig zu Tracer-Zwecken in Forschung und Technik verwendet (vgl. Radioimmunoassays!). Ausserdem werden sie zur Diagnostik und als Radiopharmaka (Schilddrüsenerkrankungen) in der Medizin eingesetzt.

8.1.1 Ziel der Iodprophylaxe

Radioaktive Iodisotope, wenn in der Schilddrüse gespeichert, führen zu einer Bestrahlung des Drüsengewebes und können so zu Schilddrüsenkrebs oder zu Hypothyreose führen. Für die Verursachung einer Hypothyreose braucht es exzessiv hohe Dosen, welche erfahrungsgemäss bei Unfällen praktisch nie erreicht werden. **Die «Iodprophylaxe» ist also im wesentlichen eine Prophylaxe von Schilddrüsenkrebs.** Da es bis zu dessen Manifestation Jahre oder meist Jahrzehnte dauert, sind vor allem schwangere Frauen, Kinder und Jugendliche gefährdet und bedürfen in besonderem Mass der Prophylaxe. Zudem ist möglicherweise der jugendliche Organismus auch ganz generell anfälliger für die Krebsentwicklung.

Nach dem Unfall in Tschernobyl ist ab 1990 bei in dieser Grossregion lebenden Personen, die im Kindesalter exponiert wurden, die Erkrankungsrate an Schilddrüsenkrebs stark angestiegen. Sie war bereits 1990 mehr als dreissigfach erhöht gegenüber dem 10-Jahres-Mittelwert vor 1996. Ende 1998 musste für die Altersgruppe der 19- bis 64-Jährigen eine fünf- bis sechs-

fache Zunahme des Schilddrüsenkrebses konstatiert werden. Die Schilddrüsendosen dieser Personen waren teilweise hoch. Im meistbetroffenen Gebiet von Gomel wird die durchschnittliche Schilddrüsendosis in ländlichen Gegenden für Kinder die zur Zeit des Unfalls bis 7 Jahre alt waren, mit etwa 1 Sv angegeben. Vermehrtes Vorkommen von Schilddrüsenkrebs wird aber auch aus Gebieten mit deutlich weniger hohen Dosen gemeldet. Dies hat dazu geführt, dass die Iodprophylaxe heute für Kinder bereits nach tieferen Schilddrüsendosen als früher gerechtfertigt erscheint.

Anders bei älteren Leuten: Hier ist die Gefahr für Nebenwirkungen der Iodprophylaxe grösser, da im Alter häufiger Schilddrüsenerkrankungen vorkommen. Ausserdem «erleben» ältere Leute ihren Krebs wegen dessen langer Latenzzeit evtl. gar nicht mehr.

8.1.2 Wirkungsmechanismus

Mit der Gabe von stabilem Iod wird prinzipiell Folgendes erreicht:

- a) Das aufgenommene Radioiod wird durch den hohen Überschuss an stabilem Iod im Blut relativ verdünnt. Der Schilddrüse wird also im Verhältnis mehr stabiles Iod als Radioiod angeboten.
- b) Die Schilddrüse wird mit stabilem Iod abgesättigt. Weiteres Iod, ob radioaktiv oder nicht, kann nicht mehr aufgenommen werden.
- c) Der Einbau von Iodid in organische Substanzen (Hormone) wird durch die grosse Iodgabe kurzzeitig gehemmt (Wolff-Chaikoff-Effekt). Freies Iodid wird aber schneller ausgeschieden als das in Hormone eingebaute Iod.

8.1.3 Indikation

Eine medikamentöse Prophylaxe mit stabilem Iod ist überall dort angezeigt, wo eine Inkorporation von Radioiod bereits stattgefunden hat oder kurz bevorsteht und durch andere Massnahmen nicht zu verhindern ist (d.h. wenn eine Exposition zu Iodaerosolen oder eine Ingestion von mit Radioiod kontaminierten Nahrungsmitteln durch Evakuierung der Bevölkerung resp. Vermeidung der verseuchten Nahrungsmittel nicht verhindert werden kann).

Nach einem kerntechnischen Unfall wird die Höhe der Strahlenbelastung durch Radioisotope des Iod mit dem Leitnuklid I-131 (Halbwertszeit 8,04 Tage) dominiert. Der Entscheid zur Einnahme der vom Bund abgegebenen Kaliumiodid-Tabletten wird im Ereignisfall (Reaktorstörfall) über die NAZ (Nationale Alarmzentrale) getroffen und über das Alarmdispositiv in geeigneter Weise bekannt gegeben (vgl. Anh. IV).

Indiziert ist die Prophylaxe allerdings nur dann, wenn die Schilddrüsenstrahlenbelastung und das daraus resultierende Krebsrisiko stärker ins Gewicht fallen, als die von der Prophylaxe mit stabilem Iod zu befürchtenden Nebenwirkungen. In Tabelle 4 finden sich einzelne sogenannte Interventionslimiten, wie sie von verschiedenen Ländern und Organisationen empfohlen werden.

Die unteren Limiten gelten vor allem für schwangere Frauen, Kinder und Jugendliche, welche von der Prophylaxe aus den unter 8.1.1 bereits genannten Gründen mehr profitieren als alte Leute.

Der Unterschied in den empfohlenen Limiten zwischen den einzelnen Ländern und Organisationen ist unter anderem aus der jeweils unterschiedlichen Grundversorgung der Bevölkerung mit stabilem Iod (mit der sich daraus ergebenden unterschiedlichen Affinität von Radioiod zur Schilddrüse) sowie der unterschiedlichen Wertung von Krebsrisiko und Nebenwirkungen zu erklären.

Für die Schweiz wird eine Interventionslimite von 30–300 mSv empfohlen (VEOR = Verordnung über die Einsatzorganisation bei erhöhter Radioaktivität vom 26. Juni 1991, Stand 16. Februar 1999).

Im Ernstfall spielen diese Limiten nur eine sehr beschränkte Rolle: Einerseits ist der Zeitfaktor der Iodgabe derart entscheidend für die Wirkung, dass man sich bei der Abgabe der Iodtablette häufig nicht auf langwierige und unzuverlässige Dosisschätzungen einlassen können. Andererseits ist für eine kurzzeitige Prophylaxe von 1 bis 2 Tagen kaum mit ernstzunehmenden Nebenwirkungen zu rechnen (Ausnahme: bei den sehr seltenen Fällen von echter Iodallergie und hypocomplementärer Vasculitis bzw. Dermatitis herpetiformis «Dühring»).

8.1.4 Zeitpunkt der Iodgabe

Absolute Voraussetzung für die Wirksamkeit der Iodprophylaxe ist die rechtzeitige Gabe! Am besten wäre es, das stabile Iod vor der befürchteten Radioiodexposition zu geben (aber, wenn möglich, nicht mehr als 12 Stunden vorher). Auch 5 Stunden nach der Exposition ist die Prophylaxe noch sinnvoll, danach allerdings ist ihre Wirksamkeit zu relativieren, es sei denn, die Exposition zu Radioiod halte an (vgl. Abb. 21).

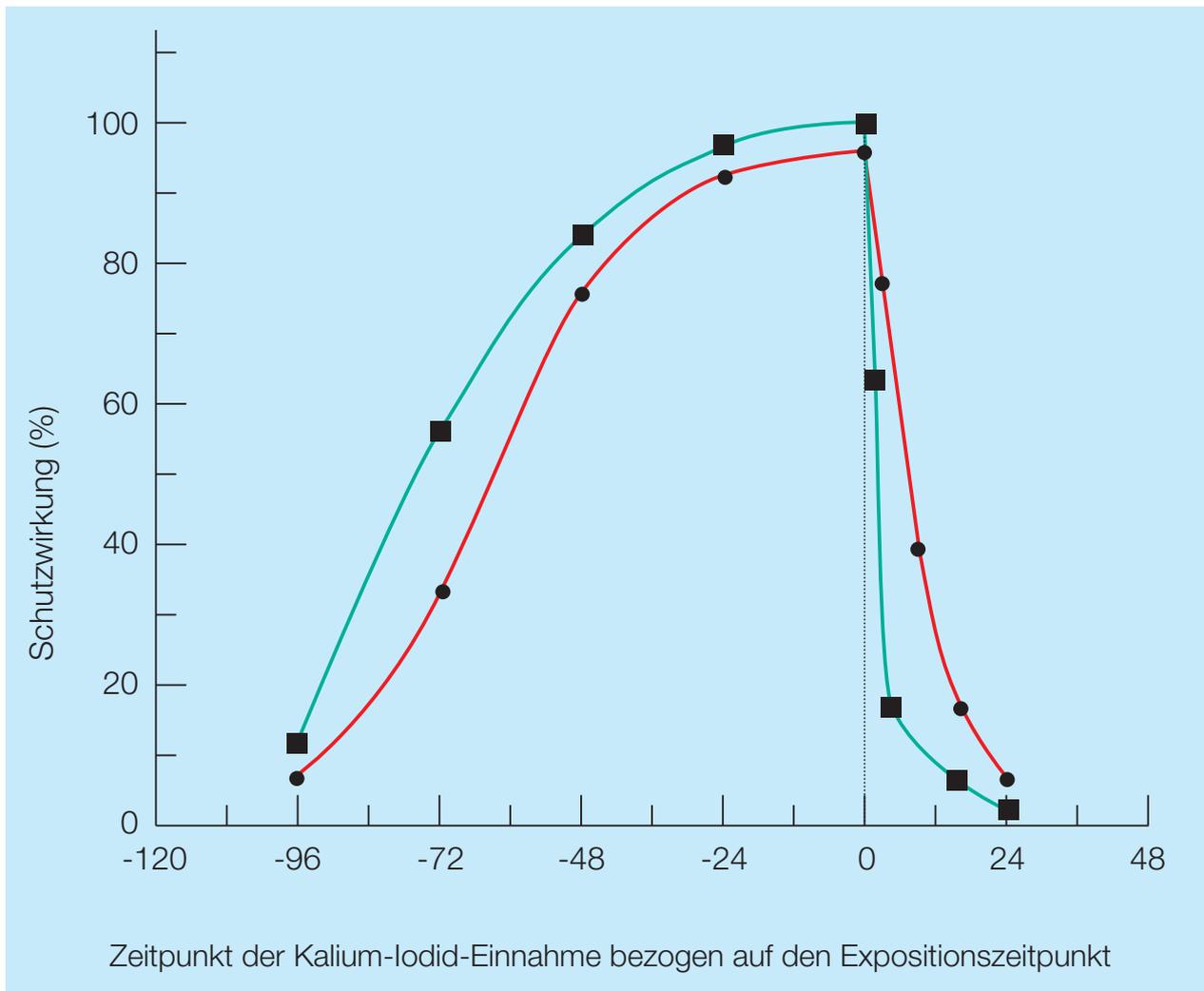


Abbildung 21: Rolle des Zeitfaktors bei der Kalium-Iodid-Prophylaxe

Die Wirkung der Iodprophylaxe beträgt in Gebieten wie der Schweiz, wo kein nutritiver Iodmangel herrscht, auch 6 Stunden nach Aufnahme von I-131 immer noch etwa 50% (rote Kurve). Iodmangel verschlechtert die Wirkung der Iodprophylaxe (grüne Kurve). Es kann in diesem Zusammenhang auf die Publikation von P.B. Zanzonico und D.V. Becker verwiesen werden (vgl. Anhang V).

8.1.5 Dosierung

Altersgruppe	Kaliumiodid	Tabletten
Geburt bis 1 Monat	16,2 mg	$1\frac{1}{44}$ Tabl. einmalig
1 Monat bis 3 Jahre	32,5 mg	$1\frac{1}{42}$ Tabl. pro Tag
3 Jahre bis 12 Jahre	65,0 mg	1 Tabl. pro Tag
über 12 Jahre Erwachsene	130,0 mg	2 Tabl. pro Tag
Schwangere und Stillende	130,0 mg	2 Tabl. pro Tag an max. 2 Tagen

Tabelle 4: Dosisschema

Für Neugeborene kann der entsprechende Tablettenanteil in etwas Flüssigkeit aufgelöst mit dem Löffel verabreicht werden. Daneben können auch Tropflösungen, aus Kaliumiodidkristallen jeweils frisch hergestellt, benutzt werden.

Obwohl das Neugeborene via Muttermilch bei Brustmilchernährung zusätzlich etwas Iod erhält, wird eine Iodprophylaxe für beide (Mutter und Kind) empfohlen.

Bei Iodrisiko-Patienten kann statt der Iodtabletten Natrium- oder Kaliumperchlorat gegeben werden, das die Aufnahme von Iod kompetitiv hemmt. Auch die Gabe von Thyreostatica, die den Einbau von Iod in Thyrosin hemmen, könnten in Einzelfällen in Erwägung gezogen werden.

Haltbarkeit: Kaliumiodid-Tabletten trocken und kühl aufbewahrt sind mindestens 8 Jahre lang haltbar.

8.1.6 Kontraindikationen

- bekannte Iodallergie
- hypocomplementäre Vasculitis und Dermatitis herpetiformis «Duhring»
- evtl. Schilddrüsenerkrankungen (je nach Schwere / vor allem bei längerer Applikation von stabilem Iod)

8.1.7 Nebenwirkungen

Die Prophylaxe mit stabilem Iod gilt als sichere und im allgemeinen völlig ungefährliche Massnahme.

Bei kurzzeitiger Iodprophylaxe von 1 bis 2 Tagen sind Nebenwirkungen kaum zu erwarten (ausser bei oben angegebenen absoluten Kontraindikationen). Die im folgenden aufgezählten Nebenwirkungen sind meist bei hohen Dosierungen (evtl. intravenösen!), welche über lange Zeiträume aufrechterhalten werden mussten, gesehen worden.

Bei Iod-bedingten Nebenwirkungen wird prinzipiell zwischen intrathyreoidalen und extrathyreoidalen unterschieden. **Extrathyreoidale Nebenwirkungen allergischer** Natur sind: Angioedem, Serumkrankheit, Periarteriitis nodosa und verschiedene Hautkrankheiten.

Nicht allergische Reaktionen (praktisch nur bei längerer Verabreichung von hohen Dosen vorkommend) betreffen:

- die Haut: leichte akneforme Veränderungen
- die Schleimhäute: Metallgeschmack, Schleimhautreizungen in Mund, Rachen, Nase und Augen (Rhinitis, Konjunktivitis), produktiver Husten
- die Speicheldrüsen: Zunahme des Speichelflusses, Schwellung der Parotis und der submandibulären Drüsen (Iodidmumps)
- den Verdauungsapparate: Anorexie, Gastritis, Diarrhoe

Die Symptome verschwinden innert weniger Tage nach Beendigung der Iodgabe.

Intrathyreoidale Nebenwirkungen: Kropfentwicklung und Hypothyreose (vor allem bei Neugeborenen zu befürchten) oder Hyperthyreose (vor allem in Iodmangelgebieten sowie bei Patienten mit autonomen Schilddrüsenadenomen usw.).

Bei länger dauernder Iodprophylaxe müssen insbesondere Neugeborene und Schilddrüsenkranke bezüglich Kropfentwicklung und Hormonstatus überwacht werden.

8.2 Schwangerschaft und Strahlenunfall

Die Frucht im Mutterleib ist bezüglich teratogenen Einwirkungen irgendwelcher Art, also auch gegenüber ionisierender Strahlung, besonders anfällig. Bei einem Strahlenunfall mit Exposition der Frucht, stellt sich die Frage, ob bleibende gesundheitliche Schäden befürchtet werden müssen oder nicht. Diese können bestehen in Missbildungen, geistiger Retardierung oder einem erhöhten Krebsrisiko. Welche Organe betroffen sind, hängt unter anderem von der Expositionsart sowie nicht zuletzt vom Entwicklungsstadium ab, in dem sich der Embryo oder Fetus befindet. Was das erhöhte Krebsrisiko angeht, so liegen diesbezüglich heute noch keine sicheren wissenschaftlichen Erkenntnisse vor. Es wird allerdings angenommen, dass es ein paar Mal grösser ist als das der erwachsenen Bevölkerung.

Etwas besser dokumentiert ist man bezüglich geistiger Retardierung nach Strahlenexposition. Untersuchungen bei überlebenden Atombombenopfern von Hiroshima und Nagasaki sprechen dafür, dass die Frucht 8 bis 15 Wochen nach Konzeption in der Gehirnentwicklung geschädigt werden kann. Den Daten haftet allerdings eine gewisse Unsicherheit an. Es ist möglich, dass die sehr schlechten äusseren Bedingungen (Hunger, Seuchen) nach den Bombenabwürfen in Hiroshima und Nagasaki die Strahleneffekte verstärkt haben. Dennoch nehmen heute anerkannte Strahlenbiologen eine Gefährdung des Feten an, wenn dieser in der 8. bis 15. Schwangerschaftswoche einer akuten Dosis von mehreren Centi-Sievert ausgesetzt war.

Allgemeine Empfehlungen bezüglich einer Interruptio können nicht gegeben werden. Einerseits muss auf die derzeit gültigen die Schwangerschaftsabbrüche regelnden Bestimmungen in der Gesetzgebung hingewiesen werden. Andererseits muss bei einer übermässigen Strahleneinwirkung auf eine Schwangere die Situation multidisziplinär beurteilt werden. Falls eine Exposition von mehr als 20 mSv am Abdomen vermutet wird, sind genaue Dosisberechnungen anzustreben. Falls die Exposition am Uterus (Fetus) 100 mSv übersteigt, ist eine individuelle multidisziplinäre Beurteilung notwendig. Medizinische Empfehlungen müssen dabei die Situation der Schwangeren und deren psychosoziales Umfeld miteinbeziehen. Details zum Vorgehen sind in der Stellungnahme der Eidg. Kommission für Strahlenschutz (EKS) vom 16.6.1998 festgehalten (Risiko des Feten nach Exposition der Schwangeren mit ionisierender Strahlung). Es liegt auf der Hand, dass nur eine zuverlässige Dosisbestimmung Grundlage einer solchen Beratung sein kann.

Auch wenn keine Strahlenschädigung der Frucht zu befürchten ist, sollte der Arzt mit der betroffenen Schwangeren in jedem Falle ein ausführliches Gespräch führen. Nur dadurch können unbegründete Ängste abgebaut werden.

Fazit: Vorgehen bei Gravidität

Die Frucht im Mutterleib ist gegenüber Strahlenexpositionen besonders empfindlich.

Aufgrund neuester Erkenntnisse ist eine ernsthafte Gefährdung nach akuten Expositionen von einigen Centisievert an aufwärts (und nur wenn diese in der besonders empfindlichen Entwicklungsperiode von der 8. bis zur 15. postkonzeptionellen Schwangerschaftswoche akkumuliert worden sind) anzunehmen.

Die Frage einer Interruptio muss zusammen mit der Schwangeren unter Beiziehung eines Sachverständigen (Nuklearmediziner, Radiotherapeuten) gründlich besprochen werden.

Bei jeder unfallmässigen Bestrahlung einer Schwangeren sollte der behandelnde Arzt ein ausführliches Gespräch mit der Betroffenen führen, auch wenn Strahlenschäden der Frucht nicht befürchtet werden müssen.

8.3 Fertilität

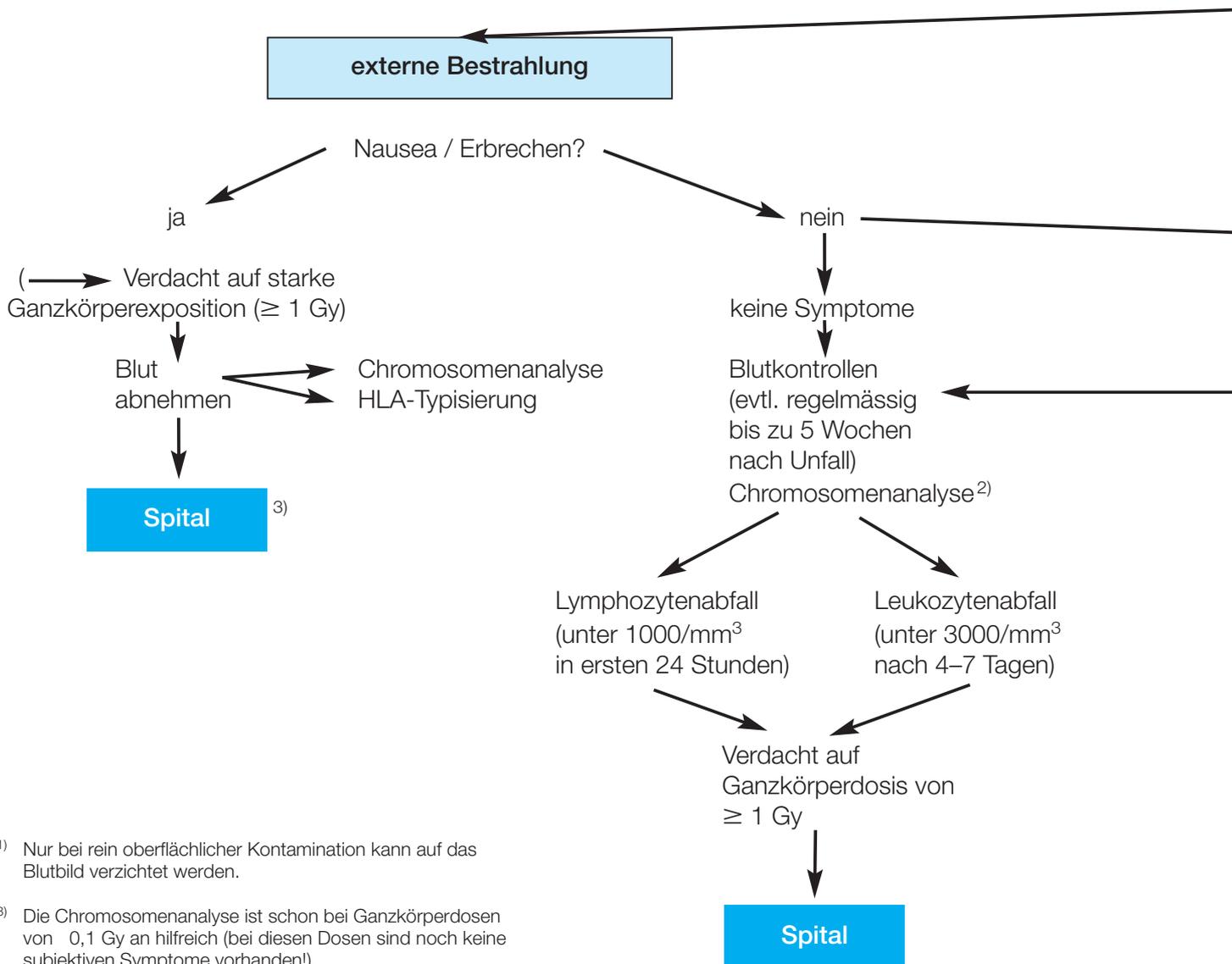
Eine akute Strahlendosis von 0,15 Gy an aufwärts kann beim Mann zu einer temporären Sterilität führen. Von 3,5 Gy an muss mit einer permanenten Sterilität gerechnet werden.

Die Bestrahlung der Hoden führt zu einer Abnahme der Spermatogenese, nicht aber der hormonalen Sekretion. Die Potentia coeundi bleibt auch bei hohen Dosen praktisch immer erhalten.

Ist die Sterilität beim Mann temporär, muss berücksichtigt werden, dass der tiefste Punkt der Spermatozoen-Depression oft erst nach Monaten erreicht ist und eine Erholung evtl. erst nach einem Jahr konstatiert werden kann.

Bei Frauen spielt das Alter bei der Strahlenexposition eine wesentliche Rolle: Ältere Frauen, mit ihrer bereits verminderten Oozytenzahl, sind gefährdeter als jüngere. Dies steht nicht im Gegensatz dazu, dass man bei den jüngeren Frauen den Strahlenschutz besonders hoch hält, soll damit doch vor allem **die Frucht** im Mutterleib geschützt werden. Eine permanente Sterilität bei der Frau kann schon nach akuten Dosen von 2,5 Gy an auftreten.

9. Vorgehen beim Strahlenunfall



¹⁾ Nur bei rein oberflächlicher Kontamination kann auf das Blutbild verzichtet werden.

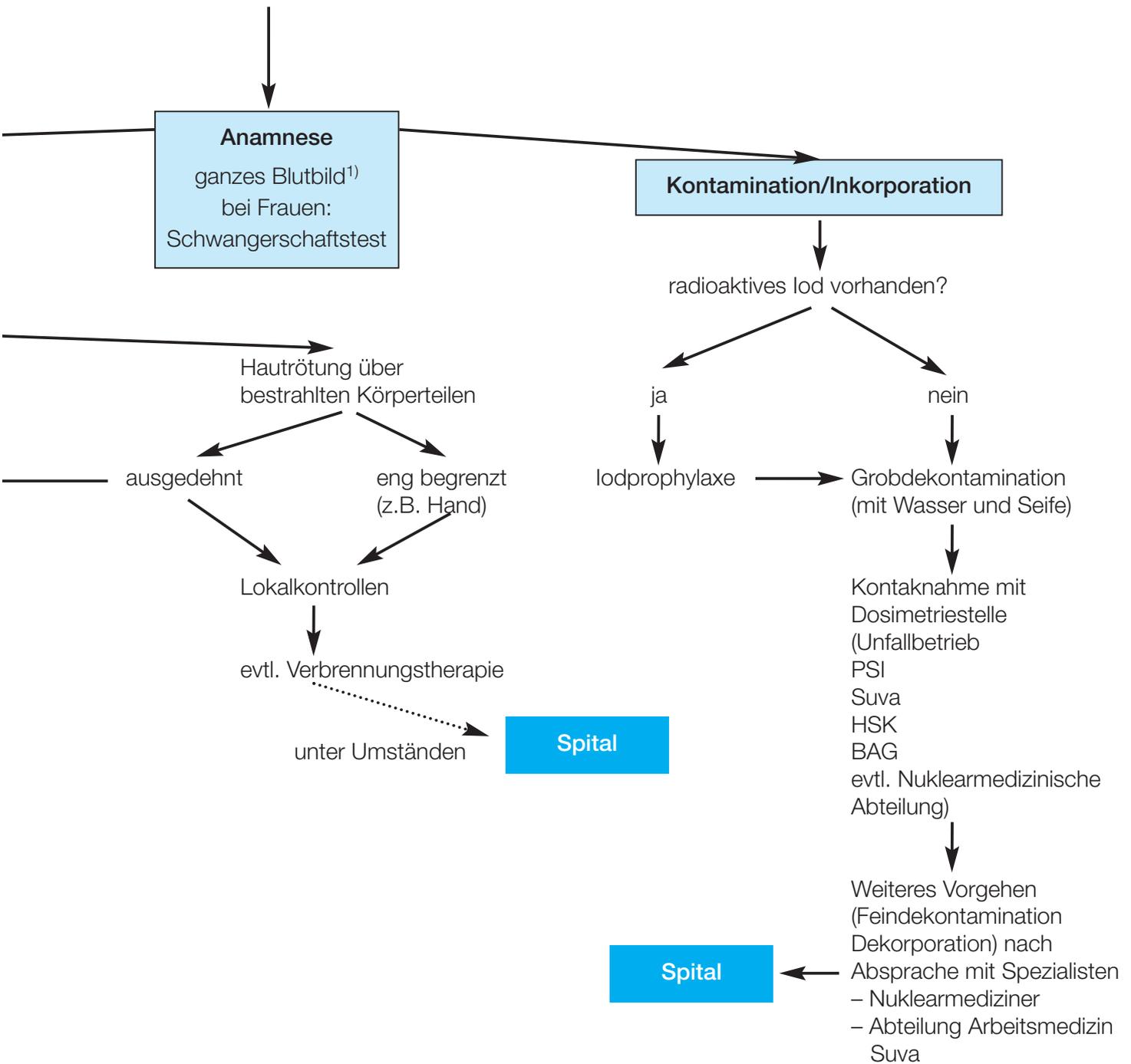
²⁾ Die Chromosomenanalyse ist schon bei Ganzkörperdosen von 0,1 Gy an hilfreich (bei diesen Dosen sind noch keine subjektiven Symptome vorhanden!).

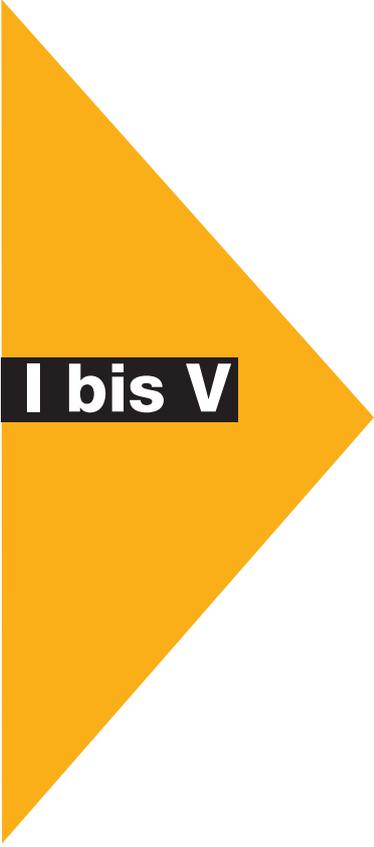
³⁾ Am besten Einweisung in ein Spital mit gut ausgebauter hämatologisch-onkologischer Abteilung.

Strahlenunfall

(Vorgehen bis zur Spitaleinweisung)

Lebensrettende Ersthilfemaßnahmen für «konventionelle» Verletzungen (mechan. Trauma, Verbrennungen usw.) gehen in jedem Fall einer «spezifischen» Therapie der Strahlenschäden vor.





Anhang I bis V

Anhang I

Wichtige Adressen

ARMA	Alarmstelle Radioaktivität bei: MeteoSchweiz Krähbühlstr. 58 8044 Zürich Tel. 01/256 91 11 (Geschäftszeiten) (die hier nicht aufgeführte Alarmnummer ist einschlägigen Institutionen und Notfallorganisatio- nen bekannt)
BAG	Bundesamt für Gesundheit Abteilung Strahlenschutz Postfach 3005 Bern Tel. 031/324 94 00
KSR	Kommission für Strahlenschutz und Überwachung der Radioaktivität Postfach 3000 Bern
HSK	Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen 5232 Villigen-HSK Tel. 056/310 38 11
IRS	Institut de radiophysique appliquée Centre universitaire 1015 Lausanne Tel. 021/623 34 34

- PSI** Paul-Scherrer-Institut
5234 Villigen
Tel. 056/310 21 11
- Suva** Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
Abteilung Arbeitssicherheit
Bereich Physik
Postfach
6002 Luzern
Tel. 041/419 51 11
- Suva** Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
Abteilung Arbeitsmedizin
Postfach
6002 Luzern
Tel. 041/419 51 11
- Antidot-Bezug** Kantonsapotheke
Universitätsspital Zürich
Tel. 01/255 32 14 (Apotheke)
Tel. 01/255 30 30 (Dringlichkeitsnummer Apotheke)

Anhang II

Chromosomenanalyse

1. Kontaktnahme mit der Abteilung Arbeitsmedizin Suva, der HSK oder dem BAG.
2. Entnahme von 10 ml Blut in ein steriles, heparinisiertes Röhrchen. Die Blutentnahme hat bald nach dem Unfall zu erfolgen.
3. Es müssen folgende Angaben mitgeliefert werden:
 - Personalien
 - Genaue Zeit des Unfalles bzw. Hergang desselben
 - Strahlungsart
 - Betroffene Körperregionen
 - Geschätzte Dosis
 - Frühere medizinische und berufliche Strahlenexposition (auch eine früher durchgeführte Zytostatikatherapie muss angegeben werden).
 - Zeit der Blutentnahme
4. Erste Resultate sind nach 3–4 Tagen erhältlich.

Anhang III

Nuklid	physikalische Halbwertszeit	effektive Halbwertszeit	Strahlenart	Kritisches Organ
Americium-241 AM-241	457,7 a	83,9 a	alpha, gamma	Knochen
Berkelium-249 Bk-249	314 d	311 d	beta, gamma	Knochen
Blei-210 Pb-210	21,4 a	1,2 a 6,8 a	beta, gamma	Niere Knochen
Brom-82 Br-82	35,3 h	1,27 d	beta,gamma	Ganzkörper
Caesium-137 Cs-137	30 a	70 d	beta, gamma	Ganzkörper
Calcium-45 Ca-45	165 d	165 d	beta	Knochen
Calcium-47 Ca-47	4,53 d	4,53 d	beta, gamma	Knochen
Californium-252 Cf-252	2,6 a	2,5 a	alpha, gamma, Neutronen	Knochen
Chrom-51 Cr-51	27,8 d	22,8 d	beta, gamme	Lunge (Gastro- intestinaltrakt)
Curium-242 Cm-242	162,5 d	161,8 d	alpha, gamma, Neutronen	Knochen
Curium-244 Cm-244	17,6 a	15 a	alpha, gamma, Neutronen	Knochen
Einsteinium-253 Es-253	20,4 d	20,4 d	alpha	Knochen
Eisen-55 Fe-55	2,6 a	388 d	beta, gamma	Milz (RES)
Eisen-59 Fe-59	45 d	41,9 d	beta, gamma	Milz (RES)
Gold-198 Au-198	2,7 d	1 d	beta, gamma	Niere/Gastro- intestinaltrakt
Indium-113m In-113m	99,4 min.	1,61 h	beta, gamma	Niere/Gastro- intestinaltrakt
Iod-123 I-123	13,3 h	0,54 d	beta, gamma	Schilddrüse
Iod-125 I-125	60,2 d	41,8 d	beta, gamma	Schilddrüse

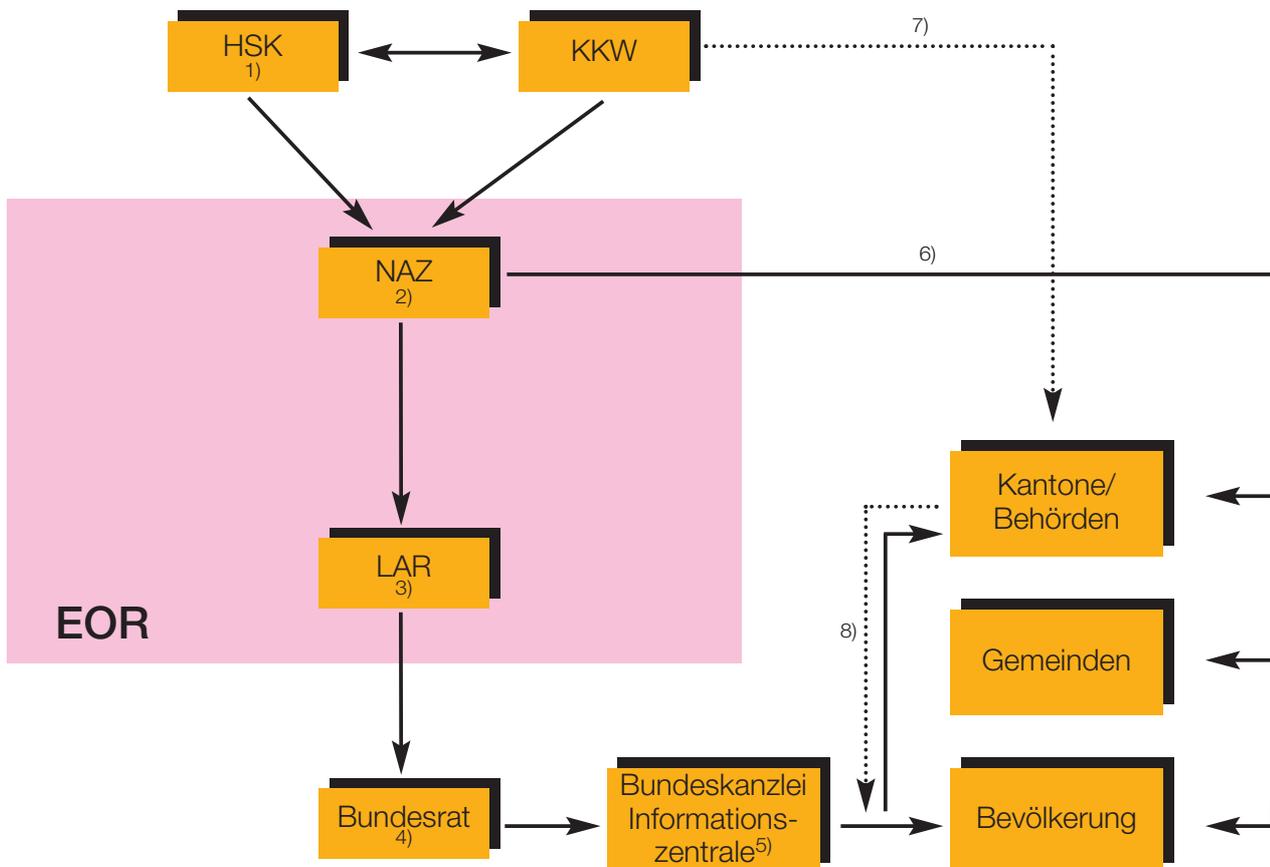
Iod-131	I-131	8,05 d	7,6 d	beta, gamma	Schilddrüse
Kobalt-60	Co-60	5,26 a	117 d	beta, gamma	Lunge
Kohlenstoff-14	C-14	5730 a	40 d	beta	Ganzkörper
Krypton-85	Kr-85	10,7 a		beta	Ganzkörper
Mangan-54	Mn-54	314 d	88,5 d 23 d	gamma	Lunge Leber
Natrium-22	Na-22	2,6 a	11 d	beta, gamma	Ganzkörper
Natrium-24	Na-24	15 h	0,6 d	beta, gamma	Gastrointestinal- trakt
Phosphor-32	P-32	14,3 d	14,1 d	beta	Knochen
Plutonium-238	Pu-238	86 a	46,2 a	alpha, gamma	Knochen
Plutonium-239	Pu-239	24 360 a	100 a	alpha, gamma	Knochen
Polonium-210	Po-210	138,4 d	31,7 d 66,7 d	alpha	Niere Lunge
Quecksilber-203	Hg-203	46,6 d	11 d	beta, gamma	Niere
Schwefel-35	S-35	88 d	7 d	beta	Ganzkörper
Selen-75	Se-75	120 d	61 d 10 d	gamma	Lunge Niere
Strontium-85	Sr-85	64 d	64 d	gamma	Knochen
Strontium-89	Sr-89	52 d	52 d	beta	Knochen
Strontium-90	Sr-90	28,1 a	$6,4 \times 10^3$ d	beta	Knochen
Technetium-99m	Tc-99m	6 h		gamma	Schilddrüse/ Gastrointestinal- trakt
Tritium	H-3	12,3 a	10 d	beta	Ganzkörper
Uran-235	U-235	$7,1 \times 10^8$ a	15 d	alpha, gamma	Niere
Uran-238	U-238	$4,49 \times 10^9$ a	15 d	alpha, gamma	Niere
Xenon-133	Xe-133	5,27 d		beta, gamma	Ganzkörper
Yttrium-90	Y-90	64 h		beta	Gastrointestinal- trakt
Zink-65	Zn-65	245 d	194 d 80,5 d	beta, gamma	Ganzkörper Lunge

Anhang IV

KKW-Unfall:

Quelle: Konzept für den Notfallschutz in der Umgebung der Kernkraftwerke, März 1998, Eigenössische Kommission für AC-Schutz

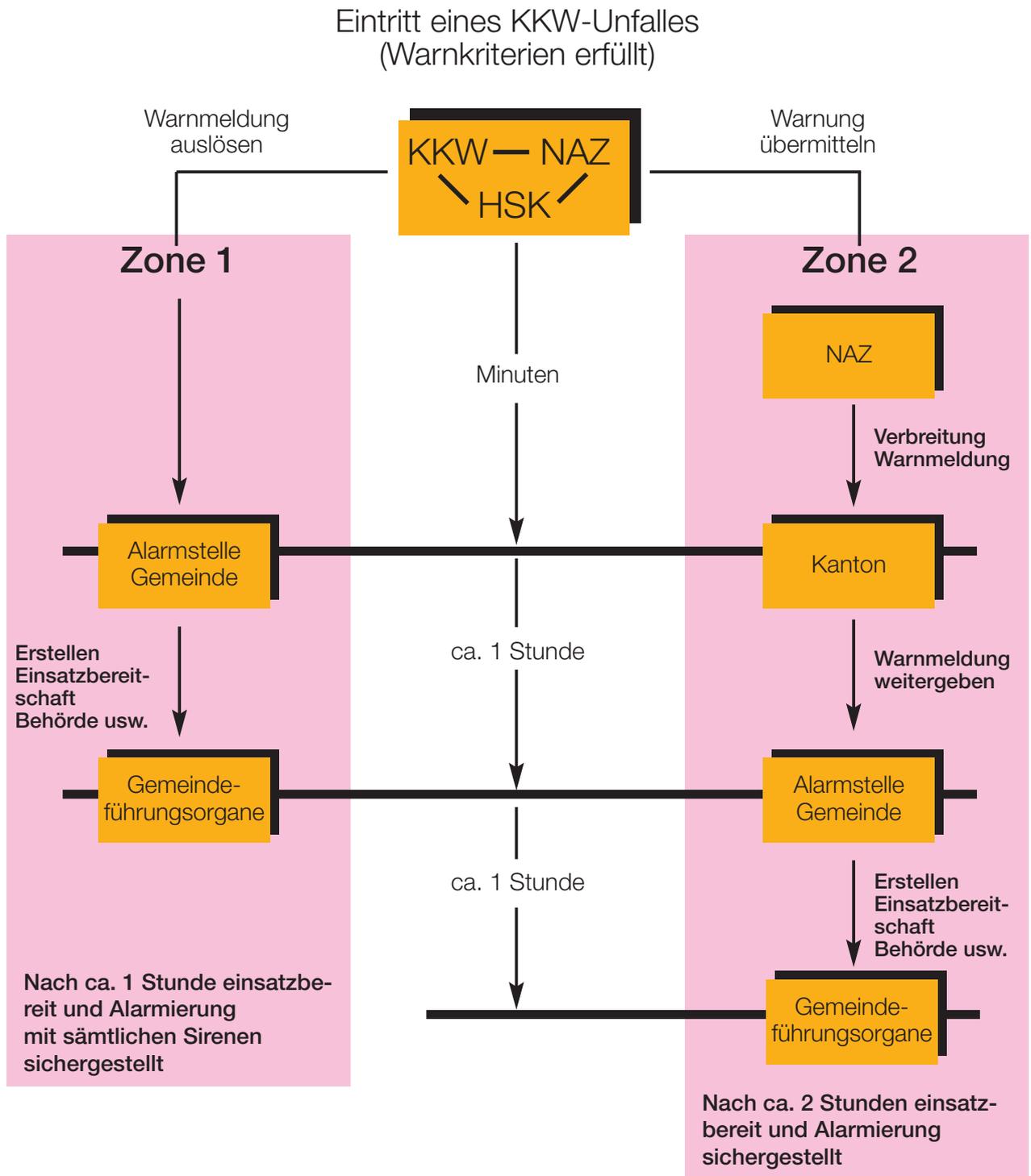
Strukturen und Aufgaben der Notfallorganisation (EOR) und weitere Stellen



- 1) Beurteilung der Lage im Werk und Prognose über die radiologischen Auswirkungen in und um die Anlage.
- 2) Messorganisation und Beurteilung von Strahlenmesswerten; Bestimmung und Prognosen der radiologischen Gefährdung; Anordnung von Schutzmassnahmen.
- 3) Beurteilung der Gesamtlage; Formulierung der Anträge an den Bundesrat.
- 4) Erlass von Weisungen.
- 5) Verbreitung von Informationen und von Verhaltensanweisungen.
- 6) Direkte Verbreitung von Informationen und von Verhaltensanweisungen durch die NAZ, solange der LAR nicht einsatzbereit ist.
- 7) Empfehlung von Verhaltensmassnahmen zum Schutz der Bevölkerung bei Unfallabläufen mit keiner oder sehr kurzer Vorphase.
- 8) Erste Information der Bevölkerung und allfällige Verhaltensanweisungen gestützt auf Empfehlungen des Werkes bei Unfallabläufen mit keiner oder sehr kurzer Vorphase.

Verfügbare Zeiten für die Vorbereitung von Schutzmassnahmen

Erstellen der Einsatzbereitschaft für Gemeindeführungsorgane



Anhang V

Literaturverzeichnis

De Oliveira A.R.: «Un répertoire des accidents radiologiques 1945–1985». Radioprotection 22,89–135,1987.

Der Strahlenunfall. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission (Deutschland); Bd. 32, 1996. ISBN 3-437-25208-9

Deutsche Strahlenschutzkommission: «Medizinische Massnahmen bei Kernkraftwerksunfällen». Band 4. Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart, 1986.

Deutsche Strahlenschutzkommission: «Wirkungen nach pränataler Bestrahlung». Gustav Fischer-Verlag, Stuttgart, 1989.

Eberhard H., Eigenmann F., Schärer K., Bürgi H. : «Auswirkungen der verbesserten Kropfprophylaxe mit iodiertem Kochsalz auf den Iodstoffwechsel in der Schweiz». Schweiz. med. Wschr. 113, 24–27, 1983.

Erste Hilfe bei erhöhter Einwirkung ionisierender Strahlung. Institut für Strahlenschutz der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektronik und der Berufsgenossenschaft der chemischen Industrie. Köln, Dezember 1996

Fanger H. et al.: «Radiation Death from Cardiovascular Shock Following a Criticality Accident». Arch. Path. 83, 446–460, 1967.

Hübner K.F., Fry S.A.: «The Medical Basis for Radiation Accident Preparedness». Elsevier/North-Holland, 1980.

IAEA-TEC DOC-366. «What the general practitioner (MD) should know about medical handling of overexposed individuals», IAEA, 1986.

IAEA: «Biological Dosimetry: Chromosomal Aberration Analysis for Dose Assessment». International Atomic Energy Agency, Wien, Technical Reports Series No. 260, 1986.

IAEA: The Radiological Accident in Yanango. Vienna., August 2000. ISBN 92-0-101500-3

Jammet H., Daburon F., Gerber G.B., Hopewell J.W., Haybittle J.L., Whitefield L.: «Radiation Damage to Skin». Brit. J. Radiology, Supplement No. 19, 1986.

Kallee E., Wahl R.: «Nutzen und Risiko der Iodprophylaxe», in: Strahlenschutz in Forschung und Praxis, Band XXI 1, S. 100–110, Thieme Verlag Stuttgart, New York, 1981.

Massnahmen nach Kontamination der Haut mit radioaktiven Stoffen. Empfehlungen der Strahlenschutzkommission. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission (Deutschland); Bd. 18, 1992. ISBN 3-437-11450-6

Messerschmidt O. et al.: «Industrielle Störfälle und Strahlenexposition». Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1980.

NCRP-Report No. 65: «Management of Persons Accidentally Contaminated with Radionuclides». National Council on Radiation Protection and Measurements. Washington D.C., 1980.

Planning the Medical Response to Radiological Accidents. Safety Reports Series No 4. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1998.

Risiko des Feten nach Exposition der Schwangeren mit ionisierender Strahlung. Stellungnahme der Eidg. Kommission für Strahlenschutz (EKS) vom 16. Juni 1998, publiziert in der Schweizerischen Ärztezeitung 1998; 79 Nr. 36: 1763–1766

Suva, Reihe Arbeitsmedizin: Ionisierende Strahlen.
Abteilung Arbeitsmedizin Suva, 6002 Luzern, 3. überarbeitete Auflage März 1996

U.S. National Center for Devices and Radiological Health, Rockville, MD.FDA: «Treparedness and Response in Radiation Accidents», Technical Report, August 1983.

Vereinigung Deutscher Strahlenschutzärzte e.V.: «Inkorporation von Radionukliden». Workshop 27.–28. Febr. 1986, Hamburg, BRD.

Volf V.: «Iodtabletten als Schilddrüsenschutz nach Reaktorunfall: Risiko-Nutzen-Überlegung». Atomkernenergie, Kerntechnik 37, 50–55, 1981.

Weigensberg I.J. et al.: «Injury due to Accidental Exposure to X-Rays from a X-Ray Fluorescence Spectrometer». Health Physics 39, 237–241, 1980.

WHO, Regionalbüro für Europa, Kopenhagen, 1987: «Nuclear Accidents and Epidemiology». Environmental Health Nr. 25.

WHO: «Guidelines for Iodine Prophylaxis following Nuclear Accidents».
WHO Regional Office for Europe, 1989.

Zanzonico P.B. and Becker D.V.: Effects of Time of Administration and Dietary Iodine Levels on Potassium Iodide (KI) Blockade of Thyroid Irradiation by ¹³¹I from Radioactive Fallout. Health Physics 78; No 6, June 2000: 660–667.