©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg download unter www.biologiezentrum.at

Ber. nat.-med. Ver. Salzburg	Band 11	S. 7 - 23	Salzburg 1996

DOSISBERECHUNGEN IM FALLE EINES REAKTORUNFALLS: EXTERNE UND INTERNE EXPOSITIONSWEGE

WERNER HOFMANN

Institut für Physik und Biophysik, Universität Salzburg, Hellbrunner Str. 34, A-5020 Salzburg, Austria

Abstract

Dose calculations in case of a reactor accident: external and internal exposure pathways

The assessment of doses in the wake of a nuclear accident comprises the determination of the committed dose equivalents resulting from measured exposures and intakes during the first year following the release of radionuclides, and the prediction of the collective effective dose equivalent commitment reflecting the projection of doses to be received in the future from the deposited material. The different pathways contributing to the first-year doses are: (i) external irradiation during the passage of the radioactive cloud, (ii) inhalation of contaminated air, (iii) external irradiation from deposited nuclides, and (iv) ingestion of radionuclides in different food categories. The projected doses for exposures beyond the first year are caused by: (i) external irradiation from radioactive materials deposited on the ground, and (ii) from ingestion of long-lived cesium isotopes.
The equations and parameter values for the calculation of external and internal doses from the different exposure pathways were taken from the UNSCEAR (1988) report and adapted to the specific Austrian situation. In case of an accident, where immediate action is required, effective equivalent doses are computed for the first month (short-term consequences), for the period from the end of the first month to the end of the first year (medium-term consequences), and for the years thereafter (long-term consequences). For risk assessment purposes, the calculated doses for these three periods will be compared to the range of the expected doses as defined by the Austrian authorities in relation to the four stages in a governmental emergency plan.

Key-words: externe Dosimetrie, interne Dosimetrie, Reaktorunfall, Fallout

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

1 Einleitung

Als Folge des Reaktorunfalls von Tschernobyl hat das United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) Richtlinien für die Dosisabschätzung der Bevölkerung nach einem Reaktorunfall herausgegeben (UNSCEAR 1988). In diesen Empfehlungen werden zwei verschiedene Komponenten der Dosisabschätzung unterschieden: (1) die effektive Äquivalentdosis, die aus der Exposition und Aufnahme von Radionukliden während des 1. Jahres nach dem Unfall resultiert, und (2) die kollektive effektive Äquivalentdosis, welche die Bevölkerung durch den Fallout in Zukunft (d.h. nach dem 1. Jahr) erhalten wird (projektierte effektive Äquivalentdosis).
Die verschiedenen Expositionswege, die bei der Dosisberechnung für das 1. Jahr berücksichtigt werden, sind im einzelnen:

1. Externe Bestrahlung durch die vorbeiziehende Wolke,
2. Inhalation von Radionukliden in der kontaminierten Luft,
3. Externe Bestrahlung durch am Boden deponierte Radionuklide, und
4. Ingestion durch Radionuklide.

Da die beiden Dosisbeiträge durch die vorbeiziehende Wolke nur kurz nach dem Reaktorunfall eine Rolle spielen, bezieht sich die Berechnung der projektierten Dosis nach dem Ablauf des 1. Jahres nur mehr auf die folgenden Expositionswege:

1. Externe Bestrahlung durch am Boden deponierte Radionuklide, und
2. Ingestion von Radionukliden.

Im Folgenden werden nun die Gleichungen für die Berechnung der einzelnen Dosisbeiträge vorgestellt. Die hier angegebenen Gleichungen wurden im wesentlichen den UNSCEAR (1988) Empfehlungen entnommen. Die Werte der Koeffizienten dieser Gleichungen beruhen auf Messungen und Abschätzungen der Konsequenzen des Reaktorunfalls von Tschernobyl in verschiedenen europäischen Ländern, bzw. wurden sie, wenn österreichische Untersuchungen vorlagen, durch diese Daten ersetzt.

2 Berechnung der Dosen für das 1. Jahr

2.1 Externe Bestrahlung durch die vorbeiziehende Wolke

Während des Vorbeiziehens der Wolke kontaminierter Luft ist die Bevölkerung kurzzeitig (einige Stunden bis zu wenigen Tagen) einer externen Bestrahlung aus der Wolke ("cloud gamma irradiation") ausgesetzt. In der Praxis kann diese Gammastrahlenkomponente von der Gammastrahlung, die von den bereits auf den Boden deponierten Aktivitäten emittiert wird, meßtechnisch nicht getrennt werden. Die externe Dosis kann aber aus den gemessenen Luftkonzentrationen der verschiedenen gammastrahlenden Nuklide unter Annahme einer unendlich ausgedehnten gleichförmigen Wolke folgendermaßen berechnet werden:

$$H_{E,c}(i) = C_a^*(i)\,\Phi_c(i)\,(1 - F_o) + C_a^*(i)\,\Phi_c(i)\,F_o\,F_s \qquad (1)$$

download unter www.biologiezentrum.at

$H_{E,c}(i)$ ...effektive Äquivalentdosis durch Gammas des Nuklids i aus der Wolke (Sv)
$C_a^*(i)$....integrierte Freiluftkonzentration des Nuklids i (Bq d / m^3)
$\Phi_c(i)$.....effektive Äquivalentdosis pro integrierter Luftkonzentration des Nuklids i (Sv / (Bq d / m^3))
F_o.....Aufenthaltsfaktor im Inneren von Häusern (Bruchteil der in Häusern verbrachten Zeit)
F_s.....Abschirmfaktor des Gebäudes (Verhältnis der Dosisleistung im Inneren / im Freien)

Während sich der erste Term der Gleichung auf die direkte Exposition im Freien bezieht, berücksichtigt der zweite Term (Exposition im Inneren) die Abschirmwirkung in Häusern (Anmerkung: eine mögliche Komponente durch kontaminierte Luft in Räumen wird dabei vernachlässigt).
Die zu messende Variable $C_a^*(i)$ kann entweder durch eine direkte Messung (Filtermessung) oder durch Umrechnung aus gemessenen Bodendepositionsdaten gewonnen werden.
Die von UNSCEAR (1988) empfohlenen Werte für den Aufenthaltsfaktor im Inneren und den Abschirmfaktor des Gebäudes sind: F_o = 0,8 und F_s = 0,2. Aufgrund der unterschiedlichen Bauweise von Häusern kann der Abschirmfaktor aber im Bereich von 0,01 (mehrstöckige Häuser) bis zu 0,7 (Einfamilienhäuser) liegen. Für Österreich wurden folgende Werte angenommen: F_s = 0,3 (Einfamilienhäuser), 0,03 (Wohnblöcke) und 0,05 (urbanes Gebiet).
Die im UNSCEAR (1988) Bericht angegebenen Werte der effektiven Äquivalentdosis pro integrierter Luftkonzentration eines bestimmten Nuklids, $\Phi_c(i)$, sind in Tabelle 1 angeführt.

2.2 Inhalation von Radionukliden

Während der relativ kurzen Zeit zwischen dem Vorbeiziehen der radioaktiven Nuklide (Wolke) und ihrer Deposition am Boden können diese Radionuklide eingeatmet werden. Zwar können deponierte Radionuklide auch später durch Resuspension in die Luft gelangen, ihr Dosisbeitrag kann aber im Vergleich zur externen Dosis und der Ingestionsdosis vernachlässigt werden. Aus den gemessenen Luftkonzentrationen erhält man die Inhalationsdosis durch die Gleichung:

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

$$H_{E,h}(i) = C_a^*(i)\, B\, \Phi_h(i)\, (1 - F_o) + C_a^*(i)\, B\, \Phi_h(i)\, F_o\, F_r \qquad (2)$$

$H_{E,h}(i)$ ...effektive Äquivalentdosis durch Inhalation des Nuklids i (Sv)
$C_a^*(i)$....integrierte Freiluftkonzentration des Nuklids i (Bq d / m^3)
B .....Atmungsrate (m^3 / d)
$\Phi_h(i)$.....Äquivalentdosis pro inhalierter Aktivität des Nuklids i (Sv / Bq)
F_o.....Definition siehe Gleichung (1)
F_r.....Raumluftfilterfaktor (Verhältnis der Konzentration im Inneren / im Freien)

Auch hier bezieht sich der erste Term der Gleichung auf die direkte Exposition im Freien, während der zweite Term (Exposition im Inneren) die verringerte Konzentration der Nuklide in der Atemluft in Häusern berücksichtigt.

Tabelle 1: Externe effektive Äquivalentdosen pro (zeitintegrierte) Luftkonzentration für verschiedene Radionuklide in der Wolke (UNSCEAR 1988).

Radionuklid	Effektive Äquivalentdosis pro Luftkonzentration (nSv pro Bq d / m^3)
^{89}Sr	0,033
^{90}Sr	0,008
^{95}Zr	2,88
^{95}Nb	2,99
^{99}Mo*	1,04
^{103}Ru*	1,81
^{106}Ru*	0,874
^{110m}Ag	10,7
^{115}Cd*	1,39
^{125}Sb	1,61
^{127}Sb	2,55
^{129m}Te*	0,324
^{131m}Te*	2,90
^{131}I	1,44
^{132}Te*	9,78
^{133}I	2,33
^{134}Cs	6,03
^{136}Cs	8,47
^{137}Cs*	2,30
^{140}Ba	0,718
^{140}La	9,26
^{141}Ce	0,293
^{143}Ce	1,01
^{144}Ce*	0,275
^{239}Np	0,636

* inklusive der Tochternuklide

Die zu messende Variable $C_a^*(i)$ kann, so wie bei der externen Bestrahlung durch die vorbeiziehende Wolke, wiederum durch eine Filtermessung, bzw. aus Bodendepositionsdaten berechnet werden.
Als Standardwerte für die Atmungsrate, B, werden von UNSCEAR (1988) folgende Werte angenommen: B = 22 m^3 / d (für Erwachsene) und B = 3,8 m^3 / d (für Kleinkinder). Aus Messungen des Raumluftfilterfaktors, F_r , in Schweden (0,23 - 0,47) und Dänemark (0,1-0,5) wurde von UNSCEAR (1988) ein Mittelwert von 0,3 festgelegt.
Die von UNSCEAR (1988) vorgeschlagenen Umrechungsfaktoren für die Äquivalentdosis pro inhalierter Aktivität sind in Tabelle 2 für die Schilddrüse (Schilddrüsenäquivalentdosis), bzw. für den Ganzkörper (effektive Äquivalentdosis) für Erwachsene und Kinder zusammengestellt.

Tabelle 2: Umrechungsfaktoren für die Bestimmung der Äquivalentdosen bei der Inhalation von Radionukliden (UNSCEAR 1988).

Radionuklid	Inhalationsklasse	Schilddrüsenäquivalentdosis pro inhalierter Aktivität (nSv / Bq)		Effektive Äquivalentdosis pro inhalierter Aktivität (nSv / Bq)	
		Kinder	Erwachsene	Kinder	Erwachsene
^{89}Sr	D	8,0	0,41	21	1,8
^{90}Sr	D	22	2,2	130	59
^{95}Zr	W	2,2	0,78	26	4,3
^{95}Nb	Y	0,42	0,36	27	1,6
^{99}Mo*	Y	0,23	0,033	7,9	1,1
^{103}Ru*	Y	0,82	0,26	8,0	2,4
^{106}Ru*	Y	12	1,7	900	130
^{110m}Ag	Y	38	6,4	210	22
^{115}Cd*	Y	0,12	0,018	8,9	1,1
^{125}Sb	W	2,1	0,32	27	3,3
^{127}Sb	W	0,39	0,062	12	1,6
^{129m}Te*	W	1,1	0,16	4,7	6,5
^{131m}Te*	W	180	33	21	1,6
^{131}I	D	2200	270	66	8,1
^{132}Te*	W	260	58	37	2,5
^{133}I	D	420	44	14	1,5
^{134}Cs	D	6,5	11	7,3	13
^{136}Cs	D	4,2	1,7	4,7	2,0
^{137}Cs*	D	5,6	7,9	6,4	8,6
^{140}Ba	D	1,5	0,26	8,2	1,0
^{140}La	W	0,2	0,069	8,6	1,3
^{141}Ce	Y	0,039	0,025	17	2,4
^{143}Ce	Y	0,045	0,0062	6,8	0,92
^{144}Ce*	Y	1,4	0,29	700	100
^{239}Np	W	0,043	0,0058	4,7	0,66

* D, W und Y beziehen sich auf die Retentionszeiten in der Lunge (Tage, Wochen und Jahre)
** inklusive der Tochternuklide

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

2.3 Externe Bestrahlung durch deponierte Radionuklide

Die externe Strahlenbelastung durch am Boden deponierte Radionuklide liefert einen wesentlichen Beitrag zur gesamten Äquivalentdosis. Die wichtigsten Radionuklide im Laufe des ersten Monats nach der Deposition sind einige kurzlebige Nuklide, wie ^{132}Te, ^{132}I, ^{131}I, ^{140}Ba, ^{140}La und ^{136}Cs. Während für einige weitere Monate noch ^{103}Ru und ^{106}Ru von Bedeutung sind, hängt die externe Strahlenbelastung längerfristig nur mehr von den abgelagerten ^{134}Cs und ^{137}Cs Aktivitäten ab. Aufgrund dieser unterschiedlichen Halbwertszeiten wird die externe Dosis für zwei getrennte Zeiträume berechnet:
(A) während des 1. Monats, bzw.
(B) nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres.

(A) Während des 1. Monats:

Kennt man den zeitlichen Verlauf der Ionendosis (Exposure), X_1, während des ersten Monats, so kann die daraus resultierende Äquivalentdosis mit Hilfe der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$H_{E,e1} = A\, X_1\, (1 - F_o) + A\, X_1\, F_o\, F_s \qquad (3)$$

$H_{E,e1}$.....effektive Äquivalentdosis für alle Nuklide während des 1. Monats (Sv)
A .....Umrechungsfaktor Äquivalentdosis / Ionendosis (Sv / (C / kg))
X_1 .....Ionendosis (Exposure) im Freien für alle Nuklide (C / kg)
F_o.....Definition siehe Gleichung (1)
F_s.....Definition siehe Gleichung (1)

Auch hier bezieht sich der erste Term der Gleichung auf die direkte Exposition im Freien, während der zweite Term (Exposition im Inneren) die Abschirmwirkung in Häusern berücksichtigt.
Die Ionendosis, X_1, im Verlauf des 1. Monats kann entweder direkt mit einem Dosisleistungsmeßgerät gemessen, oder indirekt aus gemessenen Bodendepositionsdaten der einzelnen Radionuklide unter der Annahme einer exponentiellen Abnahme der Aktivitätskonzentration A(z) mit der Tiefe z im Boden berechnet werden ($A(z) = A(0) \exp(-\alpha z)$, mit der Relaxationstiefe $\lambda = \alpha^{-1}$).
Der Umrechungsfaktor Äquivalentdosis / Ionendosis, A, beträgt 23,6 Sv / (C / kg)) (berechnet aus 33,7 Gy pro C / kg mal 0,7 Sv / Gy).

(B) Nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres:

Die externe Strahlenbelastung nach dem 1. Monat hängt vor allem von den deponierten ^{137}Cs und ^{134}Cs Aktivitäten ab, bzw. in geringerem Ausmaß auch von ^{103}Ru, ^{106}Ru und ^{131}I, und kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$H_{E,e2}(i) = [F(i) / \lambda(i)] [\Phi_{e2}(i) (\exp(-\lambda(i) 1a / 12 - \exp(-\lambda(i) 1a)] [1 - F_o (1 - F_s)] \times [1 - F_p (1 - F_u)] \quad (4)$$

$H_{E,e2}(i)$ ..effektive Äquivalentdosis des Nuklids i nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres (Sv)
$F(i)$ .....Depositionsdichte des Nuklids i (Bq / m^2)
$\Phi_{e2}(i)$....Umrechnungsfaktor effektive Äquivalentdosis / Depositionsdichte des Nuklids i (Sv / (Bq / m^2)) (für Relaxationstiefe λ = 1 cm)
$\lambda(i)$ .....radioaktive Zerfallskonstante des Nuklids i (a^{-1})
F_p.....Bruchteil der Bevölkerung die in Städten wohnt
F_u.....Bruchteil der Deposition der auf urbanen Flächen gebunden bleibt
F_o.....Definition siehe Gleichung (1)
F_s.....Definition siehe Gleichung (1)

Die Depositiondichte, F(i), der einzelnen Radionuklide kann entweder durch in-situ Gammaspektrometrie direkt bestimmt werden, bzw. indirekt aus dem Tiefenverlauf der gemessenen Bodenkonzentrationen berechnet werden.
Je nachdem wie eine urbane Bevölkerung definiert wird, beträgt F_p = 0,5 (inklusive der im suburbanen Raum lebenden Bevölkerung), bzw ist F_p = 0,8 im eigentlichen Stadtgebiet (UNSCEAR 1988). Da Messungen der externen Dosisleistung in Städten gezeigt haben, daß nur etwa die Hälfte der an urbanen Oberflächen abgelagerten Aktivitäten auch für längerer Zeit dort gebunden bleibt ("run off"), setzt UNSCEAR (1988) den Wert für F_u mit 0,5 fest.
Unter Annahme einer Relaxationstiefe λ = 1 cm wurden die in Tabelle 3 (Spalte 1) angeführten Umrechnungsfaktoren für die effektive Äquivalentdosis bei gegebener Depositionsdichte, $\Phi_{e2}(i)$, berechnet (UNSCEAR 1988).

Tabelle 3: Umrechungsfaktoren für die Bestimmung der Äquivalentdosis bei externer Bestrahlung durch deponierte Radionuklide (UNSCEAR 1988).

Radionuklid	Effektive Äquivalentdosis pro Depositionsdichte (nSv pro Bq / m^2)	
	30 Tage bis 1 Jahr	Nach 1. Jahr
^{103}Ru	0,691	0,00128
^{106}Ru	2,09	1,65
^{131}I	0,015	
^{134}Cs	18,6	36,2
^{137}Cs	8,04	264

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 4: Mittlerer jährlicher Lebensmittelverbrauch in verschiedenen Lebensmittelklassen in Österreich (Rohrbeck 1994).

Lebensmittelklasse (g)	Jährlicher Lebensmittelverbrauch (kg / a)
Milch, Milchprodukte (1)	128,2
Kuh- (Trink-) Milch	103,1
Obers, Rahm	5,4
Kondensmilch	2,2
Trockenmilch	1,1
Käse	8,1
Topfen	3,1
Butter	5,2
Getreide (2)	71,1
Weizen (Mehl)	49,1
Roggen (Mehl)	14,3
Gerste, Hafer	0,9
Körnermais	2,3
Reis	4,5
Blattgemüse (3)	17,2
Chinakohl	3,3
Kohl, Kohlsprossen	1,0
Rot- und Weißkraut	6,3
Häuptelsalat	4,3
Spinat	0,5
Karfiol	1,8
Gemüse, Obst (4)	296,9
Kartoffel	61,3
Hülsenfrüchte	1,2
Nüsse und Kastanien	5,3
Ölsaaten	1,0
Pflanzliche Öle	17,1
Sonstiges Gemüse	60,9
Obst	93,2
Trockenobst	1,3
Zucker und Zuckerwaren	36,7
Fruchtsäfte	18,9
Fleisch, Fisch (5)	108,1
Rindfleisch	19,4
Kalbfleisch	2,2
Schweinefleisch	51,6
Innereien	3,7
Geflügelfleisch	13,8
Sonstiges Fleisch	1,9
Fische	3,6
Fischkonserven	1,7
Schlachtfette	10,2

2.4 Ingestion von Radionukliden

©Ges. zur Förderung d. Erforschung von Insektenwanderungen e.V. München, download unter www.biologiezentrum.at

Die Ingestion von Radionukliden in Nahrungsmitteln ist, neben der externen Dosis durch deponierte Radionuklide, der zweite wichtige Expositionspfad in der Fallout-Dosimetrie im ersten Jahr. Für die daraus resultierende effektive Äquivalentdosis müssen nur die Beiträge der Nuklide ^{131}I, ^{134}Cs und ^{137}Cs berücksichtigt werden:

$$H_{E,g1}(i) = C_g^*(i)\, I_g\, \Phi_g(i) \qquad (5)$$

$H_{E,g1}(i)$ .... effektive Äquivalentdosis des Nuklids i im 1. Jahr in Lebensmittelklasse g (Sv)
$C_g^*(i)$..... gewichtete integrierte Konzentration des Nuklids i in Lebensmittelklasse g (Bq a / kg)
I_g..... jährlicher Lebensmittelverbrauch in Klasse g (kg / a)
$\Phi_g(i)$ ..... effektive Äquivalentdosis pro aufgenommene Aktivität des Nuklids i (Sv / Bq)

Unter der gewichteten integrierten Konzentration, $C_g^*(i)$, versteht man die mittlere integrierte Konzentration des Radionuklids i in der Lebensmittelklasse g. Man erhält sie, indem man die integrierte Konzentration, $C_g^*(i)$, mit der relativen Häufigkeit der einzelnen Lebensmittel innerhalb einer Lebensmittelklasse wichtet (siehe Tabelle 4).
Die Konzentrationen der Radionuklide i in den verschiedenen Nahrungsmitteln können mittels Gammaspektrometrie bestimmt werden. Aus der gemessenen Konzentration des Nuklids i kann dann die über einen Zeitraum T integrierte Konzentration im menschlichen Körper nach folgender Formel berechnet werden:

$$C_g^*(i) = C_g(i)\, \tau_{eff}(i)\, (1 - \exp(- \ln 2\, T / \tau_{eff}(i)) / \ln 2 \qquad (6)$$

$C_g^*(i)$....integrierte Konzentration des Nuklids i in Lebensmittelklasse g (Bq a / kg)
$C_g(i)$ gemessene Konzentration des Nuklids i in der Lebensmittelklasse g (Bq / kg)
$\tau_{eff}(i)$.....effektive Halbwertszeit des Nuklids i im menschlichen Körper (a)
T.....Integrationszeit der internen Strahlenbelastung durch Ingestion (a)

Im gegenständlichen Fall der Berechnung der Dosen für das 1. Jahr beträgt die Integrationszeit 1 Jahr. Möchte man jedoch die Dosis für den 1. Monat berechnen, so muß nicht nur Integrationszeit T = 0,0833 a gesetzt werden sondern es muß auch die jährlich aufgenommene Menge der Lebensmittel auf 1/12 des jährlichen Wertes heruntergesetzt werden. Die effektiven Halbwertszeiten, $\tau_{eff}(i)$, die sich aus den jeweiligen radioaktiven und biologischen Halbwertszeiten zusammensetzen (ICRP 1979), sind für die hier in Betracht kommenden Nuklide ^{131}I, ^{134}Cs and ^{137}Cs in Tabelle 5 zu finden.

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 5: Radioaktive, biologische und effektive Halbwertszeiten verschiedener Nuklide im menschlichen Körper (ICRP 1979).

Radionuklid	radioaktive Halbwertszeit (a)	biologische Halbwertszeit (a)	effektive Halbwertszeit (a)
^{131}I*	$2{,}21.10^{-2}$	0,329	$2{,}21.10^{-2}$
^{134}Cs**	2,05	0,301	0,263
^{137}Cs**	30,0	0,301	0,298

* Schilddrüse
** Ganzkörper

Für Dosisberechnungen durch Ingestion unterscheidet man 5 Lebensmittelklassen g:
g = 1 Milch, Milchprodukte,
g = 2 Getreide,
g = 3 Blattgemüse,
g = 4 Gemüse und Obst,
g = 5 Fleisch, Fisch.
Für die besonders gefährdete Gruppe der Kleinkinder hat UNSCEAR (1988) standardisierte Werte für die jährliche Lebensmittelaufnahme festgelegt: 200 kg / a (g = 1), 20 kg / a (g = 2), 5 kg / a (g = 3), 15 kg / a (g = 4) und 5 kg / a (g = 5).
Für Erwachsene wurden die in Tabelle 4 zusammengestellten Mittelwerte aus statistischen Untersuchungen in Österreich in den Jahren 1987 bis 1993 gewonnen (für g = 3 standen Daten nur für die Jahre 1992 und 1993 zur Verfügung) (Rohrbeck 1994).
Die Umrechnungsfaktoren von der aufgenommenen Aktivität auf Äquivalentdosen für Schilddrüse und Ganzkörper (effektive Äquivalentdosis), $\Phi_g(i)$, sind in Tabelle 6 angeführt (UNSCEAR 1988).
Um die gesamte Ingestionsdosis für ein bestimmtes Nuklid i im 1. Jahr zu erhalten, müssen schließlich die Äquivalentdosen in den einzelnen Lebensmittelkategorien g, $H_{E,gI}(i)$, über alle Lebensmittelklassen summiert werden:

$$H_{E,I}(i) = \sum_g H_{E,gI}(i) \qquad (7)$$

$H_{E,I}(i)$ gesamte effektive Äquivalentdosis durch Ingestion (alle Lebensmittelklassen) für ein bestimmtes Nuklid i im 1 Jahr (Sv)

$H_{E,gI}(i)$ effektive Äquivalentdosis des Nuklids i im 1.Jahr in Lebensmittelklasse g (Sv)

Tabelle 6: Umrechnungsfaktoren für die Bestimmung der Äquivalentdosis bei der Ingestion von Radionukliden (UNSCEAR 1988).

Radionuklid	Schilddrüsenäquivalentdosis pro aufgenommener Aktivität (nSv / Bq)		Effektive Äquivalentdosis pro aufgenommener Aktivität (nSv / Bq)	
	Kinder	Erwachsene	Kinder	Erwachsene
^{131}I	3500	430	110	13
^{134}Cs	11	18	12	20
^{137}Cs	9	13	9,3	14

3 Berechnung der projektierten Dosen

3.1 Externe Bestrahlung durch deponierte Radionuklide

Die externe Strahlenbelastung durch auf dem Boden deponierte Nuklide kann folgendermaßen berechnet werden:

$$H_{E,e3}(i) = [F(i) / \lambda(i)]\ [\Phi_{e3}(i) \exp(- \lambda(i)\ 1a)]\ [1 - F_o\ (1 - F_s)]\ [1 - F_p\ (1 - F_u)] \qquad (8)$$

$H_{E,e3}(i)$..effektive Äquivalentdosis des Nuklids i nach dem 1. Jahr (Sv)
$\Phi_{e3}(i)$....Umrechnungsfaktor effektive Äquivalentdosis / Depositionsdichte des Nuklids i (Sv / (Bq / m^2)) (für Relaxationstiefe λ = 3 cm)
(Alle anderen Variablen sind bereits bei der Dosisberechung für das erste Jahr definiert worden.)

Die Depositiondichte, F(i), der einzelnen Radionuklide kann entweder durch in-situ Gammaspektrometrie direkt bestimmt werden, bzw. indirekt aus dem Tiefenverlauf der gemessenen Bodenkonzentrationen berechnet werden.
In Tabelle 3 (2. Spalte) sind die Umrechnungsfaktoren für die effektive Äquivalentdosis bei gegebener Depositionsdichte, $\Phi_{e3}(i)$, angegeben (UNSCEAR 1988). Dabei wird angenommen, daß die Nuklidverteilung im Boden nach dem 1. Jahr durch eine Relaxationslänge von 3 cm beschrieben werden kann.

3.2 Ingestion von Radionukliden

Um Dosen durch die Ingestion von Radionukliden auch für zukünftige Zeiten abschätzen zu können, für die noch keine Messungen vorliegen, schlägt UNSCEAR (1988) die Verwendung eines Compartmentmodells für den Transfer von Nukliden

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

im Boden (Compartment 2) in die Nahrung (Compartment 3) vor. In diesem Modell wird der Zusammenhang zwischen der Depositionsdichte des Nuklids i, F(i), und der gewichteten integrierten Konzentration dieses Nuklids in einem Nahrungsmittel der Lebensmittelklasse g, $C_g^*(i)$, für die Zeiten nach dem 1. Jahr durch folgende Transferfunktion, $P_{23,2+}(g,i)$, beschrieben:

$$C_g^*(i) = P_{23,2+}(g,i)\ F(i) \tag{9}$$

Unter Verwendung dieser Transferfunktion erhält man die projektierte Dosis für den Ingestionspfad mit folgender Gleichung:

$$H_{E,g2}(i) = P_{23,2+}(g,i)\ F(i)\ I_g\ \Phi_g(i) \tag{10}$$

$H_{E,g2}(i)$ ..... effektive Äquivalentdosis durch die Ingestion des Nuklids i aus der Lebensmittelklasse g nach dem 1. Jahr (Sv)

$P_{23,2+}(g,i)$ Transferfaktor Depositionsdichte (Compartment 2) / Lebensmittel (Compartment 3) für Nuklid i in Lebensmittelklasse g nach dem 1. Jahr

F(i) ..... Depositionsdichte des Nuklids i (Bq / m^2)

I_g..... jährlicher Lebensmittelverbrauch in Klasse g (kg / a)

$\Phi_g(i)$ ..... effektive Äquivalentdosis pro aufgenommene Aktivität des Nuklids i (Sv / Bq)

Die zu messende Variable ist hier wiederum, so wie bei der Berechnung der externen Strahlenbelastung, die Depositionsdichte, F(i), des Nuklids i.

Tabelle 7: Transferfaktoren für die Berechnung der integrierten ^{137}Cs-Konzentration in verschiedenen Lebensmitteln aus der Oberflächendeposition dieses Nuklids (UNSCEAR 1988).

Lebensmittelklasse	Transferfaktoren (Bq a / kg pro kBq / m^2)
Milch, Milchprodukte	2,1
Getreide	12
Blattgemüse	1,4
Gemüse, Obst	2,0
Fleisch, Fisch	8

Eine detaillierte Bestimmung des Transferfaktors, $P_{23,2+}$, für alle Lebensmittelkategorien wurde bisher nur für ^{137}Cs durchgeführt. Die in Tabelle 7 von UNSCEAR (1988) vorgeschlagenen Transferfaktoren, $P_{23,2+}$ sind daher nur für ^{137}Cs gültig. Da physiologische Transfermechanismen zwischen Boden und Pflanze aber nur von der Art des chemischen Elements abhängig sind und daher für alle Isotope eines bestimmten Elements gleich sind, können diese Werte auch für ^{134}Cs verwendet werden.
Zur Berechnung der gesamten projektierten, jährlichen Ingestionsdosis für ein bestimmtes Nuklid i müssen wiederum die Äquivalentdosen in den einzelnen Lebensmittelkategorien g, $H_{E,g2}(i)$, über alle Lebensmittelklassen summiert werden:

$$H_{E,f2}(i) = \sum_{g} H_{E,g2}(i) \qquad (11)$$

$H_{E,f2}(i)$ ..gesamte projektierte, effektive Äquivalentdosis durch Ingestion (alle Lebensmittelklassen) für ein bestimmtes Nuklid i nach dem 1. Jahr (Sv)

$H_{E,g2}(i)$ ..effektive Äquivalentdosis durch Ingestion des Nuklids i in Lebensmittelklasse g nach dem 1. Jahr (Sv)

4 Dosisberechungen im Falle eines Reaktorunfalls

Kommt es in Salzburg zu einem Fallout radioaktiver Nuklide als Folge eines Reaktorunfalls, so stellt sich die Aufgabe, aus sofortigen Messungen der externen Dosis, der Nuklidkonzentrationen in der Luft und der Depositionsdichten am Boden, die zu erwartende Strahlenbelastung kurzfristig (im 1. Monat), mittelfristig (im 1. Jahr) und längerfristig (in den folgenden Jahren) abzuschätzen. Da sowohl Erwartungsdosen für bestimmte Gefährdungsstufen auf nationaler Ebene (Strahlenschutzkommission beim Bundesministerium für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz 1992) als auch international festgelegte Grenzwerte für die Bevölkerung (IAEA 1994) als effektive Äqivalentdosen (mSv) angegeben werden, so ist es sinnvoll, die im vorigen Kapitel besprochenen spezifischen Dosisbeiträge über alle Radionuklide und Expositionswege zu integrieren.

4.1 Gesamtdosis für das 1. Monat

Die gesamte Dosis im 1. Monat, $H_{tot}(1)$, setzt sich zusammen aus der externen Bestrahlung durch die vorbeiziehende Wolke, der Inhalation von Radionukliden, der externen Bestrahlung durch am Boden deponierte Radionuklide, und der Ingestion von Radionukliden:

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

$$H_{tot}(1) = \sum_i H_{E,c}(i) + \sum_i H_{E,h}(i) + H_{E,el} + \sum_i H_{E,fl}(i) \qquad (12)$$

$H_{tot}(1)$ ...totale effektive Äquivalentdosis im 1. Monat (Sv)
$H_{E,c}(i)$ ...effektive externe Äquivalentdosis des Nuklids i aus der Wolke (Sv)
$H_{E,h}(i)$ ...effektive Äquivalentdosis durch Inhalation des Nuklids i (Sv)
$H_{E,el}$ .....effektive externe Äquivalentdosis für alle deponierten Nuklide während des 1. Monats (Sv)
$H_{E,fl}(i)$ ..gesamte effektive Äquivalentdosis durch Ingestion (alle Lebensmittelklassen) für ein bestimmtes Nuklid i im 1. Monat (Integrationszeit T = 1 Monat) (Sv)

4.2 Gesamtdosis nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres

Berücksichtigt man die unterschiedliche Berechnung der externen Dosis durch deponierte Radionuklide nach dem 1. Monat und vernachlässigt man den Dosisbeitrag der Inhalation von Radionukliden in allen folgenden Monaten, so kann man die Gesamtdosis zwischen dem Ende des 1. Monats bis zum Ende des 1. Jahres, $H_{tot}(2)$, folgendermaßen berechnen:

$$H_{tot}(2) = \sum_i H_{E,e2}(i) + \sum_i H_{E,fl}(i) \qquad (13)$$

$H_{tot}(2)$ ...totale effektive Äquivalentdosis nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres (Sv)
$H_{E,e2}(i)$ ..effektive Äquivalentdosis des Nuklids i nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres durch externe Bestrahlung durch deponierte Radionuklide (Sv)
$H_{E,fl}(i)$ ..effektive Äquivalentdosis des Nuklids i nach dem 1. Monat bis zum Ende des 1. Jahres durch Ingestion (alle Lebensmittelklassen) des Radionuklids i (Integrationszeit T = 11 Monate) (Sv)

Die gesamte effektive Äquivalentdosis für das 1. Jahr kann durch einfache Addition der entsprechenden effektiven Äquivalentdosen (Gleichungen (12) und (13)) gewonnen werden.

4.3 Projektierte jährliche Gesamtdosis

Zur Berechnung der jährlichen projektierten Gesamtdosis, $H_{tot}(proj)$, müssen nur die beiden Beiträge durch die externe Bestrahlung von am Boden deponierten Radionukliden und durch die Ingestion von Radionukliden (^{137}Cs) herangezogen werden:

$$H_{tot}(proj) = \sum_i H_{E,e3}(i) + \sum_i H_{E,f2}(i) \quad (14)$$

©Naturwissenschaftl. Verein für Kärnten, Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

$H_{tot}(proj)$. totale projektierte effektive Äquivalentdosis für alle Jahre nach dem 1. Jahr (Sv)
$H_{E,e3}(i)$.... effektive externe Äquivalentdosis des Nuklids i nach dem 1. Jahr (Sv)
$H_{E,f2}(i)$ gesamte projektierte, effektive Äquivalentdosis durch Ingestion (alle Lebensmittelklassen) für ein bestimmtes Nuklid i nach dem 1. Jahr (Sv)

5 Vergleich mit Grenzwerten

Die in den Gleichungen (12-14) berechneten effektiven Äquivalentdosen können nun im Falle eines Reaktorunfalls mit vorgegebenen Grenzwerten in Relation gesetzt werden, um so eine eventuelle Gefährdung der Bevölkerung durch den radioaktiven Fallout abschätzen zu können.
Eine Möglichkeit der Risikoabschätzung ist der Vergleich der berechneten Dosen mit dem international festgelegten Grenzwert der effektiven Äquivalentdosis für die Bevölkerung von 1 mSv pro Jahr, bzw. im Falle besonderer Umstände, bis zu 5 mSv pro Jahr (IAEA 1994). Nimmt man eine gleichmäßige Belastung vom 1 mSv während des ganzen Jahres an, so beträgt der Grenzwert für das 1. Monat 0,083 mSv, bzw. 0,917 für die Zeit zwischen dem 1. Monat und dem Ende des 1. Jahres. Für die projektierten jährlichen Dosen gilt dann der ursprüngliche Grenzwert von 1 mSv / a.
Eine zweite, und im Falle einer radioaktiven Kontamination geeignetere, Abschätzung ist der Vergleich mit den in Österreich von der Strahlenschutzkommission beim Bundesministerium für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz (1992) festgelegten Erwartungsdosen. Solche berechneten Erwartungsdosen gestatten eine Lagebeurteilung im Katastrophenfall im Hinblick auf die zu erwartende gesundheitliche Gefährdung und damit die Anordnung von Maßnahmen, die der Situation entsprechend eine Vermeidung oder zumindest eine Verringerung der Strahlenbelastung ermöglichen (Tabelle 8). Der Einteilung der Gefährdungsstufen von 0 IV liegen effektive Äquivalentdosen als Erwartungsdosen im 1. Jahr nach dem Eintreten einer großräumigen radioaktiven Kontamination zu Grunde, wobei die Strahlenbelastungen einzelner Organe, insbesondere der Schilddrüse, nicht mehr als das Zehnfache dieser Werte betragen dürfen. Die Bandbreite von etwa einer Größenordnung für die Erwartungsdosen in den einzelnen Gefährdungsstufen berücksichtigen sowohl die zu erwartende inhomogene Verteilung der Kontamination, als auch eventuelle anfängliche Unsicherheiten bei der Berechnung der Erwartungsdosen aufgrund fehlender Daten.

©Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

Tabelle 8: Maßnahmen und Erwartungsdosen im 1. Jahr für verschiedene Gefährdungsstufen nach dem Eintreten einer großräumigen radioaktiven Kontamination (Strahlenschutzkommission beim Bundesministerium für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz 1992).

Gefährdungsstufe	Erwartungsdosis (mSv)	Maßnahmen
0	< 0,5	keine, da im Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenbelastung
I	0,5 - 2,5	keine gesundheitliche Gefährdung von Einzelpersonen; eine Minimierung der Strahlenbelastung der Bevölkerung ist aber im Hinblick auf bestimmte Risikogruppen, vor allem Kleinkinder, angezeigt
I	2,5 - 25	keine gesundheitlichen Auswirkungen auf Einzelpersonen zu erwarten; eine Minimierung für die Gesamtbevölkerung ist erforderlich; eine Reduzierung der Strahlenbelastung für Risikogruppen ist notwendig
III	25 - 250	Erste direkte Auswirkungen bei den betroffenen Personen (Veränderungen in den Chromosomen), es sind aber keine unmittelbaren gesundheitlichen Schäden zu erwarten; Spätschäden können auftreten; eine Reduzierung der Strahlenbelastung von betroffenen Einzelpersonen ist notwendig
IV	> 250	direkte gesundheitliche Schäden sind zu erwarten; bei hohen Dosen ist mit dem akuten Strahlensyndrom zu rechnen

6 Literaturverzeichnis

ch-Medizinischen Vereinigung in Salzburg; download unter www.biologiezentrum.at

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (1994): International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. - Safety Series No. 115-I, IAEA, Vienna.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP) (1979): Limits for intakes of radionuclides by workers. - ICRP Publication 30, Ann. ICRP 2, 3/4.

ROHRBECK, G. J. (1994): Ernährungsbilanz 92/93. - Statistische Nachrichten, 2/1994: 151-161.

STRAHLENSCHUTZKOMMISSION BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR GESUNDHEIT, SPORT UND KONSUMENTENSCHUTZ (1992): Rahmenempfehlungen für die Festlegung und Durchführung von Maßnahmen zum Schutze der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung in Fällen großräumiger radioaktiver Verunreinigung. Forschungsberichte des Bundesministeriums für Gesundheit, Sport und Konsumentenschutz, Sektion III, 3/92.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR) (1988): Sources, effects and risks of ionizing radiation. - United Nations, New York.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Berichte der Naturwissenschaftlich-Medizinischen Vereinigung in Salzburg

Jahr/Year: 1996

Band/Volume: 11

Autor(en)/Author(s): Hofmann Werner

Artikel/Article: DOSISBERECHUNGEN IM FALLE EINES REAKTORUNFALLS: EXTERNE UND INTERNE EXPOSITIONSWEGE. 7-23