

Folgen von Tschernobyl:

Säuglingssterblichkeit, Fehlbildungen, Spontanaborte

Zusammenfassung

Die Sterblichkeit von Neugeborenen (Perinatalsterblichkeit) war im Jahr 1987, dem Jahr nach dem Reaktorunfall von Tschernobyl, sowohl in Deutschland als auch in Polen signifikant erhöht. Die Auswertung der Monatsdaten ergab einen signifikanten zeitlichen Zusammenhang der Perinatalsterblichkeit mit der um 7 Monate verzögerten Cäsiumbelastung der werdenden Mütter. Dieser Zusammenhang ist nicht linear, die Dosis-Wirkungsbeziehung ist stark nach oben (positiv) gekrümmt. Monatsdaten der Säuglingssterblichkeit aus Polen und der Perinatalsterblichkeit aus Zhytomyr, dem höchstbelasteten Gebiet der Ukraine, bestätigen die Befunde aus Deutschland.

Weißrussland (Belarus) war das vom Tschernobyl-Fallout am stärksten betroffene europäische Land. Im Gebiet Gomel, der höchstbelasteten Region von Belarus, steigt die Perinatalsterblichkeit ab dem Ende der 1980er Jahre deutlich gegenüber dem Rest von Belarus an. Die mögliche Ursache dieses Anstiegs ist die verzögerte Wirkung von Strontium, das bevorzugt während der Pubertät in die Knochen junger Mädchen eingelagert wird. Ein vergleichbarer Anstieg der Perinatalsterblichkeit wie in Gomel zeigt sich am Ende der 1980er Jahre auch in den Daten aus den hochbelasteten Gebieten der Ukraine.

Daten für Fehlbildungen bei Neugeborenen vor und nach Tschernobyl existieren nur in Bayern, dem Bundesland mit der höchsten mittleren Cäsiumbelastung. Während der bayerische Mittelwert der Fehlbildungsrate im Jahr 1987 nicht erhöht war, war die Fehlbildungsrate am Ende des Jahres 1987 im höher belasteten Südbayern ca. doppelt so hoch wie im niedriger belasteten Nordbayern. In den 10 Landkreisen mit der höchsten Cäsium-Bodenkontamination ist die Fehlbildungsrate im November und Dezember 1987 fast 8-mal höher als in den 10 niedrigst belasteten Landkreisen.

Ebenfalls in Bayern zeigt sich ein signifikanter Rückgang der Geburtenrate im Februar 1987, neun Monate nach dem Mai 1986, dem Monat mit der höchsten Strahlenintensität unmittelbar nach Tschernobyl. Auch in den höher belasteten Gebieten der Ukraine weist die Geburtenrate im Februar 1987 ein Minimum auf.

Nach bisheriger strahlenbiologischer Lehrmeinung sollten teratogene Effekte unterhalb einer Schwellendosis von 100 mSv nicht vorkommen. Diese Schwelle liegt mindestens zwei Größenordnungen über der maximalen Strahlenbelastung des Embryos nach Tschernobyl in Deutschland. Damit widersprechen die hier berichteten Studienergebnisse der Existenz einer Schwellendosis für Schäden während der Embryonalentwicklung. Allerdings basieren die Befunde auf ökologischen Studien und müssen mit Vorsicht interpretiert werden.

Einführung

Ionisierende Strahlung schädigt das ungeborene Leben. Deshalb kommt der Beobachtung des Ausgangs von Schwangerschaften eine Schlüsselrolle zu bei der Erforschung der möglichen Folgen des Reaktorunfalls von Tschernobyl am 26. April 1986.

Schäden während der Schwangerschaft können Spontanaborte, Fehlbildungen oder eine erhöhte Sterblichkeit von Neugeborenen (Perinatalsterblichkeit) sein. Leider gibt es in den meisten Ländern keine aussagekräftigen Fehlbildungsregister; so umfasst das europäische Register EURO-

CAT gerade mal 10% der Bevölkerung. Dagegen existieren fast überall Daten der Perinatalsterblichkeit.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich nur wenige aussagekräftige Arbeiten zu den Auswirkungen von Tschernobyl auf Säuglingssterblichkeit, Totgeburten oder perinatale Sterblichkeit. Wenn auffällige Befunde berichtet werden, fehlen oft quantitative Angaben (p-Werte, Vertrauensbereiche). Die Mehrzahl der Arbeiten liefert negative Ergebnisse, jedoch fehlen fast immer Angaben zur Nachweisgrenze. In einem Übersichtsartikel schreibt Little, dass es nach Tschernobyl keinen konsistenten Nachweis einer erhöhten Fehlbildungsrate nach Tschernobyl gibt [1].

In zwei stark kontaminierten Bezirken der Ukraine nahe dem Tschernobylreaktor wurden erhöhte Perinatalsterblichkeit und andere ungünstige Schwangerschaftsausgänge registriert [2]. Eine erhöhte Zahl von Fehlbildungen wurde bei 5-12 Wochen alten Föten in Weißrussland (Belarus) diagnostiziert [3]. Scherb et al. berichten über einen dauerhaften Anstieg der Totgeburtenrate nach Tschernobyl in einigen Ländern Osteuropas, der sich in Westeuropa nicht zeigt [4]. Die selben Autoren finden einen Zusammenhang der Totgeburtenrate 1987 mit der Cäsium-Bodenbelastung in den bayerischen Landkreisen [5]. Eine ähnliche Studie aus Finnland ergab keinen Zusammenhang zwischen Totgeburtenrate und Fallout [6].

In Deutschland fand eine Wissenschaftlergruppe aus Bremen schon 1989 einen Anstieg der frühen neonatalen Sterblichkeit nach Tschernobyl in den beiden südlichen Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg, die vom Tschernobyl-Fallout am stärksten betroffen waren [7]. In der Bremer Studie wird der zeitliche Verlauf der frühen Säuglingssterblichkeit (frühe neonatale Sterblichkeit) in Süddeutschland untersucht. Die Autoren fanden eine Abweichung der Daten in den Monaten nach Tschernobyl vom Trend der Jahre davor, und führten diese auf die Tschernobylstrahlung zurück. An der Arbeit wurde kritisiert, dass die Existenz des vermeintlichen Tschernobyleffekt davon abhängt, welches Trendmodell verwendet wird [8].

Anfang 1992 begann ich meine Untersuchung der Säuglingssterblichkeit nach Tschernobyl. Von der Bremer Gruppe übernahm ich die Idee einer Trendanalyse, erweiterte aber die Studienregion auf das gesamte Bundesgebiet einschließlich der ehemaligen DDR. Außerdem beschränkte ich die Untersuchung nicht auf die frühe Säuglingssterblichkeit, sondern schloss die Daten der Totgeborenen mit ein. Wenn Strahlung einen negativen Einfluss auf die Lebensfähigkeit von Neugeborenen hatte, sollte auch die Totgeburtenrate erhöht sein. Die Zusammenfassung der frühen Säuglingssterblichkeit und der Totgeburtenrate nennt man Perinatalsterblichkeit.

Erste Ergebnisse meiner Analyse der deutschen Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit wurden zum Tschernobyl Jahrestag 1992 in der Berliner *tageszeitung* abgedruckt. Aber erst 1997 gelang es mir, zusammen mit dem Statistiker Helmut Küchenhoff, die Arbeit in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift zu veröffentlichen [9].

Die einzige offizielle Studie zum Thema Perinatalsterblichkeit nach Tschernobyl wurde 1994 vom Bundesamt für Strahlenschutz durchgeführt [10]. Für die Studie wurden bayerische Daten verwendet, da Bayern das vom Tschernobyl-Fallout am stärksten betroffene Bundesland war. Die bevölkerungsgewichtete mittlere Cäsium-Bodenbelastung war in Südbayern ca. viermal höher als in Nordbayern. Deshalb sollte ein möglicher Strahleneffekt auf die Perinatalsterblichkeit in Südbayern stärker sein als in Nordbayern. Das Verhältnis der Perinatalsterblichkeit in Südbayern zu der in Nordbayern unterschied sich aber im Jahr 1987 nicht von dem in den Jahren vor und nach 1987. Das negative Ergebnis aus Bayern führte dazu, dass eine offizielle Auswertung der gesamtdeutschen Daten gar nicht erst versucht wurde.

In den letzten Jahren war ich einige Male in Belarus. Über meine dortigen Kontakte gelang es mir, offizielle Jahresdaten der Perinatalsterblichkeit für die 7 weißrussischen Gebiete (oblast) zu

erhalten. Bei einem Vergleich der Perinatalsterblichkeit in Gomel, dem vom Tschernobyl Fallout am höchsten belasteten Oblast, mit der im Rest von Belarus zeigte sich ein signifikanter Anstieg der Perinatalsterblichkeit in Gomel, der sich mit der verzögerten Wirkung von Radiostrontium erklären lässt [11].

Auch Fehlbildungen bei Neugeborenen in Bayern wurden vom BfS untersucht, ebenfalls mit negativem Ergebnis [12]. Mit Hilfe von Helmut Küchenhoff gelang es mir, die Daten der bayerischen Fehlbildungen vom BfS zu erhalten. Unsere Auswertung zeigte erstaunliche Ergebnisse. Zwar war der bayerische Mittelwert der Fehlbildungsrate 1987 gegenüber dem langjährigen Trend nicht erhöht. Eine kombinierte räumlich-zeitliche Trendanalyse ergab aber einen signifikanten, nichtlinearen Zusammenhang der Fehlbildungsrate mit der Cäsiumbelastung werdender Mütter.

Als Nebenprodukt unserer Untersuchungen der Fehlbildungsraten fand ich in den bayerischen Daten einen deutlich signifikanten Rückgang der Geburtenrate in Bayern im Februar 1987, neun Monate nach Tschernobyl, der in Südbayern stärker ausgeprägt war als in Nordbayern.

Der vorliegende Artikel ist eine Zusammenfassung meiner und Küchenhoffs Arbeiten zu den Folgen von Tschernobyl. Detailliertere Darstellungen finden sich in den zitierten Originalstudien.

Daten

Definitionen

Die Perinatalsterblichkeit ist definiert als die Zahl der Totgeburten plus die Zahl der in den ersten 7 Lebenstagen gestorbenen Neugeborenen (frühe neonatale Sterblichkeit, auch frühe Säuglingssterblichkeit genannt), geteilt durch die Zahl der Lebendgeburten plus Totgeburten. Die Säuglingssterblichkeit ist die Zahl der im ersten Lebensjahr gestorbenen Säuglinge, geteilt durch die Zahl der Lebendgeborenen. Die Kriterien für Totgeburten wurden in Deutschland jeweils mit Beginn des Jahres 1980 und 1994 geändert. Deshalb war der Studienzeitraum auf 1980-1993 begrenzt. Vor 1980 war das Kriterium für Totgeburten eine Körperlänge von mindestens 35 cm, danach ein Geburtsgewicht von mindestens 1000 Gramm. Mit dem Jahr 1994 wurde das Geburtsgewicht auf 500 Gramm reduziert.

Die deutschen Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit 1980-1993, wurden vom statistischen Bundesamt in Wiesbaden bezogen. Die bayerischen Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit und der Fehlbildungen bei Neugeborenen, 1984-1991, stellte das Bundesamt für Strahlenschutz zur Verfügung. Vom Institut für Mutter und Kind in Warschau erhielt ich die polnischen Monatsdaten der Säuglingssterblichkeit für 1985-1990. Die Jahresdaten der Perinatalsterblichkeit, 1985-1998, bekam ich von der statistischen Abteilung des weißrussischen Gesundheitsministeriums. Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit, 1985-1991, für die ukrainischen Gebiete Kiew und Zhytomyr wurden mir vom ukrainischen Gesundheitsministerium überlassen.

Daten der Cäsiumbelastung von Kuhmilch von Mai 1986 bis Ende 1988 wurden mir freundlicherweise von der Gesellschaft für Umwelt und Gesundheit (GSF) in Neuherberg bei München bis Ende 1988 zur Verfügung gestellt. Daten der Cäsium-137 Bodenbelastung in den bayerischen Landkreisen erhielt ich vom Bundesamt für Strahlenschutz.

Perinatalsterblichkeit – Jahresdaten

Modell

Der zeitliche Trend der Perinatalsterblichkeit wird durch ein logistisches Regressionsmodell beschrieben. Für die Zeitabhängigkeit wird ein linear-quadratischer Ansatz gewählt. Um den möglichen Einfluss der Tschernobylstrahlung auf die Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 zu testen, wird eine Dummy Variable d_{87} eingeführt, die den Wert $d_{87}=1$ im Jahr 1987 und in allen anderen Jahren den Wert $d_{87}=0$ hat. Das Modell hat die folgende Form:

$$E(Y(t)) = 1/(1+1/\exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot t^2 + \beta_4 \cdot d_{87})).$$

Hier ist $E(Y(t))$ der Schätzwert der Perinatalsterblichkeit im Jahr t , β_1 bis β_4 sind Parameter. Ein möglicher Anstieg der Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 gegenüber dem Trend der übrigen Jahre wird durch einen einseitigen t-Test geprüft (Nullhypothese: $\beta_4 \leq 0$).

Ergebnisse

Deutschland: Das obige Modell erlaubt einen guten Fit an die deutschen Jahresdaten der Perinatalsterblichkeit (siehe Abbildung 1). Der quadratische Term der Zeitabhängigkeit ist deutlich signifikant ($p=0,002$). Im Jahr 1987 ist die Perinatalsterblichkeit signifikant um 4,9% erhöht ($p=0,0088$). Der absolute Anstieg der Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 beträgt 0,36 pro 1000 Geburten. Das entspricht einer Zahl von 317 zusätzlich gestorbenen Neugeborenen (95% Vertrauensbereich: 67-578). Der Anstieg der Perinatalsterblichkeit ist hauptsächlich bedingt durch einen Anstieg der frühen neonatalen Sterblichkeit um 7,4% ($p=0,0035$). Die Totgeburtenrate ist 1987 nichtsignifikant um 2,9% erhöht ($p=0,100$).

Andere Länder: Für die Analyse der polnischen Daten der Perinatalsterblichkeit wird ein lineares logistisches Trendmodell verwendet, weil der quadratische zeitliche Term die Anpassung nicht nennenswert verbessert. Auch in Polen ist der Anstieg der Perinatalsterblichkeit 1987 gegenüber dem Trend der anderen Jahre deutlich signifikant ($p=0,0074$). Der absolute Anstieg beträgt 0,57 pro 1000 Geburten und ist damit größer als in Deutschland. Er entspricht einer Zahl von 354 zusätzlich gestorbenen Neugeborenen (95% VB: 89-626). Wieder ist der Effekt größtenteils auf den Anstieg der frühen neonatalen Sterblichkeit zurückzuführen.

Den Trend der polnischen Daten zeigt die Abbildung 2. Die standardisierten Residuen, also die Abweichungen der deutschen bzw. polnischen Daten der Perinatalsterblichkeit vom langjährigen Trend in Einheiten von Standardabweichungen, zeigt Abbildung 3. Anders als in Deutschland und Polen ist die Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 in England und Wales nicht erhöht (siehe Abbildung 4).

Eine gemeinsame Regression der Daten von Deutschland und Polen, mit individuellen Trendparametern aber einem gemeinsamen Parameter für den relativen Anstieg 1987, ergibt einen hochsignifikanten Anstieg der Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 um 4,2% ($p=0,0003$).

Die Cäsium-Bodenbelastung durch den Tschernobyl-Fallout war in Ostdeutschland (ehemalige DDR) höher als in Westdeutschland, am höchsten aber in Bayern. Deshalb wurden die Datensätze für Ostdeutschland, Westdeutschland und Bayern getrennt ausgewertet. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse dieser Analysen: den absoluten und relativen Anstieg der Perinatalsterblichkeit, die zusätzliche Zahl von perinatal gestorbenen Neugeborenen, und den einseitigen p-Wert. Der Effekt im Jahr 1987 ist größer in Polen als in Deutschland, größer in Ost- als in Westdeutschland, und größer in Bayern als in Gesamtdeutschland.

Table 1: Zunahme der Perinatalsterblichkeit 1987 in verschiedenen Ländern

Datensatz	Zusatzrate	Relativer Anstieg	Zusätzliche Fälle	p-Wert*
Polen	0,572	3,8%	354	0,0074
Deutschland	0,363	4,9%	317	0,0088

Westdeutschland	0,247	3,5%	159	0,0733
Ostdeutschland	0,623	7,2%	141	0,0279
Bayern	0,561	8,7%	67	0,0524
Südbayern	0,534	8,4%	36	0,0730
Nordbayern	0,663	10,1%	35	0,0587
England&Wales	-0,121	-1,3%	-83	0,7696

* einseitiger t-Test

Perinatalsterblichkeit in den bayerischen Landkreisen

1987 war die Perinatalsterblichkeit in Bayern erhöht, allerdings lag der Effekt an der Grenze der Signifikanz ($p=0.0524$). Seltsamerweise war der Anstieg der Perinatalsterblichkeit in Südbayern nicht höher als Nordbayern, obwohl die Cäsium-Bodenbelastung in Südbayern ca. viermal so hoch war wie in Nordbayern.

Da sowohl die Daten der Cäsium-Bodenbelastung (siehe Abbildung 5) als auch die Daten der Perinatalsterblichkeit 1987 auf Landkreisebene vorlagen, konnte die Abhängigkeit der Perinatalsterblichkeit von der Cäsium-Bodenbelastung untersucht werden. Eine lineare Regression der Perinatalsterblichkeit in den 96 bayerischen Landkreisen im Jahr 1987, zusammen mit den gesamt-bayerischen Daten der Perinatalsterblichkeit 1980-1986 und 1988-1993, ergibt einen signifikanten Anstieg mit der Cäsium-Bodenbelastung ($p=0.0256$).

Abbildung 6 zeigt die Daten der Perinatalsterblichkeit in den bayerischen Landkreisen in Abhängigkeit von der Cäsium-Bodenkontamination. Um statistische Schwankungen zu reduzieren wurden jeweils 3 Landkreise zu einem Punkt zusammengefasst. Tatsächlich ist die Perinatalsterblichkeit am höchsten für den Punkt mit der höchsten Cäsium-Bodenkontamination. In diesen 3 Landkreisen ist die Perinatalsterblichkeit um ca. 70% gegenüber den Erwartungswert erhöht. Andererseits hängt aber die Perinatalsterblichkeit unterhalb von 30 kBq/m² praktisch nicht von der Cäsium-Bodenbelastung ab. Dies lässt auf eine nicht monotone Form der Dosis-Wirkungsbeziehung schließen. Ein Regressionsmodell mit einem Polynom dritten Grades für die Cäsiumabhängigkeit der Perinatalsterblichkeit ergibt eine signifikante Verbesserung der Anpassung gegenüber einem linearen oder einem quadratischen Modell. Der Cäsiumterm ist jetzt deutlicher signifikant ($p=0,004$; F-Test). Es zeigt sich also, dass die Perinatalsterblichkeit 1987 in Bayern mit der Cäsium-Bodenbelastung korreliert, aber auch, dass der Zusammenhang nicht linear ist.

Ein ähnliches Ergebnis brachte eine kombinierte räumlich-zeitliche Trendanalyse der Totgeburtensraten in Bayern auf Landkreisebene durch Scherb et al. [5].

Perinatalsterblichkeit – Monatsdaten

Modell

Das Modell für die Monatsdaten muss neben den Trendkomponenten (Parameter β_1 bis β_3) mögliche jahreszeitliche periodische Schwankungen (Saisonfigur) berücksichtigen. Dazu werden zwei periodische Zusatzterme mit Perioden von 12 und 6 Monaten in das Modell eingeführt. Vier Parameter werden dafür benötigt, zwei für die Amplituden (β_4 , β_6) und zwei für die Phasenlage (β_5 , β_7):

$$E(Y(t)) = 1/(1+1/\exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot t^2 + \beta_4 \cdot \cos(2\pi \cdot (t-\beta_5)) + \beta_6 \cdot \cos(2\pi \cdot (2t-\beta_7))))).$$

Die Zeitvariable t zeigt auf die Monatsmitte, wobei ein Monat definiert ist als ein zwölftel Jahr. Um große Zahlen zu vermeiden, beginnt die Zeitskala im Jahr 1980. Der Monat Mai 1986 beispielsweise entspricht $t=6,375$.

Die Cäsiumkonzentration in Kuhmilch wird als Ersatzgröße für die gesamte Cäsiumbelastung verwendet, hauptsächlich deshalb, weil mir diese Daten von der Gesellschaft für Umwelt und Gesundheit (GSF) zur Verfügung gestellt wurden, aber auch, weil Milch aus dem höher belasteten Bayern, insbesondere aus dem Voralpenland, in ganz Westdeutschland konsumiert wurde. Die Cäsiumkonzentration in der Kuhmilch wurde von Mai 1986 bis Ende 1988 nahezu täglich gemessen.

Die Berechnung der Cäsiumkonzentration in schwangeren Frauen basiert auf der Annahme eines konstanten täglichen Milchkonsums und einer während der Schwangerschaft verkürzten biologischen Halbwertszeit von Cäsium von 70 Tagen. Abbildung 7 zeigt die Cäsiumkonzentration in Kuhmilch (Punkte) und die sich im Gleichgewicht zwischen Aufnahme und Ausscheidung einstellende Cäsiumkonzentration in schwangeren Frauen (durchgezogene Linie).

Der mögliche Einfluss von Cäsium auf die Perinatalsterblichkeit wird durch einen Zusatzterm der Form $\beta_8 \cdot (cs(t-\beta_{10}))^{\beta_9}$ (Cäsiumterm) im Regressionsmodell abgebildet. Darin ist Parameter β_8 ist eine Proportionalitätskonstante, β_{10} ist die Zeitverschiebung zwischen Cäsiumbelastung und dem Zeitpunkt der Geburt, und β_9 ist ein Exponent, der eine flexible Modellierung der Dosis-Wirkungsbeziehung erlaubt.

Zur Prüfung der Signifikanz des Cäsiumterms wird die Differenz der Summe der gewichteten Fehlerquadrate, die sich bei Regressionen ohne und mit dem Cäsiumterm ergeben, berechnet. Die Prüfgröße F ist folgendermaßen definiert:

$$F = ((\chi^2_0 - \chi^2_1) / (df_0 - df_1)) / (\chi^2_1 / df_1).$$

Dabei sind χ^2_0 bzw. χ^2_1 die gewichteten Fehlerquadratsummen unter der Nullhypothese bzw. mit dem Cäsiumterm; df_0 bzw. df_1 ist die zugehörige Anzahl von Freiheitsgraden. Die Differenz $df_0 - df_1$ ist die Zahl der getesteten Parameter. Der Ausdruck χ^2_1 / df_1 im Nenner ist der sogenannte Overdispersion-Faktor. Für eine detailliertere Beschreibung der Methoden sei auf unsere Veröffentlichung [9] verwiesen.

Ergebnisse

Perinatalsterblichkeit in Deutschland

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der deutschen Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit und den langjährigen Trend. In Abbildung 9 sind die zugehörigen Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Werten der Perinatalsterblichkeit (standardisierten Residuen) aufgetragen, dazu der gleitende Dreimonats-Mittelwert (durchgezogene Linie). Maxima im Verlauf der standardisierten Residuen zeigen sich am Anfang und am Ende 1987. Der F-Test ergibt einen p-Wert von 0,0053 für den Cäsium-Effekt.

Zur Abschätzung der Zeitverschiebung zwischen Exposition und Geburt mussten aus programmtechnischen Gründen Regressionen mit vorgegebener Zeitverschiebung β_{10} zwischen 0 und 9 Monaten durchgeführt werden. Es wurde geprüft, für welchen Wert von β_{10} die Summe der Fehlerquadrate den kleinsten Wert annimmt, die Anpassung an die Daten also am besten ist. Dies war der Fall für eine Zeitverschiebung von 7 Monaten. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Summe der Fehlerquadrate in Abhängigkeit von der Zeitverschiebung zwischen Perinatalsterblichkeit und Cäsiumkonzentration. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den auf dem F-Test basierenden 95% Vertrauensbereich (5,5 bis 8,5 Monate) für die Schätzung der Zeitverschiebung (Parameter β_{10}).

Säuglingssterblichkeit in Polen

Für Poland standen mir nur Monatsdaten der *Säuglingssterblichkeit* (Sterblichkeit im ersten Lebensjahr) für ein relativ kleines Zeitfenster von 1985 bis 1990 zur Verfügung. Wieder wurden Regressionen ohne und mit dem Cäsiumterm durchgeführt, zunächst mit einer Zeitverschiebung von 7 Monaten, wie sie aus den deutschen Daten bestimmt wurde. Der F-Test ergab einen hochsignifikanten Einfluss des Cäsiumterms auf die Daten ($p=0,0004$). Die Abweichungen der beobachteten von den erwarteten Daten (standardisierte Residuen) zeigt Abbildung 11. Für Zeitverschiebungen von 8 und 6 Monaten errechnen sich größere Werte der Summe der Fehlerquadrate als für 7 Monate. Damit stimmen die Schätzungen der Zeitverschiebung für beide Datensätze überein. Diese Ergebnisse wurden zuerst auf einer Konferenz in Kiew 2001 vorgestellt [13].

Eine gemeinsame Regression der Daten aus Polen und Deutschland erlaubt einerseits einen Vergleich der Größe des Cäsiumeffekts in beiden Ländern, und andererseits - wegen des wesentlich größeren Datenumfangs - eine genauere Schätzung der Parameter im Cäsiumterm. Allerdings sollten für den Vergleich der Effektstärke vergleichbare Daten verwendet werden. Nun stehen in Polen nur die Daten der Säuglingssterblichkeit zur Verfügung, in Deutschland die Daten der Perinatalsterblichkeit, die sich aus Totgeburtenrate und früher Säuglingssterblichkeit zusammensetzt. Im folgenden werden die deutschen Daten der frühen Säuglingssterblichkeit einer gemeinsamen Trendanalyse mit den Daten der polnischen Säuglingssterblichkeit unterzogen. Das erscheint deshalb gerechtfertigt, weil die in der ersten Lebenswoche gestorbenen Neugeborenen ca. 50% aller im ersten Lebensjahr gestorbenen Säuglinge ausmachen.

Zunächst wird für die deutschen Daten der frühen Säuglingssterblichkeit eine Trendanalyse durchgeführt. Es zeigt sich, dass der Cäsiumeffekt auch in diesen Daten hochsignifikant ist. Die Ergebnisse für den Cäsiumterm stimmen sehr gut mit den Ergebnissen für die polnischen Daten überein. Deshalb kann ein gemeinsamer Fit beider Datensätze, mit individuellen Trendparametern aber gemeinsamen Parametern für die saisonalen Schwankungen und den Cäsiumterm, durchgeführt werden. Mit einer Zeitverschiebung von wiederum 7 Monaten ist der Effekt des Cäsiumterms nun hochsignifikant ($p<0,0001$). Für Zeitverschiebungen von 6 bzw. 8 Monaten ergeben sich signifikant größere Werte der Summe der Fehlerquadrate als für 7 Monate. Der Schätzwert für den Exponenten im Cäsiumterm ist $\beta_{12} = 2.8 \pm 0.8$. Eine lineare Dosisabhängigkeit ergibt eine signifikant schlechtere Anpassung an die Daten; die Dosis-Wirkungsbeziehung ist demnach nicht linear.

Perinatalsterblichkeit in Belarus und der Ukraine

Belarus

Das Gebiet (oblast) Gomel ist die vom Tschernobyl Fallout vom stärksten betroffene Region von Belarus. Während in München Strontium keinen nennenswerten Anteil am Tschernobyl-Fallout hatte (210 Bq/m² Sr-90 gegenüber 20.000 Bq/m² Cs-137) überstieg 1986 die Strontiumkonzentration in Teilen von Gomel außerhalb der 30-km Sperrzone 37.000 Bq/m² (siehe Abbildung 12).

Abbildung 13 zeigt die Trends der Perinatalsterblichkeit in den Jahren 1985-1998 in den Gebieten Gomel, der Hauptstadt Minsk, und in Belarus ohne Gomel und Minsk. 1994 gibt es einen Anstieg der Perinatalsterblichkeit in allen drei Datensätzen, eine Folge der Neudefinition des Kriteriums für Totgeburten.

Bei den Daten aus Minsk fällt auf, dass die Perinatalsterblichkeit vor 1995 wesentlich höher liegt als im Rest von Belarus, und nach 1995 plötzlich um 50% absinkt. Dieser ungewöhnliche Verlauf hat wohl kaum biologische Ursachen. Die Daten aus Minsk werden bei der Analyse der Daten aus Belarus deshalb nicht berücksichtigt.

Eine Trendanalyse ist aus den folgenden Gründen problematisch. Erstens gab es eine Änderung der Definition der Totgeburten innerhalb des Untersuchungszeitraum. Zweitens könnte auch der Zusammenbruch der Sowjetunion 1991 einen Einfluss auf den Verlauf der Daten gehabt haben. Um einen möglichen Strahleneffekt zu finden, ist es deshalb sinnvoller, das Verhältnis der Perinatalsterblichkeit im Studiengebiet (Gomel) zu der Sterblichkeit im Vergleichsgebiet (Rest von Belarus ohne die Hauptstadt Minsk) zu untersuchen.

Methode

Das Verhältnis der Rate p_1 im Studiengebiet zur Rate p_0 im Vergleichsgebiet kann durch die odds ratio (OR) ausgedrückt werden, die folgendermaßen definiert ist:

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

Den Verlauf der OR im Zeitraum 1985-1998 zeigt Abbildung 14. In den Jahren 1985-88 liegen die OR sehr nahe bei 1, mit Ausnahme des Jahres 1987, in dem die OR etwa 1,09 beträgt. Von 1990 bis 1998 liegen die OR jedoch zwischen 1,2 und 1,3; die Perinatalsterblichkeit ist in Gomel in den 1990er Jahren also zwischen 20% und 30% gegenüber der Vergleichsregion erhöht.

Eine mögliche Erklärung für den Anstieg der Perinatalsterblichkeit 4 Jahre nach Tschernobyl wäre, dass es sich dabei um eine Spätwirkung der Strontiumbelastung von jungen Mädchen handelt, die sich zur Zeit des Reaktorunglücks im Stadium des größten Längenwachstums der Knochen befanden. Radioaktives Strontium, das chemisch dem Calcium gleicht, wird in dieser Zeit bevorzugt in die Knochen eingebaut. Die Dauerbestrahlung des Knochenmarks durch den Betastrahler Strontium könnte zu einer Schwächung der Immunabwehr führen. Wenn diese Mädchen einige Jahre später schwanger werden, tragen sie womöglich ein größeres Risiko, ihr Kind bei der Geburt zu verlieren.

Es wird nun eine gewichtete Regression der Logarithmen der odds ratios durchgeführt mit dem Modell

$$\ln(OR) = \ln(1 + \beta_0 + \beta_1 \cdot d_{87} + \beta_2 \cdot sr(t)),$$

wobei Parameter β_0 einen möglichen Unterschied in den Basisraten im Studiengebiet und im Vergleichsgebiet berücksichtigt, β_1 den Effekt im Jahr 1987 (Dummy-Variable d_{87}) und β_2 den Einfluss der Strontiumbelastung schätzt. Der Ausdruck $sr(t)$ ist die berechnete Strontiumbelastung in schwangeren Frauen. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass Strontium nur im ersten Jahr nach Tschernobyl und nur von solchen Mädchen inkorporiert wurde, die 1986 gerade 14 Jahre alt waren [14]. In die Berechnung von $sr(t)$ geht einerseits die Altersverteilung gebärender Frauen ein, andererseits die effektive Halbwertszeit von Strontium im menschlichen Körper [15]. Für die Details der Rechnung siehe [11].

Für die Wichtung der odds ratios gilt die einfache Formel

$$\sigma^2 = 1/n_1 + 1/(N_1 - n_1) + 1/n_0 + 1/(N_0 - n_0),$$

wobei n_1 and n_0 die Zahl der perinatal gestorbenen Neugeborenen im Studiengebiet (1) und im Vergleichsgebiet (0) sind. N_1 und N_0 sind die entsprechenden Zahlen von Lebend- plus Totgeborbenen. Die Parameter werden mit zweiseitigen t-Tests auf Signifikanz getestet (Nullhypothese $H_0: \beta_2=0, \beta_3=0$).

Ergebnisse

Das Modell ermöglicht einen guten Fit an die Daten. Die Summe der Fehlerquadrate ist 7,3 (df=11) mit- und 29,7 (df=12) ohne den Strontiumterm. Der Strontiumterm ist hochsignifikant ($p=0,0006$). Parameter β_0 ist 1.022 ± 0.027 , d.h. vor Tschernobyl gab es keinen nennenswerten

Unterschied in der Perinatalsterblichkeit zwischen Studien- und Vergleichsgebiet. Der Effekt im Jahr 1987 ist nicht signifikant ($\beta_1=0.055 \pm 0.060$; $p=0,462$). Eine Regression mit $\beta_0=0$ verschlechtert die Anpassung an die Daten nicht: Die Summe der Fehlerquadrate erhöht sich von 7,3 ($df=11$) auf 7,7 ($df=12$).

Das Ergebnis einer Regression mit $\beta_0=0$ zeigt die durchgezogene Linie in Abbildung 14. Die odds ratios liegen nach 1990 bei 1,3; die Perinatalsterblichkeit war also in Gomel in der ersten Hälfte der 1990er Jahre ca. 30% höher als im Rest von Belarus ohne die Hauptstadt Minsk. Unter den Modellannahmen errechnet sich eine Zahl von 431 in den Jahren nach Tschernobyl (1987-1998) zusätzlich gestorbenen Neugeborenen.

Perinatalsterblichkeit in der Ukraine

Modell

Die Gebiete (*oblasts*) Zhytomyr, Kiew und Kiew-Stadt waren die drei vom Tschernobyl Fallout am stärksten betroffenen oblasts der Ukraine. Wenn der Anstieg der Perinatalsterblichkeit in Gomel Anfang der 1990er Jahre auf Strontium zurückzuführen ist, sollte er sich auch in den ukrainischen Daten zeigen.

Über meine Kontakte in der Ukraine gelang es mir, offizielle Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit aus den 3 Gebieten Zhytomyr, Kiew und Kiew-Stadt für die Jahre 1985-1991 zu erhalten. Monatsdaten sind notwendig, um einen möglichen Cäsiumeinfluss nachzuweisen.

Für die Trendanalyse der Daten wurde das folgende Regressionsmodell verwendet:

$$E(Y(t)) = 1/(1+1/\exp(\beta_1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \cos(2\pi \cdot (t-\beta_4)) + \beta_5 \cdot \cos(2\pi \cdot (2t-\beta_6)) + \beta_7 \cdot cs7(t) + \beta_8 \cdot sr(t)))$$

Hier sind die Parameter β_1 und β_2 die Trendparameter, β_3 bis β_6 die Parameter für die saisonalen Schwankungen, β_7 und β_8 schätzen den Cäsium- und den Strontiumeffekt. Der Ausdruck $cs7(t)$ ist der schon für die Auswertung der deutschen und polnischen Daten verwendete, um 7 Monate verzögerte zeitliche Verlauf der Cäsiumkonzentration, $sr(t)$ der oben definierte Verlauf der Strontiumkonzentration in schwangeren Frauen.

Da die Stadt Kiew vom Gebiet Kiew umgeben ist, werden diese beiden Datensätze zusammengefasst. Zunächst werden Einzelregressionen für Kiew (Stadt und Gebiet) und das Gebiet Zhytomyr durchgeführt. Anschließend werden beide Datensätze einer gemeinsamen Regression mit gemeinsamem Parameter β_2 für den langjährigen zeitlichen Trend aber individuellen Parametern für die Cäsium- und Strontiumeffekte unterzogen.

Ergebnisse

Einzelregressionen für Zhytomyr und Kiew ergeben nur für die Daten aus Kiew einen nennenswerten Einfluss der periodischen Terme. Deshalb wurden bei der gemeinsamen Regression die periodischen Terme für die Daten aus Zhytomyr weggelassen. Die Summe der Fehlerquadrate ergeben sich zu 192,1 ($df=157$) bzw. 244,1 ($df=161$) für Regressionen mit bzw. ohne Cäsium- und Strontiumterme. Der entsprechende F-Test ist hochsignifikant ($p<0,0001$). Der Strontiumeffekt ist 3,2-mal größer in Zhytomyr als in Kiew. Auch der Cäsiumeffekt ist gut doppelt so groß in Zhytomyr wie in Kiew. Den Trend der Daten aus Zhytomyr und das Ergebnis der gemeinsamen Regression zeigt Abbildung 15.

Die Abweichungen zwischen Perinatalsterblichkeit und dem langjährigen Trend ohne den Cäsiumeffekt (standardisierte Residuen) enthält Abbildung 16. Von Dezember 1986 bis Mai 1987 überschreitet der gleitende Dreimonatsmittelwert der Perinatalsterblichkeit den Erwartungswert um mehr als 2 Standardabweichungen. Die größten monatlichen Abweichungen zeigen sich im

Januar 1987 und im April 1987. Der Januarwert folgt dem Maximum der Cäsiumbelastung der Schwangeren im Juni 1986 mit 7 Monaten Verzögerung, der Aprilwert korreliert mit der Erntesaison im Herbst 1986. In beiden Monaten finden sich auch Maxima der Säuglingssterblichkeit in Polen (siehe Abbildung 11).

Insgesamt überwiegt der Strontiumeffekt bei weitem den Effekt von Cäsium. Aus der Differenz zwischen beobachtetem und erwartetem Verlauf der Perinatalsterblichkeit errechnen sich in den drei ukrainischen Gebieten 151 zusätzlich gestorbene Neugeborene im Jahr 1987 (Cäsiumeffekt), und 712 zusätzliche Fälle in den Jahren 1988-1991, die der Wirkung von Strontium zugeschrieben werden.

Fehlbildungen in Bayern

Daten

Daten der Prävalenz von Fehlbildungen bei der Geburt wurden im Auftrag des bayerischen Umweltministeriums an den bayerischen Kinderkliniken nachträglich für den Zeitraum 1984-1991 erhoben. Jeder Fall wurde mit Diagnose, Geschlecht, Tag der Geburt, und Wohnort der Mutter erfasst. Von einer Gesamtzahl von 29.961 Neugeborenen mit Fehlbildungen, wurden nur 7.171 Fälle für die Datenanalyse zugelassen, die restlichen Fälle wurden vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) aus verschiedenen Gründen als ungeeignet für epidemiologische Untersuchungen betrachtet, und deshalb aus dem Datensatz entfernt.

Mit Hilfe von Helmut Küchenhoff, Statistiker an der Universität München, gelang es mir, vom BfS die bayerischen Fehlbildungsdaten zur Auswertung zu erhalten. Auch die Daten der Cäsium-Bodenkontamination in den 96 bayerischen Landkreisen wurden vom BfS zur Verfügung gestellt.

Odds ratios der Fehlbildungen in Süd- und Nordbayern

Die bayerischen Fehlbildungsraten zeigen im Jahr 1987 keinerlei Abweichung vom langjährigen Trend (siehe Abbildung 17). Nach dem Stand des strahlenbiologischen Wissens ist ein Strahleneffekt auf die Fehlbildungsrate auch nicht zu erwarten, da Strahlenschäden des Fötus, sogenannte teratogene Strahleneffekte, erst oberhalb einer Schwellendosis von ca. 100 mSv erwartet werden [16], 2-3 Größenordnungen größer als die geschätzte Zusatzdosis im ersten Folgejahr nach Tschernobyl in Bayern.

In einem zweiten Anlauf verfolgte ich einen ähnlichen Ansatz, wie er dem Vorgehen der BfS-Studie von 1994 [12] zu Grunde lag. Ich verglich die Fehlbildungsraten in Südbayern mit denen in Nordbayern, indem ich die odds ratios der Fehlbildungsraten in Süd- und Nordbayern berechnete. Die Cäsium-Bodenbelastung war in Südbayern nach Tschernobyl ca. viermal höher als in Nordbayern (siehe Abbildung 5). Deshalb erwartet man in Südbayern (Regierungsbezirke Oberbayern, Niederbayern, Schwaben) - wenn überhaupt - einen größeren Strahleneinfluss auf die Fehlbildungsraten als in Nordbayern (Regierungsbezirke Oberpfalz, Oberfranken, Unterfranken, Mittelfranken). Die odds ratios und die zugehörigen Standardabweichungen werden in ähnlicher Weise berechnet wie weiter oben für Belarus.

Abbildung 18 zeigt den Verlauf der odds ratios und das Ergebnis einer linearen Regression. Im November und Dezember 1987, sieben Monate nach dem zweiten Maximum der Cäsiumbelastung der werdenden Mütter im April und Mai 1987 (siehe Abbildung 7), sind die Fehlbildungsraten in Südbayern nahezu doppelt so hoch wie in Nordbayern.

Erweiterter Cäsiumterm

Bisher basierte die Berechnung der Cäsiumbelastung der werdenden Mütter lediglich auf dem Milchpfad; andere Nahrungskomponenten wurden vernachlässigt. Diese Vereinfachung mag für die Auswertung der deutschen Daten der Perinatalsterblichkeit akzeptabel sein, weil ein großer Teil der in Westdeutschland konsumierten Milch aus dem hochbelasteten bayerischen Voralpenland kam. In Bayern waren aber auch andere Nahrungsmittel aus lokaler Produktion höher belastet. Deshalb sollten sie bei einer Berechnung der Cäsiumbelastung der Schwangeren mitberücksichtigt werden.

Im Jahr 1986 veröffentlichte die GSF eine Dosisprognose, die auf Rechnungen mit dem Programm ECOSYS beruhte [17]. In dieser Rechnung wurden neben Milch noch drei weitere Nahrungsbestandteile berücksichtigt: Rindfleisch, Schweinefleisch und Getreide. Bei Kenntnis des Zeitverlaufs der Cäsiumkonzentration in diesen Nahrungsmitteln lässt sich - unter Berücksichtigung der jeweiligen mittleren Verzehrraten - der Zeitverlauf der Cäsiumbelastung in den Schwangeren besser annähern. Das Ergebnis dieser Rechnung zeigt Abbildung 19, in der die Monatsmittelwerte der Cäsiumkonzentration in den Schwangeren in den Jahren 1986-1988 aufgetragen sind. Es zeigt sich nun, dass das zweite Maximum der Cäsiumbelastung im April und Mai 1987 höher ist als das erste Maximum im Juni und Juli 1986.

Zusammenhang zwischen odds ratios und Cäsiumkonzentration

Um einen möglichen Zusammenhang der odds ratios mit der Cäsiumkonzentration zu untersuchen, wird eine Regression der odds ratios mit dem Modell

$$E(\ln(\text{OR})) = \beta_1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot \text{cs7}(t) + \beta_4 \cdot \text{cs7}(t)^2$$

durchgeführt. Hier ist $\text{cs7}(t)$ der neue, um 7 Monate verzögerte Cäsiumterm. Der linear-quadratische Ansatz sorgt für eine flexible Modellierung der Dosis-Wirkungsbeziehung. Die Regression ergibt eine Summe der Fehlerquadrate von 102,4 ($df=92$). Ohne die Cäsiumterme erhält man 111,3 ($df=94$). Damit ist der Cäsiumeffekt signifikant ($p=0,0213$, F-Test). Eine Regression mit einem linearen Cäsiumterm gibt keine signifikante Verbesserung der Anpassung gegenüber dem Modell ohne Cäsiumterm.

Zusammenhang der Fehlbildungsraten mit der Cäsium-Bodenkontamination

Oben wurde gezeigt, dass die Fehlbildungsraten im November/Dezember 1987 in Südbayern nahezu doppelt so hoch waren wie in Nordbayern. Weil sowohl die Daten der mittleren Cäsiumbelastung als auch der Fehlbildungsraten auf Landkreisebene vorhanden sind, kann die Abhängigkeit der Fehlbildungsraten im November/Dezember 1987 von der Cäsiumbelastung genauer untersucht werden. Erste Ergebnisse dieser Untersuchung stellte ich auf einer Konferenz in Kiev 2001 vor [18].

Wieder werden odds ratios berechnet, jetzt aber für das Verhältnis der Fehlbildungsraten im November/Dezember 1987 zu den Fehlbildungsraten in November/Dezember aller übrigen Jahre, also 1984-1986 und 1988-1991. Damit werden möglicherweise vorhandene systematische Unterschiede zwischen den Landkreisen berücksichtigt. Die Landkreise werden nach aufsteigender Cäsiumbelastung geordnet, und jeweils 6 Landkreise zu einer Gruppe zusammengefasst. Mit diesen Daten wird nun eine lineare Regression mit dem Modell

$$\ln(\text{OR}) = \ln(\beta_1 + \beta_2 \cdot \text{cs}(k))$$

durchgeführt. Hierbei ist $\text{cs}(k)$ die mittlere Cäsiumbelastung in Gruppe k ($k=1, \dots, 16$).

Das Regressionsmodell erlaubt eine gute Anpassung an die Daten; die Summe der Fehlerquadrate ist 13,9 bei 14 Freiheitsgraden ($df=14$). Die Schätzwerte für die Parameters sind $\beta_1 = 0,47 \pm$

0,17 und $\beta_2 = 0,034 \pm 0,011$. Die Abhängigkeit der odds ratios von der Cäsiumkonzentration ist deutlich signifikant ($p=0.0035$). Die odds ratios und die Regressionsgerade zeigt Abbildung 20.

Kombinierte räumlich zeitliche Analyse

In den beiden vorhergehenden Abschnitten wurde der Zusammenhang mit dem zeitlichen Verlauf der Cäsiumbelastung der Schwangeren und die räumliche Abhängigkeit der Fehlbildungsraten von Cäsium-Bodenkontamination getrennt untersucht. Helmut Küchenhoff schlug nun vor, eine kombinierte räumlich-zeitliche Analyse der Fehlbildungsraten vorzunehmen. Sie wurde in Wintersemester 2001/2002 am statistischen Institut der Universität München durchgeführt [19]. Dazu wurde ein neuer Cäsiumterm $cs(k,t)$ definiert, welcher das Produkt ist aus der Cäsium-Bodenkontamination $cs(k)$ im Landkreis k ($k=1, \dots, 96$) und der oben definierten, um 7 Monate zeitlich verzögerten Cäsiumbelastung $cs_7(t)$ der Schwangeren. Das Regressionsmodell ließ außerdem mögliche systematische Unterschiede in den Fehlbildungsraten der Landkreise zu. Zur Bestimmung der Form der Dosis-Wirkungsbeziehung wurden verschiedene mathematische Verfahren angewendet. Die Analyse ergab eine signifikante nichtlineare Beziehung zwischen Fehlbildungsraten und Cäsiumbelastung, die charakterisiert ist durch einen Rückgang der Fehlbildungsraten bei kleinen bis mittleren Cäsiumbelastungen und einen steilen Anstieg bei höheren Cäsiumbelastungen.

Spontanaborte

Die empfindlichste Phase in der Embryonalentwicklung ist die Zeit vor der ersten Zellteilung, also wenige Stunden nach der Befruchtung. In diesem Stadium gilt eine Alles-oder-Nichts-Regel, d.h. entweder die befruchtete Eizelle überlebt ohne Schaden oder sie geht ab. Eine Zunahme von Spontanaborten sollte sich 9 Monate später in einen Rückgang der Geburtenrate zeigen.

Wie schon gesagt, war Bayern das Bundesland mit der höchsten Belastung durch den Tschernobyl-Fallout. Abbildung 21 zeigt die Messwerte der Gammastrahlung in der bodennahen Luft, die bei der GSF durchgeführt wurden. Ende April 1986 stieg die Aktivität steil von $8 \mu\text{R/h}$ auf $110 \mu\text{R/h}$ an und ging in den darauf folgenden 2 Wochen stetig zurück.

Im Februar 1987 fiel die Geburtenrate in Bayern signifikant um 11,4% gegenüber dem Erwartungswert ($p=0.003$). Im gleichen Monat wurden auch in Norwegen, Ungarn und Italien Rückgänge der Geburtenrate beobachtet [20,21,22]. Der Rückgang der Geburtenrate ist auf einen einzelnen Monat begrenzt. Er ist ausgeprägter in Südbayern (-13,4%) als in Nordbayern (-8,7%). Abbildung 22 zeigt die Abweichung der monatlichen Geburtenzahl in Südbayern von Trend der Daten 1984-1989. Das Geburtendefizit in Bayern beträgt im Februar 1987 1154 Geburten.

Diskussion

Die Perinatalsterblichkeit war in Deutschland 1987 signifikant erhöht. Die Analyse der Monatsdaten ergab einen signifikanten Zusammenhang der Perinatalsterblichkeit mit der Cäsiumbelastung von Schwangeren. In Polen, das vom Tschernobyl Fallout stärker betroffen war als Deutschland, war sowohl die Erhöhung der Perinatalsterblichkeit im Jahr 1987 größer, als auch der Zusammenhang mit der Cäsiumbelastung der Schwangeren deutlicher. Keine Erhöhung zeigte sich im Jahr 1987 in den Daten aus England und Wales.

Eine nichtlineare Beziehung zwischen Perinatalsterblichkeit und Cäsiumbelastung findet sich in den bayerischen Daten. Auch die Fehlbildungsraten aus Bayern zeigen eine ungewöhnliche Abhängigkeit von der Cäsiumbelastung. Obwohl die Fehlbildungen im bayerischen Mittel im Jahr

1987 nicht erhöht sind, zeigt eine genauere räumlich-zeitliche Trendanalyse einen Rückgang der Fehlbildungsrate bei niedrigen bis mittleren Belastungen, gefolgt von einem steilen Anstieg bei höherer Cäsiumkonzentration in den Schwangeren. Nach Aussage der Moskauer Biochemikerin Prof. Elena Burlakova [23] sind Strahlenwirkungen charakterisiert durch eine bimodale Dosis-Wirkungsbeziehung mit einem Niedrigdosismaximum, gefolgt von einer Plateauregion oder gar einem Rückgang der Wirkung und einem anschließenden erneuten Anstieg. Diese Form der Dosis-Wirkungsbeziehung ist nach Burlakova eine Folge der Aktivierung der DNA-Reparatursysteme bei Strahlendosen oberhalb einer gewissen Triggerdosis.

Im weißrussischen Gebiet Gomel findet sich ein Anstieg der Perinatalsterblichkeit in der ersten Hälfte der 1990er Jahre im Vergleich zum Rest von Belarus. Mit einem Modell zur Berechnung der Strontiumbelastung der Schwangeren wurde gezeigt, dass sich die Unterschiede im Verlauf der Perinatalsterblichkeit mit der verzögerten Wirkung von radioaktivem Strontium erklären lassen. Dies schließt natürlich andere mögliche Erklärungen nicht aus.

Die Strahlendosis infolge der Inkorporation von Strontium wird in den höher kontaminierten Gegenden von Belarus und der Ukraine um den Tschernobylreaktor auf ca. 5% der Dosis infolge der Cäsiumbelastung abgeschätzt [14]. Andererseits errechnet sich mit diesem Modell für Gomel eine mehr als 10-mal so große Zahl von zusätzlich gestorbenen Neugeborenen aufgrund der Inkorporation von Strontium wie aufgrund der Aufnahme von Cäsium. Diese Diskrepanz würde bedeuten, dass die Wirkung von Strontium mit den gültigen Dosisfaktoren um zwei Größenordnungen unterschätzt wird.

Die hier vorgestellten Befunde sollten mit Vorsicht interpretiert werden, da sie auf ökologischen Studien beruhen. Aber die konsistenten Ergebnisse aus verschiedenen Ländern legen nahe, dass die unter Strahlenbiologen gültige Lehrmeinung der Existenz einer Schwellendosis von ca. 100 mSv für teratogene Schäden [16] in Zweifel gezogen werden muss.

Quellen

1. Little J. The Chernobyl accident, congenital anomalies and other reproductive outcomes. *Paediatr Perinat Epidemiol.* 1993 Apr;7(2):121-51. Review.
2. Kulakov VI, Sokur TN, Volobuev AI, Tzibulskaya IS, Malisheva VA, Zikin BI, Ezova LC, Belyaeva LA, Bonartzev PD, Speranskaya NV, et al. Female reproductive function in areas affected by radiation after the Chernobyl power station accident. *Environ Health Perspect.* 1993 Jul;101 Suppl 2:117-23.
3. Laziuk GI, Kirillova IA, Dubrova IuE, Novikova IV. [Incidence of developmental defects in human embryos in the territory of Byelarus after the accident at the Chernobyl nuclear power station]. *Genetika.* 1994 Sep;30(9):1268-73. Russian.
4. Scherb H, Weigelt E, Bruske-Hohlfeld I. European stillbirth proportions before and after the Chernobyl accident. *Int J Epidemiol.* 1999 Oct;28(5):932-40.
5. Scherb H, Weigelt E, Bruske-Hohlfeld I. Regression analysis of time trends in perinatal mortality in Germany 1980-1993. *Environ Health Perspect.* 2000 Feb;108(2):159-65.
6. Auvinen A, Vahteristo M, Arvela H, Suomela M, Rahola T, Hakama M, Rytomaa T. Chernobyl fallout and outcome of pregnancy in Finland. *Environ Health Perspect.* 2001 Feb;109(2):179-85.
7. Luning G, Scheer J, Schmidt M, Ziggel H. Early infant mortality in West Germany before and after Chernobyl. *Lancet.* 1989 Nov 4;2(8671):1081-3.

8. Lancet. 1990 Jan 20;335(8682):161-2. Comment on: Lancet. 1989 Nov 4;2(8671):1081-3. Infant mortality after Chernobyl. [No authors listed]
9. Korblein A, Kuchenhoff H. Perinatal mortality in Germany following the Chernobyl accident. *Radiat Environ Biophys*. 1997 Feb;36(1):3-7.
10. Grosche B, Irl C, Schoetzau A, van Santen E. Perinatal mortality in Bavaria, Germany, after the Chernobyl reactor accident. *Radiat Environ Biophys*. 1997 Jun;36(2):129-36.
11. Korblein A. Strontium fallout from Chernobyl and perinatal mortality in Ukraine and Belarus. *Radiats Biol Radioecol*. 2003 Mar-Apr;43(2):197-202.
12. Irl C, Schoetzau A, van Santen F, Grosche B. Birth prevalence of congenital malformations in Bavaria, Germany, after the Chernobyl accident. *Eur J Epidemiol*. 1995 Dec;11(6):621-5.
13. Korblein A. Infant Mortality in Germany and Poland following the Chernobyl accident. *Abstr 3rd Inter Conf on Health Effects of the Chernobyl Accident*, 4-6 June, 2001, Kiev, Ukraine. *Int J Rad Med Special Issue Vol. 3 (1-2)*: 63.
14. 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.
15. ICRP Publication 67, 1993. Age dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2: Ingestion dose coefficients. *Annals of the ICRP*, 23, Nos. 3-4.
16. ICRP (2003) International Commission on Radiological Protection. Biological effects after prenatal irradiation (embryo and fetus), Publication 90.
17. Paretzke H. Transfer von Nukliden. *Mensch und Umwelt, Magazin des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit*, December 1986:39-48.
18. Korblein A. Malformations in Bavaria following the Chernobyl accident. *Abstr 3rd Inter Conf on Health Effects of the Chernobyl Accident*, 4-6 June, 2001, Kiev, Ukraine. *Int J Rad Med Special Issue Vol. 3 (1-2)*: 63-64.
19. Engelhardt A. Angeborene Fehlbildungen in Bayern nach dem Reaktorunfall in Tschernobyl. *Statistische Analyse im Rahmen des statistischen Praktikums im WS 2001/2002*. Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Statistik.
20. Ulstein M, Jensen TS, Irgens LM, Lie RT, Sivertsen E. Outcome of pregnancy in one Norwegian county 3 years prior to and 3 years subsequent to the Chernobyl accident. *Acta Obstet Gynecol Scand*. 1990;69(4):277-80.
21. Bertollini R, Di Lallo D, Mastroiacovo P, Perucci CA. Reduction of births in Italy after the Chernobyl accident. *Scand J Work Environ Health*. 1990 Apr;16(2):96-101.
22. Czeizel AE. Incidence of legal abortions and congenital abnormalities in Hungary. *Biomed Pharmacother*. 1991;45(6):249-54.
23. Burlakova EB, Goloshchapov AN, Gorbunova NV, Gurevich SM, Zhizhina GP, Kozachenko AI, Konradov AA, Korman DB, Molochkina EM, Nagler LG, Ozerova IB, Skatlatskaia SI, Smotriaeva MA, Tarasenko OA, Treshchenkova IuA, Shevchenko VA. [The characteristics of the biological action of low doses of irradiation]. *Radiats Biol Radioecol*. 1996 Jul-Aug;36(4): 610-31. [Article in Russian].

24. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Environment” (EGE), August 2005.

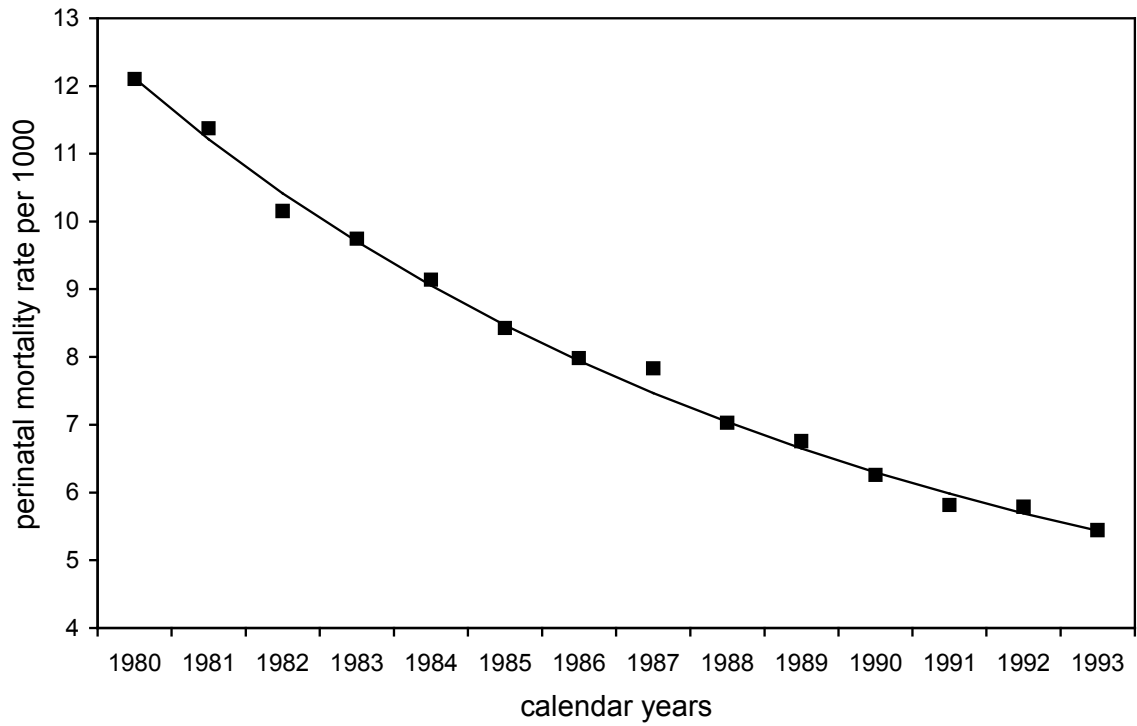


Abbildung 1: Perinatalsterblichkeit in Deutschland und Trendlinie.

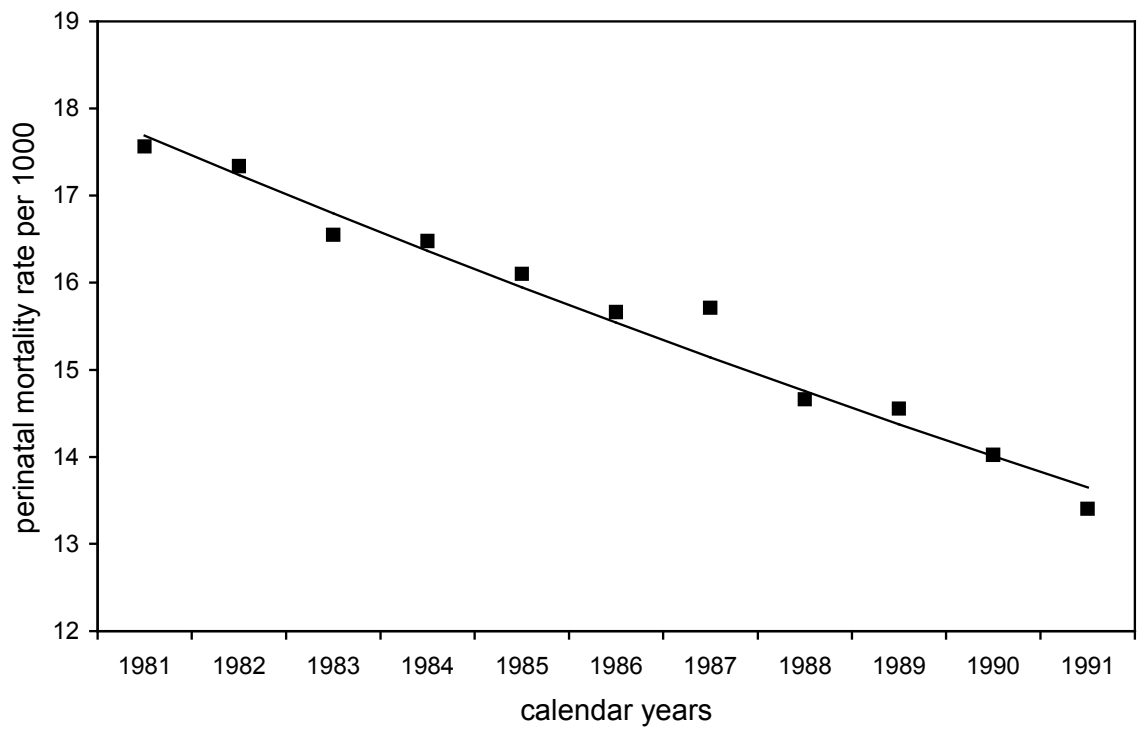


Abbildung 2: Perinatalsterblichkeit in Polen und Trendlinie.

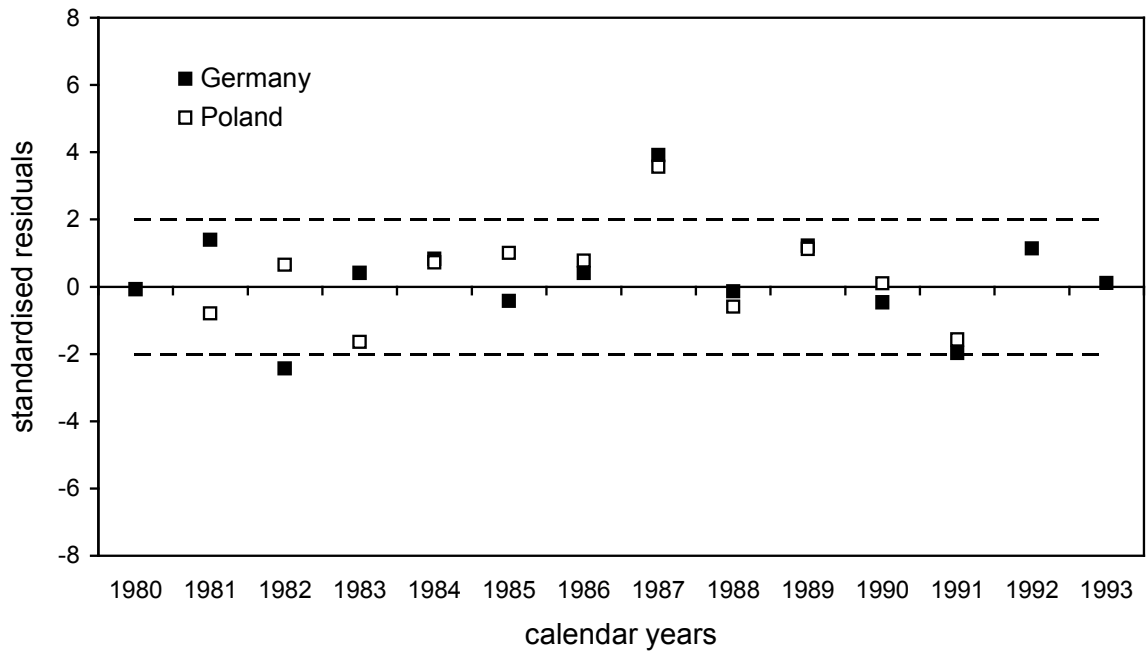


Abbildung 3: Abweichungen zwischen der beobachteten und erwarteten Perinatalsterblichkeit in Deutschland und Polen. Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich von 2 Standardabweichungen.

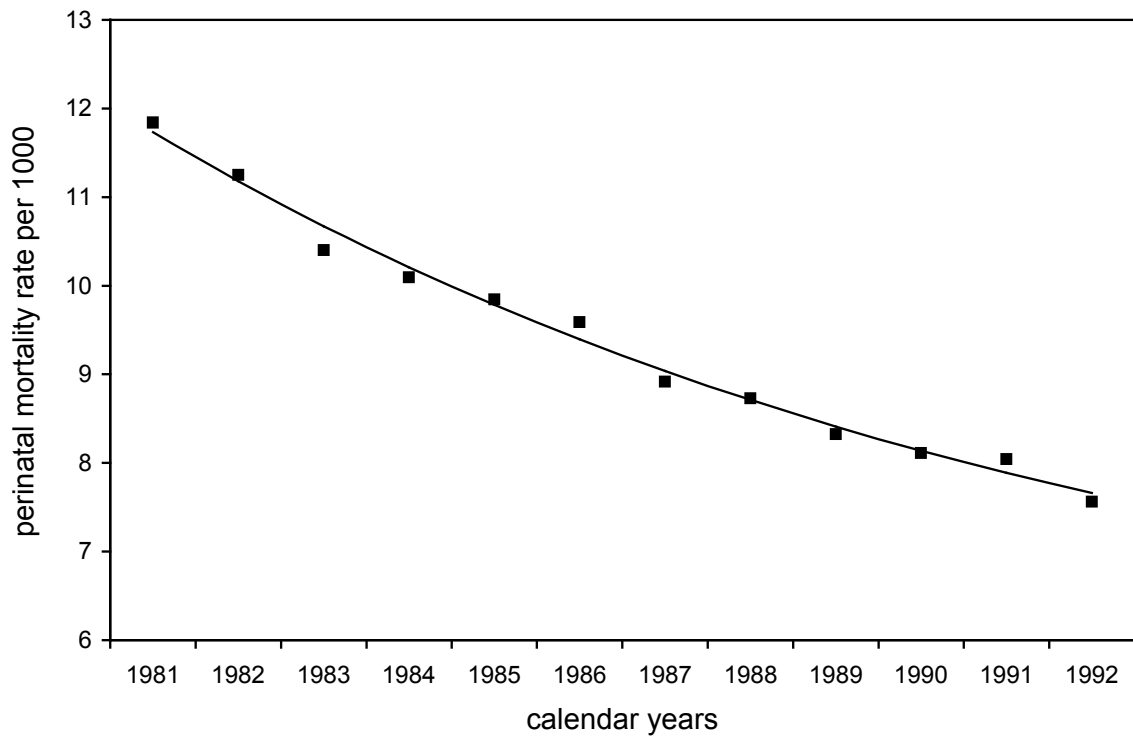


Abbildung 4: Perinatalsterblichkeit in England und Wales and langjähriger Trend

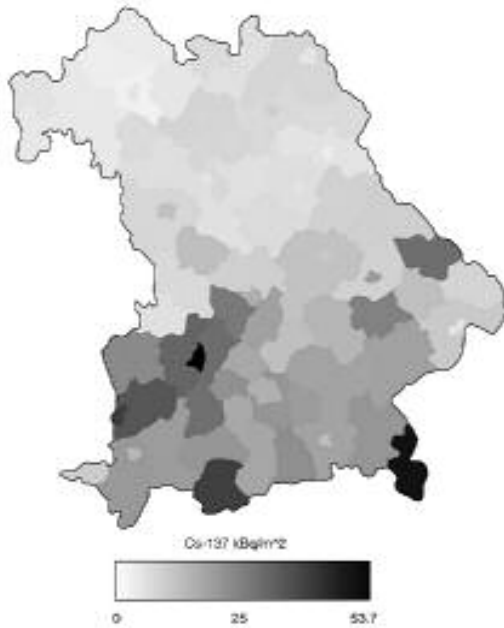


Abbildung 5: Caesium-137 Bodenkontamination in den bayerischen Landkreisen. In Südbayern (Oberbayern, Niederbayern, Schwaben) ist die durchschnittliche Cäsiumbelastung höher als in Nordbayern (Oberpfalz, Oberfranken, Mittelfranken, Unterfranken).

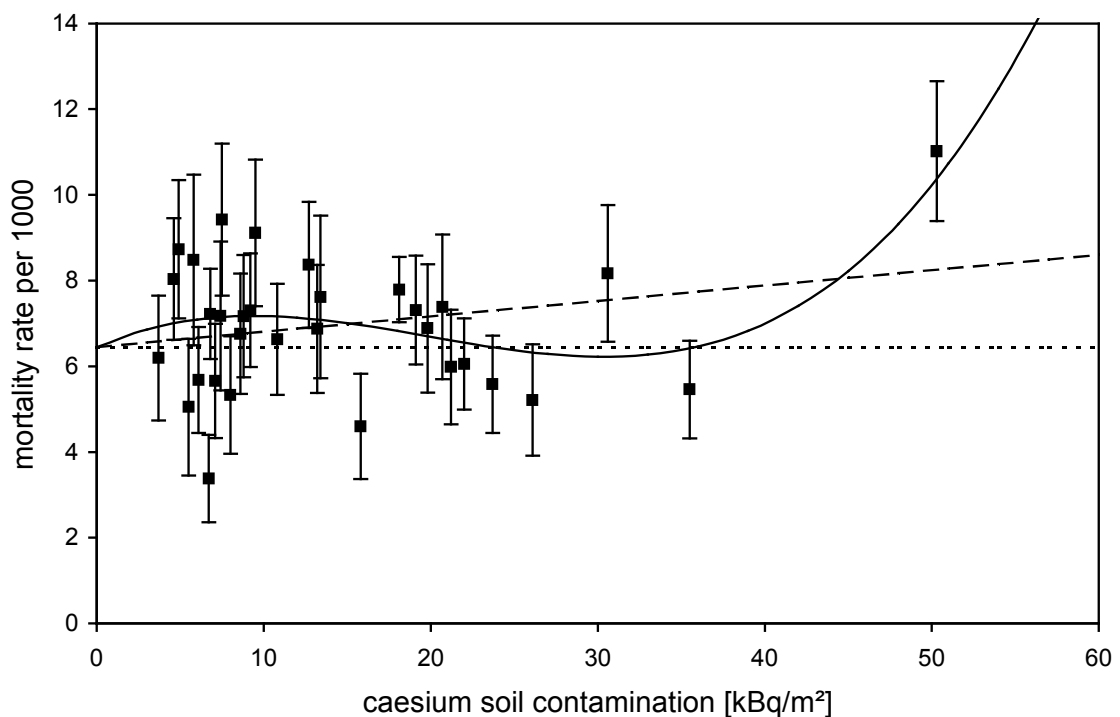


Abbildung 6: Perinatalsterblichkeit in bayerischen Landkreisen, 1987, in Abhängigkeit von der Cäsium-Bodenbelastung. Jeder Datenpunkt enthält die Daten aus drei Landkreisen. Die gepunktete Linie ist die erwartete Rate 1987, die gestrichelte Linie ein linearer Fit, und die durchgezogene Linie ein Fit mit einem Polynom 3. Grades.

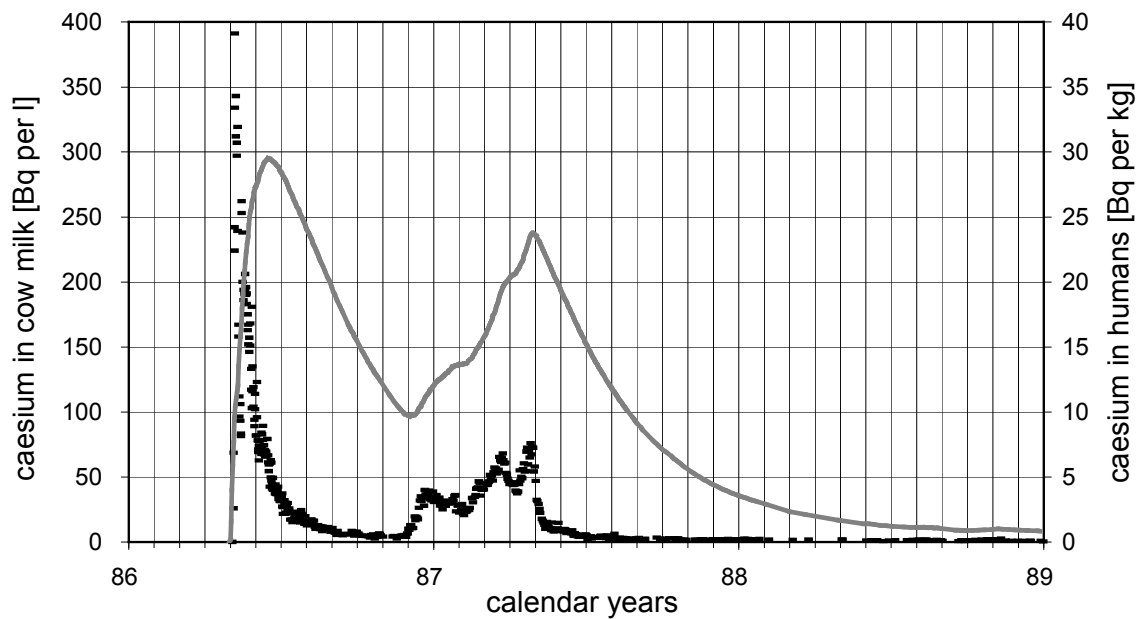


Abbildung 7: Cäsiumkonzentration in Kuhmilch (Punkte) und in schwangeren Frauen (Linie), berechnet mit einer biologischen Halbwertszeit von Cäsium von 70 Tagen.

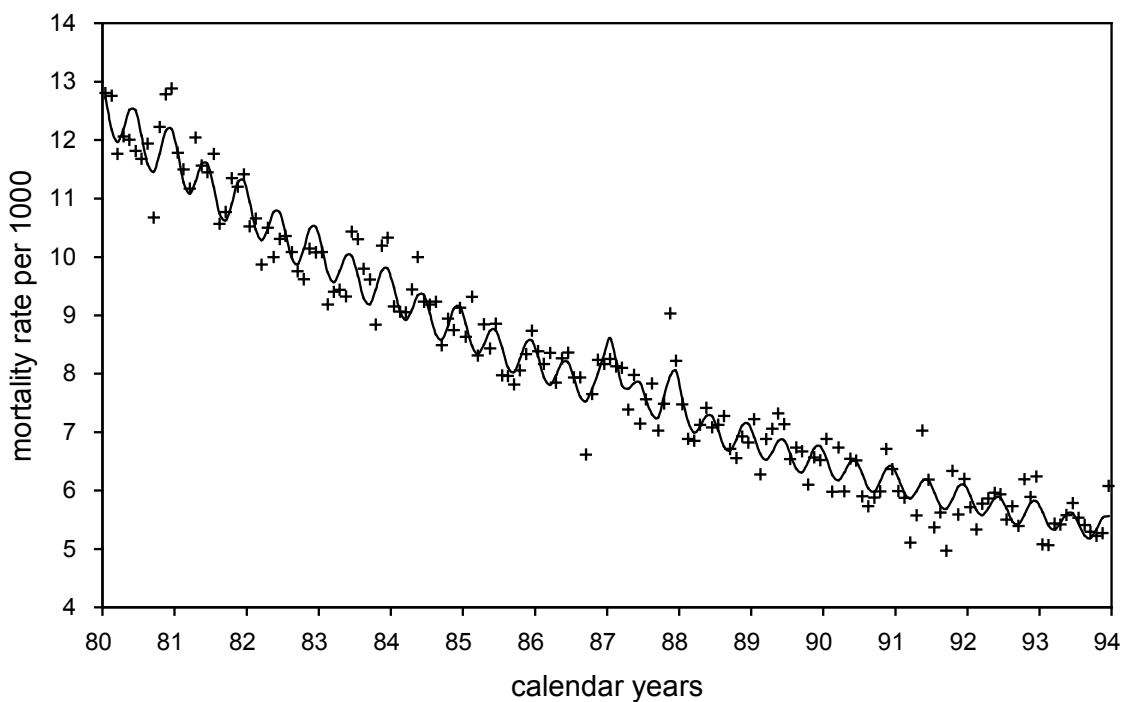


Abbildung 8: Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit in Deutschland und langjähriger Trend

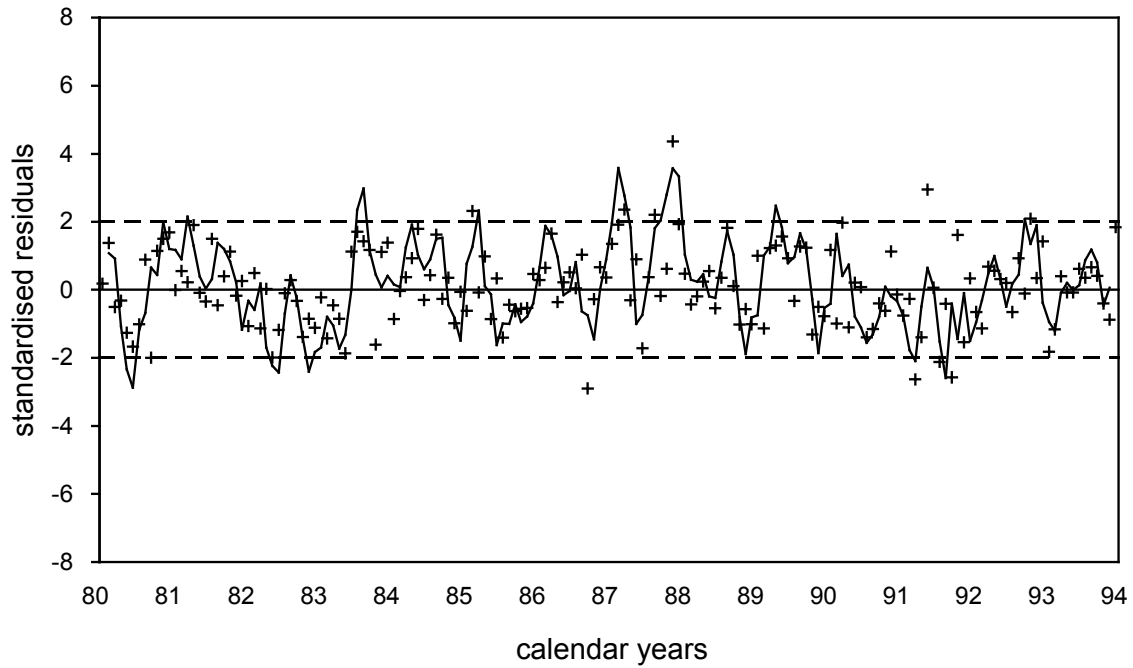


Abbildung 9: Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit in Deutschland, in Einheiten von Standardabweichungen (standardisierte Residuen). Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich von 2 Standardabweichungen.

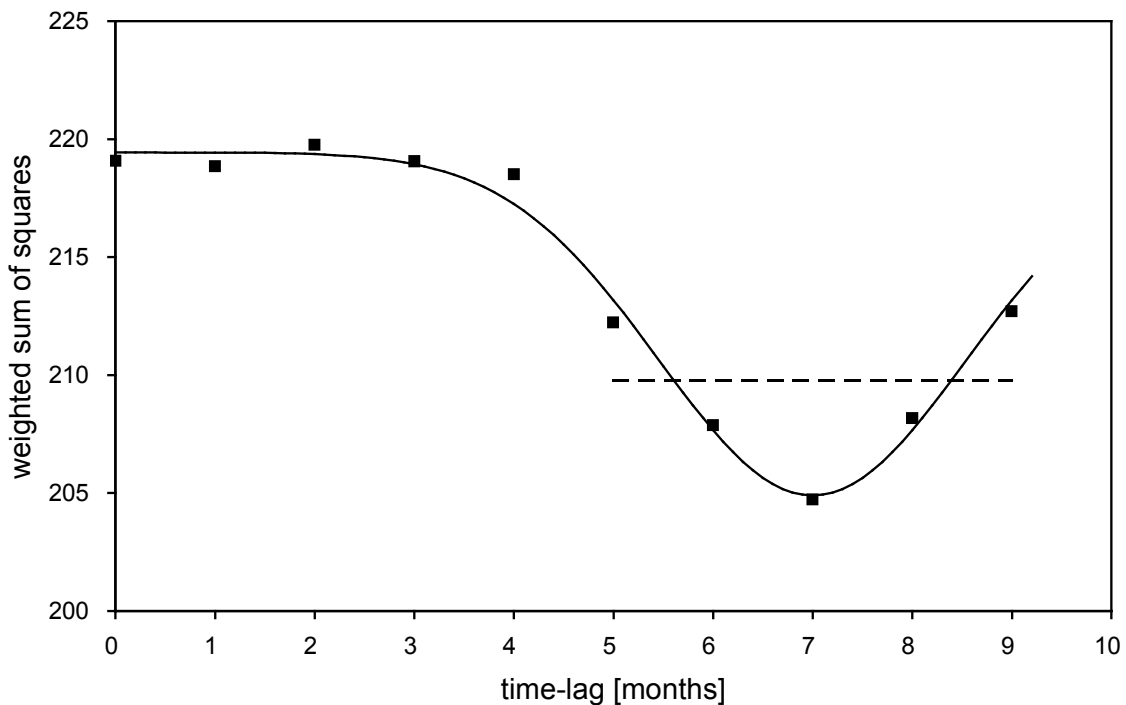


Abbildung 10: Summe der gewichteten Fehlerquadrate als Funktion der Zeitverschiebung zwischen Perinatalsterblichkeit und Cäsiumbelastung der werdenden Mütter. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den 95% Vertrauensbereich für die Zeitverschiebung.

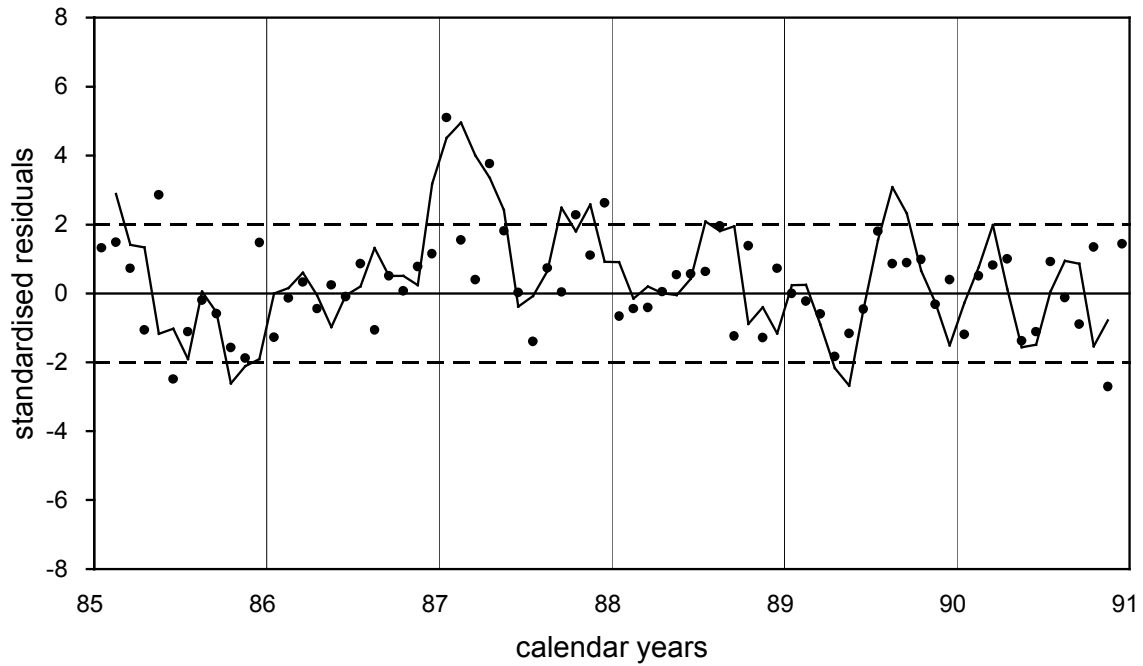


Abbildung 11: Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Monatsdaten der Säuglingssterblichkeit in Polen, in Einheiten von Standardabweichungen (standardisierte Residuen). Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich von 2 Standardabweichungen.

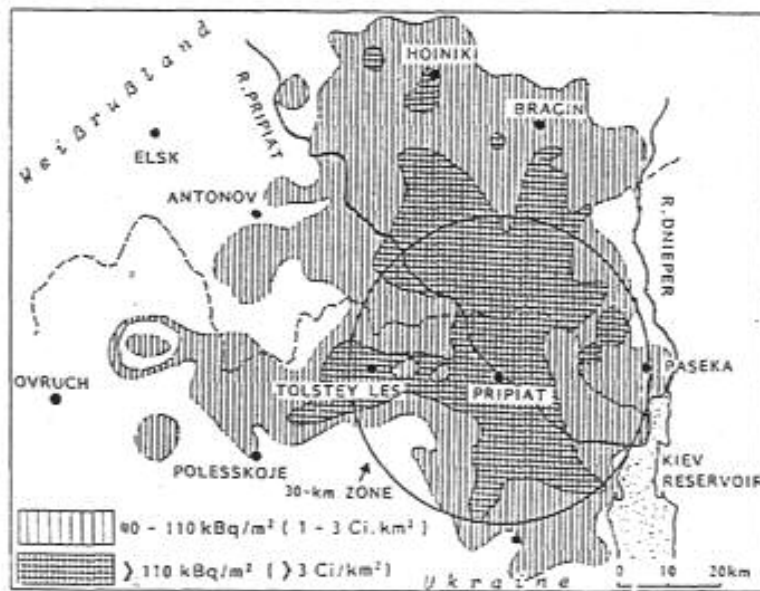


Abbildung 12: Strontium-90 Bodenbelastung um den Tschernobylreaktor (aus "Atomwirtschaft", März 1991). Die schraffierten Flächen kennzeichnen Gegenden mit Strontiumbelastungen größer als 1 Curie pro km^2 (37 kBq/m^2) bzw. 3 Curie pro km^2 (111 kBq/m^2). Der Kreis ist die 30 km Sperrzone.

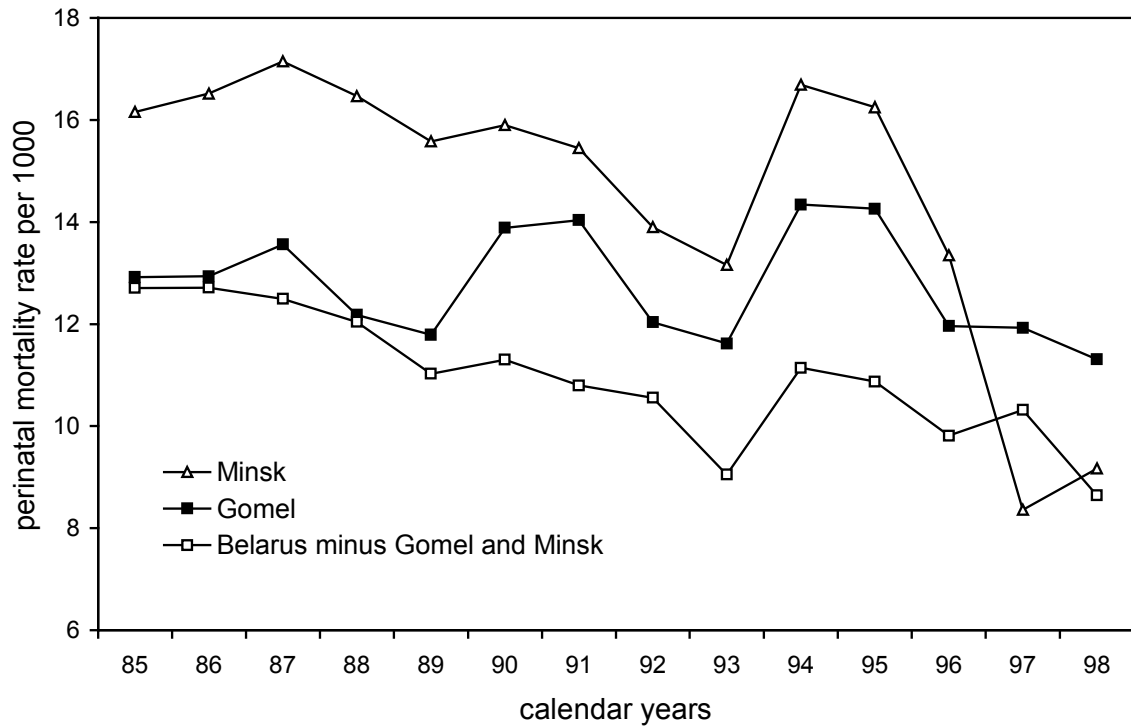


Abbildung 13: Perinatalsterblichkeit in Gomel, der Hauptstadt Minsk, und Belarus ohne Gomel and Minsk. Der Anstieg im Jahr 1994 ist die Folge der Neudefinition des Kriteriums für Totgeburten.

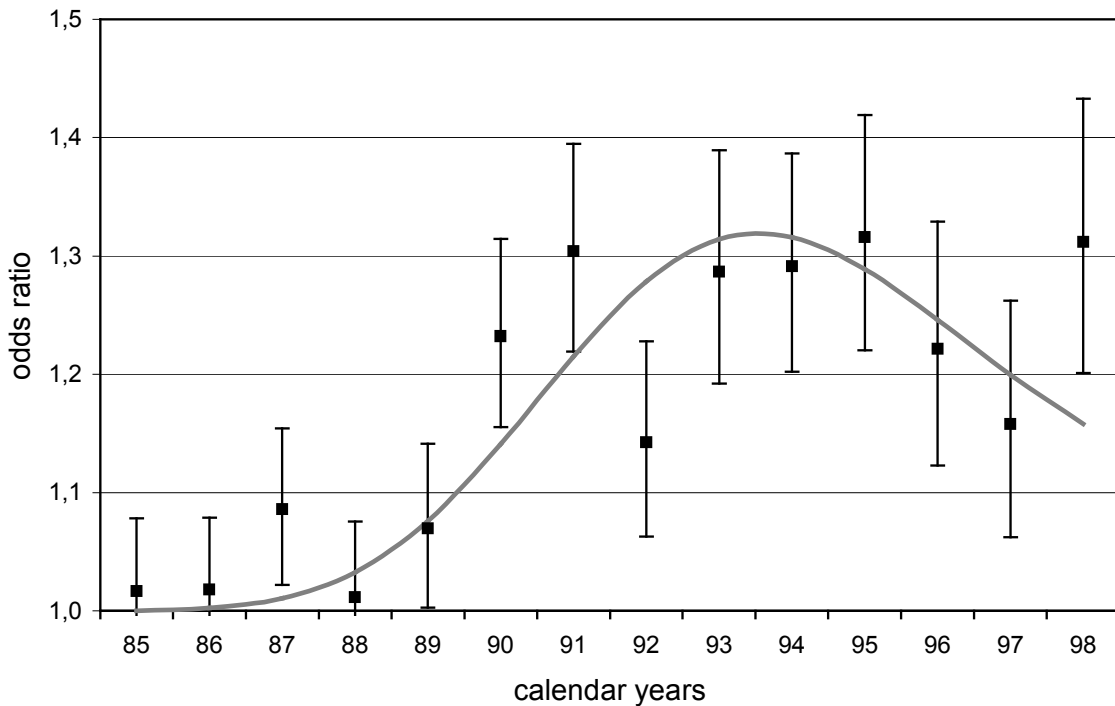


Abbildung 14: Odds ratios der Perinatalsterblichkeit in Gomel gegenüber Belarus ohne Gomel and Minsk und Regressionslinie.

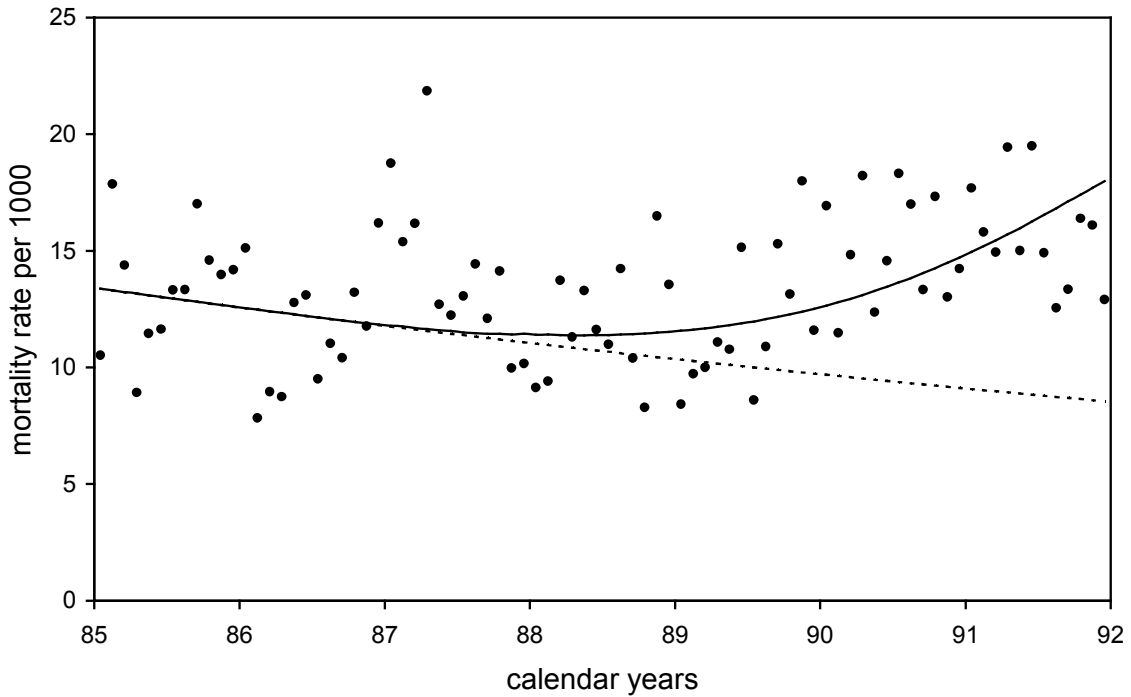


Abbildung 15: Perinatalsterblichkeit im Gebiet Zhytomyr (Ukraine) and langjähriger Trend. Die gepunktete Linie ist der aus den Daten geschätzte erwartete Trend ohne den Strontiumeinfluss.

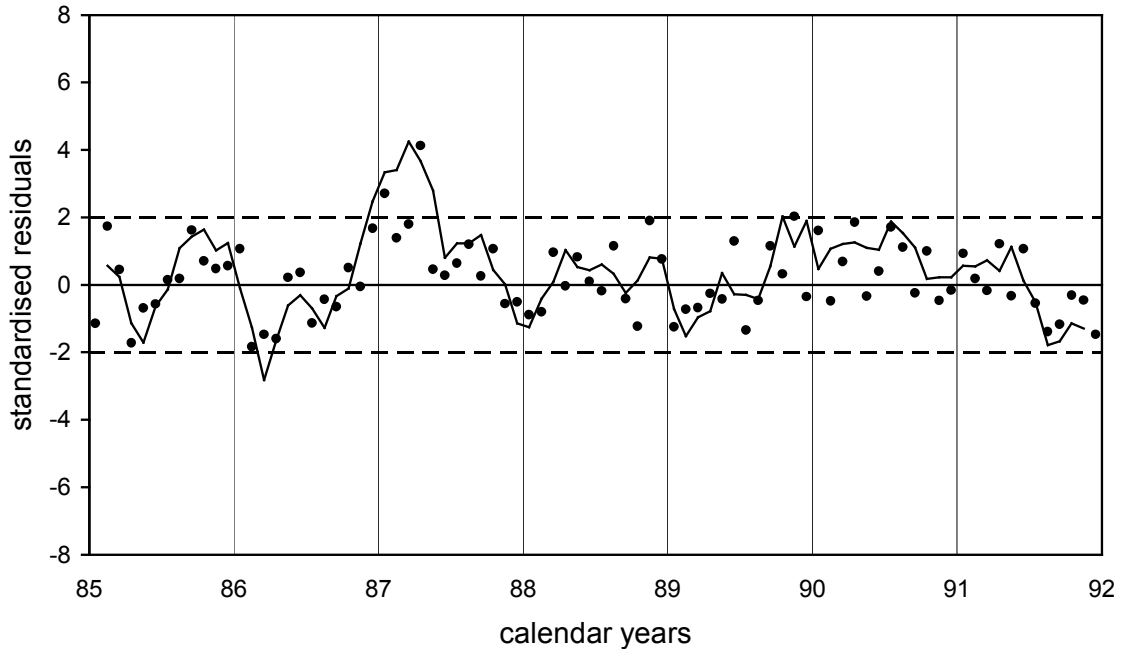


Abbildung 16: Abweichungen zwischen beobachteten und erwarteten Monatsdaten der Perinatalsterblichkeit in Zytomyr in Einheiten von Standardabweichungen (standardisierte Residuen). Die gestrichelten Linien zeigen den Bereich von 2 Standardabweichungen.

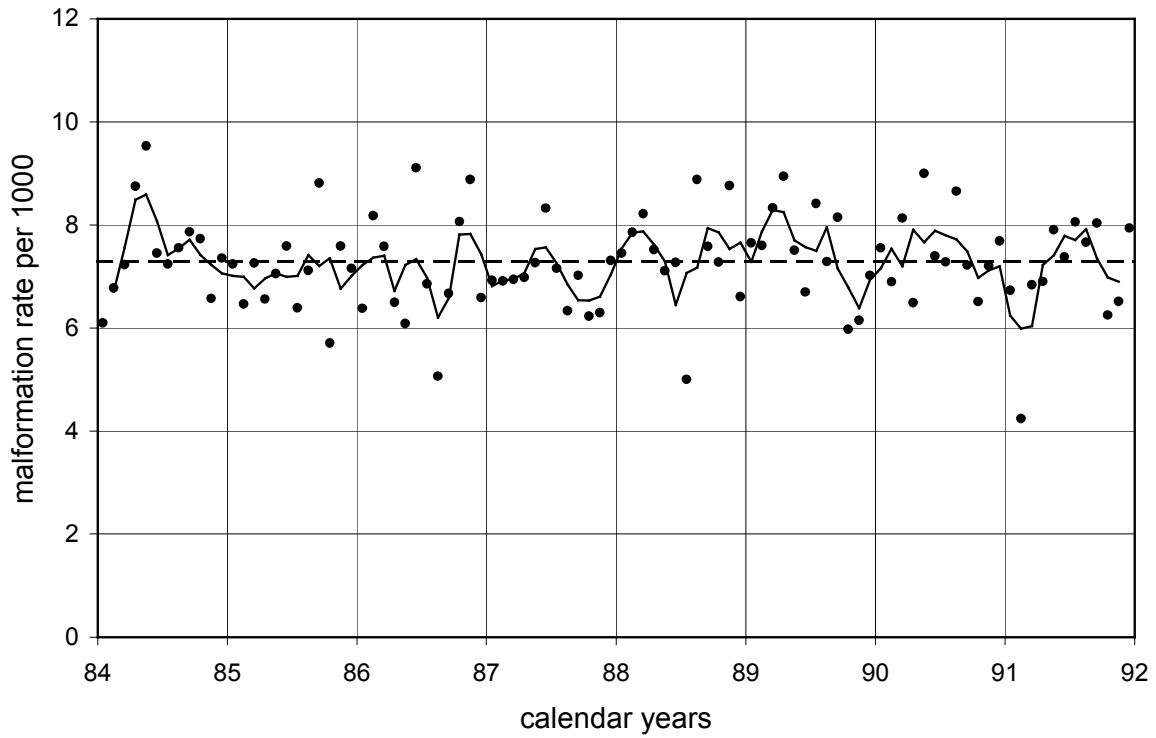


Abbildung 17: Fehlbildungsraten in Bayern und Trendlinie.

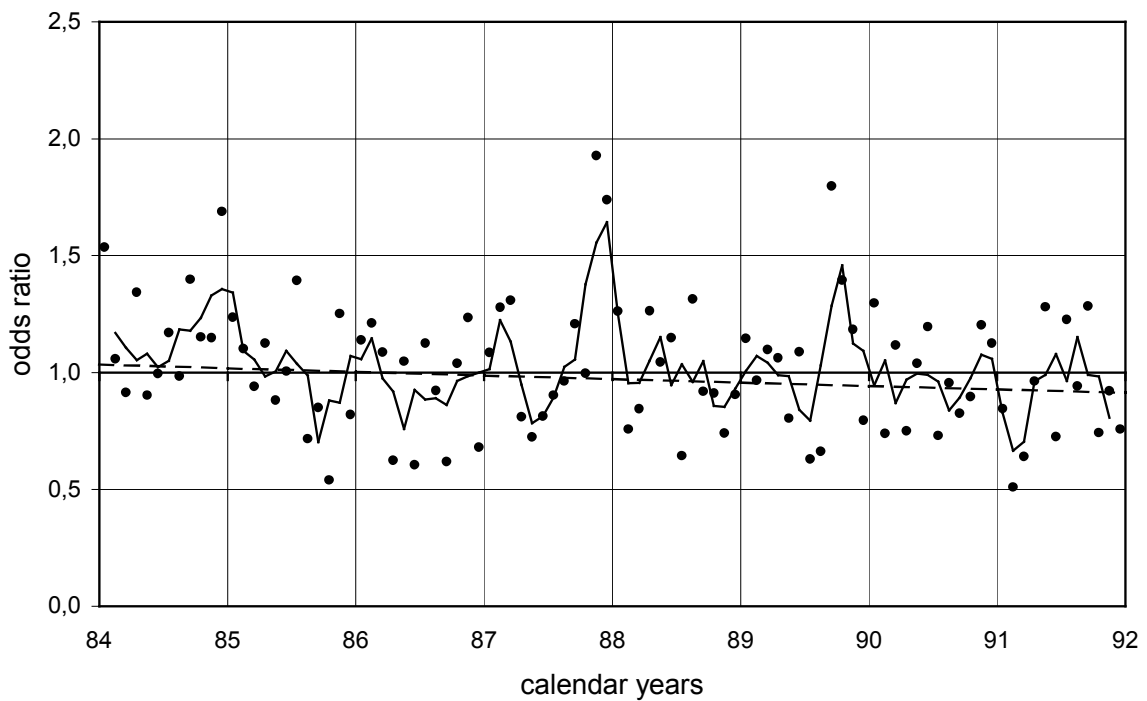


Abbildung 18: Verhältnis der Fehlbildungsraten in Süd- und Nordbayern (odds ratios) und Trendlinie (gestrichelt). Die durchgezogene Linie ist der Dreimonats-Mittelwert der odds ratios.

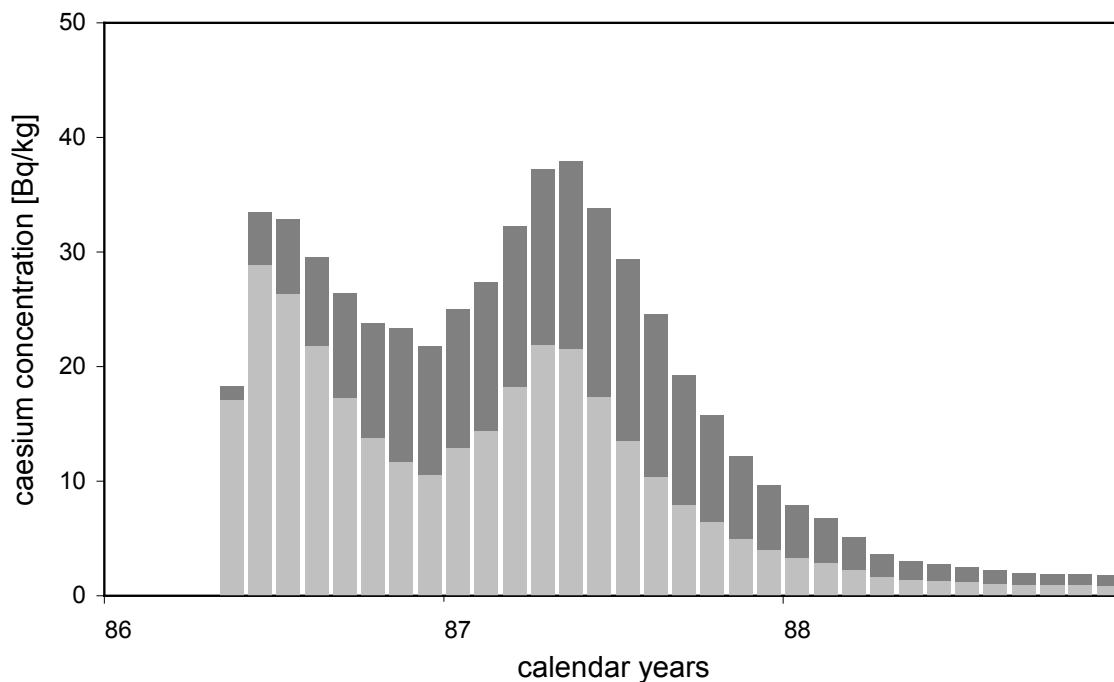


Abbildung 19: Entwicklung der Cäsiumkonzentration in schwangeren Frauen nach Tschernobyl. Die hellen Säulen zeigen den Beitrag von Kuhmilch, die dunklen Säulen den zusätzlichen Beitrag von Rindfleisch, Schweinefleisch und Getreide.

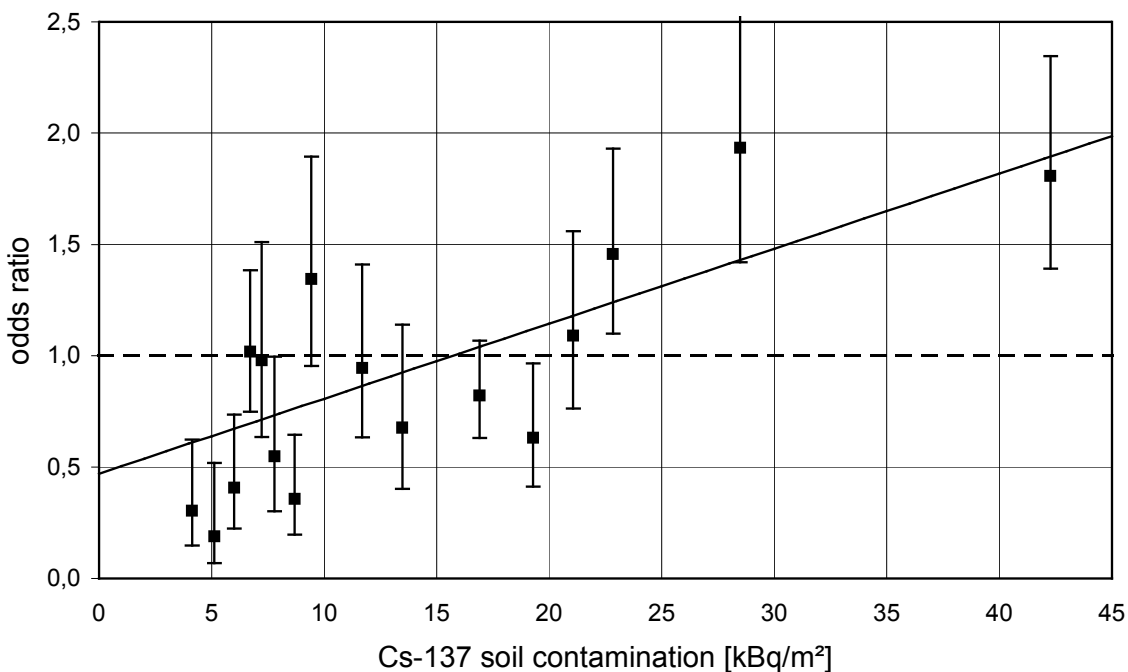


Abbildung 20: Odds ratios der Fehlbildungsraten in Bayern im November/Dezember 1987 in Abhängigkeit von der Cäsium-Bodenkontamination, und Regressionsgerade. Die Datenpunkte stellen jeweils 6 Landkreise dar. Die Fehlerbalken kennzeichnen 1 Standardabweichung.

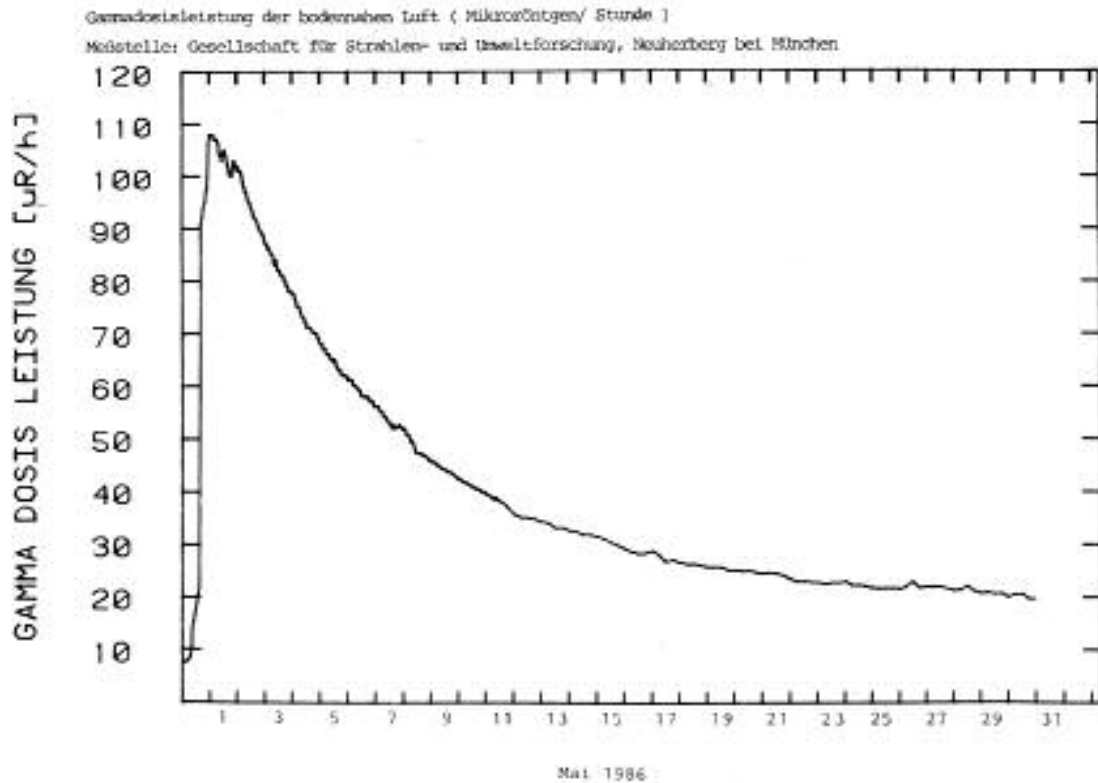


Abbildung 21: Verlauf der Gamma-Ortsdosisleistung in der bodennahen Luft im May 1986 in München (Messungen der GSF Gesellschaft für Umwelt und Gesundheit).

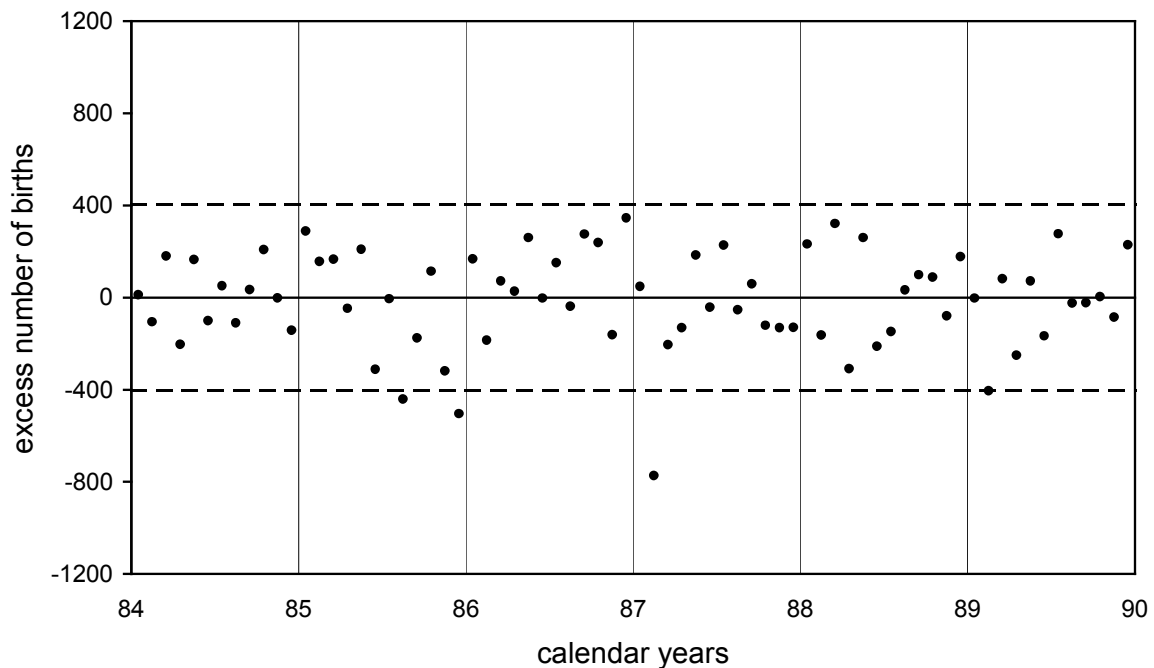


Abbildung 22: Abweichungen der Zahl von monatlichen Geburten in Süddeutschland vom Trend der Jahre 1984-1989. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den Bereich von 2 Standardabweichungen.