

Folgen von Tschernobyl

Perinatalsterblichkeit im Nahbereich des Tschernobylreaktors korreliert mit der Strontiumbelastung

Eine gemeinsame Analyse der Daten der Perinatalsterblichkeit aus Gomel und Zhytomir, den vom Tschernobyl-Fallout am stärksten verstrahlten Regionen Weißrusslands und der Ukraine, ergibt neben einem kurzzeitigen Anstieg im Jahr 1987 eine Erhöhung um bis zu 40 Prozent in den 1990er Jahren. Die Erhöhung korreliert mit der Strontiumbelastung der werdenden Mütter.

Von Alfred Körblein*

In der näheren Umgebung des Tschernobylreaktors gab es neben der Cäsiumkontamination auch eine erhebliche Strontium-Bodenbelastung. Sie erreichte außerhalb der 30 Kilometer-Sperrzone noch Werte von über 100.000 Becquerel pro Quadratmeter (Bq/m²; siehe Abbildung 1). Meine Auswertung der Daten aus dem höchstbelasteten Gebiet Weißrusslands, dem Oblast Gomel, hatte vor Jahren einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Strontiumbelastung werdender Mütter und der Perinatalsterblichkeit ergeben [1].

Nach den atmosphärischen Atomwaffentests in den 1950er und 1960er Jahren zeigte sich in Deutschland eine erhöhte Sterblichkeit von Neugeborenen, die mit der Belastung werdender Mütter durch Strontium im Fallout korreliert [2]. Ähnliche Effekte fanden sich in den Daten aus Großbritannien und den USA [3].

Inzwischen habe ich auch Daten aus Zhytomir, dem höchstbelasteten Oblast der Ukraine, erhalten. Die vorliegende Arbeit untersucht, ob sich die in Gomel beobachteten Langzeiteffekte auch in Zhytomir zeigen.

Daten

Jahresdaten der Perinatalsterblichkeit aus den sieben

Oblasts von Weißrussland (Belarus) erhielt ich vom Statistikdepartement des weißrussischen Ministeriums für Gesundheit. Die entsprechenden Daten aus dem ukrainischen Oblast Zhytomir wurden mir von Prof. Omelyanets aus Kiew überlassen.

Die Perinatalsterblichkeit wird definiert als das Verhältnis der Anzahl der Totgeborenen plus der innerhalb der ersten 7 Lebensstage gestorbenen Säuglinge, geteilt durch die Anzahl der Lebend- plus Totgeborenen. Als Kriterium für Totgeburten galt bis 1993 ein Geburtsgewicht von 1.000 Gramm. In Belarus – nicht aber in der Ukraine – wurde diese Grenze im Jahr 1994 auf 500 Gramm gesenkt. Um die Daten trotzdem gemeinsam auswerten zu können, werden für die vorliegende Untersuchung die Zahlen der Totgeburten in Zhytomir ab dem Jahr 1994 mit dem Faktor 1,22 multipliziert. Dieser Korrekturfaktor ergibt sich aus einer Trendanalyse der Daten aus Belarus.

Modellierung der Strontiumbelastung der werdenden Mütter

Das Modell geht von einigen vereinfachenden Annahmen aus. Erstens, die Strontiumaufnahme mit der Nahrung war am höchsten im ersten Folgejahr von Tschernobyl.

Tabelle 1: **Regressionsergebnisse für Gomel**

Parameter	Schätzwert	SD	t-Wert	p-Wert
(Intercept)	0,0166	0,0238	0,699	0,5006
d87	0,0557	0,0500	1,114	0,2912
Sr	0,0663	0,0103	6,433	7,5·10 ⁻⁰⁵

Tabelle 2: **Regressionsergebnisse für Zhytomir**

Parameter	Schätzwert	SD	t-Wert	p-Wert
(Intercept)	-0,0139	0,0353	-0,393	0,7026
d87	0,1291	0,0717	1,801	0,1018
Sr	0,1194	0,0145	8,219	9,3·10 ⁻⁰⁶

Tabelle 3: **Ergebnisse der gemeinsamen Analyse**

Parameter	Schätzwert	SD	t-Wert	p-Wert
(Intercept)	0,0026	0,0207	0,123	0,9030
d87 Gomel	0,0690	0,0566	1,220	0,2360
d87 Zhitomir	0,1136	0,0582	1,950	0,0646
Sr Gomel	0,0711	0,0103	6,893	8,2·10 ⁻⁰⁷
Sr Zhitomir	0,1138	0,0100	11,365	2,0·10 ⁻¹⁰

Tabelle 4: **Gepoolte Daten (Gomel+Zhytomir). Ergebnisse für Totgeburten, frühe neonatale- und perinatale Sterblichkeit**

Parameter	Schätzwert	SD	t-Wert	p-Wert
Perinatalsterblichkeit				
(Intercept)	0,0008	0,0260	0,031	0,9756
d87	0,0915	0,0538	1,7	0,1200
Sr	0,0934	0,0111	8,429	7,4·10 ⁻⁰⁶
Totgeburten				
(Intercept)	0,0863	0,0239	3,61	0,0048
d87	-0,0155	0,0500	-0,311	0,7623
Sr	0,0943	0,0104	9,11	3,7·10 ⁻⁰⁶
Frühe neonatale Sterblichkeit				
(Intercept)	-0,1191	0,0610	-1,953	0,0794
d87	0,2397	0,1238	1,936	0,0816
Sr	0,0988	0,0254	3,884	0,0030

Zweitens, die Aufnahme von Strontium in die Knochen erfolgt bevorzugt in der Zeit des größten Längenwachstums, also mit etwa 14 Jahren [4]. Drittens, die Betastrahlung von Strontium schwächt das Immunsystem und kann bei schwangeren Frauen zu einer Schädigung des Embryos und in der Folge zu erhöhter Perinatalsterblichkeit führen. Das größte Risiko tragen damit Schwangere, welche 1986 circa 14 Jahre alt waren, also solche des Geburtsjahrgangs 1972. Das Zusatzrisiko durch Strontium in den Jahren nach Tschernobyl ist damit in erster Näherung proportional zum Anteil der Gebärenden des Jahrgangs 1972. Dieser geht aus der Altersverteilung der

Gebärenden hervor.

Die Altersverteilung von Gebärenden in Belarus, genauer deren Mittelwert in den Jahren 1992 bis 1996, zeigt Abbildung 2. Allerdings ist der Anteil der Gebärenden in Altersgruppen von jeweils 5 Jahren zusammengefasst, also in die Altersgruppen 15 bis 19, 20 bis 24, ... , 40 bis 44, 45+ Jahre. Um eine kontinuierliche Verteilung zu erhalten, wurden die Daten mit einer Überlagerung zweier Lognormalverteilungen angenähert (durchgezogene Linie in Abbildung 2).

Schließlich muss auch noch die natürliche Ausscheidung von Strontium aus den Knochen berücksichtigt werden,

welche nach ICRP Publikation 67 [5] durch eine Überlagerung zweier Exponentialfunktionen mit effektiven Halbwertszeiten T_1 ($\approx 2,4$ Jahre) und T_2 ($\approx 13,7$ Jahre) gekennzeichnet ist. So errechnet sich schließlich ein „Strontiumterm“ $Sr(t)$, der für die Bestimmung des Einflusses der Strontiumbelastung auf die Perinatalsterblichkeit im Jahr t verwendet wird:

$$Sr(t) = F(t-1972) \cdot (C_1 \cdot \exp(-\ln(2) \cdot (t-1986)/T_1) + C_2 \cdot \exp(-\ln(2) \cdot (t-1986)/T_2))$$

Hier ist $F(t-1972)$ der Anteil der Gebärenden mit Geburtsjahr 1972. Die Größen C_1 , C_2 , T_1 , T_2 wurden mit Hilfe einer Regression aus Tabellenwerten in [5] ermittelt.

Regressionsmodell

Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf (Trend) der Perinatalsterblichkeit in den Gebieten Gomel und Zhytomir (Studienregion) in den Jahren 1985 bis 1997, zusammen mit der Perinatalsterblichkeit in Belarus ohne Gomel und die Hauptstadt Minsk (Vergleichsregion). Um Abweichungen im Verlauf der Sterblichkeit p_1 in der Studienregion zum Verlauf der Sterblichkeit p_0 in der Vergleichsregion zu finden, wird nun das Verhältnis von p_0 zu p_1 , genauer das Chancenverhältnis (odds ratio, OR) bestimmt.

Mit $odds = p/(1-p)$ erhält man

$$OR = odds_1 / odds_0$$

$$= p_1 / (1-p_1) / (p_0 / (1-p_0))$$

Für $p_1, p_0 \ll 1$ nähert sich OR dem Verhältnis der Raten p_0/p_1 .

Im Regressionsmodell wird nicht OR selbst, sondern $\ln(OR)$ verwendet, weil sich dann die Varianzen einfach berechnen lassen. Mit $p_0 = (SB_0 + NEO_0) / (LB_0 + SB_0)$ und $p_1 = (SB_1 + NEO_1) / (LB_1 + SB_1)$ – wobei LB, SB, und NEO die Anzahl der Lebendgeburten, Totgeburten und frühen neonatal Gestorbenen bezeichnen – gilt für die Varianzen der odds ratios

$$\begin{aligned} \text{var} = & 1/(SB_1 + NEO_1) + \\ & 1/(LB_1 + NEO_1) + \\ & 1/(SB_0 + NEO_0) + \\ & 1/(LB_0 + NEO_0). \end{aligned}$$

Das lineare Regressionsmodell hat die einfache Form:

$$\ln(OR) = \beta_0 + \beta_1 \cdot d87 + \beta_2 \cdot Sr(t)$$

Dabei ist $d87$ eine Dummyvariable, die das Jahr 1987 kennzeichnet. Sie erlaubt, einen möglichen Effekt im Jahr nach Tschernobyl zu prüfen. Für die statistische Auswertung wurde die Funktion lm (linear model) des Statistikpakets R (<http://www.r-project.org/>) verwendet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Regressionen enthalten die Tabellen 1 bis 4. Der Effekt des Strontiumterms ist sowohl in Gomel (siehe Tabelle 1) als auch in Zhytomir (Tabelle 2) hochsignifikant ($p < 0,0001$). Im Maximum in den Jahren 1993-94 ist der Strontiumeffekt in Zhytomir doppelt so groß (+56 Prozent) wie in Gomel (+28 Prozent). Die Erhöhung im Jahr 1987 ist in keinem der beiden Datensätze signifikant; sie ist aber in Zhytomir (+14 Prozent, $p=0,102$) größer als in Gomel (+6 Prozent, $p=0,291$).

Da die Ergebnisse für die Intercepts in beiden Datensätzen innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen, wird zusätzlich eine gemeinsame Regression mit nur einem Parameter für den Intercept durchgeführt. Die Effekte im Jahr 1987 und die Strontiumeffekte werden für Gomel und Zhytomir einzeln geschätzt. Die Schätzwerte für die Parameter (siehe Tabelle 3) unterscheiden sich erwartungsgemäß nur geringfügig von den Ergebnissen der Einzelregressionen (Tabellen 1 und 2), aber die gemeinsame Analyse liefert kleinere p-Werte. Die Verbesserung der Anpassung gegenüber einer Regression ohne die Strontiumterme ist hochsignifikant; die Summe der Fehlerquadrate verringert sich von 115,7 (df=

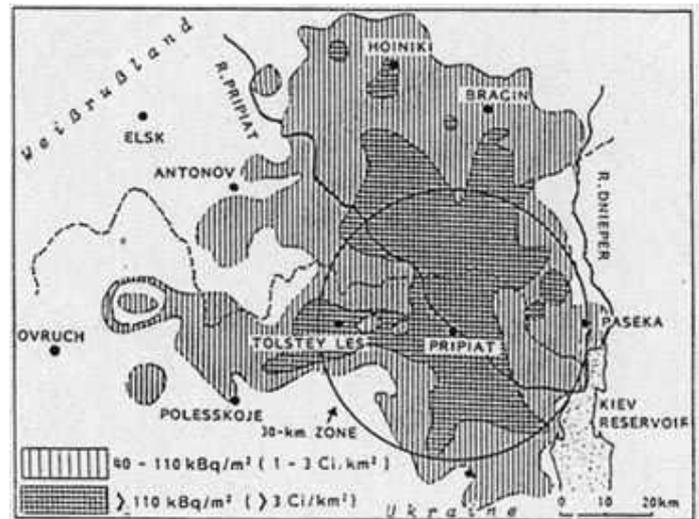


Abb. 3: Verteilung der Deposition von Sr-90 im näheren Bereich von Tschernobyl.

Abbildung 1: Strontiumbelastung des Bodens in der Umgebung des Tschernobylreaktors. Der Kreis kennzeichnet die 30-km-Zone. Die schraffierten Flächen zeigen Gebiete mit Bodenkontaminationen von 1 bis 3 Curie pro Quadratmeter (Ci/km^2) bzw. größer als $3 Ci/km^2$. Aus der Zeitschrift Atomwirtschaft vom März 1991. ($1 Ci = 3,7 \cdot 10^{10}$ Becquerel)

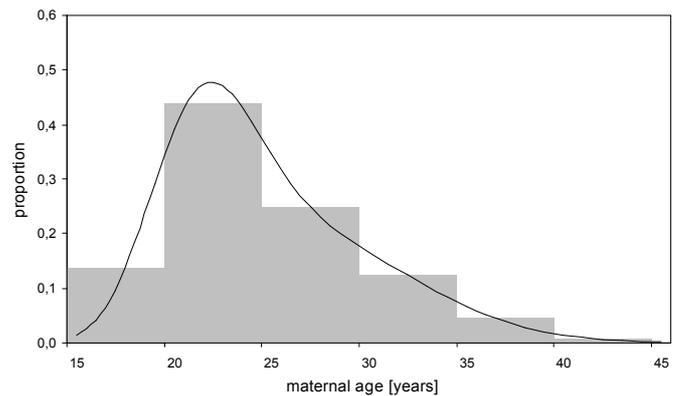


Abbildung 2: Mittlere Altersverteilung weißrussischer Frauen bei der Geburt in den Jahren 1992 bis 1996, in Altersgruppen von jeweils 5 Jahren, und Regressionslinie.

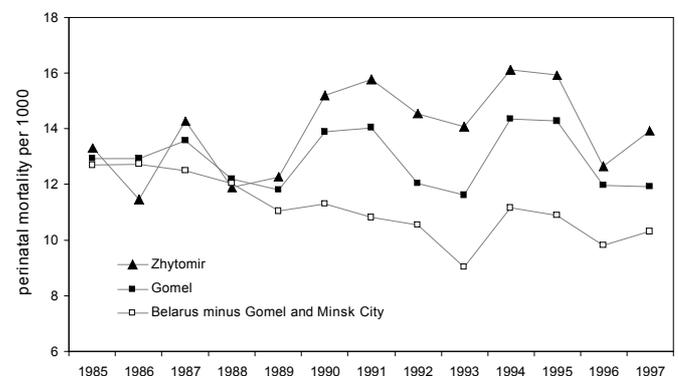


Abbildung 3: Perinatalsterblichkeit in den Gebieten Gomel (Weißrussland) und Zhytomir (Ukraine) und in der Vergleichsregion (Weißrussland ohne Gomel und die Hauptstadt Minsk). Der Anstieg im Jahr 1994 ist die Folge einer Definitionsänderung des Kriteriums für Totgeburten.

23) auf 15,9 (df=21), woraus ein p-Wert von $9 \cdot 10^{-10}$ erreicht ein F-Wert von 65,9 und net.

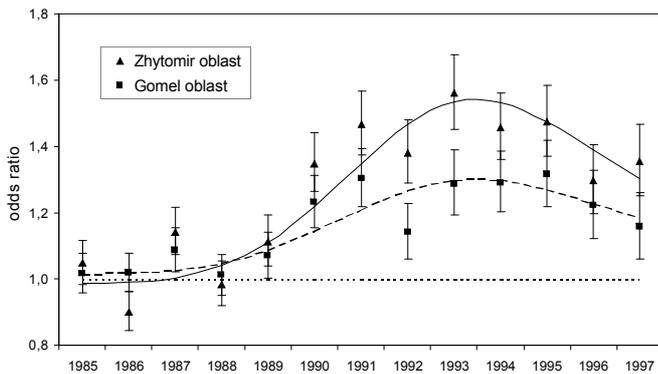


Abbildung 4: Verhältniss der Perinatalsterblichkeit in Gomel und in Zhytomir (Ukraine) zur Perinatalsterblichkeit in der Vergleichsregion (odds ratio). Die Linien sind die Ergebnisse der Einzelregressionen.

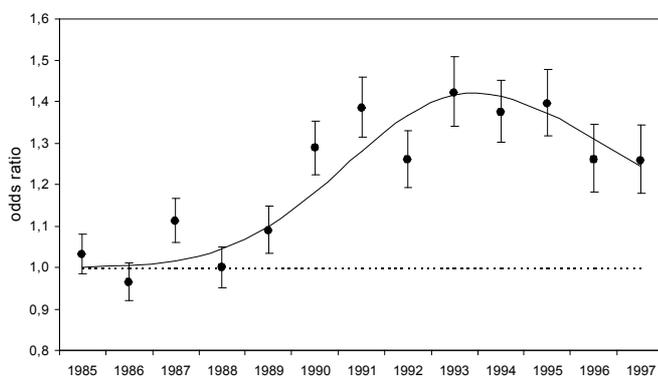


Abbildung 5: Verhältniss der Perinatalsterblichkeit in Gomel plus Zhytomir (gepoolte Daten) zur Perinatalsterblichkeit in der Vergleichsregion (odds ratio) und Regressionslinie.

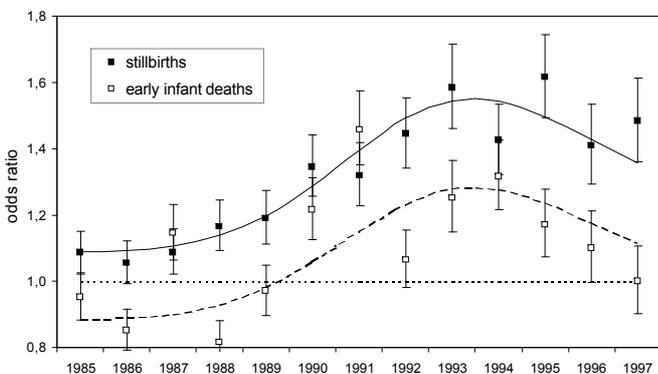


Abbildung 6: Verhältniss der Totgeburtenrate und der Rate der frühen neonatalen Sterblichkeit in Gomel plus Zhytomir zu den entsprechenden Raten in der Vergleichsregion (odds ratio) und Regressionslinien.

Die Ergebnisse einer Analyse der gepoolten Daten der odds ratios der Perinatalsterblichkeit aus Gomel und Zhytomir zeigt Tabelle 4. Der Strontiumeffekt ist hochsignifikant (+41 Prozent im Jahr 1993, $p=7,4 \cdot 10^{-6}$), die Erhöhung im Jahr 1987 beträgt 9,6 Prozent ($p=0,120$). Die Anpassung des Modells an die Daten ist sehr gut (siehe Abbildung 5), die

Summe der Fehlerquadrate beträgt 10,04 bei 10 Freiheitsgraden.

Tabelle 4 enthält außerdem die Ergebnisse von Analysen für Totgeborene und für die in den ersten sieben Lebenstagen gestorbenen Säuglinge (früh neonatal Gestorbene; siehe Abbildung 6). Der Strontiumeffekt ist im Maximum

im Jahr 1993 bei Totgeborenen (+42 Prozent) etwa ebenso groß wie bei früh neonatal Gestorbenen (+44 Prozent). Im Jahr 1987 zeigt sich nur bei den früh neonatal Gestorbenen eine deutliche Erhöhung (+27 Prozent, $p=0,082$), nicht aber bei den Totgeborenen (-2% Prozent $p=0,762$).

Diskussion

Die Daten aus Zhytomir bestätigen und verstärken den in Gomel gefundenen Anstieg der Perinatalsterblichkeit in den 1990er Jahren. Einzelauswertungen der Daten für Totgeborene und für früh neonatal Gestorbene zeigen vergleichbare Effekte. Eine gepoolte Auswertung der Daten aus Gomel und Zhytomir ergibt einen hochsignifikanten Zusammenhang der Perinatalsterblichkeit mit der berechneten Strontiumbelastung der Schwangeren.

Das der Rechnung zugrunde liegende Modell wurde schon erfolgreich bei der Auswertung der deutschen Daten der Perinatalsterblichkeit nach den atmosphärischen Atomwaffentests angewendet. Obwohl das Modell starke Vereinfachungen enthält, beschreibt es den Verlauf der Daten sehr gut.

Aus der Erhöhung der Perinatalsterblichkeit errechnen sich für die Jahre 1990 bis 1997 1.002 zusätzlich perinatal gestorbene Neugeborene, viel mehr als die 66 zusätzlichen Fälle im Jahr 1987. Damit überwiegt der verzögerte Effekt von Strontium bei weitem den Kurzzeiteffekt im Jahr 1987, welcher der Wirkung von Cäsium mit einer biologischen Halbwertszeit von nur wenigen Monaten zugeschrieben wird. Die offizielle Aussage, dass Strontium nach Tschernobyl nur etwa 5 Prozent der Strahlenbelastung von Cäsium ausmacht [6], mag im Landesdurchschnitt stimmen, widerspricht aber im Nahbereich des Tschernobyl-

reaktors den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung.

1. Korblein A. Strontium fallout from Chernobyl and perinatal mortality in Ukraine and Belorussia. Radiats Biol Radioecol 2003 Mar-Apr;43(2):197-202.
2. Korblein A. Perinatal mortality in West Germany following atmospheric nuclear weapons tests. Arch Environ Health 2004 Nov;59(11):604-9.
3. Korblein A. Säuglingssterblichkeit und Geschlechterverhältnis nach den atmosphärischen Atomwaffentests. Strahlentelex 2010; 554-555:1-5. http://www.strahlentelex.de/Stx_10_554_S01-05.pdf
4. Tolstykh E I. Kozheurov V P. Vyushkova O V. Degteva M O. Analysis of strontium metabolism in humans on the basis of the Techa river data. Radiat Environ Biophys 1997; 36: 25-29.
5. International Commission on Radiological Protection (1993). Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2: Ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67, Annals of the ICRP 23, Nos. 3-4. Pergamon Press, Oxford.
6. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation. Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group "Environment" (EGE), August 31, 2005.

* Dr. Alfred Korblein, alfred.koerblein@gmx.de www.alfred.koerblein.de