

## Wissenschaftliche Begründung der Stellungnahme der Strahlenschutzkommission

### Inhaltsübersicht

- 1 Einleitung**
- 2 Epidemiologie**
  - 2.1 Methode des Vorgehens
  - 2.2 Ergebnisse
  - 2.3 Bezug der untersuchten Krankheitsfälle zur Beschäftigung in der Schachtanlage Asse II
  - 2.4 Diskussion
  - 2.5 Bewertung
- 3 Statistische Bewertung regionaler Unterschiede**
  - 3.1 Einleitung
  - 3.2 Methoden
  - 3.3 Ergebnisse
    - 3.3.1 Leukämie bei Männern
    - 3.3.2 Leukämie bei Frauen
    - 3.3.3 Schilddrüsenkrebs bei Frauen
    - 3.3.4 Schilddrüsenkrebs bei Männern
  - 3.4 Diskussion und Schlussfolgerung
- 4 Risiken und Ursachen für Leukämie und Schilddrüsenkrebs**
  - 4.1 Leukämie
    - 4.1.1 Ursachen für Leukämie
    - 4.1.2 Leukämie nach Strahlenexposition
  - 4.2 Schilddrüsenkrebs
    - 4.2.1 Ursachen für Schilddrüsenkrebs
    - 4.2.2 Schilddrüsenkrebs nach Strahlenexposition
  - 4.3 Zusammenfassung
- 5 Strahlenexpositionen**
  - 5.1 Sachstand
  - 5.2 Immissionsüberwachung
  - 5.3 Überwachung der Grubenfortluft der Asse
  - 5.4 Ergebnisse der Emissionsüberwachung
  - 5.5 Vorfälle mit Kontaminationen
  - 5.6 Strahlenexpositionen von Referenzpersonen der Bevölkerung
  - 5.7 Strahlenexpositionen der Beschäftigten
  - 5.8 Zusammenfassung und Bewertung

<b>6</b>	<b>Zur Erklärung der beobachteten Erhöhungen erforderliche Strahlenexpositionen</b>
6.1	Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Leukämieinzidenzrate bei Männern in der SG Asse zu erklären
6.1.1	Veranlassung und Vorgehensweise
6.1.2	Szenario für Exposition und Risikoberechnungen
6.1.3	Betrachteter Datensatz und resultierendes SIR
6.1.4	Einbeziehung mehrerer Modelle in die Risikoberechnungen (multi-model inference)
6.1.5	Ausgewählte Risikomodelle
6.1.6	Risikoanalyse
6.1.6.1	Dosis-Wirkungsbeziehung nach der MMI-Methode
6.1.6.2	Übertragung des Strahlenrisikos in den ehemaligen RB Braunschweig nach BEIR VII
6.1.6.3	Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Leukämieinzidenzrate bei Männern in der SG Asse zu erklären
6.2	Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Schilddrüsenkrebsinzidenzrate bei Frauen in der SG Asse zu erklären
6.2.1	Veranlassung und Vorgehensweise
6.2.2	Expositionsszenario
6.2.3	Betrachteter Datensatz und resultierendes SIR
6.2.4	Auswahl des Risikomodells für Schilddrüsenkrebs
6.2.5	Dosis-Wirkungsbeziehung
6.2.6	Übertragung des Strahlenrisikos in den ehemaligen RB Braunschweig nach BEIR VII
6.2.7	Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Schilddrüsenkrebsinzidenzrate bei Frauen in der SG Asse zu erklären
6.2.8	Eignung des gewählten Expositionsszenarios
6.3	Zusammenfassung und Bewertung
<b>7</b>	<b>Literatur</b>
<b>8</b>	<b>Glossar</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsnachweis</b>

## **1 Einleitung**

In einer Sonderauswertung des Epidemiologischen Krebsregisters Niedersachsen (EKN) aufgrund einer Anfrage des Landkreises (LK) Wolfenbüttel zur Krebshäufigkeit in der Samtgemeinde (SG) Asse waren für die Jahre 2002 bis 2009 bei Leukämien sowie beim Schilddrüsenkrebs signifikant mehr Neuerkrankungsfälle beobachtet worden, als im Vergleich zum restlichen LK Wolfenbüttel ohne SG Asse zu erwarten gewesen wären (EKN 2010a).

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat mit Schreiben vom 20. Dezember 2010 die Strahlenschutzkommission (SSK) um eine Bewertung der Ergebnisse der

Auswertungen des Epidemiologischen Krebsregisters Niedersachsen zur Krebshäufigkeit in der SG Asse gebeten. Dabei sollten insbesondere die angewendeten statistischen Methoden geprüft und folgende Fragen beantwortet werden: Gibt es strahlenbiologische Erkenntnisse, die die Ergebnisse plausibel erklären können? Wie können die Ergebnisse erklärt werden?

Die SSK hat für ihre Stellungnahme die epidemiologischen Untersuchungen des EKN und die strahlenbiologischen Erkenntnisse zu den strahleninduzierten Risiken für Leukämie und Schilddrüsenkrebs kritisch bewertet. Sie ist darüber hinaus der Frage nachgegangen, ob die vom EKN festgestellten lokalen Erhöhungen der Leukämie-Inzidenz bei Männern und der Schilddrüsenkrebs-Inzidenz bei Frauen als statistischer Zufall anzusehen sind. Zur Frage der möglichen Verursachung der erhöhten Inzidenzen durch ionisierende Strahlung hat die SSK die Strahlenexposition der Bevölkerung in der SG Asse als Folge der Ableitungen radioaktiver Stoffe aus der Schachanlage Asse II sowie die Strahlenexposition der Beschäftigten in der Schachanlage Asse II betrachtet. Durch Vergleich dieser Strahlenexpositionen mit Strahlendosen, die erforderlich wären, um die beobachteten erhöhten Inzidenzen zu erklären, gelangt die SSK zu ihrer abschließenden Schlussfolgerung und Bewertung.

## **2 Epidemiologie**

### **2.1 Methode des Vorgehens**

Der Anlass der Untersuchung des EKN in der SG Asse und dem LK Wolfenbüttel war: „Hintergrund dieser Sonderauswertung ist eine Anfrage des Landkreises (LK) Wolfenbüttel an das Epidemiologische Krebsregister Niedersachsen (EKN) aus dem Jahr 2008 zur Häufigkeit von Leukämien in der Samtgemeinde (SG) Asse. Aufgrund der seinerzeit noch unzureichenden Datenlage und der deutlichen Untererfassung von Leukämien und Lymphomen war eine kleinräumige Auswertung zum damaligen Zeitpunkt noch nicht möglich. Inzwischen ist die Datenlage für diese Analyse ausreichend. Die Ergebnisse der Auswertung werden in diesem Bericht vorgestellt.“ (EKN 2010a)

Damit bezog sich die Fragestellung ausschließlich auf Leukämie und die SG Asse. Damit war die Anwendung eines 5 %-Niveaus für den Test dieser Hypothese zulässig.

Im Bericht heißt es:

„Daraus wurde als statistische Nullhypothese formuliert: Die beobachtete Anzahl an Leukämiefällen (ICD-10 C91-C95) in der SG Asse ist kleiner oder gleich der auf Grundlage der Leukämieraten des LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse berechneten erwarteten Fälle.“

„Die Alternativhypothese lautet: In der SG Asse werden mehr Leukämiefälle (ICD-10 C91-C95) beobachtet, als auf Grundlage der Leukämieraten des LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse zu erwarten wären.“

„Diese Fragestellung ist einseitig formuliert.“ (EKN 2010a)

Die Aussagen beziehen sich auf die Jahre 2002 bis 2009. Das EKN nahm seine Tätigkeit 2000 auf, vor 2002 wurden in Niedersachsen Krebsfälle nicht ausreichend vollzählig erfasst.

Grundsätzlich unterscheidet man bei statistischen Analysen zwischen konfirmatorischen und explorativen Analysen. Konfirmatorische Analysen erfordern eine ohne Kenntnis der Daten vorab formulierte, präzise Forschungsfrage (Hypothese). Diese kann dann mit einer vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit beantwortet werden. Derartige Erkenntnisse haben einen hohen Stellenwert. Die Bewertung der Leukämiehäufigkeit in der SG Asse wie oben beschrieben ist dann eine solche konfirmatorische Analyse im engeren Sinne, wenn die Frage ohne Kenntnis der Daten formuliert wurde. Zusätzlich kann man in einem vorhandenen Datensatz beliebig explorativ ohne vorab formulierte Hypothese nach Auffälligkeiten und Zusammenhängen suchen. Der Vorgang wird auch als „Datenfischen“ bezeichnet. Dabei ist bei ausreichend vielen Einzelbetrachtungen rein zufällig eigentlich immer mit irgendwelchen Auffälligkeiten zu rechnen. Die so gefundenen Auffälligkeiten sind als sehr viel weniger relevant anzusehen, im besten Falle generieren sie ihrerseits Hypothesen, die unabhängig bestätigt werden müssen. Das EKN bezeichnet die Auswertungen im Bericht (EKN 2010b) als „deskriptiv“, und grenzt sie damit eindeutig von der o. g. konfirmatorischen Analyse ab.

Die übrigen Krebsarten in (EKN 2010a) sowie die im zweiten Bericht (EKN 2010b) später hinzugefügten Auswertungen (andere Krebsarten, übrige Gemeinden/Samtgemeinden des LK Wolfenbüttel) müssen daher als solche explorative Auswertungen bewertet werden. Alle Unterscheidungen nach Männern und Frauen sind ebenfalls als explorativ zu werten. Angesichts der vielen durchgeführten Tests musste für die multiplen Tests korrigiert werden. Im ersten Bericht (EKN 2010a) wurde dies für alle anderen Krebsarten außer Leukämien und Lymphome (37 Krebsarten) nach dem Verfahren von Bonferroni durchgeführt (Victor et al. 2010). Dies ist eine geeignete, wenn auch konservative Vorgehensweise. Etwas weniger konservativ ist das Verfahren nach Bonferroni-Holm (Victor et al. 2010), das in der SSK-Auswertung alternativ angewendet wurde, in diesem Falle jedoch zu exakt den gleichen Schlussfolgerungen führt.

Der zweite Bericht des EKN berichtete die übrigen Gemeinden und Samtgemeinden des LK Wolfenbüttel im Vergleich zum ehemaligen Regierungsbezirk (RB) Braunschweig für alle Krebsentitäten inklusive der Leukämien und Lymphome (41 Krebsarten) (EKN 2010b). Dieser Bericht ist rein explorativ ohne vorher formulierte Hypothese. Hierbei wurde keine Korrektur nach Bonferroni durchgeführt, jedoch die Zahl der gefundenen „signifikanten“ nicht geschlechtsspezifischen Ergebnisse mit der Zahl der unter Zufallsbedingungen zu erwartenden verglichen. Dies ist eine alternative Vorgehensweise und ebenfalls zulässig, sie macht es jedoch schwerer, die Angaben in den Tabellen zu bewerten. Das Vorgehen hat andererseits den Vorteil, dass qualitativ das Vorliegen von Mustern (z.B. besonders viele auffällige Ergebnisse in einer Region oder in Bezug auf eine Krebsart) bewertet werden kann. In diesem Falle

wurde keine größere Anzahl „signifikanter“ Ergebnisse als zufällig erwartbar gefunden, und es gab keine Hinweise auf ein Muster (siehe Tabelle 6 in (EKN 2010b)). Damit wurden im Umkehrschluss mit dieser Vorgehensweise keine signifikant auffällig häufigen Krebsinzidenzen in irgendeiner Gemeinde/Samtgemeinde gefunden.

Als Vergleichsmaß wurde das SIR (standard incidence ratio, Standardisiertes Inzidenzverhältnis) gewählt und mit einem exakten Test auf Basis der Poisson-Verteilung bewertet. Dies ist das korrekte Standardvorgehen für derartige Fragestellungen in der Epidemiologie. Das SIR ist ein Faktor, der angibt, um wie viel sich die Inzidenz in der betrachteten Region, korrigiert für Unterschiede im Altersaufbau, von einer Vergleichsregion unterscheidet. Ein Wert von 1,00 bedeutet „kein Unterschied“ (Einzelheiten siehe Glossar).

Hierfür wird die alters- und geschlechtsspezifische Inzidenz der betreffenden Erkrankung aus einer Vergleichsregion benötigt. Dabei versucht man Daten aus einer Region heranzuziehen, die möglichst stabile Werte liefert, also möglichst groß ist, sich aber außer bezüglich des interessierenden Faktors (hier: die unter Verdacht stehende Punktquelle Schachanlage Asse II) soziodemographisch und in Bezug auf die Erfassung der interessierenden Erkrankung möglichst wenig von der interessierenden Region unterscheidet. Damit ist die Wahl der Vergleichsregion immer zwangsläufig ein Kompromiss. In der ursprünglichen Auswertung wurde für die SG Asse als Vergleichsregion der LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse herangezogen (EKN 2010a). In der später in Auftrag gegebenen explorativen Analyse weiterer Gemeinden aus dem LK Wolfenbüttel wurde der ehemalige RB Braunschweig als Vergleichsregion herangezogen (EKN 2010b). Die Auswertungen aus (EKN 2010a) wurden durch das EKN mit dem ehemaligen RB Braunschweig als Vergleichsregion wiederholt, diese Auswertung (EKN 2011) liegt der SSK vor und wird in Tabelle 2.3 wiedergegeben.

Der ehemalige RB Braunschweig ist immer noch eine eher kleine Region, die jedoch aufgrund der Einwohnerzahl erheblich stabiler und damit prinzipiell geeigneter als Vergleichsregion ist als der LK Wolfenbüttel (ohne die SG Asse); daher werden hier bevorzugt die miteinander vergleichbaren Ergebnisse dieser zweiten Auswertungen besprochen (EKN 2010b, EKN 2011). Auswertungen auf der Basis unterschiedlicher Vergleichsregionen sind nicht vergleichbar.

Die relativ niedrigen Bevölkerungszahlen des LK Wolfenbüttel gehen aus dem ersten Bericht hervor (EKN 2010a):

Tab. 2.1: Bevölkerung der SG Asse und des LK Wolfenbüttel ohne SG Asse (EKN 2010a).

Bevölkerung	SG Asse			LK Wolfenbüttel ohne SG Asse		
	Männer	Frauen	Männer und Frauen	Männer	Frauen	Männer und Frauen

2002	4 956	5 118	10 073	56 986	59 892	116 878
2003	4 975	5 154	10 128	57 093	59 919	117 012
2004	4 996	5 153	10 149	57 110	59 919	117 029
2005	4 990	5 130	10 119	56 926	59 752	116 678
2006	4 955	5 090	10 045	56 542	59 350	115 892
2007	4 898	5 030	9 927	56 226	58 879	115 105
2008	4 837	4 967	9 803	55 922	58 433	114 355
2009	4 789	4 893	9 682	55 551	58 003	113 553
Personenjahre e 2002 bis 2009	39 396	40 535	79 926	452 356	474 147	926 502
Personenjahre e 2002 bis 2008	34 607	35 642	70 244	396 805	416 144	812 949

Entsprechend gehen die höheren Bevölkerungszahlen des ehemaligen RB Braunschweig aus dem zweiten Bericht hervor (EKN 2010b):

Tab. 2.2: Bevölkerung des ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2010b).

Bevölkerung (gemittelt)	2002 bis 2008			2002 bis 2009		
	Männer	Frauen	Männer und Frauen	Männer	Frauen	Männer und Frauen
Bezirk Braunschweig	808 068	843 028	1 651 095	806 436	840 795	1 647 231
LK Wolfenbüttel	61 630	64 540	126 170	61 468	64 335	125 803
SG Cremlingen	6 224	6 504	12 728	6 229	6 506	12 735
Stadt Wolfenbüttel	26 351	28 043	54 394	26 309	27 990	54 298
SG Asse	4 944	5 091	10 035	4 924	5 066	9 991
SG Baddeckenstedt	5 591	5 712	11 302	5 556	5 680	11 235
SG Oderwald	3 631	3 660	7 291	3 614	3 639	7 253
SG Schladen	4 678	4 937	9 615	4 660	4 917	9 577
SG Schöppenstedt	5 017	5 263	10 280	4 987	5 215	10 202
SG Sickinge	5 195	5 330	10 525	5 190	5 321	10 512

Personenjahre	2002 bis 2008			2002 bis 2009		
	Männer	Frauen	Männer und Frauen	Männer	Frauen	Männer und Frauen
Bezirk Braunschweig	5 656 476	5 901 196	11 557 665	6 451 488	6 726 360	13 177 848
LK Wolfenbüttel	431 410	451 780	883 190	491 744	514 680	1 006 424

SG Cremlingen	43 568	45 528	89 096	49 832	52 048	101 880
Stadt Wolfenbüttel	184 457	196 301	380 758	210 472	223 920	434 384
SG Asse	34 608	35 637	70 245	39 392	40 528	79 928
SG Baddeckenstedt	39 137	39 984	79 114	44 448	45 440	89 880
SG Oderwald	25 417	25 620	51 037	28 912	29 112	58 024
SG Schladen	32 746	34 559	67 305	37 280	39 336	76 616
SG Schöppenstedt	35 119	36 841	71 960	39 896	41 720	81 616
SG Sickinge	36 365	37 310	73 675	41 520	42 568	84 096

Das EKN nutzt, wie alle gesetzlichen Krebsregister in Deutschland, unterschiedliche Quellen für seine Meldungen (GEKN 1999). Mehrfachmeldungen eines Falls, z.B. vom Pathologen, vom niedergelassenen Arzt und von der behandelnden Klinik, sind erwünscht und führen in der Gesamtschau zu einem vollständigeren Bild eines Falls. In Niedersachsen ist die Informierung des Patienten von der Meldung durch den diagnostizierenden Arzt vorgesehen, dies gilt jedoch nicht für Meldungen von einem Arzt, z.B. Pathologen, der keinen Patientenkontakt hat (§ 4 GEKN). Diese sogenannten „Pathologenmeldungen“ enthalten auch keine detaillierteren Angaben zum Wohnort als die Zuordnung zu einer großen Gemeinde oder einer Samtgemeinde. Behandelnde Ärzte mit Patientenkontakt haben in Niedersachsen ein Melderecht, Ärzte ohne Patientenkontakt eine Meldepflicht. Bei Meldungen vom behandelnden Arzt ist unter bestimmten Umständen eine Rückfrage durch das EKN an Arzt oder Patienten möglich, bei Pathologenmeldungen jedoch nicht (anonyme Meldung) (GEKN 1999). Von den Leukämiefällen aus der SG Asse wurden 44 % ausschließlich vom Pathologen gemeldet, von den Schilddrüsenkrebserkrankungen 100 % (EKN 2010a).

Die parallelen Untersuchungen der Sterbefälle beziehen sich auf etwa den gleichen Zeitraum wie die inzidenten Krebsfälle (EKN 2010a). Damit sind sie jedoch keine Untermenge der inzidenten Fälle; ein wesentlicher Teil der verstorbenen Patienten dürfte vor dem untersuchten Zeitraum erkrankt sein. Der jeweilige Erkrankungszeitpunkt und Erkrankungsort dieser verstorbenen Personen ist unbekannt. Damit ist es schwer, einen Bezug zur Fragestellung herzustellen.

## 2.2 Ergebnisse

Das EKN berichtete in (EKN 2010a) ein SIR für Leukämien von 2,12 (signifikant zum Niveau 5 %), getrennt für Männer und Frauen ergaben sich 2,33 und 1,80. Dies beruht auf 18 beobachteten Fällen aus den Erkrankungsjahren 2002 bis 2009 im Vergleich zu 8,5 erwarteten Fällen. Die alternative Bewertung (siehe Tabelle 2.3) im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig ergab SIR = 2,17 (signifikant zum Niveau 5 %), separat für Männer und Frauen jeweils 2,49 und 1,72. Die erwartete Anzahl betrug 8,3 Fälle. Der Unterschied des SIR ist bei den beiden Vergleichsregionen nicht besonders groß, die Aussagen sind vergleichbar.

In Bezug auf die Bewertung der explorativen Tests ist etwas unklar, nach welchem Kriterium die Anzahl der Leukämien und Lymphome zu bewerten wäre, da dies keine unabhängige weitere Kategorie ist. Dieses SIR ist jedoch auch ohne Korrektur für multiples Testen nicht signifikant.

Tab. 2.3: Häufigkeit von Neuerkrankungsfällen in der SG Asse in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 (EKN 2011)  
(Vergleichsregion ehemaliger RB Braunschweig, EKN-Stand 1. Oktober 2010)

SG Asse – Inzidenz 2002 – 2009 (Stand 1. Oktober 2010) Krebsdiagnose		Neuerkrankungen beobachtet			Neuerkrankungen erwartet			SIR (beobachtet/erwartet)			95 %-Konfidenzintervall des SIR (zweiseitig)			p-Wert (einseitig)
		M	W	M+W	M	W	M+W	M	W	M+W	M	W	M+W	M+W
Krebs insgesamt	C00 – C97 o. C44	217	180	397	211,3	167,3	378,6	1,03	1,08	1,05	0,89 – 1,17	0,92 – 1,25	0,95 – 1,16	0,1784
Mund + Rachen	C00 – C14	7	1	8	7,6	2,2	9,8	0,92	0,46	0,82	0,37 – 1,90	0,01 – 2,58	0,35 – 1,61	0,7612
Speiseröhre	C15	3	1	4	4,0	1,0	5,0	0,76	1,00	0,80	0,15 – 2,21	0,01 – 5,55	0,22 – 2,05	0,7350
Magen	C16	10	4	14	8,2	5,0	13,2	1,23	0,80	1,06	0,59 – 2,26	0,22 – 2,05	0,58 – 1,78	0,4489
Dünndarm, Zwölffingerdarm	C17	0	0	0	0,6	0,6	1,2	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Darm	C18 – C21	36	24	60	28,5	23,0	51,5	1,26	1,04	1,17	0,88 – 1,75	0,67 – 1,55	0,89 – 1,50	0,1334
Leber, intrahep. Gallengänge	C22	3	0	3	2,8	1,2	4,0	1,07	–	0,75	0,22 – 3,13	–	0,15 – 2,19	0,7619
Gallenblase, n.n.bez. Teile der Gallenwege	C23 – C24	4	0	4	1,3	1,6	2,9	3,00	–	1,38	0,81 – 7,68	–	0,37 – 3,53	0,3304
Bauchspeicheldrüse	C25	1	1	2	4,6	3,8	8,4	0,22	0,26	0,24	0,00 – 1,21	0,00 – 1,45	0,03 – 0,86	0,9979
Verdauungsorgane, n.n.bez.	C26	0	0	0	0,5	0,5	1,0	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Nasenhöhlen, Nasennebenhöhlen, Mittelohr	C30 – C31	0	0	0	0,3	0,2	0,5	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Kehlkopf	C32	1	0	1	2,9	0,4	3,3	0,35	–	0,30	0,00 – 1,92	–	0,00 – 1,69	0,9631

Lunge + Luftröhre	C33 – C34	18	10	28	25,8	10,3	36,1	0,70	0,97	0,78	0,41 – 1,10	0,46 – 1,78	0,52 – 1,12	0,9286
Thymus, Herz, Mediastinum, Pleura	C37 – C38	0	0	0	0,1	0,1	0,2	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Knochen, Gelenkknorpel	C40 – C41	0	0	0	0,4	0,2	0,6	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Malignes Melanom der Haut	C43	9	14	23	7,6	7,9	15,5	1,18	1,76	1,48	0,54 – 2,23	0,96 – 2,96	0,94 – 2,23	0,0442
Sonstige bösartige Neubildungen der Haut	C44	48	41	89	49,9	42,0	91,9	0,96	0,98	0,97	0,71 – 1,28	0,70 – 1,32	0,78 – 1,19	0,6328
Mesotheliom	C45	0	0	0	0,8	0,1	0,9	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Periphere Nerven und autonomes Nervensystem	C47	0	0	0	0,1	0,1	0,2	zu wenig Fälle			–	–	–	–
(Retro-)Peritoneum	C48	0	0	0	0,2	0,2	0,4	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Bindegewebe u.a. Weichteile	C49	0	1	1	1,1	0,9	2,0	–	1,07	0,50	–	0,01 – 5,95	0,01 – 2,78	0,8647
Brustdrüse	C50	2	63	65	0,5	56,5	57,0	3,78	1,11	1,14	0,42 – 13,65	0,86 – 1,43	0,88 – 1,45	0,1600

Fortsetzung Tab. 2.3: Häufigkeit von Neuerkrankungsfällen in der SG Asse in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 (EKN 2011)

(Vergleichsregion ehemaliger RB Braunschweig, EKN-Stand 1. Oktober 2010)

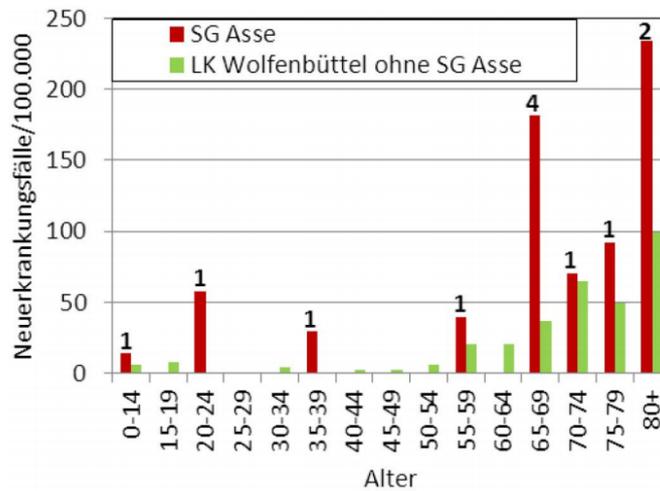
SG Asse – Inzidenz 2002 – 2009 (Stand 1. Oktober 2010) Krebsdiagnose	ICD-10- Code	Neuerkrankungen beobachtet			Neuerkrankungen erwartet			SIR (beobachtet/erwartet)			95 %-Konfidenzintervall des SIR (zweiseitig)			p-Wert (einseitig)
		M	W	M+W	M	W	M+W	M	W	M+W	M	W	M+W	M+W
Vulva, Vagina	C51 – C52	–	2	–	–	1,7	–	–	1,15	–	–	0,13 – 4,14	0,13 – 4,14	0,5068
Gebärmutterhals	C53	–	4	–	–	4,4	–	–	0,90	–	–	0,24 – 2,30	0,24 – 2,30	0,6406

Gebärmutterkörper	C54 – C55	–	12	–	–	8,7	–	–	1,38	–	–	0,71 – 2,41	0,71 – 2,41 (W)	0,1689
Eierstock	C56	–	8	–	–	6,3	–	–	1,28	–	–	0,55 – 2,52	0,55 – 2,52 (W)	0,2983
Weibl. Genitalorgane, n.n.bez.	C57	–	1	–	–	0,5	–	–	2,13	–	–	0,03 – 11,85	0,03 – 11,85 (W)	0,3935
Penis, männl. Genitalorgane, n.n.bez.	C60 + C63	0	–	–	0,6	–	–	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Prostata	C61	51	–	–	59,6	–	–	0,86	–	–	0,64 – 1,13	–	0,64 – 1,13 (M)	0,8827
Hoden	C62	2	–	–	3,9	–	–	0,52	–	–	0,06 – 1,87	–	0,06 – 1,87 (M)	0,9008
Niere, Harnorgane (ohne Harnblase)	C64, 65, 66, 68	11	4	15	7,9	4,2	12,1	1,40	0,95	1,24	0,70 – 2,50	0,25 – 2,42	0,69 – 2,04	0,2371
Harnblase	C67	29	3	32	18,8	5,5	24,3	1,54	0,54	1,32	1,03 – 2,22	0,11 – 1,58	0,90 – 1,86	0,0766
Auge	C69	0	0	0	0,3	0,3	0,6	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Meningen, Rückenmark, Hirnnerven, ZNS n.n.bez.	C70+C72	0	0	0	0,1	0,1	0,2	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Gehirn	C71	4	1	5	2,0	1,5	3,5	1,99	0,67	1,43	0,54 – 5,09	0,01 – 3,73	0,46 – 3,33	0,2746
Schilddrüse	C73	2	10	12	1,3	3,4	4,7	1,56	2,94	2,55	0,18 – 5,65	1,41 – 5,40	1,32 – 4,46	0,0034
Nebenniere, sonst, endokrine Drüsen	C74 – C75	0	0	0	0,1	0,1	0,2	zu wenig Fälle			–	–	–	–
Hodgkin-Lymphom	C81	1	2	3	1,0	0,7	1,7	1,04	2,95	1,76	0,01 – 5,80	0,33 – 10,66	0,35 – 5,16	0,2428
Non-Hodgkin-Lymphom	C82 – C85	7	4	11	6,6	5,2	11,8	1,07	0,77	0,93	0,43 – 2,20	0,21 – 1,98	0,46 – 1,67	0,6315
Bösart. immunproliferative Krankheiten, Plasmozytom	C88 – C90	2	1	3	2,4	1,9	4,3	0,85	0,53	0,70	0,10 – 3,06	0,01 – 2,94	0,14 – 2,04	0,8026

Leukämien	C91 – C95	12	6	18	4,8	3,5	8,3	2,49	1,72	2,17	1,29 – 4,35	0,63 – 3,74	1,28 – 3,43	0,0023
Leukämien + Lymphome insgesamt	C81 – C96	22	13	35	14,7	11,3	26,0	1,49	1,15	1,35	0,94 – 2,26	0,61 – 1,97	0,94 – 1,87	0,0528
Restliche bösartige Neubildungen	C39, 46, 58, 76, 80, 97	2	3	5	4,3	3,5	7,8	0,46	0,87	0,64	0,05 – 1,67	0,17 – 2,54	0,21 – 1,50	0,8883

Die aufgetretenen Leukämiefälle in der SG Asse und im Vergleich dazu dem LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse, bzw. dem ehemaligen RB Braunschweig, verteilen sich auf die Altersklassen wie folgt (Abbildungen 2.1 und 2.2):

### Leukämien (C91 – C95) – Männer



### Leukämien (C91 – C95) – Frauen

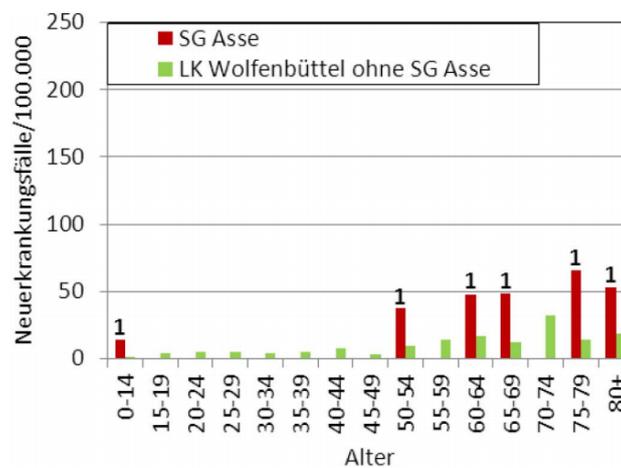
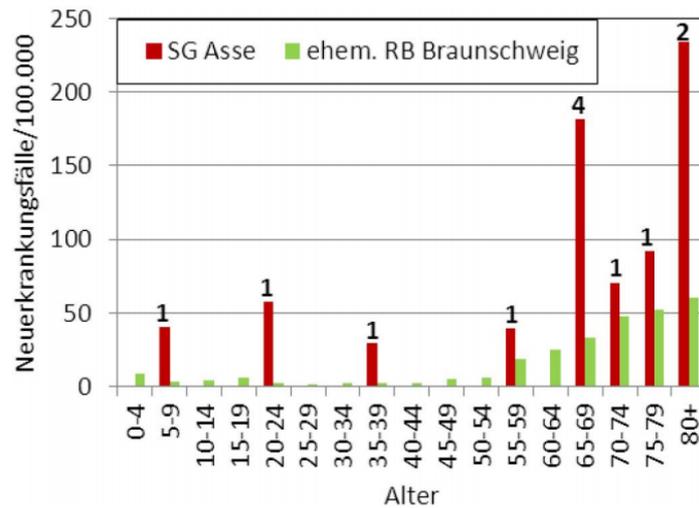


Abb. 2.1: Vergleich der Leukämieinzidenz (C91 – C95) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse und dem LK Wolfenbüttel ohne SG Asse, Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (EKN 2010a).

### Leukämien (C91 – C95) – Männer



### Leukämien (C91 – C95) – Frauen

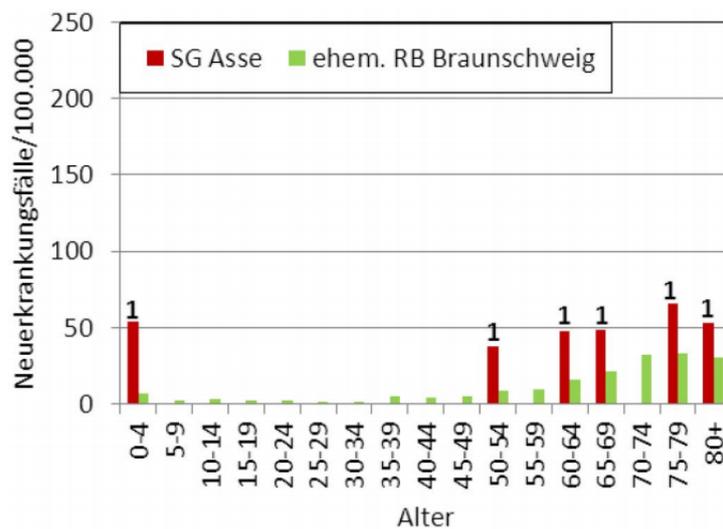


Abb. 2.2: Vergleich der Leukämieinzidenz (C91 – C95) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse (rot) und dem ehemaligen RB Braunschweig (grün), Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (Daten aus EKN 2011).

Von den Leukämiefällen in der SG Asse 2002 bis 2009 verteilen sich die Fälle bei den Männern in erwarteter Weise auf die auch in ganz Niedersachsen im gleichen Zeitraum vier häufigsten Subentitäten (in dieser Reihenfolge): C91.1 – Chronische lymphatische Leukämie, C92.0 – Akute myeloische Leukämie, C92.1 – Chronische myeloische Leukämie und C91.0 – Akute lymphoblastische Leukämie. Bei den Frauen traten zusätzlich ein etwas seltenerer Subtyp und ein Fall nicht näher bezeichneten Subtyps auf. Der SSK liegt die genaue Verteilung vor, die hier aus Gründen des Datenschutzes nicht wiedergegeben wird.

Als Zusatzinformation können wir feststellen, dass die Leukämiehäufigkeit bei Kindern unter 15 Jahren in der SG Asse im Vergleich zum gesamten Bundesgebiet im gleichen Zeitraum unauffällig war.

Eine Gesamtschau der SIR-Ergebnisse für Leukämie im gesamten LK Wolfenbüttel ergibt folgendes Bild (siehe Tabelle 2.4, Abbildung 2.3):

Tab. 2.4: SIR für Leukämie (C91 – 95) in den Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig, 2002 bis 2009 (EKN 2010b, EKN 2011).

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel	Männer und Frauen		Männer		Frauen	
	SIR	95 %-KI	SIR	95 %-KI	SIR	95 %-KI
SG Asse	2,17 (sig.) <sup>a</sup>	1,28 – 3,34	2,49	1,29 – 4,35	1,72	0,63 – 3,74
Gemeinde Cremlingen	0,93 <sup>b</sup>	0,46 – 1,67	1,03	0,41 – 2,13	0,79	0,21 – 2,03
Stadt Wolfenbüttel	0,95 <sup>b</sup>	0,70 – 1,25	1,05	0,71 – 1,49	0,82	0,49 – 1,28
SG Baddeckenstedt	0,99 <sup>b</sup>	0,47 – 1,82	1,21	0,49 – 2,50	0,70	0,14 – 2,05
SG Oderwald	1,88 <sup>b</sup>	0,97 – 3,28	2,17	0,93 – 4,28	1,47	0,40 – 3,76
SG Schladen	1,04 <sup>b</sup>	0,50 – 1,92	0,93	0,30 – 2,18	1,18	0,38 – 2,76
SG Schöppenstedt	1,00 <sup>b</sup>	0,48 – 1,84	1,07	0,39 – 2,32	0,92	0,25 – 2,34
SG Sickinge	0,97 <sup>b</sup>	0,44 – 1,84	0,76	0,20 – 1,95	1,26	0,40 – 2,93

<sup>a</sup> Konfirmatorischer Test zum Niveau 5 %

<sup>b</sup> Explorative Tests zum Niveau 5 % bei 41 Tests nach Bonferroni-Holm (Victor et al. 2010), alle Testergebnisse sind nicht signifikant.

Das auffällige Ergebnis für die SG Asse bleibt die einzige Ausnahme.

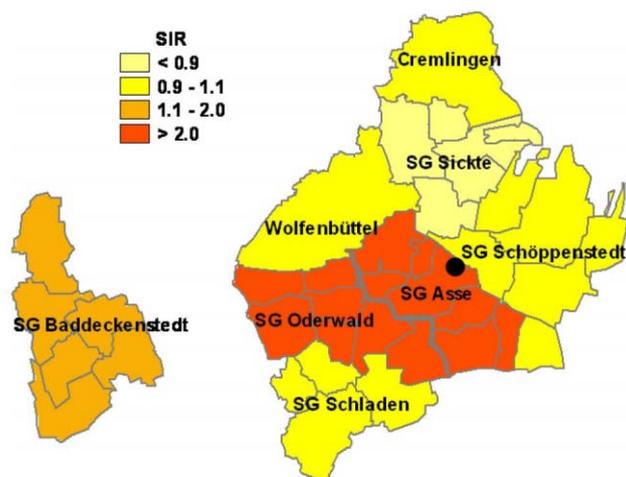


Abb. 2.3: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) entsprechend Tabelle 2.4 für Leukämien bei

Männern im LK Wolfenbüttel nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden, 2002 bis 2009. Der Punkt bezeichnet die ungefähre Lage der Schachtanlage Asse II.

Das EKN berichtete in (EKN 2010a) für die SG Asse im Vergleich zum Rest des LK Wolfenbüttel ein exploratives SIR für Schilddrüsenkrebs von 3,05 (signifikant zum Niveau 5 % bei 37 Tests korrigiert nach Bonferroni), getrennt für Männer und Frauen ergaben sich 3,36 und 3,00. Dies beruht auf 12 beobachteten Fällen aus den Erkrankungsjahren 2002 bis 2009 im Vergleich zu 3,9 erwarteten Fällen. Die alternative Bewertung im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig ergab SIR = 2,55 (nicht signifikant zum Niveau 5 % adjustiert für 41 Tests nach Bonferroni-Holm), separat für Männer und Frauen jeweils 1,56 und 2,94. Die erwartete Anzahl betrug 4,7 Fälle (siehe Tabelle 2.3).

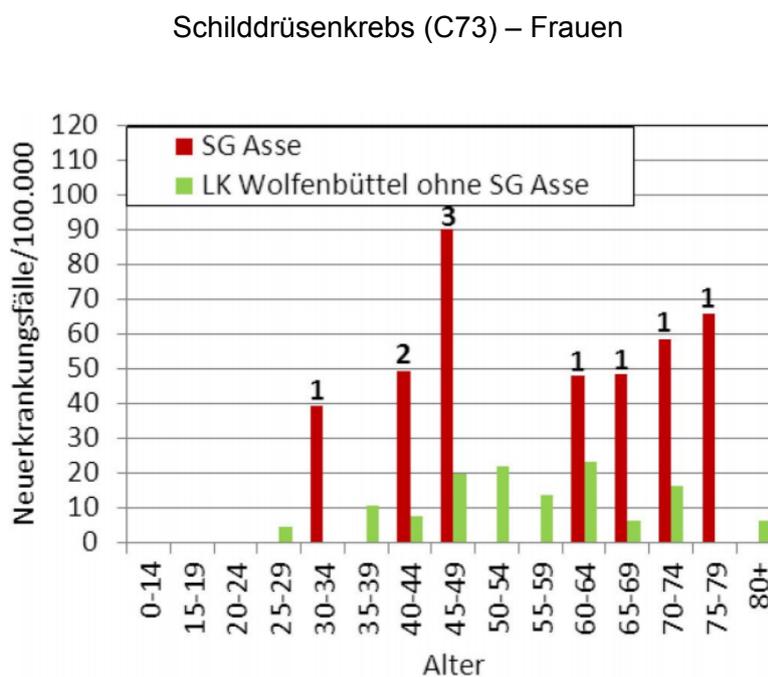


Abb. 2.4: Vergleich der Inzidenz des Schilddrüsenkrebs (C73) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse und dem LK Wolfenbüttel ohne SG Asse, Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Dargestellt sind nur Frauen, da bei den Männern nur 2 Fälle auftraten. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (EKN 2010a).

Erkennbar ist die aufgrund der kleinen beobachteten Zahlen deutlich schwankende altersspezifische Inzidenz in den Landkreisdaten (grün dargestellt) (Abbildung 2.4).

### Schilddrüsenkrebs (C73) – Frauen

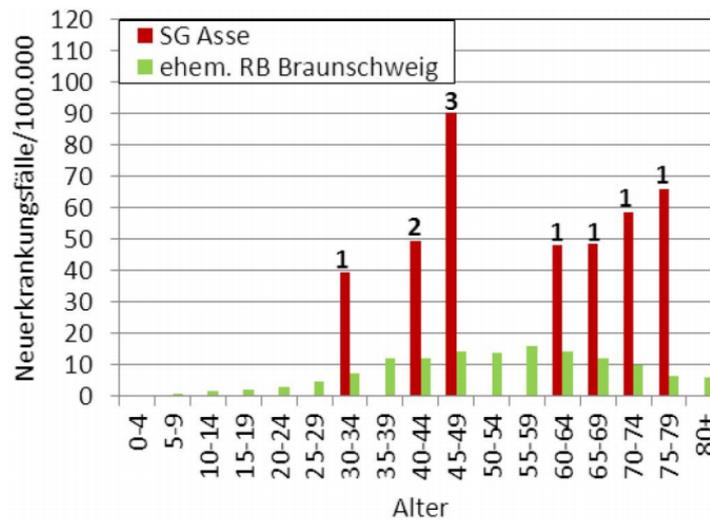


Abb. 2.5: Vergleich der Inzidenz des Schilddrüsenkrebs (C73) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse (rot) und dem ehemaligen RB Braunschweig (grün), Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Dargestellt sind nur Frauen, da bei den Männern nur 2 Fälle auftraten. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (Daten aus EKN 2011).

Erkennbar sind die aufgrund der größeren Zahlen sehr viel weniger schwankenden Inzidenzangaben der Vergleichsbevölkerung ehemaliger RB Braunschweig (grün dargestellt) (Abbildung 2.5). Erkennbar ist auch, dass die Erkrankungen überwiegend im erwarteten Alter aufgetreten sind, mit einer gewissen Häufung im Alter unter 50 (Abbildungen 2.4 und 2.5). Die Verteilung der histologischen Subtypen unterscheidet sich nach Angaben des EKN nicht wesentlich von der Verteilung auf Landesebene in Niedersachsen. Die Schilddrüsenerkrankungen bei den Frauen waren zu 70 % im niedrigsten Stadium T1, dies ist ungewöhnlich viel. Die Stadien sind definiert nach der TNM-Klassifikation der Schilddrüsenmalignome (UICC 2002). Die Stadienverteilung im Einzelnen liegt der SSK vor, wird jedoch aus Gründen des Datenschutzes hier nicht veröffentlicht.

Die Häufung eher jüngerer Fälle (unter 50) und ungewöhnlich vieler niedriger Stadien bei den Frauen ist auffällig und spricht für eine große Zahl von vorgenommenen Untersuchungen ohne konkreten Krankheits-Verdacht. Eine Gesamtschau der SIR-Ergebnisse für Schilddrüsenkrebs ergibt folgendes Bild:

Tab. 2.5: SIR für Schilddrüsenkrebs in den Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig, 2002 bis 2009 (EKN 2010b, EKN 2011).

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel			Männer		Frauen	
	SIR	95 %-KI	SIR	95 %-KI	SIR	95 %-KI
SG Asse	2,55 <sup>b</sup>	1,32 – 4,46	1,56	0,18 – 5,65	2,94	1,41 – 5,40
Gemeinde Cremlingen	0,48 <sup>b</sup>	0,10 – 1,39	–	–	0,65	0,13 – 1,90
Stadt Wolfenbüttel	1,01 <sup>b</sup>	0,67 – 1,47	0,28	0,03 – 1,00	1,28	0,83 – 1,89
SG Baddeckenstedt	1,48 <sup>b</sup>	0,64 – 2,92	2,02	0,41 – 5,90	1,27	0,41 – 2,97
SG Oderwald	1,18 <sup>b</sup>	0,32 – 3,01	–	–	1,62	0,43 – 4,14
SG Schladen	0,43 <sup>b</sup>	0,05 – 1,54	0,77	0,01 – 4,29	0,30	0,00 – 1,64
SG Schöppenstedt	0,20 <sup>b</sup>	0,00 – 1,11	–	–	0,28	0,00 – 1,56
SG Sickinge	0,58 <sup>b</sup>	0,12 – 1,69	0,71	0,01 – 3,97	0,53	0,06 – 1,91

<sup>b</sup> Explorative Tests zum Niveau 5 % bei 41 Tests nach Bonferroni-Holm (Victor et al. 2010). Alle Testergebnisse sind nicht signifikant.

– keine/zu wenige Fälle

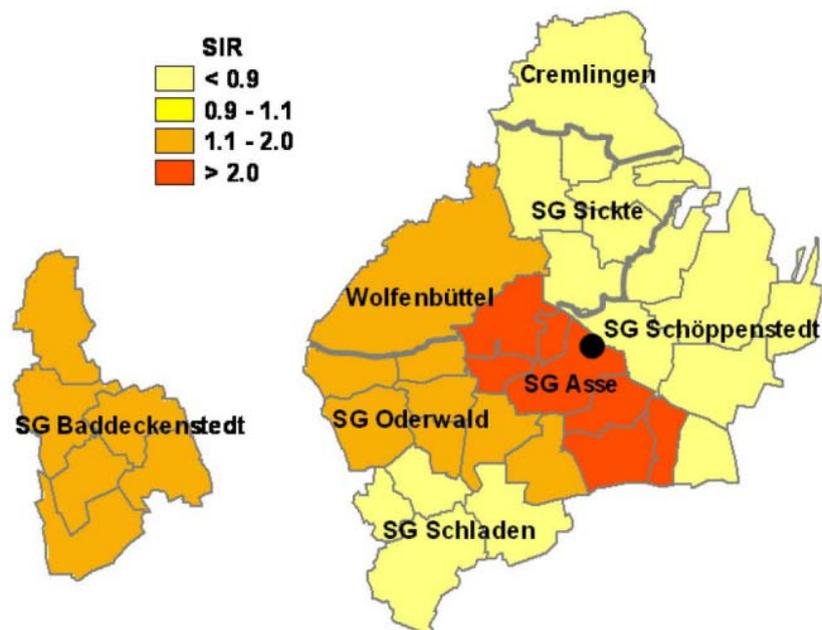


Abb. 2.6: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) entsprechend Tabelle 2.5 für Schilddrüsenkrebs bei Frauen im LK Wolfenbüttel nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden, 2002 bis 2009. Der Punkt bezeichnet die ungefähre Lage der Schachtanlage Asse II.

Setzt man für alle Samtgemeinden/Gemeinden des LK Wolfenbüttel außer der SG Asse und alle 41 berichteten Krebsentitäten (EKN 2010b) als eher antikonservative Vorgehensweise für jede Samtgemeinde/Gemeinde 41 unabhängige Tests an und korrigiert die einseitigen Tests nach Bonferroni-Holm (Victor 2010), so ergeben sich keine signifikanten Ergebnisse. Der Bericht (EKN 2010b) kam auf

Basis einer etwas anderen Herangehensweise (siehe oben) zu dem gleichen Schluss. Das auffällige Ergebnis für die Leukämie in der SG Asse bleibt die einzige Ausnahme.

### 2.3 Bezug der untersuchten Krankheitsfälle zur Beschäftigung in der Schachtanlage Asse II

Da nur etwa für die Hälfte der in der SG Asse zwischen 2002 und 2009 neu aufgetretenen 35 Fälle an hämatologischen Erkrankungen (Leukämien und Lymphome) und für keine der 12 Schilddrüsenkrebserkrankungen Name und Anschrift der jeweiligen Person dem EKN bekannt war (nur bei Meldung durch behandelnden Arzt mit Information des Patienten), konnte keine vollständige Befragung der Betroffenen zu Arbeitsstätten oder anderen Risikofaktoren durchgeführt werden. Aus diesem Grunde startete der LK Wolfenbüttel einen Aufruf an die Bevölkerung und die Institute der Pathologie in der Region, sich beim Gesundheitsamt Wolfenbüttel zu melden, um anschließend über Fragebogen die notwendigen Informationen von den Betroffenen oder deren Angehörigen ggf. über die behandelnden Ärzte zu erfragen. Für weniger als ein Drittel der oben genannten 47 Krebsfälle der SG Asse konnte im Zuge dieses Aufrufs diese Information am Ende gewonnen werden. Damit konnte die Frage nicht beantwortet werden, ob die in den Jahren 2002 bis 2009 in der SG Asse beobachtete Erhöhung der Zahl der Neuerkrankungen (Leukämien, Lymphome und Schilddrüsenkrebs) möglicherweise mit einer Beschäftigung bei der Schachtanlage Asse II zusammenhängen könnte.

Aus diesem Grunde hat sich das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) entschieden, einen anonymisierten Abgleich der 47 Fälle mit den Beschäftigten der Asse durchzuführen. Für einen derartigen Abgleich werden sowohl Daten des EKN (Krebsfälle in der SG Asse) wie der Beschäftigten der Schachtanlage Asse II benötigt. Alle personenbeziehbaren, personenidentifizierenden Daten des EKN sind hoch sensibel und unterliegen strengsten Datenschutzbestimmungen. Ähnliches gilt für die personenbezogenen Daten zu den Beschäftigten der Schachtanlage Asse II. Diese wurden mit Zustimmung des Bundesbeauftragten für Datenschutz und Informationsfreiheit (BfDI) vom BfS nur für den Zweck des Gesundheitsmonitoring Asse (GM) erhoben. Auflage des GM Asse war, dass keine personenbezogenen Daten an Dritte weitergegeben werden und keine Erkrankungen von Beschäftigten erhoben werden. Um einen Abgleich der Daten des EKN mit den Daten der Beschäftigten der Asse durchzuführen, wurde ein Datenschutzkonzept entwickelt und das Einverständnis der Geschäftsführung und des Betriebsrats der Asse-GmbH sowie die Zustimmungen der Datenschutzbeauftragten des BfS (Treuhanderin der personenbezogenen Daten der Asse) und des BfDI eingeholt.

Das Datenschutzkonzept sieht vor, dass die personenbezogenen Daten von den jeweiligen Stellen (EKN und BfS) doppelt-verschlüsselt werden (MD5-Schlüssel und IDEA-Schlüssel). Diese Doppelverschlüsselung lässt keine Dechiffrierung über Dritte zu. Das EKN und das BfS gaben die so verschlüsselten Daten an eine dritte unabhängige Stelle, die den Abgleich vornahm. Hierzu wurden die 47 zwischen 2002 und 2009 in der SG Asse aufgetretenen Neuerkrankungen des EKN (hämatologische Krebserkrankungen: 22 Männer und 13 Frauen; Schilddrüsenkrebs: 2 Männer und 10 Frauen) mit den 800 im Zeitraum 1967 bis 2008 Beschäftigten der Schachtanlage Asse II abgeglichen. Die 800

Beschäftigten (Männer und Frauen) der Schachtanlage Asse II umfassten sowohl die 695 Personen, die als potentiell strahlenexponiert in das GM Asse aufgenommen worden waren als auch 105 weitere Personen, z.B. der Verwaltung etc., die als sicher nicht strahlenexponiert eingestuft worden waren.

Das Datenschutzkonzept sieht vor, dass nur die Information, wie viele Übereinstimmungen bzw. „Treffer“ es gibt, an das EKN und das BfS weitergegeben wird. Weitergehende Informationen zum Geschlecht, zur Erkrankung oder des Schlüssels der Person durften hingegen nicht weitergegeben werden. Da in einigen Fällen von den Beschäftigten nur Nachname oder Nachname und Vorname ohne Geburtsjahr vorlagen, wurde vereinbart, „sichere Treffer“ und „unsichere Treffer“ zu kennzeichnen. Ein „sicherer Treffer“ bedeutete, dass sowohl Namen, Geschlecht und Geburtsjahr übereinstimmten, ein „unsicherer Treffer“ bedeutet demgegenüber, dass Unsicherheiten beim Match bestehen, etwa weil für eine der Variablen keine Angaben vorliegen.

Der Abgleich der 47 im Zeitraum 2002 bis 2009 in der SG Asse neu aufgetretenen Krebsfälle (hämatologisch Krebserkrankung oder Schilddrüsenkrebs) mit den 800 zwischen 1967 und 2008 bei der Schachtanlage Asse II Beschäftigten ergab einen „sicheren Treffer“ und keinen „unsicheren Treffer“. Dies bedeutet, dass eine der 47 zwischen 2002 und 2009 in der SG Asse neu an einer der genannten Krebsarten erkrankten Personen bei der Schachtanlage Asse II beschäftigt war. Die zwischen 2002 und 2009 in der SG Asse beobachtete Inzidenzerhöhung für Schilddrüsenkrebs und hämatologische Krebserkrankungen kann von daher nicht auf eine Tätigkeit auf der Schachtanlage Asse II zurückgeführt werden. Der anonymisierte Abgleich der Beschäftigten mit den hier betrachteten Erkrankungsfällen an Leukämien, Lymphomen und Schilddrüsenkrebs erbrachte lediglich eine Übereinstimmung für einen Fall, damit ist eine Beschäftigung in der Schachtanlage Asse als Grund für die beobachteten erhöhten Inzidenzen im Zeitraum 2002 bis 2009 praktisch auszuschließen.

## 2.4 Diskussion

Es ist möglich, dass die Anfrage des LK Wolfenbüttel an das EKN nicht ohne Anlass, sondern aufgrund eines konkreten Verdachts erfolgte. Dies wird dadurch gestützt, dass von den zwei unmittelbar an die Schachtanlage Asse II angrenzenden Samtgemeinden (Asse und Schöppenstedt) eine Frage nur für die SG Asse formuliert wurde. Damit wäre die Auswertung nicht hypothesengesteuert sondern datengesteuert, was ihre Aussagekraft mindern würde. Sie würde damit nicht die Kriterien für eine konfirmatorische Analyse im engeren Sinne erfüllen. Eine signifikante Auffälligkeit bezüglich der Leukämiehäufigkeit wurde nur in der SG Asse, jedoch nicht in den anderen Gemeinden des LK Wolfenbüttel, auch nicht in der direkt östlich der Schachtanlage Asse II gelegenen SG Schöppenstedt, beobachtet. Bezüglich der Altersstruktur und der Subentitäten der Leukämiefälle ergeben sich keine Auffälligkeiten; die absoluten Anzahlen pro Altersgruppe und Subentität sind gering.

Die relativ geringen Inzidenzen an Schilddrüsenkrebs machen die Inzidenzangaben aus dem LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse sehr unsicher, der Vergleich mit dem ehemaligen RB Braunschweig ist

erkennbar die validere Aussage. Eine (nicht signifikante) Auffälligkeit bezüglich der Schilddrüsenkrebshäufigkeit wurde in der explorativen Analyse auf dieser Basis nur in der SG Asse, jedoch nicht in den anderen Gemeinden, auch nicht in der direkt östlich der Schachanlage Asse II gelegenen SG Schöppenstedt, beobachtet. Die Alters-, Geschlechts- und Schweregradverteilung der Schilddrüsenpatienten (ungewöhnlich viele Frauen unter 50, ungewöhnlich viele niedrige Stadien) in der SG Asse deutet möglicherweise auf eine größere Zahl von Untersuchungen ohne konkreten Krankheitsverdacht hin. Eine Nachfrage ist aufgrund der Tatsache, dass alle diese Meldungen von Pathologen, und damit entsprechend dem niedersächsischen Krebsregistergesetz anonym, erfolgten, nicht möglich (GEKN 1999). Ein Aufruf, sich auf freiwilliger Basis zu melden, brachte nicht den gewünschten Erfolg.

## 2.5 Bewertung

Die SSK ist der Ansicht, dass die vorliegenden Auswertungen des EKN zu der Fragestellung einer regionalen Krebshäufung im LK Wolfenbüttel korrekt durchgeführt wurden. Die Schlussfolgerungen sind ebenfalls korrekt.

Die SSK ist der Ansicht, dass von den vorliegenden alternativen Bewertungen der SG Asse im Vergleich zum LK Wolfenbüttel ohne SG Asse oder dem ehemaligen RB Braunschweig diejenigen Berechnungen im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig zur Bewertung herangezogen werden sollten, da sie auf einer größeren Datenbasis beruhen und untereinander vergleichbar sind.

Die SSK stellt fest, dass sich aus statistischer Sicht eine Leukämiehäufung in der gesamten Umgebung der Schachanlage Asse nicht ergibt, lediglich eine isolierte Häufung in der SG Asse wurde beobachtet, die im Gesamtzusammenhang durchaus möglicherweise zufällig ist. Die Überprüfung aller anderen Krebsentitäten, Gemeinden, Samtgemeinden und die Aufteilung nach Geschlecht müssen als explorativ bewertet werden, wobei eine gewisse Anzahl rein zufällig gegenüber dem erwarteten Wert erhöhter und erniedrigter Werte sich aus den normalen Zufallsschwankungen ergibt. Es ergeben sich daraus keine Anhaltspunkte für eine Häufung von Schilddrüsenkrebsfällen.

## 3 Statistische Bewertung regionaler Unterschiede

### 3.1 Einleitung

Die kleinräumige Untersuchung der geografischen Verteilung von Krankheiten dient u. a. der Identifikation von sog. Krankheitsclustern, d. h. von Arealen mit gegenüber dem Durchschnitt deutlich erhöhter Inzidenz. Dabei kann man einzelne räumliche Einheiten oder zusammenhängende benachbarte räumliche Einheiten betrachten. Hier werden Verfahren des Disease Mapping verwendet, um strukturelle Unterschiede im Untersuchungsgebiet beschreiben zu können. Um die Betrachtung auf eine breitere Basis zu stellen, hat die SSK eine Untersuchung für die Leukämien und Schilddrüsenkrebserkrankungen

aller 71 Gemeinden und Samtgemeinden des ehemaligen RB Braunschweig vorgenommen. Die anonymisierten Daten wurden vom EKN für den Zeitraum des ursprünglichen Berichts 2002 bis 2009 zur Verfügung gestellt (EKN 2010a).

Verfahren des Disease Mapping sind grundsätzlich nicht geeignet, eine kausale Beziehung zwischen einer Exposition und einer Erkrankung herzustellen, sie haben beschreibenden Charakter.

### 3.2 Methoden

Zunächst wird für jede Gemeinde und die jeweilig betrachtete Erkrankung das „rohe“ SIR bezogen auf den ehemaligen RB Braunschweig berechnet. Dieses übliche Vorgehen hat den prinzipiellen Nachteil, dass nicht zwingend Unterschiede im Erkrankungsrisiko dargestellt werden, sondern möglicherweise nur Unterschiede in der Variabilität der jeweiligen SIRs. Grundsätzlich werden bei kleinen Fallzahlen eher starke Schwankungen des SIR, d. h. weit von 1 entfernte Werte, beobachtet als bei großen Fallzahlen. Der Grund ist, dass bei kleinen Fallzahlen bereits ein oder zwei Fälle mehr oder weniger erhebliche Änderungen bewirken können. Besonders anfällig für eine derartige Überbewertung sind folglich Gemeinden mit wenigen Einwohnern und seltene Erkrankungen.

Deshalb wurden sogenannte empirische Bayes- und vollständige Bayes-Verfahren genutzt, um strukturelle Unterschiede des Erkrankungsrisikos, die über Zufallsschwankungen hinausgehen, zu identifizieren. Für diese Modelle wird angenommen, dass die beobachteten Fälle einer Poissonverteilung folgen. Die auf Basis des Gesamtdatensatzes erwarteten Fälle bilden dabei ein sogenanntes Offset. Um strukturelle Unterschiede zwischen den Gemeinden abzubilden, wird die Heterogenität zwischen den Gemeinden durch eine Normalverteilung beschrieben. Je größer die Unterschiede zwischen den Regionen, umso größer die Varianz dieser Normalverteilung. Wenn so zusätzlich für die Parameter des Modells wieder Verteilungen angenommen werden, handelt es sich um einen sogenannten vollständigen Bayes-Ansatz. Die Parameter dieses Modells wurden mit der Software SAS 9.3 (Proc Glimmix) geschätzt. Beiden Verfahren (empirischer und vollständiger Bayes-Ansatz) ist gemeinsam, dass sie die resultierenden SIR-Schätzwerte für die jeweilige Region von Zufallsschwankungen, dem sog. „Rauschen“, befreien. Eine verbleibende Heterogenität bedeutet, dass es Unterschiede gibt, die sich nicht ausschließlich durch Zufallsschwankungen erklären lassen. Damit ist über die Ursachen dieser Schwankungen nichts gesagt. Dieses Modell kann dazu genutzt werden, modellbasierte Schätzwerte für das „wahre“ SIR der jeweiligen räumlichen Einheit ohne die reine Zufallsschwankung zu gewinnen. Die so geschätzten gegebenenfalls verbliebenen Größenunterschiede zwischen den Regionen bedürfen einer inhaltlichen Einschätzung.

Alternativ zu den Bayes-Verfahren kann man nichtparametrische Mischverteilungsmodelle anwenden (Schlattmann 2009). Bei diesem völlig anderen Ansatz wird angenommen, dass es Klassen unterschiedlichen Risikos innerhalb des betrachteten Datensatzes gibt, es wird die Zahl der sich

unterscheidenden Klassen und die Größe des Unterschieds geschätzt. Im Extremfall haben alle Gemeinden das gleiche Risiko, und Unterschiede sind allein zufallsbedingt.

Vergleichende Analysen in der Literatur führen zu einer Bevorzugung des vollständigen Bayes-Ansatzes (Lawson et al. 2000, Lawson 2006), nur diese Ergebnisse werden hier präsentiert. Die ebenfalls betrachteten Ergebnisse des empirischen Bayes-Ansatzes und des nichtparametrischen Mischmodells erbrachten vergleichbare Schlussfolgerungen. Die Bayes-Schätzwerte werden zusammen mit einem 95 %-Kreditintervall berichtet. Dieses enthält mit 95 % Wahrscheinlichkeit das unbekannte „wahre“ SIR der jeweiligen Region. Für die Darstellung der resultierenden Karten wird die Klasseneinteilung der ursprünglichen Perzentilkarten des „rohen“ SIR beibehalten. Auf diese Weise wird der Glättungseffekt, d. h. die Befreiung vom „Rauschen“ in den modellbasierten Karten auch optisch sichtbar.

### 3.3 Ergebnisse

#### 3.3.1 Leukämie bei Männern

Die rohen SIR-Daten für den ehemaligen RB Braunschweig zeigen erhebliche Heterogenität (Abbildung 3.1). Nach Anwendung des vollständigen Bayes-Verfahrens wird zwar ein erheblicher Teil der Heterogenität als Zufallsschwankung zwischen den Gemeinden identifiziert (Abbildung 3.2), es bleibt aber eine gewisse Heterogenität erhalten, d. h. einige Schätzwerte für das SIR nach dem vollständigen Bayes-Verfahren unterscheiden sich deutlich von 1,00. Die Zahlen für den LK Wolfenbüttel finden sich exemplarisch in Tabelle 3.1. Für die SG Asse wurde ein bester Schätzwert des SIR von 1,30 mit einem 95 %-Kreditintervall von (0,88 – 2,11) erhalten. Der beste Schätzwert für das SIR der SG Asse verbleibt damit im obersten Quartil der im ehemaligen RB Braunschweig beobachteten Schwankungsbereite der SIR-Werte. Die SG Asse findet sich unter den Regionen mit höherem Risiko, jedoch schließt das Kreditintervall die 1,00 ein, was jedoch auch eine Folge der eher kleinen Fallzahlen ist.

Tab. 3.1: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Leukämien bei Männern im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel	beobachtete Anzahl Fälle	erwartete Anzahl Fälle	rohes SIR	bereinigtes SIR nach vollständigem Bayes-Verfahren	95 %-Kreditintervall	
Gemeinde Cremlingen	7	6,79	1,03	0,98	0,65	1,47
Stadt Wolfenbüttel	31	29,50	1,05	1,01	0,76	1,33

SG Asse	12	4,82	2,49	1,30	0,88	2,11
SG Baddeckenstedt	7	5,77	1,21	1,02	0,68	1,53
SG Oderwald	8	3,68	2,17	1,17	0,77	1,89
SG Schladen	5	5,35	0,93	0,96	0,62	1,44
SG Schöppenstedt	6	5,62	1,07	0,99	0,64	1,48
SG Sickinge	4	5,26	0,76	0,92	0,58	1,38

### 3.3.2 Leukämie bei Frauen

Die Anwendung eines vollständigen Bayes-Verfahrens zeigt kaum verbliebene Heterogenität des SIR zwischen den Gemeinden und zeigt für die SG Asse ein durchschnittliches SIR von 1,01 mit einem 95 %-Kreditintervall von (0,84 – 1,33). Alle SIR der Gemeinden des LK Wolfenbüttel liegen zwischen 0,98 und 1,01, das kann man als gleiche Inzidenz einschätzen. Karten mit den rohen und bereinigten Werten finden sich in den Abbildungen 3.1 und 3.2. Die Zahlen für den LK Wolfenbüttel finden sich in Tabelle 3.2.

Tab. 3.2: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Leukämien bei Frauen im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel	beobachtete Anzahl Fälle	erwartete Anzahl Fälle	rohes SIR	bereinigtes SIR nach vollständigem Bayes- Verfahren	95 %-Kreditintervall	
Gemeinde Cremlingen	4	5,04	0,79	0,99	0,78	1,22
Stadt Wolfenbüttel	19	23,21	0,82	0,98	0,78	1,14
SG Asse	6	3,49	1,72	1,01	0,84	1,33
SG Baddeckenstedt	3	4,27	0,70	0,99	0,78	1,22
SG Oderwald	4	2,72	1,47	1,01	0,82	1,30
SG Schladen	5	4,22	1,18	1,01	0,81	1,27
SG Schöppenstedt	4	4,37	0,92	1,00	0,79	1,23
SG Sickinge	5	3,98	1,26	1,01	0,82	1,29

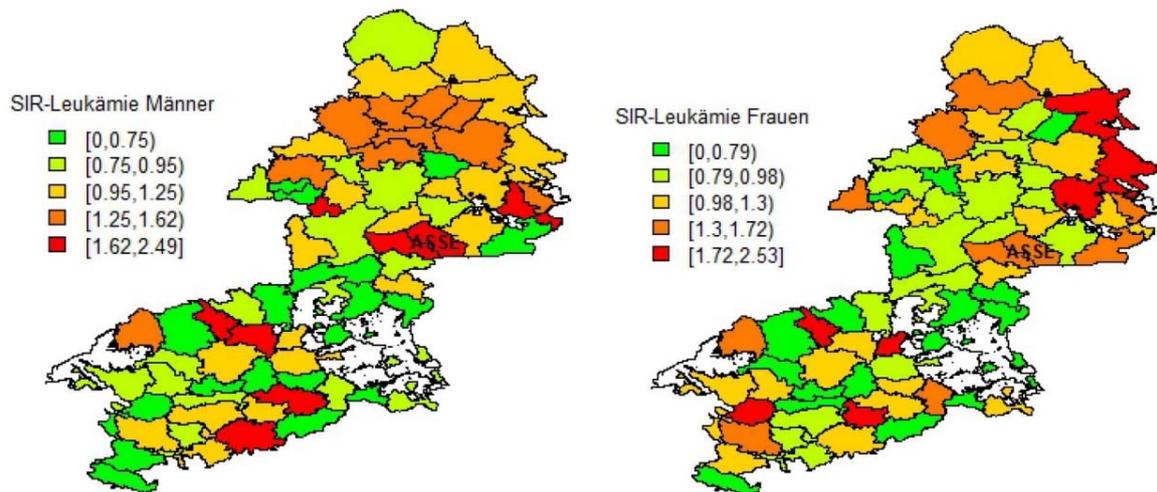


Abb. 3.1: Standardisierte „rohe“ Inzidenzverhältnisse (SIR) für Leukämien bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt.

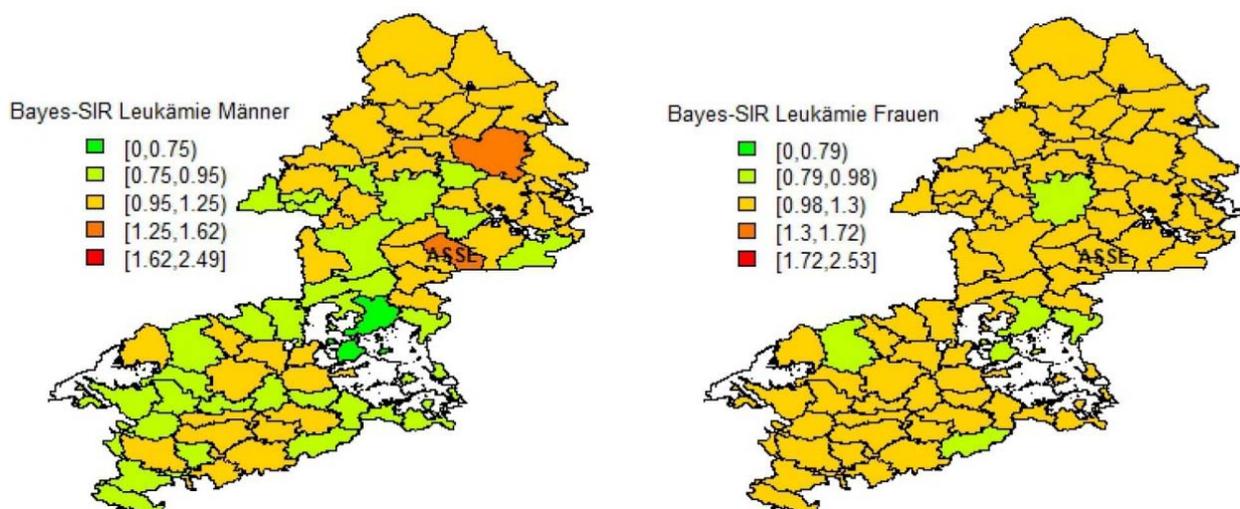


Abb. 3.2: Bereinigte standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) nach Anwendung des vollständigen Bayes-Verfahrens für Leukämien bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt (gleiche Klassengrenzen wie Abbildung 3.1).

### 3.3.3 Schilddrüsenkrebs bei Frauen

Die Anwendung eines vollständigen Bayes-Verfahrens zeigt über die Zufallsschwankung hinaus Heterogenität zwischen den Gemeinden und zeigt für die SG Asse ein durchschnittliches SIR von 1,52

mit einem 95 %-Kreditintervall von (0,88 – 2,74). (Abbildungen 3.3 und 3.4). Die Zahlen für den LK Wolfenbüttel finden sich in Tabelle 3.3.

Tab. 3.3: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Schilddrüsenkrebs bei Frauen im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel	beobachtete Anzahl Fälle	erwartete Anzahl Fälle	rohes SIR	bereinigtes SIR nach vollständigem Bayes-Verfahren	95 %-Kreditintervall	
Gemeinde Cremlingen	3	4,61	0,65	0,81	0,43	1,40
Stadt Wolfenbüttel	25	19,50	1,28	1,15	0,80	1,63
SG Asse	10	3,40	2,94	1,52	0,88	2,74
SG Baddeckenstedt	5	3,92	1,27	1,00	0,56	1,74
SG Oderwald	4	2,48	1,62	1,04	0,57	1,92
SG Schladen	1	3,38	0,30	0,75	0,37	1,33
SG Schöppenstedt	1	3,56	0,28	0,74	0,37	1,29
SG Sickinge	2	3,79	0,53	0,79	0,41	1,38

### 3.3.4 Schilddrüsenkrebs bei Männern

Die Anwendung eines vollständigen Bayes-Verfahrens zeigt wenig über das Rauschen hinausgehende Heterogenität zwischen den Gemeinden. Im Vergleich zum gesamten RB Braunschweig weisen einige Samtgemeinden/Gemeinden im LK Wolfenbüttel eine auffallend niedrige SIR auf. Die SG Asse weist ein durchschnittliches SIR von 0,95 mit einem 95 %-Kreditintervall von (0,48 – 1,78) auf. Die Zahlen für den LK Wolfenbüttel finden sich in Tabelle 3.4.

Tab. 3.4: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Schilddrüsenkrebs bei Männern im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.

Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel	beobachtete Anzahl Fälle	erwartete Anzahl Fälle	rohes SIR	bereinigtes SIR nach vollständigem Bayes-Verfahren	95 %-Kreditintervall	
--	--------------------------	------------------------	-----------	--	----------------------	--

Gemeinde Cremlingen	0	1,69	0,00	0,78	0,33	1,36
Stadt Wolfenbüttel	2	7,25	0,28	0,67	0,30	1,10
SG Asse	2	1,28	1,56	0,95	0,48	1,78
SG Baddeckenstedt	3	1,49	2,02	1,01	0,54	1,99
SG Oderwald	0	0,95	0,00	0,83	0,36	1,48
SG Schladen	1	1,30	0,77	0,88	0,41	1,57
SG Schöppenstedt	0	1,37	0,00	0,80	0,34	1,41
SG Sickinge	1	1,40	0,71	0,87	0,40	1,55

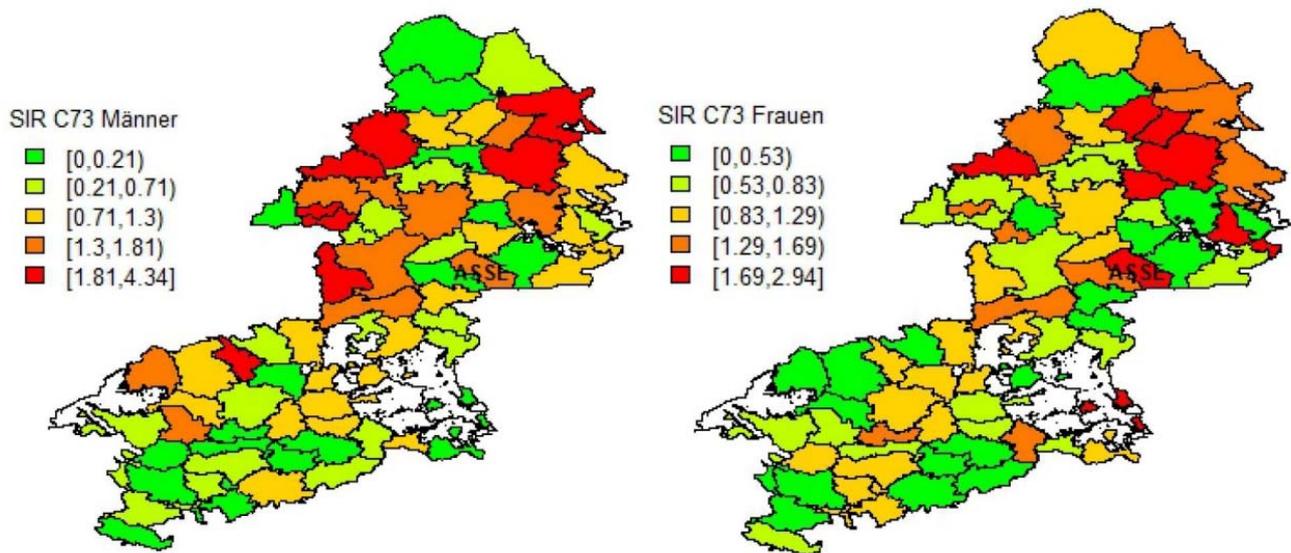


Abb. 3.3: Standardisierte „rohe“ Inzidenzverhältnisse (SIR) für Schilddrüsenkrebs bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete.

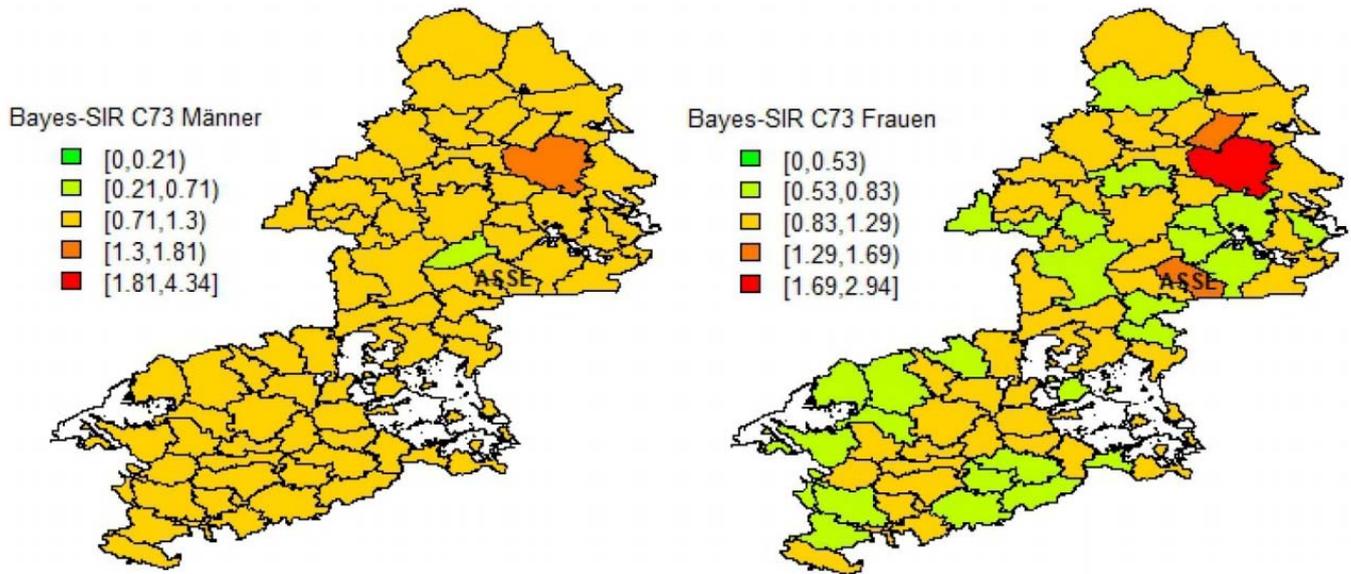


Abb. 3.4: Erwartete standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) nach Anwendung des vollständigen Bayes-Ansatzes für Schilddrüsenkrebs bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete (gleiche Klassengrenzen wie Abbildung 3.3).

### 3.4 Diskussion und Schlussfolgerung

Die von der SSK angewendeten Bayes-Verfahren erlauben die Zerlegung der beobachteten Heterogenität in eine strukturelle und eine zufallsbedingte Komponente. Der ehemalige RB Braunschweig hat in Bezug auf beide betrachtete Diagnosen und beim jeweils auffälligen Geschlecht (Leukämie bei den Männern und Schilddrüsenkrebs bei den Frauen) eine deutliche, über die Zufallsschwankung hinausgehende strukturelle Heterogenität, zu der die SG Asse mit ihrer erhöhten SIR beiträgt. Neben den Bayes-Verfahren (empirisch und vollständig), von denen aufgrund der Literatur das vollständige Bayes-Verfahren bevorzugt wird, wurden auch nichtparametrische Mischverteilungsmodelle mit Klassenbildung angewendet, die zu ähnlichen Schlussfolgerungen führten.

Bei Männern findet sich über eine reine Zufallsschwankung hinausgehende Heterogenität im Erkrankungsrisiko bei den Leukämien. Bei Verwendung von Verfahren zur Identifikation struktureller Unterschiede zwischen den Regionen findet sich die SG Asse unter den Regionen mit höherem Risiko, nach Bereinigung um die Zufallsschwankung bleibt eine abgeschätzte Erhöhung um 30 %. Allerdings findet sich bezogen auf den RB Braunschweig auch in mindestens einer anderen Gemeinde ein vergleichbar hohes Risiko für Leukämien bei Männern. Dies deutet nicht auf ein Alleinstellungsmerkmal für die SG Asse hin. Bezogen auf den Schilddrüsenkrebs findet sich bei Männern kein auffälliges Ergebnis in der SG Asse. Bei Frauen findet sich bezogen auf Leukämien kein auffälliges Ergebnis für die

SG Asse. Bezogen auf den Schilddrüsenkrebs bei Frauen findet sich die SG Asse unter den Regionen mit höherem Risiko.

Die statistische Analyse zeigt eine verbleibende Heterogenität für Leukämieerkrankungen bei Männern und Schilddrüsenkrebskrankungen bei Frauen, wobei allerdings die Kreditabilitätsintervalle der bereinigten SIRs stets den Wert 1,00 enthalten.

Die relativ hohen Unsicherheiten der statistischen Analyse der SIRs sind jedoch nicht eine Konsequenz der angewandten Verfahren, sondern eine Folge der Kleinräumigkeit des Problems und damit der geringen Fallzahlen und deuten auf ein generelles Problem bei der Bewertung sogenannter „Cluster“ hin.

Wird ein „Cluster“, d. h. eine zeitliche oder räumliche Häufung von Krankheitsfällen in der Bevölkerung, vermutet oder wahrgenommen, weckt es Ängste und Besorgnis in der Bevölkerung. Dies ist sehr gut nachvollziehbar und muss ernst genommen werden.

Die wissenschaftliche Literatur macht aber Aussagen dazu, unter welchen Umständen epidemiologische Studien aufgrund beobachteter kleinräumiger Erkrankungshäufungen sinnvoll erscheinen und zielführend sein könnten; z.B. Empfehlungen des Robert-Koch-Institutes (Schümann et al. 2009) oder des Centers for Disease Control (CDC) in den USA (CDC 1990).

Generell ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, aufgrund eines kleinräumigen Krankheitsclusters durch eine ausführliche Untersuchung oder Studie eine Ursache – wenn es sie denn gibt – zu finden. Das CDC führt aus, dass bei 108 aus den USA berichteten Krebs-Clustern trotz zum Teil sehr aufwändiger Studien nirgends die Ursache geklärt werden konnte.

Rothmann (1990) hat fünf wesentliche Punkte als Vorbehalte gegen Clusterverdachtsuntersuchungen angegeben, deren erster lautet: „Einzelne Cluster sind im Allgemeinen zu klein für epidemiologische Untersuchungen.“

In solchen Fälle reicht die verfügbare Information für eine Analyse mit geringen verbleibenden Unsicherheiten nicht aus. Dies ist auch der Fall für die beobachtete Erhöhung der Krebshäufigkeit in der SG Asse.

## **4 Risiken und Ursachen für Leukämie und Schilddrüsenkrebs**

### **4.1 Leukämie**

Im Jahr 2006 erkrankten in Deutschland etwa 9 300 Menschen an Leukämie (KID 2010). Der Begriff Leukämie umfasst eine recht heterogene Gruppe von malignen Erkrankungen des hämatopoietischen

Systems, die sich in Symptomatik und Pathogenese unterscheiden. Man unterscheidet zwischen lymphatischen Leukämien, die aus Vorläuferzellen der Lymphozyten entstehen, und myeloischen Leukämien, die aus Vorläuferzellen der Erythrozyten, Thrombozyten, Granulozyten und Monozyten entstehen. Die vier Hauptgruppen sind akute lymphatische Leukämie (ALL), akute myeloische Leukämie (AML), chronische lymphatische Leukämie (CLL) und chronische myeloische Leukämie (CML). Während für alle Formen eine Zunahme der Inzidenz mit steigendem Alter beobachtet wird (mittleres Alter bei Diagnose zwischen 60 und 70 Jahren), zeigt die ALL einen weiteren Häufigkeitsgipfel bei 2 bis 5 Jahren (SSK 2011). Leukämieerkrankungen treten bei Männern ca. 40 % häufiger auf als bei Frauen (KID 2010).

Die CLL (C91.1 nach ICD-10) verläuft im Allgemeinen langsam und wird oft zufällig aufgrund von Veränderungen im Blutbild diagnostiziert. CLL-Erkrankungen machen in Deutschland über ein Drittel aller Leukämieerkrankungen aus und treten nur selten im Alter unter 50 Jahren auf. Die Abgrenzung zwischen den lymphatischen Formen der Leukämie und Non-Hodgkin-Lymphomen (NHL) ist zum Teil unscharf, so wird CLL heute als Sonderform von NHL betrachtet.

Die CML (C92.1) macht ca. 10 % aller Leukämieerkrankungen in Deutschland aus und verläuft am Anfang oft symptomlos. Bei den meisten Patienten geht die CML mit einer spezifischen Chromosomenaberration einher, einer reziproken Translokation zwischen den Chromosomen 9 und 22, wobei das sogenannte Philadelphia-Chromosom entsteht. Dadurch kommt es zur dauerhaften Aktivierung einer bestimmten Tyrosinkinase, was die Möglichkeit einer spezifischen, gegen diese Kinase gerichtete Therapie eröffnete. Durch die Einführung dieser zielgerichteten Therapie hat sich die Prognose bei CML in den letzten Jahren deutlich verbessert.

Die ALL (C91.0) macht weniger als 10 % aller Leukämieerkrankungen beim Erwachsenen aus, während sie bei Kindern unter 15 Jahren die häufigste Leukämieform ist. Der Krankheitsverlauf ist recht heterogen.

AML-Erkrankungen (C92.0) machen ca. ein Viertel aller Leukämieerkrankungen in Deutschland aus. Das mediane Alter bei Diagnose liegt bei etwa 65 Jahren. Vor allem bei Älteren entwickelt sich AML häufig aus einem myelodysplastischen Syndrom (MDS). Die AML hat eine eher schlechte Prognose.

Weitere Leukämietypen tragen zusammen zu etwa 10 % aller Leukämieerkrankungen bei, weitere 10 % in den Krebsregistern sind ungenau bezeichnet (KID 2010).

#### 4.1.1 Ursachen für Leukämie

Die Ursachen für Leukämieerkrankungen sind weitgehend unklar. Nur ein geringer Anteil aller Leukämieerkrankungen lässt sich auf bisher identifizierte Risikofaktoren zurückführen.

Ein erhöhtes Leukämierisiko findet sich bei Patienten mit Down-Syndrom (Trisomie 21) oder einigen sehr seltenen Erbkrankheiten. So haben Fanconi-Anämie-Patienten ein ca. 800-fach erhöhtes Risiko, an AML zu erkranken, mit einer maximalen Inzidenz im Alter von 20 Jahren (Rosenberg et al. 2008). Weitere Erbkrankheiten mit erhöhten Leukämie- oder Lymphomraten sind z.B. Bloom-Syndrom, Ataxia teleangiectatica, Klinefelter-Syndrom, Patau-Syndrom, Shwachman-Diamond-Syndrom, Kostman-Syndrom, Li-Fraumeni-Syndrom und Neurofibromatose (Deschler und Lübbert 2006). Meist treten die Leukämie- bzw. Lymphomkrankungen infolge erblicher Syndrome jedoch in deutlich früherem Alter auf als das Gros der Leukämie- und Lymphomkrankungen.

Auch einige Virenerkrankungen können Lymphom- und Leukämieerkrankungen verursachen, und die International Agency for Research on Cancer (IARC) bewertet die wissenschaftliche Evidenz für die krebsauslösende Wirkung von Epstein-Barr-Virus (EBV), Hepatitis-B- und -C-Viren und humanem T-Lymphotropes Virus 1 (HTLV-1) für ausreichend groß (IARC 2011b).

Unter chemischen Noxen ist die Leukämie auslösende Wirkung von Benzol am besten untersucht und belegt. Während bislang vor allem von einem erhöhten Risiko von AML-Erkrankungen nach Benzolexposition ausgegangen wurde, deuten neuere Daten darauf hin, dass auch die Risiken für ALL und CLL erhöht sind (Baan et al. 2009, Vlaanderen et al. 2011). Zu Benzolexpositionen kann es beim Umgang mit fossilen Brennstoffen (z.B. Erdöl- und Kohleindustrie, Tankstellen) und bei unvollständigen Verbrennungen (Abgase, aber auch Zigarettenrauch) kommen. Durch die vor allem früher sehr häufige Nutzung von Benzol oder benzolhaltigen Stoffen als Lösungs- und Reinigungsmittel kam es in einigen Industriezweigen zu signifikanten Expositionen, unter anderem in der Druckindustrie sowie der Gummi-, Kunststoff- oder Lederverarbeitung (BG 1318 2010). Durch eine Verschärfung der Arbeitsschutzmaßnahmen ist von einer Verringerung möglicher Expositionen in jüngerer Zeit auszugehen.

Butadien ist ein weiterer chemischer Stoff, für den laut IARC die Evidenz dafür, dass er als Auslöser von Leukämien oder Lymphomen wirken kann, überzeugend ist (IARC 2008). Dieses wird unter anderem bei der Herstellung von Synthesekautschuk und Polymeren verwendet. Die Evidenz für eine Leukämie auslösende Wirkung von Formaldehyd ist stark, aber noch nicht vollkommen überzeugend, da erhöhte Risiken in vielen (z.B. Pathologen, Bestattern), aber nicht allen damit umgehenden Berufssparten beobachtet wurden (IARC 2006). Hinweise gibt es auch für Leukämie- oder Lymphominduktion durch Dioxine und Ethylenoxid, sowie infolge von Tätigkeiten in der Gummiindustrie und als Maler/Lackierer (Baan et al. 2009), ebenso wie für Umgang mit Pestiziden und Herbiziden (Bassil et al. 2007, van Maele-Fabry et al. 2008). Das Herbizid Agent Orange wird mit Induktion von CLL in Verbindung gebracht.

Verschiedene Medikamente, vor allem alkylierende Zytostatika, erhöhen das Risiko für AML oder ihre mögliche Vorstufe, das myelodysplastische Syndrom (MDS). Laut IARC ist die wissenschaftliche Evidenz überzeugend für die Stoffe Busulfan, Chlorambucil, Methyl-CCNU, Cyclophosphamid, Melphalan, MOPP, Thiotepa und Treosulfan (IARC 2011a). Hinweise auf erhöhte AML-Inzidenz bei

Patienten mit verschiedenen Autoimmunkrankheiten (z.B. rheumatoide Arthritis, systemischer Lupus erythematodes, ulzerative Colitits) lassen sich möglicherweise zum Teil durch die bei der Behandlung eingesetzten Medikamente erklären (Anderson et al. 2009).

Schließlich sind einige Faktoren des persönlichen Lebensstils mit erhöhten Risiken für Leukämieerkrankung assoziiert. Konsistent wird Rauchen und ehemaliges Rauchen als Risikofaktor beobachtet (Thomas und Chelghoum 2004, Ma et al. 2009). Ein weiterer möglicher Risikofaktor ist erhöhter Fleischkonsum (Ma et al. 2009).

#### 4.1.2 Leukämie nach Strahlenexposition

Eine Vielzahl von Studien belegt, dass ionisierende Strahlung ein wichtiger Risikofaktor für Leukämieerkrankungen ist. In den späten 1940er Jahren wurde von einem japanischen Arzt unter den Überlebenden der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki eine Häufung von Leukämieerkrankungen beobachtet, woraufhin ein Register eingerichtet wurde sowie in den frühen 1950er Jahren erste wissenschaftliche Veröffentlichungen zu Leukämieerkrankungen erschienen ([www.rerf.jp/radefx/late\\_e/leukemia.html](http://www.rerf.jp/radefx/late_e/leukemia.html)). Im Rahmen der Life Span Study (LSS) wurden alle Fälle, die seit 1950 diagnostiziert wurden, betrachtet. Preston et al. veröffentlichten 2004 die neueste Auswertung beruhend auf allen Leukämie-Todesfällen zwischen 1950 und 2000: unter 49 204 Personen der LSS mit einer Knochenmarksdosis von mindestens 5 mSv traten insgesamt 204 Fälle von Leukämie auf, gegenüber einer aufgrund des Spontanrisikos erwarteten Anzahl von 110 Todesfällen. Eine Auswertung nach Leukämieart zeigte dosisabhängige Anstiege der Leukämiemortalitätsraten für AML, ALL und CML, nicht aber für andere Leukämiearten inklusive CLL (Richardson et al. 2009). Zu einem ähnlich Schluss kamen Preston et al. (1994) bei einer Auswertung von Leukämieinzidenzdaten im Zeitraum von 1950 bis 1987.

Eine Vielzahl von Studien untersuchte den Zusammenhang zwischen Strahlenexposition und Leukämieerkrankung an Personen, die am Arbeitsplatz oder durch Umwelteinflüsse einer erhöhten Strahlenexposition ausgesetzt waren, z.B. an Arbeitern kerntechnischer Anlagen, Aufräumarbeitern nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl, Anwohnern des kontaminierten Tetscha-Flusses und Bewohnern von Regionen mit erhöhter natürlicher Strahlenexposition. Die meisten dieser Studien ergaben Hinweise auf erhöhte Leukämieinzidenz oder -mortalität nach Strahlenexposition, wenn auch die Erhöhungen aufgrund der geringen Fallzahlen oft nicht statistisch signifikant waren. Daniels und Schubauer-Berigan (2011) führten eine Metaanalyse von 23 dieser Studien zu Leukämierisiken (ohne CLL) nach protrazierter Strahlenexposition mit hauptsächlich locker ionisierender Strahlung am Arbeitsplatz oder in der Umwelt durch. Sie schätzten ein zusätzliches relatives Risiko (ERR) bei 100 mGy von  $ERR = 0,19$  (95 %-KI: 0,07 – 0,32) ab und weisen auf die gute Übereinstimmung dieses Wertes mit Leukämierisiken von Männern, die als Erwachsene bei den Atombombenabwürfen in Japan exponiert wurden ( $ERR = 0,15$  bei 100 mGy, 95 %-KI: 0,11 – 0,53), hin, wie sie sich nach Cardis et al. (Cardis et al. 2005a) aus dem linearen Term des linear-quadratischen Dosis-Effekt-Modells ergeben.

Die Frage, ob CLL durch Strahlung induziert werden kann, ist noch nicht abschließend geklärt. Die Inzidenz von CLL zeigt große geografische Variationen und ist z.B. in Asien sehr gering. Auch im Rahmen der LSS wurden nur sehr wenige Fälle von CLL beobachtet, was eine quantitative Bewertung der Dosisabhängigkeit beeinträchtigte. Die definitive Herstellung eines kausalen Zusammenhangs zwischen Strahlenexposition und CLL wird durch eine Reihe von biologischen, epidemiologischen und methodischen Schwierigkeiten erschwert (Linnet et al. 2007). Wegen der weit verbreiteten Annahme, dass CLL nicht durch Strahlung verursacht wird, besteht z.B. die Gefahr einer systematischen Untererfassung (underreporting). In einer eingebetteten Fall-Kontroll-Studie (nested case control study) an Arbeitern in US-amerikanischen nukleartechnischen Anlagen beobachteten Schuhbauer-Berigan et al. 2007 einen nicht-signifikanten Anstieg von CLL bei Expositionen zwischen 10 und 100 mSv, aber im Gegensatz zu den Kontrollpersonen erhielt keiner der Fälle in dieser Studie eine Dosis über 100 mSv. In einer größer angelegten Studie zu Arbeitern in nukleartechnischen Anlagen in 15 Ländern wurde bei Annahme einer 10-jährigen Latenzphase ein relatives Risiko bei 100 mSv von  $RR = 0,84$  (95 %-KI: 0,39 – 1,48) und somit keine erhöhte CLL-Mortalität beobachtet (Vrijheid et al. 2008).

## 4.2 Schilddrüsenkrebs

In Deutschland erkranken etwa 5 300 Menschen pro Jahr an Schilddrüsenkrebs, wobei Frauen ungefähr doppelt so häufig betroffen sind wie Männer (Husmann et al. 2010). Das durchschnittliche Erkrankungsalter liegt zwischen 50 und 60 Jahren. Ähnlich wie weltweit, so ist auch in Deutschland zu beobachten, dass die Häufigkeit der Fälle ansteigt, wohingegen die Mortalität sinkt (Husmann et al. 2010). Der beobachtete Anstieg könnte auf eine verbesserte Diagnostik hinweisen, was auch die sinkende Mortalität erklären würde, da frühere Stadien mit besseren Heilungsaussichten entdeckt werden.

Man unterscheidet drei Typen von Schilddrüsenkarzinomen:

### 1. Differenzierte Karzinome

Bei dieser häufigsten Form der Schilddrüsenkarzinome sind die Zellen differenziert, also vollständig ausgereift und den gesunden Schilddrüsen-Zellen sehr ähnlich. Sie reichern Jod an und die Heilungsaussichten sind ausgesprochen gut. Unterteilt werden die differenzierten Karzinome in zwei Formen, wobei der wichtigste Unterschied die Art der Metastasierung betrifft:

#### 1.1 Papilläre Schilddrüsenkarzinome

Der Name leitet sich ab von den fingerförmigen Verästelungen, die das Karzinom ausbildet. Tochtergeschwülste kommen vor allem in den Schilddrüsen-nahen Lymphknoten vor. Die papilläre Form macht etwa 50 % aller Schilddrüsenkarzinome aus und wird insbesondere bei

jungen Erwachsenen gefunden.

## 1.2 Follikuläre Schilddrüsenkarzinome

Bei dieser Form gehen die Krebszellen von den Bläschen (Follikeln) aus, deren Zellen die Schilddrüsenhormone T3 und T4 produzieren. Hier beobachtet man in erster Linie Metastasen in der Lunge und in den Knochen. Der Anteil der follikulären Schilddrüsenkarzinome liegt bei 20 % bis 30 % und betroffen sind vor allem Personen im fünften Lebensjahrzehnt.

## 2. Undifferenzierte (anaplastische) Karzinome

Die Zellen dieser Schilddrüsenkarzinom-Form haben keine Ähnlichkeit mit den gesunden Schilddrüsen-Zellen. Etwa 4 % bis 10 % entfallen auf diesen Typ Schilddrüsenkarzinom, der besonders aggressiv ist und bei dem die Heilungsaussichten gering sind.

## 3. Medulläre Karzinome

Weniger als 5 % aller Schilddrüsenkarzinome sind vom medullären (vom Mark abgeleiteten) Typ. Synonym verwendet wird auch der Begriff C-Zell-Karzinom, da diese Form ihren Ursprung in den C-Zellen hat, die unter anderem Calcitonin produzieren. Auffällig bei den medullären Karzinomen sind familiäre Häufungen. Sie sind auf Gen-Defekte zurückzuführen (Lodish und Stratakis 2008), wobei jedoch nur ein Teil der medullären Karzinome davon betroffen ist. Die Prognose ist gut, wenn der Tumor vor Erreichen von 1 cm Durchmesser und vor einer Metastasierung in die Lymphknoten erkannt wird.

### 4.2.1 Ursachen für Schilddrüsenkrebs

Von zahlreichen Faktoren wird vermutet, dass sie entweder Schilddrüsenkrebs auslösen können oder an der Auslösung zumindest beteiligt sind. Erwähnt wurde bereits die genetische Prädisposition für einen Teil der medullären Karzinome. Auch für andere Formen wird eine genetische Komponente vermutet (Khan et al. 2010, Vecchio und Santoro 2000). Die in Jodmangelgebieten beobachteten Strumaerkrankungen erhöhen das Risiko, ein Schilddrüsenkarzinom zu entwickeln. Anfälliger für Schilddrüsenkrebs sind auch Personen mit Schilddrüsen-Adenomen (also gutartigen Tumoren) und mit chronischen Schilddrüsen-Entzündungen. Schilddrüsen-Adenome sind zumindest in Jodmangelgebieten außerordentlich häufig (ca. 25 % – 30 % aller Frauen und ca. 20 % aller Männer sind betroffen), aber nur etwa 1 von 1 000 Adenomen geht in ein Karzinom über (Mann 2002). Schon lange wird vermutet, dass das TSH (thyroid stimulating hormone), wenn es im Überschuss vorkommt, eine maßgebliche Rolle bei der Entwicklung von Schilddrüsenkrebs spielt (Henderson et al. 1982).

Widersprüchlich sind die Ergebnisse zur Jod-Supplementierung (Knobel und Medeiros-Neto 2007). Festzustehen scheint, dass sich zumindest das Spektrum der Schilddrüsenkrebs-Formen verändert. Wird in einem Jod-Mangelgebiet Jod-Supplementierung eingeführt, so findet man anschließend mehr Fälle papillärer und weniger Fälle follikulärer Formen. Ob die Schilddrüsenkrebs-Häufigkeit insgesamt durch diese Maßnahme ansteigt, ist umstritten, da die in manchen ökologischen Studien beobachteten Anstiege auf eine intensivere Diagnostik und verbesserte diagnostische Methoden rückführbar sein könnten (Dal Maso et al. 2009).

Ein bisher ungeklärter Zusammenhang besteht zwischen Vulkanen und der Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs (Duntas und Doumas 2009). Auffällig ist, dass in Gebieten mit zahlreichen Vulkanen (Hawaii, Philippinen, Island) Schilddrüsenkrebs besonders häufig ist. Als Auslöser verdächtigt werden z.B. einige arsen- und zinkhaltige Mineralien.

Auf die Rolle der ionisierenden Strahlung wird im folgenden Kapitel eingegangen.

#### 4.2.2 Schilddrüsenkrebs nach Strahlenexposition

Ionisierende Strahlung kann Schilddrüsenkrebs auslösen (für einen Überblick siehe S. 101 bis 108 in UNSCEAR 2006). Dies gilt jedoch insbesondere für Strahlenexpositionen während der Kindheit. Dagegen ist das Risiko nach Exposition im Erwachsenenalter (älter als etwa 20 Jahre) gering (Ron et al. 1995).

Eine starke Altersabhängigkeit wird auch in Hiroshima und Nagasaki beobachtet (Preston et al. 2007). So liegt bei einer Exposition mit 1 Gy das zusätzliche relative Risiko (ERR) geschlechtsgemittelt für 0-Jährige bis 9-Jährige bei 1,5, für 10-Jährige bis 19-Jährige bei 1,2, für 20-Jährige bis 39-Jährige bei 0,46 und für Personen älter als 40 Jahre bei 0,31, wobei diese Erhöhung statistisch nicht mehr signifikant ist. Frauen haben im Vergleich zu Männern zum einen eine höhere Spontanhäufigkeit, einen Schilddrüsenkrebs zu entwickeln, und zum anderen ein höheres zusätzliches und absolutes Risiko. Die Berechnungsmodelle zeigen, dass die Beobachtungen kompatibel sind mit einer linearen Abhängigkeit zwischen der Dosis und der Häufigkeit von Schilddrüsenkrebs, allerdings sind, wie nicht anders zu erwarten, die Unsicherheiten im niedrigen Dosisbereich (bis ca. 0,2 Gy) beträchtlich.

Besonders auffällig ist der Anstieg von Schilddrüsenkrebsfällen nach externen Strahlenexpositionen während der Kindheit, die vor allem in früheren Zeiten im Rahmen verschiedenster medizinischer Maßnahmen durchgeführt worden sind (Thymus- und Mandel-Verkleinerung, Behandlung von Tinea capitis [Ron et al. 1995]). In neuerer Zeit spielt diese Problematik nur noch eine Rolle bei der Strahlentherapie von Tumoren im Kopf-/Hals-Bereich.

Schwieriger ist die Beurteilung von I-131 -Expositionen. In Tschernobyl wurde relativ kurz nach dem Reaktorunglück ein deutlicher Anstieg der Schilddrüsenkrebsfälle bei Kindern beobachtet (Cardis et al.

2005b, Jacob et al. 1999, Ron 2007, UNSCEAR 2008). Bis heute gibt es keine Hinweise, dass von Tschernobyl im Erwachsenenalter exponierte Personen vermehrt Schilddrüsentumoren aufweisen (UNSCEAR 2008). Wie in der Umgebung Tschernobyls lieferte eine Studie wiederum an Kindern in der Umgebung der amerikanischen Atombombenversuche in Nevada Hinweise auf einen Anstieg von Schilddrüsenkrebs; allerdings war die Datenbasis schmal (Kerber et al. 1993). Schwierig zu interpretieren sind die Untersuchungen auf den Marshall-Inseln. Auch dort ging es um oberirdische Atombombenversuche, und zwar in den Jahren 1946 bis 1958 mit zum Teil erheblichen Strahlenexpositionen der Bevölkerung. Allerdings wurde die Schilddrüse hier nicht nur durch Jod-Radionuklide exponiert, sondern auch in hohem Maße durch externe Strahlung (Simon et al. 2010). Es gibt einige kleinere Studien zu den radiologischen Auswirkungen, aber Land et al. kommen im Jahr 2010 zu dem Schluss, dass „the infrastructure of medical reporting and records in the RMI (Republic of the Marshall Islands) is not sufficient to support detailed epidemiological studies“ (Land et al. 2010). Auf der Basis der Zusammenfassung der Informationen zum strahleninduzierten Schilddrüsenkarzinom-Risiko im BEIR VII-Bericht (2006) schließen Land et al., dass in der Population von 10 600 Personen 50 strahleninduzierte Schilddrüsenkarzinom-Fälle (5. Perzentil 12 Fälle, 95. Perzentil 120 Fälle) zusätzlich zu den 190 spontanen Fällen zu erwarten sind.

Diagnostische Maßnahmen bei Erwachsenen mit I-131 haben bisher keine Anhaltspunkte dafür geliefert, dass dadurch Schilddrüsenkrebs ausgelöst wird (Dickman et al. 2003). Dies gilt auch für diagnostische Maßnahmen mit I-131 bei Kindern (Dickman et al. 2003, Hahn et al. 2001), wobei jedoch die statistische Power wegen der geringen Anzahl von Kindern in diesen Studien gering war. Kein Anstieg an Schilddrüsenkrebs wurde in Hanford in der Nähe der kerntechnischen Anlage nach Exposition von Kindern beobachtet (Davis et al. 2004). Die Expositionsszenarien in Tschernobyl und Hanford sind allerdings unterschiedlich: In Tschernobyl handelte es sich um eine kontinuierliche Exposition über wenige Tage, unter Beteiligung auch von kurzlebigen Jod-Radionukliden und mit relativ vielen hoch-exponierten Kindern in einem Jodmangel-Gebiet; in der Umgebung von Hanford dagegen gab es eine kontinuierliche Exposition über Jahre hinweg, es war ausschließlich I-131 beteiligt, und es gab nur wenige hoch-exponierte Kinder und dies in einem gut mit Jod versorgten Gebiet.

Ein Problem, das bei der Ermittlung des Strahlenrisikos für die Schilddrüse unbedingt beachtet werden muss, ist der sogenannte Screening-Effekt. Es gibt eine ganze Reihe von Knoten in der Schilddrüse, die nie entdeckt werden, da sie keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen nach sich ziehen. Autopsie-Untersuchungen zeigen, dass bei bis zu 35 % aller Personen okkulte Schilddrüsen-Karzinome vorhanden sind (Franssila und Harach 1986, Raue und Frank-Raue 2005, Reiners et al. 2005). Diese Karzinome haben Durchmesser von weniger als 1 cm, sie metastasieren nicht und werden häufig nur zufällig gefunden, da sie keine gesundheitlichen Probleme bereiten. Wenn nun eine Population systematisch im Hinblick auf das Vorliegen von Schilddrüsen-Veränderungen untersucht wird („screening“), so werden diese Schilddrüsen-Knoten zusätzlich entdeckt (Colonna et al. 2002, Kaiser et al. 2009) und können dann zumindest teilweise irrtümlich als Strahleneffekt interpretiert werden. Auffällig und auf einen Screening-Effekt hinweisend ist das Auffinden vieler früher Tumor-Stadien. Ein intensives

Screening kann durchaus die absolute Anzahl gefundener Schilddrüsen-Tumoren um den Faktor 3 bis 4 erhöhen (Kaiser et al. 2009).

#### 4.3 Zusammenfassung

Für die meisten bösartigen (malignen) Prozesse im menschlichen Körper (Leukämien, Lymphome, Karzinome und Sarkome) sind die auslösenden Faktoren im individuellen Fall weitgehend unbekannt. Für einige Faktoren ist der Nachweis erbracht, dass sie in der Lage sind, Malignome hervorzurufen. So beispielsweise für Benzol bei den Leukämien oder für das Rauchen bei Lungenkarzinomen. Ionisierende Strahlung kann (vermutlich) in allen Phasen der Krebsentstehung eine Rolle spielen, allerdings sind gewebeabhängige Unterschiede in den dafür benötigten Strahlendosen vorhanden. Dementsprechend sind auch Leukämien und Schilddrüsenkarzinome durch ionisierende Strahlung auslösbar. Allerdings fehlt bis heute der Nachweis, dass I-131 bei Erwachsenen Schilddrüsenkrebs auslöst. Auf der Basis zahlreicher epidemiologischer Studien, die in der Vergangenheit durchgeführt worden sind, kann man abschätzen, wie hoch die Strahlendosen hätten gewesen sein müssen, um die in der SG Asse beobachtete Erhöhung der Anzahl der beiden genannten Malignome (Leukämien bei den Männern und Schilddrüsenkrebs bei den Frauen) hervorzurufen. Dies geschieht in Kapitel 6.

Gegen eine Verursachung durch ionisierende Strahlung spricht neben den sehr hohen benötigten Strahlendosen (siehe Kapitel 6), dass eine Erhöhung nur bei Leukämien und Schilddrüsenkrebs beobachtet worden ist. Andere Gewebe (wie die weibliche Brust, Lunge, Magen, Dickdarm) waren unauffällig. Dies gilt insbesondere auch für die Gesamtzahl der in der SG Asse beobachteten Krebsfälle.

## 5 Strahlenexpositionen

### 5.1 Sachstand

In der Schachanlage Asse II, in der zwischen 1909 und 1964 Kali- und Steinsalz abgebaut worden ist, wurden von 1967 bis 1978 insgesamt 124 494 Gebinde mit schwach radioaktiven Abfällen (LAW) und 1 239 Gebinde mit mittlerradioaktiven Abfällen (MAW) mit einem deklarierten Inventar von 7,8 PBq (5,0 PBq im LAW, 2,8 PBq im MAW) in 13 Kammern auf der 511 m-Sohle (1 Kammer), der 725 m-Sohle (1 Kammer) und der 750 m-Sohle (11 Kammern) eingelagert.

Nachdem in den Jahren 1967 bis 1971, der Periode der sog. Versuchseinlagerung, nur 10 328 LAW-Gebinde, d. h. etwa 8 % aller LAW-Gebinde, eingelagert wurden, erfolgte die überwiegende Einlagerung in den Jahren 1972 bis 1978: 92 % aller LAW-Gebinde. Von 1972 bis 1976 wurden zusätzlich 1 293 MAW-Gebinde in der Form von 200 L-Fässern (BfS 2010) eingelagert. Vergleiche hierzu den Abschlussbericht der AG Asse Inventar vom 31. August 2010.

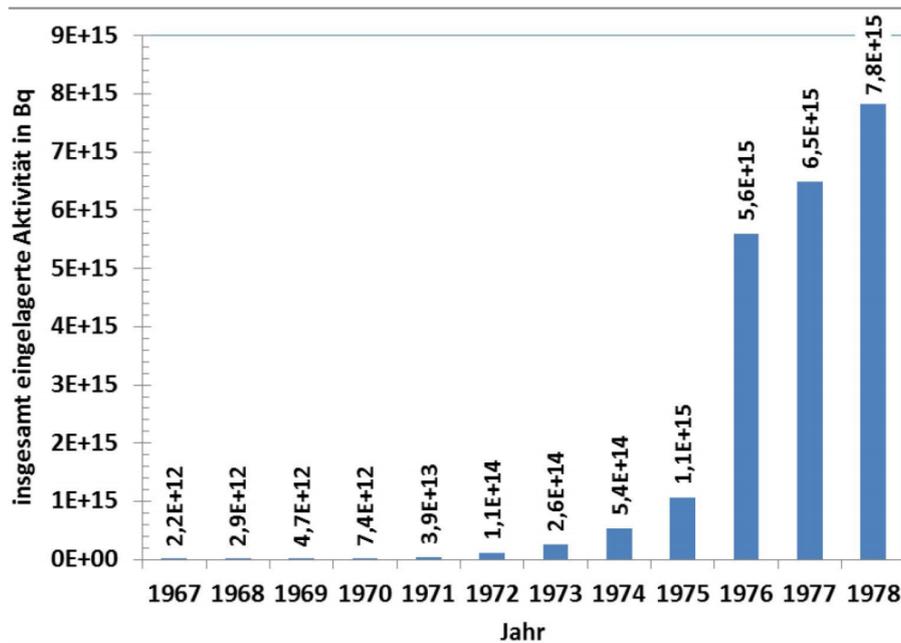


Abb. 5.1: Akkumulation der eingelagerten Aktivität in den Jahren 1967 bis 1978.

Abbildung 5.1 zeigt die Akkumulation der eingelagerten Aktivität als Funktion der Zeit. In den Jahren 1967 bis 1971 wurden nur 0,5 % der gesamten Aktivität eingelagert. Ende 1975 waren es 14 %. In den letzten drei Jahren der Einlagerungsphase von 1976 bis 1978 wurden mehr als 85 % der Aktivität eingelagert. Da die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft aus der Schachanlage Asse II (Kapitel 5.3) aus der eingelagerten Aktivität als Quelle stammen, kann man davon ausgehen, dass die Ableitungsdaten für 1978 als obere Grenze der Ableitungen für die früheren Jahre anzusehen sind. Aus diesem Grunde wurde für die Berechnung der Strahlendosen, die zur Erklärung der beobachteten Krebsinzidenzen erforderlich wären (Kapitel 6), das Jahr 1978 als Bezugsjahr gewählt.

Die Einlagerung erfolgte auf der Grundlage der erteilten Umgangsgenehmigungen der damals gültigen Strahlenschutzverordnung von 1965 und unter Beachtung der jeweils gültigen Bedingungen für die Lagerung von radioaktiven Abfallstoffen im Salzbergwerk Asse. Die strahlenschutz- bzw. atomrechtlichen Genehmigungen waren befristet und endeten am 31. Dezember 1978.

In der Nacheinlagerungsphase seit 1979 wurde das Bergwerk unter Beibehaltung und Weiterentwicklung der radiologischen Überwachung weiterhin offengehalten. 1997 wurde entschieden, dass eine weitere Verwendung des Bergwerks nicht beabsichtigt war und dass die endgültige Schließung der Schachanlage vorbereitet werden sollte. Im Jahre 2008 beschloss die Bundesregierung, die bis dahin nach Bergrecht geführte Anlage in den Geltungsbereich des Atomrechts zu überführen und künftig als Endlager für radioaktive Abfälle nach § 9a des Atomgesetzes (AtG) zu führen. Das BfS wurde damit beauftragt, die Anlage zum 1. Januar 2009 vom Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (HMGU), vorher Gesellschaft für Strahlen- und

Umweltforschung (GSF), zu übernehmen und die Schachtanlage Asse II nach den für Endlager geltenden Regelungen zu betreiben und stillzulegen.

Sowohl während der Einlagerungsphase als auch in der Nacheinlagerungsphase wurden Strahlenschutzmessungen im Bereich der Schachtanlage Asse II durchgeführt, die die Überwachung der Umweltradioaktivität sowie die Überwachung der betrieblichen Maßnahmen zum Schutz von Belegschaft und Bevölkerung vor ionisierenden Strahlen umfassen.

Die Umgebungsüberwachung der Schachtanlage Asse II erfolgt seit 1966. Zu dieser Zeit begann eine Überwachung der Grund- und Oberflächenwässer aus dem Bereich Asse im Rahmen eines hydrogeologischen Forschungsprogramms der GSF. Zusätzlich wurde seit 1968 das Trinkwasser der Gemeinden auf Grund des Fallouts der oberirdischen Kernwaffenexplosionen untersucht. Das Programm zur Umgebungsüberwachung durch den Betreiber wurde später in Anlehnung an die „Richtlinie zur Emissions- und Immissionsüberwachung kerntechnischer Anlagen“ (REI) ausgeweitet.

Die letzte Anpassung des Messprogramms zur Umgebungsüberwachung erfolgte 2008. Das Messprogramm des Betreibers umfasst Grund-, Oberflächen- und Trinkwasser, Gras- und Bodenproben, Bodenbelegung, Luftproben und Umgebungsstrahlung.

Das Messprogramm des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) und seinen Vorgängerorganisationen als unabhängige Messstelle lief für oberirdische Gewässer seit 1979 und für die anderen Medien seit 1986. Das Programm umfasste äußere Strahlung, Boden-, Gras- und Lebensmittelproben sowie oberirdische Gewässer. Ab 2010 wurde das Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt als unabhängige Messstelle eingesetzt. Das Messprogramm wird fortgesetzt und entsprechend der REI um Luftproben, Sediment, Trinkwasser sowie Kuhmilch ergänzt, da die Anlage den Status eines Endlagers bekommen hat.

Seit 2009 wird ein zusätzliches Messprogramm zur Umgebungsüberwachung durch die LUFA Nord-West im Auftrage des Betreibers durchgeführt. Im Rahmen dieses Programms werden Boden, Pflanzen, Nahrungsmittel, Wasser und Laub gemessen.

Weiterhin liegen auf Grund des IMIS-Messprogramms des Bundes sowie durch Sonderprogramme aus dem LK Wolfenbüttel zusätzliche Daten über die Ortosisleistung vor. Seit 2009 überprüft das BfS das Trinkwasser der Gemeinde Kissenbrück monatlich.

Die Untersuchungsprogramme beinhalten heute mehr als 650 Proben pro Jahr und umfassen  $\gamma$ -spektrometrische (z.B. Cs-137),  $\beta$ -spektrometrische (z.B. H-3 und Sr-90) Messungen sowie Analysen von Alphastrahlern. Die Programme zur Abluft- und Umgebungsüberwachung wurden in Anlehnung an die REI durch den Betreiber und durch eine unabhängige Messstelle aufgestellt.

Im Folgenden werden die Datengrundlagen zur Beurteilung der durch die Einlagerung radioaktiver Abfälle in die Schachtanlage Asse II verursachten Strahlenexpositionen der Bevölkerung und der Beschäftigten dargestellt.

Aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen gelangen H-3 (überwiegend als HTO), C-14 (überwiegend als  $^{14}\text{CO}_2$ ) und Rn-222 als Zerfallsprodukt der eingelagerten Ra-226-Abfälle in die Grubenluft. Mit Rn-222 kommen so die Folgeprodukte des Rn-222, darunter auch das langlebige Pb-210, in die Grubenluft. Die Grubenluft wird über einen Diffusor auf dem Schachtgebäude in die Umgebungsluft abgeleitet.

Strahlenexpositionen resultieren für die Beschäftigten aus externer Strahlung, aus der Inhalation von Radioaktivität in der Grubenluft und interner und externer Strahlenexposition beim Umgang mit Abfallbinden. Für die Bevölkerung in der Umgebung der Schachtanlage Asse II ergibt sich eine potentielle Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft. Aus der Schachtanlage Asse II werden nach Angabe des Betreibers keine radioaktiven Stoffe mit dem Abwasser abgeleitet. Zutrittslösungen werden vor Verbringung aus der Schachtanlage Asse II auf radioaktive Kontaminationen überprüft.

Aufgrund vielfältiger Veränderungen und Weiterentwicklungen des Regelwerks und des Standes von Wissenschaft und Technik wurden im Laufe der Jahrzehnte ganz unterschiedliche Verfahren zur Immissions- und Emissionsüberwachung und zur Modellierung der potentiellen Strahlenexpositionen angewandt.

- Im Zeitraum 1966 bis 1977 fand lediglich eine Immissionsüberwachung statt. Es gibt in den Berichten der Betreiber keine Angaben über Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft; Folgedosen für die Bevölkerung wurden nicht berechnet.
- Ab 1978, dem letzten Jahr der Einlagerung, wurden neben den Ergebnissen der Immissionsüberwachung nuklidspezifische Daten zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft berichtet. Folgedosen für die Bevölkerung wurden nicht berechnet.
- Im Zeitraum 1978 bis 1982 wurden neben den Ergebnissen der Immissionsüberwachung und nuklidspezifischen Daten zur Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft auch Nuklidkonzentrationen in der Umgebungsluft an der ungünstigsten Einwirkungsstelle berichtet. Folgedosen für die Bevölkerung wurden nicht berechnet.
- Ab 1983 wurden neben den Ergebnissen der Immissions- und Emissionsüberwachung Jahresdosen der Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle berichtet: 1983 bis 1988 als Ganzkörperdosen, 1989 bis 2001 effektive Äquivalentdosen für Erwachsene und Kleinkinder und seit 2002 effektive Dosen für Referenzpersonen mit den 6 Altersklassen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) von 2001. Seit 2008 werden diese Dosen der

Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen in den Parlamentsberichten (BMU 2008 bis 2012) veröffentlicht.

## 5.2 Immissionsüberwachung

Zur Immissionsüberwachung, die bis einschließlich 1977 als ausschließliche Maßnahme der Umgebungsüberwachung durchgeführt wurde, gehörten:

- seit 1966 Messungen der Beta-Aktivität in Grund- und Oberflächenwasser,
- seit 1968 Messungen der Alpha-Gesamtaktivität und des Gehalts an Cs-137 und Sr-90 im Trinkwasser der Ortschaften im Bereich der Asse,
- seit 1970 Messungen der kurzlebigen und langlebigen Alpha- und Beta-Aktivität der bodennahen Luft in der Umgebung der Schachtanlage Asse II,
- seit 1971 Messungen der Beta-Gesamtaktivität und Beta-Restaktivität in Boden- und Bewuchsproben,
- seit 1975 Ortsdosismessungen mit Thermolumineszenz-Dosimetern auf dem Zechengelände des Salzbergwerkes Asse.

Der Betreiber (GSF) hat die Ergebnisse der Immissionsüberwachung für die Jahre 1966 bis 1976 in einem Bericht zusammengefasst (GSF 1977). Nach Angabe der Betreiber und der unabhängigen Messstelle waren die Ergebnisse der Immissionsmessungen stets unauffällig und ergaben keinen Hinweis auf einen Einfluss der Schachtanlage Asse II auf die Umweltradioaktivität in der Umgebung der Schachtanlage. Grundlage dieser Aussage war der Vergleich der Messergebnisse mit Immissionsüberwachungsdaten aus anderen Standorten in Deutschland. Für die Angaben zur Aktivität in der Luft in der Umgebung der Schachtanlage Asse II waren dies Arbeiten von Kricks und Siegel (1975), Vogt et al. (1975) und BMI (1976). Daneben stehen Daten des Deutschen Wetterdienst (DWD) zur Radioaktivität der bodennahen Luft in Norddeutschland seit 1956 für einen solchen Vergleich zur Verfügung (DWD 2011).

Sowohl in der Einlagerungsphase bis 1978 als auch in der Nacheinlagerungsphase ab 1979 sind nach den Berichten der Betreiber und der unabhängigen Messstellen aus den Immissionsmessungen keine Hinweise auf einen Einfluss der Schachtanlage Asse II auf die Umweltradioaktivität in der Umgebung der Schachtanlage abzulesen (GSF 1978 bis 2009, Asse-GmbH 2009, 2010, BMU 2012, NLÖ 1993 bis 2004, NLWKN 2005a bis 2009, NWA 1972 bis 1986, NLVA 1982 bis 1987, NLI 1988 bis 1990).

### 5.3 Überwachung der Grubenfortluft der Asse

Die Grubenluft der Schachtanlage Asse II wird sowohl durch Messungen der Grubenfortluft (Emissionsmessungen) als auch durch Messungen der Grubenluft vor Ort überwacht. Eine ausführliche Zusammenfassung ist im Bericht „Die Strahlenexposition der Beschäftigten der Schachtanlage Asse II von 1967 bis 2008 – Gesundheitsmonitoring Asse“ (BfS 2011) gegeben.

Seit 1971 wurden Messungen der Radioaktivität in der Grubenfortluft durchgeführt. Dazu gehörten:

- seit 1971 Messungen der kurzlebigen und langlebigen Gesamt-Alpha- und Gesamt-Beta-Radioaktivität,
- seit 1972 sporadische und ab 1978 fortlaufende Messungen von H-3,
- seit 1976 werden nuklidspezifische Messungen durchgeführt, u. a. seit Ende 1976 Messungen der Aerosole und damit der Pb-210-Aktivität,
- seit 1982 Messungen von C-14.

Tritium wird dabei in der chemischen Form von Wasser (HTO) bestimmt. Da bei der routinemäßigen Messung des Radionuklids H-3 nur der anorganische Anteil an Tritium (HTO) erfasst wird, wurden in den Jahren 1978, 1979, 1982, 1983 und 2010 vom jeweiligen Betreiber zusätzlich Untersuchungen zur Bestimmung des organischen Anteils an Tritium (OBT) im Abwetter der Schachtanlage Asse II durchgeführt. Die Ergebnisse dieser stichprobenartigen Messungen zeigten, dass der organische Anteil im Gegensatz zum anorganischen Anteil an H-3 vernachlässigt werden kann.

Bei der routinemäßigen Bestimmung des Radionuklids C-14 wird nur der anorganische Anteil von C-14 ( $^{14}\text{CO}_2$ ) erfasst. Zusätzlich wurden in den Jahren 1978, 1979, 1982, 1983 und 2010 vom jeweiligen Betreiber Untersuchungen zur Bestimmung von Kohlenstoffmonoxid ( $^{14}\text{CO}$ ), Methan ( $^{14}\text{CH}_4$ ) und höheren Kohlenwasserstoffen im Abwetter der Asse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser stichprobenartigen Messungen zeigten, dass letztere Spezies im Vergleich zum Anteil an  $^{14}\text{CO}_2$  vernachlässigt werden können.

Die Überwachung der Luft in der Schachtanlage erfolgt seit 1969 über Luftstaubmessungen an mehreren Stellen im Grubengebäude, wobei die kurzlebige und langlebige Gesamt-Alpha- und Gesamt-Beta-Aktivität und Radon bestimmt wurden. Seit 1972 werden Tritium-Messungen in der Grubenluft durchgeführt. Darüber hinaus wurde ab Dezember 1976 stichprobenartig die Grubenluft nuklidspezifisch auf langlebige Aerosolaktivität untersucht. Die Ergebnisse der nuklidspezifischen Analysen der Grubenwetter im Grubengebäude sind in Höhe und Zusammensetzung vergleichbar den nuklidspezifischen Messungen der Fortluft aus der Schachtanlage Asse II.

In der Grubenfortluft wird neben Pb-210 auch Be-7 in dem den natürlichen Umweltkonzentrationen dieses kosmogenen Radionuklids entsprechenden Maße beobachtet; vgl. Zähringer et al. (2008); Wershofen und Arnold (1999). Ansonsten wurden Spaltprodukte aus den oberirdischen Kernwaffenexplosionen und 1986 aus dem Unfall von Tschernobyl nachgewiesen (GSF 1987).

In speziellen Analysen wurde die Grubenluft 1981 auf Plutonium-Isotope untersucht. Es zeigte sich, dass die Konzentrationen (Tabelle 4.1) sich im Bereich der in Deutschland durch den Kernwaffenfallout verursachten Plutonium-Konzentrationen in der bodennahen Luft lagen.

Tab. 5.1: Aktivitätskonzentrationen in  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  der Plutonium-Isotope in der Grubenluft, nach (GSF 1982).

Sammelzeitraum	Pu-238	Pu-239/240
Februar 1981	< 0,15	$0,4 \pm 0,3$
August/September 1981	$0,3 \pm 0,2$	$0,7 \pm 0,4$

Langlebiges I-129 wurde nicht überwacht, da Stichprobenmessungen im Jahr 1978 ergaben, dass die Konzentrationen unter der Nachweisgrenze üblicher Messverfahren lagen. Dennoch wurde nach einer nicht näher spezifizierten Spezialuntersuchung eine mittlere Konzentration von I-129 mit  $3,1 \times 10^{-15} \text{ Ci}/\text{m}^3$ , d. h.  $0,12 \text{ mBq}/\text{m}^3$  angegeben; für die Umgebungsluft wurde ein Konzentrationsbereich  $10^{-19} \text{ Ci}/\text{m}^3$  bis  $10^{-21} \text{ Ci}/\text{m}^3$ , d. h.  $3,7 \text{ nBq}/\text{m}^3$  bis  $0,037 \text{ nBq}/\text{m}^3$  genannt (GSF 1979). Zum Vergleich: in einer Messung der bodennahen Luft auf der Insel Föhr im Jahr 2002 wurde mittels Beschleunigermassenspektrometrie eine I-129-Konzentration von  $26 \text{ nBq}/\text{m}^3$  gemessen (Michel et al. 2012). Der heutige hohe Wert in der bodennahen Luft ist auf die I-129-Ableitungen aus den europäischen Wiederaufarbeitungsanlagen La Hague und Sellafield zurückzuführen.

Zum Zeitpunkt der Einlagerung war das ursprünglich in ihnen vorhandene kurzlebige Spaltprodukt I-131 bereits zerfallen. I-131 entsteht in den in der Schachanlage Asse II eingelagerten Abfällen bei der Spontanspaltung von Aktiniden (Tabelle 5.2).

Tab. 5.2: Aktivitäten der eingelagerten Aktiniden nach ASSEKAT (BfS 2010). Die Anteile der Spontanspaltung wurden der Chart of the Nuclides (<http://www.nndc.bnl.gov>) entnommen, die Spaltausbeuten der Masse 131 für I-131 stammen von England und Rider (1994). Wenn Spaltausbeuten für Spontanspaltung nicht verfügbar waren, wurden Spaltausbeuten für induzierte Spaltung angenommen.

Nuklid	Halbwertszeit	Spontanspaltung	$A_{\text{LAW}}$ in Bq	$A_{\text{MAW}}$ in Bq	$A_{\text{total}}$	Spaltausbeute	I-131 $A_{\text{gesamt}}$
--------	---------------	-----------------	------------------------	------------------------	--------------------	---------------	------------------------------

			in %				für I-131 in %	in Bq
U-235	7,04E+08	a	7,00E-09	5,30E+10	2,54E+08	5,32E+10	2,89	1,08E-01
U-236	2,34E+07	a	9,40E-08	2,22E+10	1,32E+09	2,35E+10	5,57	1,23E+00
U-238	4,47E+09	a	5,50E-05	1,28E+12	3,45E+09	1,28E+12	0,45	3,16E-03
Np-237	2,14E+06	a	2,00E-10	1,18E+09	6,43E+08	1,83E+09	3,16	1,15E-04
Pu-238	8,77E+01	a	1,90E-07	5,98E+13	6,64E+12	6,64E+13	3,92	4,95E+03
Pu-239	2,41E+04	a	3,00E-10	4,08E+13	3,24E+12	4,41E+13	3,88	5,13E+00
Pu-240	6,56E+03	a	5,70E-06	4,57E+13	3,70E+12	4,94E+13	6,91	1,95E+05
Pu-241	1,44E+01	a	2,00E-14	1,46E+15	1,32E+14	1,59E+15	3,36	1,07E-02
Pu-242	3,73E+05	a	5,50E-04	8,11E+10	8,46E+09	8,96E+10	3,11	1,53E+04
Pu-244	8,08E+07	a	0,12	9,05E+03	1,15E+03	1,02E+04	3	3,67E-01
Am-241	4,32E+02	a	4,00E-10	5,07E+13	5,70E+12	5,64E+13	4,17	9,40E+00
Am-242m	1,41E+02	a	4,70E-09	1,44E+10	7,30E+09	2,17E+10	4	4,07E-02
Am-243	7,37E+03	a	3,70E-09	2,95E+10	2,36E+10	5,30E+10	3,19	6,26E-02
Zwischen- summe								2,18E+05
Cm-242	1,63E+02	d	3,90E-06	2,82E+10	1,52E+08	2,83E+10	3,46	3,82E+01
Cm-243	2,91E+01	a	5,30E-09	2,16E+10	1,71E+10	3,87E+10	3,19	6,54E-02
Cm-244	1,81E+01	a	1,40E-04	1,49E+12	1,46E+12	2,95E+12	3	1,24E+05
Cm-245	8,50E+03	a	6,10E-07	1,46E+08	1,26E+08	2,72E+08	2,91	4,83E-02
Cm-246	4,73E+03	a	0,03	1,86E+08	1,43E+08	3,28E+08	3,3	3,25E+03
Cm-247	1,56E+00	a	0	6,57E+01	2,07E+01	8,64E+01	0	0
Cm-248	3,40E+00	a	8,39	2,27E+02	9,28E+01	3,20E+02	1,49	4,00E-01
Cm-250	9,00E+03	a	74	4,29E-05	2,09E-05	6,39E-05	100	6,39E-05
Summe Cm								1,27E+05
Summe								3,45E+05

Das durch Spontanspaltung der eingelagerten Abfälle erzeugte I-131-Inventar von ca.  $3,7 \times 10^5$  Bq liefert keinen erkennbaren Beitrag zur Aktivität in der Grubenluft. Dies belegt eine Betrachtung der Ra-226-Aktivität in den Abfällen und der daraus resultierenden Rn-222-Aktivitätskonzentration in der Grubenluft. Die eingelagerte Ra-226-Aktivität von  $10^{11}$  Bq bewirkt eine Rn-222-Konzentration in der Grubenfortluft von im Mittel ca.  $60 \text{ Bq/m}^3$ . Im Analogieschluss würde eine I-131-Quelle von  $10^5$  Bq eine Aktivitätskonzentration von ca.  $60 \mu\text{Bq/m}^3$  in der Grubenfortluft bewirken. Diese Rechnung ist extrem überschätzend, da das Halogen Jod im Gegensatz zum Edelgas Radon hoch reaktiv ist und auf dem Weg aus den Gebinden in die Grubenluft starke Rückhaltung erfährt. Messungen der Grubenluft haben auch keine Hinweise auf I-131 ergeben.

Für I-131 in der Grubenluft wurden im Jahre 1978 Stichprobenmessungen vorgenommen. Diese ergaben, dass die Konzentration unter der Nachweisgrenze üblicher Messverfahren lag. Daher wurde auf eine Routineüberwachung von Radiojod verzichtet (GSF 1979). Eine obere Grenze für die I-131-Aktivitätskonzentrationen in der Grubenluft lassen sich aber aus Messungen ableiten, die 1986 nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl durchgeführt wurden. In der Grubenluft in Schacht 2 waren 1986 die Spaltprodukte aus dem Reaktorunfall nachweisbar (GSF 1987). Für I-131 lagen die Aktivitätskonzentrationen im Zeitraum vom 25. April 1986 bis 4. Juli 1986 zwischen  $52,7 \text{ mBq/m}^3$  und  $0,032 \text{ mBq/m}^3$ . Ab dem 4. Juli 1986 lagen die I-131-Aktivitätskonzentrationen wieder unter der Erkennungsgrenze von ca.  $0,017 \text{ mBq/m}^3$ . Die Nachweisgrenze für I-131 wurde mit  $0,035 \text{ mBq/m}^3$  angegeben (GSF 1987).

#### 5.4 Ergebnisse der Emissionsüberwachung

Die gesamten Abwetter werden über einen Diffusor auf dem Schachtgebäude als Grubenfortluft abgeleitet. Der jährliche Luftdurchsatz beträgt etwa  $1,9 \times 10^9 \text{ m}^3$ . Abbildung 5.2 fasst die Angaben der Betreiber für die aus den radioaktiven Abfällen stammenden Radionuklide zusammen. Obwohl alle 4 Radionuklide auch natürliche Bestandteile der Umweltradioaktivität sind und damit auch natürlicher Weise in den Wettern vorkommen, sind die ganz überwiegenden Teile dieser abgeleiteten Radionuklide auf die eingelagerten radioaktiven Abfälle zurückzuführen. Aus der Schachanlage Asse II werden mit der Grubenfortluft folgende aus den Abfällen stammenden Radionuklide abgeleitet:

- H-3, überwiegend in der Form von  $\text{H}_2\text{O}$ ,
- C-14, überwiegend in der Form von  $\text{CO}_2$ ,
- Pb-210 an Schwebstoffe gebunden,
- Rn-222 als Gas und dessen kurzlebige Folgeprodukte (FP) Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214.

Für das Jahr 1978, das letzte Jahr der Einlagerung, wurden erstmals Ableitungsdaten sowie berechnete Radionuklidkonzentrationen der bodennahen Luft an der ungünstigsten Einwirkungsstelle berechnet und mit den Grenzwerten der StrlSchV und den natürlichen und durch Kernwaffenexplosionen erzeugten Radionuklidkonzentrationen der Umgebungsluft verglichen (GSF 1979). In Tabelle 5.3 sind diese Daten exemplarisch nach Umrechnung in SI-Einheiten dargestellt.

Die Ableitungen wurden aus den im Diffusor gemessenen Aktivitätskonzentrationen und der im Jahr 1978 gemessenen Gesamtabluftmenge von etwa  $1,9 \times 10^9 \text{ m}^3$  bestimmt. Für die Berechnung der potentiellen Strahlenexposition der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle schätzte der Betreiber 1978 einen Langzeitausbreitungsfaktor in Höhe von  $2 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$  ab (GSF 1979). Die Lage der ungünstigsten Einwirkungsstelle liegt in Sektor 1 am Zaun der Anlage.

Tab. 5.3: Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft im Jahr 1978, dem letzten Jahr der Einlagerung, und die daraus berechneten Radionuklidkonzentrationen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (nach GSF 1979 auf SI-Einheiten umgerechnet).

Nuklid	Ableitung im Jahr 1978 Bq	berechnete Radionuklidkonzentrationen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Umzäunung Bq/m <sup>3</sup>	Grenzwert der StrlSchV (1976) Bq/m <sup>3</sup>	natürliche und durch Kernwaffenexplosionen erzeugte Radionuklidkonzentrationen der Umgebungsluft Bq/m <sup>3</sup>
H-3	$3,2 \times 10^{11}$	2,0	370	0,11
C-14	$6,3 \times 10^9$	0,041	270	0,056
I-129	$1,1 \times 10^5$	$7,4 \times 10^{-7}$	0,059	$3,7 \times 10^{-9} - 3,7 \times 10^{-11}$
Pb-210	$2,7 \times 10^6$	$1,7 \times 10^{-5}$	0,0096	$0,0037 - 3,7 \times 10^{-5}$
kurzlebige Aerosole*	$7,4 \times 10^{10}$	0,23	22**	37 - 0,37

Abbildung 5.2 zeigt die gemessenen jährlichen Ableitungen der vier Radionuklide für den Zeitraum von 1978 bis 2009. Die Ableitungen von H-3, C-14 und Pb-210 haben im Laufe der Jahre abgenommen. Für Rn-222 sind die Ableitungen weitgehend konstant geblieben.

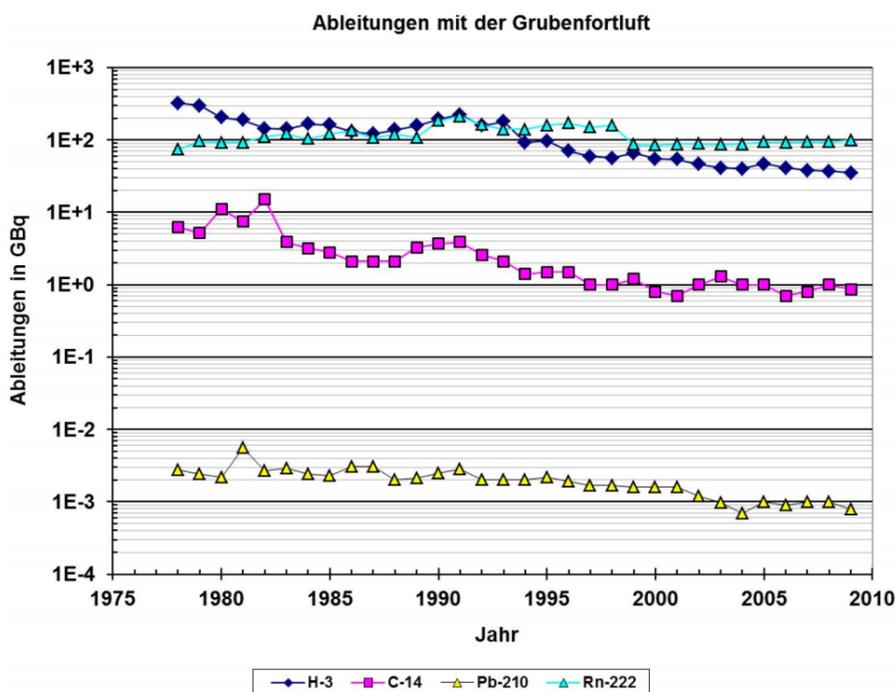


Abb. 5.2: Jährliche Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft aus der Schachtanlage

\* kurzlebige Zerfallsprodukte von Rn-222 und Rn-220  
 \*\* Rn-222.

Asse II nach den Berichten der Betreiber.

Da die Immissionsmessungen keine Hinweise auf Strahlenexpositionen der Bevölkerung durch Ableitungen radioaktiver Stoffe aus der Schachanlage Asse II ergeben, ist man auf die Modellierung der potentiellen Expositionen auf der Grundlage der Daten für die Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenluft angewiesen. Um diese potentiellen Strahlenexpositionen für den gesamten Zeitraum der Betriebs- und Nachbetriebsphase berechnen zu können, wurden Ableitungsdaten für die Jahre vor 1978 aus den Messwerten für 1978 proportional zur insgesamt eingelagerten Aktivität (Abbildung 5.1) angesetzt (Abbildung 5.3).

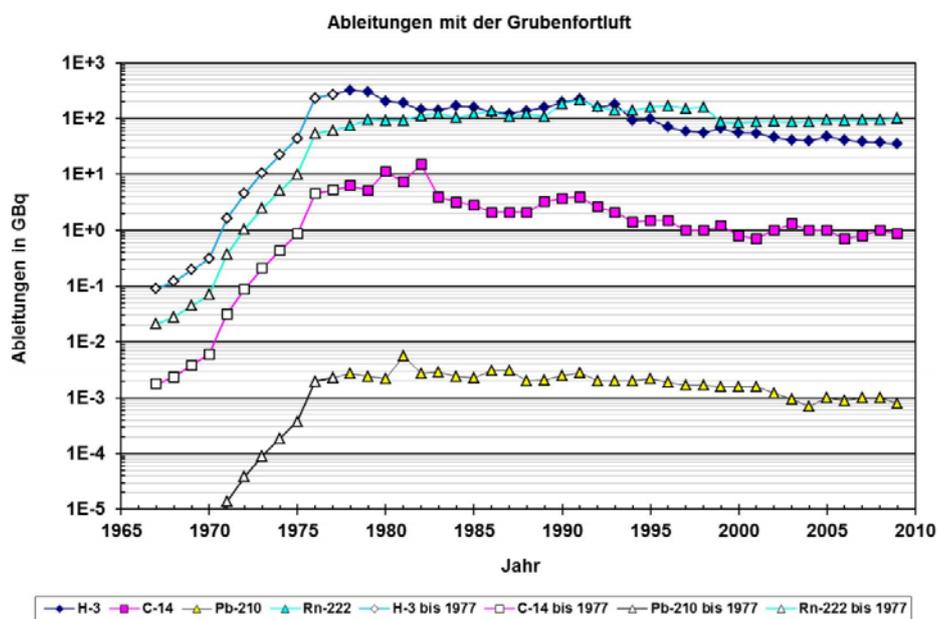


Abb. 5.3: Jährliche Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft aus der Schachanlage Asse II: Messwerte ab 1978 nach den Berichten der Betreiber, bis 1977 aus den Daten für 1978 mit der bis dahin jeweils eingelagerten Aktivität skaliert.

## 5.5 Vorfälle mit Kontaminationen

Mehr als 200 aufgetretene Kontaminationen wurden vom früheren Betreiber GSF (seit 2008 HGMU) zwischen März 1968 und September 1980 dokumentiert. Im Bericht „Die Strahlenexposition der Beschäftigten der Schachanlage Asse II von 1967 bis 2008 – Gesundheitsmonitoring Asse“ (BfS 2011) wurden die Vorfälle mit Kontaminationen ausführlich im Hinblick auf die Strahlenexposition der Beschäftigten dargestellt. Das BfS bezieht sich dabei auf die Datenlage des Berichtes „Radiologische Sachstandserhebung für die Schachanlage Asse II“ (ISTec 2009).

Unter diesen Ereignissen sind drei mit großflächigeren Kontaminationen bzw. mit dem Nachweis von Alpha-Strahlung unter Tage und eines über Tage:

- am 17. Dezember 1973: Kontamination am pa-Behälter (Großbehälter für den Eisenbahntransport) (2 000 cm<sup>2</sup>, 14,8 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination, Anfang des Jahres 1974 dekontaminiert auf 0,37 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination), im Füllort auf der 750-m-Sohle und in der Strecke zur LAW-Einlagerungskammer 12 (ca. 250 m<sup>2</sup>, 185 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination) und am Kramer-Lader auf der 750-m-Sohle (2 m<sup>2</sup>, 74 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination). Bei gammaspektrometrischen Untersuchungen des bei den Dekontaminationsarbeiten angefallenen Materials wurde Cs-134 nachgewiesen;
- am 28. Oktober 1974: Kontamination der Schachthallensohle (1 000 cm<sup>2</sup>, 1,85 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination), am pa-Behälter (20 000 cm<sup>2</sup>, 7,4 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination), im Füllort der 750-m-Sohle (10 m<sup>2</sup>, 148 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination und 18,5 Bq/cm<sup>2</sup> Alpha-Kontamination) am Kramer-Lader (5 000 cm<sup>2</sup>, 18,5 Bq/cm<sup>2</sup> Beta-Kontamination und 500 cm<sup>2</sup>, 0,74 Bq/cm<sup>2</sup> Alpha-Kontamination), alle Flächen dekontaminiert am 28. Oktober 1974;
- am 10. September 1980: Kontamination in der LAW-Einlagerungskammer 7 auf der 750-m-Sohle durch ein am 12. oder 13. Dezember 1978 angeliefertes Fass, das beim Aufnehmen mit dem Fassgreifer aufplatzte und dessen gesamter Fassinhalt in Form von dünnflüssigem Schlamm infolge des in dem Fass herrschenden Innendrucks heraussprudelte (ca. 10 m<sup>2</sup> der Fahrbahn, ca. 3 700 Bq/cm<sup>2</sup>, Betastrahler Co-60 und Cs-137);
- am 28. Dezember 1978 wurde über einen kontaminierten LKW vom Kernforschungszentrum Karlsruhe berichtet.

Die genannten vier Kontaminationsereignisse wurden durch das BfS im Hinblick auf die Strahlenexposition der Beschäftigten ausgewertet und bewertet (BfS 2011). Das BfS hat die maximale potentielle interne Strahlenexposition der Beschäftigten für die vier Vorfälle abgeschätzt und berechnete Strahlenexpositionen von 0,95 mSv, 1,3 mSv, 0,35 mSv bzw. 0,029 mSv. Die übrigen Kontaminationsereignisse waren kleinräumig und nach Einschätzung des BfS nicht Anlass zu erhöhten Strahlenexpositionen der Beschäftigten. In den Immissions- und Emissionsmessungen haben diese Ereignisse bei der Art der damals vorgenommenen Messungen keine Spuren hinterlassen. Strahlenexpositionen der Bevölkerung in der Umgebung der Schachtanlage Asse II, die zu berücksichtigen wären, würden ihre Spuren auch in der Immissions- und Emissionsüberwachung hinterlassen.

## 5.6 Strahlenexpositionen von Referenzpersonen der Bevölkerung

In der Kerntechnik werden üblicherweise die potentiellen Strahlenexpositionen für Referenzpersonen für 6 Altersklassen nach StrlSchV an den ungünstigsten Einwirkungsstellen berechnet. Es handelt sich hierbei um konservative Abschätzungen der Strahlenexposition der Bevölkerung nach der Allgemeinen

Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV. Ihre Konservativität erhalten die generischen Berechnungen nach der AVV durch explizite Festlegungen, u. a. in der StrlSchV:

- Es wird angenommen, dass die kerntechnische Anlage bereits 50 Jahre in Betrieb ist und damit ein Gleichgewichtsmodell für die Strahlenexposition angenommen werden kann.
- Die Strahlenexpositionen der Referenzpersonen werden an den jeweils ungünstigsten Einwirkungsstellen berechnet, wobei für verschiedene Expositionspfade diese Einwirkungsstellen an unterschiedlichen Orten liegen können, ungeachtet der Tatsache, dass sich der Mensch nicht an unterschiedlichen Orten gleichzeitig aufhalten kann.
- Die Aufenthaltszeiten der Referenzpersonen sind extrem konservativ. So wird z.B. ein ganzjähriger Daueraufenthalt im Freien außerhalb des Betriebsgeländes an den ungünstigsten Einwirkungsstellen angenommen.
- Die Ernährungsgewohnheiten sind in der StrlSchV festgelegt. Dabei sind die mittleren Verzehrsmengen der Anlage VII Teil B Tabelle 1 multipliziert mit den Faktoren der Spalte 8 zu verwenden. Diese Werte decken konservativ die 95. Perzentile der Ernährungsgewohnheiten in Deutschland ab.
- Nach der AVV zu § 47 StrlSchV ist bei äußerer Strahlenexposition die Dosis für das Bezugsjahr, bei innerer Strahlenexposition die Folgedosis der Referenzpersonen bis zum 70. Lebensjahr aufgrund der Inkorporation im Bezugsjahr zu berechnen. Bei Expositionspfaden, die mit einer Anreicherung in der Umwelt verbunden sind, ist eine 50-jährige Akkumulationszeit vor dem Bezugsjahr zu berücksichtigen.
- Es wird angenommen, dass die Referenzpersonen sich ausschließlich aus lokal an den ungünstigsten Einwirkungsstellen angebauten Nahrungsmitteln ernähren.

Durch diese Akkumulation von konservativen Annahmen wird eine starke Überschätzung der Strahlenexposition der realen Bevölkerung erreicht, sodass die Behörde in Genehmigungsverfahren davon ausgehen kann, dass die Grenzwerte nach § 47 StrlSchV eingehalten sind, wenn Berechnungen der Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen nach der AVV die Einhaltung der Grenzwerte für die Referenzpersonen nachweisen. Eine realistische Abschätzung der tatsächlichen Strahlenexpositionen der Bevölkerung in der Umgebung der Schachanlage Asse II stellen diese Berechnungen nicht dar; sie sind extrem konservativ und überschätzend.

Die ab 1983 berichteten Strahlenexpositionen der erwachsenen Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Standort Schachanlage Asse II lagen zwischen 65,5  $\mu\text{Sv}$  (1983) und 5,4  $\mu\text{Sv}$  (2004) im Kalenderjahr. Die für die einzelnen Jahre angegebenen Strahlenexpositionen der

Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle sind nicht direkt vergleichbar, da im Laufe der Jahrzehnte unterschiedliche Annahmen und Berechnungsverfahren zur Anwendung kamen.

Die Modellierung der potentiellen Strahlenexposition durch Ingestion und Inhalation für die Referenzperson Erwachsene an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II erfolgte auf der Grundlage der jeweils gültigen Regelwerke. Nicht in den Verordnungen und Verwaltungsvorschriften geregelte Sachbestände, wie z.B. die Strahlenexposition durch Radon, wurden im Sinne des jeweiligen Standes von Wissenschaft und Technik behandelt. Anfänglich, d. h. ab 1982, wurden die Allgemeinen Berechnungsgrundlagen (BMI 1979) der Strahlenschutzverordnung von 1976 zur Grundlage der Modellierung gemacht. Nach der Neufassung der StrlSchV im Jahr 1989 wurde die AVV zu § 45 StrlSchV angewandt, wobei die Dosiskoeffizienten teilweise aus den Werten der Jahresaktivitätszufuhr (sog. JAZ-Werten) abgeleitet wurden. Ab 2002 wurde die Modellierung nach StrlSchV 2001 in Verbindung mit der AVV zu § 47 StrlSchV in der Fassung des Entwurfs von 2001 und den Berechnungsgrundlagen Bergbau (BMU 1999) durchgeführt.

Entsprechend der Weiterentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik sowie des Regelwerks wurden auch unterschiedliche Dosisgrößen benutzt: 1982 bis 1988 die Ganzkörperdosis für die Referenzperson Erwachsene, 1989 bis 2001 die effektive Äquivalentdosis für die Referenzpersonen Erwachsene und Kleinkind und ab 2002 effektive Dosen für die Referenzpersonen in 6 Altersklassen.

Da sich mit dem Inkrafttreten der neuen Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001 auch die Berechnungsgrundlage der AVV zu § 47 StrlSchV änderte, wurde mit Zustimmung der Behörden die Ausbreitungssituation auf der Schachanlage Asse II im Jahre 2001 mittels einer Studie (Brenk 2001) neu bewertet. Unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten und der Abluftmengen lässt sich aus den Ergebnissen der Studie für die ungünstigste Einwirkungsstelle in der Umgebung (nordöstlich des Diffusors am Zaun der Anlage) ein Langzeitausbreitungsfaktor von  $4,6 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$  für luftgetragene Aktivitätsabgaben ableiten (GSF 2007).

Mit der Übernahme der Schachanlage Asse II durch das BfS wurde das Berechnungsverfahren für potentielle Strahlenexpositionen erneut angepasst. Bei der Dosisermittlung werden neben Erwachsenen und Kleinkindern vier weitere Altersgruppen berücksichtigt. Zur Ermittlung der potentiellen Strahlenexposition sind die Dosiskoeffizienten aus dem Bundesanzeiger Nr. 160 a/b vom 28. August 2001 zu verwenden. Da darin für Radon keine Dosiskoeffizienten enthalten sind, wurden für Radon die in der EURATOM-Richtlinie 96/29 enthaltenen Konversionsfaktoren übernommen.

Die in dieser Stellungnahme der SSK gewählte Darstellung betrachtet für den gesamten Zeitraum die Strahlenexposition der Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen nach StrlSchV 2001 in Verbindung mit der AVV zu § 47 StrlSchV in der Fassung des Entwurfs von 2001 (BfS 2001) und den Berechnungsgrundlagen Bergbau (BMU 1999), wie sie im Gutachten der Firma Brenk (2001) dargestellt

wurde. Auch spätere Rechnungen zur Überprüfung der radiologischen Ausbreitungssituation am Standort der Schachanlage Asse II (Brenk 2008) benutzen diesen Ansatz.

Für die Abschätzung der Strahlenexposition im gesamten Betriebszeitraum wurde das Gutachten der Firma Brenk (2001) zugrunde gelegt. In diesem Gutachten wurden jährliche Ableitungen mit der Grubenfortluft von  $5,5 \times 10^{10}$  Bq für H-3,  $0,8 \times 10^9$  Bq für C-14,  $1,6 \times 10^6$  Bq für Pb-210 und  $8,4 \times 10^{10}$  Bq für Rn-222 (ohne Folgeprodukte) angenommen. Bei diesen Ableitungen handelt es sich um die messtechnisch ermittelten Emissionen für das Jahr 2000, die im Jahresbericht 2000 (GSF 2001) angegeben sind. Die Ergebnisse dieses Gutachtens wurden zur Berechnung der Strahlenexposition in den einzelnen Betriebsjahren benutzt.

Die Ergebnisse der Modellierung nach dem Gutachten der Firma Brenk (2001) sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Sie erlauben für den gesamten Zeitraum, in dem Ableitungen berichtet wurden, die Berechnung der potentiellen Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an den ungünstigsten Einwirkungsstellen auf der Basis des derzeit gültigen Regelwerks (siehe Abbildung 5.4 a, b).

Die berechnete Strahlenexposition der Referenzpersonen berücksichtigt bei der Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Abluft folgende Expositionspfade:

Zur Ermittlung der äußeren Strahlenexposition:

- Exposition durch Betastrahlung innerhalb der Abluffahne,
- Exposition durch Gammastrahlung aus der Abluffahne,
- Exposition durch Gammastrahlung der am Boden abgelagerten radioaktiven Stoffe.

Zur Ermittlung der inneren Strahlenexposition:

- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Atemluft (Inhalation),
- Exposition durch Aufnahme radioaktiver Stoffe mit der Nahrung (Ingestion) auf den Wegen:  
Luft→Pflanze, Luft→Futterpflanze→Kuh→Milch, Luft→Futterpflanze→Tier→Fleisch,  
Luft→Muttermilch und Luft→Nahrung→Muttermilch.

Tab. 5.4: Strahlenexposition der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, berechnet mit dem Modell der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) auf der Basis der tatsächlichen Ableitungen des Jahres 2000 (Brenk 2001).

Jährliche Ableitungen mit der Grubenfortluft nach GSF (2001) in Brenk (2001)

Nuklid	H-3	C-14	Pb-210	Rn-222	Summe
Ableitung Bq/a	$5,5 \times 10^{10}$	$8,0 \times 10^8$	$1,6 \times 10^6$	$8,4 \times 10^{10}$	
Effektive Dosis in $\mu\text{Sv/a}$					
Referenzperson $\leq 1$ Jahr	0,39	1,3	7,8	3,3	13
Referenzperson > 1 Jahr – $\leq 2$ Jahre	0,31	1,5	5,3	3,3	10
Referenzperson > 2 Jahre – $\leq 7$ Jahre	0,25	1,4	5	3,3	9,8
Referenzperson > 7 Jahre – $\leq 12$ Jahre	0,22	1,2	4,9	3,3	9,6
Referenzperson > 12 Jahre – $\leq 17$ Jahre	0,17	0,93	5	3,3	9,4
Referenzperson > 17 Jahre	0,16	0,88	1,8	3,3	6,1
Organdosis rotes Knochenmark in $\mu\text{Sv/a}$					
Referenzperson $\leq 1$ Jahr	0,35	1,2	29	0	31
Referenzperson > 1 Jahr – $\leq 2$ Jahre	0,29	1,4	20	0	22
Referenzperson > 2 Jahre – $\leq 7$ Jahre	0,23	1,3	17	0	19
Referenzperson > 7 Jahre – $\leq 12$ Jahre	0,21	1,2	16	0	17
Referenzperson > 12 Jahre – $\leq 17$ Jahre	0,16	0,92	15	0	16
Referenzperson > 17 Jahre	0,15	0,87	6	0	7,0
Organdosis Schilddrüse in $\mu\text{Sv/a}$					
Referenzperson $\leq 1$ Jahr	0,35	1,2	1,9	0	3,5
Referenzperson > 1 Jahr – $\leq 2$ Jahre	0,29	1,4	1,4	0	3,1
Referenzperson > 2 Jahre – $\leq 7$ Jahre	0,23	1,3	1,2	0	2,7
Referenzperson > 7 Jahre – $\leq 12$ Jahre	0,21	1,2	0,96	0	2,4
Referenzperson > 12 Jahre – $\leq 17$ Jahre	0,16	0,92	0,7	0	1,8
Referenzperson > 17 Jahre	0,15	0,87	0,21	0	1,2

Im Gutachten von Brenk (2001) wird zu den Ergebnissen ausgeführt: „Bei der Berechnung der potentiellen Strahlenexposition erwiesen sich die Beiträge der äußeren Bestrahlung als

vernachlässigbar. Gammasubmersion, Bodenstrahlung und Betasubmersion führen zu potentiellen Dosisbeiträgen mehrere Größenordnungen unterhalb einem Mikrosievert.

Bei der Inhalation ist der potentielle Dosisbeitrag durch Rn-222 und seine kurzlebigen Folgeprodukte führend. Für alle Altersgruppen liegt der berechnete Dosiswert bei 3  $\mu\text{Sv}$  pro Jahr.

Insgesamt sind die Beiträge des Ingestionspfades zur potentiellen Strahlenexposition am größten. Hier ist Pb 210 dominant mit kleinen zusätzlichen Beiträgen von C 14 und Tritium. ... Für die Gesamtdosis sind also im Wesentlichen Inhalation und Ingestion zu berücksichtigen.“

Die ungünstigste Einwirkungsstelle liegt für die Schachanlage Asse II in Sektor 1 in 50 m Entfernung vom Diffusor am Zaun des Zechengeländes. Dies gilt nach den Berechnungen von Brenk (2001) sowohl hinsichtlich der äußeren Bestrahlung als auch für die Inhalation und Ingestion. Für die Kontamination der Umwelt erwies sich die trockene Deposition in niederschlagsfreien Wetterlagen als um fast zwei Größenordnungen bedeutsamer als die nasse Deposition durch Auswaschen von Radioaktivität mit dem Niederschlag.

Diesen Berechnungen liegt ein jährlicher Luftdurchsatz von  $1,4 \times 10^9 \text{ m}^3$  zu Grunde. Der Langzeitausbreitungsfaktor für das Gesamtjahr ergab sich zu  $4,64 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$  und ist um mehr als einen Faktor 4 geringer als der seit 1978 benutzte Langzeitausbreitungsfaktor in Höhe von  $2 \times 10^{-4} \text{ s/m}^3$  (GSF 1978). Seit 2006 wurde ein Langzeitausbreitungsfaktor von  $4,6 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$  in den GSF-Jahresberichten zugrunde gelegt (GSF 2006).

Für diese Stellungnahme wurden für den gesamten Zeitraum der Betriebs- und der Nachbetriebsphase mit der Methodik der Firma Brenk (2001) die Strahlenexpositionen der Referenzpersonen aller sechs Altersgruppen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle sowohl für die effektive Dosis als auch für die Organdosen Rotes Knochenmark und Schilddrüse berechnet (Abbildung 5.4). Es wurden die Ableitungen nach Abbildung 5.3 zugrunde gelegt.

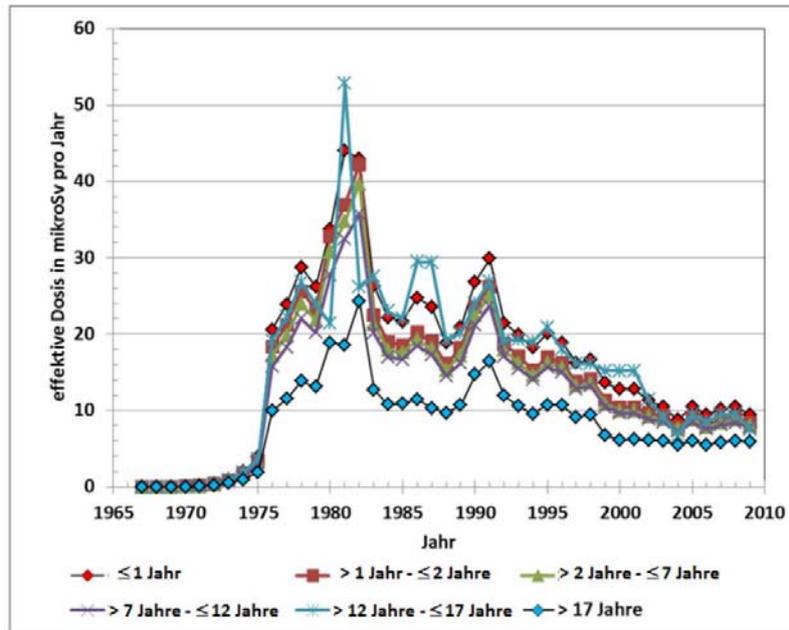


Abb. 5.4a: Zeitlicher Verlauf der effektiven Dosen in Mikrosievert pro Jahr für die Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachtanlage Asse II durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in Analogie zu Brenk (2001).

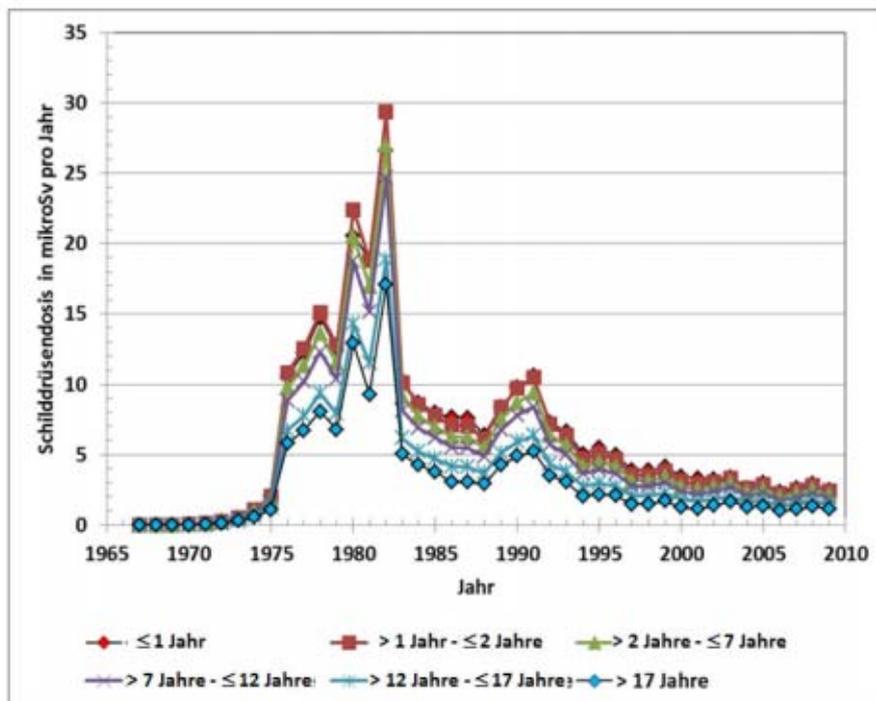
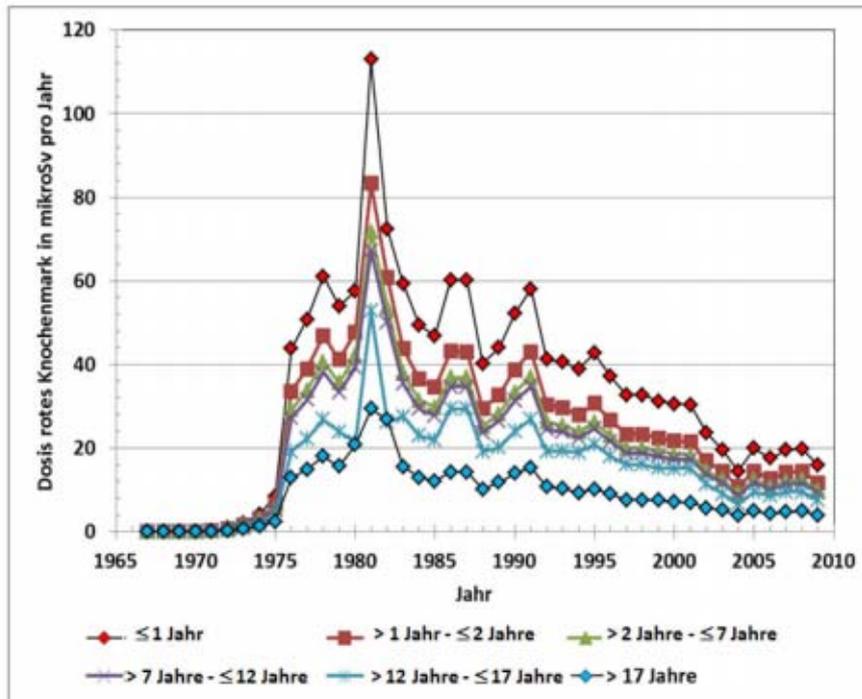


Abb. 5.4b: Zeitlicher Verlauf der Organdosen für das rote Knochenmark (oben) und der Schilddrüsendosen (unten) jeweils in Mikrosievert pro Jahr für die Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in Analogie zu Brenk (2001).

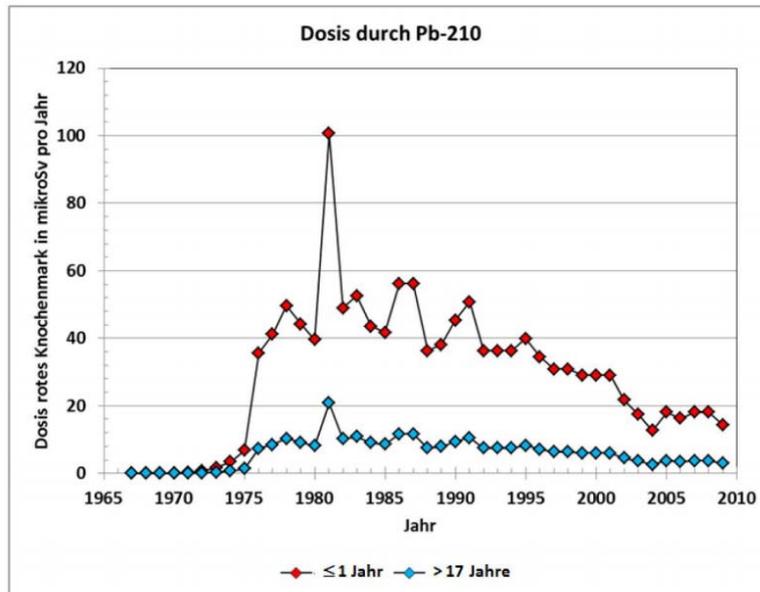


Abb. 5.5: Zeitlicher Verlauf des durch die Ableitungen von Pb-210 mit der Fortluft bewirkten Anteils der Organdosen für das rote Knochenmark der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II, berechnet nach AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in Analogie zu Brenk (2001).

Schon in Tabelle 5.4 war ersichtlich, dass sowohl die Organdosis für das rote Knochenmark als auch die effektive Dosis durch den Beitrag von Pb-210 dominiert wird. Es ist die Ingestion von Pb-210, die diese potentiellen Expositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle bewirkt. Dies wird besonders deutlich im zeitlichen Verlauf der durch Pb-210 bewirkten Anteile der Dosis für das rote Knochenmark (Abbildung 5.5) im Vergleich zu den Daten in Abbildung 5.4b.

Bei der Modellierung der Strahlenexposition durch Pb-210 muss an dieser Stelle auf ein allgemeines Problem hingewiesen werden. Es gibt bei Berechnungen nach der AVV zu § 47 StrlSchV und auch nach den Berechnungsgrundlagen Bergbau (BMU 1999) Inkonsistenzen zur sonstigen Ermittlung der Strahlenexposition der Menschen in Deutschland durch Pb-210. Mit einer pro Jahr abgeleiteten Pb-210-Aktivität von  $1,6 \times 10^6$  Bq und einem Langzeitausbreitungsfaktor an der ungünstigsten Einwirkungsstelle von  $4,6 \times 10^{-5}$  s/m<sup>3</sup> (Brenk 2001) errechnet sich die mittlere Pb-210-Aktivitätskonzentration als Folge der Ableitungen mit der Grubenfortluft an der ungünstigsten Einwirkungsstelle zu  $2,3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ .

In Brenk (2001) wird aus diesen  $2,3 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  nach der AVV eine Jahresdosis der Referenzperson (1a bis 2a) von  $5 \mu\text{Sv}$  berechnet. In der Umgebungsluft ist Pb-210 auch natürlich vorhanden. Die Aktivitätskonzentrationen liegen in Deutschland zwischen  $200 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  und  $670 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (BMU 2002).

Für den langjährigen Mittelwert der Aktivitätskonzentration von Pb-210 in der bodennahen Luft in Braunschweig von  $317 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$  (Wershofen und Arnold 2005) würde sich nach den AVV-Rechnungen

(Brenk 2001) eine Jahresdosis der Referenzperson (1 Jahr bis 2 Jahre) durch Ingestion von 690  $\mu\text{Sv/a}$  allein aus dem natürlichen Vorkommen von Pb-210 ergeben.

Nach dem Parlamentsbericht 2000 (BMU 2001) bewirken Kalium-40 sowie die Radionuklide der natürlichen Zerfallsreihen von Uran-238 und Thorium-232, die über Trinkwasser und Nahrung aufgenommen werden (Ingestion), in Deutschland zusammen eine mittlere effektive Jahresdosis von 300  $\mu\text{Sv}$ . Diese Daten sind in guter Übereinstimmung mit der mittleren natürlichen Ingestionsdosis von 290  $\mu\text{Sv}$ , die UNSCEAR (2000) angibt. Nach Messungen von Vahlbruch (2004) sind in Niedersachsen nur etwa 10 % der gesamten Ingestionsdosis des 1 Jahr bis 2 Jahre alten Kindes, d. h. 40  $\mu\text{Sv}$ , durch das natürliche Vorkommen von Pb-210 verursacht.

Die Berechnung der vergangenen Strahlenexpositionen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der existierenden Schachanlage Asse II sind somit inkonsistent mit den Angaben der natürlichen Strahlenexposition. Die potentiellen Strahlenexpositionen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II durch Pb-210 werden weit überschätzt. Dies belegt die Tatsache, dass das Verhältnis der natürlichen Strahlenexposition durch Ingestion von Pb-210 und der natürlichen Pb-210-Aktivitätskonzentrationen in der bodennahen Luft wesentlich kleiner ist als das Verhältnis der für die ungünstigste Einwirkungsstelle berechneten Strahlenexpositionen und der aus den Ableitungen aus der Schachanlage Asse II berechneten Pb-210-Aktivitätskonzentration der Luft an der ungünstigsten Einwirkungsstelle.

Eine realistischere Einschätzung der potentiellen Strahlenexposition der Bewohner der SG Asse, die über die Berechnungen der Strahlenexposition der Referenzperson an den ungünstigsten Einwirkungsstellen hinausgeht, kann auf der Grundlage von Ausbreitungsrechnungen mittels eines Lagrange-Partikel-Modells durchgeführt werden (ISTec 2010).

Diese Rechnungen (ISTec 2010) bestätigen im Wesentlichen die Lage der ungünstigsten Einwirkungsstelle, ergeben jedoch einen Langzeitausbreitungsfaktor von  $3,6 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$ , d. h. mehr als einen Faktor 10 niedriger als Brenk (2001). Bei einem Vergleich der potentiellen Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (Tabelle 5.5) nach Brenk (2001) und ISTec (2010) ist zu berücksichtigen, dass ISTec (2010) die nuklidspezifisch maximalen jährlichen Ableitungen nach BfS (2010) zugrunde legt. Diese sind mit  $1,3 \times 10^9 \text{ Bq}$  für C-14 und  $9,4 \times 10^{10} \text{ Bq}$  für Rn-222 höher als in Brenk (2001). Die angenommenen Ableitungen für H-3 und Pb-210 sind in den beiden Berichten identisch. Es ist darauf hinzuweisen, dass einige Parameterwerte und Randbedingungen der beiden Berichte nicht identisch sind.

Im Bericht der ISTec (2010) werden erstmals Langzeitausbreitungsfaktoren flächenhaft für die Umgebung der Schachanlage Asse II angegeben (Abbildung 5.6). Man sieht, dass die Langzeitausbreitungsfaktoren vom Höchstwert von  $3,6 \times 10^{-6} \text{ s/m}^3$  an der ungünstigsten Einwirkungsstelle nach Süden in Richtung Remlingen innerhalb von 1,2 km um mehr als eine

Größenordnung abnimmt. Nach Westen in Richtung Wittmar ist die Abnahme noch stärker. Nach Nordosten, in der nicht zur SG Asse gehörenden Ortschaft Großvahlberg, nehmen die Langzeitausbreitungsfaktoren am schwächsten ab, jedoch auch hier innerhalb von 1,2 km um etwa eine Größenordnung.

Tab: 5.5: Vergleich der berechneten potentiellen Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung der Schachanlage Asse II nach Brenk (2001) und ISTec (2010).

Referenzperson	Effektive Dosis in $\mu\text{Sv/a}$	
	ISTec (2010)	Brenk (2001)
Referenzperson $\leq 1$ Jahr	3,5 (1,6 <sup>*</sup> )	13
Referenzperson $> 1$ Jahr – $\leq 2$ Jahre	1,3	10
Referenzperson $> 2$ Jahre – $\leq 7$ Jahre	1,2	9,8
Referenzperson $> 7$ Jahre – $\leq 12$ Jahre	1,0	9,6
Referenzperson $> 12$ Jahre – $\leq 17$ Jahre	0,9	9,4
Referenzperson $> 17$ Jahre	0,6	6,1

Noch deutlicher wird die Verdünnung der Radionuklidkonzentration in der Atmosphäre der nächstgelegenen Ortschaften der SG Asse, wenn man die flächenhafte Verteilung der Verdünnung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 relativ zu der Aktivitätskonzentration der Grubenfortluft im Diffusor in der Umgebung der Schachanlage Asse II (Kirchner 2011) betrachtet (Abbildung 5.7). Danach ist mit Verdünnungen der Aktivitätskonzentration für Pb-210 zwischen der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Zaun der Schachanlage Asse II und den nächstgelegenen Ortschaften Remlingen und Wittmar um Faktoren von etwa 100 bzw. etwa 1 000 und damit entsprechend geringeren potentiellen Strahlenexpositionen zu rechnen.

\* Säuglingsersatznahrung

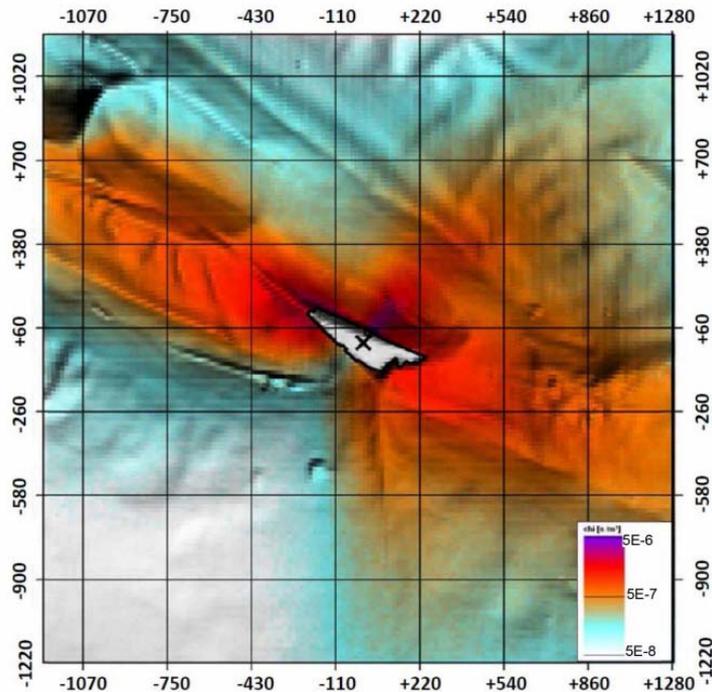


Abb. 5.6: Flächenhafte Verteilung des Langzeit-Ausbreitungsfaktors in  $\text{s/m}^3$  für die Jahre 2002 bis 2006 in der Umgebung der Schachanlage Asse II (nach ISTec 2010). Bei den Koordinaten handelt es sich um metrische Angaben des Abstandes vom Diffusor (Geokoordinaten 32 U 614348 5776789, 52.12978°N 10.67055°E). Die Gitterzellen haben eine Kantenlänge von 320 m, die Kantenlänge des Bildes beträgt 2 400 m.

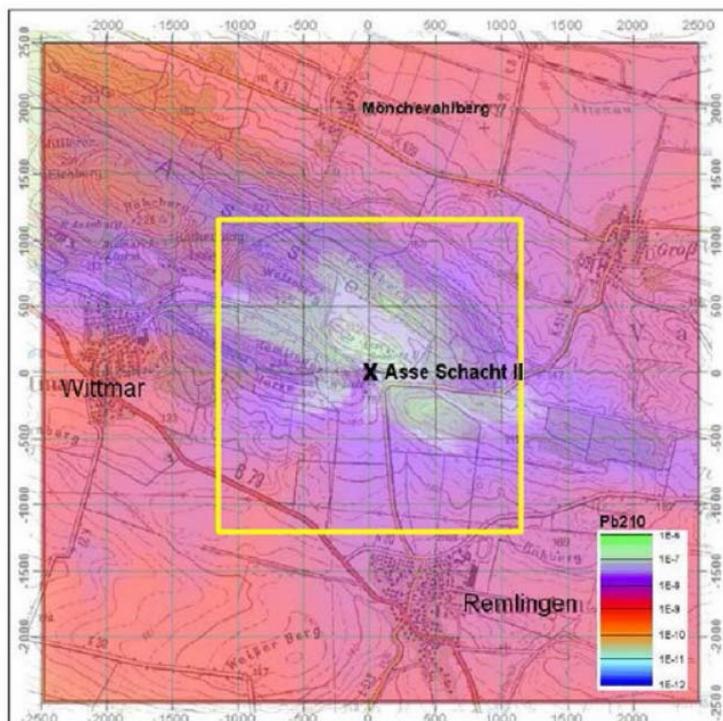


Abb. 5.7: Flächenhafte Verteilung der Verdünnung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 relativ zu der im Diffusor in der Umgebung der Schachanlage Asse II (Kirchner 2011, modifiziert). Das

gelbe Quadrat gibt die Größe des Kartenausschnittes in Abb. 5.6 an.

Während die nächstgelegene Wohnbebauung in den Ortschaften Remlingen und Wittmar 1,5 km bis 2 km vom Diffusor entfernt liegt, ist die Mehrzahl der Ortschaften der SG Asse noch wesentlich weiter von der Schachanlage Asse II entfernt. Semmenstedt, Groß- und Klein-Denkte, Groß- und Klein-Timmern und Kissenbrück liegen in 4 km bis 6 km Abstand und Hedeper, Wetzleben und Rocklum in 7 km bis 8 km Entfernung (Abbildung 5.8). Für diese weiter entfernten Ortschaften liegen keine detaillierten Ausbreitungsrechnungen vor. Aus dem allgemeinen Verhalten von Langzeitausbreitungsfaktoren nach dem Gauß-Fahnenmodell (AVV zu § 47 StrlSchV) kann für diese Orte noch einmal eine Verdünnung um einen weiteren Faktor 10 mit der Konsequenz einer gleichermaßen erniedrigten Strahlenexposition durch die Ableitungen der Schachanlage Asse II angenommen werden.



Abb. 5.8: SG Asse. Quelle: <http://www.samtgemeinde-asse.de>

Tab: 5.6: Vergleich der berechneten potentiellen, bis zum Jahr 2009 akkumulierten Folgedosis einer im Jahr 1978 geborenen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle und nächstgelegenen Orten in der Umgebung der Schachanlage Asse II, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV.

Ausbreitungsmodell	ungünstigste Einwirkungsstelle am Zaun der Schachanlage Asse II	die nächstgelegenen Orte in der SG Asse: Remlingen und Wittmar		weiter entfernte Orte der SG Asse	
	Gauß	Gauß	Lagrange	Gauß	Lagrange

relativer Verdünnungsfaktor	1	10	100 – 1 000	100	1 000 – 10 000
effektive Dosis in $\mu\text{Sv}$	500	50	5 – 0,5	5	0,5 – 0,05
Organdosis rotes Knochenmark in $\mu\text{Sv}$	700	70	7 – 0,7	7	0,7 – 0,07
Schilddrüsendosis in $\mu\text{Sv}$	200	20	2 – 0,2	2	0,2 – 0,02

Für die Berechnung der Strahlendosen, die zur Erklärung der beobachteten Krebsinzidenzen erforderlich wären, wird in Kapitel 5 das Jahr 1978, in dem die gesamte Aktivität eingelagert war, als Bezugsjahr gewählt. Es wird dann angenommen, dass die gesamte Exposition in diesem Jahr stattfand. Um einen Vergleich der erforderlichen Strahlendosen mit den Dosen der AVV-Rechnungen zu ermöglichen, ist in Tabelle 5.6 die akkumulierte Strahlenexposition einer im Jahr 1978 geborenen Referenzperson bis zum Jahr 2009, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV, für die ungünstigste Einwirkungsstelle zusammengestellt. Zusätzlich sind globale Abschätzungen der potentiellen Strahlenexpositionen in den nächstgelegenen und weiter entfernten Orten in der Umgebung der Schachanlage Asse II unter der Annahme der oben diskutierten Verdünnungsfaktoren angegeben.

#### 5.7 Strahlenexpositionen der Beschäftigten

Das BfS hat mit dem Bericht „Die Strahlenexposition der Beschäftigten der Schachanlage Asse II von 1967 bis 2008 – Gesundheitsmonitoring Asse“ (BfS 2011) eine Abschätzung der Strahlenexposition für insgesamt 692 Beschäftigte (darunter 45 Frauen) vorgelegt und veröffentlicht. Diese Ermittlung umfasste

- die personenbezogenen Daten der amtlichen und betrieblichen Personendosimetrie,
- die personenbezogenen Daten der Überwachung einer möglichen Aufnahme radioaktiver Stoffe,
- die Ergebnisse der Inkorporationsüberwachung,
- radiologische Messwerte in der Grube,
- radiologische Messwerte der Grubenluft,
- radiologische Messwerte der Abluft,
- radiologische Messwerte von Salzlösungen und
- Aufzeichnungen zu Kontaminationsereignissen.

Bei der Erstellung des Dosisregisters wurden vielfältige konservative, d. h. nach oben abschätzende Annahmen gemacht mit dem Ziel, Dosiswerte zu ermitteln, die die Strahlenexposition der Beschäftigten

nicht unterschätzen. Der zeitliche Verlauf der jährlichen effektiven Dosen ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Als höchste Gesamtjahresdosis wurde ein Wert von 17,4 mSv im Jahr 1972 bei einem Beschäftigten beobachtet. Dieser Wert liegt unter dem damals gültigen Grenzwert von 50 mSv pro Jahr und dem heute gültigen Grenzwert von 20 mSv pro Jahr. Im Mittel lagen die Jahresdosen unter 10 mSv; seit 1984 lagen sowohl die maximalen als auch die mittleren effektiven Jahresdosen unter 2 mSv.

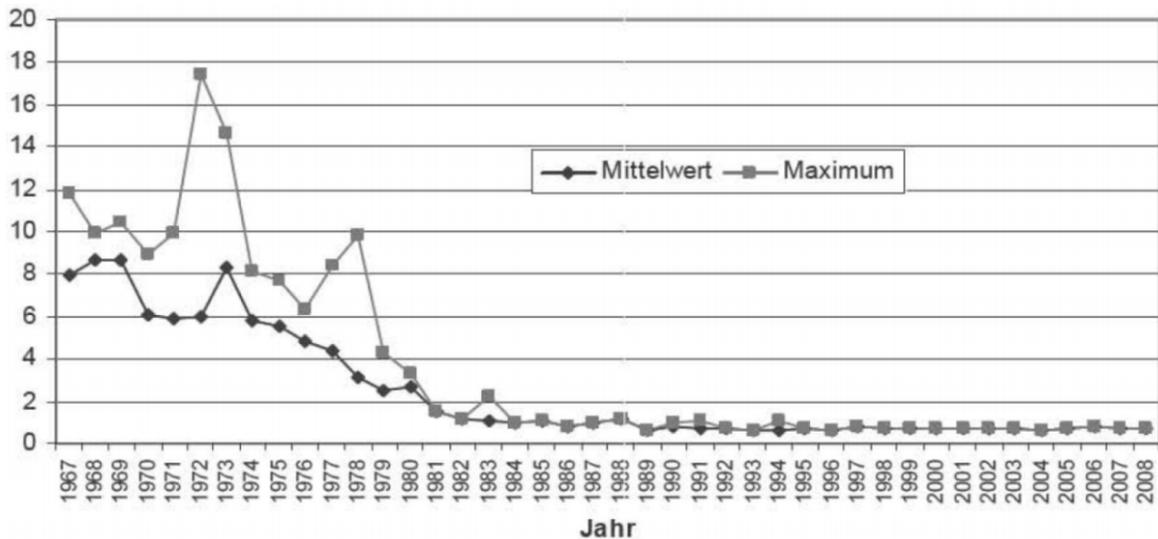


Abb. 5.9: Zeitlicher Verlauf der durchschnittlichen und maximalen, unter konservativen Annahmen geschätzten jährlichen effektiven Gesamtdosis (extern und intern) in mSv für die Beschäftigtengruppe GM Asse (BfS 2011).

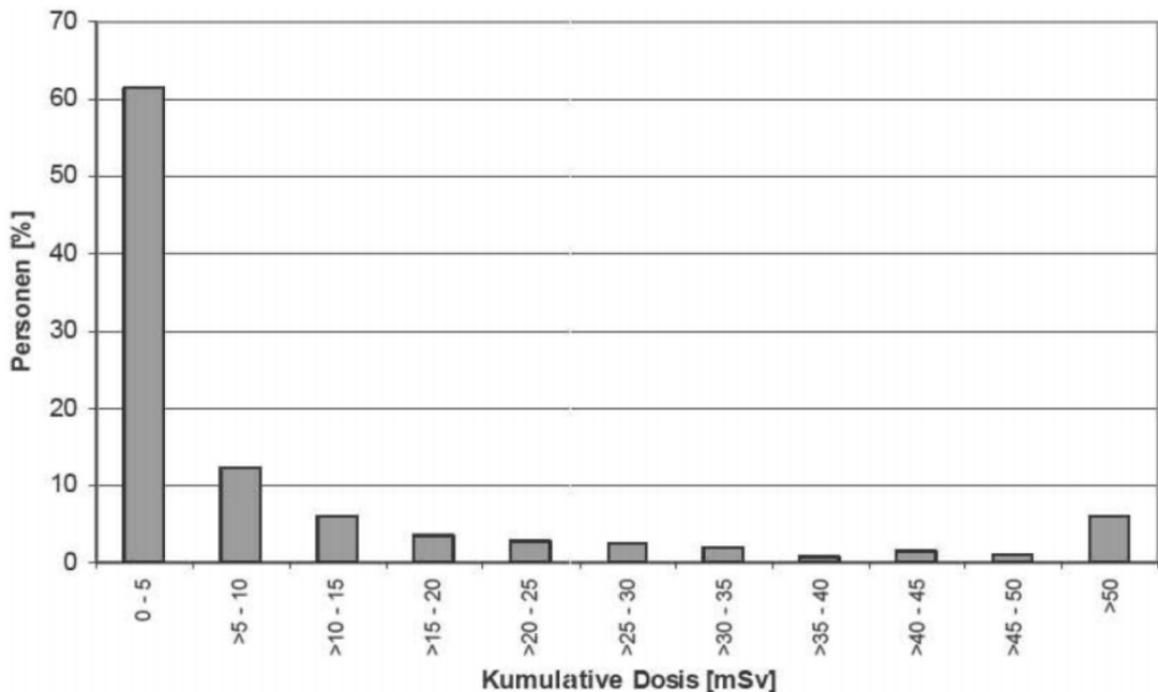


Abb. 5.10: Verteilung der geschätzten effektiven Berufslebensdosis in mSv in der Beschäftigtengruppe GM Asse (BfS 2011). Die Dosiswerte wurden mit konservativen Annahmen

geschätzt.

Insgesamt liegt die abgeschätzte Gesamt-Berufslebensdosis, d. h. die Strahlendosis jedes Beschäftigten während der beruflichen Tätigkeit auf der Schachanlage Asse II aus externer und interner Strahlenbelastung (Abbildung 5.10), im Mittel pro Beschäftigtem bei 12 mSv und im höchsten Fall bei einem Beschäftigten bei 115 mSv. Diese Werte liegen unter dem derzeit gültigen Grenzwert für die Berufslebensdosis von 400 mSv. Etwa 75 % der im GM Asse betrachteten Beschäftigten weisen den Berechnungen zufolge eine geschätzte Berufslebensdosis von weniger als 10 mSv auf. Für 7 % (41 Personen) ergab sich eine Dosis von über 50 mSv und für 1 % (7 Personen) eine Dosis von über 100 mSv mit einem Maximum von 115 mSv. Alle Personen mit Dosen über 50 mSv waren langjährig und bereits in der Einlagerungsphase (1960iger und 1970iger Jahre) bei der Asse tätig.

Die externe Strahlung leistete den höchsten Beitrag zur effektiven Strahlendosis der Beschäftigten. Die Berufslebensdosis beträgt durchschnittlich für jeden Beschäftigten 6,2 mSv und im Maximum bei einem Beschäftigten 79,3 mSv aus externer Strahlung. Den zweitwichtigsten Beitrag zur effektiven Dosis erbringt die Strahlenbelastung durch Radon und seine Zerfallsprodukte mit einer durchschnittlichen Berufslebensdosis von 4,6 mSv. Danach folgt der Dosisbeitrag durch langlebige Alpha- bzw. Beta-Radionuklide im Luftstaub mit einer mittleren Gesamtdosis von 0,7 mSv bzw. 0,3 mSv (Höchstwerte 3,8 mSv bzw. 1,8 mSv). Für Tritium hingegen beträgt die Berufslebensdosis im Mittel 0,1 mSv und im Maximum 1 mSv. Das BfS stellt fest, dass alle Werte aufgrund der konservativen Abschätzungen Maximalwerte darstellen.

## 5.8 Zusammenfassung und Bewertung

Auf der Grundlage der Berichte der Betreiber und der unabhängigen Messstellen, der von verschiedenen Institutionen vorgenommenen Ausbreitungsrechnungen und Dosismodellierungen sowie des vom BfS durchgeführten „Gesundheitsmonitoring Asse“ und der darin zitierten Unterlagen kommt die SSK zu folgender Bewertung in Bezug auf die durch die Schachanlage Asse II verursachte zusätzliche potentielle Strahlenexposition der Bevölkerung in der SG Asse:

Die Strahlenschutzüberwachung der Schachanlage Asse II einschließlich der Immissions- und Emissionsüberwachung entsprach dem jeweiligen Stand von Wissenschaft und Technik.

Die Daten der Immissionsüberwachung und die Messungen der Umweltradioaktivität (IMIS) in der Umgebung der Asse zeigen keinen messbaren Eintrag von radioaktiven Stoffen aus der Schachanlage Asse II. Messbare Effekte resultierten lediglich aus dem Reaktorunfall in Tschernobyl. Aus den Immissionsmessungen ergeben sich keine Hinweise für einen Einfluss der Asse auf die Umweltradioaktivität in der Umgebung der Schachanlage und erhöhte Strahlenexpositionen der Bevölkerung in der SG Asse.

Aus den Berichten über Kontaminationsfälle während der Einlagerungsphase ergeben sich keine Hinweise auf erhöhte Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung in der Umgebung der Schachanlage Asse II. Die Kontaminationsereignisse waren sowohl über als auch unter Tage insgesamt zu geringfügig, um Spuren in den Emissions- und Immissionsmessungen zu hinterlassen. Ihr Beitrag zur potentiellen Strahlenexposition der Bevölkerung ist vernachlässigbar.

Die Berichte der Betreiber zur Emissions- und Immissionsüberwachung sind geeignet, die Einhaltung der Grenzwerte nachzuweisen. Sie sind jedoch extrem konservativ, d. h. sie überschätzen die tatsächlichen Expositionen. Sie sind nicht geeignet, die Strahlenexpositionen der Menschen in der Umgebung der Asse realistisch zu beschreiben. Sie erlauben es aber, zumindest eine obere Grenzen der Strahlenexposition anzugeben.

Dabei sind im Laufe der Jahrzehnte große Unterschiede in den Anforderungen an die Berichterstattung zu verzeichnen, die sich auch in den berichteten potentiellen Strahlenexpositionen der allgemeinen Bevölkerung manifestieren.

Die Schachanlage Asse II leitet radioaktive Stoffe über die Grubenwetter ab, Ableitungen mit dem Abwasser liegen nach Feststellung des BfS nicht vor. Kurzlebige Spaltprodukte, insbesondere I-131, sind in der Grubenluft nicht nachweisbar (BfS 2011). Abschätzungen der SSK zur Entstehung von I-131 aus der Spontanspaltung von Aktiniden-Isotopen haben ergeben, dass diese im Hinblick auf potentielle Ableitungen von I-131 aus der Schachanlage Asse II vernachlässigbar ist.

Die SSK hat auf der Grundlage der von der Firma Brenk (2001) durchgeführten Rechnungen nach der AVV zu § 47 StrlSchV die Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Zaun der Anlage in ca. 50 m Abstand vom Diffusor für den gesamten Zeitraum, für den Ableitungsdaten vorliegen, d. h. seit 1978 (letztes Jahr der Einlagerungsphase), einheitlich berechnet. Diese Berechnungen wurden auch für die Zeit vor 1978 durchgeführt. Dabei wurden Ableitungen, die ihren Ursprung in den eingelagerten radioaktiven Stoffen haben, proportional zur bis dahin eingelagerten Aktivität angenommen. Da bei den Ableitungen relevante Radionuklide, H-3, C-14, Ra-226 und Rn-222, sich überwiegend im eingelagerten LAW verteilt auf die Einlagerungskammern befinden, ist diese Annahme konservativ. Die eingelagerten Aktivitäten als Quelle der abgeleiteten Radionuklide sind von 1972 bis 1978 stark angestiegen, und in den ersten Jahren lag ein noch relativ geringes Radioaktivitätsinventar in der Schachanlage Asse II als Quelle für die Ableitungen vor.

Zu allen Zeiten lagen die berechneten Organdosen für das rote Knochenmark der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle unter 110  $\mu\text{Sv}$  im Kalenderjahr, die berechneten Schilddrüsendosen unter 29  $\mu\text{Sv}$  im Kalenderjahr. Die höchsten Organdosen für das rote Knochenmark (110  $\mu\text{Sv}$  für kleiner 1-Jährige) werden für das Jahr 1981 berechnet. Für die Schilddrüsendosen liegt das Maximum (29  $\mu\text{Sv}$  für 1- bis 2-Jährige) im Jahr 1982. In den übrigen Jahren lagen die berechneten Dosen deutlich niedriger. Auch ist eine starke Altersabhängigkeit der berechneten Dosen festzustellen. Die

Dosisangaben für die Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II sind für die Bewohner der SG Asse extrem überschätzend. Dies ist nicht nur in den unrealistischen Eigenschaften und Gewohnheiten der Referenzpersonen begründet, sondern folgt auch aus der geografischen Lage der SG Asse relativ zur ungünstigsten Einwirkungsstelle.

Die SG Asse umfasst sieben Gemeinden (Denkte, Hedeper, Kissenbrück, Remlingen, Roklum, Semmenstedt, Wittmar) im LK Wolfenbüttel. Sie hat eine Fläche von 86,63 km<sup>2</sup> und erstreckt sich von Nordwest nach Südost mit einer Länge von etwa 14 km und einer Breite von etwa 6 km. In der SG Asse ist die dem Ableitungsort nächstliegende Ortschaft Remlingen. Die der Asse nächstliegende Wohnbebauung ist ca. 1,3 km vom Ableitungsort entfernt. Die langjährige Wetterstatistik weist für Remlingen nur selten aus der Richtung der Schachanlage Asse II wehenden Wind aus. Zum Ort Wittmar, der mit der nächsten Wohnbebauung in ca. 1,6 km Entfernung vom Ableitungsort liegt, werden Ableitungen der Schachanlage Asse II bei Wetterlagen mit Wind aus Ost bis Südost verfrachtet. Die größten Entfernungen zwischen nächstliegenden Wohnbebauungen von Ortschaften der SG Asse und dem Ableitungsort betragen ca. 6,4 km (Kissenbrück) und ca. 8,5 km (Roklum). Die in Hauptwindrichtung zur Schachanlage Asse II liegenden Orte Groß-Vahlberg und Klein-Vahlberg, deren nächste Wohnbebauungen in etwa 1,6 km Abstand vom Ableitungsort der Schachanlage Asse II liegen, gehören nicht zur SG Asse, sondern zur SG Schöppenstedt.

Nach der Modellierung der Verdünnung der Aktivitätskonzentrationen der aus der Schachanlage Asse II abgeleiteten Grubenluft in der Umgebung mittels Lagrange-Ausbreitungsrechnungen kann gefolgert werden, dass die nach der AVV zu § 47 StrlSchV berechneten potentiellen Strahlenexpositionen von in größter Nähe zur Schachanlage lebenden Referenzpersonen (SG Asse: Remlingen und Wittmar; sonstige Gemeinden: Groß- und Klein-Vahlberg) mindestens einen Faktor 10 unter denen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Zaun der Schachanlage liegen. In den nächstgelegenen Ortschaften ist mit Langzeitausbreitungsfaktoren zu rechnen, die um einen Faktor 10 bis 100 geringer sind als an der ungünstigsten Einwirkungsstelle.

Während sich die nach der AVV zu § 47 StrlSchV berechneten Strahlendosen für eine im Jahr 1978 geborene Referenzperson bis zum Jahr 2009 an der ungünstigsten Einwirkungsstelle am Zaun der Schachanlage Asse II für das rote Knochenmark zu 700 µSv und für die Schilddrüse zu 200 µSv akkumulierten, liegen in den nächstgelegenen Orten Remlingen und Wittmar die berechneten potentiell akkumulierten Strahlenexpositionen bei 70 µSv für das rote Knochenmark und bei 20 µSv für die Schilddrüse. In weiter entfernten Orten der SG Asse liegen die berechneten potentiell akkumulierten Strahlenexpositionen in diesem Zeitraum jeweils unter 10 µSv.

Die SSK weist darauf hin, dass die für Pb-210 berechneten potentiellen Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung der Schachanlage Asse II unrealistisch hoch sind.

Für den Zweck dieser Stellungnahme, d. h. für die Abschätzung der radiologischen Risiken für stochastische Schäden in der Bevölkerung der SG Asse, kann die SSK damit feststellen, dass die zusätzlichen Strahlenexpositionen von Referenzpersonen nach der AVV zu § 47 StrlSchV in den zur Schachanlage Asse II nächstgelegenen Ortschaften sowohl für die effektiven Dosen als auch für die Organdosen des roten Knochenmarks und der Schilddrüse immer unter 10  $\mu$ Sv im Kalenderjahr lagen. Für weiter entfernte Ortschaften der SG Asse lagen diese Expositionen um Zehnerpotenzen niedriger.

Die SSK weist jedoch darauf hin, dass wegen der extremen Annahmen zu den Eigenschaften der Referenzpersonen nach der AVV zu § 47 StrlSchV die tatsächlichen Strahlenexpositionen für reale Menschen mit normalen Lebens- und Aufenthaltsgewohnheiten in den nächstliegenden Ortschaften um Größenordnungen unter 10  $\mu$ Sv im Kalenderjahr liegen.

Die SSK stellt außerdem fest, dass die in den Parlamentsberichten (BMU 2008 bis 2012) der Bundesregierung für die Schachanlage Asse II – und auch für andere kerntechnische Anlagen – angegebenen Strahlenexpositionen unrealistisch hoch sind und nicht der Realismus-Forderung der EU-Grundnormen entsprechen. Die SSK mahnt eine realistische Berichterstattung für existierende Anlagen an.

## **6 Zur Erklärung der beobachteten Erhöhungen erforderliche Strahlenexpositionen**

6.1 Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Leukämieinzidenzrate bei Männern in der SG Asse zu erklären

### 6.1.1 Veranlassung und Vorgehensweise

Die Auswertung des EKN zur Krebshäufigkeit in der SG Asse ergab gegenüber der Vergleichsregion LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse eine signifikante Erhöhung des SIR für Erkrankungen von Männern an Leukämie (ICD-10 C91-C95). In diesem Kapitel wird diejenige Dosis ionisierender Strahlung abgeschätzt, die mindestens nötig gewesen wäre, um die beobachtete Erhöhung zu bewirken. Dabei wird angenommen, dass alle männlichen Bewohner der SG Asse gleichermaßen exponiert worden sind. Bei einer inhomogenen Exposition müsste die nötige Dosis in der kritischen Gruppe (Gruppe mit der höchsten Exposition) naturgemäß höher sein.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Rechnungen benötigen altersspezifische Daten. Auf Grund der geringen Fallzahlen unterliegen die altersspezifischen Inzidenzdaten für Leukämie im LK Wolfenbüttel großen statistischen Schwankungen. Als Vergleichsregion wird der ehemalige RB Braunschweig ohne die SG Asse betrachtet. Diese Region enthält den LK Wolfenbüttel. Die im Vergleich zum LK Wolfenbüttel größere Fallzahl verringert die statistische Unsicherheit der altersspezifischen Rechnungen. Dies ist auch dadurch gerechtfertigt, dass sich für beide Vergleichsregionen ähnliche Werte des SIR für die SG Asse ergeben (siehe Kapitel 2).

Die vorliegenden Abschätzungen der Dosis-Wirkungsbeziehung basieren auf dem von Walsh und Kaiser (2011) entwickelten Verfahren zur Berechnung der Leukämiemortalität unter den Überlebenden der Atombombenexplosionen in Hiroshima und Nagasaki. Die verwendeten Daten wurden im Rahmen der Lebenszeitstudie (Life Span Study, LSS) der Atombombenüberlebenden erhoben. Zur Ableitung von Risikofaktoren ist die Anwendung von Modellen notwendig. Einzelne bislang in der Literatur verwendete Modelle ergeben teilweise stark unterschiedliche Schätzungen des Strahlenrisikos für die Mortalität durch Leukämie-Erkrankungen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Annahmen, die bei der Anwendung eines Modells auf die Daten gemacht werden, die Ergebnisse erheblich beeinflussen können. Eine Analyse, die mehrere Risikomodelle einbezieht (englisch multi-model inference, MMI), macht die Ergebnisse unabhängiger von den Annahmen, auf denen die einzelnen Modelle beruhen. Es wird im Folgenden für die Ergebnisse der LSS angenommen, dass die ERR-Schätzwerte für die Leukämie-Mortalitätsrate eine gute Näherung für die ERR-Schätzwerte für die Leukämie-Inzidenzrate sind.

Der Beitrag spontaner Leukämie-Erkrankungen zu den in der LSS registrierten Mortalitätsfällen unterscheidet sich von der Leukämie-Inzidenz im RB Braunschweig. Deshalb ist das Risikomodell von der Leukämiemortalität in der LSS in einer geeigneten Weise auf die Leukämieinzidenzrate im ehemaligen RB Braunschweig und in der SG Asse zu übertragen. Für den Transfer der Risikofunktion werden vom National Research Council der USA (BEIR VII 2006) verwendete Annahmen angewandt.

#### 6.1.2 Szenario für Exposition und Risikoberechnungen

Mögliche Strahlenexpositionen der Bevölkerung der SG Asse durch die Schachanlage Asse II können im gesamten Zeitraum ab 1967 aufgetreten sein (siehe Abbildung 5.1). Zur Abschätzung der hypothetisch notwendigen Strahlendosis wird hier der Einfachheit halber angenommen, dass im Jahre 1978 eine akute Exposition der in der SG Asse gemeldeten männlichen Bevölkerung erfolgte. In diesem Jahr wurde die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in die Schachanlage Asse II beendet. Dieses Szenario führt unter den folgenden zwei Annahmen nicht zu einer Unterschätzung des Leukämierisikos bei einer hypothetischen Dosis  $D_{hyp}$  (und damit nicht zu einer Überschätzung der hypothetisch notwendigen Dosis bei einer gegebenen Anzahl von Erkrankungsfällen):

- Bei gegebener Gesamtdosis  $D_{hyp}$  ist die Dosisrate einer Exposition in einem Jahr (1978) höher als bei einer Exposition, die sich über mehrere Jahre erstreckt. Im Vergleich zu akuten Expositionen führen längerfristige Expositionen bei gleicher Gesamtdosis zu gleichen oder niedrigeren Leukämierisiken. Diese Annahme ist sinnvoll, da es keine Hinweise darauf gibt, dass das Leukämierisiko bei gleicher Gesamtdosis für höhere Dosisraten niedriger ist als für niedrige Dosisraten.
- Das Leukämierisiko nach Strahlenexposition hängt nicht vom Alter bei Exposition ab (siehe Kapitel 6.1.6.1). Unter dieser Annahme ist es für die vorliegende Fragestellung (gegebenes Alter

bei Diagnose) unwesentlich, in welchem Jahr die Exposition aufgetreten ist.

Der Mittelpunkt des Zeitraums 2002 bis 2009, für den das erhöhte SIR in der SG Asse beobachtet wurde, ist das Jahr 2005. Dementsprechend wird die Risikofunktion für eine Zeit von 27 Jahren nach Exposition berechnet. Eine Änderung der Bevölkerungszahl durch Zu- und Abwanderung wird in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

### 6.1.3 Betrachteter Datensatz und resultierendes SIR

Es werden die beobachteten Leukämie-Neuerkrankungen in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse und in den Altersklassen 30 bis 34, 35 bis 39, ..., ab 80 betrachtet. Praktisch alle Männer, die im Zeitraum 2002 bis 2009 zu diesen Altersklassen gehörten, waren zum hypothetischen Expositionszeitpunkt im Jahre 1978 schon am Leben<sup>3</sup>. Die Berücksichtigung der beiden jüngeren Altersklassen (20 bis 24, 25 bis 29) würde willkürliche Annahmen über die Bevölkerungsstatistik erfordern, um abzuleiten wie viele Männer jeweils exponiert wurden. Es ist nicht davon auszugehen, dass eine solche Berücksichtigung die Ergebnisse der Betrachtungen in diesem Kapitel wesentlich verändern würde.

Als Vergleichsregion wird der RB Braunschweig betrachtet. Diese Region enthält den LK Wolfenbüttel. Die im Vergleich zum LK Wolfenbüttel größere Fallzahl verringert die statistische Unsicherheit der altersabhängigen Rechnungen.

In der SG Asse wurden 10 Leukämiefälle unter Männern mit einem Alter von mindestens 30 Jahren beobachtet (Tabelle 6.1). Dem stehen 4,24 zu erwartende Fälle auf Basis der Vergleichsregion gegenüber. Nach dem Berechnungsverfahren für kleine Fallzahlen (Kahn und Sempos 1989) ergibt sich ein SIR von 2,36 (95 %-KI: 1,13 – 4,34). Dies ist praktisch der gleiche Wert wie das vom EKN angegebene SIR von 2,33 (95 %-KI: 1,20 – 4,06) bei Berücksichtigung aller Altersgruppen und mit dem LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse als Referenzgebiet (EKN 2010a), oder wie das vom EKN angegebene SIR von 2,49 (95 %-KI: 1,29 – 4,35) bei Berücksichtigung aller Altersgruppen und mit dem ehemaligen RB Braunschweig als Referenzgebiet (siehe Tabelle 2.3).

Tab. 6.1: Altersverteilung der Leukämie-Neuerkrankungen und mittlere Bevölkerungszahl von Männern in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse (laut Tabelle 6c in EKN 2010a) und im ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2011).

Altersklasse	SG Asse		ehemaliger RB Braunschweig	
	Fälle	Männer	Fälle	Männer
30 bis 34	0	281	11	51 064

<sup>3</sup> Mit Ausnahme derjenigen, die im Jahre 2009 dreißig Jahre alt wurden.

35 bis 39	1	430	16	64 856
40 bis 44	0	490	19	70 422
45 bis 49	0	450	31	64 038
50 bis 54	0	376	29	56 189
55 bis 59	1	313	73	48 717
60 bis 64	0	292	97	48 842
65 bis 69	4	275	136	50 852
70 bis 74	1	178	134	37 367
75 bis 79	1	135	109	26 111
ab 80	2	107	132	24 688
Gesamt	10	3 326	787	543 147

#### 6.1.4 Einbeziehung mehrerer Modelle in die Risikoberechnungen (multi-model inference)

Oftmals ergibt die Analyse von radioepidemiologischen Daten, dass mehrere Risikomodelle die Daten ungefähr gleich gut beschreiben. Zur Abschätzung von Strahlenrisiken war es bisher üblich, ein Modell der Wahl zu nutzen. Für die Analyse der Mortalitätsdaten für Leukämie in der japanischen LSS-Kohorte haben Walsh und Kaiser (2011) ein Verfahren benutzt, mit dem nun mehrere geeignete Modelle zur Risikoschätzung herangezogen werden können (multi-model inference, MMI). Die MMI-Methode wurde erfolgreich in anderen Forschungsgebieten (z.B. Physik, Biologie, Umweltwissenschaften) verwendet. In dem Buch von Burnham und Anderson (2002) findet man eine gute Einführung. Im Folgenden wird die MMI-Methode kurz skizziert.

Die MMI-Analyse wird in zwei Schritten durchgeführt. Zunächst wird eine Gruppe von Risikomodellen ausgewählt, mit denen eine gemeinsame Risikoanalyse durchgeführt werden soll. Walsh und Kaiser (2011) haben aus der Fachliteratur bekannte Modelle ausgewählt (siehe Tabelle 1 in Walsh und Kaiser 2011). Zur Auswahl genügte allein die Tatsache, dass die Modelle nach einem peer-review-Verfahren in einer Fachzeitschrift veröffentlicht wurden. Dies waren fast ausschließlich Modelle, in denen die Strahlenwirkung durch einen multiplikativen Faktor auf das Spontanrisiko beschrieben wird.

In einem zweiten Schritt wird festgelegt, mit welchem Gewicht die Modelle in die Berechnung eingehen. Hierfür wählten Walsh und Kaiser (2011) das Informationskriterium von Akaike (1973)

$$AIC = Dev + 2 N_{par}$$

Dies ist dann möglich und sinnvoll, wenn alle gewählten Modelle auf den gleichen Datensatz (hier: LSS-Kohorte) angewendet wurden. Zur Berechnung des AIC wird die Poisson-Devianz Dev mit der doppelten Anzahl von Modellparametern beaufschlagt. Das Modell mit dem kleinsten Wert für das AIC erhält das höchste Gewicht. Die Beaufschlagung erzwingt daher, dass Modellparameter sparsam verwendet

werden, weil sonst das AIC so groß werden kann, dass ein Modell nur noch ein verschwindend geringes Gewicht in der MMI-Analyse hat. Die Modellgewichte  $p_k$  werden für  $M$  Modelle mit der Formel

$$p_k = \frac{\exp(-\Delta AIC_k/2)}{\sum_{j=0}^{M-1} \exp(-\Delta AIC_j/2)}$$

berechnet. Der beste Schätzwert für das zusätzliche relative Risiko  $ERR(a, e, D)$  aus der MMI-Methode ergibt sich nun als der gewichtete Mittelwert

$$ERR(a, e, D) = \sum_{j=0}^{M-1} p_j ERR_j(a, e, D)$$

wobei  $ERR_j(a, e, D)$  den modellspezifischen Schätzwerte,  $a$  das erreichte Alter,  $e$  das Alter bei Exposition und  $D$  die Strahlendosis im Knochenmark bezeichnet. Die Konfidenzintervalle können mit Monte-Carlo-Simulationen unter Berücksichtigung der Korrelationen zwischen den Parametern bestimmt werden. Hierzu wurde das Softwarepaket ME-CAN (Kaiser 2010) verwendet, mit dem die Berechnungsschritte nach der MMI-Methode in einem Arbeitsgang durchgeführt werden können. Eine detaillierte Darstellung der Berechnung von Mittelwerten und Perzentilen der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung des zusätzlichen Risikos (ERR) ist in Walsh und Kaiser (2011) angegeben.

Ein wichtiger Nutzen der MMI-Methode ergibt sich aus der realistischeren Quantifizierung von Modellunsicherheiten in Fällen, wo epidemiologische Datensätze möglicherweise eine geringe statistische Power aufweisen. Das ist für die LSS-Kohorte bei Dosen unterhalb 0,2 Sv und bei jungem Alter der Fall. In aller Regel sind die Unsicherheitsintervalle in der MMI-Methode breiter als die Unsicherheitsintervalle bei der Verwendung einzelner Modelle. Die MMI-Methode berücksichtigt damit den Aspekt der Unsicherheiten, die sich durch die mit der Anwendung von einzelnen Modellen gemachten Annahmen verbinden. Im Gebiet der Strahlenrisikoanalyse sind erst einzelne Arbeiten zur Anwendung der MMI-Methode veröffentlicht worden. Die Diskussion der Methode ist noch nicht abgeschlossen. Es ist aber davon auszugehen, dass die gegenwärtig verwendeten Verfahren eine Verbesserung der Abschätzung von Unsicherheitsintervallen im Vergleich zur Anwendung einzelner Modelle darstellen.

### 6.1.5 Ausgewählte Risikomodelle

Zur Risikoanalyse mit der MMI-Methode wurden vier Modelle ausgewählt, die in der unten stehenden Tabelle 6.2 aufgeführt sind. Aus Walsh und Kaiser (2011) sind die genaue Form des ERR (dort Tabelle

1) und des spontanen Risikos (dort Tabelle 8) zu entnehmen. Modelle mit einem Gewicht von 0,001 und kleiner wurden in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt.

Tab. 6.2: Modellreferenzen, Anzahl der Parameter, Poisson Devianz, AIC und Gewicht  $P_k$  für die Risikomodelle, die für das MMI verwendet wurden.

Referenz des Modells	Anzahl der Parameter	Devianz	AIC	Gewicht
Schneider und Walsh (2009) LQ	13	2 258,0	2 284,0	0,069
Schneider und Walsh (2009) LQ-exp	14	2 253,9	2 281,9	0,198
Little et al. (2008)	11	2 258,7	2 281,7	0,219
UNSCEAR (2006)	10	2 260,0	2 280,0	0,514

## 6.1.6 Risikoanalyse

### 6.1.6.1 Dosis-Wirkungsbeziehung nach der MMI-Methode

Die Abbildung 6.1 zeigt das ERR für Männer der LSS-Kohorte im erreichten Alter 60, die im Alter 33 exponiert wurden. Die Dosis-Wirkungsbeziehung aus der MMI-Methode folgt im Wesentlichen der Beziehung des Modells aus UNSCEAR (2006), das mit 51 % in die Wichtung eingeht. Die 90 %-Konfidenzintervalle sind nach der MMI-Methode im Dosisbereich von 0,5 Sv bis 2 Sv ungefähr gleich groß. Für kleine Dosen ist das Verhältnis der oberen und der unteren Grenze der Konfidenzintervalle deutlich größer, da die einzelnen Modelle auf Grund der geringeren statistischen Aussagekraft der Daten hier sehr unterschiedliche Ergebnisse ergeben (Walsh und Kaiser 2011, Tabelle 4).

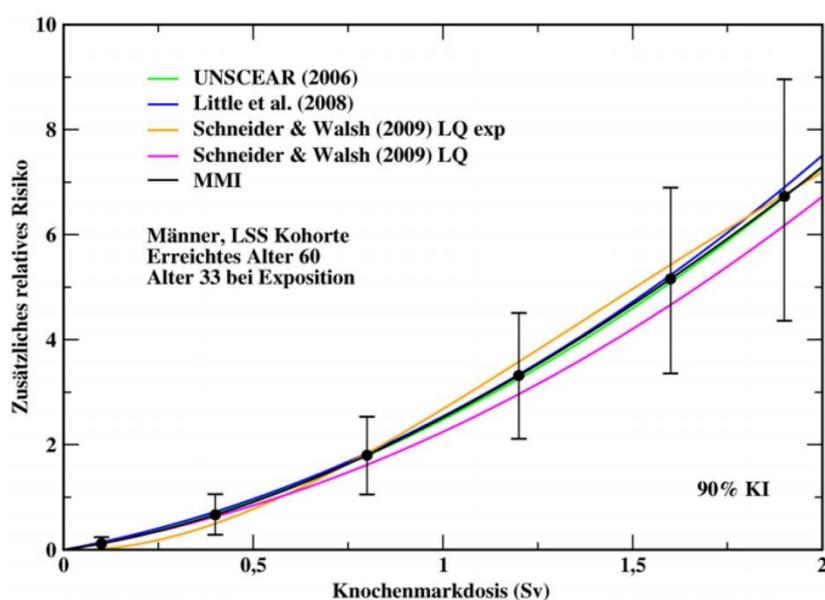


Abb. 6.1: Zusätzliches relatives Erkrankungsrisiko für Männer der LSS-Kohorte als Funktion der

Knochenmarkdosis im erreichten Alter 60 für eine Exposition im Alter 33. Für ausgewählte Dosiswerte wurden mit der Monte-Carlo-Methode beste Schätzwerte des ERR und dazugehörige 90 %-Konfidenzintervalle berechnet. In den Modellen von Schneider und Walsh (2009) stehen „LQ“ für eine linear-quadratische und „LQ exp“ für eine linear-quadratisch-exponentielle Dosis-Wirkungsbeziehung.

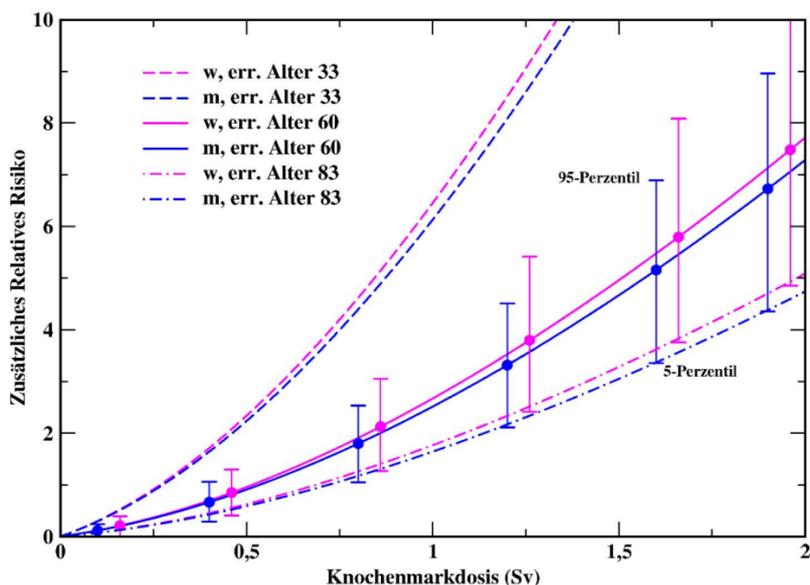


Abb. 6.2: Zusätzliches relatives Risiko für Frauen und Männer der LSS-Kohorte als Funktion der Knochenmarkdosis für erreichte Alter von 33, 60 und 83. Die Exposition erfolgte jeweils 27 Jahre vor dem erreichten Alter.

Das ERR im UNSCEAR-Modell

$$ERR(a, D) = (\alpha D + \beta D^2) \exp(\gamma \ln(a/70))$$

hängt nicht vom Alter bei Exposition ab. Im Gegensatz dazu hat das ERR im Modell von Little et al. (2008) noch einen zusätzlichen Faktor  $\exp(\delta \ln(e/30))$ . Das ERR aus der MMI-Methode ist deshalb schwach vom Alter bei Exposition abhängig (siehe Abbildung 6.3). Da der Modellparameter positiv ist, ergibt sich ein fallender Trend bei sinkendem Alter bei Exposition.

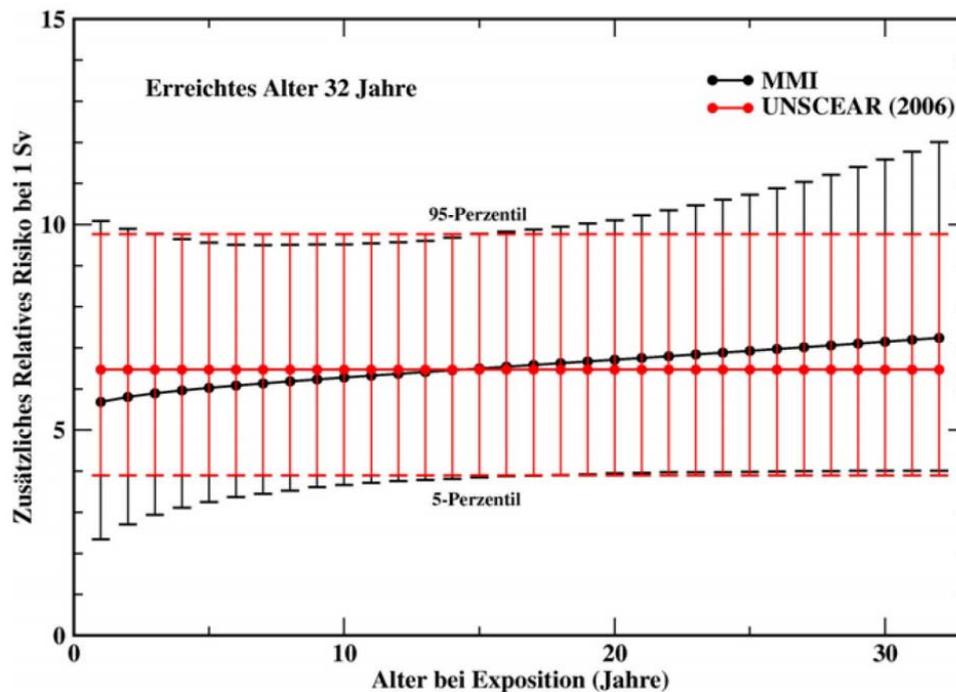


Abb. 6.3: Zusätzliches relatives Risiko bei einer Knochenmarksdosis von 1 Sv für das Modell von UNSCEAR (2006) und aus der MMI-Methode (Walsh und Kaiser 2011) in einer exemplarischen Rechnung für eine hypothetische Gruppe von Männern der LSS-Kohorte im erreichten Alter 32 als Funktion des Alters bei Exposition.

#### 6.1.6.2 Übertragung des Strahlenrisikos in den ehemaligen RB Braunschweig nach BEIR VII

Die in der LSS-Kohorte ermittelten Strahlenrisiken müssen nun auf die Bevölkerung der Vergleichsregion des RB Braunschweig übertragen werden. Hier werden dazu die folgenden Annahmen von BEIR VII (2006) übernommen:

- Das ERR für Mortalitätsrate und Inzidenzrate der Leukämie in der LSS ( $ERR_{LSS}$ ) ist gleich.
- (Totale) Mortalitäts- und Inzidenzraten waren in den ersten Jahrzehnten der LSS praktisch gleich, weil es damals praktisch keine erfolgreichen Behandlungsmöglichkeiten gab.
- Die Risikofunktion für die LSS wird auf eine andere Bevölkerung zu 70 % durch einen Transfer des relativen Risikos und zu 30 % durch einen Transfer des absoluten Risikos übertragen.

Damit ergibt sich für das ERR für die Leukämieinzidenzrate im ehemaligen RB Braunschweig,  $ERR_{BS}(a, D)$

$$ERR_{BS}(a, D) = 0.7ERR_{LSS}(a, D) + 0.3ERR_{LSS}(a, D) \cdot \frac{h_{LSS}(a)}{h_{BS}(a)}$$

Hierbei ist  $h_{LSS}$  die spontane Leukämie mortalitätsrate in der LSS und  $h_{BS}$  die spontane Leukämieinzidenzrate im ehemaligen RB Braunschweig. Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis für das altersspezifische ERR. Die Schwankungen des ERR bei jungem Alter ergeben sich durch die kleinen Fallzahlen im ehemaligen RB Braunschweig (siehe Tabelle 6.1).

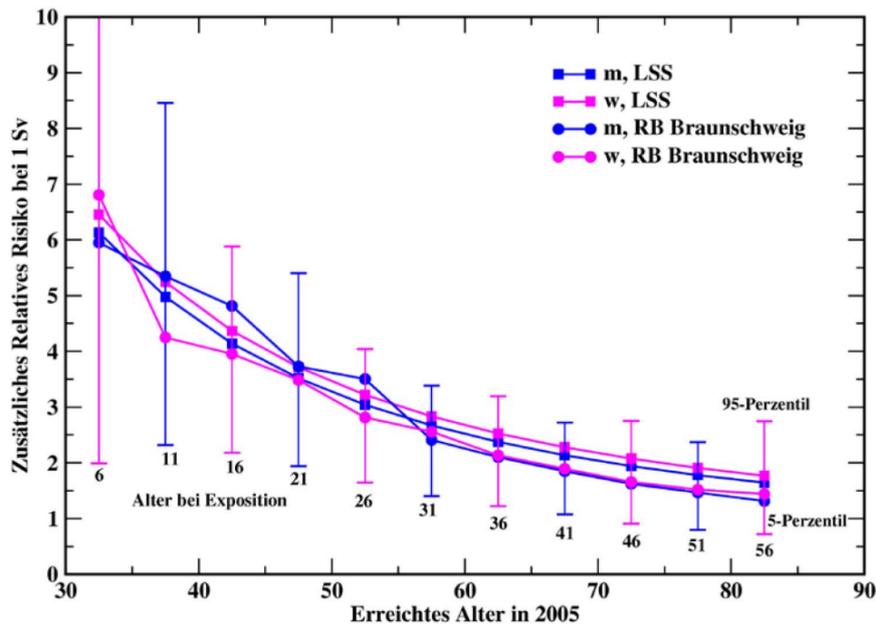


Abb. 6.4: ERR bei 1 Sv für Frauen und Männer der Vergleichsregion ehem. RB Braunschweig in den Altersgruppen 30 – 34, 35 – 39, ..., > 80, berechnet durch Übertragung des Risikos der LSS-Kohorte nach BEIR VII (2006).

### 6.1.6.3 Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Leukämieinzidenzrate bei Männern in der SG Asse zu erklären

Für eine Altersgruppe mit mittlerem erreichtem Alter  $a$  sind in der SG Asse

$$N(a, D) = 8 \text{ Jahre} \times n_{Asse}(a) \times h_{BS}(a) \times (1 + ERR_{BS}(a, D))$$

Fälle im Zeitraum 2002 bis 2009 zu erwarten. Dabei bezeichnet  $n_{Asse}(a)$  die mittlere männliche Bevölkerung der SG Asse im Stichjahr 2005 (siehe Tabelle 6.1). Ein bester Schätzwert der  $D_{hyp}$ , die nötig wäre, um die erhöhte Leukämieinzidenzrate in der SG Asse zu erklären, ergibt sich nun aus der Beziehung

$$10 \text{ Leukämie-Neuerkrankungen bei Männern in der SG Asse in } 2002 - 2009 = \sum_a N(a, D_{hyp}).$$

Die Anwendung der MMI-Methode bedeutet, dass keine einfachen geschlossenen Ausdrücke für das ERR zur Verfügung stehen, sondern nur simulierte Verteilungsfunktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte.

Deshalb ist die Berechnung der Strahlendosis nur iterativ möglich im Intervallschachtelungsverfahren, wobei in kleinen Dosisintervallen von unter 0,1 Sv die Dosis-Wirkungsbeziehung linearisiert werden kann. Abbildung 6.5 zeigt, dass unter den gemachten Annahmen eine Strahlenexposition aller Männer der SG Asse im Jahre 1978 mit einer Dosis  $D_{hyp}$  von 0,73 Sv notwendig ist, um ein Auftreten von insgesamt 10 Leukämiefällen zu erklären.

Das 95 %-Konfidenzniveau des minimalen Wertes der dafür nötigen Dosis liegt unter den gemachten Annahmen bei 0,50 Sv. Die Breite des Konfidenzintervalls setzt sich zusammen aus der Modellunsicherheit und der Unsicherheit, die die erwartete Zahl von beobachteten Fällen beiträgt. Diese wird mit abnehmender Fallzahl immer größer, denn sehr wenige Fälle erlauben nur eine unsichere Aussage. Interpretiert man den unteren Wert als „mindestens erforderliche Strahlendosis für die beobachtete Wirkung“, so muss man sich klar machen, dass diese Abschätzung aus dem genannten Grund in kleineren Gemeinden grundsätzlich kleiner ausfällt als in größeren. In diesem Falle stammt der wesentliche Beitrag zum Unsicherheitsintervall der zu erwartenden Fälle von der Unsicherheit des  $ERR_{LSS}$ . Die Variabilität des spontanen Risikos  $h_{BS}(a)$  im ehemaligen RB Braunschweig spielt nur eine geringe Rolle. Den zehn beobachteten Fällen wurde in den Rechnungen keine Unsicherheit zugeordnet.

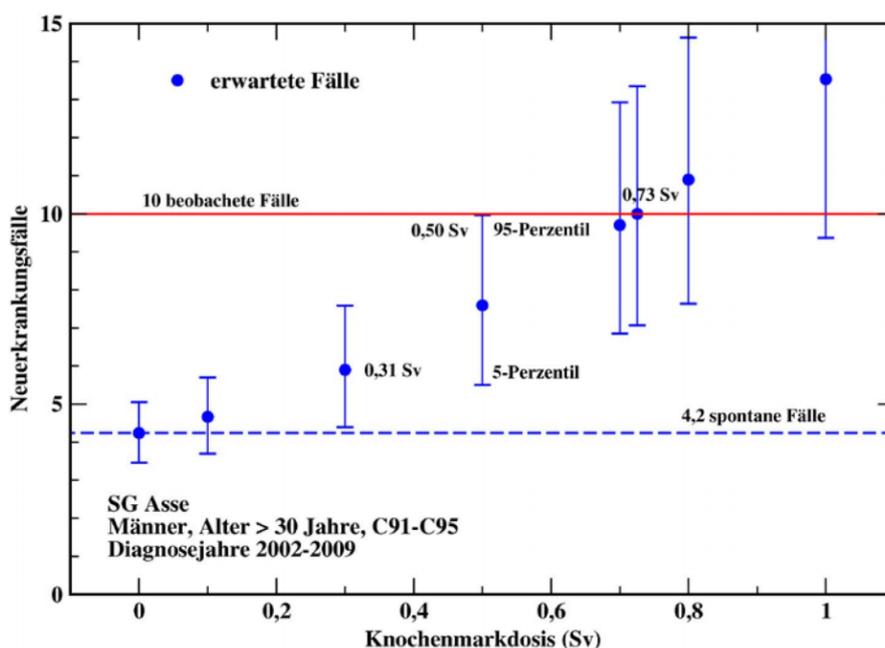


Abb. 6.5: Grafische Ermittlung des besten Schätzwerts der Knochenmarksdosis von 0,73 Sv im Jahre 1978, die nötig wäre, um die in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 beobachteten Leukämie-Neuerkrankungen bei Männern in der SG Asse zu bewirken. Das 95 %-Konfidenzniveau des minimalen Wertes der dafür nötigen Dosis liegt bei 0,50 Sv.

Für das unwahrscheinliche Szenario einer einmaligen Exposition nur wenige Jahre vor der Diagnose der Leukämien wäre die Dosis zur Erklärung der erhöhten Leukämieraten etwas geringer als im

angenommenen Szenario einer einmaligen Exposition im Jahre 1978. Nach Abbildung 6.3 betrüge dieser Unterschied für ein Alter bei Diagnose von 32 Jahren etwa 15 %.

6.2 Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Schilddrüsenkrebsinzidenzrate bei Frauen in der SG Asse zu erklären

### 6.2.1 Veranlassung und Vorgehensweise

Die Auswertung des EKN zur Krebshäufigkeit in der SG Asse ergab gegenüber der Vergleichsregion LK Wolfenbüttel ohne Asse eine signifikante Erhöhung des SIR für Schilddrüsenkrebs (ICD-10 C73) bei Frauen (siehe Kapitel 2). In diesem Kapitel wird diejenige Dosis ionisierender Strahlung abgeschätzt, die nötig gewesen wäre, um die beobachtete Erhöhung zu bewirken. Dabei wird angenommen, dass alle weiblichen Bewohner der SG Asse gleichermaßen exponiert worden sind. Bei einer inhomogenen Exposition müsste die nötige Dosis in der kritischen Gruppe naturgemäß höher sein als die in diesem Abschnitt abgeschätzte Dosis.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Rechnungen benötigen altersspezifische Daten. Auf Grund der geringen Fallzahlen unterliegen die altersspezifischen Inzidenzdaten für Schilddrüsenkrebs im LK Wolfenbüttel großen statistischen Schwankungen. Als Vergleichsregion wird der ehemalige RB Braunschweig betrachtet. Diese Region enthält den LK Wolfenbüttel. Die im Vergleich zum LK Wolfenbüttel größere Fallzahl verringert die statistische Unsicherheit der altersspezifischen Rechnungen. Dies ist auch dadurch gerechtfertigt, dass sich für beide Vergleichsregionen ähnliche Werte des SIR für die SG Asse ergeben (siehe Kapitel 2).

Die vorliegenden Abschätzungen der Dosis-Wirkungsbeziehung basieren auf einer Modellierung von Preston et al. (2007) der Schilddrüsenkrebsinzidenzrate unter den weiblichen Überlebenden der Atombombenexplosionen von Hiroshima und Nagasaki (Life Span Study, LSS). Es liegen noch keine Analysen dieser Daten mit der MMI-Methode vor.

Die Übertragung der Risikofunktion von der LSS auf den ehemaligen RB Braunschweig wird analog zu der in BEIR VII (2006) verwendeten Methode vorgenommen.

### 6.2.2 Expositionsszenario

Mögliche Strahlenexpositionen der Bevölkerung der SG Asse durch die Schachtanlage Asse II können im gesamten Zeitraum ab 1974 aufgetreten sein. Zur Abschätzung der hypothetisch notwendigen Strahlendosis wird hier der Einfachheit halber angenommen, dass im Jahre 1978 eine akute Exposition der in der SG Asse gemeldeten weiblichen Bevölkerung erfolgte. In diesem Jahr wurde die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in die Schachtanlage Asse II beendet. Kapitel 6.2.8 gibt Argumente dafür, dass dieses Szenario nicht zu einer wesentlichen Unterschätzung des Schilddrüsenkrebsrisikos bei einer

hypothetischen Dosis  $D_{hyp}$  und damit nicht zu einer Überschätzung der hypothetisch notwendigen Dosis bei einer gegebenen Anzahl von Erkrankungsfällen führt.

Der Mittelpunkt des Zeitraums 2002 bis 2009, für den das erhöhte SIR in der SG Asse beobachtet wurde, ist das Jahr 2005. Dementsprechend wird die Risikofunktion für eine Zeit von 27 Jahren nach Exposition berechnet. Eine Änderung der Bevölkerungszahl durch Zu- und Abwanderung wird in diesem Szenario nicht berücksichtigt.

### 6.2.3 Betrachteter Datensatz und resultierendes SIR

Es werden die Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse und in den Altersklassen 30 bis 34, 35 bis 39, ..., ab 80 betrachtet. Praktisch alle Frauen, die im Zeitraum 2002 bis 2009 zu diesen Altersklassen gehörten, waren zum hypothetischen Expositionszeitpunkt im Jahre 1978 schon am Leben<sup>4</sup>. Die Berücksichtigung der beiden jüngeren Altersklassen (20 bis 24, 25 bis 29) würde willkürliche Annahmen über die Bevölkerungsstatistik erfordern, um abzuleiten, wie viele Frauen jeweils exponiert wurden. Es ist nicht davon auszugehen, dass eine solche Berücksichtigung die Ergebnisse der Betrachtungen in diesem Kapitel wesentlich verändern würde.

Als Vergleichsregion wird der ehemalige RB Braunschweig betrachtet. Diese Region enthält den LK Wolfenbüttel. Die im Vergleich zum LK Wolfenbüttel größere Fallzahl verringert die statistische Unsicherheit der altersabhängigen Rechnungen.

Tab. 6.3: Altersverteilung der Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen und mittlere Bevölkerungszahl von Frauen über 30 Jahren in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse (laut Tabelle 6b in EKN 2010a) und im ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2011).

Altersklasse	SG Asse		ehemaliger RB Braunschweig	
	Fälle	Frauen	Fälle	Frauen
30 bis 34	1	317	29	49 550
35 bis 39	0	459	58	62 294
40 bis 44	2	506	61	66 935
45 bis 49	3	416	68	61 293
50 bis 54	0	332	61	54 687
55 bis 59	0	268	61	48 366
60 bis 64	1	260	57	49 750
65 bis 69	1	259	53	54 641
70 bis 74	1	213	36	44 762

<sup>4</sup> Mit Ausnahme derjenigen, die im Jahre 2009 dreißig Jahre alt wurden.

75 bis 79	1	190	21	39 095
ab 80	0	234	31	59 329
Gesamt	10	3 453	536	590 699

In der SG Asse wurden 10 Schilddrüsenkrebsfälle unter Frauen mit einem Alter von mindestens 30 Jahren beobachtet (Tabelle 6.3). Dem stehen 3,1 zu erwartende Fälle auf Basis der Vergleichsregion gegenüber. Nach dem Berechnungsverfahren für kleine Fallzahlen (Kahn und Sempos 1989) ergibt sich ein SIR von 3,18 (95 %-KI: 1,53 – 5,85). Dies ist praktisch der gleiche Wert wie das vom EKN angegebene SIR von 3,05 (95 %-KI: 1,43 – 5,51) bei Berücksichtigung aller Altersgruppen und mit dem LK Wolfenbüttel ohne die SG Asse als Referenzgebiet (EKN 2010a), oder wie das vom EKN angegebene SIR von 2,94 (95 %-KI: 1,32 – 4,46) bei Berücksichtigung aller Altersgruppen und mit dem ehemaligen RB Braunschweig als Referenzgebiet (siehe Tabelle 2.3).

#### 6.2.4 Auswahl des Risikomodells für Schilddrüsenkrebs

Als Risikomodell für den Schilddrüsenkrebs wird das von Preston et al. (2007) vorgestellte ERR-Modell für das zusätzliche relative Risiko (ERR) herangezogen, das für die japanischen Atombomben-Überlebenden entwickelt wurde. Das spontane Risiko hängt wesentlich vom Geburtsjahr, dem erreichten Alter und der Herkunft aus der Stadt Hiroshima oder Nagasaki ab. Zusätzlich ergab sich eine Abhängigkeit von der Teilnahme an der sogenannten Adult Health-Study (AHS). Personen der LSS-Kohorte, die an dieser Studie teilnahmen, wurden zur Verbesserung der medizinischen Überwachung in regelmäßigem Abstand untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden Fälle von Schilddrüsenkrebs diagnostiziert, die ohne Untersuchung möglicherweise klinisch nicht auffällig geworden wären. Die Erhöhung der Inzidenzrate des Schilddrüsenkrebses durch intensiviertere medizinische Überwachung wird als Screening-Effekt bezeichnet. Allerdings zeigte das ERR keine Abhängigkeit von der Teilnahme an der AHS.

Das ERR für die Schilddrüsenkrebsinzidenzrate in der LSS wird im Modell von Preston et al. (2007) beschrieben durch  $ERR(s,a,e,D)=\alpha D \exp(\beta \ln(a/70)+\gamma(e-30)/10+\omega(s-1))$ .

Hierbei sind  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\omega$  Fitparameter und  $s = 2$  für Frauen. Das Modell wurde an die aktuellen Schilddrüsenkrebs-Inzidenzraten der LSS angepasst, um die für die weiteren Rechnungen notwendigen Parameterwerte und ihre Standardabweichungen und Korrelationen zu bestimmen. Die Rechnungen wurden mit dem Softwarepaket MECAN (Kaiser 2010) durchgeführt. Tabelle 6.4 fasst die Punktschätzer und die Standardabweichungen zusammen.

Tab. 6.4: Bester Schätzwert und Standardabweichungen der Parameter des ERR-Modells von Preston et al. (2007) für das Schilddrüsenkrebsrisiko.

Kofaktor	Fitparameter	Einheit	Beste Schätzwert	Standardabweichung
Geschlecht s	$\omega$	–	0,29	0,59
Erreichtes Alter a	$\beta$	–	-1,44	0,83
Alter bei Exposition e	$\gamma$	1/Jahr	-0,37	0,26
Schilddrüsens dosis D	$\alpha$	1/Sv	0,49	0,30

### 6.2.5 Dosis-Wirkungsbeziehung

Die Abhängigkeit des Risikos von der Strahlendosis ist linear (Abbildung 6.6). Der beste Schätzwert des ERR für Frauen ist um einen Faktor 1,3 höher als für Männer, der Unterschied ist aber nicht signifikant. Das ERR für Schilddrüsenkrebs nimmt für zunehmende Alter bei Exposition deutlich ab. Das 90 %-Konfidenzintervall schließt in allen berechneten Fällen das Nullrisiko ein. Vermutlich werden die Unsicherheiten durch das Modell von Preston et al. (2007) überschätzt, weil statistisch nicht signifikante Parameter nicht aus dem Modell eliminiert wurden. Andererseits wurde für die Schilddrüsenkrebsdaten bisher noch keine MMI-Analyse durchgeführt, die tendenziell größere Unsicherheiten ergibt, weil unterschiedliche Modelle zu voneinander abweichenden Risikoaussagen kommen können. Die MMI-Analyse berücksichtigt die Unterschiede, die sich aus den Annahmen der einzelnen Modelle ergeben. Insgesamt muss die Beschreibung der Unsicherheiten durch das vorliegende Modell als vorläufig betrachtet werden.

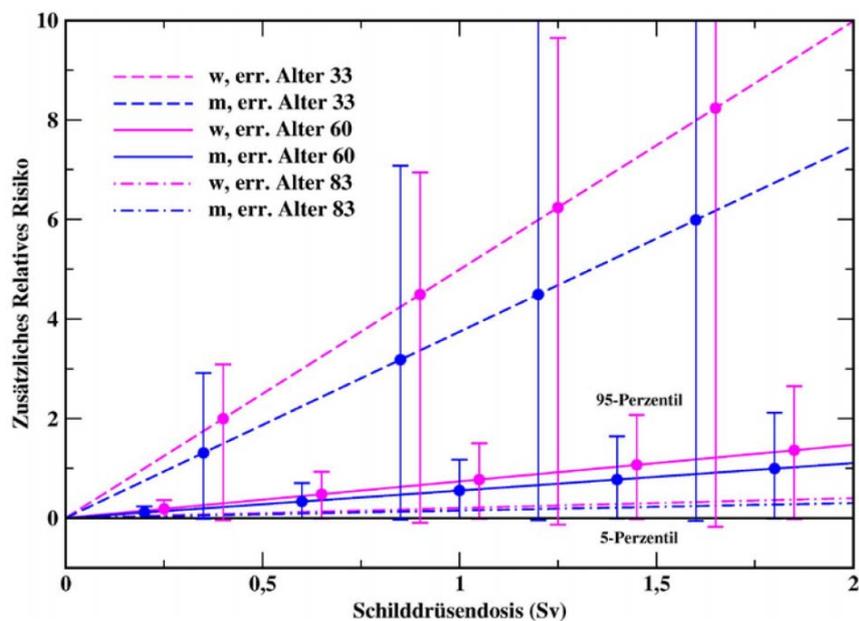


Abb. 6.6: ERR für Schilddrüsenkrebs unter Frauen (w) und Männern (m) in der LSS-Kohorte als Funktion der Schilddrüsensdosis für erreichte Alter von 33, 60 und 83, die Exposition erfolgte jeweils 27 Jahre vor dem erreichten Alter. Für ausgewählte Dosiswerte wurden mit der Monte-Carlo-Methode beste Schätzwerte des ERR und dazugehörige 90 %-Konfidenzintervalle berechnet.

## 6.2.6 Übertragung des Strahlenrisikos in den ehemaligen RB Braunschweig nach BEIR VII

Die in der LSS-Kohorte ermittelten Strahlenrisiken müssen nun auf die Bevölkerung der Vergleichsregion des ehemaligen RB Braunschweig übertragen werden. Hierzu wird wie allgemein üblich (z.B. BEIR VII 2006) angenommen, dass das ERR direkt übertragbar ist. Somit ist  $ERR_{BS}$  gleich dem ERR in der LSS-Kohorte.

## 6.2.7 Strahlendosis, die nötig wäre, um die erhöhte Schilddrüsenkrebsinzidenzrate bei Frauen in der SG Asse zu erklären

Für eine Altersgruppe mit mittlerem erreichtem Alter  $a$  sind in der SG Asse

$$N(a, D) = 8 \text{ Jahre} \times n_{Asse}(a) \times h_{BS}(a) \times (1 + ERR_{BS}(a, D))$$

Fälle im Zeitraum 2002 bis 2009 zu erwarten. Dabei bezeichnen  $n_{Asse}(a)$  die mittlere weibliche Bevölkerung der SG Asse im Stichjahr 2005 (siehe Tabelle 6.3) und  $h_{BS}$  die spontane Schilddrüsenkrebsinzidenzrate unter Frauen im ehemaligen RB Braunschweig. Ein bester Schätzwert der  $D_{hyp}$ , die nötig wäre, um die erhöhte Schilddrüsenkrebs-Inzidenzrate in der SG Asse zu erklären, ergibt sich nun aus der Beziehung

$$10 \text{ Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen bei Frauen in der SG Asse in } 2002 - 2009 = \sum_a N(a, D_{hyp}).$$

Abbildung 6.7 zeigt, dass unter den gemachten Annahmen eine Strahlenexposition aller Frauen in der SG Asse im Jahre 1978 mit einer Dosis  $D_{hyp}$  von 1,3 Sv notwendig wäre, um ein Auftreten von insgesamt 10 Schilddrüsenkrebsfällen zu erklären.

Das 95. Perzentil des ERR bei 0,32 Sv entspricht 10 Schilddrüsenkrebsfällen. Dementsprechend müsste auf dem 90 %-Konfidenzniveau die Dosis unter den gemachten Annahmen mindestens 0,32 Sv sein, um die beobachteten Fälle zu erklären. Die Breite des Konfidenzintervalls setzt sich zusammen aus der Modellunsicherheit und der Unsicherheit, die die erwartete Zahl von beobachteten Fällen beiträgt. Diese wird mit abnehmender Fallzahl immer größer, denn sehr wenige Fälle erlauben nur eine unsichere Aussage. In diesem Falle handelt es sich zusätzlich zu der erheblichen Modellunsicherheit um sehr wenige erwartete Fälle, sodass die Breite der Konfidenzintervalle sehr groß und damit die Abschätzung der Mindestdosis sehr gering ausfällt.

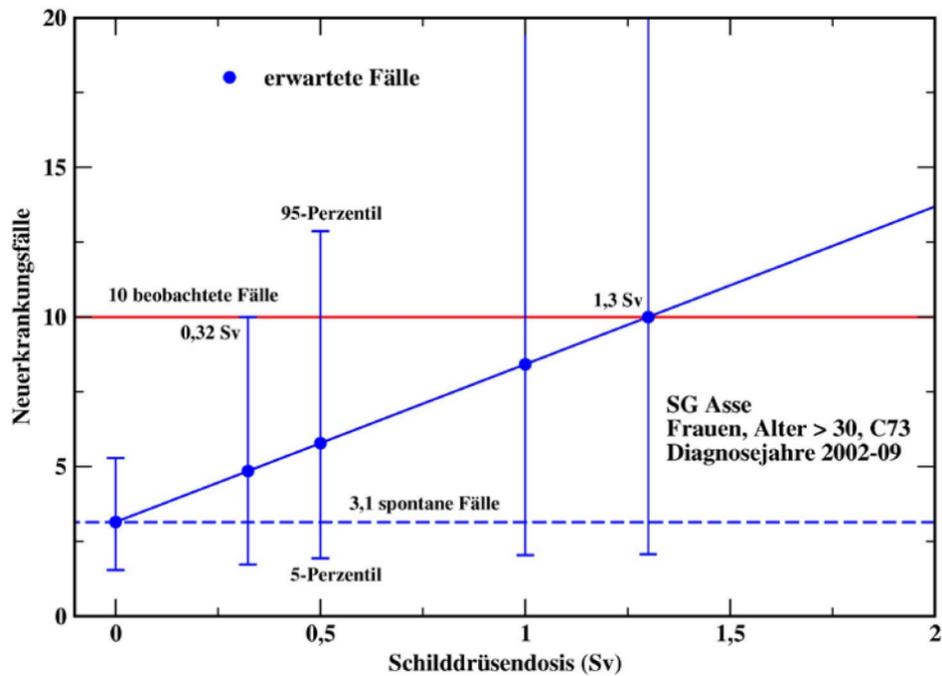


Abb. 6.7: Grafische Ermittlung des besten Schätzwerts der Schilddrüsendosis von 1,3 Sv im Jahre 1978, die nötig wäre, um die in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 beobachteten Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen bei Frauen in der SG Asse zu bewirken. Das 95. Perzentil des ERR bei einer Dosis von 0,32 Sv liegt bei der beobachteten Anzahl von 10 Fällen.

#### 6.2.8 Eignung des gewählten Expositionsszenarios

Es erhebt sich die Frage, ob das Szenario einer akuten Exposition im Jahre 1978 zu einer wesentlichen Unterschätzung des Schilddrüsenkrebsrisikos bei einer hypothetischen Dosis  $D_{hyp}$  und damit zu einer Überschätzung der hypothetisch notwendigen Dosis bei einer gegebenen Anzahl von Erkrankungsfällen führt. Zunächst einmal wird hier davon ausgegangen, dass niedrigere Dosisraten nicht zu einem höheren Krebsrisiko führen. Unter dieser Voraussetzung spielen für das Schilddrüsenkrebsrisiko bei gegebenem Alter bei Diagnose nur die Alter, bei denen Strahlenexpositionen auftraten, eine Rolle.

Abbildung 6.8 zeigt exemplarisch für ein Alter von 32 Jahren bei Diagnose im Jahre 2005, dass in der Modellierung der Daten für die LSS-Kohorte das Schilddrüsenkrebsrisiko mit dem Alter bei Exposition abnimmt. Dementsprechend würden im Vergleich zu einer Exposition im Jahre 1978 frühere Expositionen zu einem höheren Risiko und spätere Expositionen zu einem niedrigeren Risiko führen.

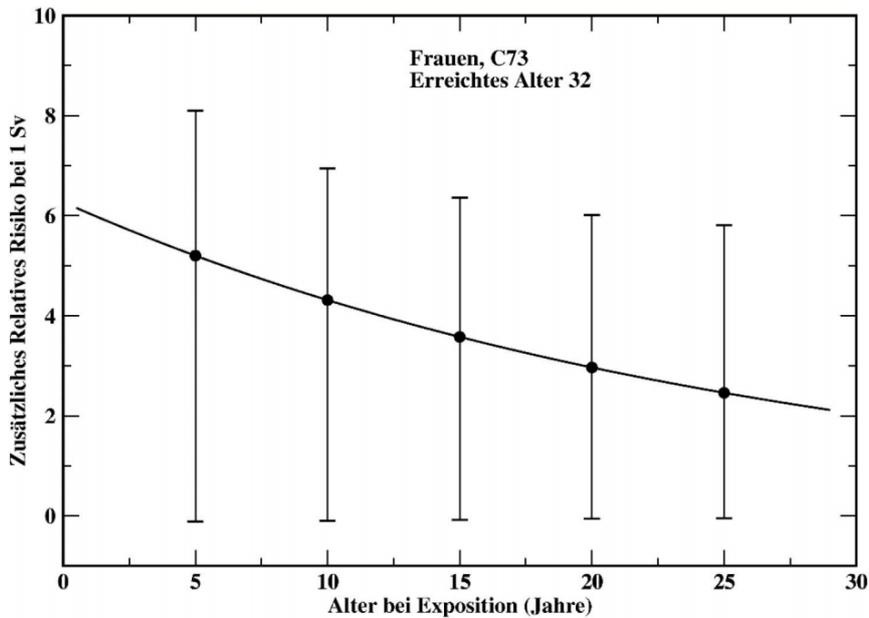


Abb. 6.8: Zusätzliches relatives Risiko für Frauen, Schilddrüsenkrebs im Alter von 32 Jahren nach einer Strahlenexposition mit einer Schilddrüsendosis von 1 Sv zu bekommen.

In Kapitel 5 wurde der zeitliche Verlauf der Schilddrüsendosis in Folge einer hypothetischen Exposition durch Freisetzungen aus der Schachanlage Asse II abgeleitet. In diesem zeitlichen Verlauf führen Expositionen vor 1978 nur zu einem geringen Teil der Gesamtdosis. Für das Beispiel des Geburtsjahrgangs 1972 (Alter 32 in 2005) beträgt dieser Anteil 14 %.

In Abbildung 6.9 wurde dieser Zeitverlauf so skaliert, dass diese hypothetische Exposition die beobachtete Schilddrüsenkrebsinzidenzrate in der SG Asse erklären könnte. Die Gesamtdosis beträgt dann 1,55 Sv. Sie ist um 20 % höher als die im Szenario einer akuten Exposition im Jahre 1978 notwendige Dosis. Eine niedrigere Abschätzung ergibt sich nur, wenn der überwiegende Teil der Dosis vor 1978 aufgetreten ist. Im unwahrscheinlichen Extremfall einer akuten Exposition im Jahre 1974 wäre das Strahlenrisiko um einen Faktor 1,16 höher als bei einer akuten Exposition im Jahre 1978. Um diesen Prozentsatz wäre dann die zur Erklärung der beobachteten Schilddrüsenkrebsfälle unter Frauen notwendige hypothetische Dosis niedriger.

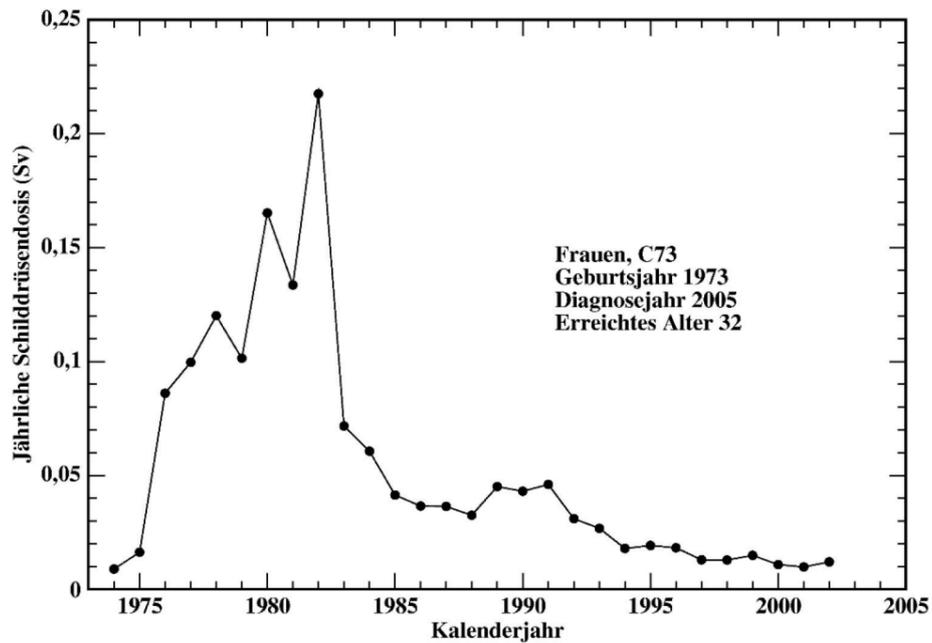


Abb. 6.9: Ein hypothetischer Dosisverlauf, skaliert nach dem relativen Dosisverlauf nach (Abb. 5.4b), der die unter den Frauen der SG Asse beobachtete Schilddrüsenkrebsinzidenz erklären könnte.

Insgesamt ergibt sich, dass das Expositionsszenario einer einmaligen Exposition im Jahre 1978 geeignet ist zur Abschätzung der Dosis, die notwendig wäre, um die Beobachtungen der Krebsinzidenzrate in der SG Asse durch Strahlenexpositionen zu erklären.

### 6.3 Zusammenfassung und Bewertung

Es wurden Rechnungen zu der Frage durchgeführt, welche Dosis einer Strahlenexposition im Jahre 1978 nötig gewesen wäre, um die erhöhte Leukämierate unter Männern in der SG Asse im Zeitintervall 2002 bis 2009 zu erklären. Dazu wurde von dem Strahlenrisiko für Leukämie in der Kohorte der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki ausgegangen. Es wurde angenommen, dass im Vergleich zu akuten Expositionen längerfristige Expositionen bei gleicher Gesamtdosis zu gleichen oder niedrigeren Leukämierisiken führen. Die Risikofunktion wurde entsprechend der von BEIR VII verwendeten Methode auf das Zeitintervall 2002 bis 2009 im ehemaligen RB Braunschweig ohne die SG Asse übertragen. Unter Verwendung der amtlichen Bevölkerungszahlen für die SG Asse wurde diejenige Knochenmarksdosis bestimmt, die unter diesen Annahmen zu der beobachteten Anzahl von 10 Leukämiefällen führen würde. Es ergab sich ein bester Schätzwert von 0,73 Sv. Auf dem 95 %-Konfidenzniveau wäre mindestens eine Knochenmarksdosis von 0,5 Sv nötig. Bei den Rechnungen wurde angenommen, dass alle männlichen Bewohner der SG Asse gleichermaßen exponiert worden sind. Bei einer inhomogenen Exposition müsste die nötige Dosis in der kritischen Gruppe naturgemäß höher sein als die in diesem Kapitel abgeschätzte Dosis. Untersuchungen anderer Expositionsszenarien ergaben hypothetische Mindestwerte der Knochenmarksdosis, die nicht um mehr als 15 % geringer

waren als für die einmalige Exposition im Jahre 1978. Das gewählte Expositionsszenario ist deshalb geeignet für eine Abschätzung der mindestens notwendigen Dosis zur Erklärung der beobachteten Leukämieinzidenz unter Männern in der SG Asse.

Es wurden Rechnungen zu der Frage durchgeführt, welche Dosis einer Strahlenexposition im Jahre 1978 nötig gewesen wäre, um die erhöhte Inzidenzrate von Schilddrüsenkrebs unter Frauen in der SG Asse im Zeitintervall 2002 bis 2009 zu erklären. Dazu wurde von dem Strahlenrisiko für Schilddrüsenkrebs in der Kohorte der Atombombenüberlebenden von Hiroshima und Nagasaki ausgegangen. Die Risikofunktion wurde entsprechend der von BEIR VII verwendeten Methode auf das Zeitintervall 2002 bis 2009 im RB Braunschweig übertragen. Unter Verwendung der Populationsstatistik für die SG Asse wurde diejenige Schilddrüsendosis bestimmt, die unter diesen Annahmen zu der beobachteten Anzahl von 10 Schilddrüsenkrebsfällen führen würde. Es ergab sich ein bester Schätzwert von 1,3 Sv. Auf dem 95 %-Konfidenzniveau wäre mindestens eine Dosis von 0,32 Sv nötig. Bei den Rechnungen wurde angenommen, dass alle weiblichen Bewohner der SG Asse gleichermaßen exponiert worden sind. Bei einer inhomogenen Exposition müsste die nötige Dosis in der kritischen Gruppe naturgemäß höher sein als die in diesem Kapitel abgeschätzte Dosis. Untersuchungen anderer Expositionsszenarien ergaben hypothetische Mindestwerte der Schilddrüsendosis, die nicht um mehr als 20 % geringer waren als für die einmalige Exposition im Jahre 1978. Das gewählte Expositionsszenario ist deshalb geeignet für eine Abschätzung der mindestens notwendigen Dosis zur Erklärung der beobachteten Schilddrüsenkrebsinzidenz unter Frauen in der SG Asse.

Die wahrscheinlichsten Dosis-Werte, mit welchen sich die beobachteten SIR-Werte in der SG Asse erklären ließen, betragen 0,73 Sv für Leukämie-Erkrankungen bei Männern und 1,3 Sv für Schilddrüsenkrebs-Erkrankungen bei Frauen. Die geschätzte Dosis für Leukämie unter Männern ist also geringer als diejenige für Schilddrüsenkrebs unter Frauen. Der beste Schätzwert für das ERR je Dosis ist für die hier interessierenden Altersgruppen für Leukämie unter Männern eher höher als für Schilddrüsenkrebs unter Frauen (z.B. für ein Alter bei Exposition von 15 Jahren und ein Alter bei Diagnose der Erkrankung von 32 Jahren beträgt der beste Schätzwert des ERR je Dosis für Leukämie unter Männern ca.  $6,5 \text{ Sv}^{-1}$  (Abbildung 6.3) und für Schilddrüsenkrebs unter Frauen ca.  $3,5 \text{ Sv}^{-1}$  (Abbildung 6.8)).

Die abgeschätzte minimale Dosis, die die Leukämie-Erhöpfung erklären könnte, ist jedoch mit 0,5 Sv höher als der entsprechende Mindestwert für die Schilddrüsenkrebs-Erhöpfung (0,32 Sv). Dies liegt an der deutlich größeren Unsicherheit des geschätzten Risikomodells für Schilddrüsenkrebs.

Die hier abgeleiteten Werte der zur Erklärung der beobachteten Krebsinzidenzen mindestens notwendigen Knochenmarksdosis von Männern von 0,5 Sv und mindestens notwendigen Schilddrüsendosis von Frauen von 0,32 Sv liegen um drei Größenordnungen über den in Kapitel 5 abgeschätzten maximal möglichen Dosiswerten durch Ableitungen aus der Schachanlage Asse II.

Demnach kann nach dem heutigen Kenntnisstand die beobachtete hohe Krebsinzidenzrate in der SG Asse nicht durch ionisierende Strahlung von Ableitungen aus der Schachtanlage Asse II erklärt werden.

## 7 Literatur

- Akaike 1973 Akaike H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Petrov N., Caski F. (eds). Proceedings of the second international symposium on information theory. Akademiai Kiado Budapest, Hungary, 267 – 281, 1973
- Anderson et al. 2009 Anderson LA, Pfeiffer RM, Landgren O, Gadalla S, Berndt SI, Engels EA. Risks of myeloid malignancies in patients with autoimmune conditions. Br J Cancer 100(5):822-8, 2009
- Asse-GmbH 2009 Asse-GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse II. Jahresbericht 2008
- Asse-GmbH 2010 Asse-GmbH: Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse II. Jahresbericht 2009
- Baan et al. 2009 Baan R, Grosse Y, Straif K, Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, Guha N, Freeman C, Galichet L, Cogliano V. A review of human carcinogens – Part F: Chemical agents and related occupations. Lancet Oncol 10(12): 1143 – 1144, 2009
- Bassil et al. 2007 Bassil KL, Vakil C, Sanborn M, Cole DC, Kaur JS, Kerr KJ. Cancer health effects of pesticides: systematic review. Can Fam Physician 53(10): 1704 – 1711, 2007
- BEIR VII 2006 Committee to Assess Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, Board on Radiation Effects, Research Division on Earth and Life Studies, National Research Council of the National Academies. Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation. BEIR VII – Phase 2. United States National Academy of Sciences. National Academy Press, Washington, 2006
- BfS 2001 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Novellierung der AVV zu § 47 StrlSchV, Entwurf des BfS, Stand 10.01.2001
- BfS 2010 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). ASSEKAT, Radionuklid-Inventar, Schachtanlage Asse II, Datenbank 9.2, Stand 2010

- BfS 2011 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Die Strahlenexposition der Beschäftigten der Schachanlage Asse II von 1967 bis 2008 – Gesundheitsmonitoring Asse, Februar 2011
- BG 1318 2010 Ärztlicher Sachverständigenbeirat „Berufskrankheiten“ beim Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS): Merkblatt zur Berufskrankheit Nummer 1318 „Erkrankungen des Blutes, des blutbildenden und des lymphatischen Systems durch Benzol“ Bek. des BMAS vom 30. Dezember 2009 – IVa4-45222-1318 – GMBI 5/6/2010, S. 94 ff
- BMI 1976 Bundesminister des Innern (BMI). Bericht der Bundesregierung an den Deutschen Bundestag über „Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 1974“. BMI, Bonn, 1976
- BMI 1979 Bundesminister des Innern (BMI). Allgemeine Berechnungsgrundlagen für die Strahlenexposition bei radioaktiven Ableitungen mit der Abluft oder in Oberflächengewässer (Richtlinie zu § 45 StrlSchV) GMBI, Nr. 21, S. 371 – 435, 1979, Berichtigung GMBI, Nr. 30, S. 576 – 577, 1980, Berichtigung und Änderung GMBI, Nr. 33, S. 736 – 737, 1982, Berichtigung und Änderung GMBI, Nr. 19, S. 380 – 383, 1985
- BMU 1999 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaulicher Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau), Teil 1, Entwurf/Stand 30. Juli 1999
- BMU 2001 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Unterrichtung durch die Bundesregierung: Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahre 2000. Parlamentsbericht 2000, 14. Wahlperiode, Drucksache 14/6905, 10. September 2001  
<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/14/069/1406905.pdf>
- BMU 2002 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresbericht 2000. BMU, Bonn 2002
- BMU 2008 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2007, Unterrichtung durch die

Bundesregierung, erschienen 2008

- BMU 2009 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).  
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2008, Unterrichtung durch die  
Bundesregierung, erschienen 2009
- BMU 2011 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).  
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2009, Unterrichtung durch die  
Bundesregierung, erschienen 2011
- BMU 2012 Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).  
Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung im Jahr 2010, Unterrichtung durch die  
Bundesregierung, erschienen 2012
- Brenk 2001 Brenk Systemplanung GmbH. Rechnungen gemäß der neuen Allgemeinen  
Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung für den Standort der  
Schachanlage Asse zu GSF-Vergabenr. 021/01, Endbericht, BS-Proj.-Nr. 0103-  
10, erstellt im Auftrag des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit  
GmbH, Forschungsbergwerk Asse, Aachen, den 9. November 2001
- Brenk 2008 Brenk Systemplanung GmbH. Überprüfung der radiologischen  
Ausbreitungssituation am Standort der Schachanlage Asse, BS-Projekt-Nr. 0808-  
03, Bestellnummer 31/171804/08/T, erstellt im Auftrag der Helmholtz Zentrum  
München GmbH, Schachanlage Asse, Am Walde 2, 38319 Remlingen, Aachen,  
30. Oktober 2008
- Burnham und  
Anderson 2002 Burnham KP and Anderson DR. Model selection and multimodel inference, 2nd  
edn. Springer, New York, 2002
- Cardis et al. 2005a Cardis E, Vrijheid M, Blettner M, Gilbert E, Hakama M, Hill C, Howe G, Kaldor J,  
Muirhead CR, Schubauer-Berigan M, Yoshimura T, Bermann F, Cowper G, Fix J,  
Hacker C, Heinmiller B, Marshall M, Thierry-Chef I, Utterback D, Ahn YO, Amoros  
E, Ashmore P, Auvinen A, Bae JM, Solano JB, Biau A, Combalot E, Deboodt P,  
Diez Sacristan A, Eklof M, Engels H, Engholm G, Gulis G, Habib R, Holan K,  
Hyvonen H, Kerekes A, Kurtinaitis J, Malaker H, Martuzzi M, Mastauskas A,  
Monnet A, Moser M, Pearce MS, Richardson DB, Rodriguez-Artalejo F, Rogel A,  
Tardy H, Telle-Lamberton M, Turai I, Usel M, Veress K. Risk of cancer after low  
doses of ionising radiation: retrospective cohort study in 15 countries. *BMJ*  
331(7508):77, 2005

- Cardis et al. 2005b 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, Parshkov E, Piliptsevich N, Pinchera A, Polyakov S, Shabeka N, Suonio E, Tenet V, Tsyb A, Yamashita S, Williams D. Risk of thyroid cancer after exposure to 131-I in childhood. *J. Natl. Cancer Inst.* 97:724 – 732, 2005
- CDC 1990 Centers for Disease Control and Prevention (CDC). Guidelines for investigating clusters of health events. *MMWR Recommendations and Reports* 39 (RR-11): 1 – 16, 1990, <http://www.cdc.gov/mmwr/preview/mmwrhtml/00001797.htm>
- Colonna et al. 2002 Colonna M, Grosclaude P, Remontet L, Schvartz C, Mace-Lesech J, Velten M, Guizard A, Tretarre B, Buemi AV, Arveux P, Esteve J. Incidence of thyroid cancer in adults recorded by French cancer registries (1978 – 1997). *Eur. J. Cancer* 38: 1762 – 1768, 2002
- Dal Maso et al. 2009 Dal Maso L, Bosetti C, La Vecchia C, Franceschi S. Risk factors for thyroid cancer: an epidemiological review focused on nutritional factors. *Cancer Causes Control* 20:75 – 86, 2009
- Daniels u. Daniels RD and Schubauer-Berigan MK. A meta-analysis of leukaemia risk from Schubauer-Beri. 2011 protracted exposure to low-dose gamma radiation. *Occup Environ Med.* 68(6):457 – 464, 2011
- Davis et al. 2004 Davis S, Kopecky KJ, Hamilton TE, Onstad L. Thyroid neoplasia, autoimmune thyroiditis, and hypothyroidism in persons exposed to iodine 131 from the hanford nuclear site. *JAMA* 292:2600 – 2613, 2004
- Deschler und Lübbert 2006 Deschler B and Lübbert M. Acute myeloid leukemia: epidemiology and etiology. *Cancer* 107 (9):2099 – 2107, 2006
- Dickman et al. 2003 Dickman PW, Holm LE, Lundell G, Boice JD Jr., Hall P. Thyroid cancer risk after thyroid examination with 131I: a population-based cohort study in Sweden. *Int. J. Cancer* 106:580 – 587, 2003
- Duntas und Doumas 2009 Duntas LH and Doumas C. The ‚rings of fire‘ and thyroid cancer. *Hormones (Athens)* 8:249 – 253, 2009

DWD 2011	Deutscher Wetterdienst (DWD). Zusammenstellung der Messungen der spezifischen Aktivität der bodennahen Luft in Hannover für den Zeitraum seit 1956, Mitteilung an die SSK, 2011
EKN 2010a	Niedersächsisches Krebsregister (EKN). Auswertung des EKN zur Krebshäufigkeit in der Samtgemeinde Asse. Epidemiologisches Krebsregister Niedersachsen. Oldenburg, 16. Dezember 2010
EKN 2010b	Epidemiologisches Krebsregister Niedersachsen (EKN). Auswertung des EKN zur Krebshäufigkeit in den Gemeinden Cremlingen, Wolfenbüttel, SG Baddeckenstedt, SG Oderwald, SG Schladen, SG Schöppenstedt und SG Sickinge. Oldenburg, 16. Dezember 2010, <a href="http://www.krebsregister-niedersachsen.de/registerstelle/dateien/aktuellesnews/pdf/Asse/EKN_Bericht_Gemeinden_Wolfenbuettel_2010_12_16.pdf">http://www.krebsregister-niedersachsen.de/registerstelle/dateien/aktuellesnews/pdf/Asse/EKN_Bericht_Gemeinden_Wolfenbuettel_2010_12_16.pdf</a>
EKN 2011	Niedersächsisches Krebsregister (EKN). Mitteilung vom 20.01.2011 an die Strahlenschutzkommission
England und Rider 1994	England TR and Rider BF. Evaluation and Compilation of Fission Product Yields, LA-UR-3106, ENDF-349, LANL, October 1994
Franssila und Harach 1986	Franssila KO and Harach HR. Occult papillary carcinoma of the thyroid in children and young adults. A systemic autopsy study in Finland. Cancer 58:715 – 719, 1986
GEKN 1999	Land Niedersachsen. Gesetz über das epidemiologische Krebsregister Niedersachsen (GEKN) vom 16. November 1999, Nds. GVBl. S. 390
GSF 1977	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF). Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresberichte 1966 – 76
GSF 1978	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF). Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 1977
GSF 1979	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF). Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage

Asse, Jahresbericht 1978

- GSF 1980 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1979
- GSF 1981 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1980
- GSF 1982 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1981
- GSF 1983 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1982
- GSF 1984 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1983
- GSF 1985 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF):  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1984
- GSF 1986 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1985
- GSF 1987 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1986
- GSF 1988 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1987
- GSF 1989 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).

Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1988

- GSF 1990 Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München (GSF).  
Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage  
Asse, Jahresbericht 1989
- GSF 1991 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1990
- GSF 1992 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1991
- GSF 1993 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1992
- GSF 1994 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1993
- GSF 1995 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1994
- GSF 1996 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1995
- GSF 1997 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1996
- GSF 1998 GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und  
Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht  
1997

GSF 1999	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 1998
GSF 2000	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 1999
GSF 2001	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2000
GSF 2002	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2001
GSF 2003	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2002
GSF 2004	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2003
GSF 2005	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlag Asse, Jahresberichte 2004
GSF 2006	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2005
GSF 2007	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2006
GSF 2009	GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. Strahlenschutz und Umgebungsüberwachung im Bereich der Schachtanlage Asse, Jahresbericht 2007

- Hahn et al. 2001 Hahn K, Schnell-Inderst P, Grosche B, Holm LE. Thyroid cancer after diagnostic administration of iodine-131 in childhood. *Radiat. Res.* 156:61 – 70, 2001
- Henderson et al. 1982 Henderson BE, Ross RK, Pike MC, Casagrande JT. Endogenous hormones as a major factor in human cancer. *Cancer Res.* 42:3232 – 3239, 1982
- Husmann et al. 2010 Husmann G, Kaatsch P, Katalinic A, Bertz J, Haberland J, Kraywinkel K, Wolf U. Krebs in Deutschland 2005/2006 – Häufigkeiten und Trends. Berlin: Robert-Koch-Institut, 2010
- IARC 2006 International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 88: Formaldehyde, 2-Butoxyethanol and 1-tert-Butoxypropan-2-ol, 2006
- IARC 2008 International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 97: 1,3-Butadiene, Ethylene Oxide and Vinyl Halides (Vinyl Fluoride, Vinyl Chloride and Vinyl Bromide), 2008
- IARC 2011a International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100A: A Review of Human Carcinogens: Pharmaceuticals, 2011
- IARC 2011b International Agency for Research on Cancer (IARC). IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans Volume 100B: A Review of Human Carcinogens: Biological Agents, 2011
- ISTec 2009 Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH. Radiologische Sachstandserhebung für die Schachanlage Asse II. Stand: 21. April 2009
- ISTec 2010 Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH. Ermittlung der potentiellen Strahlenexposition der Bevölkerung in der Umgebung der Schachanlage Asse II infolge Ableitung radioaktiver Stoffe mit den Abwettern im bestimmungsgemäßen Betrieb mittels eines Lagrange-Partikel-Modells, Stand: 11. Mai 2010
- Jacob et al. 1999 Jacob P, Kenigsberg Y, Zvonova I, Goulko G, Buglova E, Heidenreich WF, Golovneva A, Bratilova AA, Drozdovitch V, Kruk J, Pochtennaja GT, Balonov M, Demidchik EP, Paretzke HG. Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia. *Brit. J.*

Cancer 80:1461 – 1469, 1999

- Kahn und Sempos 1989 Kahn HA and Sempos CT. *Statistical Methods in Epidemiology*, Oxford University Press, 1989
- Kaiser 2010 Kaiser JC. MECAN – A software package to estimate health risks in radiation epidemiology with multi model inference, User Manual, Version 0.2, Helmholtz-Zentrum München, Institut für Strahlenschutz, 2010
- Kaiser et al. 2009 Kaiser JC, Jacob P, Blettner M, Vavilov S. Screening effects in risk studies of thyroid cancer after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.* 48:169 – 179, 2009
- Kerber et al. 1993 Kerber RA, Till JE, Simon SL, Lyon JL, Thomas DC, Preston-Martin S, Rallison ML, Lloyd RD, Stevens W. A cohort study of thyroid disease in relation to fallout from nuclear weapons testing. *JAMA* 270:2076 – 2082, 1993
- Khan et al. 2010 Khan A, Smellie J, Nutting C, Harrington K, Newbold K. Familial nonmedullary thyroid cancer: a review of the genetics. *Thyroid* 20:795 – 801, 2010
- KID 2010 Krebs in Deutschland (KID) 2005/2006 – Häufigkeiten und Trends, 7. Ausgabe 2010
- Kirchner 2011 Kirchner G. Vortragsfolien auf der Grundlage der Lagrange Rechnungen durch ISTec (2010), 2011
- Knobel und Medeiros-Neto 2007 Knobel M and Medeiros-Neto G. Relevance of iodine intake as a reputed predisposing factor for thyroid cancer. *Arq Bras. Endocrinol. Metabol.* 51:701 – 712, 2007
- Kricks und Siegel 1975 Kricks H-J and Siegel V. Bericht über Arbeiten am Forschungs- und Messreaktor Braunschweig (FRMB) für das Jahr 1975, PTB-Bericht FRMB-63
- Land et al. 2010 Land CE, Bouville A, Apostoaiei I, Simon SL. Projected lifetime cancer risks from exposure to regional radioactive fallout in the Marshall Islands. *Health Phys.* 99:201 – 215, 2010
- Lawson 2006 Lawson AB. *Statistical Methods in Spatial Epidemiology*. Wiley, Chichester, 2006

- Lawson et al. 2000 Lawson AB, Biggeri AB, Boehning D, Lesaffre E, Viel JF, Clark A, Schlattmann P, Divino F. Disease mapping models: an empirical evaluation. Disease mapping collaborative group. *Stat Med.* 19(17-18):2217 – 2241, 2000
- Linnet et al. 2007 Linnet MS, Schubauer-Berigan MK, Weisenburger DD, Richardson DB, Landgren O, Blair A, Silver S, Field RW, Caldwell G, Hatch M, Dores GM. Chronic lymphocytic leukaemia: an overview of aetiology in light of recent developments in classification and pathogenesis. *Br J Haematol.* 139 (5):672 – 686, 2007
- Little et al. 2008 Little MP, Hoel DG, Molitor J, Boice JD Jr., Wakeford R, Muirhead CR. New models for evaluation of radiation-induced lifetime cancer risk and its uncertainty employed in the UNSCEAR 2006 report. *Radiat. Res.* 169:660 – 676, 2008
- Lodish und Stratakis 2008 Lodish MB and Stratakis CA. RET oncogene in MEN2, MEN2B, MTC and other forms of thyroid cancer. *Expert. Rev. Anticancer Ther.* 8:625 – 632, 2008
- Ma et al. 2010 Ma X, Park Y, Mayne ST, Wang R, Sinha R, Hollenbeck AR, Schatzkin A, Cross AJ. Diet, lifestyle, and acute myeloid leukemia in the NIH-AARP cohort. *Am J Epidemiol.* 171(3):312 – 322, 2010
- Mann 2002 Mann K. Diagnostik und Therapie differenzierter Schilddrüsenkarzinome. *Internist* 43:174 – 185, 2002
- Michel et al. 2012 Michel R, Daraoui A, Gorny M, Jakob D, Sachse R, Tosch L, Nies H, Goroncy I, Herrmann J, Synal H-A, Stocker M, Alfimov V. Iodine-129 and Iodine-127 in European Seawaters and in Precipitation from Northern Germany, *Science Total Environment* 419:151 – 169, 2012
- NLI 1988 Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz (NLI). *Asse, Jahresberichte* 1988
- NLI 1989 Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz (NLI). *Asse, Jahresberichte* 1989
- NLI 1990 Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz (NLI). *Umgebungsüberwachung Schachanlage Asse II, Berichtsjahr* 1990
- NLÖ 1993 Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). *Schachanlage Asse Umgebungsüberwachung 1992, Wasser, Hildesheim* 13. August 1993

- NLÖ 1994                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Schachtanlage Asse  
Umgebungsüberwachung 1993, Wasser, Hildesheim 2. Juni 1994
- NLÖ 1995                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Schachtanlage Asse  
Umgebungsüberwachung 1994, Wasser, Hildesheim 26. Juni 1995
- NLÖ 1996                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Forschungsbergwerk Asse  
Umgebungsüberwachung Wasser 1995, Hildesheim 11. September 1996
- NLÖ 1997                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 1996
- NLÖ 1998                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 1997
- NLÖ 1999                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 1998
- NLÖ 2000                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 1999
- NLÖ 2001                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 2000
- NLÖ 2002                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 2001
- NLÖ 2003                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 2002
- NLÖ 2004                    Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ). Umgebungsüberwachung  
Wasser, Forschungsbergwerk Asse. Jahresbericht 2003
- NLVA 1982                    Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1982 zur  
Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1982
- NLVA 1983                    Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1983 zur  
Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1983

NLVA 1984	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1984 zur Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1984
NLVA 1985	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1985 zur Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1985
NLVA 1986	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1986 zur Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1986
NLVA 1987	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt (NLVA). Jahresbericht 1987 zur Umgebungsüberwachung beim Salzbergwerk Asse, 1987
NLWKN 2005a	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Wasserpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2004
NLWKN 2005b	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Luftpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2004
NLWKN 2006a	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Wasserpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2005
NLWKN 2006b	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Luftpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2005
NLWKN 2007	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Wasserpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2006
NLWKN 2008a	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung Luftpfad, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2006
NLWKN 2008b	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte

2007

- NLWKN 2009      Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2008
- NLWKN 2010      Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Immissionsüberwachung, Forschungsbergwerk Asse. Jahresberichte 2009
- NWA 1972 – 1986      Niedersächsischen Wasseruntersuchungsamt (NWA). Schreiben vom 25. Mai 1972 bis zum 10. Januar 1986: Umgebungsüberwachung Wasser, Schachanlage Asse II, 1972 – 1984
- Preston et al. 1994      Preston DL, Kusumi S, Tomonaga M, Izumi S, Ron E, Kuramoto A, Kamada N, Dohy H, Matsuo T, Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.* 137 (Suppl.):68 – 97 (1994); Erratum, *Radiat. Res.* 139:129, 1994
- Preston et al. 2004      Preston DL, Pierce DA, Shimizu Y, Cullings HM, Fujita S, Funamoto S, Kodama K. Effect of recent changes in atomic bomb survivor dosimetry on cancer mortality risk estimates. *Radiat. Res.* 162(4):377 – 389, 2004
- Preston et al. 2007      Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, Mabuchi K, Kodama K. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat Res* 168:1 – 64, 2007
- Raue und Frank-Raue 2005      Raue F und Frank-Raue K. Diagnostik des Schilddrüsenkarzinoms. *Onkologie* 11:50 – 57, 2005
- Reiners et al. 2005      Reiners C, Geling M, Luster M, Farahati J, Mäder U. Epidemiologie des Schilddrüsenkarzinoms. *Onkologie* 11:11 – 19, 2005
- Richardson et al. 2009      Richardson D, Sugiyama H, Nishi N, Sakata R, Shimizu Y, Grant EJ, Soda M, Hsu WL, Suyama A, Kodama K, Kasagi F. Ionizing radiation and leukemia mortality among Japanese Atomic Bomb Survivors, 1950 – 2000. *Radiat. Res.* 172(3):368 – 382, 2009
- Ron 2007      Ron E. Thyroid cancer incidence among people living in areas contaminated by

radiation from the Chernobyl accident. *Health Phys.* 93:502 – 511, 2007

- Ron et al. 1995 Ron E, Lubin JH, Shore RE, Mabuchi K, Modan B, Pottern LM, Schneider AB, Tucker MA, Boice JD Jr. Thyroid cancer after exposure to external radiation: a pooled analysis of seven studies. *Radiat. Res.* 141:259 – 277, 1995
- Rosenberg et al. 2008 Rosenberg PS, Alter BP, Ebell W. Cancer risks in Fanconi anemia: findings from the German Fanconi Anemia Registry. *Haematologica.* 93(4):511 – 517, 2008
- Rothman 1990 Rothman K. A sobering start to the clusterbusters conference. *Am J Epidemiol* 132:6 – 12, 1990
- Schlattmann 2009 Schlattmann P. Medical applications of finite mixture models. *Statistics for Biology and Health.* Berlin: Springer, 2009
- Schneider und Walsh 2009 Schneider U and Walsh L. Cancer risk above 1 Gy and the impact for space radiation protection. *Adv Space Res* 44:202 – 209, 2009
- Schubauer-Berigan et al. 2007 Schubauer-Berigan MK, Daniels RD, Fleming DA, Markey AM, Couch JR, Ahrenholz SH, Burphy JS, Anderson JL, Tseng CY. Chronic lymphocytic leukaemia and radiation: findings among workers at five US nuclear facilities and a review of the recent literature. *Br J Haematol.* 139(5):799 – 808, 2007
- Schümann et al. 2009 Schümann M, Bolte G, Heinzow B, Hoopmann M, Kaatsch P, Suchenwirth R, Terschüren C, Zöllner I. Empfehlungen für den Umgang mit Beobachtungen von räumlich-zeitlichen Krankheitsclustern, Mitteilung der Kommission „Methoden und Qualitätssicherung in der Umweltmedizin“, Empfehlung des Robert Koch-Instituts, *Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz* 52:239 – 255, DOI 10.1007/s00103-009-0783-y, 2009
- Simon et al. 2010 Simon SL, Bouville A, Land CE, Beck HL. Radiation doses and cancer risks in the Marshall Islands associated with exposure to radioactive fallout from Bikini and Enewetak nuclear weapons tests: summary. *Health Phys.* 99:105 – 123, 2010
- SSK 2011 Strahlenschutzkommission (SSK). „Ionisierende Strahlung und Leukämieerkrankungen von Kindern und Jugendlichen“, verabschiedet in der 250. Sitzung der SSK am 29./30.09.2011. Veröffentlichungen der Strahlenschutzkommission Band 69, H. Hoffmann GmbH – Fachverlag, Berlin, 2011

- Thomas und Chelghoum 2004 Thomas X and Chelghoum Y. Cigarette smoking and acute leukemia. *Leuk Lymphoma*. 45 (6):1103 – 1109, 2004
- UICC 2002 Union for International Cancer Control (UICC). Wittekind C, Meyer HJ, Bootz F: TNM-Klassifikation maligner Tumoren. 6. Aufl. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 49 – 52, 2002
- UNSCEAR 2000 United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (Hrsg.). Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. United Nations. New York, NY, 2002  
[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_1.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html),  
[http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000\\_2.html](http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html)
- UNSCEAR 2006 United Nations Effects of ionizing radiation (UNSCEAR). Effects of ionizing radiation (UNSCEAR 2006 Report), Volume I Annex A: Epidemiological studies of radiation and cancer. New York: United Nations, 13 – 322, 2008
- UNSCEAR 2008 United Nations Effects of ionizing radiation (UNSCEAR). Effects of ionizing radiation (2008), Volume II Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. New York: United Nations, 45 – 219, 2011
- Vahlbruch 2004 Vahlbruch J-W. Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2004, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh04/38731427X.pdf>.
- van Maele-Fabry et al. 2008 van Maele-Fabry G, Duhayon S, Mertens C, Lison D. Risk of leukaemia among pesticide manufacturing workers: a review and meta-analysis of cohort studies. *Environ Res*. 106(1):121 – 137, 2008
- Vecchio und Santoro 2000 Vecchio G and Santoro M. Oncogenes and thyroid cancer. *Clin. Chem. Lab Med*. 38:113 – 116, 2000
- Victor et al. 2010 Victor A, Elsässer A, Hommel G, Blettner M. Wie bewertet man die p-Wert-Flut? *Dtsch Arztebl Int* 107(4):50 – 56, 2010
- Vlaanderen et al. 2011 Vlaanderen J, Lan Q, Kromhout H, Rothman N, Vermeulen R. Occupational benzene exposure and the risk of lymphoma subtypes: a meta-analysis of cohort studies incorporating three study quality dimensions. *Environ Health Perspect*.

- Vogt et al. 1975 Vogt KJ, Frenkler K, Nordsiek H, Polster G. Umweltradioaktivität der Kernforschungsanlage Jülich im Jahre 1975, ZST-Bericht Nr. 232
- Vrijheid et al. 2008 Vrijheid M, Cardis E, Ashmore P, Auvinen A, Gilbert E, Habib RR, Malker H, Muirhead CR, Richardson DB, Rogel A, Schubauer-Berigan M, Tardy H, Telle-Lamberton M. 15-Country Study Group. Ionizing radiation and risk of chronic lymphocytic leukemia in the 15-country study of nuclear industry workers. *Radiat. Res.* 170(5):661 – 665, 2008
- Walsh und Kaiser 2011 Walsh L and Kaiser JC. Multi-model inference of adult and childhood leukaemia excess relative risks based on the Japanese A-bomb survivors mortality data (1950 – 2000). *Radiat Environ Biophys.* 50(1):21 – 35, 2011
- Wershofen und Arnold 2005 Wershofen H and Arnold D. Long-term measurement series of the mean monthly activity concentration of the naturally occurring  $\gamma$ -ray-emitting radionuclides  $^7\text{Be}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{40}\text{K}$ , and  $^{210}\text{Pb}$  measured in ground-level air in Braunschweig, PTB-Ra-45, 2005
- Zähringer et al. 2008 Zähringer M, Bieringer J, Schlosser C. Three years of operational experience from Schauinsland CTBT monitoring station. *Journal of Environmental Radioactivity* 99:596 – 606, 2008

## 8 Glossar

### Akaike Informationskriterium (AIC)

Das AIC ist ein relatives Maß der Fitqualität, das die Wahrscheinlichkeit der Daten bei gegebenem Modell und die Anzahl der Modellparameter berücksichtigt. Das AIC ist ein Konzept, das auf der Informationstheorie beruht. Für einen gegebenen Datensatz wird demjenigen von untersuchten Modellen mit den niedrigsten AIC-Wert die höchste Wahrscheinlichkeit zugeordnet. In einer ersten Näherung ist der Wert des AIC durch die Summe aus der Devianz und der zweifachen Anzahl der Modellparameter gegeben.

### Devianz

Die Devianz ist ein Maß für die Fitqualität eines statistischen Modells für einen gegebenen Datensatz. Für verallgemeinerte lineare Modelle ist die Devianz im Rahmen von Maximum-Likelihood-Methoden durch zweimal dem natürlichen Logarithmus der Likelihood definiert.

### Explorative Analyse

Es werden beliebig viele Subgruppen und Fragestellungen an einem vorliegenden Datensatz ohne vorformulierte Hypothese untersucht. Dabei sind zufällige Auffälligkeiten zu erwarten. Diese müssen an mindestens einem unabhängigen Datensatz konfirmatorisch bestätigt werden, um relevant sein zu können.

### Füllort

Im Bergbau ein größerer Grubenbau mit Einrichtungen zum Umschlag des Fördergutes von der waagerechten Streckenförderung auf die senkrechte Schachtförderung.

<http://lexikon.meyers.de/wissen/F%C3%BCllort>

### Konfirmatorische Analyse

Es gibt eine ohne Kenntnis der Daten formulierte (Null-)Hypothese und eine vorab festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit. Die Aussage hat hohe Relevanz.

### Kredibilitätsintervall

In der Bayes-Statistik ist ein Kredibilitätsintervall (oder Bayesisches Konfidenzintervall) ein Intervall, das eine gegebene Wahrscheinlichkeit der resultierenden (posterior) Wahrscheinlichkeitsverteilung enthält. Die begriffliche Unterscheidung eines Kredibilitätsintervalls von einem Konfidenzintervall der frequentistischen Statistik wird gemacht, um die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsbegriffe der Bayes-Statistik und der frequentistischen Statistik zu betonen.

### Langzeitausbreitungsfaktor $\chi^{(x)}$

Zeitgemittelter Ausbreitungsfaktor unter Berücksichtigung einer langzeitigen Wetterstatistik. Der Ausbreitungsfaktor ist eine Kenngröße für die Ausbreitung einer Aktivität aus einer punktförmigen Quelle. Er ist eine ortsabhängige Größe, welche die bodennahe Aktivitätskonzentration  $a_v(X)$  in der Aktivitätswolke in der Entfernung  $x$  von der Emissionsquelle mit der Emissionsrate der Quelle verknüpft:  
$$a_v(X) = \chi(a_v(X)) \cdot \dot{A}.$$

### Quartil

Quartile teilen eine zugrunde liegende Häufigkeitsverteilung in vier Viertel. Ein bestimmtes Quartil bezeichnet die Grenze zwischen zwei bestimmten Vierteln der Verteilung. Bis zum ersten Quartil liegen 25 % aller Fälle der Verteilung, bis zum zweiten Quartil 50 % usw.

Regierungsbezirk (RB)

In Niedersachsen wurde in einer Verwaltungsreform die Einteilung in Regierungsbezirke aufgelöst, der ehemalige RB Braunschweig besteht aus den Kreisen, die vor dieser Verwaltungsreform den RB Braunschweig ausmachten.

Signifikant (Sig.)

Wenn nicht anders angegeben, so bezieht sich dies auf zweiseitige Tests zum Niveau von 5 %.

Standardisiertes Inzidenzverhältnis (SIR), Standardisiertes Mortalitätsverhältnis (SMR)

Englisch: standard incidence ratio, standard mortality ratio.

Die altersspezifische Inzidenz oder Mortalität eines geeigneten Vergleichsgebiets wird mit den altersspezifischen Bevölkerungszahlen des Studiengebietes multipliziert und diese über die Altersgruppen anschließend aufaddiert, sodass man eine erwartete Zahl von Fällen erhält. Diese wird dann in Beziehung zu den beobachteten Fällen gesetzt. Zum Beispiel wären in der SG Asse bezogen auf die Leukämiehäufigkeit des gesamten ehemaligen RB Braunschweig 8,3 Leukämiefälle zu erwarten gewesen. Beobachtet wurden 18, sodass  $SIR = 18/8,3 = 2,17$ , also das 2,17-fache der erwarteten Fälle festgestellt wird. Ein SIR-Wert von 1,0, wie z.B. in der SG Schöppenstedt beobachtet, bedeutet, dass genau so viele Fälle auftraten, wie erwartet wurden. Die Vergleichszahlen sollten aus einer vergleichbaren, aber möglichst großen Region und den gleichen Erkrankungsjahren stammen. Siehe auch Seite 6f in (EKN 2010a).

## 9 Abkürzungsverzeichnis

95 %-KI	95 %-Konfidenzintervall
AIC	Akaike Informationskriterium
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
Dev	Devianz
EKN	Epidemiologisches Krebsregister Niedersachsen
ERR	Excessive Relative Risk (zusätzliches relatives Risiko)
GM	Gesundheitsmonitoring
GSF	Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung

HMUG	Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt
ICD-10	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems (Internationale statistische Klassifikation der Krankheiten und verwandter Gesundheitsprobleme) <a href="http://www.dimdi.de/static/de/klassi/icd-10-gm/index.htm">http://www.dimdi.de/static/de/klassi/icd-10-gm/index.htm</a>
LAW	Low Active Waste (schwach radioaktive Abfälle)
LK	Landkreis
LSS	Life Span Study
MAW	Medium Active Waste (mittelradioaktive Abfälle)
NLI	Niedersächsisches Landesamt für Immissionsschutz
NLÖ	Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
NLVA	Niedersächsisches Landesverwaltungsamt
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NWA	Niedersächsisches Wasseruntersuchungsamt
RB	Regierungsbezirk
SG	Samtgemeinde
SIR	Standardisiertes Inzidenzverhältnis (standard incidence ratio)
SMR	Standardisiertes Mortalitätsverhältnis (standard mortality ratio)
UICC	Union for International Cancer Control

## 10 Abbildungs- und Tabellennachweis

- Abb. 2.1: Vergleich der Leukämieinzidenz (C91 – C95) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse und dem LK Wolfenbüttel ohne SG Asse, Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (EKN 2010a).
- Abb. 2.2: Vergleich der Leukämieinzidenz (C91 – C95) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse (rot) und dem ehemaligen RB Braunschweig (grün), Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (Daten aus EKN 2011).
- Abb. 2.3: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) entsprechend Tabelle 2.4 für Leukämien bei Männern im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Der Punkt bezeichnet die ungefähre Lage der Schachanlage Asse II.
- Abb. 2.4: Vergleich der Inzidenz des Schilddrüsenkrebs (C73) nach Geschlecht und 5-Jahres-Altersgruppen in der SG Asse und dem LK Wolfenbüttel ohne SG Asse, Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Dargestellt sind nur Frauen, da bei den Männern nur 2 Fälle auftraten. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (EKN 2010a).
- Abb. 2.5: Vergleich der Inzidenz des Schilddrüsenkrebs (C73) nach Geschlecht und 5-Jahres-

Altersgruppen in der SG Asse (rot) und dem ehemaligen RB Braunschweig (grün), Diagnosezeitraum 2002 bis 2009. Dargestellt sind nur Frauen, da bei den Männern nur 2 Fälle auftraten. Bei den Zahlen handelt es sich um die absoluten Anzahlen der Fälle je Altersgruppe in der SG Asse (Daten aus EKN 2011).

- Abb. 2.6: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) entsprechend Tabelle 2.5 für Schilddrüsenkrebs bei Frauen im LK Wolfenbüttel nach Samtgemeinden bzw. in nicht in Samtgemeinden integrierten Gemeinden, 2002 bis 2009. Der Punkt bezeichnet die ungefähre Lage der Schachtanlage Asse II.
- Abb. 3.1: Standardisierte „rohe“ Inzidenzverhältnisse (SIR) für Leukämien bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt.
- Abb. 3.2: Bereinigte standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) nach Anwendung des vollständigen Bayes-Verfahrens für Leukämien bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt (gleiche Klassengrenzen wie Abbildung 3.1).
- Abb. 3.3: Standardisierte „rohe“ Inzidenzverhältnisse (SIR) für Schilddrüsenkrebs bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete.
- Abb. 3.4: Erwartete standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR) nach Anwendung des vollständigen Bayes-Ansatzes für Schilddrüsenkrebs bei Männern und Frauen im ehemaligen RB Braunschweig 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden. Die Farbcodierung zeigt die SIR-Werte der Größe nach geordnet und in Klassen von je 25 % eingeteilt, die 10 % höchsten Werte sind zusätzlich rot eingefärbt. Die weißen Felder sind gemeindefreie Gebiete (gleiche Klassengrenzen wie Abbildung 3.3).
- Abb. 5.1: Akkumulation der eingelagerten Aktivität in den Jahren 1967 bis 1978.
- Abb. 5.2: Jährliche Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft aus der Schachtanlage Asse II nach den Berichten der Betreiber.
- Abb. 5.3: Jährliche Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft aus der Schachtanlage Asse II: Messwerte ab 1978 nach den Berichten der Betreiber, bis 1977 aus den Daten für 1978 mit der bis dahin jeweils eingelagerten Aktivität skaliert.
- Abb. 5.4a: Zeitlicher Verlauf der effektiven Dosen in Mikrosievert pro Jahr für die Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachtanlage Asse II durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in

Analogie zu Brenk (2001).

- Abb. 5.4b: Zeitlicher Verlauf der Organdosen für das rote Knochenmark (oben) und der Schilddrüsendosen (unten) jeweils in Mikrosievert pro Jahr für die Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II durch Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Fortluft, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in Analogie zu Brenk (2001).
- Abb. 5.5: Zeitlicher Verlauf des durch die Ableitungen von Pb-210 mit der Fortluft bewirkten Anteils der Organdosen für das rote Knochenmark der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle der Schachanlage Asse II, berechnet nach AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) in Analogie zu Brenk (2001).
- Abb. 5.6: Flächenhafte Verteilung des Langzeit-Ausbreitungsfaktors in  $\text{s/m}^3$  für die Jahre 2002 bis 2006 in der Umgebung der Schachanlage Asse II (nach ISTec 2010). Bei den Koordinaten handelt es sich um metrische Angaben des Abstandes vom Diffusor (Geokoordinaten 32 U 614348 5776789, 52.12978°N 10.67055°E). Die Gitterzellen haben eine Kantenlänge von 320 m, die Kantenlänge des Bildes beträgt 2 400 m.
- Abb. 5.7: Flächenhafte Verteilung der Verdünnung der Aktivitätskonzentration von Pb-210 relativ zu der im Diffusor in der Umgebung der Schachanlage Asse II (Kirchner 2011, modifiziert). Das gelbe Quadrat gibt die Größe des Kartenausschnittes in Abb. 5.6 an.
- Abb. 5.8: SG Asse. Quelle: <http://www.samtgemeinde-asse.de>
- Abb. 5.9: Zeitlicher Verlauf der durchschnittlichen und maximalen, unter konservativen Annahmen geschätzten jährlichen effektiven Gesamtdosis (extern und intern) in mSv für die Beschäftigtengruppe GM Asse (BfS 2011).
- Abb. 5.10: Verteilung der geschätzten effektiven Berufslebensdosis in mSv in der Beschäftigtengruppe GM Asse (BfS 2011). Die Dosiswerte wurden mit konservativen Annahmen geschätzt.
- Abb. 6.1: Zusätzliches relatives Erkrankungsrisiko für Männer der LSS-Kohorte als Funktion der Knochenmarkdosis im erreichten Alter 60 für eine Exposition im Alter 33. Für ausgewählte Dosiswerte wurden mit der Monte-Carlo-Methode beste Schätzwerte des ERR und dazugehörige 90 %-Konfidenzintervalle berechnet. In den Modellen von Schneider und Walsh (2009) stehen „LQ“ für eine linear-quadratische und „LQ exp“ für eine linear-quadratisch-exponentielle Dosis-Wirkungsbeziehung.
- Abb. 6.2: Zusätzliches relatives Risiko für Frauen und Männer der LSS-Kohorte als Funktion der Knochenmarkdosis für erreichte Alter von 33, 60 und 83. Die Exposition erfolgte jeweils 27 Jahre vor dem erreichten Alter.
- Abb. 6.3: Zusätzliches relatives Risiko bei einer Knochenmarkdosis von 1 Sv für das Modell von UNSCEAR (2006) und aus der MMI-Methode (Walsh und Kaiser 2011) in einer exemplarischen Rechnung für eine hypothetische Gruppe von Männern der LSS-Kohorte im erreichten Alter 32 als Funktion des Alters bei Exposition.
- Abb. 6.4: ERR bei 1 Sv für Frauen und Männer der Vergleichsregion ehem. RB Braunschweig in den Altersgruppen 30 – 34, 35 – 39, ..., ab 80, berechnet durch Übertragung des Risikos der

LSS-Kohorte nach BEIR VII (2006).

- Abb. 6.5: Grafische Ermittlung des besten Schätzwerts der Knochenmarkdosis von 0,73 Sv im Jahre 1978, die nötig wäre, um die in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 beobachteten Leukämie-Neuerkrankungen bei Männern in der SG Asse zu bewirken. Das 95 %-Konfidenzniveau des minimalen Wertes der dafür nötigen Dosis liegt bei 0,50 Sv.
- Abb. 6.6: ERR für Schilddrüsenkrebs unter Frauen (w) und Männern (m) in der LSS-Kohorte als Funktion der Schilddrüsendosis für erreichte Alter von 33, 60 und 83, die Exposition erfolgte jeweils 27 Jahre vor dem erreichten Alter. Für ausgewählte Dosiswerte wurden mit der Monte-Carlo-Methode beste Schätzwerte des ERR und dazugehörige 90 %-Konfidenzintervalle berechnet.
- Abb. 6.7: Grafische Ermittlung des besten Schätzwerts der Schilddrüsendosis von 1,3 Sv im Jahre 1978, die nötig wäre, um die in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 beobachteten Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen bei Frauen in der SG Asse zu bewirken. Das 95. Perzentil des ERR bei einer Dosis von 0,32 Sv liegt bei der beobachteten Anzahl von 10 Fällen.
- Abb. 6.8: Zusätzliches relatives Risiko für Frauen, Schilddrüsenkrebs im Alter von 32 Jahren nach einer Strahlenexposition mit einer Schilddrüsendosis von 1 Sv zu bekommen.
- Abb. 6.9: Ein hypothetischer Dosisverlauf, skaliert nach dem relativen Dosisverlauf nach (Abb. 5.4b), der die unter den Frauen der SG Asse beobachtete Schilddrüsenkrebsinzidenz erklären könnte.
- Tab. 2.1: Bevölkerung der SG Asse und des LK Wolfenbüttel ohne SG Asse (EKN 2010a).
- Tab. 2.2: Bevölkerung des ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2010b).
- Tab. 2.3: Häufigkeit von Neuerkrankungsfällen in der SG Asse in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 (EKN 2011).
- Tab. 2.4: SIR für Leukämie (C91 – 95) in den Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig, 2002 bis 2009 (EKN 2010b, EKN 2011).
- Tab. 2.5: SIR für Schilddrüsenkrebs in den Mitgliedsgemeinden des LK Wolfenbüttel im Vergleich zum ehemaligen RB Braunschweig, 2002 bis 2009 (EKN 2010b, EKN 2011).
- Tab. 3.1: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Leukämien bei Männern im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.
- Tab. 3.2: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Leukämien bei Frauen im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.
- Tab. 3.3: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Schilddrüsenkrebs bei Frauen im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.
- Tab. 3.4: Standardisierte Inzidenzverhältnisse (SIR), rohe und bereinigte Werte, für Schilddrüsenkrebs bei Männern im LK Wolfenbüttel 2002 bis 2009 nach Samtgemeinden bzw. Gemeinden.
- Tab. 5.1: Aktivitätskonzentrationen in  $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$  der Plutonium-Isotope in der Grubenluft, nach (GSF 1982).
- Tab. 5.2: Aktivitäten der eingelagerten Aktiniden nach ASSEKAT (BfS 2010). Die Anteile der

Spontanspaltung wurden der Chart of the Nuclides (<http://www.nndc.bnl.gov>) entnommen, die Spaltausbeuten der Masse 131 für I-131 stammen von England und Rider (1994). Wenn Spaltausbeuten für Spontanspaltung nicht verfügbar waren, wurden Spaltausbeuten für induzierte Spaltung angenommen.

- Tab. 5.3: Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Grubenfortluft im Jahr 1978, dem letzten Jahr der Einlagerung, und die daraus berechneten Radionuklidkonzentrationen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle (nach GSF 1979 auf SI-Einheiten umgerechnet).
- Tab. 5.4: Strahlenexposition der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle, berechnet mit dem Modell der AVV zu § 47 StrlSchV (BfS 2001) auf der Basis der tatsächlichen Ableitungen des Jahres 2000 (Brenk 2001).
- Tab. 5.5: Vergleich der berechneten potentiellen Strahlenexpositionen der Referenzpersonen an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung der Schachanlage Asse II nach Brenk (2001) und ISTec (2010).
- Tab. 5.6: Vergleich der berechneten potentiellen, bis zum Jahr 2009 akkumulierten Folgedosis einer im Jahr 1978 geborenen Referenzperson an der ungünstigsten Einwirkungsstelle und nahegelegenen Orten in der Umgebung der Schachanlage Asse II, berechnet nach der AVV zu § 47 StrlSchV.
- Tab. 6.1: Altersverteilung der Leukämie-Neuerkrankungen und mittlere Bevölkerungszahl von Männern in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse (laut Tabelle 6c in EKN 2010a) und im ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2011).
- Tab. 6.2: Modellreferenzen, Anzahl der Parameter, Poisson Devianz, AIC und Gewicht  $P_k$  für die Risikomodelle, die für das MMI verwendet wurden.
- Tab. 6.3: Altersverteilung der Schilddrüsenkrebs-Neuerkrankungen und mittlere Bevölkerungszahl von Frauen über 30 Jahren in den Diagnosejahren 2002 bis 2009 in der SG Asse (laut Tabelle 6b in EKN 2010a) und im ehemaligen RB Braunschweig (EKN 2011).
- Tab. 6.4: Bester Schätzwert und Standardabweichungen der Parameter des ERR-Modells von Preston et al. (2007) für das Schilddrüsenkrebsrisiko.