

Alpha-Strahlung: Strahlenbiologie und Risikobeurteilung²

In das mir vorgegebene Thema möchte ich auch ein paar eigene Erfahrungen einfließen lassen und mich am Schluß – das ist nun auch notwendig bei diesem speziellen Thema – zur Frage der chemischen Toxizität dieses Alpha-Strahlers äußern, weil das auch eine Rolle spielt für Beschäftigte, die mit Uran zu tun hatten. Dann werde ich auch kurz berichten über die neuesten, jüngst publizierten Zwischenergebnisse aus der Nachuntersuchung von Soldaten, die mit angereichertem Uran umgehen mussten.

Ich muss über vieles hinweggehen, aber bitte entnehmen Sie dem nicht, daß ich mich irgendwie vor bestimmten Dingen drücken will, sondern wir haben ja dann noch Zeit zur Diskussion und zur Nachfrage, und da bitte ich, einfach ungeniert davon Gebrauch zu machen.

Welche Besonderheit haben Alpha-Strahlen? Die Alpha-Strahlen gehören zu den sog. dicht ionisierenden Strahlen, und wir müssen uns erst mal klarmachen, was da eigentlich dahintersteckt und worin der Unterschied zu den locker ionisierenden Strahlen besteht. Unter locker ionisierenden Strahlen verstehen wir Strahlenarten wie z. B. Röntgenstrahlen und Gammastrahlen, mit denen Sie wahrscheinlich aus unserem täglichen Leben schon viel vertrauter sind. Wenn wir jetzt über Quantifizierung sprechen, dann müssen wir uns über die Dosis verständigen, über die Menge der Strahlung, die wir anwenden und die auf uns einwirkt. Da ist die Grundeinheit Joule pro kg, d. h. also eine Energiemenge pro kg Materie – das ist z. B. bei Lebewesen natürlich der Körper – und diese Einheit Joule pro kg wird in der Strahlenkunde mit einem Einheiten-Namen benannt: Gray (Gy). Warum ist es sinnvoll, dass wir eine spezielle Benennung dafür haben? Das hängt damit zusammen, dass diese Energiezufuhrmenge pro kg schon biologisch relevante Effekte hervorruft. Z. B. bei 2 Joule pro kg, also bei 2 Gy müssen wir schon mit einigen Todesfällen bei den Betroffenen durch eine akute Strahlenkrankheit rechnen, wenn die Dosis den ganzen Körper gleichmäßig betroffen hat. Wir müssen das schon unterscheiden, denn 1 Joule Wärmeenergie macht 1 kg Wasser nur um etwa den 4. Teil eines 1000stel Grades wärmer. Das ist also eine sehr geringe Energiemenge, die Sie kalorimetrisch kaum nachweisen können. Aber als ionisierende Strahlung können Sie damit schon einen Menschen umbringen. Das macht es sinnvoll, für diese Energiemenge in Form ionisierter Strahlung einen eigenen

¹ Nuklearmedizin Universitätsklinikum 35033 Marburg
<http://staff-www.uni-marburg.de/~kuni/h/> horst@kuni.org

² Vortrag auf der Tagung "Uran-Waffen im Einsatz: Irak, Kosovo, ..." der ev. Akademie Müllheim an der Ruhr 22.01.00

Einheiten-Namen einzuführen, damit man gleich weiß: Hier geht's nicht um Kaffeekochen, sondern hier wird vielleicht ein Mensch gegrillt.

Was sind jetzt locker ionisierende Strahlen? Ionisierende Strahlung heißt, dass sie beim Durchgang durch Materie immer wieder Energieübertragungen bewirkt, und zwar punktuelle Energieübertragungen, die in der Lage sind, Ionisationen hervorzurufen, d. h. auch, Moleküle zu verändern und zu zerstören. Bei den meisten Defekten, über die ich heute spreche, geht es um ein spezielles Molekül, nämlich um das Erbmolekül Desoxyribonukleinsäure (DNS) im Zellkern. Hier oben sehen Sie so eine typische Ionisationsspur einer locker ionisierenden Strahlung – es könnte Röntgenstrahlung sein – und ab und zu mal gibt es eine Ionisation, dann ist hier ein etwas energieärmeres Teilchen, ein Elektron, und das macht eine etwas dichtere Ionisation. Sie sehen, dass vielleicht hier an einer Stelle das Erbmolekül getroffen wird, und das war's dann. Das ist schon schlimm genug, aber es sind eben nur vereinzelte Treffer, während bei einer dicht ionisierenden Strahlung – das könnte also jetzt ein Alpha-Teilchen oder ein Neutron sein, das hier durchmarschiert – die Energieübertragungsakte so eng beieinander liegen, dass ein solcher Erbmolekülstrang im Regelfall mehrfach getroffen wird. Die Zerstörung ist einfach größer und damit schwerer oder nur mit einer SOS-Reparatur oder gar nicht zu reparieren.

Wie sieht nun eine solche Ionisationsspur beim Alpha-Teilchen speziell aus? Da haben wir noch eine Besonderheit, die ich Ihnen hier zeigen will: Und zwar ist die Ionisationsdichte keineswegs gleichmäßig verteilt, sondern – das ist jetzt in Luft aufgenommen, da hat man ein bisschen mehr Platz zur Verfügung – Sie sehen, daß die Ionisationsdichte in Ionenpaaren pro mm Weglänge Luft um über das Doppelte zunimmt, bis das Teilchen zur Ruhe kommt. Es ist sozusagen eine Bremsspur, die immer dichter wird, ehe die Reichweite dieses Alpha-Teilchens erschöpft ist. Wenn wir das jetzt auf menschliches Gewebe übertragen, brauchen Sie diese Werte nur etwa durch Tausend zu teilen – von der Luft- zur Wasserdichte – und so sehen wir, dass so ein typisches Alpha-Teilchen im menschlichen Gewebe etwa 30 bis 40 Mikrometer weit kommt. Das entspricht dem Durchmesser von drei bis vier Zellen. Wenn also drei bis vier Zellkerne durchschlagen werden, dann ist die Energie dieses Teilchens deponiert. Wenn wir jetzt ausrechnen, wieviel Energie ein Zellkern bei einem solchen Alpha-Strahlen-Durchgang abbekommt, dann liegt diese Energie in der Größenordnung von 1 bis 2 Gray pro Zellkern.

Was Sie jetzt hier sehen, ist ein völliges Auseinanderfallen des makrodosimetrischen und mikrodosimetrischen Dosisbegriffes. Bei der Röntgenstrahlung geht es auf weiten Strecken noch Hand in Hand. Wenn Sie also einen ganzen Organismus mit Röntgenstrahlen bestrahlen mit einer hohen Dosis im Bereich von 1 bis 2 Gy, dann bekommt auch jede einzelne Zelle in diesem Organismus 1 bis 2 Gy ab. Und wenn ich das jetzt herunternehme auf – sagen wir mal – ein Zehntel, also auf 100 mGy, dann bekommt auch noch jede Zelle im Körper 100 mGy ab. Aber ich kann das nicht beliebig heruntersetzen, denn etwa unter 100 mGy fängt es dann an, sich bemerkbar zu machen, dass diese Energieübertragung nicht in einem gleichmäßigen Strom erfolgt, sondern in einzelnen punktuellen Trefferakten. Das heißt also, wenn wir uns jetzt auf die Ebene einer einzelnen Zelle herunterbegeben und in die

DNS der Zelle reinschauen, dann sehen wir, dass sich ab einer bestimmten Minimaldosis nicht mehr darum dreht, wie hoch diese Dosis ist, sondern nur darum: Hat es einen Treffer gegeben, oder nicht? Wenn es einen Treffer gegeben hat, dann ist eine bestimmte Minimalenergie – wir nennen dies in der Mikrodosimetrie spezifische Energie – übertragen worden, und diese Energie reicht in jedem Fall aus, eine Zerstörung des Moleküls an dieser Stelle zu machen, die bei locker ionisierenden Strahlen auch sehr häufig wieder ausrepariert werden kann. Bei locker ionisierenden Strahlen liegt diese spezifische Energie im Bereich von einigen Milligray. Das Besondere ist jetzt bei der dicht ionisierenden Strahlung, speziell bei der Alpha-Strahlung, daß die spezifische Energie im Bereich von Gray liegt; das heißt also, selbst eine winzige Dosis im Bereich von Picogray, Nanogray – also eine Dosis, die wir uns, bezogen auf die übliche Bezugsgröße Kilogramm, eigentlich gar nicht mehr richtig vorstellen können – macht dennoch diese riesige Strahlenbelastung in den Zellen, durch die sie hindurchgeht. Das haben wir sonst bei keiner Strahlenart, dieses Auseinanderklaffen der Makrodosimetrie und Mikrodosimetrie.

Eigentlich gilt für ionisierende Strahlung ganz allgemein, dass es auf der Ebene des Lebens und der Lebensinformation im Zellkern keine niedrigen Dosen gibt. Speziell für die Alpha-Strahlung gilt es umso mehr, weil da jeder Treffer ein Hochdosistreffer ist, der dann, wenn er den gesamten Organismus beträfe, sehr häufig zum Tode des Organismus führen würde.

Die Anwendung von Alpha-Strahlen am Menschen hat eine lange Geschichte. Unser vergangenes "strahlendes Jahrhundert" – so nenne ich es mal – begann mit der Entdeckung der Radioaktivität in Gestalt von Alpha-Strahlen. Deswegen brauchen wir uns nicht zu wundern, dass hier frühzeitig schon Alpha-Strahler eingesetzt worden sind. Es hat schon in ganz frühen Jahren erste Todesfälle gegeben durch Missbrauch von Alpha-Strahlern, hauptsächlich durch Ärzte, die ihren Patienten relativ kritiklos hauptsächlich Radium intravenös injiziert haben. Dann gab es auch Laien, die radiumhaltige Wässer in großen Mengen getrunken haben, weil sie dachten, es wäre gutes Fitness-Wasser, bis ihnen dann schließlich der Unterkiefer weggefault ist, oder sie sonst einen bösen Tod gestorben sind. Eine große Radiumserie hat ein Psychiater geliefert, der in den 30er Jahren seine Patienten grundsätzlich mit einer Radiumspritze erleuchtet hat, wenn sie in seine Praxis gekommen sind. Gegen Ende des Zweiten Weltkrieges wurden von der amerikanischen Atomenergie-Behörde mit großem Aufwand in einem wissenschaftlichen Projekt in Zusammenarbeit mit der Chicagoer Universität praktisch alle Radiumfälle, die in den USA bekannt geworden waren, gesammelt. Zum Teil wurden die Leute auch wieder exhumiert, und man hat versucht, quantitative Zusammenhänge zu finden zwischen der Radiumdosis, die diese Leute bekommen haben, und erkennbaren Gesundheitsschäden.

Eine sehr bemerkenswerte Anwendung von Radium unternahm hier in Deutschland ein Arzt namens Troch. 1940 hatte er ein Heilmittel erfunden, von dem er einfach behauptet hat, es sei ein wunderbares Heilmittel. Er hat es Petiosthor genannt, es war eine wilde Mischung von einem Isotop des Radiums (Ra-224), vermischt mit Platin und einer Art roter Tinte. Es sah sehr eindrucksvoll aus. Er hat behauptet, damit könne er vor allem die Knochentuberkulose von Kindern heilen. In dieser entsetzli-

chen Notzeit haben verzweifelte Eltern massenhaft ihre Kinder zu ihm gebracht und Kuren damit machen lassen. Das Wirken von Herrn Troch wurde erst 1952 eingestellt. Erst dann konnte der heute über 90 Jahre alte Pädiater Spieß aus München, der seine Promotionsarbeit und später seine Habilitationarbeit über die Aufdeckung dieser Fälle machte, diesem Herrn Troch das Handwerk legen. Auch von daher haben wir besonders eindrucksvolle Informationen über das, was so passiert, wenn wir solche Alpha-Strahler inkorporieren. Sie sehen hier, was passiert: Wir haben eine wilde Mischung von sog. deterministischen Strahlenschäden und stochastischen Strahlenschäden.

Ich glaube, diese Begriffe muss ich kurz erklären: Was verstehen wir unter einem deterministischen Strahlenschaden? Beim deterministischen Strahlenschaden ist die Dosis, die einwirkt, so hoch, daß Zelltötungseffekte massenhaft vorkommen, die schließlich die Funktionstüchtigkeit eines Organs oder eines Organsystems einschränken oder die Wiederherstellungsmöglichkeit eines Organsystems ersticken, so dass es dann zu Krankheitserscheinungen bis hin zum Todesfall kommt. Da ist die Schwere der Erkrankung und die Schnelligkeit, mit der sich eine solche Krankheit entwickelt, proportional zur Dosis: Je höher die Dosis ist, um so schwerer sind die Krankheitserscheinungen. Das heißt, die Dosis bestimmt die Schwere des Gesundheitsschadens. Deswegen nennen wir diese Art von Strahlenschäden deterministisch. Die kommen also im Regelfall bei locker ionisierenden Strahlen vor bei Dosen von mehreren Gray.

Davon müssen wir die sog. stochastischen Strahlenschäden unterscheiden. Die werden nach unseren heutigen molekularbiologischen Vorstellungen dadurch ausgelöst, dass durch einzelne Treffer die Erbinformation unserer Zelle so verändert wird, dass sie nicht wieder repariert werden kann oder es zu einer Fehlreparatur kommt. Wenn jetzt noch ein zusätzlicher Mechanismus dazukommt, der dafür sorgt, daß dieser winzige Schaden, der zunächst nur die Erbinformation einer einzigen Zelle trifft, sich vervielfältigt, dann wird auf diese Weise auch der Schaden so lange vervielfältigt, bis er dann schließlich Krankheitserscheinungen macht. Für die Vervielfältigungsmöglichkeit eines solchen molekularbiologischen Schadens gibt es drei grundsätzlich verschiedene Mechanismen, die wir hier berücksichtigen müssen:

Erstens: Es war eine Veränderung einer Keimbahnzelle, also des Samens oder der Eizelle, und es ist ein neues Individuum gezeugt worden mit einer DNS mit dieser entsprechenden Mutation, dann wird durch die Vervielfältigung der Zelle aus einer Eizelle zu einem 70-kg-Menschen dieser molekulare biologische Schaden x-mal vervielfältigt und ist schließlich in sämtlichen Zellen vorhanden. Je nachdem, was dieser Schaden in der Erbinformation der Zelle bewirkt hat, wird er dann eine entsprechende Veränderung des Phänotypus erzeugen können und vielleicht auch in der Folge in zwei, in drei, in vier Generationen, wo auch immer, je nachdem wie das Schicksal mit dem Zusammenspiel der Gene würfelt.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass in einer sehr frühen embryonalen Anlage eine Zelle getroffen wird, aus der sich noch größere Teile des Körpers entwickeln, z. B. eine ganze Extremität oder

ein ganzes Organsystem. Dann ist natürlich auch denkbar, dass aus einer einzigen geschädigten Zelle sich ein unmittelbar sichtbarer körperlicher Schaden entwickelt.

Die dritte Möglichkeit schließlich ist die, dass durch den Eingriff in die DNS die Umwandlung einer gutartigen Zelle zu einer bösartigen Zelle – wir nennen das maligne Transformation – befördert wird. Wahrscheinlich brauchen wir – je nach Art des Tumors – drei, vier, fünf, sechs solcher Veränderungsschritte im Erbgut der Zelle, und wir müssen heute annehmen nach allem, was wir wissen, dass eine ionisierende Strahlung grundsätzlich in der Lage ist, alle diese Schritte zu befördern, das heißt, dazu beizutragen, dass sich aus einer gutartigen Zelle eine Krebszelle entwickelt. Dadurch, dass die Zelle sich immer weiter vermehrt – das ist ja das Merkmal einer Tumorzelle –, dass sich also ein Zellklon entwickelt, der diesen Informationsschaden immer mit sich trägt und an die Tochterzellen weitergibt, kommt es dann auch schließlich zur der Vermehrung aus einem winzigen Schaden, den man vorher gar nicht sehen konnte, der sich im molekularen Bereich abgespielt hat. Es wächst dann so ein Tumor heran, der dann, je nachdem wie groß er geworden ist, wo er ist, wie schnell er wächst, wie seine Blutversorgung ist etc., früher oder später klinische Erscheinungen macht, Leidensdruck erzeugt und dann schließlich auch zum Tode führen kann.

Alle diese drei Arten, die ich jetzt aufgeführt habe, nennen wir stochastische Strahlenschäden. Die Besonderheit bei den stochastischen Strahlenschäden ist, daß wir keinen quantitativen Zusammenhang mehr feststellen können zwischen der Dosis, die hier die primäre Schädigung hervorgerufen hat, und der Schwere der Erkrankung, die hinterher ausgelöst worden ist.

Wir können also keinen quantitativen Zusammenhang mehr knüpfen zwischen der Dosis und der Erscheinung, die hinterher auftaucht. Das ist das eine. Das zweite ist, daß wir an der Erscheinung, die auftritt, an keinem spezifischen Krankheitsmerkmal erkennen können, dass sie durch Strahlung hervorgerufen worden ist. Dann kommt noch dazu, dass typischerweise natürlich auch eine größere Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt der Einwirkung an dem Erbmolekül und dem Auftauchen der Erkrankung vergeht. Im Falle von genetisch weitergegebenen Informationen können auch Generationen dazwischen liegen, und bei einer malignen Transformation kann das Jahre und Jahrzehnte dauern. Da kann also eine Einwirkung im Säuglingsalter oder pränatal sogar vor der Geburt im Mutterleib stattgefunden haben, und der bösartige Tumor oder der gutartige – es kann auch mal ein gutartiger Tumor sein, der entsteht – entsteht vielleicht erst im 80. Lebensjahr. Da sind auch beliebig lange sog. Latenzzeiten möglich, und auch das macht es zusätzlich im Einzelfall unmöglich, einer Krankheit anzusehen und zuzuordnen, welches die auslösende Ursache war. Da stehen wir also völlig blind da.

Ein Schlaglicht auf die Zusammenhänge bekommen wir nur dann, wenn wir uns ganz kurz vergegenwärtigen, was das heißt. Das ist also eine völlig neue qualitative Dimension, daß wir durch einen einzigen Eingriff auf molekularer Ebene letztendlich jemanden umbringen können. Das ist eine ganz neue Erkenntnis, verbunden auch mit der Entdeckung der DNS der Erbinformation und allem, was damit zusammenhängt.

Das heißt mit anderen Worten auch: Es gibt für diese Arten von Einwirkungen ionisierender Strahlen keine Grenzdosis, unter der wir solche Auswirkung nicht mehr zu befürchten brauchen, sondern grundsätzlich kann ein einziges Strahlenteilchen, ein einziges Strahlenquant so eine Auswirkung hervorrufen. Lediglich die Wahrscheinlichkeit, dass diese Wirkung hervorgerufen wird, ist wieder von der Dosis abhängig: Je größer die Dosis ist, umso größer wird die Wahrscheinlichkeit. Insofern müssen wir uns schon auch über die Quantitäten unterhalten, aber das Grundlegende ist erst mal und, wie ich meine, auch für die Wertung das Wesentliche, dass es sozusagen kein Ausweichen gibt außer der Null. Nur die völlige Vermeidung dieser Einwirkung bedeutet die Vermeidung dieser Gesundheitsgefährdung.

Jetzt zurück zu dieser Statistik: Da sind also Veränderungen dabei wie Knochenwachstumsstörungen, Zahnbrüche, Nierenschäden, Leberschäden, verfrüht aufgetretener Grauer Star, Katarakte (also Trübung der Augenlinse) – das sind typische deterministische Schäden. Daneben haben wir hier aber auch Leukämie, Nierenkrebs, Knochenkrebs, ganz typische stochastische Schäden, und bei diesen Kindern – das hat Herr Spies uns zusammengestellt – haben wir eine ganz ähnliche Reaktion der Häufung von Knochenkrebs in Abhängigkeit von der Zeit nach dieser Trochsen Peteosthor-Therapie. Die durchgezogene Kurve ist der gleitende Mittelwert über die Häufigkeitsverteilung der Knochenkrebsfälle bei diesen Kindern. Sie sehen hier, nach einer kurzen Latenzzeit von ein oder zwei Jahren war die Häufung schon zu sehen, und nach acht Jahren war das Maximum der Fälle erreicht. Dann schwappt die Kurve so allmählich wieder zurück, ähnlich wie wir das bei den Leukämien der Atombombenopfer von Hiroshima und Nagasaki sahen.

Was ist an den Beobachtungen mit Radium für uns interessant? Einmal ist das Radium auch ein Alpha-Strahler. Das Radium gehört chemisch zu der Reihe der sog. Erdalkalimetalle und hat sich deswegen wie das Kalzium im Körper verhalten, und auch das Uran hat neben seiner spezifischen Affinität zu bestimmten Proteinen in den Zellen als Schwermetall zusätzlich noch die Eigenschaft, daß es sich im Stoffwechsel teilweise eben auch typisch wie ein Erdalkalimetall, also wie Kalzium verhält, zwar nicht ganz so ausgeprägt wie das Radium, auch nicht so ausgeprägt wie das Plutonium, aber in Grenzen zeigt es eben auch eine Affinität zum Kalzium-Stoffwechsel, das heißt, wir brauchen uns nicht zu wundern, daß es konzentriert im Knochen eingelagert wird.

Noch ganz kurz zu anderen wichtigen von Alpha-Strahlen belasteten Menschengruppen. Da gab es die Entwicklung eines Kontrastmittels, Thorotrast, das war Thoriumdioxid. 1928 wurde es von der Firma von Heyden eingeführt zu einem Zeitpunkt, als die Toxizität von Alpha-Strahlern längst bekannt war, und wurde dann kritiklos von vielen Kollegen in der Radiologie angewendet und auch propagiert. Einer der frühesten Warner, der Gründer des Krebsforschungszentrums Heidelberg, K. H. Bauer, wurde jahrelang verlacht und verhöhnt wegen seiner Warnungen. Es hat bis 1952 gedauert, bis in Marburg und vielen anderen Kliniken, die damals auch noch den Lazarett-Status nach dem Krieg hatten, die letzten Dosen dieses Röntgenkontrastmittels angewendet worden sind. Die Wirkungen waren verheerend. Das sehen Sie hier, wenn Sie hier z. B. die Häufigkeit von bestimmten Krankheitserschei-

nungen bei Thorotrast-Patienten mit den Kontrollen vergleichen. Da sehen Sie auch wieder eine Mischung von deterministischen Veränderungen, z.B. Leberzirrhose, aber auch zahlreiche stochastische Erkrankungen: Leberkrebs, myeloproliferative Erkrankungen, dazu gehört die ganze Gruppe der Leukämien und auch Wucherungen des Bindegewebes, also Versagen bei der Blutbildung und Oste fibrosen, das Hodgkin-Lymphom, Lungenkrebs, Larynx-Krebs usw.

Eine dritte große Informationsgruppe über die Wirkung von Alpha-Strahlern sind Bergleute, die einer erhöhten Strahlenbelastung vor allem durch das radioaktive Edelgas Radon oder durch bestimmte Isotope des Radons ausgesetzt sind. Hauptsächlich handelt es sich um das Radon 222 als Folgeprodukt des Radiums und damit einer der Urenkel aus der Uran-Reihe. Hier sehen wir eine typische Abhängigkeit der Zunahme der beobachteten Lungenkrebs-Todesfälle gegenüber der normalen Todesrate in Abhängigkeit von der Lebensdosis. Mit zunehmender Lebensdosis nimmt die Sterblichkeit an Lungenkrebs deutlich zu, und was man hier auch gleich sieht, ist, dass das keineswegs in den beiden Kohorten gleich ist und sogar innerhalb der einen Kohorte inhomogen ist, und zwar sieht man hier schon deutlich einen wichtigen Effekt, den sog. inversen Dosis- und Dosis-Rateneffekt, der charakteristisch ist für dicht ionisierende Strahlen. Das heißt, dass die Beobachtungen vor allem über die Häufigkeit ausgelöster stochastischer Strahlenschäden in Abhängigkeit von einer bestimmten Dosis, die wir im Bereich relativ hoher Dosen gemacht haben, nicht unkritisch einfach heruntergerechnet werden dürfen auf den Niedrigdosis-Bereich, sondern dass im Niedrigdosis-Bereich die Krankheiten relativ häufiger auftreten.

Nach großen Auseinandersetzungen in den wissenschaftlichen Komitees ist dieser inverse Raten- und Dosis effekt im letzten BEIR-Report VI auch anerkannt worden, der noch im BEIR-Report IV bestritten worden ist. Das ist ganz wichtig, wenn es darum geht, die Beobachtung aus dem Bereich relativ hoher Radioaktivitätsdosen auf die Niedrigdosisbereiche zu übertragen. Da kann man nämlich manche Überraschung erleben, und zwar – dazu muss ich erst mal etwas weiter ausholen – hat man sich zunächst Gedanken gemacht über Schutzwerte und Schutzmaßnahmen, denn es waren ja auch Berufstätige dabei. Ich habe die Bergleute schon erwähnt, und beim Radium waren vor allem Zifferblatt-Malerinnen und in der Leuchtmittelindustrie waren Angestellte betroffen. Da hat man die Schutzwerte orientiert an der Dosis des Radiums, die man zu sich genommen hatte. In den 70er Jahren hat man sich überlegt, ob dieses Schutzsystem, bei dem man für jede einzelne Strahlenart eigene Grenzwerte definiert, beibehalten werden soll. Man hat sich dagegen entschieden. Man wollte zu einer Vereinheitlichung kommen. Das war zumindest die offizielle Begründung. Dahinter steckte die Beobachtung, dass bestimmte Strahlenarten bei gleicher Energiedosis, also bei gleicher Dosis in Gray, unterschiedliche biologische Wirksamkeiten verursachten. Das war besonders bei den Alpha-Strahlen aufgefallen. Deshalb heben wir im Strahlenschutz die dicht ionisierenden Strahlen besonders hervor. Heute wissen wir, dass sie mehr Zerstörung der DNS hervorruft. Das ist eigentlich eine relativ späte Erkenntnis. Aber es ist schon sehr frühzeitig aufgefallen, dass bei der gleichen Dosis in Gray bestimmte Strahlenarten viel schwerwiegendere biologische Wirkungen hervorrufen. Wenn ich umgekehrt prüfe, wie groß

die Dosis sein muß, um die gleiche biologische Wirkung hervorzurufen, dann brauche ich bei manchen Strahlenarten nur einen Bruchteil der Dosis, die ich z. B. mit Röntgenstrahlen brauche.

Dem hat man also, wie ich eben sagte, zunächst mal dadurch Rechnung getragen, dass man für jede Strahlenart einen eigenen Schutz- oder Grenzwert einführt. Als man das verlassen hatte, schuf man ein neues Konzept, das Konzept der sog. Äquivalentdosis oder Gleichwertigkeits-Dosis. Was steckt dahinter? Dahinter steckt, dass man die physikalische Dosis, also die Joule pro kg, (d.h. Gray) wichtet mit einem dimensionslosen Wichtungsfaktor und in eine Gleichwertigkeits-Dosis umrechnet. So kann man die Grenzwerte für Berufstätige und für die normale Bevölkerung in Einheiten dieser Äquivalentdosis definieren. Das bedeutet, wenn Sie rückwärts gehen: Sie haben einen bestimmten Grenzwert, den Sie einhalten wollen. Jetzt prüfen Sie, wie hoch darf die Dosis einer bestimmten Strahlung sein? Wie wird dieser Grenzwert eingehalten? Jetzt haben Sie eine Strahlenart wie die Alpha-Strahlen, der also eine höhere Wichtung zugeordnet ist (der derzeitige Wichtungsfaktor für die Alpha-Strahlen beträgt 20), dann bedeutet das, dass Sie den Grenzwert durch 20 dividieren müssen und dann kriegen Sie die Dosis in Gray, die nicht überschritten werden darf.

Sie sehen also, je höher dieser Wichtungsfaktor ist, umso schärfer werden die Schutzanforderungen gegenüber der physikalischen Dosis sein. Da können Sie sich vorstellen, was das in der Praxis bedeutet: Je größer dieser Wichtungsfaktor ist – in unserer jetzigen Strahlenschutz-Verordnung heißt er noch Qualitätsfaktor –, umso schärfer werden die Anforderungen in der Praxis sein. Das ist genau so, wie wenn ich den Gray-Wert senken würde. Wenn ich also einen Faktor 20 einführe, dann wäre das genauso, wie wenn ich den Grenzwert 20fach absenke. Also können Sie sich vorstellen, dass man bei der Festlegung dieser Rechenfaktoren genauso pingelig oder empfindlich gegen eine Vergrößerung dieses Faktors war, wie man Zurückhaltung bei der Senkung von Grenzwerten in den letzten Jahren und Jahrzehnten gezeigt hat.

Wenn man diese Zusammenhänge kennt, dann wird man sich natürlich fragen, wie der Zusammenhang zwischen diesen Wichtungsfaktoren und dem tatsächlichen Verhältnis der relativen biologischen Wirksamkeit, die wir beobachten, eigentlich ist. Wenn wir diese Multiplikation mit 20 durchgeführt haben, dann haben wir natürlich, weil es ein dimensionsloser Faktor ist, immer noch Joule pro kg – aber die Benennung ändert sich dann. Wir nennen die Dosis dann Sievert. Wenn Sie also etwas von Sievert hören, dann wissen Sie, dass schon mit diesem Wichtungsfaktor gerechnet worden ist. Umgekehrt, wenn Sie von der Äquivalentdosis ausgehen, dann müssen Sie, wenn Sie auf die physikalische Dosis zurück wollen, etwa durch die Zahl 20 dividieren.

Auf der physikalischen Ebene hat sich ein Wissenschaftler-Komitee, eine Arbeitsgruppe der Internationalen Strahlenschutz-Kommission, schon Mitte der 80er Jahre Gedanken darüber gemacht, wie in Abhängigkeit von der Energie der Alphateilchen – die liegt meist zwischen vier und neun Millionen Elektronenvolt – der Qualitätsfaktor eigentlich sein müsste. Die gestrichelte Kurve ist der Faktor, der allein aus physikalischen Überlegungen ausgerechnet wurde. Deswegen haben sie empfohlen, dass man im praktischen Strahlenschutz vorsichtshalber mit einem für alle Energien einheitlichen Quali-

tätsfaktor von 25 rechnen sollte. 20 ist derzeit unser Wichtungsfaktor. Vor ein paar Jahren lag er sogar nur bei 10. Das Hauptkomitee der Internationalen Strahlenschutz-Kommission hat diesen Vorschlag ihrer eigenen Wissenschaftlergruppe abgelehnt. Daran können Sie schon sehen, dass schon auf dieser rein physikalischen Ebene eine nicht unbeachtliche Diskrepanz besteht zwischen dem, was aus physikalischer Sicht als Wichtung für die mikrodosimetrischen Berechnungen eigentlich notwendig wäre und was in den gültigen Rechtsvorschriften vorgeschrieben wird, nämlich 20. Das ist, wie ich meine, ein nicht akzeptables Mißverhältnis.

Jetzt schauen wir uns dazu ein paar Untersuchungen an. Da sehen wir hier unten Chromosomen-Schäden, die Alpha-Strahler an Leberzellen machen. Das hat man verglichen mit der Wirksamkeit der Gamma-Strahlen, das sind locker ionisierende Strahlen ähnlich wie die Röntgenstrahlung. und da kamen Werte für die relative biologische Wirksamkeit von 15 - 20 heraus. Als nächstes hat man dann Untersuchungen gemacht über die (Lungen-) Krebs erzeugende Wirkung an verschiedenen Tieren. Das sind also stochastische Wirkungen im engerem Sinne. Das hat man verglichen mit der entsprechenden Einwirkung von Beta-Strahlen. Beta-Teilchen sind auch locker ionisierende Strahlen. Letztlich beruht die Wirkung von Gamma- und Röntgenstrahlen darauf, daß ihre Energie auf Elektronen, auf Beta-Teilchen also, übertragen wird. Insofern gehört das in eine große Gruppe hinein, und da sehen wir, dass Experimente Qualitätsfaktoren ergeben haben, die z.T. in der Größenordnung von 25 liegen, wie das nach den mikrodosimetrischen Überlegungen auch zu erwarten war, aber auch deutlich darüber hinausgehen, hier bis zu 58. Was man bei der Gelegenheit auch beobachtet hat, ist eine deutliche Abhängigkeit auch wieder von der Dosis: Je niedriger die Dosis und die Dosisrate waren, umso höher war die relative biologische Wirksamkeit. Aber vor allem die Dosis war hier die entscheidende Größe. Was man auch erkannt hat, ist: Je komplexer der biologische Mechanismus ist, etwa der der Krebszeugung, bei dem ja mehrere Veränderungsschritte durchlaufen werden müssen, umso höher scheint die relative biologische Wirksamkeit zu sein.

Was in dieser Tabelle nicht enthalten ist, sind neuere Befunde: Da hat man einzelne Zellen untersucht und dann wieder das Schicksal der Chromosomen beobachtet. Man hat sie sowohl mit Alpha- als auch mit Röntgenstrahlen bestrahlt und dann gesehen, dass bestimmte Strahlenschäden nach Einwirkung von Alpha-Strahlen erst nach mehreren Zellteilungen wirksam wurden. Ein Effekt, den man mit Röntgen- und Gammastrahlen so gut wie gar nicht auslösen konnte. Das heißt, wenn man hier die relative biologische Wirksamkeit ausrechnet, kommt man auf Werte von 1000 bis zu praktisch Unendlich. Da ist es natürlich sinnlos, nach den üblichen Formeln die relative biologische Wirksamkeit auszurechnen, wenn man bestimmte Wirkungen nur mit diesen dicht ionisierenden Strahlen auslösen kann.

Was will ich damit sagen? Dass es grundsätzlich – und das zeigen auch Vergleiche der Ergebnisse einzelner Fallstudien – hochproblematisch und wirklich nur für ganz grobe Kalkulationen zulässig ist, aus den Beobachtungen mit locker ionisierenden Strahlen Schlüsse zu ziehen auf die Schadens-

wartung bei dicht ionisierenden Strahlen. Da kann es höchstens mal um grobe Größenordnungen gehen.

Warum hat das so eine große Bedeutung erlangt? Die große Bedeutung der Schlussfolgerung aus Beobachtungen mit locker ionisierenden Strahlen beruht darauf, dass die wichtigste und größte Menschengruppe, bei der man quantitativ die Wirkung von locker ionisierenden Strahlen beobachten konnte, die Überlebenden von Hiroshima und Nagasaki sind, bei denen man nämlich mit einem enormen, bis heute noch nicht völlig abgeschlossenen Aufwand die Dosen auch auf individueller Ebene, sogar auf Organebene herunter ermittelt hat. Man hat hier eine Gruppe, bei der es gelungen ist, Dosis und Wirkung in einen relativ guten qualitativen Zusammenhang zu bringen. Bei vielen anderen Kohorten ist es nämlich außerordentlich schwierig, hinterher die Dosis zu rekonstruieren oder auch die echte Krankheitshäufung herauszubekommen. Denn dazu braucht man nämlich ein vergleichbar gutes Gesundheitssystem über längere Zeit und eine gute Erfassung, Dokumentation usw.. Es ist also hoch problematisch, wenn wir unsere Schlüsse aus diesen Kohorten mit Exposition durch locker ionisierende Strahlen ableiten. Das kann nicht die Wahrheit sein. Das ergibt sich aus Vielem.

Ich will jetzt einen Sprung machen und noch kurz etwas sagen zu Erfahrungen im Niedrigdosis-Bereich, z. B. über die Abhängigkeit der Häufigkeit von Leukämie von der Einwirkung von Alpha-Strahlern. Das sind amerikanische Untersuchungen zum Radiumgehalt des Trinkwassers. Möglicherweise war da auch noch Uran drin, aber das Radium-226 ist messtechnisch besonders leicht nachzuweisen, und dafür gibt es inzwischen in Amerika auch einen Grenzwert. In Deutschland gibt es so etwas nicht. Und zwar liegt der Grenzwert bei 185 Millibecquerel pro Liter für Radium-226. Sie sehen, in den Regionen, in denen die Zahl von Brunnen zugenommen hat, die diesen Grenzwert überschritten haben, hat man auch häufiger Leukämien festgestellt, sowohl bei Erwachsenen als auch bei Kindern.

Wir selbst haben auch solche Untersuchungen in der Umgebung einer Uranverarbeitungsanlage in Ellweiler gemacht und haben dabei nachweisen können, dass die Häufigkeit kindlicher Leukämien in Abhängigkeit von der Belastung des Trinkwassers mit Radium zunimmt (s. Abb. 1). Es war damals so, dass das abfließende Wasser aus einer Uranhalde schließlich in das Trinkwassersystem der amerikanischen Garnison gekommen ist, und die amerikanische Garnison hatte einige deutsche Orte, die damals noch keine guten Tiefbrunnen hatten, damit beliefert. Ausgerechnet in den Orten, die dieses Oberflächenwasser mit Radium-Verseuchung fast lupenrein bekommen hatten, fanden wir die meisten kindlichen Leukämien.

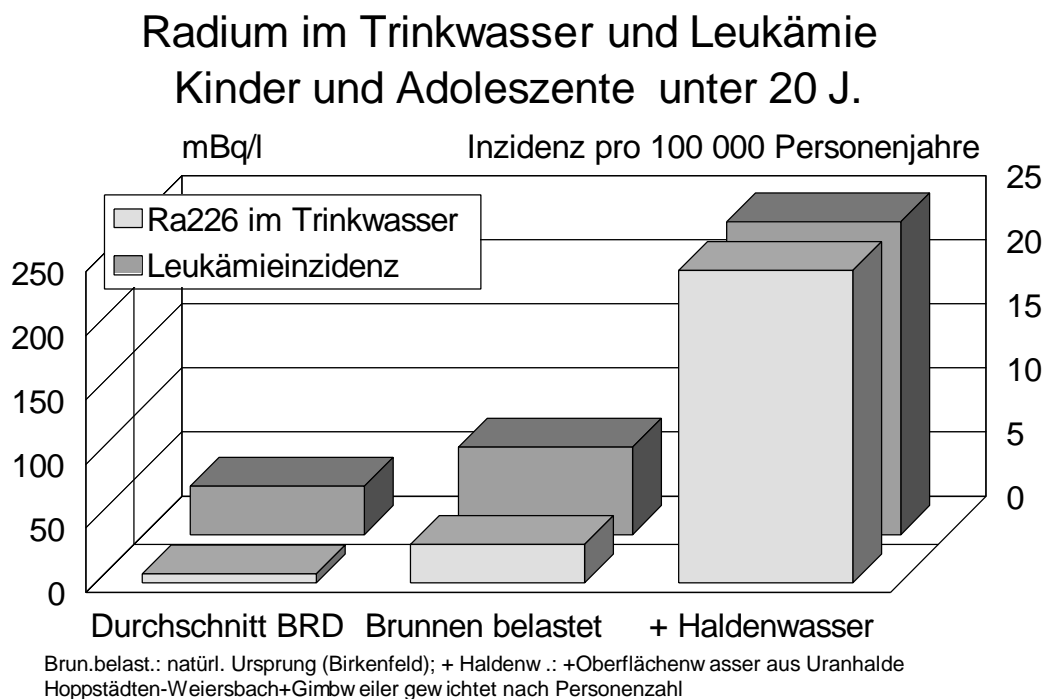


Abb. 1: Radium im Trinkwasser und Leukämie von Kindern und Adoleszenten unter 20 Jahren in der Umgebung der Uranaufarbeitungsanlage Ellweiler

Wir haben auch eine andere Statistik, auch wieder Gesundheitsschäden in Abhängigkeit vom Radium im Trinkwasser. Hier ist einfach die mittlere Aktivität des Trinkwassers gewertet worden, und da sehen Sie, dass Lungenkrebs, Blasenkrebs und Brustkrebs deutlich mit zunehmender Radioaktivität im Trinkwasser gehäuft auftreten.

Bei diesen Untersuchungen wird immer wieder bestritten, dass das etwas mit der Radioaktivität zu tun hat, weil die Übertragungen der Beobachtungen aus den hochdosis-belasteten Gruppen, von denen ich vorhin referiert habe, und auch der Atombombenopfer, damit nicht zusammenpasst. Da klafft noch eine Lücke. Ich meine aber, daß es genügend Gründe gibt, die diese Lücke ziemlich weitgehend geschlossen haben.

Abschließend noch etwas zur chemischen Wirkung des Urans als Schwermetall. Wir haben schon gehört, dass es sich in den Nieren anreichert. Ich habe hier eine Verlaufskurve eines Mitarbeiters einer Brennelemente-Fabrik, der über die Atemluft ständig Uran aufgenommen hat. Erst später wurde festgestellt, dass dabei die Grenzwerte wahnsinnig überschritten worden sind, aber da war es zu spät. Ich habe dann rückwärts ausgerechnet, wie groß der Gehalt an Uran in Milligramm war und habe das der Menge gegenübergestellt, die aufgrund von Menschenversuchen in den USA als noch gerade

hinnehmbar für die Niere deklariert worden ist. Es sind 0,9 Milligramm Uran-Gehalt in der Niere für den Norm-Menschen.

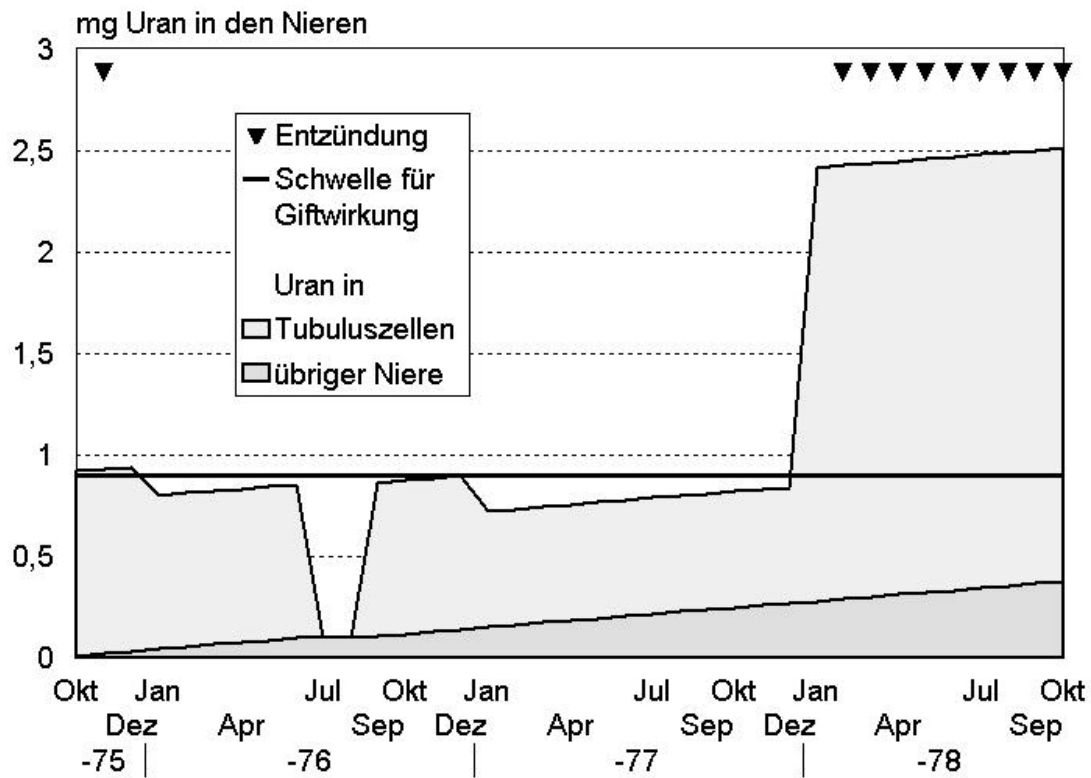


Abb. 2: Nierenschädigung nach Inkorporation von Uran

Sie sehen jedes Mal dann, wenn der toxische Wert überschritten worden ist – also der scheint ganz gut zu stimmen – dann sind deutliche Entzündungserscheinungen aufgetreten (s. Abb. 2). Hier, Juli 76, wurde er vorübergehend mal vom Arzt aus dem Kontrollbereich herausgenommen und dann wieder eingesetzt. Ab hier nahm dann die Belastung zu, und dann kam er aus den Entzündungserscheinungen nicht mehr heraus. Dieser Mensch hatte außerdem inhalativ noch Thorium-Belastungen, die auch nicht unerheblich waren. Seine Lebensdosis ist nach der heutigen Strahlenschutzverordnung nach konventioneller Berechnung um etwa das Sechsfache überschritten worden. Er ist inzwischen an drei Krebserkrankungen – Nierenkrebs, anschließend Kehlkopfkrebs und dann Lungenkrebs – verstorben.

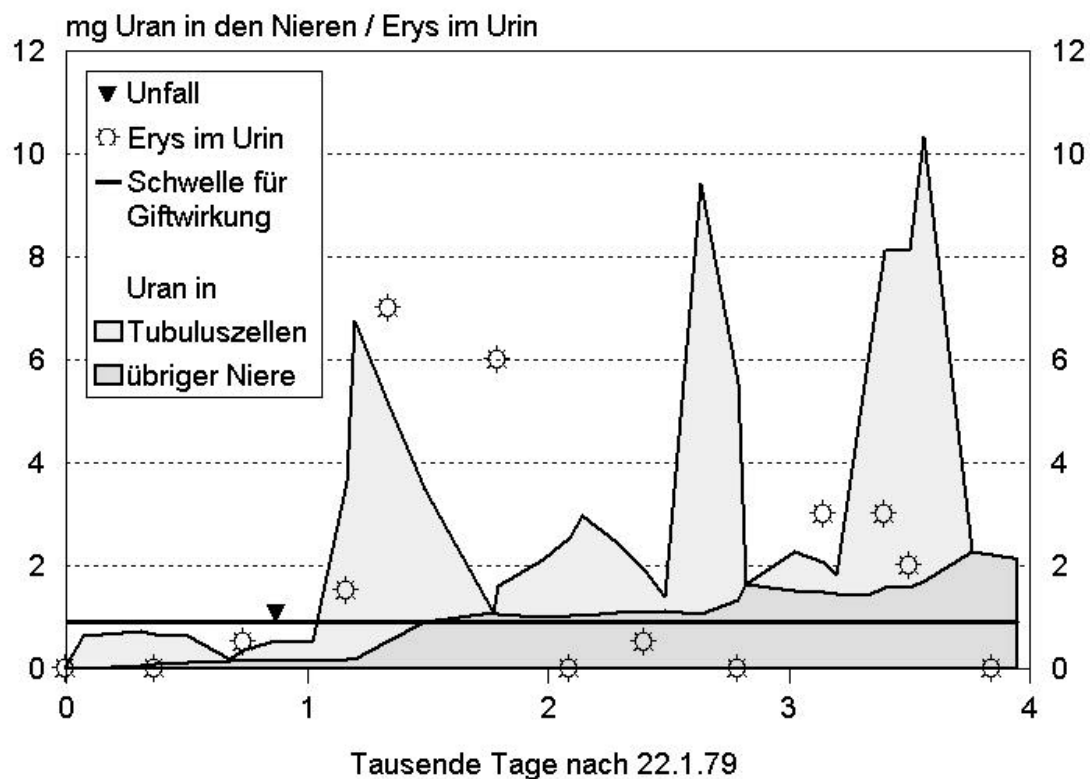


Abb. 3: Nierenschädigung nach Inkorporation von abgereichertem Uran

Nun noch eine zweite Beobachtung bei einem Beschäftigten, der hauptsächlich abgereichertes Uran zu verarbeiten hatte, also Uran in der Form, wie es auch für die hier diskutierten Waffen verwendet wird. Er hatte einen Unfall erlitten, bei dem ihm ein Splitter des Metalls durch die Haut in die Weichteile des Armes eingedrungen war. Es war chirurgisch versucht worden, möglichst den gesamten Fremdkörper wieder zu entfernen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausscheidung von Erythrozyten (rote Blutkörperchen) im Urin zunahm, wenn er besonders stark mit dem Gift belastet worden war (s. Abb. 3).

Nun möchte ich noch etwas zu den Nachuntersuchungen von Kombattanten des Golfkrieges sagen. Und zwar sind 33 Soldaten nachuntersucht worden, die verwundet wurden und Krankheitserscheinungen wie Verbrennungen, Amputationen usw. hatten. 23 hatten angegeben, sie hätten eine Verwundung durch Granatsplitter gehabt, wobei der Verdacht bestand, dass es uranhaltige Granatsplitter waren [Hooper, F.J., Squibb, K.S., Siegel, E.L., McPhaul, K., Keogh, J.P.: Elevated urine uranium excretion by soldiers with retained uranium shrapnel, *Health Phys.* 77(5): 512-519; 1999]. Bei 15 von ihnen ist tatsächlich durch Röntgenaufnahmen der Beweis gelungen, dass noch Splitter vorhanden

waren. Bei 8 waren keine nachzuweisen. Zwei davon – das finde ich einen hohen Anteil von den 15 – haben die Tatsache, dass sie Splitter neben den sichtbaren Verletzungen abbekommen hatten, nicht bemerkt. Sie waren also völlig überrascht davon, dass sie z. T. von kleinsten Uranpartikeln in den Weichteilen übersät waren. Ich bin kein Militärmediziner. Ich weiß aber aus Erfahrung, dass es immer mal wieder vorkommt, dass wir jemanden aus dem 2. Weltkrieg haben, bei dem wir Splitter feststellen, die der Betroffene das gar nicht bemerkt hat. Es kann schon sein, dass man im Schock der Verletzung eine solche Splitterverletzung nicht bemerkt, und wenn man wieder drüber nachdenken kann, wie es einem geht, dann ist die Haut schon längst über der Eintrittsstelle vernarbt, so dass man das nicht mehr sieht, vor allem am Rücken oder Stellen, die dem direkten Blick nicht so zugänglich sind. Aber ich finde, das ist schon eine beachtliche Zahl: 2 von 15, die das nicht wussten. Da muss man sich natürlich überlegen, ob das nicht auch eine Folge der besonders hohen Dichte dieser Uransplitter ist, so dass sie auch als kleinste Splitter noch durch die Haut penetrieren können, ohne eine größere Verwundung zu hinterlassen, und dann in der Muskulatur stecken bleiben.

Wie ging es den Leuten dadurch? Das ist eine Nachuntersuchung drei Jahre nach dem Golfkrieg. Da haben wir eine ganze Reihe Befunde, die deutliche Erhöhungen zeigen, die allerdings bis auf eine Ausnahme nicht signifikant, aber doch auffällig sind. Durchgängig sind das Merkmale, die auf eine Einwirkung z.T. auf die Muskulatur, z.T. auf die Niere schließen lassen (s. Abb. 4).

3 Jahre nach Golfkrieg (2/91)

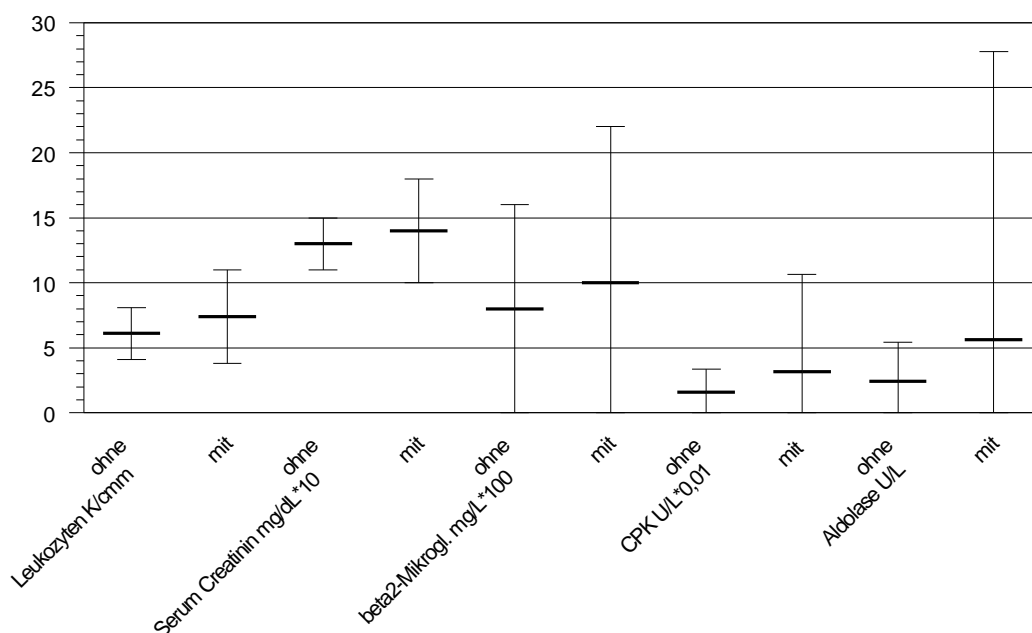
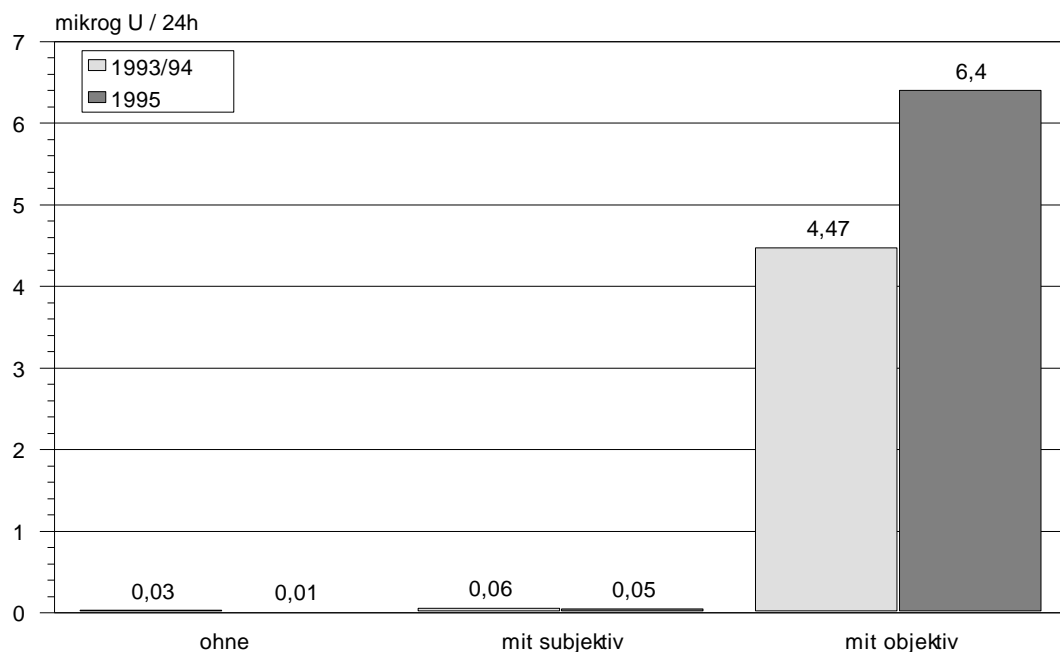


Abb. 4: Einige klinisch-chemische Parameter nach Verletzung durch Splitter mit abgereichertem Uran drei Jahre nach dem Golfkrieg

Die Erhöhung der Konzentration der Leukozyten – das sind die weißen Blutkörperchen, die Blutpolizei sozusagen – war nach statistischen Kriterien signifikant. Diejenigen, die Splitter hatten, hatten ein signifikant höheres Niveau, jedoch zum größten Teil noch innerhalb des Normbereiches, und eine größere Spanne, wie Sie hier sehen. Das heißt also, wir müssen davon ausgehen, dass das Persistieren von solchen Fremdkörpern grundsätzlich auch dazu führt, dass sich Infektionen gehäuft abspielen oder zu mindestens solche Reaktionen ausgelöst werden wie eine Vermehrung der Leukozyten.

Dann haben wir hier Merkmale wie Serum-Kreatinin, Beta2-Mikroglobulin-Ausscheidung im Urin, das sind Hinweise auf Schädigungen der Nieren, und die CPK und Aldolase, das sind zwei Enzyme, die Hinweise geben auf schädigende Einflüsse auf die Muskeln. Die waren auch tendenziell höher im Mittelwert. Vor allem waren da auch einzelne Ausreißer mit sehr hohen, eindeutig pathologischen Werten.

Nach Einsatz im Golfkrieg 2/91



Hooper et al. Helath Phys. 77, 1999, 512-519

Abb. 5: Urinausscheidung von Uran nach Verletzung mit Splittern abgereicherten Urans

Das Wesentliche ist, dass man festgestellt hat, dass diese Leute erheblich Uran ausgeschieden haben. Das ist auch leicht erklärlich, weil Uran als reines Metall offensichtlich soweit angelöst wird und

sich auch an der Oberfläche ständig zersetzt, dass Uran in das System des Körpers übertritt und dann am Stoffwechsel teilnimmt. Die Ausscheidungswerte waren im Durchschnitt etwa 3 Mikrogramm pro Tag.

Nach 6 Jahren wurden sie noch mal nachuntersucht. Inzwischen waren die Werte fast aufs Doppelte angestiegen. Es findet also eine ständige Mobilisierung des Urans statt.

Das waren ein paar Informationen im Schnelldurchgang.

Jetzt am Schluß will ich mich einer Wertung natürlich nicht entziehen. Diese Wertung bereitet mir große Bauchschmerzen, muss ich dazu sagen, weil ich zu denen gehöre, die es schon schrecklich finden, wenn jemand einen anderen nach der klassischen Methode von Kain und Abel umbringt.

Ich kann auch einem konventionellen Krieg mit herkömmlichen Waffen nichts abgewinnen, und ich finde ihn schon schrecklich. Im Prinzip ist es letztlich egal, ob ich jemanden ersteche oder erschieße – tot ist er allemal. Also insofern fällt es mir furchtbar schwer, jetzt noch eine graduelle Abstufung zu machen. Ich weiß aber aus meiner Auseinandersetzung mit Ärzten, die z. B. etwas gegen Atomkriege, aber nichts gegen andere Kriege haben, dass es Leute gibt, die sich bemühen, in ihrer ethischen Wertung noch Merkmale für Abstufungen zu finden, warum man also besondere Waffen vielleicht doch noch mehr ächten soll als andere oder überhaupt ächten soll, denn die anderen seien gute Waffen, so dass es vielleicht einen Unterschied gibt zu den schlechten Waffen. Also, es fällt mir schwer, da Kriterien zu finden.

Aber ein wichtiges Kriterium – meine ich – ist doch da: Das hat sich auch ergeben aus der Diskussion mit vielen, die beruflich mit Strahlung belastet worden sind. Leute, auch Angehörige eines Risikobereiches wie z.B. Polizisten, haben plötzlich wahrgenommen: Ich war hier einer Strahlung ausgesetzt, die ich eigentlich gar nicht wollte. Ich wollte gar nicht beruflich mit Strahlung zu tun haben. Da haben alle Leute gesagt: "Was willst du eigentlich, du bist doch angetreten in einem Beruf, in dem man mit Körperverletzung und Tod rechnen muss!"

Oder Piloten, die ein Lebensrisiko haben, das nach konventioneller Berechnung der fünf- bis zehnfachen Strahlenbelastung eines Atomkraftwerk-Arbeiters entspricht. Was also ist das Schreckliche an der Strahlenbelastung? Das ist doch etwas, das manche Berufe ohne weiteres täglich auf sich nehmen, die also eine durchschnittlich zehnfach höhere Gefährdung haben. Aber wenn jetzt so jemand, der meinetwegen in einem gefährlichen Beruf arbeitet, der z.B. Sprengmeister ist oder irgendwo unter Tag gearbeitet hat, nach Hause kommt oder pensioniert wird. Dann kann er sagen: So, jetzt ist Feierabend, jetzt kann ich mich ausruhen, jetzt kann ich mich entspannen, jetzt ist die Gefahr vorbei, jetzt kann keine Bombe mehr explodieren, jetzt kann mir kein Gebälk mehr auf den Kopf fallen, jetzt kann ich nicht mehr verschüttet werden.

Aber jemand, der schon beruflich mit einer nennenswerten Strahlendosis belastet worden ist, der hat sozusagen diese Bombe noch im Körper. Das ist eine Art Mine, die er mit sich herumträgt, denn solange er lebt, kann eine stochastische Krankheit ausbrechen.

Das ist eine Bedrohung, die immer vorhanden ist, die sogar zunimmt, weil wir heute wissen, dass das Ausmaß der Gesundheitsgefährdung mit der spontanen Krebsgefährdung zunimmt, und die nimmt nun mal für viele Krebse mit dem laufenden Alter zu. Jetzt stellen Sie sich vor, jetzt hat noch jemand Radioaktivität im Körper. Dann haben Sie die Potenzierung dieser Zeitbombe: Sie haben einmal eine Strahlenbelastung, und die Strahlenbelastung hält auch noch ständig an. Der Bedrohung, die mit dieser Strahlenbelastung zusammenhängt, kann er sich nicht mehr entziehen. Er muss sich auch überlegen, dass, wenn er Kinder zeugt, er das auch an die junge Generation weitergibt. Auch das belastet viele Menschen. Viele Menschen nehmen bewusst Gefahren auf sich und sagen: "Also gut, ich mache das, den Jungen soll's mal besser gehen; die sollen's mal besser haben durch meine Arbeit, durch die Gefahren, die ich auf mich genommen habe." Aber jetzt hat er die Hypothek im Nacken, dass er gerade durch seine Arbeit, durch seine Tätigkeit praktisch noch Gesundheitsgefährdungen an die Folgegeneration weitergibt. Das gilt auch für die, die vielleicht Berufssoldaten sind. Gerade in der amerikanischen Armee sind es ja im Regelfall Berufssoldaten. Sie übernehmen ein Risiko eben nicht nur für sich.

Also, hier sehe ich schon einen qualitativen Unterschied zwischen dem Umgang mit konventionellen und radioaktiven Waffen, natürlich erst recht für die Bevölkerung. Für die Bevölkerung ist ja doch ein Krieg schon schlimm genug. Dass die Kriege heute mehr denn je auf dem Rücken der Zivilbevölkerung ausgetragen werden, ist auch ein Grund, warum viele Menschen grundsätzlich gegen Krieg als Form der Auseinandersetzung zwischen den Staaten sind. Jetzt ist es so, wenn der Krieg zu Ende ist, sind seine Nachwirkungen eben noch lange nicht zu Ende. Man könnte sagen: Ja gut, dann müssen wir eben die sozialen Folgen tragen helfen, muss aufgeräumt werden, wiederaufgebaut werden, das kann man ja machen. Aber bei so etwas wie langlebiger Radioaktivität, da wird sich die Hauptgefahr erst in Generationen auswirken, denn das Uran wird erst zunehmend mobilisiert. Das wird erst zunehmend in den Stoffwechsel der Biosphäre einmünden und dann in die Körper zurückkommen. Das heißt also, die Kollektivdosis in den Regionen, wo das Uran ausgebreitet ist, wird erst mit der Zeit noch wachsen. Das ist schon eine Hypothek, wenn ein Streit, den zwei haben, die Nachkommen auf Tausende von Jahren belastet, so wie das ja auch für Atomwaffenversuche gilt und gegolten hat.

Ich bedanke mich für Ihre Geduld.