

Bachelorarbeit

**Atomenergie – Auswirkungen auf den  
menschlichen Körper mit Hauptaugenmerk auf  
die Schilddrüse**

**Lehrveranstaltung**

Physiologie

**Begutachterin**

Ao. Univ.- Prof. Dr. phil. Anna Gries

Institut für Physiologie

Harrachgasse 21/V, 8010 Graz

**Eingereicht von**

Julia Kopanz

geboren am 02. Juni 1992

Graz, 2013

### **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe, andere als die angegebenen Quellen nicht verwendet habe und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Weiters erkläre ich, dass ich diese Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt habe.

Erscheinungsjahr: 2013

Julia Kopanz

## **Kurzzusammenfassung**

Die Reaktorkatastrophen in Fukushima und Tschernobyl haben die Welt geschockt und die hohen Schilddrüsenkrebsraten bestätigen Meinungen zahlreicher Experten/innen. Die Auswirkungen von Atomenergie auf den menschlichen Körper, und gerade auf die Schilddrüse, sind enorm. Die Schilddrüse ist ein sehr strahlenempfindliches Organ und reagiert bereits bei der kleinsten Dosis. Positiv gesehen, ergeben sich dadurch gute Möglichkeiten zur Therapie und Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen. Vor allem Szintigraphie und Radiojodtherapie sind hier zwei wesentliche Komponenten. Negativ gesehen können radioaktive Substanzen Funktionsstörungen der Schilddrüse auslösen. Häufig kommt es zum Auftreten von Hyperthyreose, Hypothyreose und Struma. In den schlimmsten Fällen entwickelt sich ein Schilddrüsenkarzinom. Festzustellen ist, dass insbesondere Kinder und Jugendliche immer öfter betroffen sind. Forschung auf diesem Gebiet existiert zwar, bedarf jedoch weiterer expliziter Untersuchungen.

## **Abstract**

The reactor disasters of Fukushima and Tschernobyl shocked the whole world and the high incidence of thyroid cancer has confirmed the expectations of many experts. Nuclear energy has an extensive effect on the human body, particularly on the thyroid gland. It is a highly radiation-sensitive organ which already reacts at minimal dose. On the positive side, this offers good opportunities for the therapy and the diagnosis of thyroid diseases. Scintigraphy and radioiodine therapy in particular are two basic therapeutic and diagnostic components. On the negative side, radioactive substances are able to cause a functional disorder of the thyroid gland. Common disorders are hyperthyreosis, hypothyreosis and struma. The development of a thyroid cancer represents the worst case. It could be observed that especially children and adolescents are more and more affected by cancer. Research in regard to this topic already exists but needs further explicit analysis.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Atomenergie</b> .....	<b>7</b>
2.1	Von den Anfängen bis heute .....	7
2.2	Physikalische Grundlagen .....	7
2.2.1	Aufbau des Atoms.....	7
2.2.2	Wesen der Radioaktivität.....	8
<b>3</b>	<b>Atomenergie und die Folgen für den Menschen</b> .....	<b>9</b>
3.1	Verschiedene Strahlungsarten und deren Auswirkungen auf das Individuum .....	9
3.2	Strahlendosis .....	9
3.3	Biologische Wirkung der Strahlung .....	10
3.3.1	Wirkungswege.....	10
3.3.2	Strahlungswirkung .....	11
3.3.3	Strahlungsrisiko.....	12
3.4	Reaktorkatastrophen und deren Folgen .....	13
3.4.1	Reaktorunfall in Tschernobyl .....	13
3.4.2	Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl .....	14
3.4.3	Reaktorunglück in Fukushima.....	17
3.4.4	Gesundheitliche Folgen von Fukushima.....	18
<b>4</b>	<b>Schilddrüse</b> .....	<b>20</b>
4.1	Anatomie der Schilddrüse .....	21
4.2	Physiologie der Schilddrüse.....	22
4.2.1	Schilddrüsenhormone.....	22
4.2.2	Hypothalamus-Hypophysen-Regelkreis .....	23
4.2.3	Jod .....	24
4.3	Diagnostik bei Schilddrüsenerkrankungen.....	26
4.3.1	Anamnese und körperliche Untersuchung.....	26
4.3.2	Labordiagnostik.....	27
4.3.3	Sonographie .....	28
4.3.4	Szintigraphie.....	29
4.3.5	Feinnadelpunktion.....	30
4.4	Erkrankungen und Therapie der Schilddrüse .....	30

4.4.1	Hyperthyreose.....	30
4.4.2	Hypothyreose.....	31
4.4.3	Struma .....	32
4.4.4	Schilddrüsenentzündung (Thyreoiditis).....	33
4.4.5	Schilddrüsentumore.....	33
<b>5</b>	<b>Auswirkungen radioaktiver Substanzen auf die Schilddrüse .....</b>	<b>35</b>
5.1	Negative Auswirkung .....	35
5.2	Positive Auswirkung.....	39
5.2.1	Szintigraphie.....	39
5.2.2	Radiojodtherapie .....	39
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung und Diskussion.....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Literaturangaben.....</b>	<b>42</b>

## 1 Einleitung

Die Atomenergie zählt zu den aktuellsten Themen der Gegenwart. Kein Tag vergeht, an dem man nicht in den Medien damit konfrontiert wird: „Iran will Schwerreaktor Arak weiterbauen“, „Nuklearchemiker bewertet Fukushima nicht schlimmer als Tschernobyl“, etc. (Der Standard 2013). Die gesundheitlichen Auswirkungen von radioaktiven Substanzen werden dabei oft verheimlicht, unterschätzt oder vergessen. Welche Rolle dabei die Schilddrüse einnimmt, ist stark umstritten.

Die Schilddrüse ist ein kleines, auf den ersten Blick unscheinbares Organ. Beschäftigt man sich näher damit, wird man schnell feststellen, dass die Schilddrüse lebensnotwendig ist. Die Inzidenz der Schilddrüsenerkrankungen, vor allem der Schilddrüsenkarzinome in Österreich (Statistik Austria), ist stark steigend. Des Weiteren ist festzustellen, dass vor allem Kinder und Jugendliche immer öfter erkranken.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die atomaren Hintergründe und Ursachen dieser erhöhten Inzidenzen der Schilddrüsenerkrankungen genauer zu beleuchten. Dafür werden in den ersten beiden Teilen Hintergrundinformationen bezüglich der Atomenergie und der Schilddrüse geliefert, um die Zusammenhänge besser zu verstehen. Der letzte Abschnitt beinhaltet die Klärung der Frage, ob radioaktive Substanzen eine Auswirkung auf die Schilddrüse haben und wenn ja, welche.

Die Forschungsfrage, welche in dieser Arbeit behandelt wird, lautet:

„Welche positiven und negativen Auswirkungen haben radioaktive Substanzen auf die Schilddrüse?“

## **2 Atomenergie**

### **2.1 Von den Anfängen bis heute**

Die Entdeckung der Radioaktivität hat ihren Ursprung im Jahre 1896 unter Henri Becquerel. Fortan beschäftigten sich weitere Wissenschaftler/innen, im Besonderen Marie und Pierre Curie, mit den Phänomenen der radioaktiven Strahlung. Nach jahrzehntelanger Forschung kam es 1938 zum Nachweis der ersten Kernspaltung. Den Chemikern Hahn und Straßmann gelang es erstmals, Neutronen auf Urankerne zu schießen und folgend die Spaltprodukte festzuhalten. Der Grundstein für die Kernenergie und die Atombombe war dadurch gelegt (Neles 2012, Seiten 2-3). Im Jahre 1953 kam es zu ersten öffentlichen Diskussionen über die Gefahren der friedlichen Atomenergienutzung (Laufs 2013, Seite 46). Der US-Präsident Eisenhower bestärkte in seiner Rede „Atoms for Peace“ die Wichtigkeit einer friedlichen Nutzung der Atomenergie. Er appellierte an die Notwendigkeit einer internationalen Atomenergiebehörde, da das Interesse, eine Atommacht zu werden, in vielen Ländern immer mehr anstieg und das Risiko einer militärischen Nutzung von Atomenergie bestand. Im Jahre 1957 kam es folglich zur Gründung der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) und der europäischen Atombehörde EURATOM (Neles 2012, Seiten 3-4). Zahlreiche Anti-Atomkraft-Bewegungen entwickelten sich in den 1970er-Jahren (Neles 2012, Seiten 4-5). Deren Kritik wurde bereits 1979 Wirklichkeit. In Three Mile Island in Harrisburg in den USA ereignete sich ein Reaktorunfall, im Jahre 1986 kam es in Tschernobyl zu einer Nuklearkatastrophe und 2011 geschah in Fukushima ein Reaktorunglück (Neles 2012, Seite 4). Heute sind laut der Internationalen Atomenergiebehörde Wien (2013) weltweit 434 Reaktoren in Betrieb, 1 Reaktor ist in der Langzeit-Abschaltung, 69 Reaktoren befinden sich im Bau und 147 Reaktoren wurden dauerhaft geschlossen. Dabei sind 329 Kernreaktoren in den OECD Ländern in Betrieb (OECD France 2013).

### **2.2 Physikalische Grundlagen**

#### **2.2.1 Aufbau des Atoms**

Die Materie besteht aus Atomen, welche wiederum aus Protonen, Neutronen und Elektronen bestehen. Atome verhalten sich nach außen elektrisch neutral und besitzen einen Durchmesser von  $10^{-10}$  Meter (Pistner 2012, Seiten 22-23). Sie haben eine Elektronenhülle und einen positiv geladenen Kern, welcher einen Durchmesser von  $10^{-14}$  Meter aufweist. Die positive

Kernladung wird durch die negative Ladung der Elektronen ausgeglichen. Die Atomkerne bestehen aus den positiv geladenen Protonen und den ungeladenen Neutronen, welche beide als Nukleonen tituliert sind (Stolz 2005, Seite 9). Atomkerne können in der Zahl der Protonen und der Neutronen, sprich ihrer Massenzahl, variieren. „Atome, die dieselbe Anzahl an Protonen, aber unterschiedlich viele Neutronen besitzen, werden als Isotope eines Elements bezeichnet. Atomkerne mit einer bestimmten Massen- und Kernladungszahl wiederum werden als Nuklide bezeichnet“ (Pistner 2012, Seite 24). In der Natur entsteht radioaktive Strahlung hauptsächlich bei Umwandlungen von Atomkernen. Hierbei handelt es sich um den radioaktiven Zerfall, bei welchem der Alpha-, Beta- und Gammazerfall die wichtigsten Komponenten darstellen (Pistner 2012, Seite 24).

### **2.2.2 Wesen der Radioaktivität**

Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt, entsteht bei der Umwandlung von Atomkernen radioaktive Strahlung. Die Umwandlung erfolgt spontan bei instabilen Atomkernen unter Energieabgabe. Dadurch entsteht ein stabiles Nuklid, wobei der Übergang über mehrere Abschnitte verlaufen kann. Dieser Vorgang geschieht durch die Abgabe von Energie in Form von ionisierender Strahlung. Über die Stabilität bzw. Instabilität eines Nuklids entscheidet das Verhältnis zwischen Neutronen- und Protonenzahl im Atomkern (Stolz 2005, Seite 19).

Der Zerfall von instabilen Kernen erfolgt über mehrere Abschnitte. Hierbei lässt sich der Zeitpunkt des Zerfalls für einen einzelnen Atomkern nicht bestimmen. Es ist jedoch möglich, für eine größere Anzahl radioaktiver Kerne die Zeit festzulegen, zu der die Hälfte der Kerne zerfallen wird. Angegeben wird diese Zeit mit Hilfe der Halbwertszeit, wobei die Hälfte der am Anfang bestehenden Atome in dieser Zeit zerfällt. In einer weiteren Halbwertszeit zerfällt wiederum der halbe Teil der noch existierenden Atome, d.h. nach zwei Halbwertszeiten ist noch ein Viertel der vorhandenen Menge gegeben. Zuzufolge kommt es auch zu einer Reduktion der abgegebenen Energie (Küppers 2012, Seiten 42-43).

Die Umwandlungsrate, oder auch Aktivität genannt, bestimmt die Anzahl der Atomkerne, bei welchen in einer bestimmten Zeit eine Umwandlung geschieht. Sie gilt als Maß für die Radioaktivität und wird in der Einheit Becquerel (Bq) angeführt. Ein Becquerel steht für den Zerfall eines Kerns pro Sekunde (Küppers 2012, Seite 42; Stolz 2005, Seite 22).

### 3 Atomenergie und die Folgen für den Menschen

#### 3.1 Verschiedene Strahlungsarten und deren Auswirkungen auf das Individuum

Beim radioaktiven Zerfall kommt es zur Abgabe von Energie in Form von Strahlung. Hierbei lassen sich verschiedene Arten von Strahlung unterscheiden (Küppers 2012, Seite 44):

- Die **Alpha-Strahlung** wirkt nur in geringer Entfernung. Bereits ein Blatt Papier kann als gute Abschirmung dienen. Kommt es zum äußeren Einwirken der Strahlung auf den Menschen, wird die Energie in der Hornhaut abgegeben. Da die Hornhaut ein totes Gewebe ist und auf Strahlen unempfindlich reagiert, führt die Strahlung zu keinen Problemen. Anders verhält es sich jedoch bei der direkten Aufnahme der Alpha-Strahlen in den Körper. Dies geschieht beispielsweise über die Atemwege, die Nahrung oder Wunden. Hierbei kann die Strahlung sehr wirksam werden, weil sie ohne Umwege auf lebendes Zellgewebe stößt (Küppers 2012, Seite 46).
- Die **Beta-Strahlung** durchdringt den menschlichen Körper beliebig. Der Einflussbereich der Beta-Strahlung beträgt in der Luft einige Meter. Ein Durchdringen der Hornhaut ist bei hoher Energie möglich und Beta-Strahlung wird somit bereits durch äußere Einwirkung im Menschen wirksam. Die Strahlung kann durch wenige Millimeter dünne Schichten von Metall oder Beton abgeschirmt werden (Küppers 2012, Seiten 47-48).
- Die **Gamma-Strahlung** hat in der Luft eine Reichweite von einigen hundert Metern. Es ist möglich, dass sie den Körper des Menschen durchdringt und einen Teil der Energie ausstrahlt. Dicke Betonwände oder Wasserschichten würden die Strahlung abschirmen. Von Bedeutung ist dabei die Stärke der Strahlung. Sie gibt Auskunft darüber, welchem Maß die Dicke entsprechen muss, um Mensch und Umwelt vor der Strahlung zu bewahren (Küppers 2012, Seite 49).

#### 3.2 Strahlendosis

„Kein Ding ist ohn‘ Gift.  
Allein die Dosis macht,  
ob ein Stoff ein Gift sei.“

(Paracelsus 1493-1541, zitiert in Buttlar & Roth 1990, Seite V)

„Die Strahlung, die von radioaktiven Stoffen ausgeht, ist sehr energiereich. Von dieser Energie hängt die biologische Wirkung der Strahlung auf den Menschen ab. Die Menge der radioaktiven Strahlung, der ein Mensch ausgesetzt ist, wird als Exposition bezeichnet“ (Küppers 2012, Seite 51).

Die International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) hat bereits 1971 und 1980 Messgrößen für die Strahlung bestimmt (Fritz-Niggli 1991, Seite 47):

- Gray (Gy) für Energie, Energiedosis
- Röntgen für Ionendosis
- Sievert (Sv) für Äquivalentdosis und Äquivalentdosis-Index
- Becquerel (Bq) für Aktivität

### **3.3 Biologische Wirkung der Strahlung**

#### **3.3.1 Wirkungswege**

Hat radioaktive Strahlung eine Wirkung auf den menschlichen Körper, so handelt es sich entweder um äußere oder innere Strahlenexposition, d.h. entweder gelangt Strahlung von außen oder direkt in den Körper hinein (Stolz 2005, Seite 187). Bei der äußeren Einwirkung von Strahlung, beispielsweise in verseuchten Gebieten, ist es entscheidend, wie lange der Aufenthalt an diesem Ort andauert. Durch die Dauer des Aufenthalts lässt sich die Dosis bestimmen. Die Messung geschieht mit Dosisleistungsmessgeräten oder Dosimetern. Schutz vor der äußeren Exposition bieten eine Abschirmung der Strahlung, ein vergrößerter Abstand zum Strahlungsort oder ein verkürzter Aufenthalt am Strahlungsort (Küppers 2012, Seiten 53-54). Des Weiteren ist der bestehende Unterschied zwischen einer Ganzkörper- und einer Teilkörperbestrahlung beachtenswert: „Jedes Individuum verträgt als Teilkörperdosis ein Vielfaches der Ganzkörperdosis“ (Stolz 2005, Seite 187).

Bei der internen Exposition, auch Inkorporation genannt, ist die Messung der Dosis jedoch viel komplexer. Hierbei werden radioaktive Stoffe beispielsweise durch die Atemluft, die Nahrung oder Wunden in den Körper aufgenommen. „Die Dosis ist dann die Folgedosis, also die Summe der Dosen, die in Zukunft von den aufgenommenen radioaktiven Stoffen bei ihrem Zerfall im Körper erzeugt wird“ (Küppers 2012, Seite 54). Von Bedeutung ist neben der physikalischen Halbwertszeit, welche den Zerfall von Radionukliden angibt, auch die biologische Halbwertszeit. Diese bestimmt, wie lange Radionuklide im Körper verweilen bis

sie ihn wieder verlassen (Küppers 2012, Seite 54). Beispiel: In der Schilddrüse beträgt die biologische Halbwertszeit von Jod etwa 25 Jahre, wohingegen Jod-131 eine physikalische Halbwertszeit von 8 Tagen aufweist. Das bedeutet, dass das Jod fast vollständig zerfallen ist, ehe es aus dem Körper ausgeschieden wird. Demnach ist die physikalische Halbwertszeit für die Berechnung der Folgedosis einschränkend. Dennoch reagiert die Schilddrüse bei einer großen Aufnahme von Jod-131 sehr empfindlich, da sich Jod sehr rasch in der Schilddrüse konzentriert (Küppers 2012, Seiten 54-55).

### 3.3.2 Strahlungswirkung

Radioaktive Strahlung ist sehr energiereich. Kommt es zur Exposition, wird ein Teil der Energie in Haut oder Organe abgegeben. Vorerst geschehen dann physikalische Prozesse an Atomen im Körper, wie die Ionisation (siehe Abbildung 1). In der äußeren Hornhautschicht kommt es zum Beispiel zu keinen Schädigungen, da diese nicht empfindlich ist.

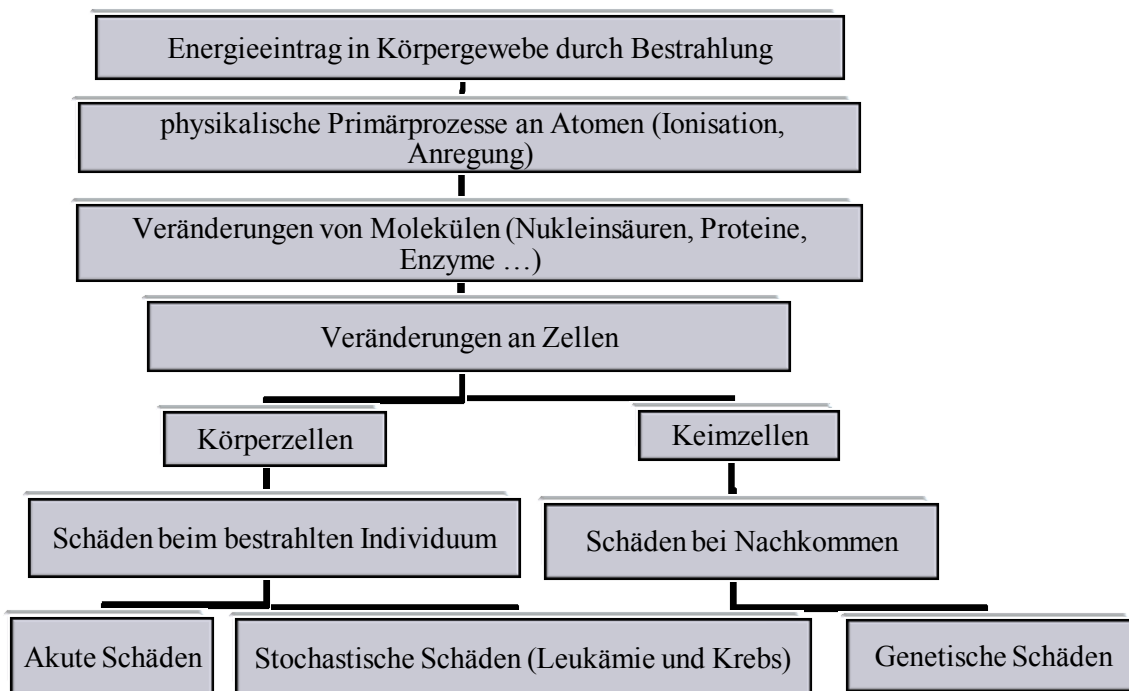


Abbildung 1: Biologische Wirkung von Strahlung auf den Menschen

Entstehen nun aber Veränderungen an Atomen und Molekülen, zeigen diese Auswirkungen auf die Gesundheit. „Kommt es beispielsweise bei Proteinen und Enzymen oder Nukleinsäuren, wie der Desoxyribonukleinsäure (DNS), die im Zellkern die Erbinformation der Zelle trägt, zu einem Schaden, so kann dieser letztendlich zu Leukämie oder Krebs führen, auch noch nach Jahren und Jahrzehnten“ (Küppers 2012, Seite 56). Bezieht sich der Schaden auf eine Keimzelle, so kann dies zu Missbildungen bei Nachkommen führen. Diese

Ergebnisse können bei allen Individuen erreicht werden, jedoch ist die Sensibilität zu beachten, da sie sehr unterschiedlich sein kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, dass der Körper alleine Mechanismen aktiviert, welche die Fähigkeit besitzen, Veränderungen, welche durch radioaktive Strahlung verursacht wurden, zu reparieren (Küppers 2012, Seiten 56-57).

Des Weiteren wird zwischen stochastischer und deterministischer Strahlenwirkung unterschieden. Zu den stochastischen Schäden zählen zwei Arten: die somatischen und die genetischen Schäden. Somatische Schäden können Krebserkrankungen sowie Leukämie auslösen und werden auf Grund ihrer Latenzzeit von vielen Jahren auch als Spätschäden bezeichnet. Genetische Schäden haben ihre Ursache in Genmutationen und chromosomalen Anomalien und werden durch Vererbung weitergegeben. Kennzeichnend für stochastische Schäden ist, dass sie mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in der Zukunft erscheinen werden (Küppers 2012, Seite 57; Stolz 2005, Seiten 187-188). „Die Höhe der Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden eintritt, hängt dabei von der Höhe der Dosis ab, während der Schaden selbst von der Höhe der Dosis unabhängig ist“ (Küppers 2012, Seite 57).

Die deterministischen Schäden sind akut und ereignen sich, wenn es zur Aufnahme einer sehr hohen Dosis in kurzer Zeit kommt. Hierfür müssen bestimmte Schwellenwerte übertroffen werden. Deterministische Schäden kommen in Form von Frühschäden zum Vorschein. „Typische Frühschäden sind Hautrötungen, Haarausfall und Strahlengeschwüre nach Teilkörperbestrahlung (Schwellenenergiedosis > 2 Gy) sowie die akute Strahlenkrankheit oder sogar der Strahlentod nach Ganzkörperbestrahlung“ (Stolz 2005, Seite 187). Weitere akute Symptome bilden Übelkeit und Erbrechen, Durchfall, Fieber, Entzündungen und Blutarmut. Deterministische Schäden sind hauptsächlich nach Unfällen zu erwarten und laut Stolz (2005, Seite 187) sind sie somatische Schäden, „d.h. sie manifestieren sich am bestrahlten Individuum selbst“ (Küppers 2012, Seite 57; Stolz 2005, Seite 187). Zudem existieren noch weitere Möglichkeiten und Zusammenhänge der Strahlenschädigung des Menschen, welche noch gänzlich zu erforschen sind (Küppers 2012, Seite 57).

### **3.3.3 Strahlungsrisiko**

Den ersten Schritt zur Bestimmung des Strahlungsrisikos stellt das Entdecken einer ungewöhnlich häufig auftretenden Erkrankung dar. Weiters bedarf es der Erzeugung eines quantitativen Zusammenhanges zur Strahlendosis, um auf die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung schlussfolgern zu können. Stochastische Spätschäden können beispielsweise in statistischen Schäden angegeben werden, wodurch das Risiko viel genauer definiert werden

kann, abhängig von der Dosis und der Anzahl der Betroffenen – je größer, desto besser (Küppers 2012, Seite 58).

Die vorhandenen Kenntnisse der Höhe des Strahlungsrisikos sind Untersuchungen an Menschen, welche die Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki überstanden, und an Personen, welche in der Kerntechnik und Medizin tätig sind, zu verdanken. Der Dosisbereich lag bei diesen Untersuchungen etwa bei hundert Millisievert. Dies entspricht Dosen, welche deutlich über den Grenzwerten der Strahlenschutzverordnung für die Öffentlichkeit liegen. Um das Strahlungsrisiko in den niedrigeren Dosisbereichen zu bestimmen, bedarf es einer Übertragung der Erkenntnisse, welche bei höheren Dosen erreicht wurden (Küppers 2012, Seiten 58-59).

Unterschiedliche Gremien, wie die Internationale Strahlenschutzkommission (International Commission on Radiological Protection, ICRP), das US-amerikanische Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR) und das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), haben es sich zur Aufgabe gemacht, die quantitative Höhe des Strahlenrisikos zu analysieren. Im Jahr 2007 veröffentlichte die ICRP Schätzungen bezogen auf die Gesamtbevölkerung. „Pro einem Sievert effektiver Dosis schätzt die ICRP das Risiko, einen stochastischen Schaden zu erleiden, auf 5,7 Prozent. Sie nimmt weiter an, dass für vererbare Effekte bei dieser Dosis ein Risiko von 0,2 Prozent besteht“ (Küppers 2012, Seite 60).

Wichtig ist, dass die Höhe des Strahlenrisikos schwer festzulegen ist, da die Schäden, welche entstehen können, auch andere Ursachen haben können, wie es beispielsweise bei Krebs der Fall sein kann. Um eine Verbindung zwischen Schaden und Ursache herstellen zu können, bedarf es eines großen Personenkreises, welcher sich genau in einer möglichen Ursache unterscheidet. „Da sich das Krebsrisiko durch Strahlung – im Vergleich zu anderen möglichen Ursachen – bei niedrigen Strahlendosen nur wenig erhöht, ist hier eine quantitative Bestimmung besonders schwierig“ (Küppers 2012, Seite 61).

### **3.4 Reaktorkatastrophen und deren Folgen**

#### **3.4.1 Reaktorunfall in Tschernobyl**

Das Reaktorunglück in Tschernobyl ereignete sich am 26. April 1986. Ein Leistungsanstieg führte zur Explosion des Reaktors und ermöglichte das Austreten von Radioaktivität. Erst das

Zuschütten der Reaktorrüine bewirkte, dass nicht mehr Radioaktivität freigesetzt wurde. Anschließend wurde eine Konstruktion, benannt als „Sarkophag“, aus Stahl und Beton errichtet, um weitere Freisetzungen zu verhindern (Pistner & Küppers 2012, Seiten 123-125; Koepf & Koepf-Schewyrina 1996, Seite 67-70).

Verantwortlich für den Reaktorunfall in Tschernobyl waren mehrere Komponenten. Lücken und Schwächen in der Planung und der Organisation des Experiments sowie das Fehlverhalten des Personals trugen erheblich zur Katastrophe bei. Des Weiteren gab es auslegungstechnische Mängel des Reaktors wie auch ungünstige Eigenschaften des Reaktortyps (Pistner & Küppers 2012, Seite 124).

### **3.4.2 Gesundheitliche Folgen von Tschernobyl**

„Offiziell wurde der Unfall erst am 28. April 1986 bekannt gegeben“ (Pistner & Küppers 2012, Seite 124). Die Moskauer Informationspolitik beschloss nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl, den Menschen Auskunft über genaue Ursache und Ablauf zu verweigern, wodurch sich der Schaden weiterhin erhöhte. Das Fehlen von Messgeräten und das Desinteresse der Regierung an genauen Aufzeichnungen führten zu einem Mangel an Daten der Strahlenbelastung. „Die Verluste an Menschenleben, die gesundheitlichen Schäden sowie die Landverseuchung wurden erst im Laufe der Jahre sichtbar“ (Laufs 2013, Seite 149).

Die Zahl der Personen, welche einer starken Belastung ionisierender Strahlung ausgesetzt war, dürfte um eine Million betragen. Alleine die Liquidatoren, jene Personen, welche an der Beseitigung der Folgen der Katastrophe mitwirkten, zählten Hunderttausende. Hinzu kommen mehr als 100.000 Einwohner/innen. Staubwolken voll mit radioaktivem Cäsium und Strontium sowie eine mit Jodgas angereicherte Luft umgaben die Menschen und lagerten sich auf der Flora ab. Durch das Weiden der Tiere gelangten diese Elemente über die Nahrung in den menschlichen Körper (Koepf & Koepf Schewyrina 1996, Seite 83).

Die gesundheitlichen Folgen der Katastrophe sind immens. Laufs (2013, Seite 149) berichtet von 31 Todesopfern durch akutes Strahlensyndrom innerhalb der ersten drei Monate sowie von 134 hochverstrahlten Personen, welche in den folgenden Jahren verstarben. Hinzu kommen 100.000 Liquidatoren, welche nicht über ihre Strahlenexposition informiert wurden. Vermutungen zufolge wurden Tausende lebensgefährlichen Dosen ausgesetzt und verstarben wegen unangemessener Behandlung (Laufs 2013, Seite 149).

Sehr auffällig ist der Anstieg von Schilddrüsenkrebs bei Kindern und Jugendlichen: „In den 25 Jahren nach dem Unfall traten mehr als 5.000 Fälle auf“ (Pistner & Küppers 2012, Seite 126). Die Zunahme von Schilddrüsenkrebs bestätigt auch Laufs (2013, Seite 149) mit einer von Organisationen der Vereinten Nationen durchgeführten Nachprüfung aus dem Jahr 2001. Sie zählte circa 2.000 Fälle von Schilddrüsenkrebs und schätzte die Zahl der zu erwartenden Erkrankten auf 8.000-10.000. Im Kapitel 5.1 wird noch näher darauf eingegangen. Ein Anstieg von Leukämie-Patienten/innen, wie vorhergesagt, trat nicht ein. Zudem erklärt Laufs (2013, Seiten 149-150): „Die Spätfolgen der Strahlenbelastung der Liquidatoren und der Bevölkerung können nur durch statistische Vergleiche annähernd ermittelt werden, da strahlenbedingte Krebsfälle sich nicht von spontanen unterscheiden lassen.“

Neben den bereits erwähnten Schäden kam es zu einer erhöhten Säuglingssterblichkeit, zu genetischen Schäden sowie Fehlbildungen (Pflugbeil 2006, Seite 75). Des Weiteren waren Trübungen der Augenlinse, kardiovaskuläre und andere organische Erkrankungen und Veränderungen des Immunsystems möglich (Streffler 2006, Seiten 107-110). Viele Betroffene litten zudem unter psychosozialen Folgen. Die Strahlenexposition, die Evakuierung und die Umsiedlung verursachten psychogene Erkrankungen, welche lange nicht beachtet wurden. Hinzu kamen schlechte materielle und soziale Verhältnisse, die die Situation der Betroffenen nicht gerade erleichterten (Laufs 2013, Seite 150).

Alexijewitsch (2006, Seite 189) berichtet von Gesprächen mit den Betroffenen:

„Noch heute sehe ich den himbeerfarbenen Schein vor mir, der Reaktor leuchtete irgendwie von innen. Es war kein gewöhnliches Feuer, sondern so ein Glühen. Wunderschön. Ich hatte so etwas noch nie gesehen, nicht mal im Kino. Abends strömten die Leute auf die Balkons, wer keinen hatte, ging zu Freunden oder Bekannten [...] ‚Guck mal! Das musst du gesehen haben!‘ Und das von Leuten, die im Atomkraftwerk beschäftigt waren! [...] Wir wussten nicht, dass der Tode so schön sein kann.“

„Mein Verstand reicht nicht aus, um das alles zu begreifen. Auch nicht meine Hochschulbildung. Da lebst du nun ... Ein ganz gewöhnlicher, kleiner Mensch. [...] Und eines Tages wird aus dir unerwartet ein Tschernobyl-Mensch. So etwas wie ein Exote! [...] Man schaut dich mit anderen Augen an. [...] Wir haben keine Stadt verloren, sondern ein ganzes Leben. [...] Ich brachte Frau und Tochter ins Krankenhaus ... Sie hatten Flecken am ganzen Körper dunkle Flecken. [...] Meine Tochter war sechs Jahre alt. Wenn ich sie zu Bett brachte, flüsterte sie mir ins Ohr: ‚Papa, ich möchte leben, ich bin doch noch so klein.‘ [...]

Wir haben sie auf die Tür gelegt ... Auf die Tür, auf der damals mein Vater gelegen hat. Bis der kleine Sarg gebracht wurde ... Er war so klein, fast wie eine große Puppenschachtel. Ich möchte Zeugnis ablegen – meine Tochter ist an Tschernobyl gestorben. Und von uns will man, dass wir das vergessen“ (Alexijewitsch 2006, Seiten 64-66).

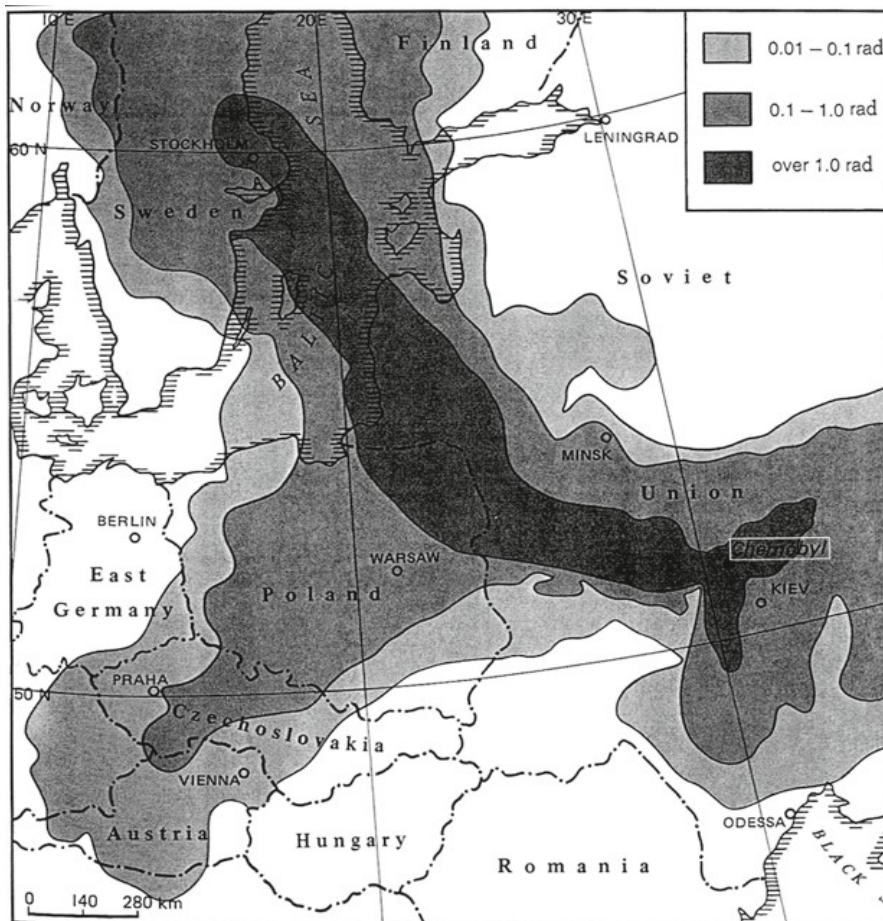


Abbildung 2: Verteilung radioaktiver Elemente über Europa am 29. April 1986

Durch das Austreten der radioaktiven Elemente des Kernkraftwerkes in die Umwelt kam es zu einer Verteilung dieser in die angrenzenden Gebiete. Das am stärksten radioaktiv verseuchte Gebiet befindet sich in der 30-km-Zone rund um den Reaktor. Ukraine, Weißrussland und Russland sind folglich am meisten betroffen. Die Radioaktivität erstreckte sich aber auch über weite Teile Europas, so war/ist auch Österreich betroffen (siehe Abbildung 2). Regenfälle, sogenannte „Washouts“, ermöglichten, dass die radioaktiven Stoffe in einer höheren Konzentration abgelagert wurden. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, war die Bundesrepublik Deutschland mit ca. 0,1mSv nicht so stark betroffen wie Österreich mit ca. 0,62mSv. „Im Vergleich dazu beträgt die mittlere äußere Strahlenexposition durch natürliche terrestrische Strahlung ca. 0,3mSv“ (Laufs 2013, Seite 152). Im Jahr 1986 betrug die mittlere Schilddrüsendosis für einen Durchschnitts-Grazer in etwa 550µSv (Rabitsch et al. 1998, Seite

29). Bodenkontaminationen mit Jod-131, Cäsium-134 und Cäsium-137 erfolgten und konnten in stark belasteten Gebieten zehn Jahre später noch erheblich hoch sein. Beispielsweise bleibt Cäsium-137 in Wäldern und moorigen Wiesen über viele Jahre erhalten und wird über die Humusschicht von Pflanzen und Pilzen aufgenommen (Koepp & Koepp-Schewyrina 1996, Seiten 85-94; Laufs 2013, Seite 151-152).

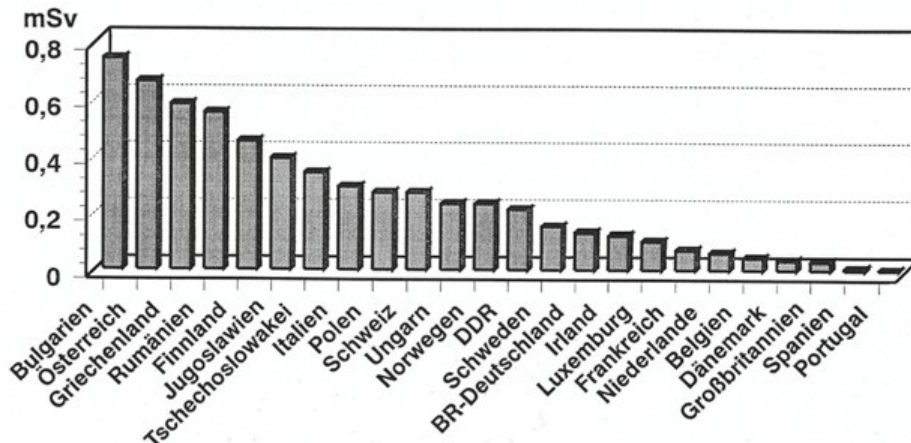


Abbildung 3: Effektive Dosis gemessen in mSv im ersten Jahr in Europa (mSv steht für Millisievert und ist die Maßeinheit zum Festlegen von Strahlendosen)

### 3.4.3 Reaktorunglück in Fukushima

Das Reaktorunglück im Kernkraftwerk Fukushima Dai-ichi ereignete sich ab dem 11. März 2011. Ein Erdbeben der Stärke 9,0 führte zu einer automatischen Schnellabschaltung der Blöcke 1, 2 und 3 des Kernkraftwerks, wodurch es zu einem Stopp in der Leistungserzeugung kam. Durch das starke Erdbeben entstand ein Tsunami, welcher mit circa 14 Meter hohen Wellen die Anlage großteils überschwemmte. Das Resultat waren Kernschmelzen sowie Wasserstoffexplosionen, bei der kontaminierte Anlagenteile auf das Gelände fielen. Wegen der hohen Strahlenbelastung stellte sich die Umsetzung der Notfallmaßnahmen als sehr schwierig heraus. Die Arbeiten zur Kühlung des Systems erfolgten weitgehend durch Wasser von außen. Ein Jahr nach dem Unglück musste die Kühlung weiterhin fortgesetzt werden. Lecks in der Anlage begünstigen nach wie vor das Austreten radioaktiver Stoffe in die Umwelt (Pistner & Küppers 2012, Seite 129-132).

Grund für das Reaktorunglück in Fukushima ist vor allem das Erdbeben mit dem darauf folgenden Tsunami. Ein Unterschätzen dieser Naturereignisse hatte einen Zusammenbruch der elektrischen Energieversorgung als auch der Nebenkühlwasserversorgung zur Folge. Die Anlage war zudem nicht so geplant und ausgelegt, dass sie solchen Bedingungen Stand halten konnte (Pistner & Küppers 2012, Seite 132).

### 3.4.4 Gesundheitliche Folgen von Fukushima

Infolge des Reaktorunglücks in Fukushima erstellte die japanische Regierung am 12. März 2011 ein Evakuierungsprogramm, woran nahezu 147.000 Menschen betroffen waren. Erste Anordnungen waren unscharf und „chaotisch“. So mussten beispielsweise einige Menschen nochmals evakuiert werden, da sie in Regionen mit höherer Strahlenbelastung gebracht wurden (Laufs 2013, Seite 193).

Durch den Unfall erfolgte ein Austreten von kontaminiertem Wasser, welches in Boden und Grundwasser sowie ins Meer gelangte (Pistner & Küppers 2012, Seite 138). Große Mengen an radioaktiven Stoffen, vor allem Edelgase, Jod und Cäsium gelangten in die Umwelt. „Die Nuclear Safety Commission of Japan (NSC) bestimmte durch Berechnungen und Abschätzungen die durch das Unfallgeschehen in die Atmosphäre abgeleitete Gesamtmenge an radioaktivem Jod und Cäsium und kam zum Ergebnis, dass etwa ein Zehntel der in Tschernobyl freigesetzten Jod- und Cäsiummengen in Fukushima-I ins Freie gelangten, wie einer Presseerklärung des NISA/METI (Ministry of Economy Trade and Industry) vom 12.4.2011 zu entnehmen war“ (Laufs 2013, Seite 190). Der Vergleich ist in der Tabelle 1 ersichtlich.

	Assumed amount of the discharge from Fukushima Daiichi NPS		(Reference) Amount of the discharge from the Chernobyl accident (Bq)
	Estimated by NISA (Bq)	Announced by NSC (Bq)	
$^{131}\text{I}$ (a)	$1,3 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{17}$	$1,8 \times 10^{18}$
$^{137}\text{Cs}$	$6,1 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{16}$	$8,5 \times 10^{16}$
(converted value to $^{131}\text{I}$ ) (b)	$2,4 \times 10^{17}$	$4,8 \times 10^{17}$	$3,4 \times 10^{18}$
(a) + (b)	$3,7 \times 10^{17}$	$6,3 \times 10^{17}$	$5,2 \times 10^{18}$

Tabelle 1: Freisetzungen von Jod und Cäsium in Fukushima und Tschernobyl

Die Ortsdosisleistung der näheren Umgebung von Fukushima ist in Abbildung 4 dargestellt. Sie wurde Ende Juni 2011 erhoben, wobei die Höhe 1m über dem Grund betrug. Die Ortsdosisleistung betrug in den stark betroffenen Gebieten wie Fukushima und Namie mehr als  $20\mu\text{Sv/h}$  (Laufs 2013, Seite 192).

Nach Angaben der IAEA erlitten circa 30 Personen im Kernkraftwerk von Fukushima bis Ende Mai 2011 eine Strahlenexposition von 100-250mSv. „In Folge des Reaktorunfalls sei keine Verletzung irgendeiner Person durch Verstrahlung nachgewiesen worden“ (Laufs 2013, Seite 196). Die IAEA berichtete jedoch von Unsicherheiten. Ein Personaluntersuchungsprogramm mit Stand vom 30.9.2011 zeigte, dass von 14.800 Personen, welche in Fukushima tätig waren, 99 Personen Dosen von mehr als 100mSv, davon 77 Personen 100 bis 150mSv, 14 Personen 150 bis 200mSv, 2 Personen 200 bis 250mSv und 6 Personen über 250mSv ausgesetzt waren. Der Bericht der WHO über die Strahlenexposition von Fukushima gibt an, dass die Schilddrüsendosis in Fukushima 10 bis 100mSv und in Namie für Kleinkinder 100 bis 200mSv betrug. Für die 360.000 Jugendlichen unter 18 Jahren wurde in Fukushima ein staatliches Schilddrüsen-Überwachungsprogramm eingeführt, wobei Karzinome frühzeitig erkannt werden sollten (Laufs 2013, Seiten 196-197).

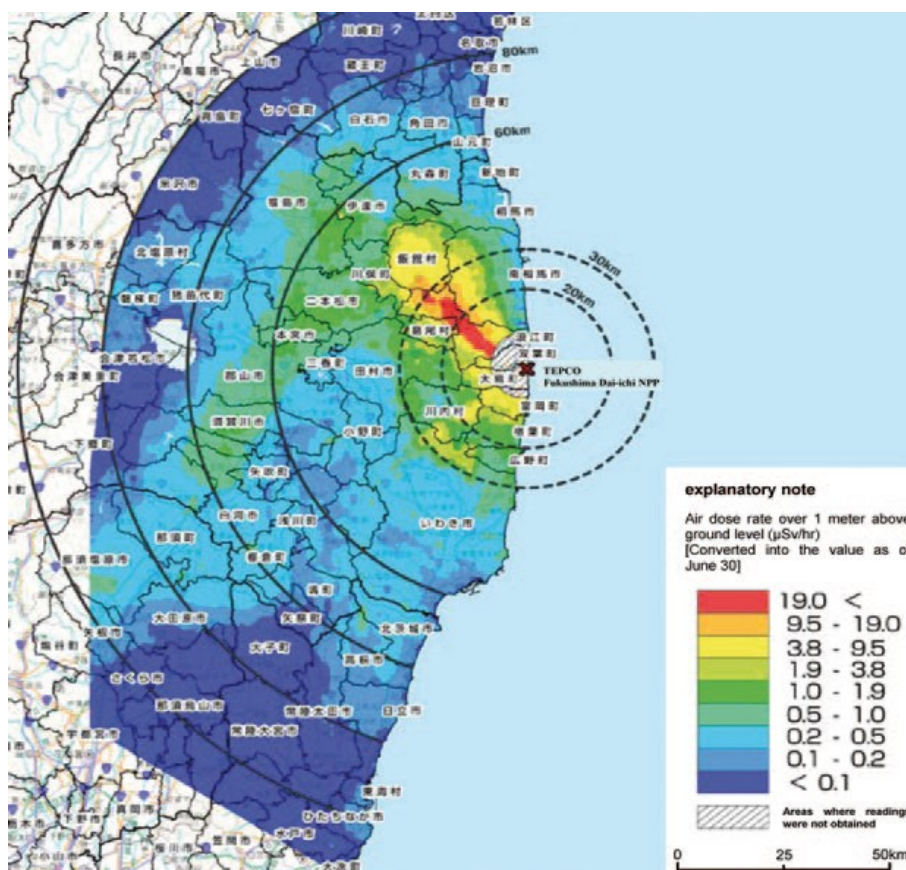


Abbildung 4: Ortsdosisleistung in  $\mu\text{Sv/h}$  im Umfeld von Fukushima

Pistner und Küppers (2012, Seiten 138) berichten zudem von einer Kontamination des Trinkwassers mit Jod-131 in Fukushima. Untersuchtes Leitungswasser beinhaltete eine Aktivitätskonzentration von über 100 Becquerel pro Liter. Des Weiteren gelangten Radionuklide in die Nahrungskette der Menschen. Dies erfolgte durch den Verbleib

radioaktiver Stoffe in der Luft oder durch Ablagerungen im Boden. Die japanische Behörde verhängte Vermarktungsverbote, welche jedoch nicht immer sehr klar waren (Pistner & Küppers 2012, Seite 139).

Ob die radioaktiv freigesetzten Stoffe vom Kernkraftwerk in Fukushima gesundheitliche Auswirkungen auf die japanische bzw. weltweite Bevölkerung haben, ist umstritten. Die Internationale Strahlenschutz-Kommission (International Commission on Radiological Protection – ICRP) besagt, „[...] dass keine biologischen und epidemiologischen Daten verfügbar sind, die im Bereich kleiner Strahlendosen unterhalb von etwa 100mSv die Quantifizierung von Dosis-Wirkungsbeziehungen ermöglichen“ (Laufs 2013, Seite 197). Die ICRP empfiehlt Krebserkrankungen und Todesfälle bezogen auf die Strahlenexposition nicht zu berechnen (Laufs 2013, Seite 198). Küppers und Pistner (2012, Seite 140) verweisen außerdem auf das langlebige Radionuklid Cäsium-137, dessen Bedeutung in den kommenden Jahren spürbar sein wird. Dies betrifft vor allem die Anreicherung von Cäsium-137 in Nahrungsmitteln und in bestimmten Gebieten. Die Konzentration von Cäsium-137 in Fischen aus stehenden Gewässern kann zum Beispiel noch weiterhin ansteigen. Zusätzliche Nahrungsmittelkontrollen werden daher in den nächsten Jahren von Bedeutung sein (Pistner & Küppers 2012, Seite 140).

Die Betroffenheit der Menschen ist nicht zu verbergen. Brandner (2012) berichtet:

„Fuku-Shima bedeutet: eine Insel voller Glück. Was ist denn Glück? Saubere Luft, sauberes Wasser, saubere Erde, in der man die wohlschmeckenden Dinge anbauen kann, die wir essen. Das ist doch das größte Glück für uns Menschen! Jetzt aber haben wir das Gefühl, dass all dies verloren gegangen und zunichte gemacht worden ist. Wenn wir aber den Unfall im AKW zum Anlass nehmen, aus der Atomtechnologie auszusteigen, und wenn dieser Unfall dazu dient, der Welt mitzuteilen, dass weltweit alle Atomkraftwerke gestoppt werden müssen, dann können wir die Katastrophe in Glück umkehren!“ (Brandner 2012, Seite 90).

#### **4 Schilddrüse**

Die Schilddrüse ist ein scheinbar unauffälliges kleines Organ mit großer Wirkung. Sie gehört zum endokrinen System und ist verantwortlich für die Produktion der Schilddrüsenhormone, welche an vielen Stoffwechselfvorgängen mitwirken. Zu den wichtigsten Aufgaben zählen die Regulation des Zucker-, Fett- und Eiweißstoffwechsels, die Regulation des Energie- und Wärmehaushaltes, die Einflussnahme auf Wachstum und Entwicklung von Nerven- sowie

anderen Zellen und die Einwirkung auf das kardiovaskuläre System. Des Weiteren beeinflusst die Schilddrüse die seelische Verfassung des Menschen (Maier 2001, Seite 8; Merck GesmbH 2010, Seite 6).

#### 4.1 Anatomie der Schilddrüse

Die Schilddrüse, welche in der Medizin auch als Glandula thyreoidea bezeichnet wird, befindet sich unmittelbar unterhalb des Kehlkopfes. Sie liegt direkt neben und auf der Trachea und hat die Form eines Schmetterlings oder eines Hufeisens. Sie besteht aus zwei Seitenlappen, welche durch eine Gewebebrücke, den Isthmus, miteinander verbunden sind (Horn, Vosberg & Wagner 1999, Seite 1; Leopold 2012, Seite 2; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 15). Nach Spelsberg, Negele und Ritter (2000, Seite 15) „ist die normale Schilddrüse fast immer asymmetrisch, der rechte Lappen meist größer als der linke. [...] Die Länge der Lappen beträgt 3-7 cm, die Breite und Dicke etwa 2-3 cm.“ Abbildung 5 zeigt die anatomische Darstellung der Schilddrüse im menschlichen Körper.

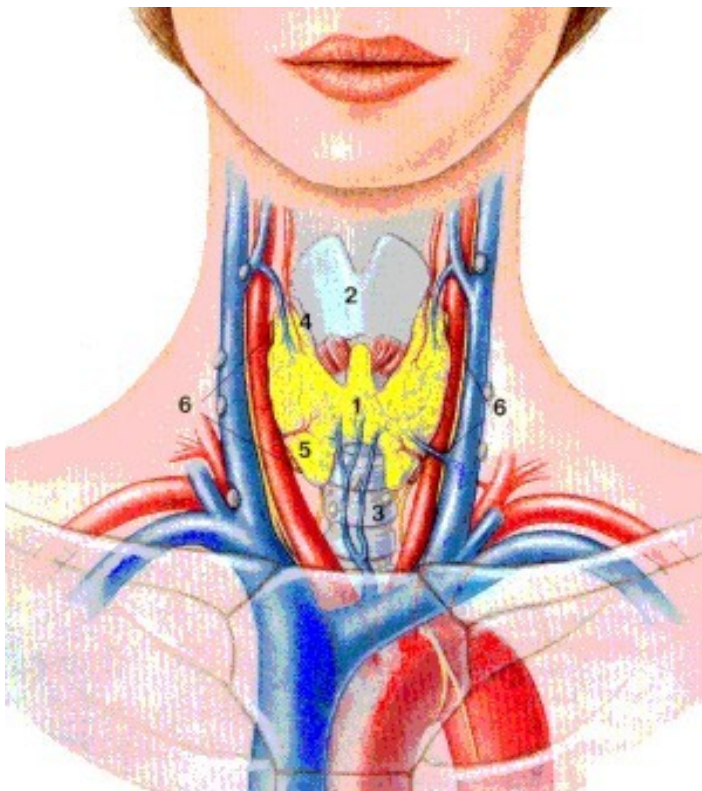


Abbildung 5: anatomische Darstellung der Schilddrüse im menschlichen Körper: 1. Schilddrüse, 2. Kehlkopf, 3. Luftröhre, 4. und 5. Blutgefäße, 6. Nebenschilddrüsen

Des Weiteren ist die normale Schilddrüse von außen nicht sichtbar und für den Laien schwer tastbar. Das Gewicht der Schilddrüse beträgt bei der Geburt etwa 2g und verändert sich im

Laufe des Lebens. Bei einer erwachsenen Frau wiegt die Schilddrüse bis zu 18g, bei einem erwachsenen Mann sogar bis zu 25g. Die Schilddrüse ist zudem ein sehr gut und sehr stark durchblutetes Organ. „Innerhalb von 1,5 Stunden wird sie von der Gesamtblutmenge des Körpers durchströmt“ (Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 16). Die Blutversorgung geschieht mittels der oberen und unteren Schilddrüsenarterien. Außerdem besitzt die Schilddrüse eine lymphatische Versorgung, welche in Verbindung zu den Lymphgefäßen und Lymphknoten des Halses und des vorderen Brustkorbes steht (Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seiten 15-16).

Das Schilddrüsengewebe besteht aus funktionellen Einheiten, den sogenannten Follikeln. Diese sind etwa 50 bis 500µm groß und sind schlauchförmig angeordnet. Sie beinhalten das Kolloid, eine Proteinlösung mit hauptsächlichem Anteil von Thyreoglobulin. Außerdem sind die Follikel von hormonbildenden Drüsenepithelzellen, den sogenannten Thyreozyten umgeben (Faller & Schünke 2008, Seite 361; Silbernagl & Despopoulos 2007, Seite 288; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 19).

Die vier Nebenschilddrüsen, welche auch als Glandulae parathyreoideae bezeichnet werden, befinden sich an der hinteren Fläche der Schilddrüsenseitenlappen. Rechts und links an den Lappen befindet sich jeweils eine oben und eine unten. Ihre Größe entspricht einer Linse, einem Korn bzw. einem Weizenkorn und ist entweder rundlich oder stäbchenförmig. In ihrer Funktion haben sie nichts mit der Schilddrüse zu tun, sondern befinden sich nur neben ihr und haben dadurch ihren Namen (Bruker & Gutjahr 2000, Seite 26; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 23).

## **4.2 Physiologie der Schilddrüse**

### **4.2.1 Schilddrüsenhormone**

Die Schilddrüse ist zuständig für die Sekretion von drei Hormonen (Schmidt 2011, Seite 481):

- Tetrajodthyronin = T4 = Thyroxin
- Trijodthyronin = T3
- Calcitonin

Die beiden jodhaltigen Schilddrüsenhormone T3 und T4 werden im Drüsenepithel und im Kolloid des Follikels gebildet und gespeichert. „Bei Bedarf werden die Hormone von den Drüsenepithelzellen wieder aufgenommen und an angrenzende Blutgefäße abgegeben“ (Faller

& Schünke 2008, Seite 361). T3 und T4 beeinflussen Wachstum, Reifung und Stoffwechsel des Körpers. Trijodthyronin ist eigentlich das aktive Schilddrüsenhormon und resultiert aus der Abspaltung eines Jodatoms von Thyroxin. Für die Synthese und Freigabe von T3 und T4 bedarf es einer Steuerung. Diese erfolgt durch das Hypothalamus-Hypophysen-System, welches im Kapitel 4.2.2. beschrieben ist (Faller & Schünke 2008, Seite 361-363; Silbernagl & Despopoulos 2007, Seite 288).

Die Schilddrüsenhormone T3 und T4 sind gebunden an Proteine, wobei ein kleiner Teil ungebunden im Blut bleibt. Diese ungebundenen Hormone werden als freie Hormone bezeichnet: fT3 und fT4 (Merck GesmbH 2010, Seite 14).

Neben T3 und T4 entsteht in der Schilddrüse ein weiteres Hormon, das Calcitonin. Es wird in den parafollikulären oder C-Zellen der Schilddrüse gebildet und ist für die Absenkung des Blutkalziumspiegels sowie die Knochenbildung zuständig (Faller & Schünke 2008, Seite 363).

#### **4.2.2 Hypothalamus-Hypophysen-Regelkreis**

Das Hypothalamus-Hypophysen-System ist für die Regulation von Produktion und Abgabe der beiden Schilddrüsenhormone T3 und T4 ins Blut zuständig. Um einen gleichbleibenden Hormonspiegel zu erhalten, bedarf es zweier Hormone, TRH und TSH. TRH steht für Thyreotropin-Releasing-Hormon und stellt das Releasing-Hormon des Schilddrüsenhormonregelkreises dar. „Es stimuliert im Hypophysenvorderlappen die Ausschüttung von TSH (Thyreoida-stimulierendes Hormon)“ (Huch & Jürgens, 2011, Seite 225). TSH veranlasst die Schilddrüse zur vermehrten Bildung von Schilddrüsenhormonen sowie zur Freisetzung der Schilddrüsenhormone aus dem Kolloid. Die Schilddrüsenhormone wiederum können über das Blut alle Regionen des Körpers erreichen. Folglich gelangen sie auch zur Hypophyse und zum Hypothalamus, welche durch ihre Rezeptoren in der Lage sind, einen eventuell erhöhten Spiegel von Schilddrüsenhormonen im Blut festzustellen. Geschieht dies, so wird die Bildung von TRH und TSH gehemmt, was eine weitere Hemmung der T3 und T4 Sekretion bewirkt. Eine negative Rückkopplung ist das Ergebnis (Huch & Jürgens 2011, Seite 225; Faller & Schünke 2008, Seite 363).

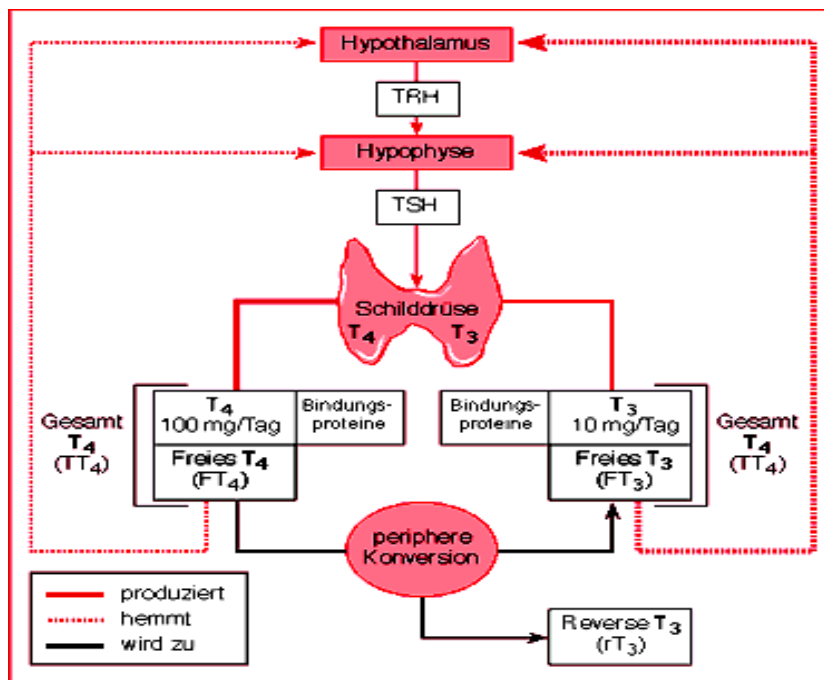


Abbildung 6: Regelkreis der Schilddrüsenhormone

### 4.2.3 Jod

Das Spurenelement Jod bildet den wesentlichen Baustein der beiden Schilddrüsenhormone T<sub>3</sub> und T<sub>4</sub>. Jod wird in Form von Jodsalzen (Jodid) über die Nahrung in den menschlichen Körper aufgenommen und gelangt in den Darm. Dort wird Jod ins Blut resorbiert und erreicht dann die Schilddrüse. Um eine ausreichende Hormonproduktion gewährleisten zu können, benötigt die Schilddrüse des Erwachsenen nach Berechnungen der WHO etwa 150-250 µg (Mikrogramm) Jod pro Tag, der tägliche Bedarf von Säuglingen und Kleinkindern liegt bei 50-100 µg. In der Schwangerschaft, in der Pubertät und in der Adoleszenz braucht die Schilddrüse bis zu 200-250 µg pro Tag. Die Aufnahme größerer Mengen an Jod kann in längeren Abständen stattfinden, da das Organ dazu im Stande ist, Jod zu speichern und je nach Bedarf bereitzustellen bzw. die Freigabe zu drosseln. Jod, welches nicht in die Schilddrüse aufgenommen wird, wird größtenteils über die Niere ausgeschieden. Die Messung der Jodausscheidung im Urin ist daher vor allem für die Bestimmung des Jodgehalts der Nahrung in einem bestimmten Gebiet von großer Bedeutung (Hotze 2008, Seite 21; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 25-27).

Eine unzureichende Aufnahme von Jod kann erhebliche gesundheitliche Folgen mit sich bringen, da die Hormone nicht ausreichend produziert werden können. Zum Beispiel ist eine Verlangsamung des Stoffwechsels die Folge sowie die Hypothyreose, welche am häufigsten durch Jodmangel verursacht wird. Des Weiteren kann Jodmangel zur Bildung eines Kropfes beitragen. Vor allem bei der Versorgung von Säuglingen ist eine ausreichende Jodaufnahme

sehr wichtig, da sie durch die Schilddrüsenhormone zur normalen Entwicklung des Gehirns und des Nervensystems beiträgt (Merck Serono 2011).

Laut einem Bericht der WHO sind über 54 Länder der Welt Jodmangelgebiete. Grund dafür ist das zu wenig bzw. gar nicht enthaltene Jod in den Böden (Merck Serono 2011). In Mitteleuropa sind die intensive landwirtschaftliche Nutzung und die nacheiszeitliche Ausschwemmung aus den Böden für den Jodmangel verantwortlich (Schilddrüsenpraxis Josefstadt). Untersuchungen, welche in Graz-Eggenberg durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass sich die Jodversorgung in den letzten eineinhalb Jahrzehnten sehr verbessert hat (Gesund Co 2009). Für einen Ausgleich des Jodmangels wird das Speisesalz seit 1963 mit Jod angereichert. Des Weiteren ist Jod vor allem in Fischen und Meeresfrüchten enthalten. Weitere natürliche Jodquellen stellen jodhaltige Mineralwässer sowie teilweise Milchprodukte dar (Schilddrüsenpraxis Josefstadt).

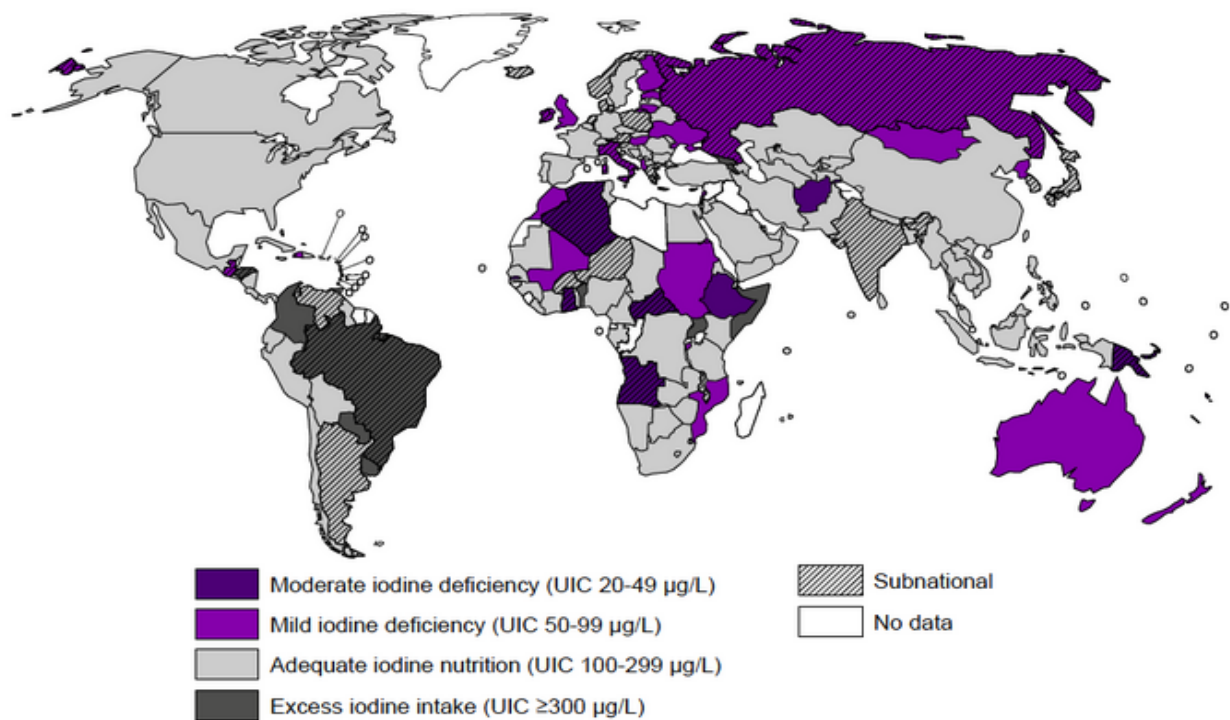


Abbildung 7: Nationaler Jod-Status 2013

### 4.3 Diagnostik bei Schilddrüsenerkrankungen

#### 4.3.1 Anamnese und körperliche Untersuchung

Der erste Schritt in der Anamnese ist die Schilderung der Krankheitszeichen. Anschließend folgen gezielte Fragen zur Schilddrüsenfunktion des/der Patienten/in (Hotze 2008, Seite 58).

Die wichtigsten Fragen zusammengefasst:

- „Hat sich das Körpergewicht verändert? (wie viel, in welchem Zeitraum?)
- Hat sich der Stuhlgang verändert? Neigen Sie eher zu Verstopfung oder Durchfall?
- Frieren oder Schwitzen Sie leicht?
- Beobachten Sie gelegentlich einen schnellen, langsamen oder unregelmäßigen Puls?
- Haben Sie Luftnot (in Ruhe oder bei Belastung)?
- Sind Sie in letzter Zeit vermehrt nervös (innerlich unruhig, träger)?
- Kam es in letzter Zeit zu einem Leistungsknick?
- Können Sie gut schlafen?
- Bemerkten Sie Muskelschwäche, Muskelschwund und/oder Lähmungen?
- Beobachten Sie einen vermehrten Haarausfall?
- Sind sie vermehrt reizbar und/oder depressiv?
- Bestehen Zyklusstörungen und/oder unerfüllter Kinderwunsch?
- Haben Sie Beschwerden im Bereich der Augen?
  - Schwellungen der Augenlider?
  - Augentränen oder Augenjucken?
  - Hervortreten der Augen?
  - Sehen Sie doppelt oder verschwommen?
  - Sind die Augen gegenüber Zug und Licht empfindlich geworden?“

(Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 33)

Neben diesen „Hauptfragen“ stellt die Familienanamnese einen zentralen Punkt dar, da einige Erkrankungen wie beispielsweise ein Jodmangelstruma, Morbus Basedow, Thyreoiditis Hashimoto oder ein medulläres Schilddrüsenkarzinom familiär gehäuft auftreten (Horn, Vosberg & Wagner 1999, Seite 12). Des Weiteren sind Fragen zur Schilddrüsenmorphologie, zur Vorbehandlung und zu Begleitumständen von Bedeutung. Die Anamnese umfasst zudem die Einnahme anderer Medikamente, wobei bei Frauen besonders wichtig ist, ob hormonelle Antikonzeptiva eingenommen werden und ob die Möglichkeit einer Schwangerschaft besteht.

Zusätzlich ist abzuklären, ob in letzter Zeit Substanzen eingenommen wurden, welche sehr viel Jod enthalten (Hotze 2008, Seite 58; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 34).

Neben der Anamnese stellt die körperliche Untersuchung einen weiteren Aspekt in der Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen dar. Hier steht vor allem die Palpation, also das Abtasten der Schilddrüse, im Vordergrund. Dafür legt der/die Arzt/Ärztin beide Hände von vorne, jedoch in der Regel von hinten auf den Hals des/der Patienten/in und tastet diesen ab. Durch Schlucken des/der Patienten/in gleitet die Schilddrüse unter den Fingerspitzen hinweg. Bei der Palpation können Knoten sowie deren Beschaffenheit (hart, weich, elastisch) festgestellt werden. Schließlich werden Schmerzen beim Abtasten, ein tastbares Schwirren und das regelmäßige Auf- und Abgleiten der Schilddrüse während des Schluckens beachtet. Außerdem können andere Körperuntersuchungen wie die Beschaffenheit der Haut, Befunde von Erkrankungen des Herzens oder der Augen zur Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen beitragen (Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seiten 34-35).

#### **4.3.2 Labordiagnostik**

Die Untersuchung des Blutes ist ein weiterer wichtiger Schritt in der Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen. Besteht der Verdacht auf eine Schilddrüsenerkrankung, kommt es zur Bestimmung des TSH-Basalwertes. Befinden sich die TSH-Werte nicht im Normbereich, so liegt bei einem erhöhten Wert eine Unterfunktion und bei einem erniedrigten Wert eine Überfunktion der Schilddrüse vor (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820; Merck GesmbH 2010, Seite 14).

„Bei pathologischem Ausfall werden dann die (freien) Schilddrüsenhormone T3 und T4 bestimmt“ (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820). Darüber hinaus werden die Schilddrüsen(auto)antikörper bei Verdacht auf immunogen bedingte Schilddrüsenerkrankungen wie zum Beispiel Morbus Basedow oder Hashimoto Thyreoiditis ermittelt. Hierbei gibt es drei Arten: „Antikörper gegen thyreoidale Peroxidase (ein Schilddrüsenenzym; kurz TPO-Ak, Anti-TPO), Thyreoglobulin-Antikörper (TgAK, Anti-TG) [...] und TSH-Rezeptor-Antikörper (TRAK)“. Hinzu kommt ein neuer, empfindlicherer TRAK-Test, über den sogenannte TRAKhuman-Antikörper untersucht werden können (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820; Merck GesmbH 2010, Seite 15).

Die Tabelle veranschaulicht die Normbereiche, wobei die Werte von Labor zu Labor leicht abweichen können:

Hormon	Referenzbereich
TSH	0,4-4,0 mU/l
T4	5,5-11,0 µg/dl
freies T4 (fT4)	0,8-1,8 ng/dl
T3	0,9-1,8 ng/ml
freies T3 (fT3)	3,5-8,0ng/l

Tabelle 2: Normbereiche der Schilddrüsenwerte

### 4.3.3 Sonographie

Die Sonographie ist eines der wichtigsten bildgebenden Verfahren für die Untersuchung der Schilddrüse. Sie ist schmerzlos und ohne Risiken. Die gute oberflächliche Lage der Schilddrüse erlaubt eine sehr gute und detailreiche Untersuchung. Der/Die Patient/in befindet sich dabei in Rückenlage und streckt den Hals leicht. Um die Größe der Schilddrüse zu bestimmen, wird jeder Schilddrüsenlappen im Quer- und im Längsschnitt rechts und links vermessen. Eine Volumenbestimmung erfolgt und eine Beurteilung der Binnenstruktur, welche entweder echofrei, echoarm, echoreich, echonormal, echokomplex und als homogen oder inhomogen zu unterscheiden ist. Die Echobeurteilung ist vor allem bei Knoten von großer Bedeutung, wobei jedoch die Malignität schwer treffsicher zu diagnostizieren ist. Zusätzliche Untersuchungen wie die Szintigraphie und die Schilddrüsenzytologie verschaffen hier mehr Klarheit. Die Sonographie ist zudem bei der Punktion eines Knotens, welcher durch Palpation nicht nachweisbar ist, sehr wichtig. Am Ende des Ultraschalls wird meistens noch das umliegende Gewebe, vor allem die Halslymphknoten, untersucht (Schmidt 2011, Seite 481; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seiten 46-49).

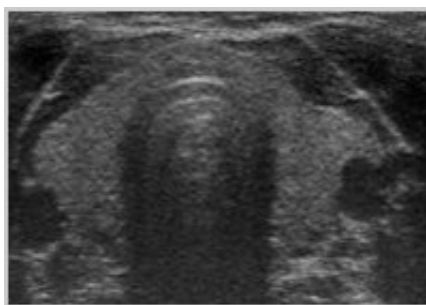


Abbildung 8: Beispiel Sonographie: Querschnitt durch einen normalen Schilddrüsenlappen

#### 4.3.4 Szintigraphie

Die Schilddrüsenszintigraphie ermöglicht Angaben über den globalen und regionalen Funktionszustand des Schilddrüsengewebes. Sie liefert Informationen über Lage, Form und Größe der Schilddrüse in zwei Ebenen. Des Weiteren dient sie der Erkennung von Regionen, welche entweder eine gesteigerte (heiße oder warme Knoten), verminderte oder fehlende Aktivität (kalte Knoten) aufweisen. Warme und heiße Knoten produzieren unkontrolliert Hormone und speichern bei der Szintigraphie daher das Radionuklid sehr intensiv. Kalte Knoten sind inaktiv und die Produktion der Hormone ist nicht gegeben. Sie speichern das Radionuklid somit nicht. „Kalte Knoten mit soliden Anteilen sind karzinomverdächtig“ (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820). Häufigste Indikationen für eine Szintigraphie sind palpatorisch oder sonographisch festgestellte Knoten oder eine Funktionsstörung, vor allem Hyperthyreose. Der Hintergrund der Untersuchung ist, dass funktionell aktive Schilddrüsenzellen Jod aufnehmen. Durch Injektion von radioaktiven Substanzen, wobei hier meist 99-m-Technetium-Perotechnetat verwendet wird, da dies ähnlich dem Jod von der Schilddrüse aufgenommen wird, ist es möglich, die Schilddrüse in einem Szintigramm abzubilden. Fünfzehn Minuten nach der Injektion wird über einen Strahlendetektor (Gamma-Kamera) das Bild erstellt. Technetium-99-m hat eine Halbwertszeit von nur sechs Stunden und stellt daher eine geringe Strahlenbelastung für die Schilddrüse und die anderen Organe dar. „Schilddrüsenhormone, Jodpräparate oder schilddrüsenblockierende Arzneimittel wie z.B. Thyreostatika werden vier Wochen vor der Untersuchung abgesetzt, Untersuchungen mit jodhaltigen Kontrastmitteln nach der Schilddrüsenszintigraphie eingeplant“ (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820). Im Anschluss an die Szintigraphie wird ein Suppressionstest durchgeführt (Suppressionsszintigraphie). Dieser dient zur Abklärung der Aktivität einzelner Knoten und dem Vorhandensein einer Autonomie (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 820; Merck GesmbH 2010, Seite 26; Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seiten 51-53).

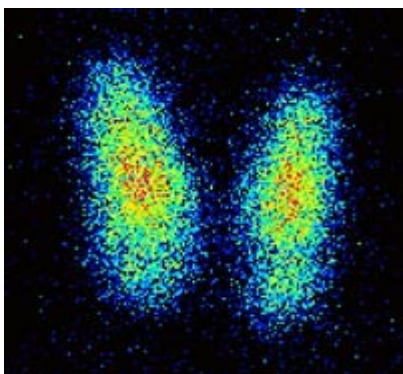


Abbildung 9: Szintigraphie einer normalen Schilddrüse

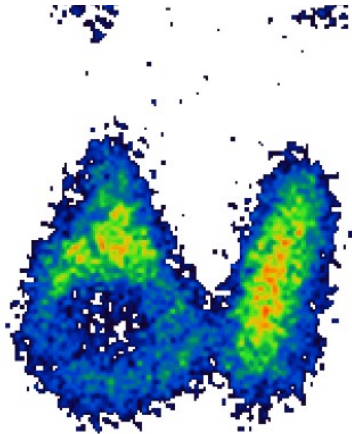


Abbildung 10: Szintigraphie: kalter Knoten (links im Bild)

#### 4.3.5 Feinnadelpunktion

Eine Feinnadelpunktion wird am häufigsten veranlasst, wenn die Frage der Benignität bzw. Malignität eines Knotens zu klären ist. Zudem kann mit Hilfe der Punktion eine Thyreoiditis abgeklärt werden sowie eine Entleerung der Schilddrüsenzyste vorgenommen werden. Für die Untersuchung wird der/die liegende Patient/in am Hals desinfiziert. Da sehr dünne Nadeln verwendet werden, ist eine örtliche Betäubung nicht vonnöten. Die freie Hand des/der Arztes/Ärztin ermittelt entweder mit Hilfe der Palpation oder der Sonographie den Knoten, um die Punktion genau anzusetzen. Das entnommene Gewebe wird zytologisch untersucht. Der/Die Pathologe/in unterscheidet dann folgende Ergebnisse:

- „Negativ (kein Hinweis auf Malignität)
- Histologisch abklärungsbedürftig (follikuläre Neoplasie)
- Positiv (Malignität)“

(Spelsberg, Negele & Ritter 2000, Seite 54)

### 4.4 Erkrankungen und Therapie der Schilddrüse

#### 4.4.1 Hyperthyreose

Die Hyperthyreose stellt eine Überproduktion von Schilddrüsenhormonen dar. „Sie äußert sich in Gewichtsabnahme durch krankhaft erhöhten Grundumsatz, Erhöhung der Körpertemperatur, Steigerung der Herzarbeit durch beschleunigte Herzfrequenz und erhöhte Schlagkraft, Schlaflosigkeit und innerer Unruhe, feinschlägigem Händezittern und gelegentlich auch Durchfall“ (Huch & Jürgens 2011, Seite 226). Grund für eine

Hyperthyreose ist meist eine Überfunktion der Schilddrüse selbst (primäre Hyperthyreose), welche die Folge eines autonomen Adenoms oder einer Morbus Basedow Erkrankung ist. Das autonome Adenom ist ein gutartiger Schilddrüsentumor, welcher ungehemmt Thyroxin und Trijodthyronin produziert, da er nicht mehr unter der Kontrolle der Hypophyse steht. Morbus Basedow hingegen ist eine Autoimmunerkrankung, bei der eine abnorme Stimulierung der Hormonproduktion stattfindet. Dies erfolgt durch zirkulierende Autoantikörper, die an den TSH-Rezeptor binden. Morbus Basedow Patienten/innen haben neben den typischen Symptomen der Hyperthyreose ein- oder beidseits hervortretende Augen. Die sekundäre Hyperthyreose ist im Vergleich zur primären Hyperthyreose selten. Sie passiert „[...] infolge eines TSH-sezernierenden Adenoms der Hypophyse oder einer ektopen TSH-Produktion“ (Krams et al. 2013, Seite 500). Für die Hemmung der übermäßigen Produktion der Schilddrüsenhormone stehen Thyreostatika zur Verfügung. Die gängigsten sind Carbimazol, Thiamazol und Propylthiouracil. Abhängig von der Grunderkrankung wird die weitere Behandlung, entweder weitere Thyreostatika, Operation oder Radiojodtherapie, entschieden (Huch & Jürgens 2011, Seite 226; Krams et al. 2013, Seite 500; Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 822).

#### **4.4.2 Hypothyreose**

Die Hypothyreose stellt ein Zuwenig an Schilddrüsenhormonen dar und besitzt die umgekehrten Symptome der Hyperthyreose. „Am auffälligsten sind dabei meist die Gewichtszunahme, ein teigig-verschwollenes Äußeres durch Verdickung der Haut, Verstopfung, Kälteempfindlichkeit, ständige Müdigkeit und geistige Verlangsamung“ (Huch & Jürgens 2011, Seite 226). Weitere Symptome bilden die Apathie sowie ein verlangsamter Herzschlag. Grund für eine Hypothyreose ist der Verlust von funktionstüchtigem Schilddrüsenengewebe (primäre Hypothyreose). Dies erfolgt beispielsweise nach einer Operation oder Bestrahlung der Schilddrüse. Eine weitere Möglichkeit bildet die Atrophie der Schilddrüse, welche häufig mit entzündlichen Schilddrüsenerkrankungen wie der Hashimoto-Thyreoiditis oder der Thyreoiditis Riedel verbunden ist. Von Bedeutung für die Entstehung einer Hypothyreose sind vor allem auch Hormonsynthesestörungen, welche in den meisten Fällen auf Grund eines Jodmangels entstehen. Bei einem angeborenen Schilddrüsenhormonmangel kommt es neben den bereits erwähnten Symptomen zu einer irreversiblen Verzögerung der körperlichen und geistigen Entwicklung. Bei der sekundären Hypothyreose liegt ein Mangel an TSH vor, welcher beispielsweise durch ein Hypophysenadenom entstehen kann. Um einer Hypothyreose entgegen zu steuern, steht in der

Behandlung die Gabe von Schilddrüsenhormonen im Vordergrund. Die meistgebrauchte Substanz ist Euthyrox (Huch & Jürgens 2011, Seite 226; Krams et al.2013, Seite 500; Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 824).

#### 4.4.3 Struma

Unter dem Begriff „Struma“ versteht man eine Vergrößerung der Schilddrüse, welche auch als Kropf bezeichnet wird. Die Vergrößerung kann entweder gleichmäßig (Struma diffusa) oder knotig (Struma nodosa) sein. Der häufigste Grund für ein Struma ist Jodmangel, da etwa 90% aller Schilddrüsenvergrößerungen darauf zurückzuführen sind. Zu wenig Jod führt zu einem Mangel an T3 und T4, wodurch die TSH-Ausschüttung erhöht und ergo die Schilddrüse vergrößert wird. Meistens kann ein Kropf medikamentös behandelt werden. „Führt die Struma jedoch durch Druck auf Luft- oder Speiseröhre zu erheblichen Beschwerden wie etwa Luftnot oder Schluckstörungen oder besteht der Verdacht auf eine maligne Entartung eines Schilddrüsenknotens (Schilddrüsenkarzinom), muss sie operativ entfernt werden“ (Huch & Jürgens 2011, Seite 225). Eine weitere Möglichkeit der Behandlung bietet die Radiojodtherapie, welche vor allem bei Rezidivstruma eingesetzt wird. Zur Unterstützung der Behandlung von Struma ist jodiertes Speisesalz sehr wichtig. Auch der Kauf von jodierten Produkten sowie die Einnahme von Jodid-Tabletten sind sinnvoll. Vor allem in der Schwangerschaft muss auf eine genügende Jod-Einnahme geachtet werden (Huch & Jürgens 2011, Seite 225; Krams et al 2013, Seiten 500-501; Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 821).

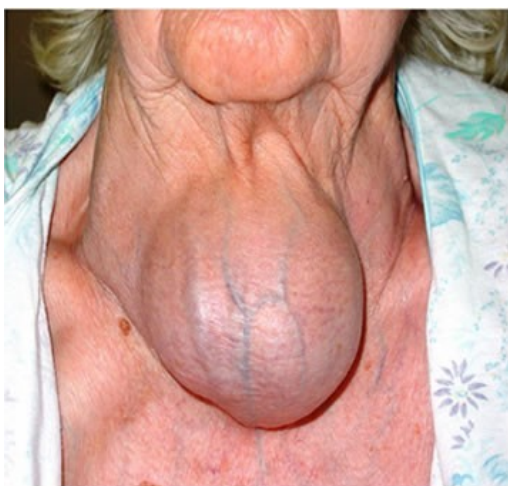


Abbildung 11: Struma

#### 4.4.4 Schilddrüsenentzündung (Thyreoiditis)

Es existieren verschiedene Formen der Schilddrüsenentzündung, wobei drei davon klinisch relevant und durch histologische Befunde gekennzeichnet sind. Die wichtigsten drei Formen (Krams et al. 2013, Seiten 501-502):

- Die chronisch lymphozytäre Thyreoiditis (Hashimoto-Thyreoiditis): schleichender Beginn, lange Zeit unbemerkt, Erkennen der Erkrankung durch Hypothyreose erst im fortgeschrittenen Stadium
- Die granulomatöse Thyreoiditis (Thyreoiditis de Quervain): akutes Krankheitsbild mit Fieber und Druckschmerz, anfänglich Hyperthyreose und anschließend Hypothyreose, spontanes Ausheilen der Erkrankung
- Die chronisch fibrosierende Thyreoiditis (Thyreoiditis Riedel; eisenharte Struma Riedel): starke Fibrosierung der Schilddrüse, Einengung der Trachea bis hin zu Dyspnoe

#### 4.4.5 Schilddrüsentumore

Schilddrüsentumore sind entweder benigne oder maligne (Krams et al. 2013, Seite 503).

Benigne Tumore sind gutartige Tumore der Schilddrüse und werden auch als Schilddrüsenadenome bezeichnet. Sie gehen von den Thyreozyten, also vom Follikel­epithel aus und sind durch eine Kapsel scharf gegen das umliegende Gewebe abgegrenzt. In der Szintigraphie erscheinen benigne Tumore meist als kalte Knoten, welche oft keine Hormone bilden. Sind diese hormoninaktiv, entstehen keine klinischen Symptome, wohingegen hormonaktive benigne Tumore eine Hyperthyreose hervorrufen können.

Schilddrüsenadenome sind vor allem im mittleren Lebensalter präsent, wobei Frauen 7-mal häufiger erkranken als Männer (Krams et al. 2013, Seite 503).

Die Behandlung von benignen Tumoren erfolgt durch Thyreostatika, Operation oder Radiojodtherapie (Achermann 2008).

Maligne Tumore sind bösartige Tumore der Schilddrüse und werden auch als Schilddrüsenkarzinome bezeichnet. Sie gehen vom Epithel oder von den C-Zellen aus. Die wichtigsten histologischen Subtypen des Schilddrüsenkarzinoms:

- Das **papilläre Schilddrüsenkarzinom** ist der häufigste Krebs der Schilddrüse und kommt zwischen dem 20. und 50. Lebensjahr vor, wobei auch Kinder betroffen sein

können. Der Grund für das Entstehen ist unklar, wobei zu beachten ist, dass radioaktive Bestrahlung sowie genetische Faktoren bei der Tumorgenese von Bedeutung sind. Beim papillären Schilddrüsenkarzinom kommt es zu einer frühen Bildung von Metastasen, vor allem in den regionalen Lymphknoten. Die Prognose ist dennoch sehr gut (Krams et al. 2013, Seiten 503-504).

- Das **follikuläre Schilddrüsenkarzinom** entsteht rein follikulär und deckt ca. 15% aller Schilddrüsenkarzinome ab. Betroffen sind meist über 40-Jährige. Der Grund für das Entstehen ist umstritten und die Auswirkungen von radioaktiver Bestrahlung sind nicht genau abgeklärt. Follikuläre Schilddrüsenkarzinome bilden ihre Metastasen hämatogen in das Skelettsystem (Krams et al. 2013, Seite 504).
- Das **medulläre Schilddrüsenkarzinom** entsteht in den C-Zellen der Schilddrüse und entspricht weniger als fünf Prozent der Schilddrüsenkarzinome. Es kann entweder sporadisch circa um das 50. Lebensjahr herum oder familiär bereits ab dem 20. Lebensjahr auftreten. Medulläre Karzinome bilden ihre Metastasen in regionalen Lymphknoten, Lunge, Leber und Knochen (Krams et al. 2013, Seiten 504-505).
- Das **anaplastische Schilddrüsenkarzinom** ist eine sehr undifferenzierte und aggressive Form des Schilddrüsenkarzinoms, welche schnell zum Tode führt. Sie macht etwa 10% aller Schilddrüsenkarzinome aus und Erkrankte sind meist über 60 Jahre alt. Die anaplastische Form entsteht entweder de novo oder entwickelt sich aus einem papillären oder follikulären Tumor (Krams et al. 2013, Seite 505).

Neben den Subtypen können noch Lymphome der Schilddrüse sowie Metastasen entstehen. Schilddrüsenkarzinome kommen bevorzugt in der dritten und vierten Lebensdekade vor. Die Prognose hängt stark von dem Karzinomtyp und der Differenzierung des Tumorgewebes ab. Die Feinnadelpunktion dient zur Abklärung von Knoten, wobei die zytologische Untersuchung nicht immer eine finale Klärung bietet, da kein Ergebnis im Hinblick auf die Kapsel geliefert werden kann. Generell sind bei allen Typen des Schilddrüsenkarzinoms Frauen häufiger betroffen als Männer (Krams et al. 2013, Seiten 503-505).

Die Behandlung von bösartigen Tumoren erfolgt durch eine vollständige Thyreoidektomie sowie durch eine Entfernung der regionalen Lymphknoten. Anschließend findet eine Radiojodtherapie statt. Ein lebenslanges Einnehmen von Schilddrüsenhormonen ist erforderlich (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 824).

## 5 Auswirkungen radioaktiver Substanzen auf die Schilddrüse

### 5.1 Negative Auswirkung

Bereits Fritz-Niggli (1991, Seiten 118-119, 192) erkannte, dass Atomenergie negative Auswirkungen auf die Schilddrüse haben kann. Beim Erwachsenen kommt es nach Dosen von 10 bis 14 Gy zu einer Funktionsstörung wie einer Unterfunktion der Schilddrüse, wohingegen bei Kindern bereits 7-14 Gy ausreichen. Des Weiteren ist die Schilddrüse das wohl strahlenempfindlichste Organ.

Statistik Austria (2013) verzeichnet eine Krebsinzidenz des Schilddrüsenkarzinoms nach ICD-Klassifikation C-73 pro Jahr in Österreich. 88 Männer erlitten im Jahre 1983 ein Schilddrüsenkarzinom, wobei im Jahre 2011 bereits 265 Männer betroffen waren. Bei den Frauen wurden 255 im Jahre 1983 und 658 Betroffene im Jahre 2011 verzeichnet. Diese Zahlen zeigen, dass ein erheblicher Anstieg an Inzidenzen des Schilddrüsenkrebses festzustellen ist.

Der Fachverband für Strahlenschutz e.V. (2008, Seite 178) erklärt, dass bei Unfällen in Kernkraftwerken die Möglichkeit der Abgabe von radioaktivem Jod besteht, welches über Luft, Pflanzen, Boden und Nahrung in den Körper des Menschen gelangen kann. Erreicht das radioaktive Jod die Schilddrüse, so kann es zur Induktion von Schilddrüsenkrebs führen.

Die bisher vorhandenen Studien handeln großteils vom „Reaktorunfall in Tschernobyl“ und wurden daher für diese Arbeit näher ins Auge gefasst. Wie bereits im Kapitel 3.4.1 erklärt, ereignete sich im April 1986 ein Reaktorunglück mit großen Auswirkungen in Tschernobyl. Die gesundheitlichen Konsequenzen wurden lange Zeit geheim gehalten und „schön“ geredet. Beispielsweise war im Bericht eines Chefarztes der Abteilung Strahlenmedizin im Staatlichen Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR zu lesen, dass der Anstieg an Schilddrüsenkrebserkrankungen nicht auf die radioaktive Strahlung, sondern auf psychosomatische Veränderungen und andere Lebensgewohnheiten zurückzuführen ist. Die IAEA hingegen gab in ihrem Bericht im Jahr 1991 folgende Ergebnisse des Internationalen Tschernobyl-Projekts an: „Die Kinder, die untersucht wurden, waren im allgemeinen gesund [...]. Die Daten zeigten keinen deutlichen Anstieg bei Leukämie und Schilddrüsenkrebs seit dem Unfall“ (Pflugbeil 2006, Seite 83). Diese Aussagen von Fachleuten führten dazu, dass es zu keiner frühen und gezielten medizinischen Hilfe kam. Im Jahr 1990 gelangten erste Informationen über Schilddrüsenkrebserkrankungen in den Westen. Eine Ärztin berichtete

von durch Strahlung induziertem Schilddrüsenkrebs, aber auch von anderen Erkrankungen der Schilddrüse wie Schilddrüsenknoten, Autoimmun-Thyreoiditis und Hypothyreose (Pflugbeil 2006, Seite 83).

Ron (2007, Seite 502) berichtet, dass Menschen in den schlimm betroffenen Gebieten der Ukraine, Weißrussland und Russland radioaktivem Jod, speziell Jod-131 ausgesetzt waren. Dies führte zu einem erheblichen Anstieg der Inzidenz von Schilddrüsenkrebserkrankungen. Vor allem Kinder und Jugendliche waren stark davon betroffen. Insgesamt, so Ron, kam es zu einer Freisetzung von etwa 1,760 PBq von Jod-131 in die Umwelt. Der Wissenschaftliche Ausschuss der Vereinten Nationen zur Untersuchung der Auswirkungen der atomaren Strahlung UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) (2000 zitiert in Ron 2007, Seite 502) erklärt, dass Jod durch innere Exposition über die Einnahme örtlicher Milch sowie durch externe Exposition mittels abgelagerten Radionukliden in der Erde aufgenommen wurde. Bouville et al. (2007, Seite 499) bestätigen dies: die mit Jod-131 kontaminierte Milch war der hauptsächliche Grund für die radioaktive Dosis in der Schilddrüse. Der Verzehr von mit Jod-131 kontaminiertem Blattgemüse, das Einatmen von mit Jod-131 kontaminierter Luft, die Aufnahme von kurzlebigen Radionukliden wie Jod-133 und Te-132 sowie langlebigen Radionukliden wie Cäsium-134 und Cäsium-137 und die äußere Exposition durch Radionuklide in der Umwelt führten zu einer zusätzlichen Aufnahme radioaktiver Stoffe in die Schilddrüse (Bouville et al. 2007, Seite 499). Das Jod-131 wurde dabei vorwiegend in der Schilddrüse konzentriert, wobei die Dosis, welche Kinder und Jugendliche aufnahmen sehr viel höher war, als die der Erwachsenen. Grund dafür ist, dass die Schilddrüsen der Kinder viel kleiner sind und sie zudem mehr Milch konsumieren. So war die aufgenommene Dosis in die Schilddrüse für Kinder zum Zeitpunkt des Reaktorunfalls beispielsweise um das Vierfache höher als bei Erwachsenen. Zudem gibt es aber kontroverse Meinungen über die aufgenommene Schilddrüsendosis beim Reaktorunfall (Ron 2007, Seite 502).

Die Zahlen der Erkrankten sprechen jedoch für sich: Zwischen 1986 und 2002 gab es rund 4.000 Schilddrüsenkarzinome bei Menschen, welche vor dem 15. Lebensjahr der Strahlungsgefahr in Weißrussland, der Ukraine und Russland ausgesetzt waren sowie weitere 1.000 Fälle bei Menschen, welche zwischen dem 15. und dem 17. Lebensjahr Radionuklide aufnahmen (Bennett et al. 2006 und Cardis et al. 2006 zitiert in Ron 2007, Seite 503).

Bereits frühe Studien berichteten von einer Verbindung zwischen der Exposition von radioaktivem Jod und der Inzidenz von Schilddrüsenkrebs. Die Berechnung der

aufgenommenen Dosis stellte jedoch oft ein Problem dar und musste ergo geschätzt werden. So auch in der Studie „Post-Chornobyl thyroid cancers in Ukraine. Report 1: Estimation of thyroid doses“ von Likhtarov et al. 2005: Für 26% der Studienpopulation wurden Messungen von Strahlungsdetektoren herangezogen; die geschätzte Dosis für die restlichen Studienteilnehmer/innen basierte auf Messungen von Personen des gleichen Geschlechts, Alters sowie Wohnorts in der gleichen/ähnlichen Gegend (Ron 2007, Seiten 503-504).

Einen weiteren wichtigen Aspekt von strahlungsinduziertem Schilddrüsenkrebs stellt die wie schon vorher erwähnte große Anfälligkeit von Kindern und Jugendlichen dar. Ihre Schilddrüse ist besonders anfällig für die Krebs erregenden Eigenschaften ionisierender Strahlungen. Man geht davon aus, dass das rasche Zellwachstum der Schilddrüsen von den Kindern dafür verantwortlich ist (Boice 2005, Seiten 703-704). Cardis et al. (2005) untersuchten in ihrer populations-bezogenen Fallkontrollstudie das Risiko, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken nach einer Exposition mit Jod-131 in der Kindheit. Sie untersuchten 276 Fallpatienten/innen mit Schilddrüsenkrebs aus der Region Weißrussland und Russland zwischen 1992 und 1998. Alle, ausgenommen 11 Fallpatienten/innen, hatten ein papilläres Schilddrüsenkarzinom. Die Kontrollgruppe bestand aus 1.300 Teilnehmern/innen, welche an Alter, Geschlecht und Wohnort den Fallpatienten/innen angepasst wurden. Alle Beteiligten waren jünger als 15 Jahre alt, als sich der Unfall in Tschernobyl ereignete. Auch hier wurde die Dosis für jede/n einzelne/n Teilnehmer/in durch Informationen von Wohnort, Nahrungsaufnahme und Jod-Status zur Zeit des Unfalls durch Interviews rekonstruiert. Die Dosen der Schilddrüse, welche aus Jod-131, kurz- und langlebigem Radiojod und externer Exposition bestanden, wurden geschätzt, wobei die mittlere Dosis in Weißrussland um das 10fache höher war als in Russland. Cardis et al. (2005) stellten zudem fest, dass vor allem eine Aufnahme von Jod-131, aber auch von anderen Radionukliden in den Körper in der Kindheit im direkten Zusammenhang mit Schilddrüsenkarzinomen steht. Das Risiko erhöht sich hierbei linear bei einer Dosis von bis zu 2 Gy. Ist die Dosis hingegen höher als 2 Gy, sinkt das Risiko, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken. Dies trifft auf nahezu alle geschätzten Dosen zu. Des Weiteren entdeckten Cardis et al. (2005), dass das Risiko, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken in den jodreichen Regionen niedriger war, als in den jodarmen Regionen. Die Personen, welche Nahrungsergänzungsmittel, wie Kaliumiodid kurz nach oder erst Jahre nach der Reaktorkatastrophe zum Schutz erhielten, hatten ein geringeres Risiko, an strahleninduziertem Schilddrüsenkrebs zu erkranken, als Personen, welche keines erhielten. Die Ergebnisse von Cardis et al. sind jedoch vorsichtig zu interpretieren, da eventuell Unsicherheiten in den Schätzungen der Dosis und mögliche Bias die Ergebnisse

verfälschen (Cardis et al. 2005, Seiten 724-729; Ron 2007, Seite 504). Boice (2005, Seite 703) bestätigt, dass Vorsicht geboten ist, wenn man beispielsweise die Ergebnisse von Cardis et al. (2007) generalisieren und auf andere Kinder in jodarmen Gebieten übertragen will. Außerdem wäre es möglich, dass das erhöhte Strahlungsrisiko in jodarmen Regionen im Vergleich zu jodreichen Regionen durch eine Dysfunktion der Schilddrüse zu erklären ist. Die Schilddrüsen von Kindern, welche in jodarmen Regionen leben, erfahren viel mehr Zellteilung und Zellwachstum als die der Kinder aus jodreichen Regionen. Dies könnte ein Grund sein für das beobachtete erhöhte Risiko (Boice 2005, Seite 704).

Die Kohortenstudie von Tronko et al. (2006, Seiten 897-903) untersucht die Schilddrüsenkrebskrankungen in der Ukraine. Insgesamt wurden 32.385 Menschen, welche zum Zeitpunkt des Reaktorunfalls jünger als 18 Jahre alt waren, zwischen 1998 und 2000 eingeladen, mittels Ultraschall und Palpation die Schilddrüse zu untersuchen. Tatsächlich nahmen 44% (13.127) der Menschen an der Studie teil. Um die radioaktiven Dosen für die Schilddrüsen zu bestimmen, erfolgten auch hier Schätzungen mit Hilfe von Messungen kurz nach dem Unfall sowie Interviews. 45 Schilddrüsenkarzinome wurden diagnostiziert, wobei ein starker monotoner linearer Zusammenhang zwischen Dosis und Schilddrüsenkrebs bestand. Darüber hinaus waren 75% der Krebsfälle auf die Strahlung von Tschernobyl zurückzuführen. Das Risiko für Frauen, an Schilddrüsenkrebs zu erkranken, war höher als das Risiko für Männer. Keinen Hinweis lieferte die Studie auf Zusammenhänge mit Kropferkrankungen. Limitationen sind die Nicht-Teilnahme von 56% der geladenen Teilnehmer/innen, das Verwenden von „Odds Ratio“ und Unsicherheiten in den Schätzungen der Dosis. Ähnlich den Ergebnissen von Cardis et al. (2005) sind die Schätzungen von Tronko et al. (2006) bzgl. dem erhöhten Risiko in jodarmen Regionen an Schilddrüsenkrebs zu erkranken. Die Studie liefert zudem Hinweise auf die Vorsicht beim Übertragen der Ergebnisse auf weitere ähnliche Reaktorunfälle wegen der potentiellen Unterschiede in der Besonderheit der Zusammensetzung der Radionuklide (Ron 2007, Seite 505; Tronko et al. 2006, Seiten 897-903).

Trotz der bereits gewonnenen Erkenntnisse aus zahlreichen Studien stehen immer noch viele Fragen offen. Zwei Lücken stellen die geringe Information über die Auswirkungen von Tschernobyl bei betroffenen Erwachsenen und sehr beschränkter Information über die Folgen bei Exposition in der Gebärmutter dar. Des Weiteren bedarf es mehr Forschung über histologische, klinische und molekulare Eigenschaften von zukünftigen Schilddrüsenkarzinomen (Ron 2007, Seite 509).

## **5.2 Positive Auswirkung**

Der Nutzen der Atomenergie für die Schilddrüse besteht definitiv in den nuklearmedizinischen Untersuchungs- und Therapieverfahren. Die Nuklearmedizin beschäftigt sich mit dem Einsatz radioaktiver Substanzen sowie kernphysikalischer Verfahren, um Diagnosen zu stellen. Hierbei werden nur ganz geringe radioaktive Dosen verwendet, welche auch als „Spürdosis“ bzw. „Tracer“ bekannt sind. Radioaktive Substanzen finden außerdem Anwendung in der Therapie, wobei jedoch im Vergleich zur Diagnostik mehr Radioaktivität benötigt wird. „Da der menschliche Körper radioaktive Isotope eines Elements genauso aufnimmt und verarbeitet wie nicht-radioaktive, können Stoffwechselfvorgänge untersucht werden, ohne die Tätigkeit der untersuchten Organe zu beeinträchtigen“ (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 578; Merck GesmbH 2004, Seite 12). Die häufigsten nuklearmedizinischen Untersuchungsverfahren werden in den Unterkapiteln näher erläutert.

### **5.2.1 Szintigraphie**

Die Szintigraphie der Schilddrüse wird bereits im Kapitel 4.3.4 erklärt.

### **5.2.2 Radiojodtherapie**

Die Radiojodtherapie ist eine nuklearmedizinische Therapieform, welche bei bestimmten Hyperthyreosen und beim papillären sowie beim follikulären Schilddrüsenkarzinom angewendet wird. Gelangt Jod von außen in den menschlichen Körper, so wird es fast ausschließlich im Gewebe der Schilddrüse gespeichert und die restlichen Organe erreicht fast kein Jod. Bei der Radiojodtherapie wird daher von außen radioaktives Jod oral verabreicht. Das radioaktive Jod, das dafür verwendet wird, ist das Jod-131, mit welchem standardmäßig von etwa 1,8 bis 3,7 GBq therapiert wird. Gelangt das Jod-131 nun in die Schilddrüse, bestrahlt und zerstört es die Schilddrüse bzw. die Schilddrüsenkarzinome, welche Jod speichernd sind, und deren Metastasen. Die Strahlenbelastung im übrigen Körper ist dabei jedoch minimal (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 825; Schicha & Schober 2000, Seite 270).

Erfolgt die Indikation der Radiojodtherapie wegen eines Schilddrüsenkarzinoms, bedarf es vor der Durchführung der Therapie einer vollständigen Thyreoidektomie. Nach der Operation dürfen bis zur Therapie keinerlei Schilddrüsenhormone oder Jodpräparate eingenommen werden. Grund dafür ist, dass die Metastasen, wenn genügend Jod in der Restschilddrüse

vorhanden ist, nur wenig oder gar kein radioaktives Jod aufnehmen. Durch die Nichteinnahme von Hormonen und Jod gelangen die Patienten/innen in eine Unterfunktion mit erhöhten TSH- Werten. Vor der Radiojodtherapie ist ein Radiojodtest durchzuführen, welcher die Berechnung der Dosis ermöglicht. Hierfür wird nach Gabe von radioaktivem Jod eine Schilddrüsen- bzw. Ganzkörperszintigraphie durchgeführt, um den Jodumsatz und die Metastasenlokalisierung zu berechnen. Nach der Berechnung der Dosis erhält der/die Patient/in die für ihn/sie passende Menge in Form einer Kapsel, welche geschluckt wird. Abhängig von der Größe der Restschilddrüse bleiben die Patienten/innen drei bis sieben Tage in einem Therapiezimmer isoliert. Die Schilddrüsenunterfunktion, welche für die Therapie erforderlich ist, ist verantwortlich für die typischen Symptome: Müdigkeit, Obstipation, Kältegefühl, Gewichtszunahme, Depressionen etc. Die Verweildauer im Krankenhaus dauert so lange, bis die von den Patienten/innen ausgehende Radioaktivität unter den gesetzlichen Grenzwert gefallen ist. Nach der Radiojodtherapie ist für sechs bis zwölf Monate auf eine zuverlässige Empfängnisverhütung zu achten. Die Durchführung der Radiojodtherapie findet in speziellen nuklearmedizinischen Stationen mit Strahlenschutz statt (Lektorat Pflege & Menche 2011, Seite 825; Selbsthilfegruppe für Schilddrüsenkarzinom-PatientenInnen Österreich). In ganz Österreich gibt es drei Stationen (Wien, Klagenfurt und Innsbruck), welche stationäre Radiojodtherapien durchführen.

## **6 Schlussfolgerung und Diskussion**

Die Auswirkungen von radioaktiven Substanzen auf die Schilddrüse, seien diese nun positiv oder negativ, sind enorm. Die Schilddrüse zählt zu den strahlenempfindlichsten Organen und reagiert bereits bei minimalen Dosen.

Positiv zu sehen sind die Fortschritte der Nuklearmedizin in den vergangenen Jahren. Mit Hilfe radioaktiver Substanzen ist es möglich, Therapie und Diagnostik von Schilddrüsenerkrankungen zu vereinfachen. Vor allem die Szintigraphie und die Radiojodtherapie sind zwei wichtige, nicht wegdenkbare Möglichkeiten.

Dennoch sind die negativen Auswirkungen radioaktiver Substanzen auf die Schilddrüse sehr groß. Da das Organ dermaßen empfindlich ist, kann es bei Kontakt mit Radioaktivität zu Funktionsstörungen kommen oder sich Krebs entwickeln. Der Extremfall Tschernobyl zeigt deutlich, welche immense Folgen ein Reaktorunglück haben kann. Über 1.000 Schilddrüsenkarzinom-Patienten/innen wurden verzeichnet und sowohl Struma als auch

Hyperthyreose und Hypothyreose wurden verstärkt vermerkt, in den betroffenen als auch in den umliegenden Gebieten („Washouts“). Trotz dieses eindeutig negativen Resultats wird das Ausmaß nach mittlerweile 27 Jahren nach der Katastrophe weiterhin von einigen Menschen, darunter auch Medizinern/innen und Menschen in Führungspositionen als „harmlos“ dargestellt und verstanden. Eine Menge an Aufklärungsarbeit wäre zu leisten. Sehr kritisch meint Pflugbeil (2006, Seite 75): „Bis heute sind wir mit sehr widersprüchlichen Positionen über die gesundheitlichen Folgen der Freisetzung radioaktiver Isotope in Tschernobyl konfrontiert, die alle beanspruchen, wissenschaftlich zu sein.“

Neue Forschung ist notwendig zur expliziten Klärung weiterer Fragen. Beispielsweise wie sich radioaktive Substanzen auf die Schilddrüse von Erwachsenen auswirken, da in den bisherigen Studien meist nur die Schilddrüsen von Kindern und Jugendlichen behandelt worden sind.

Obwohl sich ein weiteres Reaktorunglück in sehr großem Ausmaß in Fukushima ereignete und größtenteils ein Umdenken in der Bevölkerung bzgl. der Atomenergie stattgefunden hat, werden weltweit weiterhin Atomkraftwerke gebaut und in Betrieb genommen. Entgegen aller wissenschaftlicher Belege und Warnungen für die gesundheitlichen Schäden, verursacht durch radioaktive Substanzen, investieren zahlreiche Politiker/innen weiterhin in nukleare Energie, anstatt umzudenken und ihr Geld in innovative ökologische und vor allem weniger gesundheitsschädigende Energieformen zu stecken.

Abschließend ein Zitat aus Buttlar und Roth (1990, Seite 195):

„Wie unsere Erkenntnisse zum Wohl der Menschheit eingesetzt werden, hängt nur von uns selbst ab.“

## 7 Literaturangaben

### Literaturverzeichnis

- Achermann, S 2008, ‚Schilddrüsentumor‘, *eesom – Ihr Gesundheitsportal*, viewed 25.11.2013, <http://www.eesom.com/go/YAYR2V9E7WZFUPAVRPSELMPASU8KOJAB>
- Alexijewitsch, S (ed.) 2006, *Tschernobyl – Eine Chronik der Zukunft*, trans. I Kolinko, BvT Berliner Taschenbuch Verlags GmbH, Berlin.
- Boice, JD Jr. 2005, ‚Radiation-induced Thyroid Cancer – What’s New?‘, *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 97, no. 10, Seiten 703-705.
- Bouville, A, Likhtarev, IA, Kovgan, LN, Minenko, VF, Shinkarev, SM & Drozdovitch, VV 2007, ‚Radiation dosimetry for highly contaminated Belarusian, Russian and Ukrainian populations, and for less contaminated populations in Europe‘, *Health Physics*, vol. 93, no. 5, Seiten 487-501.
- Brandner, J 2012, *Reportage Japan – Außer Kontrolle und in Bewegung*, Picus Verlag Ges.m.b.H., Wien.
- Bruker, MO & Gutjahr, I 2000, *Störungen der Schilddrüse*, 3. Auflage, emu-Verlags-GmbH, Lahnstein.
- Buttlar, H v. & Roth, M 1990, *Radioaktivität – Fakten, Ursachen, Wirkungen*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Cardis, E, Kesminiene, A, Ivanov, V, Malakhova, I, Shibata, Y, Khrouch, V, Drozdovitch, V, Maceika, E, Zvonova, I, Vlassov, O, Bouville, A, Goulko, G, Hoshi, M, Abrosimov, A, Anoshko, J, Astakhova, L, Chekin, S, Demidchik, E, Galanti, R, Ito, M, Korobova, E, Lushnikov, E, Maksioutov, M, Masyakin, V, Nerovnia, A, Parshin, V, Parkshkov, E, Piliptsevich, N, Pinchera, A, Polyakov, S, Shabeka, N, Suonio, E, Tenet, V, Tsyb, A, Yamashita, S & Williams, D 2005, ‚Risk of Thyroid Cancer After Exposure to Iod-131 in Childhood‘, *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 97, no. 10, Seiten 724-732.
- Der Standard 2013, viewed 27.11.2013, <http://derstandard.at/>
- Fachverband für Strahlenschutz e.V. 2008, *Fragen des radiologischen und nuklearen Notfallschutzes aus medizinischer Sicht*, TÜV Media GmbH, Köln.

Faller, A & Schünke, M 2008, *Der Körper des Menschen – Einführung in Bau und Funktion*, 15., komplett überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Fritz-Niggli, H 1991, *Strahlengefährdung/Strahlenschutz – Ein Leitfaden für die Praxis*, 3., überarbeitete und ergänzte Auflage, Verlag Hans Huber, Bern, Stuttgart, Toronto.

Geringer, T 2001, *Grundlagen des Strahlenschutzes und der Dosimetrie*, Abteilung Strahlenschutz, Grundausbildung für Strahlenschutzbeauftragte, Austrian Research Center, Seibersdorf.

Gesund Co 2009, *Medizinlexikon: Jodmangel*, viewed 22.11.2013, <http://gesund.co.at/medizinlexikon-jodmangel-11390/>

Hano, J 2011, *Das Japanische Desaster – Fukushima und die Folgen*, Verlag Herder GmbH, Freiburg im Breisgau.

Horn, A, Vosberg, H & Wagner, H 1999, *Schilddrüse konkret: Diagnostik und Therapie der Schilddrüsenerkrankungen*, 2., neubearbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York.

Hotze, LA 2008, *Schilddrüse: mehr wissen- besser verstehen*, 1. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Huch, R & Jürgens, KD 2011, *Mensch- Körper- Krankheit*, 6. Auflage, Elsevier GmbH, Urban und Fischer Verlag, München.

Internationale Atomenergiebehörde (IAEA) Wien 2013, *Operational and Long-Term Shutdown Reactors*, viewed 22 July 2013, <http://dx.doi.org/10.1787/nuclear-gen-table-2012-1-en>

Koepp, R & Koepp-Schewyrina, T 1996, *Tschernobyl – Katastrophe und Langzeitfolgen*, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig und vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Stuttgart, Leipzig, Zürich.

Krams, M, Frahm, SO, Kellner, U & Mawrin, C 2013, *Kurzlehrbuch Pathologie*, 2., aktualisierte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Küppers, C 2012, ‚Radioaktivität – Strahlung und ihre Folgen für den Menschen‘, in JM Neles & C Pistner (ed.), *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seiten 41-62.

Laufs, P 2013, *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke – Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Lektorat Pflege & Menche, N 2011, *Pflege heute: Lehrbuch für Pflegeberufe*, 5., vollständig überarbeitete Auflage, Elsevier GmbH, Urban und Fischer Verlag, München.

Leopold, S 2012, *Schilddrüsenerkrankungen – Unterschätzte Volkskrankheit?*, Diplomarbeit, Karl-Franzens-Universität, Graz.

Maier, KF 2001, *Probleme mit der Schilddrüse: Jodmangelkropf, Überfunktion, Basedow'sche Erkrankung, Unterfunktion, Ursache und Behandlung*, Verlag des Österreichischen Kneippbundes Ges.m.b.H., Leoben.

Merck GesmbH 2004, *Radiojodtherapie mit Jod-131 bei Schilddrüsenerkrankungen*, 2. korrigierte Auflage, Merck Serono, Wien.

Merck GesmbH 2010, *Schilddrüse OK – Ihr Schilddrüsen-Ratgeber*, Merck Serono, Wien.

Merck Serono, SA 2011, *Jodmangel*, viewed 22.11.2013, <http://www.thyroidweek.com/de/thyroid-and-iodine-deficiency-a-crucial-iodine-nutrient.html?CSRT=5695272227106724176>

Neles, JM 2012, ‚Rückblick – Von den Anfängen bis heute‘, in JM Neles & C Pistner (ed.), *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seiten 1-19.

Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) France 2013, *Nuclear energy generation and nuclear power plants*, viewed 22 July 2013, [http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/nuclear-energy-generation-and-nuclear-power-plants-2012-1\\_nuclear-gen-table-2012-1-en](http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/nuclear-energy-generation-and-nuclear-power-plants-2012-1_nuclear-gen-table-2012-1-en)

Pflugbeil, S 2006, ‚Alle Folgen liquidiert? – Die gesundheitlichen Auswirkungen von Tschernobyl‘, in Mez, L, Gerhold, L & de Haan, G (ed.), *Atomkraft als Risiko – Analysen und Konsequenzen nach Tschernobyl*, Peter Lang GmbH Internationaler Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main, Seiten 75-102.

Pistner, C 2012, ‚Energie der Kerne – Physikalische Grundlagen der Kernenergienutzung‘, in JM Neles & C Pistner (ed.), *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seiten 21-39.

Pistner, C & Küppers, C 2012, ‚Tschernobyl und Fukushima – Unfallablauf und Konsequenzen‘, in JM Neles & C Pistner (ed.), *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seiten 121-142.

Rabitsch, H, Pichl, E, Plantosar, E & Kahr, G 1998, *Lebensmittelkontamination und Strahlenrisiko der Grazer Bevölkerung nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl*, Reaktorinstitut Graz – Verein zur Förderung der Strahlenforschung, Graz.

Ron, E 2007, ‚Thyroid cancer incidence among people living in areas contaminated by radiation from the Chernobyl accident‘, *Health Physics*, vol. 93, no. 5, Seiten 502-511.

Schicha, H & Schober, O 2000, *Nuklearmedizin – Basiswissen und klinische Anwendung*, 4., vollkommen überarbeitete und erweiterte Auflage, F. K. Schattauer Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.

Schilddrüsenpraxis Josefstadt, *Jodbestimmung*, viewed 22.11.2013, <http://www.schilddruesenpraxis.at/diagnose-therapie/jod.html>

Schmidt, G 2011, ‚Schilddrüse‘, in G Schmidt, L Greiner & D Nürnberg, *Sonografische Differenzialdiagnose*, 2., komplett aktualisierte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Selbsthilfegruppe für Schilddrüsenkarzinom-PatientInnen Österreich, *Behandlung*, viewed 27.11.2013, <http://www.selbsthilfegruppe.at/krankheit.php?cat=34>

Silbernagl, S & Despopoulos, A 2007, *Taschenatlas Physiologie*, 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart.

Spelsberg, F, Negele, T & Ritter, MM 2000, *Die Schilddrüse in Klinik und Praxis*, Johann Ambrosius Barth Verlag in MVH Medizinverlage Heidelberg GmbH & Co. KG, Heidelberg.

Statistik Austria 2013, *Krebserkrankungen*, viewed 26.11.2013, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/gesundheit/krebserkrankungen/krebs\\_im\\_ueberblick/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/gesundheit/krebserkrankungen/krebs_im_ueberblick/index.html)

Stolz, W 2005, *Radioaktivität: Grundlagen-Messungen-Anwendungen*, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden.

Streffer, C 2006, ‚Weitere Gesundheitseffekte‘, in Berichte der Strahlenschutzkommission (SSK) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (ed.), *20 Jahre nach Tschernobyl – Eine Bilanz aus Sicht des Strahlenschutzes*, Verlag H. Hoffmann GmbH, Berlin, Seiten 107-113.

Tronko, MD, Howe, GR, Bogdanova, TI, Bouville, AC, Epstein, OV, Brill, AB, Likhtarev, IA, Fink, DJ, Markov, VV, Greenebaum, E, Olijnyk, VA, Masnyk, IJ, Shpak, VM, McConnell, RJ, Tereshchenko, VP, Robbins, J, Zvinchuk, OV, Zablotska, LB, Hatch, M, Luckyanov, NK, Ron, E, Thomas, TL, Voillequé, PG & Beebe, GW 2006, ‚A Cohort Study of Thyroid Cancer and Other Thyroid Diseases After the Chornobyl Accident: Thyroid Cancer in Ukraine Detected During First Screening‘, *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 98, no. 13, Seiten 897-903.

## **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Biologische Wirkung von Strahlung auf den Menschen in Küppers, C 2012, ‚Abb. 3.3 Biologische Wirkung von Strahlung auf den Organismus‘, in JM Neles & C Pistner (ed.), *Kernenergie – Eine Technik für die Zukunft?*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seite 56.

Abbildung 2: Verteilung radioaktiver Elemente über Europa am 29. April 1986 in Laufs, P 2013, ‚Abb. 4.27 Verteilung der Radioaktivität am 29. Apr. 1986‘, *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke – Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seite 151.

Abbildung 3: Effektive Dosis gemessen in mSv im ersten Jahr in Europa in Laufs, P 2013, ‚Abb. 4.28 Effektive Dosis im ersten Jahr in den europäischen Ländern‘, *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke – Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seite 152.

Abbildung 4: Ortsdosisleistung in  $\mu\text{Sv/h}$  im Umfeld von Fukushima in Laufs, P 2013, ‚Abb. 4.47 Strahlenbelastung im Umfeld von Fukushima-Daiichi‘, *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke – Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seite 191.

Abbildung 5: anatomische Darstellung der Schilddrüse im menschlichen Körper,  
<http://www.patientinnenberatung.de/schilddruese.htm>, viewed 16.11.2013

Abbildung 6: Regelkreis der Schilddrüsenhormone,  
<http://home.arcor.de/g.mackenthun/lect/psysom/psysom9.htm>, viewed 20.11.2013

Abbildung 7: Nationaler Jod-Status 2013, <http://www.iccidd.org/>, viewed 22.11.2013

Abbildung 8: Beispiel Sonographie: Querschnitt durch einen normalen Schilddrüsenlappen,  
[http://www.schilddrueseninstitut.at/untersuchung\\_therapie-sonographie.htm](http://www.schilddrueseninstitut.at/untersuchung_therapie-sonographie.htm), viewed 23.11.2013

Abbildung 9: Szintigraphie einer normalen Schilddrüse,  
[http://www.schilddrueseninstitut.at/untersuchung\\_therapie-szintigramm.htm](http://www.schilddrueseninstitut.at/untersuchung_therapie-szintigramm.htm), viewed 24.11.2013

Abbildung 10: Szintigraphie: kalter Knoten (links im Bild), [http://www.praxis-nuklearmedizin.de/?page\\_id=34](http://www.praxis-nuklearmedizin.de/?page_id=34), viewed 24.11.2013

Abbildung 11: Struma, [http://www.st-agatha-krankenhaus.de/Erkrankung\\_der\\_Schilddruese\\_\\_\\_Struma.htm](http://www.st-agatha-krankenhaus.de/Erkrankung_der_Schilddruese___Struma.htm), viewed 24.11.2013

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Freisetzungen von Jod und Cäsium in Fukushima und Tschernobyl in Laufs, P 2013, , Tab. 4.5 Die Jod/Cäsium-Freisetzungen in Fukushima I und Tschernobyl, *Reaktorsicherheit für Leistungskernkraftwerke – Die Entwicklung im politischen und technischen Umfeld der Bundesrepublik Deutschland*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Seite 190.

Tabelle 2: Normbereiche der Schilddrüsenwerte in Merck GesmbH 2010, *Schilddrüse OK – Ihr Schilddrüsen-Ratgeber*, Merck Serono, Wien.