



Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Division Principale de la Sécurité des Installations Nucléaires
Divisione Principale della Sicurezza degli Impianti Nucleari

HSK-AN-1816

Rev. 1

DER UNFALL CHERNOBYL
EIN ÜBERBLICK ÜBER URSACHEN UND AUSWIRKUNGEN

November 1986

Dieser Bericht ist erhältlich bei:
Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen
Abteilung Strahlenschutz
CH-5303 Würenlingen
Tel.: (056) 99 39 48 oder 99 38 11

Inhalt

Zusammenfassung

1. Einleitung
2. Anlage Chernobyl
 - 2.1 Reaktortyp RBMK-1000
 - 2.1.1 Anlagetechnik
 - 2.1.2 Sicherheitstechnik
 - 2.2 Unfallablauf
 - 2.3 Psycho-soziologische Aspekte
 - 2.4 Freigesetzte Aktivität (Quellterm)
3. Radiologische Auswirkungen auf die Nahumgebung
 - 3.1 Einsatzpersonal
 - 3.2 Bevölkerung
4. Radiologische Auswirkungen auf Europa
 - 4.1 Ausbreitung der Radionuklide
 - 4.1.1 Wetterlagen in Europa
 - 4.1.2 Transporthöhen
 - 4.1.3 Trajektorienanalysen
 - 4.2 Radiologische Situationsübersicht für Europa
 - 4.2.1 Ortsdosisleistung
 - 4.2.2 Aktivitätsdeposition
 - 4.2.3 Individualdosen
5. Radiologische Auswirkungen auf die Schweiz
 - 5.1 Bestehende Messorganisation
 - 5.2 Wahrnehmung des Ereignisses in der Schweiz
 - 5.3 Aktivität in der Luft
 - 5.4 Abgelagerte Aktivität am Boden
 - 5.4.1 Bodenkontamination
 - 5.4.2 Dosisleistung

- 5.5 Kontamination von Nahrungsmitteln
 - 5.5.1 Aktivität in der Milch
 - 5.5.2 Aktivität im Gemüse und Salat
 - 5.5.3 Aktivität im Fleisch
 - 5.5.4 Aktivität in anderen Nahrungsmitteln
- 5.6 Schutzmassnahmen
 - 5.6.1 Entscheidungsbasis
 - 5.6.2 Getroffene Schutzmassnahmen
- 5.7 Dosisüberblick
 - 5.7.1 Grundlagen für die Dosisberechnung
 - 5.7.2 Individualdosen
 - 5.7.3 Kollektivdosen
 - 5.7.4 Nutzen der Schutzmassnahmen

- 6. Vergleich Unfall Chernobyl mit anderen Belastungen
 - 6.1 Vergleich mit natürlicher Strahlenbelastung
 - 6.2 Vergleich mit Bombenfallout
 - 6.3 Berechnete Strahleneffekte als Folge von Chernobyl
 - 6.3.1 Genetische Effekte
 - 6.3.2 Krebserkrankungen

Verdankung

Referenzen

Zusammenfassung

Der Standort Chernobyl liegt in der Ukraine, etwa 120 km nördlich von Kiev. Es handelt sich bei der verunglückten Anlage um einen Siedewasserreaktor mit Graphitmoderator vom Typ RBMK-1000. Infolge einer Leistungsexkursion kam es zu einer explosionsartigen Freisetzung von Wasserdampf, was zur weitgehenden Zerstörung des Reaktors führte. Die gebrochenen Kühlmittleitungen ermöglichten dann eine Luftzufuhr in die Reaktorkammer und erzeugten einen Graphitbrand, der erst nach mehreren Tagen durch Bedecken des Reaktors mit verschiedenen Materialien und Kühlung mit kaltem Stickstoff gelöscht werden konnte. Aufgrund des Unfallherganges mit Explosionen und Brand und der dadurch bedingten hohen thermischen Energie wurden die radioaktiven Stoffe in grosse Höhen gebracht und weiträumig verteilt. Insgesamt wurden in der Zeit vom 26. April bis zum 6. Mai alle radioaktiven Edelgase an die Atmosphäre freigesetzt, von den übrigen Spaltprodukten etwa 3,5 % des Gesamtinventars. Wegen den günstigen Wetterverhältnissen, dem starken Auftrieb und der Evakuierung sind bei der Bevölkerung in der näheren Umgebung keine akuten Strahlenschäden aufgetreten. Das Einsatzpersonal des Kernkraftwerks wurde hingegen schwer betroffen. Insgesamt waren bis zum August 1986 31 Personen des Einsatzpersonals an den Folgen des Unglücks gestorben. 135'000 Menschen mussten rund um Chernobyl evakuiert werden; für diese Menschen wird geschätzt, dass sie durchschnittlich eine Dosis von 0,12 Sv (12 rem) erhalten haben, was eine Kollektivdosis von 16'000 manSv (1,6 Mio manrem) ergibt.

Von entscheidender Bedeutung für die radiologische Situation in Europa waren die herrschende Windrichtung (höhenabhängige Richtung und Geschwindigkeit) sowie die Niederschlagszonen. Eine Zunahme der externen Dosisleistung bzw. Luftaktivität wurde in der Schweiz erstmals am 30. April 1986 festgestellt. Probenahmen und Ermittlung der Verstrahlungslage erfolgten dann mittels der fest installierten Messnetze sowie der Messwagen und Spürhelicopter. Das Schutzziel für die Bevölkerung lautete gemäss Konzept der Alarmorganisation von Anfang an: Die internen Dosen durch Ingestion sollen kleiner als 5 mSv (500 mrem) bleiben. Da für 1986 die Dosisbeiträge durch externe Bestrahlung und Inhalation relativ wenig zur Totaldosis beigetragen haben, war diese Zielsetzung gut vereinbar mit den Schutzzielen der ICRP

und SSV0. In den meist betroffenen Gebieten der Schweiz wird bei Kleinkindern für den Zeitraum ab Unfallbeginn bis Ende 1986 eine maximale Strahlendosis von 2 mSv (200 mrem) (ohne Einhalten der Empfehlungen) bzw. 1 mSv (100 mrem) (bei Einhaltung der Empfehlungen) geschätzt; bei den Erwachsenen sind es maximal 1,5 mSv (150 mrem). Die durchschnittliche Dosis als Folge von Chernobyl beträgt für 1986 gesamtschweizerisch etwa 0,15 mSv (15 mrem). Zum Vergleich: Die natürliche Strahlenbelastung des Schweizers beträgt im Durchschnitt etwa 3 mSv (300 mrem) pro Jahr. Die Kollektivdosis für 1986 ergibt somit etwa 960 manSv (96'000 manrem). Bei Einhaltung der Empfehlungen zum Schutz der Kinder und Feten kann eine Reduktion der Kollektivdosis dieser Bevölkerungsgruppe von etwa 40 manSv (4'000 manrem) abgeschätzt werden.

1. Einleitung

Am 26. April 1986 um 01 Uhr 24 Minuten (Ortszeit) ereignete sich im sowjetischen Kernkraftwerk Chernobyl, Block 4 ein schwerer Reaktivitätsunfall mit Leistungsexkursion. Der vorliegende Bericht gibt einen Gesamtüberblick über den Ablauf und die Auswirkungen dieses Unfalls. Ausgehend von einer kurzen Beschreibung des nur in der UdSSR existierenden Reaktortyps wird weiter auf den Unfallablauf eingegangen. Die radiologischen Auswirkungen auf das Einsatzpersonal und auf die Bevölkerung in der näheren Umgebung von Chernobyl werden kurz erläutert. Die Freisetzung von Radioaktivität und die daraus resultierende Ausbreitung und Ablagerung der radioaktiven Stoffe über ganz Europa werden kurz skizziert. Anschliessend wird ausführlich auf die radiologische Situation in der Schweiz eingegangen. Die regionalen Aktivitätsverläufe von Luft, Boden und Lebensmitteln und die daraus resultierende Strahlenbelastung für die Bevölkerung werden dargelegt. Die durch Chernobyl verursachte Dosisbelastung wird der natürlichen und zivilisatorisch bedingten Bestrahlung gegenübergestellt. Gesundheitliche Folgen werden diskutiert.

2. Anlage Chernobyl

Der Standort Chernobyl liegt in der Ukraine, etwa 120 km von Kiev entfernt. Dort wurden vier Druckrohrreaktoren RBMK-1000 (RBMK-1000 ist eine Abkürzung für Hochleistungs-Druckrohrreaktor mit einer elektrischen Bruttoleistung von 1000 MW) installiert und zwei weitere sind im Bau. Diese Anlagen werden als Doppelblockanlagen ausgeführt. Die beiden Blöcke 1 und 2 sind in den Jahren 1977 und 1978 in Betrieb gegangen, die Blöcke 3 und 4 in den Jahren 1982 und 1984. Der zuletzt gefertigte Block Nummer 4 erlitt am 26. April einen Unfall, der Gegenstand dieses Berichtes ist.

2.1 Reaktortyp RBMK-1000 (Ref. 1, 15)

Der Druckrohrreaktor vom Typ RBMK-1000 beruht auf Siedewasserkühlung und Graphitmoderation und steht als Leistungsreaktor nur in der UdSSR in Verwendung. Er dient zur Stromerzeugung, Fernwärmeproduktion und eignet sich auch zur Plutoniumproduktion. Die Entwicklung dieses Typs fing in den 50er Jahren mit der 5-MW-Piloteinheit Obninsk an und führte über 200 MW-Einheiten in den 60er Jahren zu 1000 MW-Einheiten in den 70er Jahren. Bis zum Zeitpunkt des Unfalls standen 14 RBMK-1000-Einheiten in Betrieb mit einem Anteil an der Stromproduktion in der UdSSR von rund 5 %. In der Anlage Ignalina-1 in Litauen ist bereits eine Blockleistung von 1500 MW realisiert und man sprach auch von einer Planung von 2000 und 2400 MW RBMK-Einheiten.

2.1.1 Anlagetechnik

Die Funktionsweise dieses Reaktortyps, der auf dem Siedewasserprinzip mit Graphitmoderation beruht, ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Die RBMK-1000 Anlagen werden als Doppelblockanlagen ausgeführt. Dabei sind die beiden Reaktorgebäude und ein dazwischenliegendes, gemeinsames Hilfsanlagegebäude in einem Gebäudekomplex untergebracht. Parallel dazu befindet

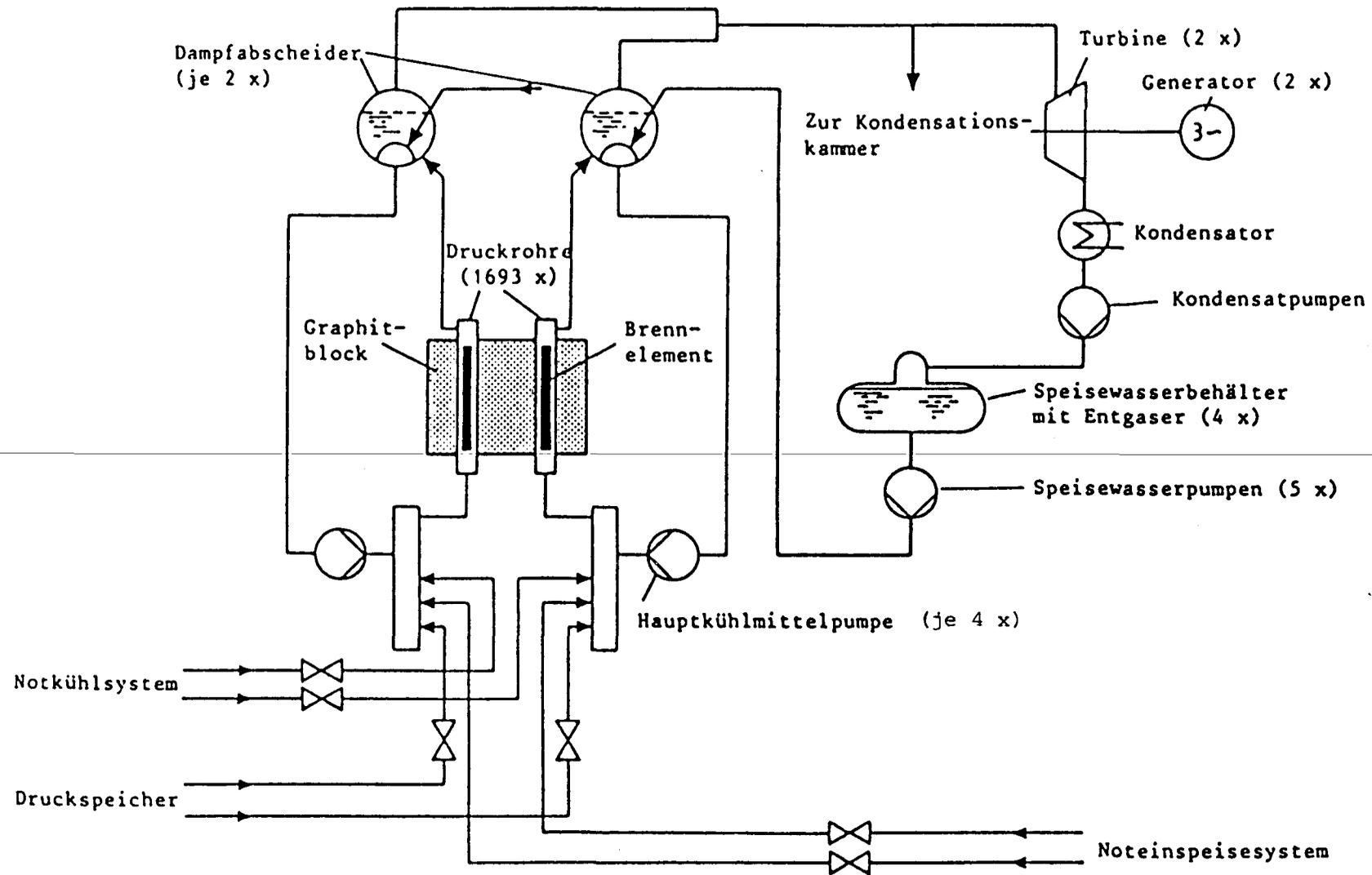


Abb. 1: Prinzipschema der Anlage (Ref. 2)

sich ein Zwischentrakt (separate Warten, Schaltanlagen, Kabelkanäle, Lüftungsanlagen) und daran anschliessend das Maschinenhaus.

Im Reaktorgebäude (Abb. 2) befinden sich im wesentlichen der Reaktorkern, der Hauptkühlkreislauf, die Brennelementlademaschine und eine Vorkehrung zur kurzfristigen Lagerung abgebrannter Brennelemente. Die neueren Anlagen dieses Typs, wie Chernobyl 3 und 4, haben eine Druckumschliessung um die Kernstruktur und sogenannte Druckkammern, die Teile des Hauptkühlkreislaufs umfassen. Diese Umschliessung hat Aehnlichkeit zu einem Containment. Da sie aber Lücken aufweist (das Oberteil der Druckrohre einschliesslich zugehöriger Rohrleitungen ist nur von einer Reaktorhalle in Leichtbauweise umgeben), kann nicht von einem eigentlichen Containment die Rede sein. Aufgrund dieser Auslegung scheint eine völlig andere Philosophie bezüglich Einschliessung des wassergekühlten Kerns und Rückhaltung von Spaltprodukten als in den USA und Westeuropa vorzuliegen.

Die Abmessungen des Reaktorkerns betragen in der Höhe 7 m und im Durchmesser 11,8 m. Als Moderator dient Graphit in Form von Blöcken (25 cm x 25 cm x 60 cm), welche auf einer Tragstruktur aus Stahl stehen. Sie sind mit senkrechten Bohrungen versehen, worin sich vertikale Kanäle für die Brennelemente, die Regelstäbe und die Kerninstrumentierung befinden. In einem derartigen Brennstoffkanal, der als Druckrohr ausgeführt ist, sind 2 Brennelemente mit je 18 Brennstäben vorhanden. In Abb. 3 ist das Prinzip eines Druckrohres im Längsschnitt dargestellt. Zudem sind im Reaktorkern 211 Kanäle für Absorberstäbe untergebracht. Die Brennelemente werden mit Wasser gekühlt, das den Kern von unten nach oben in 2 Hauptkühlmittelschleifen mit je 4 Hauptkühlmittelpumpen (davon je 1 in Reserve) durchströmt. Die Austrittstemperatur des Kühlmittels aus dem Reaktorkern beträgt bei Betrieb 284°C mit einem mittleren Dampfgehalt von 14 %. Der gebildete Dampf wird in Wasser/Dampf-Separatoren vom Kühlkreis abgetrennt und gelangt mittels Dampfleitungen zu den beiden Turbosätzen. Das Kondensat wird über Speisepumpen in die Wasser/Dampf-Separatoren zurückgefördert.

Abb. 2: Schnittzeichnung des Reaktorgebäudes (Prinzipdarstellung des Umschliessungskonzepts ohne genaue Proportionen).

Ref. 2, 3

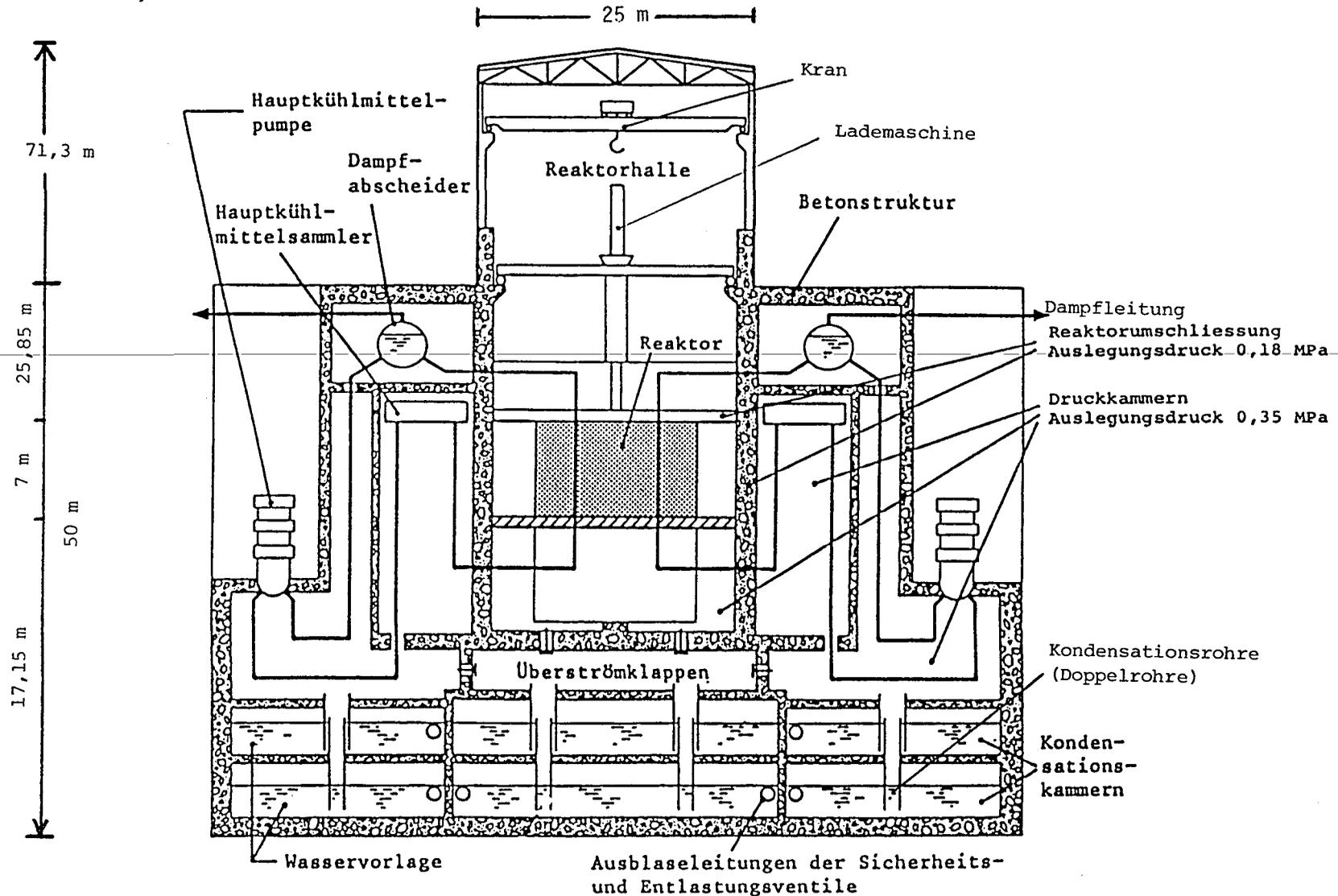
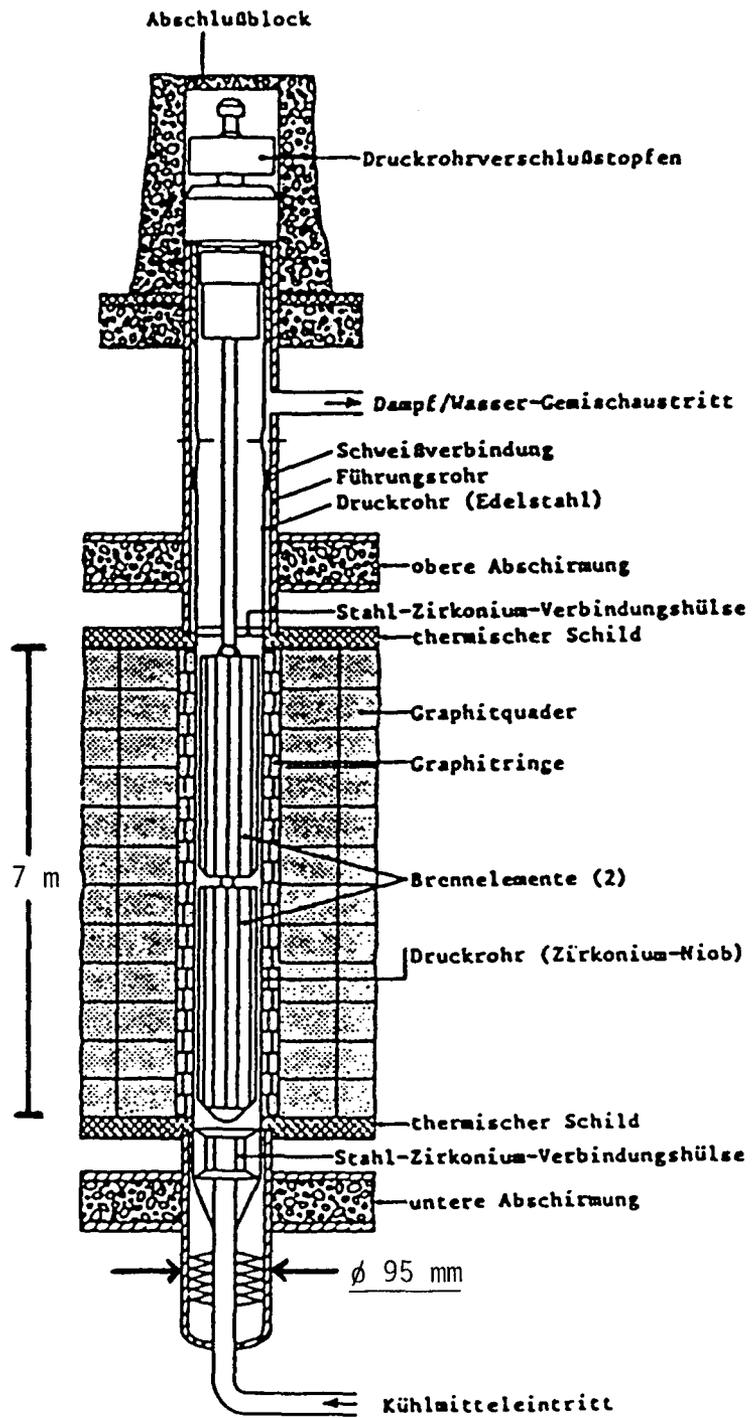


Abb. 3: Prinzipdarstellung eines Druckrohres (Ref. 2)



2.1.2 Sicherheitstechnik

Das Regel- und Abschaltssystem besteht aus 187 Steuerstäben, die von oben einfahren und über die volle Kernhöhe (7 Meter) wirken, sowie 24 halblangen Steuerstäben, die von unten in den Kern fahren. Dieses System erfüllt somit gleichzeitig 3 Funktionen, nämlich Leistungsregelung, normale Abschaltung und Schnellabschaltung. Die Steuerstäbe werden bei einer Reaktorschnellabschaltung mit einer maximalen Einfahrtgeschwindigkeit von 0,4 m/s eingefahren. Die relativ lange Einfahrzeit (ca. 17 s) soll, wenn der Reaktor normal betrieben wird, durch die grosse Anzahl der bewegten Steuerstäbe kompensiert werden. Zudem verlangt eine Vorschrift, dass zu jeder Zeit ein Äquivalent von 30 voll eingefahrenen Steuerstäben im Reaktor sein müssen. Eine weitere Möglichkeit der Schnellabschaltung besteht in der Unterbrechung der Stromzufuhr für die Servomotoren, wodurch diese Stäbe aufgrund ihres Eigengewichtes von selbst in den Kern fallen. Wegen dem entgegengesetzten Wasserstrom fallen die Stäbe jedoch nicht schneller als mit 0,4 m/sec. Ein diversitäres System für eine Reaktorschnellabschaltung ist nicht vorhanden.

Die Steuersignale erhält das Regel- und Abschaltssystem von der Kerninstrumentierung, die aus Ionisationskammern besteht, welche im und ausserhalb des Reaktorkerns angeordnet sind. Zudem existiert ein Messsystem zur Ueberwachung der Leistungsverteilung (Incore-Neutronenflussdetektoren mit Signalaufbereitung mittels Rechner), sowie zur Ueberwachung von Temperatur und Kühlmitteldurchsatz in den einzelnen Druckrohren. Eine Notstromversorgung ist ebenfalls vorhanden, wobei die Diesel anscheinend eine zu langsame Anlaufzeit haben. Dieser Schwachpunkt war die Motivation für das Experiment, das den Unfall von Chernobyl verursacht hat.

Es ist besonders auf die dynamische Instabilität des RBMK-1000 Reaktortyps hinzuweisen. Das Kühlwasser im Druckrohr wirkt neutronenabsorbierend. Eine Zunahme des Dampfanteils in den von einem Wasser/Dampf-Gemisch durchströmten Druckrohren bewirkt durch den positiven Blasen-Koeffizienten (Mass für die Reaktivitätsänderung bei Entfernung von flüssigen Kühlmittel aus dem Kern infolge von Dampfbildung) eine Zunahme der Reaktivität und damit einen Anstieg der Leistung, insbesondere im Bereich kleiner Leistung. Durch die

resultierende Erwärmung des Reaktorkerns wird das verbleibende Wasser weiter verdampft. Es stellt sich dadurch eine positive Rückkopplung ein, welche ohne Gegenmassnahmen zu einer unkontrollierten Leistungsexkursion führt. Störfälle, welche mit einem Blasen Aufbau verbunden sind, wie z.B. Druckabfall, Verlust des Speisewassers oder Ausfall von Umwälzpumpen, müssen daher rechtzeitig durch eine Reaktorschnellabschaltung begrenzt werden können, was normalerweise durch die Automatik gewährleistet ist.

Nach dem Chernobyl-Unfall sollen in der UdSSR folgende wichtige Sofortmassnahmen angeordnet worden sein, um das sicherheitstechnische Verhalten der RBMK-1000 Reaktoren zu verbessern.

- Statt mindestens 30 äquivalenter Steuerstäbe muss neu mindestens ein Äquivalent von 80 voll eingefahrener Steuerstäbe im Kern verbleiben. Dadurch wird der Void-Koeffizient kleiner oder sogar negativ. Ueberdies wird die Möglichkeit einer schnelleren Reaktorabschaltung gewährleistet.
- Durch eine Verriegelung der Steuerstäbe kann eine minimale Eintauchtiefe der Regelstäbe von 1,2 m in den Reaktorkern nicht unterschritten werden.
- Organisatorische Massnahmen sollen sicherstellen, dass die Betriebsvorschriften eingehalten werden.

Mittelfristig sollen folgende Massnahmen das Anlageverhalten weniger empfindlich gegen menschliche Fehleingriffe machen:

- Die Anreicherung des Brennstoffs soll von 2,0 auf 2,4 % Uran-235 angehoben und es sollen fixe Absorber im Kern eingebaut werden. Der Blasen-Koeffizient wird dadurch unabhängig von der Steuerstabposition immer negativ. Die oben erwähnte Sofortmassnahme von mindestens 80 eingefahrenen Steuerstäben wird dann gelockert werden können.
- Ein zweites, diversitäres Schnellabschaltsystem soll installiert werden.

2.2 Unfallablauf (Ref. 15)

Vom 25. bis 29. August 1986 fand bei der Internationalen Atomenergieagentur (IAEA) in Wien ein Expertentreffen statt, an dem sowjetische Fachleute über den Chernobyl-Unfall berichteten. Der Unfallablauf wird im vorgelegten sowjetischen Bericht im Detail beschrieben. Danach handelt es sich um einen Reaktivitätsunfall mit anschliessender Leistungsexkursion als Folge eines Experiments, welches an einem der beiden Turbogeneratoren durchgeführt werden sollte. Das Ziel war, die noch verfügbare elektrische Leistung beim Auslaufen des Turbogenerators zum Antrieb der Umwälz- und Speisewasserpumpen zu verwenden. Bei einem RBMK-Reaktor ist die Eigenbedarfsversorgung bei einem eventuellen Kühlmittelverluststörfall mit Netz-Ausfall sehr wichtig, da der gebrochene Kühlkanal innert Sekunden wieder mit Wasser versorgt werden muss. Um für diesen Fall eines eventuellen Verlustes der externen Stromversorgung besser gerüstet zu sein, ist dieses Experiment von Bedeutung. Im Verlauf des Experimentes wich die Betriebsmannschaft vom ursprünglich vorgesehenen Testprogramm ab und erzeugte eine Notfallsituation, die den Unfall hervorrief.

Die Anlage Chernobyl, Block 4 sollte am 25. April 1986 zu einer planmässigen Wartung abgeschaltet werden. Dabei sollte wie bereits erwähnt, ein Auslaufversuch mit einem der beiden Turbogeneratoren durchgeführt werden. Der Ereignisablauf wird nachfolgend beschrieben. Die Zeitangaben sind Ortszeiten. Abb. 4 gibt dazu einen Ueberblick über den Verlauf der Reaktorleistung während den 24 Stunden vor dem Unfall.

25. April 1986

- 01.00 Die Reaktorleistung wird reduziert.

- 13.05 Die Reaktorleistung beträgt 1600 MWth. Einer der beiden Turbogeneratoren wird abgeschaltet. Die Eigenbedarfsversorgung wird auf den anderen Test-Turbogenerator geschaltet.

- 14.00 Das Kernnotkühlssystem wird vom nuklearen Dampferzeugungssystem laut Testplan abgekoppelt. Die Abkoppelung des Notkühlsystems

ist ein klarer Verstoss gegen die Bedienungsvorschrift, hat aber den weiteren Verlauf des Unfalls nicht wesentlich beeinflusst.

Wegen den Bedürfnissen der Stromproduktion wurde der Reaktor weiter mit 1600 MWth Leistung betrieben. Diese Anweisung vom Lastverteiler verhindert die planmässige Durchführung des Experimentes. Die Mannschaft, die das Experiment durchführen soll, muss warten.

23.10 Die Leistungsreduktion wird wieder aufgenommen. Angestrebt wird eine Leistung von etwa 700 bis 1000 MWth.

26. April 1986

00.28 Das lokale automatische Regelsystem wird wie vorgesehen abgeschaltet. Ein Bedienungsfehler bei der Umschaltung auf das globale Regelsystem verursacht einen Leistungsabfall. Durch diese Leistungsreduktion kollabieren die Dampfblasen, was eine weitere Leistungsreduktion bewirkt. Die Bedienungsmannschaft ist nicht in der Lage, den Reaktor genügend schnell von Hand zu regeln. Die Leistung fällt ungewollt auf weniger als 30 MWth. Diese weitere Unannehmlichkeit führt die Mannschaft dazu, mit allen Mitteln die Leistung wieder zu erhöhen, was sich wegen steigender Xenon-Vergiftung als schwierig erweist.

01.00 Die Reaktorleistung kann mühsam auf etwa 200 MWth, statt wie vorgesehen auf 700 MWth, stabilisiert werden. Beinahe alle Kontrollstäbe müssen deshalb ausgefahren werden. Dies ist ein weiterer Verstoss gegen die Betriebsvorschrift, nach der ein Äquivalent von mindestens 30 Kontrollstäben voll im Kern verbleiben muss.

01.03 Zusätzlich zu den 6 laufenden Hauptkühlpumpen wird eine der beiden Reserveumwälzpumpen zugeschaltet.

- 01.07 Eine weitere Umwälzpumpe wird in der anderen Hauptkühlmittelschleife zugeschaltet. Die Zuschaltung der beiden Reservepumpen erfolgt gemäss Testvorschrift, ist aber bei dieser tiefen Leistung vorschriftswidrig. Die Absicht ist, die elektrische Last der Notkühlpumpen während des Rotorauslaufes mit Hilfe der Reservepumpen zu simulieren. Daraus erkennt man, dass nur an die elektrischen Aspekte des Experimentes gedacht worden ist. Der Wasserdurchsatz im Reaktorkern wird durch diese Massnahme erhöht und der Dampfgehalt somit reduziert. Damit wird aber das Potential einer raschen Reaktivitätserhöhung vergrössert. Die Bedienungsmannschaft versucht vergeblich, manuell auszuregeln. Das Wasserniveau in den Dampf/Wasserabscheidern sinkt unter die Notfallmarke, was normalerweise eine Schnellabschaltung auslöst. Aber die Mannschaft blockiert die dadurch bedingten Reaktorschutzsignale und verletzt dabei nochmals die Betriebsvorschrift.
- 01.22:30 Die Leistungsverteilung und die Kontrollstabstellung im Reaktorkern werden vom Rechner ausgedruckt. Nur noch 6 bis 8 Stäbe sind eingefahren, statt den mindestens erforderlichen 30. Die Betriebsmannschaft realisiert noch nicht, dass eine sofortige Reaktorabschaltung notwendig ist.
- 01.23:04 Die Betriebsmannschaft startet das eigentliche Experiment. Die Turbineneinlassventile am Test-Turbogenerator werden geschlossen und der Rotorauslauf beginnt. Um das Turbinenexperiment nötigenfalls wiederholen zu können, werden Reaktorabschaltsignale überbrückt, wobei lediglich die Abschaltfunktionen wegen hoher Reaktorleistung und kleiner Periode in Betrieb bleiben. Diese Massnahme ist der entscheidende Verstoss gegen die Betriebsvorschriften und die Testvorschriften und hat letztlich den Unfall verursacht.
- 01.23:21 Die Reaktorleistung wird zunächst noch durch das Regelsystem weiterhin auf 200 MW_{th} gehalten. Der durch das Experiment ver-

ursachte Abfall des Kühlmitteldurchflusses führt nach einer gewissen Verzögerung zu einer erhöhten Dampfproduktion im Kern. Wegen der positiven Rückkopplung des Reaktors steigt deshalb die Leistung. Die Regelung kann den sich beschleunigenden Anstieg nicht mehr kompensieren.

01.23:40 Der Schichtleiter reagiert endlich. Er befiehlt alle Abschalt- und Regelstäbe einzufahren, aber die maximale Einfahrgeschwindigkeit beträgt 0,4 m/s, was in dieser Situation mit fast allen Stäben in ausgefahrener Position viel zu langsam ist.

ca. 01.23:44 Laut analytischer Nachrechnung steigt die Neutronenleistung innerhalb von 3 Sekunden kurzzeitig auf das 100fache der Nennleistung. Dabei steigt die mittlere Temperatur des Brennstoffs auf etwa 2000°C, lokal viel höher. Dies führt zu einer Dampfexplosion, wobei die obere Abdeckplatte des Reaktors abgehoben, die Kühlkanäle abgerissen und der Oberteil des Reaktorgebäudes total zerstört wird. Kurz danach folgt eine zweite Explosion, deren Ursache nicht genau bekannt ist. Die ganze Leistungsexkursion hat weniger als 20 Sekunden gedauert.

Die Bedienungsmannschaft hört diese Explosionen und stellt ein abnormales Einfahren der Abschaltstäbe fest. Darauf unterbricht der Schichtleiter die Stromzufuhr der Servomotoren, was ein Einfallen der Stäbe in den Reaktorkern aufgrund ihres Eigengewichtes bewirken sollte. Aber auch so konnte die Einfahrgeschwindigkeit nicht erhöht werden (siehe 2.1.2). Offensichtlich kam diese Aktion einige Sekunden zu spät.

ca. 01.24 Die zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Explosionen werfen brennende Materialklumpen und Funken aus dem Reaktor aus. Einige davon erreichen das Dach der Maschinenhalle des benachbarten Blocks 3 und entfachen dort ebenfalls Feuer. Im weiteren Verlauf kommt es zu etwa 30 Brandherden auf dem Areal. Auch der Graphit des Reaktorkerns beginnt zu brennen.

- 01.30 Die Feuerwehren von Pripjat und Chernobyl werden aufgeboden.
- 02.10 Der Brand auf dem Maschinenhausdach ist gelöscht.
- 02.30 Der Brand auf dem Reaktorgebäudedach ist gelöscht.
- ca. 05.00 Alle Brände auf dem Areal sind gelöscht. Der Graphit brennt aber noch tagelang.
- 05.00 Block 3 wird abgeschaltet.

27. April 1986

- 01.13 Block 1 wird abgeschaltet.
- 02.13 Block 2 wird abgeschaltet.

27. April bis 10. Mai 1986

In den ersten Tagen nach dem Unfall wird primär versucht, durch Abwurf von ca. 5000 Tonnen Material (Bor, Dolomit, Blei, Sand und Lehm) auf den Reaktorkern die Freisetzung radioaktiver Stoffe zu begrenzen und das Feuer zu ersticken. Im Verlauf des 4. und 5. Mai wird eine Zufuhr von kaltem Stickstoff zum Reaktorkern durch bestehende umfunktionierte Rohrleitungen ermöglicht. Dies bewirkt einerseits eine rasche Temperaturabnahme des Reaktorkernes und gleichzeitig eine Inertierung. Der Graphitbrand erlischt mit der Bedeckung des Reaktorkernes. Allfällig verbliebene lokale Brandherde werden mit der Stickstoffzufuhr erstickt.

Bis Ende Juni wird unterhalb des Reaktorgebäudes eine Betonplatte mit einer Kühlmöglichkeit eingezogen. Diese vorbeugende Massnahme soll bei einem Durchschmelzen des Reaktorkerns die Schmelze aufhalten und den Kontakt zum Grundwasser verhindern. Sie erweist sich aber nicht als nötig.

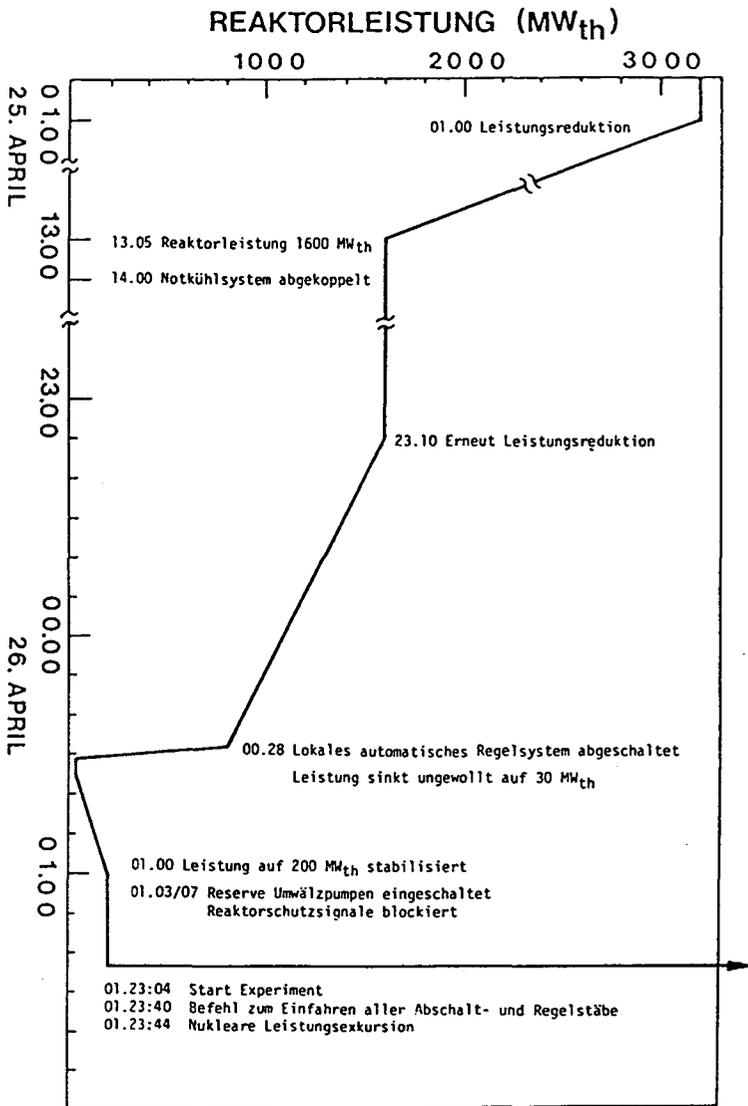


Abb. 4: Verlauf der Reaktorleistung vor dem Unfall (Ref. 4)

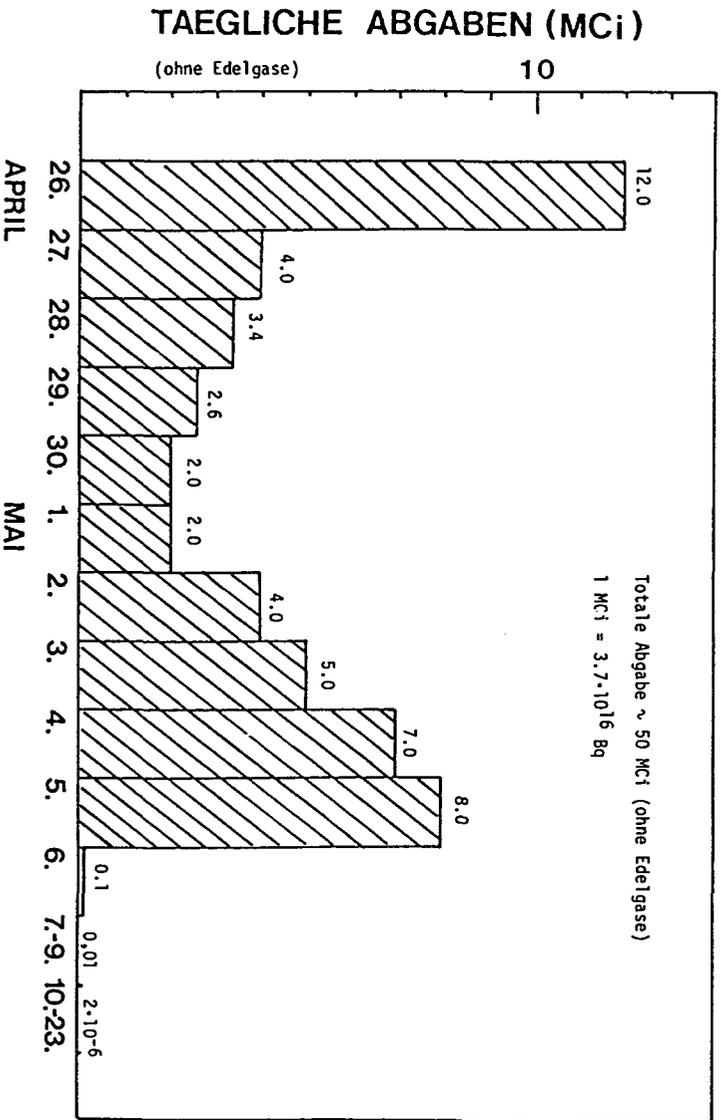


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsabgaben aus dem Unfallreaktor (Ref. 4). (Alle Aktivitäten bezogen auf den 6. Mai 1986)

2.3 Psycho-soziologische Aspekte

An dem im vorhergehenden Kapitel geschilderten Unfall-Ablauf ist ein erschreckendes Fehlverhalten der Betriebsmannschaft und eine weitgehende Unkenntnis über die physikalischen Eigenschaften des RBMK-Reaktors ersichtlich. Es sind zu wenig Unterlagen verfügbar, um dieses Verhalten zu erklären; es sind derzeit nur einige Hinweise möglich:

Der berufliche, gesellschaftliche und politische Status der Betriebsmannschaft und ihrer Mitglieder, dementsprechend auch deren de facto Hierarchie und ihre Stellung gegenüber der Versuchsmannschaft, besonders deren Leiter sind unbekannt.

Ueber die Kommunikation innerhalb der Betriebsmannschaften und zwischen den Schichtgruppen - wegen der Versuchsverzögerung ist ein Schichtwechsel anzunehmen - sowie mit der Versuchsmannschaft ist nichts genaues bekannt. Es wäre denkbar, dass die zweite Schicht nicht realisierte, dass schon einige schwere Verstöße gegen die Betriebsvorschriften hängig waren.

Alle Beteiligten befanden sich in einer Ausnahmesituation, da der Versuch nicht zur Betriebsroutine gehörte. Dazu kamen der Termindruck und der Erfolgswang, die zum Beschluss geführt hatten, den Reaktor nicht abzuschalten, um den Versuch nötigenfalls wiederholen zu können.

Des weitern fehlen uns Angaben über Ausbildungsgrad und Persönlichkeitsprofile aller Beteiligten, aber möglicherweise hatte der externe Versuchsleiter als Nicht-Reaktorfachmann das "Sagen" gegenüber der Betriebsmannschaft.

2.4 Freigesetzte Aktivität

Die Freisetzung radioaktiver Stoffe (ohne Edelgase) in die Atmosphäre betrug im Verlauf des Unfalls bis zum 6. Mai etwa 1,85 EBq ($1,85 \cdot 10^{18}$ Bq =

50 MCi), was je nach Nuklid 2,3 bis 20 % des Kerninventars entspricht. Zudem ist das gesamte Inventar an Edelgasen gleichfalls abgegeben worden. Der zeitliche Verlauf der Aktivitätsabgabe dieser 1,85 EBq ist in Abb. 5 dargestellt. Ein grosser Anteil der Aktivitätsabgabe erfolgte am Unfalltag bei den Explosionen. In den darauffolgenden Tagen nahm durch die Beschüttung des Reaktorkernes mit verschiedenen Materialien die tägliche Aktivitätsabgabe ab. Diese Abdeckung führte zu einer Verschlechterung der Wärmeabfuhr vom Reaktorkern. Die nach wie vor anfallende Nachzerfallswärme bewirkte nach etwa 6 Tagen ein Wiederaufheizen des Brennstoffes und damit einen neuerlichen Anstieg der Aktivitätsabgabe. Erst 10 Tage nach dem Unfall gelang es, durch Zufuhr von kaltem Stickstoff die Temperatur des Reaktorkernes deutlich zu reduzieren und dadurch die Aktivitätsabgaben um mehrere Grössenordnungen zu reduzieren. Der Ausstoss liegt laut bisherigen Angaben gegenwärtig (September 1986) im Bereich von $1 \cdot 10^{10}$ Bq/Tag (=0,4 Ci/Tag) und wird erst nach der Fertigstellung der Betoneinschliessung des Reaktorkernes hoffentlich vollständig unterbunden werden können.

Die in den ersten 10 Tagen abgegebenen Nuklide sind in Abb. 6 aufgelistet. Dabei ist zu erkennen, dass die Edelgase vollständig, die leicht flüchtigen Stoffe wie Jod und Cäsium zu einem grossen Anteil und die schwer flüchtigen Stoffe wie Plutonium und Neptunium auch noch zu einigen Prozenten freigesetzt wurden. Dieser relativ hohe Freisetzunganteil der schwer flüchtigen Stoffe ist auf den Brennstoffauswurf bei den Explosionen zurückzuführen. Gemäss russischer Information liegen 0,3-0,5 % des Kerninventars auf dem Reaktorareal. 1,5-2 % des Kerninventars sind in die Zone 0-20 km und 1%-1,5% über 20 km weit getragen worden.

Abb. 6: Gesamtabgabe (Ref. 4) Bezugstermin: 6. Mai 1986

Abschätzungen der nuklidspezifischen Freisetzung (relativer Fehler 50 %)				
Nuklide	Freigesetzte Aktivität (MCi) 1)			Freisetzunganteil 26.4-6.5
	26.4	27.4-6.5	26.4-6.5	
Kr-85m	0.15	-	0.15	bis 100 %
Kr-85	-	0.9	0.9	bis 100 %
Xe-133	5.0	45.0	50.0	bis 100 %
J-131	4.5	7.3	11.8	20 %
Cs-134	0.15	0.5	0.65	10 %
Cs-137	0.3	1.0	1.3	13 %
Te-132	4.0	1.3	5.3	15 %
Sr-89	0.25	2.2	2.45	4.0 %
Sr-90	0.015	0.22	0.24	4.0 %
Ba-140	0.5	4.3	4.8	5.6 %
Mo-99	0.45	3.0	3.45	2.3 %
Ru-103	0.6	3.2	3.8	2.9 %
Ru-106	0.2	1.6	1.8	2.9 %
Zr-95	0.45	3.8	4.25	3.2 %
Ce-141	0.4	2.8	3.2	2.3 %
Ce-144	0.45	2.4	2.85	2.8 %
Np-239	2.7	1.2	3.9	3.2 %
Pu-238	1.0E-4	8.0E-4	9.0E-4	3.0 %
Pu-239	1.0E-4	7.0E-4	8.0E-4	3.0 %
Pu-240	2.0E-4	1.0E-3	1.2E-3	3.0 %
Pu-241	0.02	0.14	0.16	3.0 %
Pu-242	3.0E-7	2.0E-6	2.3E-6	3.0 %
Cm-242	3.0E-3	2.1E-2	2.4E-2	3.0 %
Total	20.1	80.9	101.	2.3 - 100 %
Total (ohne Edelgase)	15.0	35.9	50.9	2.3 - 20 %

1) 1 MCi = 3.7E+16 Bq

3. Radiologische Auswirkung auf die Nahumgebung

3.1 Einsatzpersonal

Das Personal des Kraftwerks und speziell das Einsatzpersonal zur Bekämpfung des Brandes während den ersten paar Stunden wurde schwer betroffen. 203 Personen erlitten ernsthafte Strahlenverletzungen. Um den Schweregrad dieser Bestrahlungen festzustellen, wurden biologische Parameter wie Frühsymptome und Chromosomenveränderungen benutzt. Die physikalische Dosimetrie brachte als Folge der massiven Kontaminationen offensichtlich wenig Information. Aufgrund der biologischen Dosimetrie (Chromosomenveränderungen) wurden die Patienten in 4 Gruppen eingeteilt. Die schwerstbetroffene Gruppe zählte 20 Personen mit über 6 Sv (600 rem) Knochenmarkdosis, d.h. eine Dosis welche erwarten lässt, dass das Knochenmark dauerhaft geschädigt ist. Aus dieser Gruppe überlebten nur 3 Patienten. Schlimm ausgewirkt haben sich in dieser Gruppe zusätzlich zur hohen Knochenmarkdosis die ausgedehnten Hautverbrennungen primär als Folge der β -Bestrahlung aber auch wegen der Hitze. Bei vielen dieser Patienten war mehr als 50 % der Haut schwer verbrannt, was alleine schon die Ueberlebenschance praktisch auf Null herabdrückte. Zu dieser Gruppe gehörte auch der grösste Teil der 13 Patienten, die fremdes Knochenmark erhielten, von denen aber nur einer überlebte; d.h. die Knochenmarktransplantationen waren unter diesen Umständen wenig erfolgreich.

Im Bereich von 4-6 Sv (400-600 rem) Knochenmarkdosis gab es 23 Patienten. Eine solche Dosis lässt erwarten, dass sich das Knochenmark regenerieren wird, sofern der Patient die Periode der Knochenmarkinsuffizienz überlebt. Aber auch in dieser Gruppe gab es Patienten mit massiven Hautverbrennungen. 7 Personen aus dieser Gruppe starben. 6 davon hatten schwere Hautverbrennungen. 53 Patienten erhielten Dosen von 2-4 Sv (200-400 rem), bei 107 Patienten wurde eine Dosis von 0,8-2 Sv (80-200 rem) bestimmt. Insgesamt waren bis im August 1986 31 Personen des Einsatzpersonals an den Folgen des Unglücks gestorben. Die folgende Tabelle fasst diese Information zusammen:

Akute Strahlenkrankheiten und Todesfälle

	Anzahl Fälle	Todesfälle
über 6 Sv (600 rem) (Regeneration des Knochenmarks unwahrscheinlich)	20	17
4-6 Sv (400-600 rem) (Regeneration des Knochenmarks möglich)	23	7
2-4 Sv (200-400 rem) (Regeneration des Knochenmarks wahrscheinlich)	53	5
0.8-2 Sv (80-200 rem) (Regeneration des Knochenmarks sehr wahrscheinlich)	107	
Unfalltote (nicht radiologisch)		2
<hr/>		
Bilanz bis August 1986	203	31

3.2 Bevölkerung

Am meisten betroffen vom Unfall in Chernobyl war natürlich die Bevölkerung, die in der näheren Umgebung des Reaktors lebte (Abb. 7 und 8). Trotz der grossen Menge radioaktiver Stoffe, die bei der Katastrophe freigesetzt worden ist, ist aber die Bevölkerung in der nahen Umgebung nicht so massiv getroffen worden, wie das unter ungünstigen Umständen hätte geschehen können. Ein wichtiger Grund dafür war die grosse Wärmeentwicklung am Unfallort

Abb. 7: Lokale Geographie (Ref. 4)

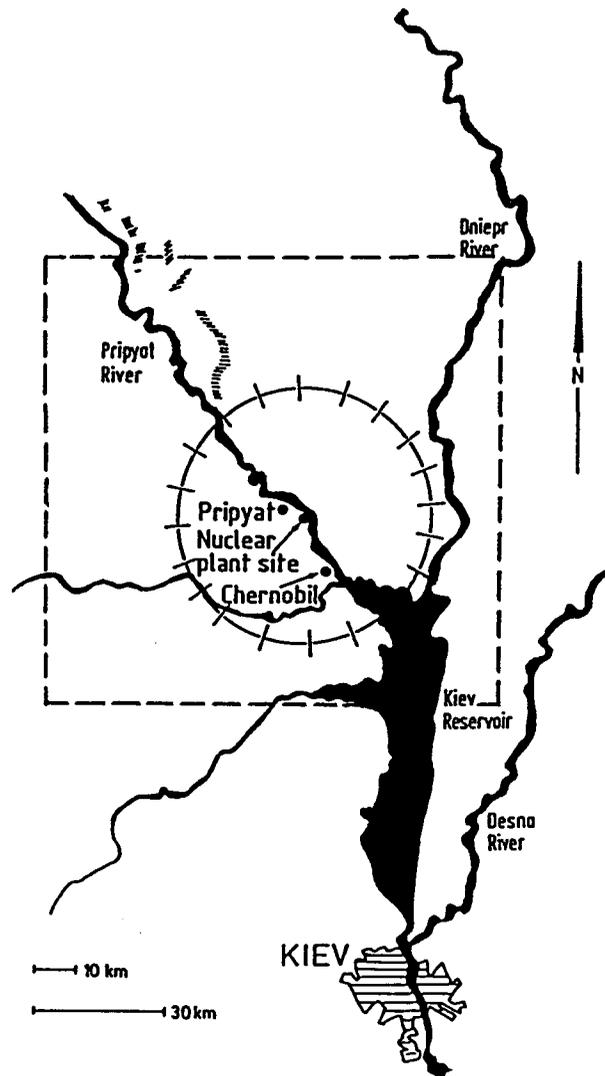
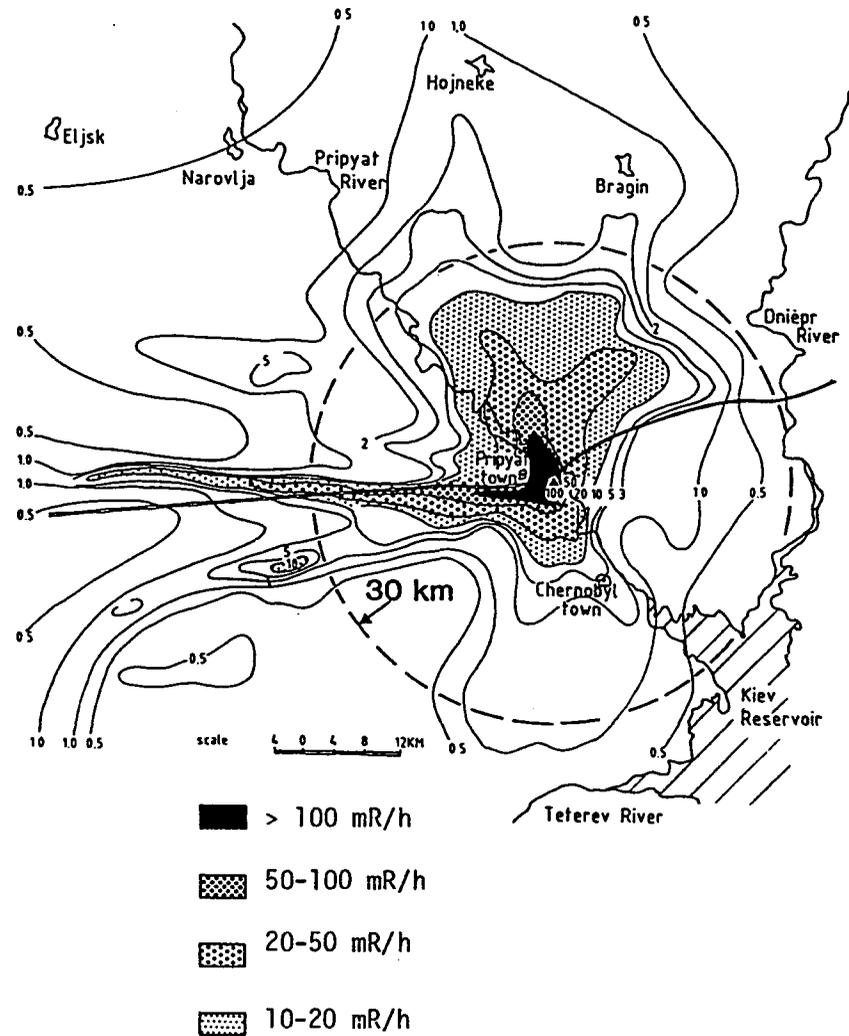


Abb. 8: Ortsdosisleistung (mR/h) in der Umgebung von Chernobyl am 29. Mai 1986. Am 28. April 1986 betrug die Ortsdosisleistung in der Stadt Pripjat 1 R/h. (Ref. 4)



und damit der hohe Auftrieb der radioaktiven Wolke. Das führte zu einer grossräumigen Verschleppung der Radioaktivität, bewahrte aber die unmittelbare Umgebung vor noch schlimmeren Auswirkungen. Da die massive Freisetzung von Radioaktivität über 10 Tage anhielt (Abb. 5), hat die erfolgte Evakuierung der Bevölkerung die akuten Dosen ebenfalls reduziert.

Die wichtigsten Schutzmassnahmen waren:

26. April Die radiologische Ueberwachung der Umgebung zeigte, dass die Stadt Pripjat mit ihren rund 49'000 Einwohnern primär gefährdet war (Abb. 8). Empfehlung an die Bevölkerung, in den Häusern zu bleiben und Fenster und Türen zu schliessen. Verteilung von Jodtabletten zum Schutz der Schilddrüsen primär an Kinder und Jugendliche.
27. April Die Stadt Pripjat wurde im Verlauf von ca. 4 Stunden mit etwa 1000 Autobussen evakuiert.

In den folgenden Tagen bis 5. Mai erfolgten die gleichen Massnahmen in anderen Bevölkerungszentren im Umkreis von rund 30 km um das Werk. Neben insgesamt rund 135'000 Bewohnern wurden ebenfalls einige 10'000 Stück Vieh mit Hilfe von hunderten von Lastwagen evakuiert. Weiters wurden Massnahmen zum Schutz der Wasserversorgung unternommen. Ab dem 1. Mai wurde die Milch in der näheren Umgebung kontrolliert.

Die 30 km Zone wurde in 3 Teile aufgeteilt: Die Spezialzone reicht bis 5 km um das Werk. In nächster Zukunft ist an keine Rückbesiedlung zu denken und es sind dort ebenfalls keine Betätigungen ausser auf dem Werksgelände selbst vorgesehen. In der 5-10 km Zone ist nach gewisser Zeit an einen teilweisen Wiedereintritt für bestimmte Arbeiten gedacht. In die 10-30 km Zone wird möglicherweise die Bevölkerung wieder eingelassen und die Agrarproduktion wieder aufgenommen. Dies ist aber von einem radiologischen Ueberwachungs- und Dekontaminationsprogramm abhängig. An der 30 km Zonengrenze sind Zu- und Ausgänge eingerichtet worden, um die Verschleppung der Kontamination durch Personen und Fahrzeuge zu reduzieren.

Aufgrund der analysierten Luftproben wurde berechnet, dass die Inhalationsdosis vom Radiojod dominiert wurde. Ueber 100'000 Personen wurden bezüglich Radiojod-Gehalt der Schilddrüse überprüft. Jodtabletten, Evakuierung und Milchkontrolle bewirkten, dass die Schilddrüsendosen im allgemeinen unter 0,3 Sv (30 rem) blieben.

Dank dieser Massnahmen konnten akute Strahlenschäden bei der Bevölkerung vermieden werden. Trotz dieser erfreulichen Tatsache darf aber nicht übersehen werden, dass die Zivilbevölkerung sehr hart getroffen wurde. 135'000 Menschen mussten rund um Chernobyl evakuiert werden und es ist zumindest aus unserer Sicht eine offene Frage, ob und wann eine Rückkehr möglich sein wird. Die russischen Sachverständigen schätzen, dass diese 135'000 Menschen durchschnittlich eine Dosis von 0,12 Sv (12 rem) erhalten haben, was eine Kollektivdosis von 16'000 manSv (1,6 Mio. manrem) ergibt. Gemäss der heutigen Erkenntnis im Strahlenschutz sind somit Späteffekte zu erwarten, die ~ 400 Menschen aus der evakuierten Gruppe treffen werden. Weil die Krebsfälle erst im Verlauf von ~ 50 Jahren auftreten werden, und weil in den Industriestaaten heute 15-25 % der Menschen ohnehin an Krebs sterben, wird es selbst bei der evakuierten Bevölkerungsgruppe nicht einfach sein, diese ~ 400 zusätzlichen Fälle festzustellen. Es wäre sehr zu begrüessen, wenn die evakuierte Bevölkerung über Jahrzehnte medizinisch genau überprüft würde, speziell auf Leukämie und Schilddrüsenkrebs bei den jüngeren Personen. Die totale Kollektivdosis, welche die Katastrophe von Chernobyl verursacht hat, wird von offizieller russischer Seite mit 90'000 manSv (9 Mio. manrem) für das Jahr 1986 angegeben und mit 290'000 manSv (29 Mio. manrem) für die nächsten 50 Jahre.

Die folgende Tabelle zeigt die Dosen, welche für die meistbetroffene Bevölkerung rund um Chernobyl abgeschätzt worden sind:

Dosen der evakuierten Bevölkerung

Maximale Ganzkörperdosen	0.3 - 0.4 Sv	(30 - 40 rem)
Durchschnittliche Ganzkörperdosen	~ 0.12 Sv	(~ 12 rem)
Kollektivdosis	~ 16'000 manSv	(~ 1,6 Mio. manrem)
Maximale Schilddrüsendosen (Kinder)	2.5 Sv	(250 rem)
Durchschnittliche Schilddrüsendosen	0.015 - 0.25 Sv	(1.5 - 25 rem)
Durchschnittliche Hautdosen	~ 0.5 Sv	(~ 50 rem)

4. Radiologische Auswirkungen auf Europa

4.1 Ausbreitung der Radionuklide

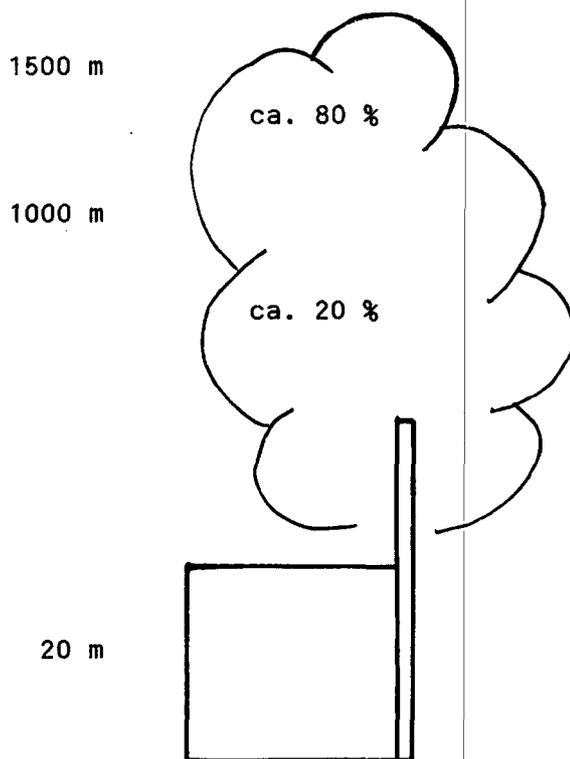
4.1.1 Wetterlagen in Europa

Zu Störfallbeginn am 26. April 1986 lag ein ausgedehntes Hochdruckgebiet mit Zentrum westlich des Urals und eine umfangreiche flache Tiefdruckzone mit je einem Kern über der Ostsee und Südfrankreich. Am 27. und 28. April verlagerte sich das russische Hoch langsam ostwärts mit gleichzeitiger Verlagerung der Tiefdruckzone nach Norden. Dies verursachte in Deutschland und Teilen Skandinaviens Niederschläge. Im Verlauf des 28. und 29. April kam es über Italien zu einer neuen Tiefdruckentwicklung, die mit Niederschlägen von Griechenland beginnend entlang der jugoslawischen Adriaküste bis hin zu den Alpen verbunden war. Gleichzeitig weitete sich das Hochdruckgebiet über den Azoren nach Nordosten aus und verstärkte sich noch im weiteren Verlauf, was zu einer nordöstlichen Bodenströmung über dem östlichen Mitteleuropa führte. Die Kaltfront des Islandtiefs erreichte am 30. April von Westen her das Gebiet Deutschland, Schweiz und Norditalien und führte im Verlauf des 30. April und 1. Mai zu teilweise gewittrigen Niederschlägen. Im Tessin und in der Westschweiz wurden zu dieser Zeit keine Niederschläge registriert. Hinter dieser Kaltfront bildete sich eine eigenständige Hochdruckzelle aus, dessen Zentrum über den Golf von Biscaya, den Kanal, die Nordsee und im Verlauf des 2. und 3. Mai über die Ostsee zog. An seiner Südseite bewirkte dieses Tief eine östliche Strömung. Hinter diesem Hoch bewirkte ein Tief südlich von Irland den Durchzug einer Kaltfront über Spanien, Frankreich und weiter in östlicher Richtung. Dies führte gleichzeitig mit dem von Nordafrika Richtung Norden ziehenden Tief zu den Regenfällen vom 3.-5. Mai über Teilen Frankreichs, Italien und speziell im Westen der Schweiz, sowie im Tessin. Im Tessin waren diese Niederschläge mit Spitzenwerten von 25 Millimetern am Sonntag den 4. Mai in Lugano doch recht ergiebig. Das Tief im Raum um Irland steuerte in den nächsten Tagen eine neue Front über Mitteleuropa, was zu neuerlichen Niederschlägen in Teilen der Schweiz führte und in der Nacht auf den 8. Mai die ganze Schweiz erfasste. Hinter dieser Front stellte sich in der Schweiz am 9. Mai Hochdruckeinfluss ein, der während den nächsten Tagen bestehen blieb.

Ab diesem Zeitpunkt war die radioaktive Wolke praktisch nicht mehr wirksam, denn weitere Regenfälle brachten keine merklichen zusätzlichen Ablagerungen radioaktiver Stoffe am Boden.

4.1.2 Transporthöhen

Aufgrund des Unfallherganges mit Explosionen und Brand und der dadurch bedingten hohen thermischen Energie wurden die radioaktiven Stoffe in grosse Höhen gebracht. Für den Unfallort selbst nimmt man für die Anfangsphase etwa folgende höhenabhängige Quellstärken an:



Für den westlichen Teil der UdSSR, über den die kontaminierten Luftmassen zogen, liegen für die Zeitspanne mit den hohen Aktivitätsabgaben routine-

mässige meteorologische Messungen der Schichtung der Atmosphäre vor. Daraus kann man eine maximale Mischungshöhe (Durchmischung der Luftmassen) von etwa 2500 m ableiten. Bei dem weiträumigen Luftmassentransport sind gleichfalls radioaktive Stoffe in Höhen bis etwa 8 km getragen worden.

4.1.3 Trajektorienanalysen

Die unter Punkt 4.1.1 beschriebene Wetterlage in der bodennahen Schicht bestimmte zusammen mit der Höhenwetterlage die Ausbreitungsvorgänge. In Abb. 9 sind die Trajektorien (Kurve, die durch die Verfolgung eines Luftpaketes entsteht) für vier verschiedene Ausbreitungshöhen für den Unfallbeginn dargestellt. Es fällt dabei auf, dass der Transport der Luftmassen entsprechend den Transporthöhen sehr unterschiedlich erfolgte. Aus diesem Grund wäre der höhenabhängige Luftmassentransport während der vollständigen Freisetzungsperiode (26. April bis 6. Mai) von grossem Interesse. Ferner sind in dieser Abbildung ebenfalls die Niederschlagsgebiete ersichtlich. In Abb. 13 wird ein weiteres Beispiel eines derartigen Luftmassentransports gegeben. Interessant ist dabei der verschlungene Transportweg. In Abb. 10 ist der Luftmassentransport für den Anfangszeitraum des Unfalles mit den hohen Aktivitätsfreisetzungen dargestellt. Es werden hierbei mittlere Trajektorien zwischen 3000 m Höhe und Bodenniveau verwendet, die weiters in Abb. 11 und 12 sehr deutlich durch die Umhüllung der kontaminierten Luftmassen die betroffenen Gebiete und den Durchzug der radioaktiven Wolke am 30. April über die Schweiz darstellen.

4.2 Radiologische Situationsübersicht für Europa

Von entscheidender Bedeutung für die radiologische Situation in Europa war primär die Windrichtung. Wie bereits im Abschnitt 4.1.3 näher dargelegt, ist das Windfeld (Richtung und Geschwindigkeit) für den Transport der kon-

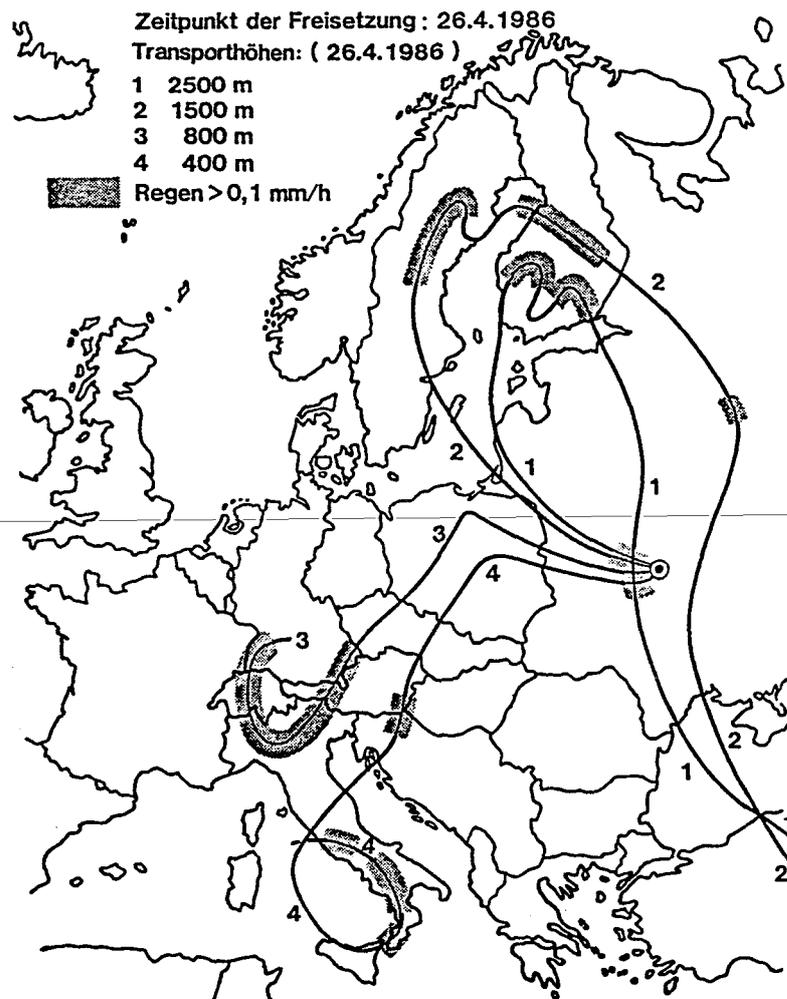


Abb. 9: Trajektorien als Funktion der Transporthöhe
 (Die Kurven entstehen durch die Verfolgung
 eines Luftpaketes) (Ref. 7)

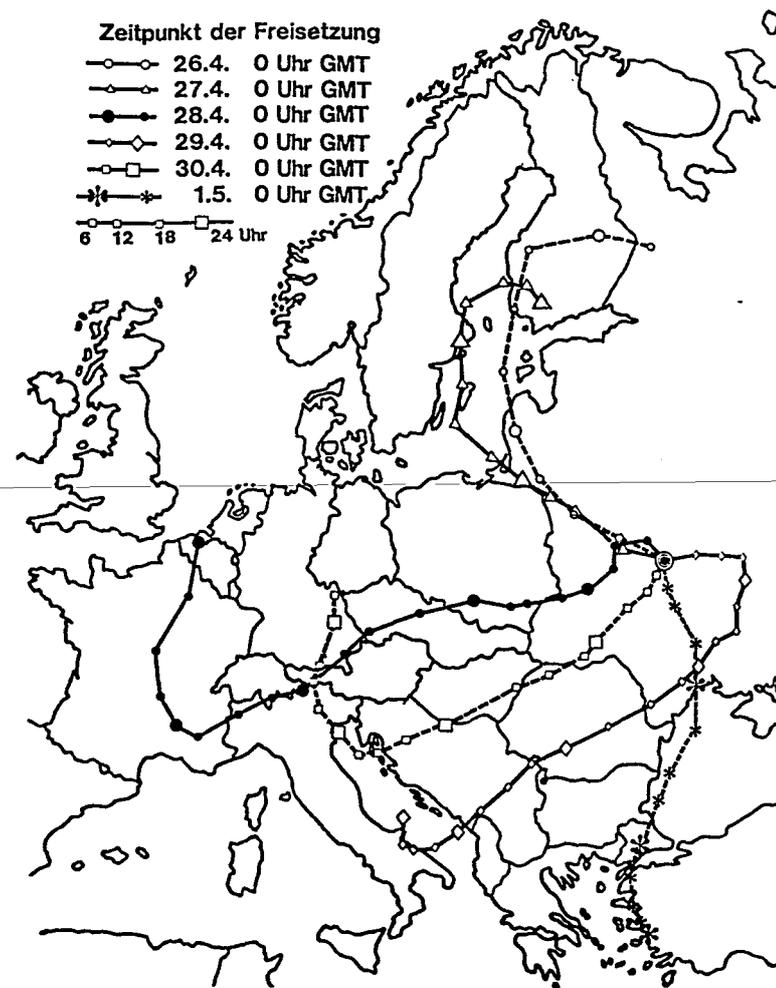


Abb. 10: Trajektorien mit verschiedenen Startzeiten
 in Chernobyl (siehe Text Abb. 9) (Ref. 5)

Abb. 11: Umhüllende der kontaminierten Luftmassen.
29.04.1986, 24.00 Uhr (Ref. 7)

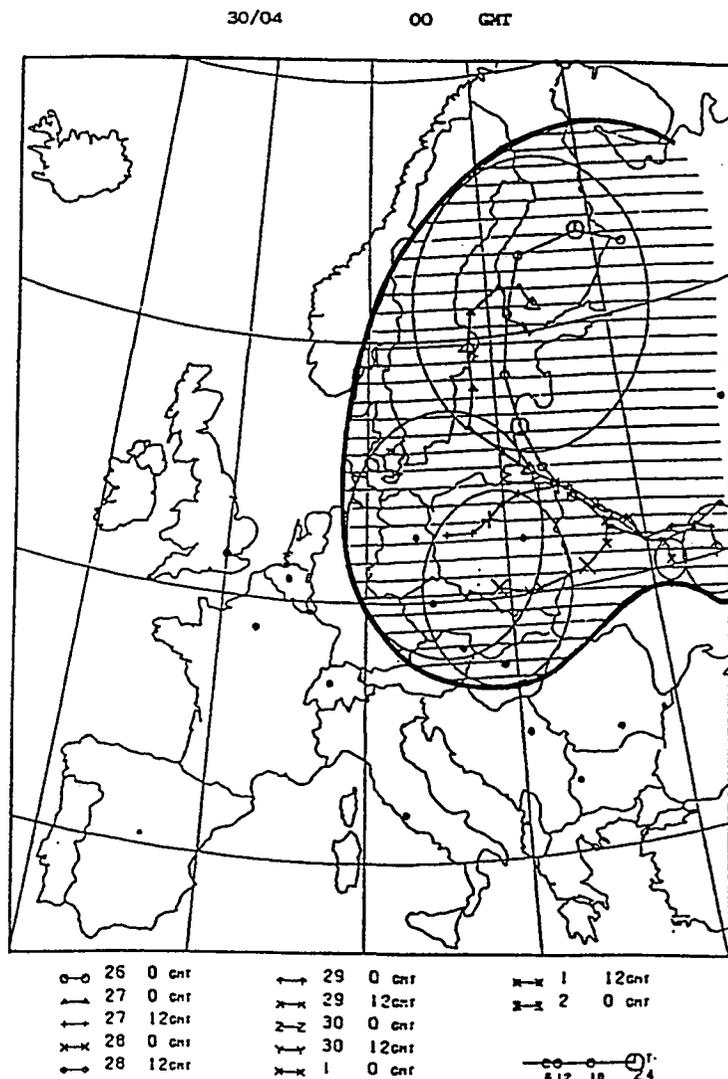


Abb. 12: Umhüllende der kontaminierten Luftmassen.
30.04.1986, 24.00 Uhr (Ref. 7)

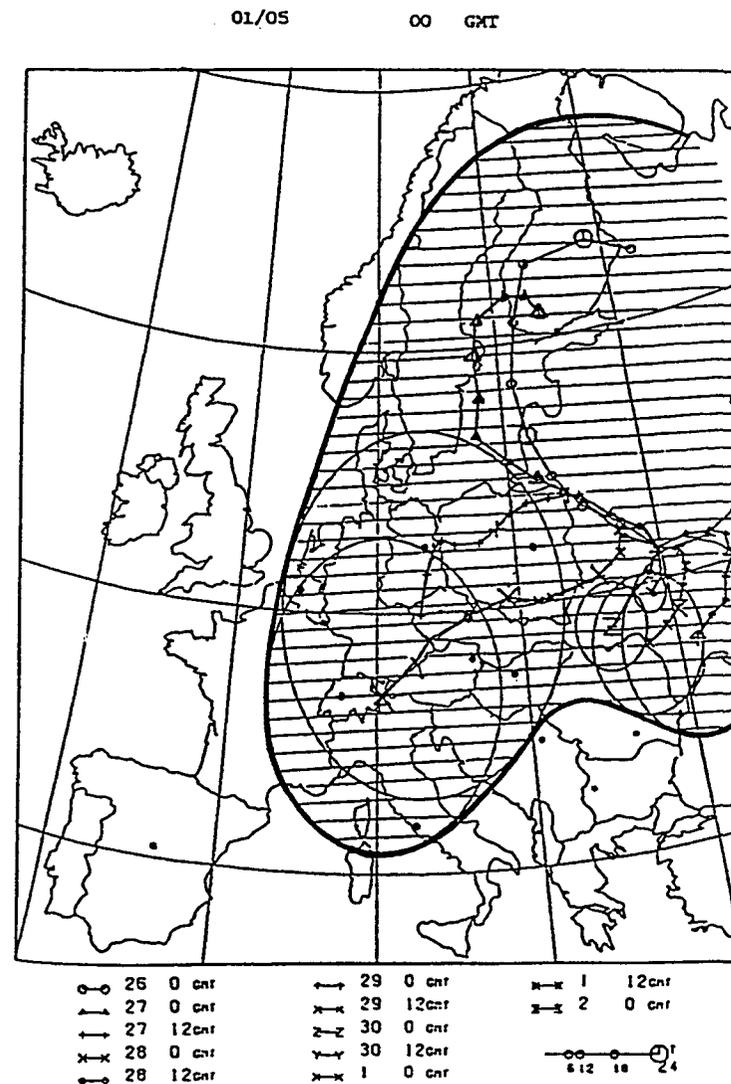


Abb. 13: Beispiel einer Trajektorie (Ref. 6)

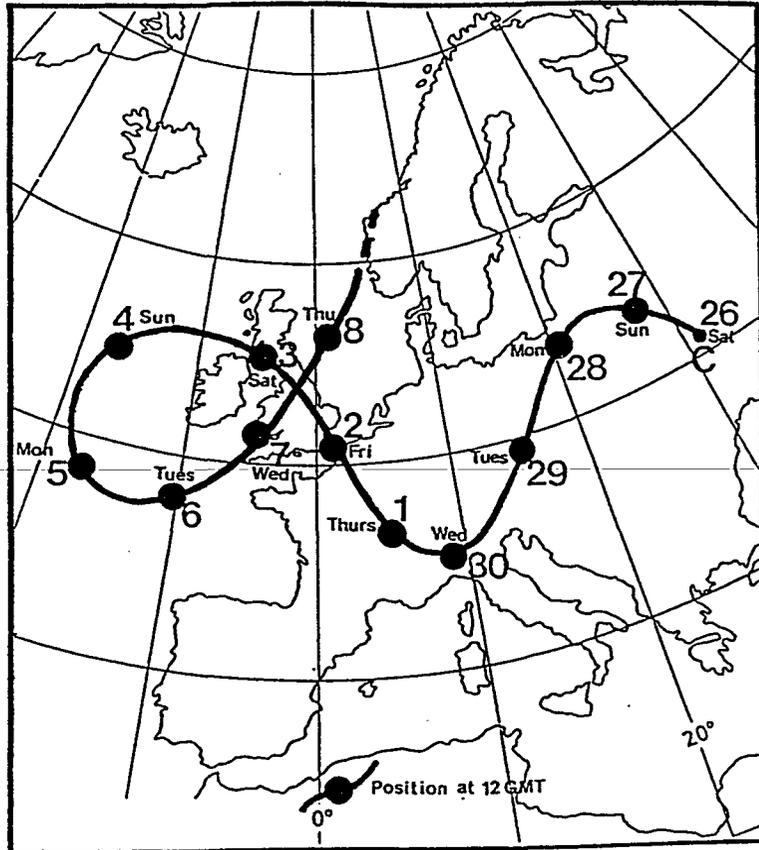
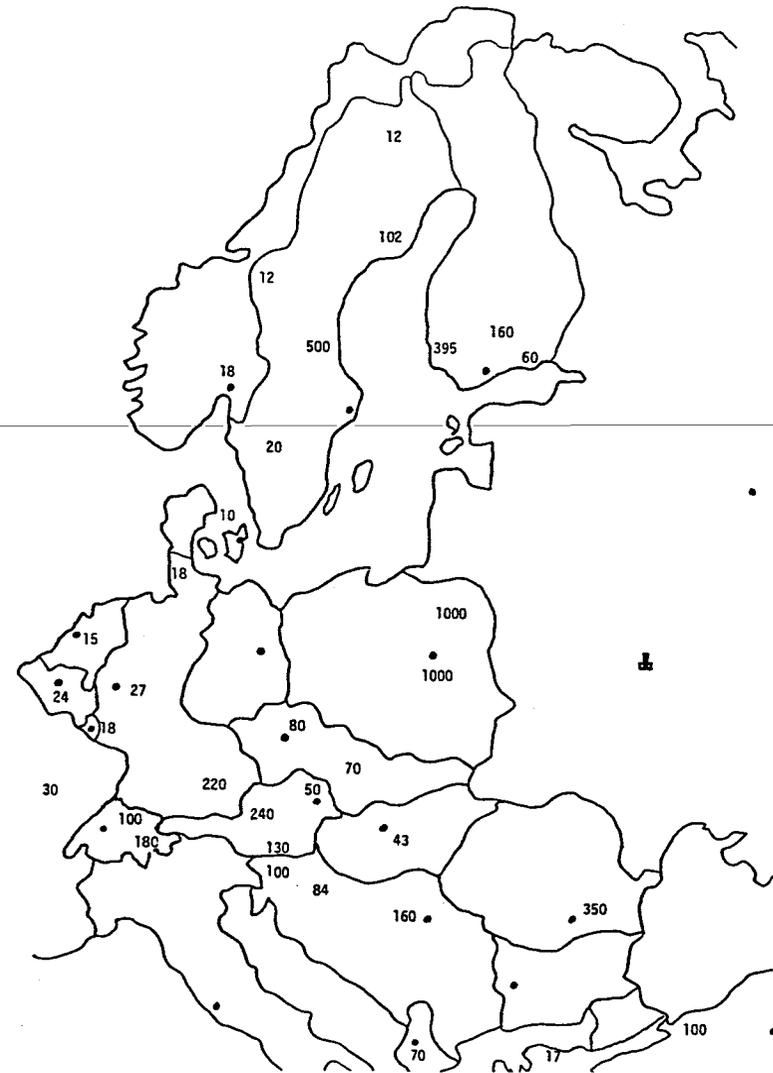


Abb. 14: Gemeldete maximale Dosisleistungen in Europa ($\mu\text{R/h}$) (natürlicher Untergrund etwa $10 \mu\text{R/h}$) (Ref. 8)



taminierten Luftmassen verantwortlich. An zweiter Stelle ist der Niederschlag zu erwähnen, der durch eine Auswaschung der kontaminierten Luftmassen eine weit stärkere Kontamination des Erdbodens gegenüber einer trockenen Deposition verursacht. Der trockene Ablagerungsvorgang ist rund 5-10 mal kleiner als die nasse Deposition. Aufgrund der zeitlichen Abfolge der lokalen Aktivitätskonzentration in der Luft verbunden mit der Niederschlagsintensität, vor allem in den ersten beiden Wochen ab Unfallbeginn, entstand die radiologische Situation in Europa.

4.2.1 Ortsdosisleistung

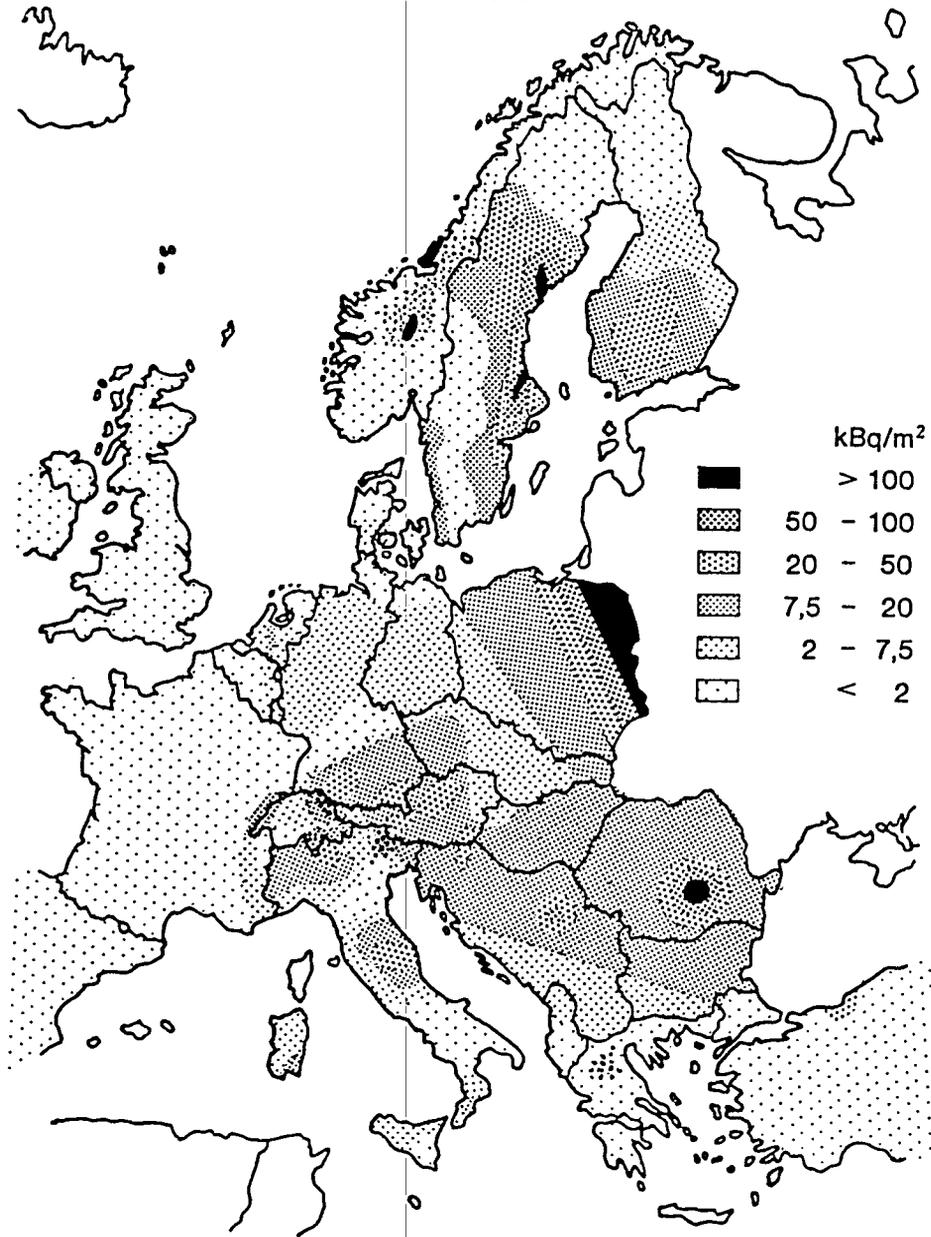
Die Ortsdosisleistung (üblicherweise 1 m über Boden gemessen) ist vorwiegend durch die Ablagerungen am Erdboden bedingt. Sie vermittelt somit ein Bild über die externe Bestrahlung und indirekt über die gesamten Ablagerungen. In Abb. 14 sind die gemeldeten maximalen Dosisleistungen gegenübergestellt.

4.2.2 Aktivitätsdeposition

In Abb. 15 wird die europaweite Cäsium-137 Ablagerung am Erdboden dargestellt. Als stärker betroffene Gebiete in Mitteleuropa werden Süddeutschland, mittlere Teile von Oesterreich, Ost- und Südschweiz, sowie Teile im nördlichen und mittleren Teil von Italien ausgewiesen. Diese Darstellung stimmt weitgehend mit der europaweiten Darstellung der Ortsdosen überein. Mittels dieser Karte über die Bodenkontamination kann man ebenfalls für landwirtschaftlich genutzte Flächen auf die zu erwartende Kontamination von Agrarprodukten extrapolieren.

Abb. 15:

Bodenkontamination Cs-137 und Cs-134



Diese Karte basiert auf
provisorischen und unvoll-
ständigen Angaben aus diversen
Quellen

4.2.3 Individualdosen

Ein Vergleich der von den einzelnen Ländern berechneten Individualdosen erscheint schwierig. Einerseits existieren Unterschiede in den Konsumgewohnheiten von Nahrungsmitteln und andererseits werden europaweit nicht die gleichen Dosisfaktoren (insbesondere für Kinder) in der Berechnung verwendet. Zudem wird von gewissen Ländern die Dosis der meistbetroffenen Bevölkerungsgruppe gemeldet und andere geben eine regionale Durchschnittsdosis an. Hinzu kommt noch die Schwierigkeit, dass verschiedene Länder eine verschiedene Integrationszeit berücksichtigt haben. Diese Umstände erlauben es nicht, einen Dosisvergleich in verschiedenen Ländern durchzuführen, ohne Kenntnisse über die nationalen Berechnungsgrundlagen. Verschiedene internationale Organisationen werden diesen Vergleich vornehmen.

5. Radiologische Auswirkungen auf die Schweiz

Es sind in der Schweiz bis heute 10'000-15'000 Proben von Gras, Luft, Wasser, Lebensmitteln usw. analysiert worden. Bei einem Teil der Proben wurden alle Radionuklide gemessen, wobei ca. 10 gefunden wurden. Dabei erwiesen sich I-131 und Cs-137 als Leitnuklide, welche beim Verfolgen der radiologischen Situation als Indikatoren verwendet werden konnten. Wesentlich erleichtert wurde die Situation auch dadurch, dass Strontium im Vergleich zu Cäsium nur in geringen Mengen vorlag.

In der Anfangsphase (bis etwa 10. Mai) der Verstrahlung dominierten die kurzlebigen Nuklide (Te-132, I-132 usw.) die externe Dosisleistung. Für die Ingestions-Phase dominierte zuerst I-131 und später Cs-134 und Cs-137. Zur Berechnung der internen Dosis wurde, um alle gefundenen Nuklide zu berücksichtigen, die Dosis durch die Leitnuklide I-131 und Cs-137 um 10 % erhöht.

5.1 Bestehende Messorganisationen

In der Schweiz wurden zur Bestimmung der Verstrahlungssituation folgende Messstationen eingesetzt (Abb. 16):

- Frühwarnposten (FWP)

6 Stück sind in der Nähe der Landesgrenze (Romanshorn, Weissfluhjoch, Locarno, Morges, Saignelégier, Stein (AG)) aufgestellt und überwachen permanent die Aerosolaktivität in der Luft. Bei Ueberschreitung eines Aktivitätspegels an einem dieser Filtergeräte erfolgt die Auslösung eines lokalen Alarms, der an die NAZ weitergeleitet wird.

- Netz für Automatischen Dosis-Alarm und -Messung (NADAM).

Dieses dauernd messende Ueberwachungs- und Alarmierungsnetz befindet sich noch im Aufbau. Gegenwärtig sind 11 Stationen im Betrieb. Bei Ueberschreitung eines Alarmpegels der Ortsdosisleistung erfolgt automatisch

eine Warnmeldung in der NAZ. Dieses Netz wird im Endausbau über ca. 60 Stationen verfügen.

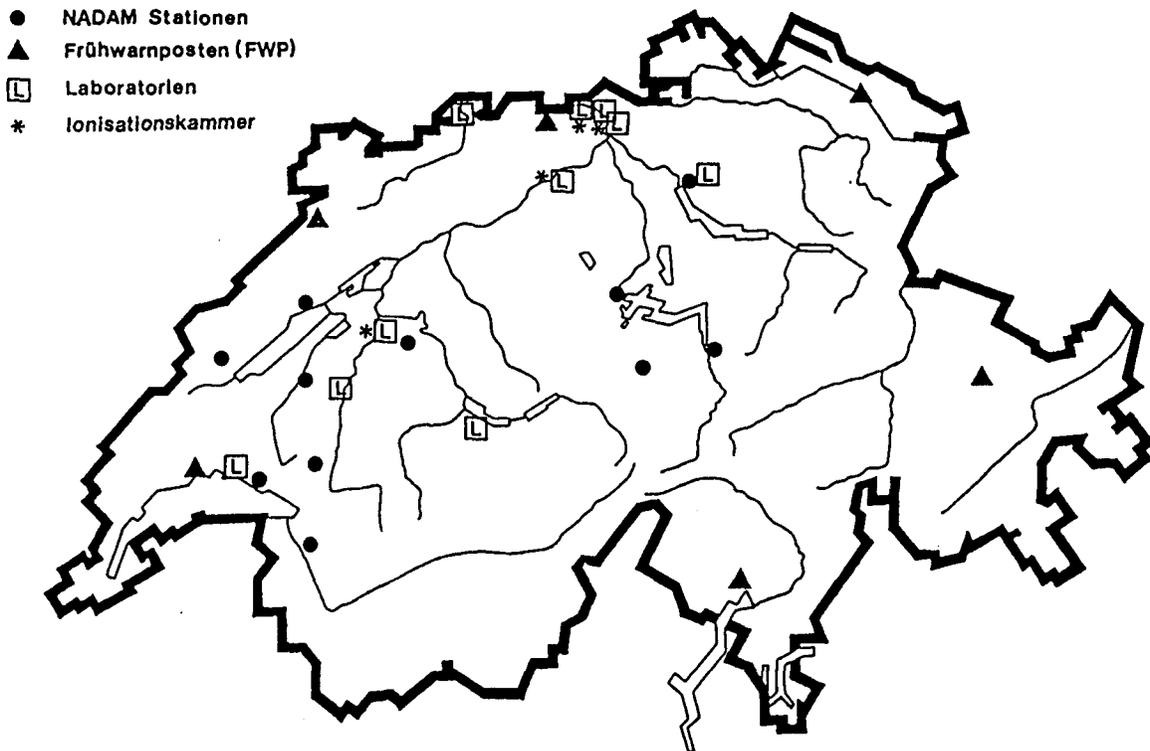


Abb. 16: Eingesetzte Messorganisation beim Unfall Chernobyl

- Umgebungsüberwachung der Kernkraftwerke.

In der näheren Umgebung eines jeden Kernkraftwerkes sind eine oder mehrere Ionisationskammern vorhanden, die automatisch die Ortsdosisleistung in der Umgebung registrieren, jedoch keine Alarme auslösen.

Ausser diesen Messnetzen waren Messwagen und Spürhelikopter im Einsatz.

Um Kontaminationen von Futter- und Lebensmitteln zu messen wurden folgende Labors eingesetzt:

EIR : Eidg. Institut für Reaktorforschung, Würenlingen
LFR : Labor Fribourg der KUEr
LDU : Labor Dübendorf der KUEr
IRA : Institut de Radiophysique Appliquée, Lausanne
ALAB : AC-Labor der Armee / A-Labor 86, GRD-Spiez (ab 6. Mai)
KKW : Labors der KKW (in der Anfangsphase)
LBS : Kantonales Labor Basel-Stadt

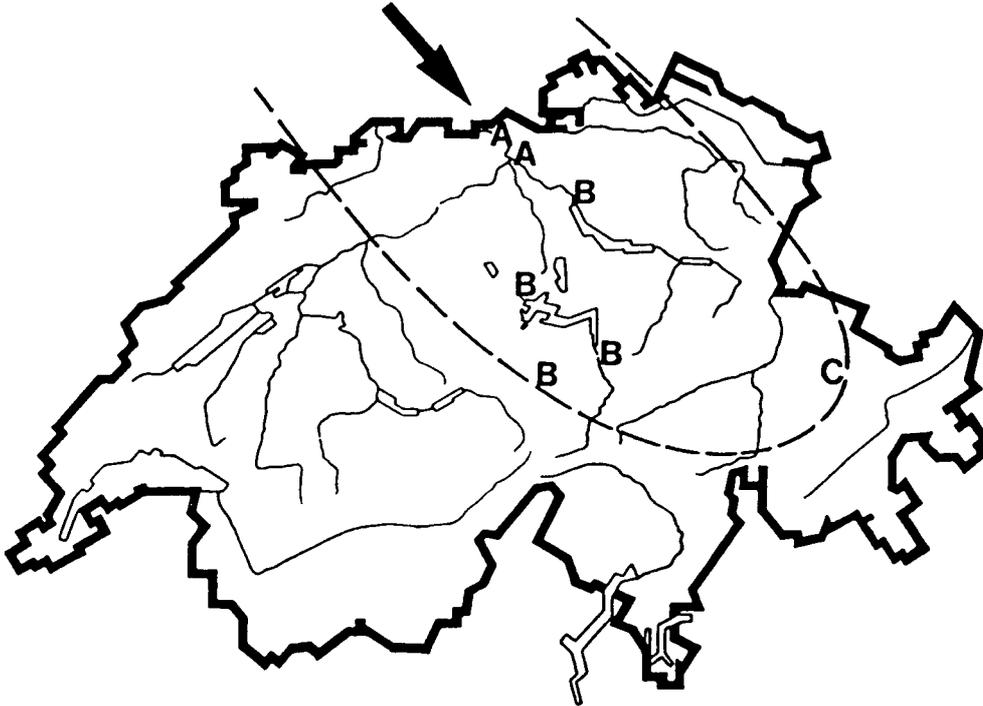
Weitere kantonale Labors sind im Laufe der Zeit dazugekommen.

5.2 Wahrnehmung des Ereignisses in der Schweiz

Eine Zunahme der Dosisleistung bzw. der Luftaktivität wurde am 30. April 1986 erstmals an folgenden Orten festgestellt:

- A. ca. 10.30 KKL-Leibstadt und EIR-Würenlingen etwa 3-fache natürliche Dosisleistung
- B. zwischen 11.00 und 13.00 Anstieg der Messwerte bei den NADAM Stationen Zürich, Luzern, Engelberg, Altdorf.
- C. ca. 13.28 Frühwarnposten Weissfluhjoch, Alarm Aerosolaktivität in der Luft

Bemerkenswert ist, dass der Frühwarnposten Romanshorn nicht angesprochen hat. Vermutlich ist der Transport der radioaktiven Luftmassen durch die Kaltluftfront aus Deutschland vom 30. April ausgelöst worden, worauf die ersten radioaktiven Ablagerungen folgten.



Aufgrund dieser Situation wurden die Messlabors mit der Auswertung von Umgebungsproben aus der gesamten Schweiz betraut. Erste Resultate am 1. Mai aus der Region Nordschweiz erbrachten folgende Ergebnisse:

- Gras ~ 10'000 Bq/m² I-131, Verhältnis I-131/Cs-137 ~ 5

- Regenwasser ~ 2'000 Bq/l I-131, Verhältnis I-131/Cs-137 ~ 10

- Luft ~ 10 Bq/m³ I-131 Verhältnis I-131/Cs-137 ~ 3

Ueber die Chronologie der Ereignisse in der Schweiz orientiert Abb. 17, die von der NAZ zusammengestellt wurde.

5.3 Aktivität in der Luft

Der Verlauf der gemessenen Aktivitätskonzentration in der Luft ist in allen Landesteilen ähnlich gewesen (siehe Abb. 18 für I-131 resp. Cs-137). Somit war die Luft über der gesamten Schweiz etwa gleich stark kontaminiert und die unterschiedlichen Ablagerungen sind auf die unterschiedlich starken Niederschläge zurückzuführen.

Die in Abb. 18 angegebene Jodaktivität entspricht aufgrund der Probenahme nur dem aerosolförmigen Anteil und muss aufgrund von Vergleichsmessungen in der Anfangsphase (bis einschliesslich 4. Mai) etwa mit einem Faktor 5 und danach mit 10 multipliziert werden, um ebenfalls den elementaren Jodanteil mitzuberechnen. Dies entspricht somit für den Zeitraum ab Unfallbeginn bis 4. Mai etwa 20 % aerosolförmigem, 80 % gasförmigem (elementar, organisch), sowie im darauffolgenden Zeitraum etwa 10 % aerosolförmigem, 90 % gasförmigem (elementar, organisch) Jod.

Die prognostizierte Dosis auf dem Belastungspfad durch Inhalation von radioaktiven Stoffen (Erwartungsdosis für den Zeitraum ab Unfallbeginn bis Ende 1986) beträgt maximal 10 μ Sv (1 mrem). Die externe Bestrahlung aus der Wolke war ebenfalls unbedeutend. Beide Belastungspfade aus der Wolke waren somit vernachlässigbar.

5.4 Abgelagerte Aktivität am Boden

5.4.1 Bodenkontamination

Die Kontamination des Bodens wurde nicht detailliert erfasst. Grosse Aufmerksamkeit wurde jedoch der Kontamination von Gras, welche für den Belastungspfad Kuh-Milch-Kleinkind (Milchpfad) von Bedeutung ist, und der aus

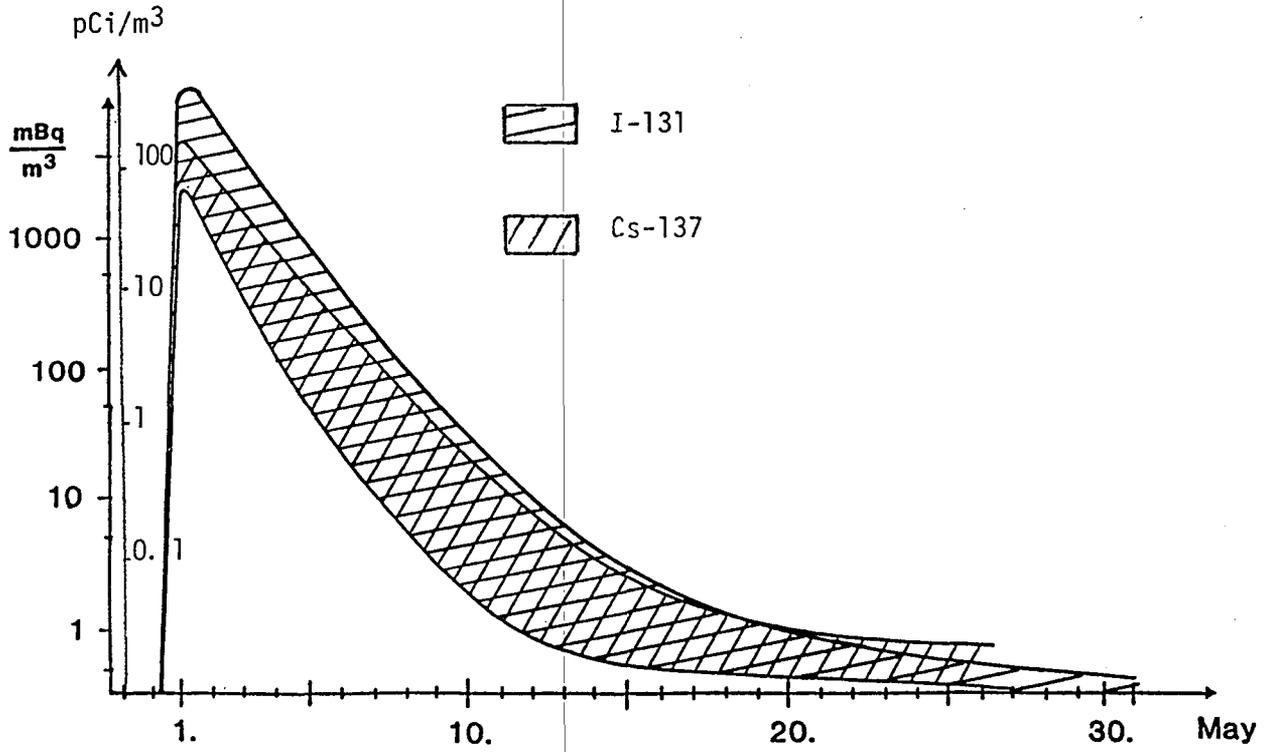


Abb. 18: Jod-131 (nur Aerosolanteil) und Cäsium-137 Konzentrationen in der Luft (Ref. 9)

diesen Ablagerungen bedingten Ortsdosisleistung geschenkt. Aus den vorhandenen Messwerten können die totale Ablagerung von I-131 und Cs-137 rekonstruiert werden (siehe Abb. 19). Daraus ist eine höhere Belastung der Nordost- und der Südschweiz zu erkennen. Für die Schweiz ergibt sich eine durchschnittliche I-131 Ablagerung von ca. 1 Ci/km^2 ($37 \cdot 10^9 \text{ Bq/km}^2$). Die Ablagerung von Radiocäsium beträgt ca. $0,3 \text{ Ci/km}^2$ ($11 \cdot 10^9 \text{ Bq/km}^2$). In Abb. 20 ist der Aktivitätsverlauf bei Gras in der Nordschweiz an einem Beispiel dargestellt.

5.4.2 Ortsdosisleistung

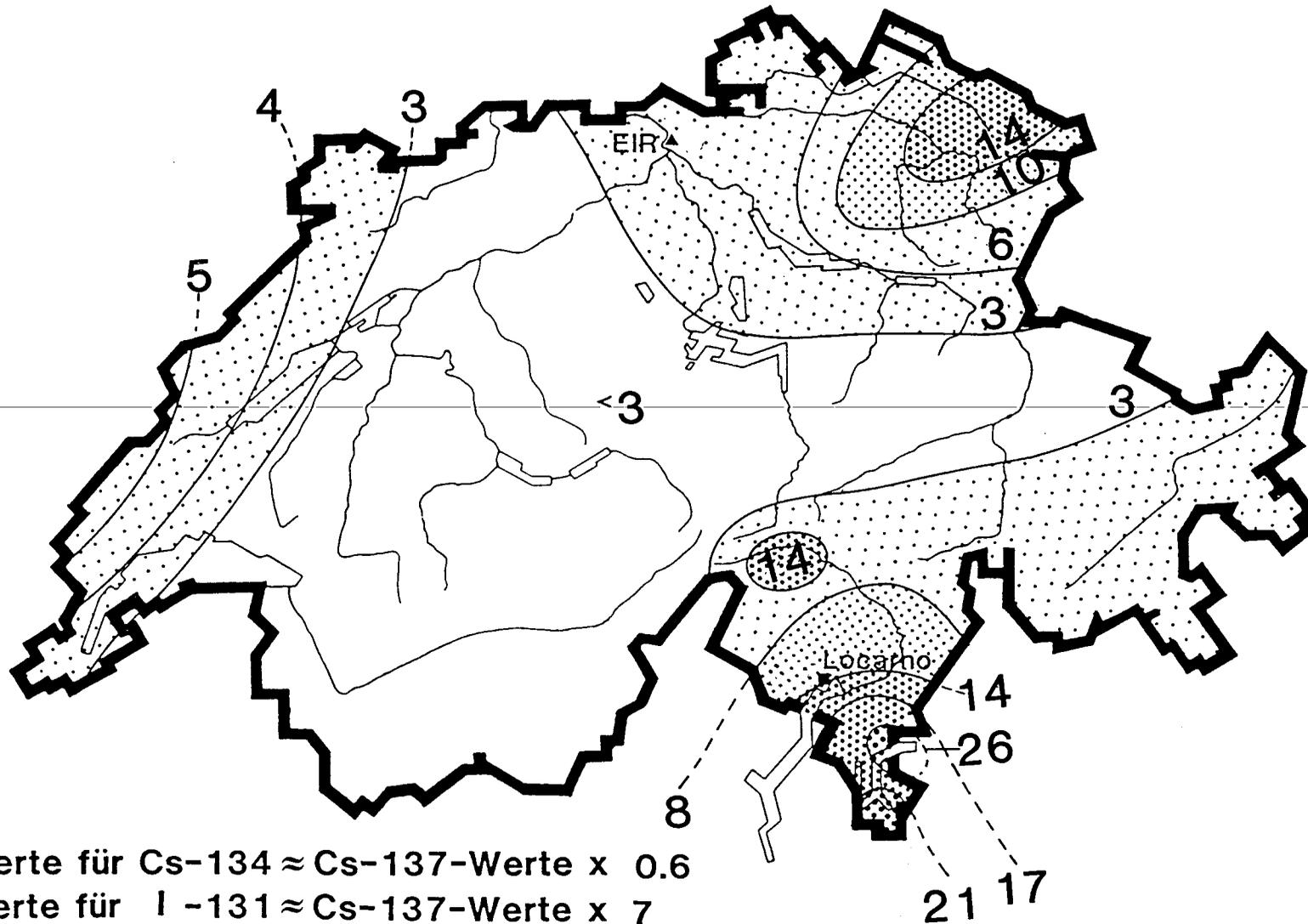
Die aus der am Boden abgelagerten Kontamination hervorgerufene Ortsdosisleistung (gemessen 1 m über Boden) in der Schweiz für verschiedene Zeiträume ab Unfallbeginn ist in den Abb. 22 und 23 dargestellt. In Abb. 24 sind die aufgetretenen Maximalwerte gegenübergestellt. Daraus ist ersichtlich, dass an den Stellen mit der höchsten Ortsdosisleistung in den Regionen Ostschweiz und Tessin ein etwa 10-facher Wert des Untergrunds auftrat. Der zeitliche Verlauf der Ortsdosisleistung in den Landesteilen Nord- und Südschweiz ist in der Abb. 21 ersichtlich und zeigt das durch die späteren Niederschläge bedingte verzögerte Maximum im Tessin.

5.5 Kontamination von Nahrungsmitteln

5.5.1 Aktivität in der Milch

Der zeitliche Verlauf der Aktivitätskonzentration in der Milch ist für einige Landesteile in den Abb. 25 und 26 dargestellt. Die Situation bei Gross-Sammelstellen ist ebenfalls ersichtlich. Man sieht, dass die regionalen Maximalwerte im Tessin auftraten (2000 Bq/l oder 50 nCi/l I-131) und dass bei den Gross-Sammelstellen etwa 20 % dieses Wertes festzustellen war. Ein wichtiges Ergebnis der späteren Auswertungen wird der Zusammenhang von kontaminiertem Gras und der daraus resultierenden Kontamination von Kuhmilch sein.

Abb. 19: $\text{Cs-137}^{*})$: Mittlere Ablagerungen in kBq/m^2



*) Werte für Cs-134 \approx Cs-137-Werte x 0.6

*) Werte für I-131 \approx Cs-137-Werte x 7

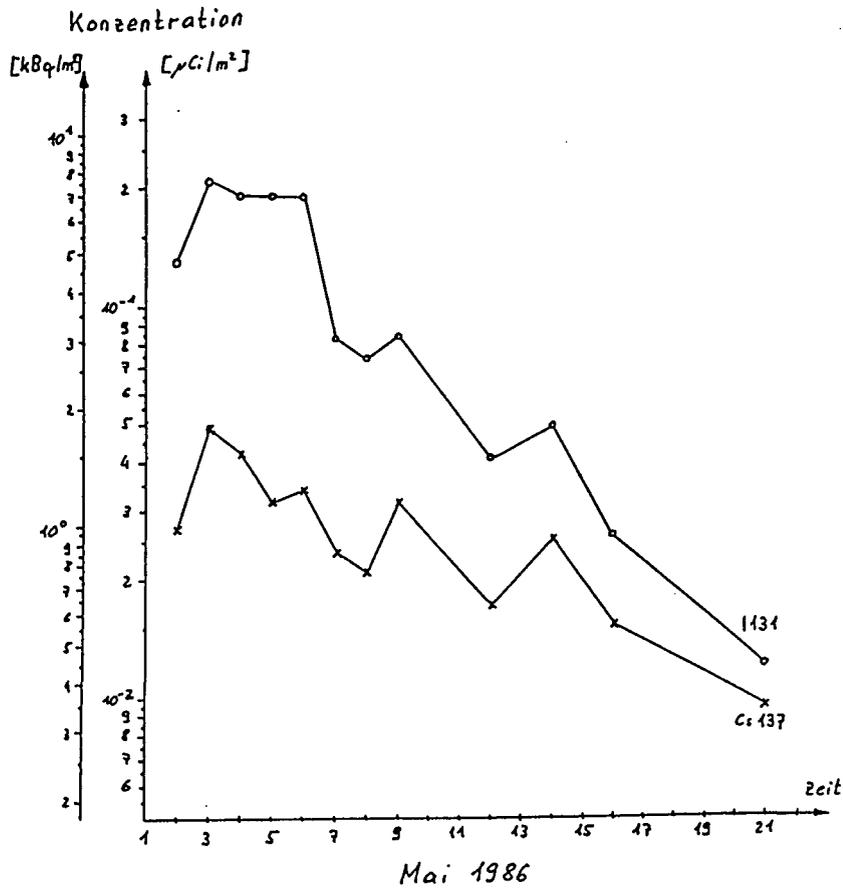


Abb. 20:
Kontamination
von Gras in der
Nordschweiz am
Standort Full
(Ref. 10)

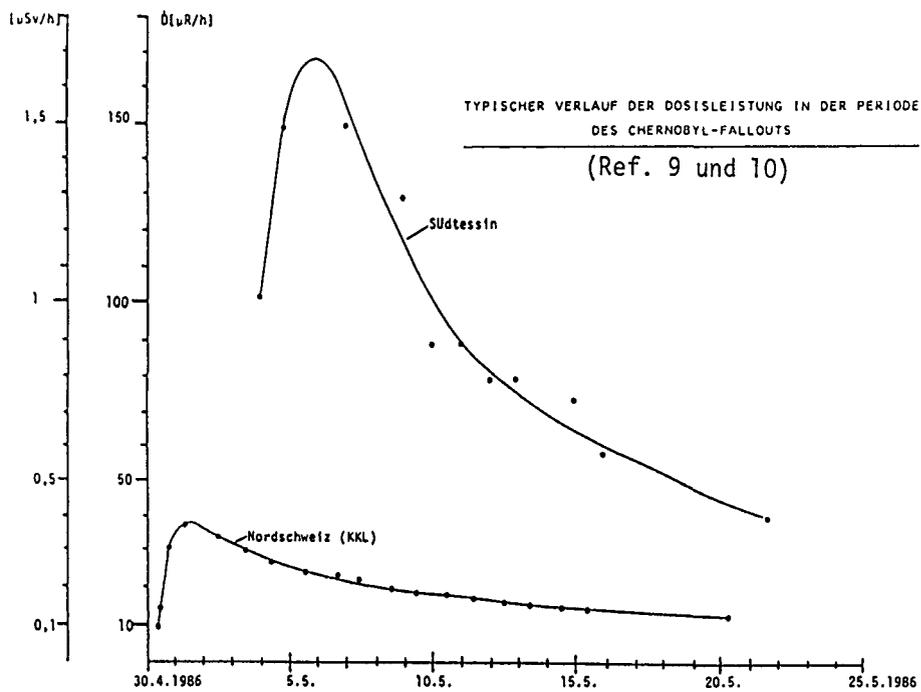


Abb. 21: Typischer Verlauf der Ortsdosisleistung in der Nordschweiz und im Tessin

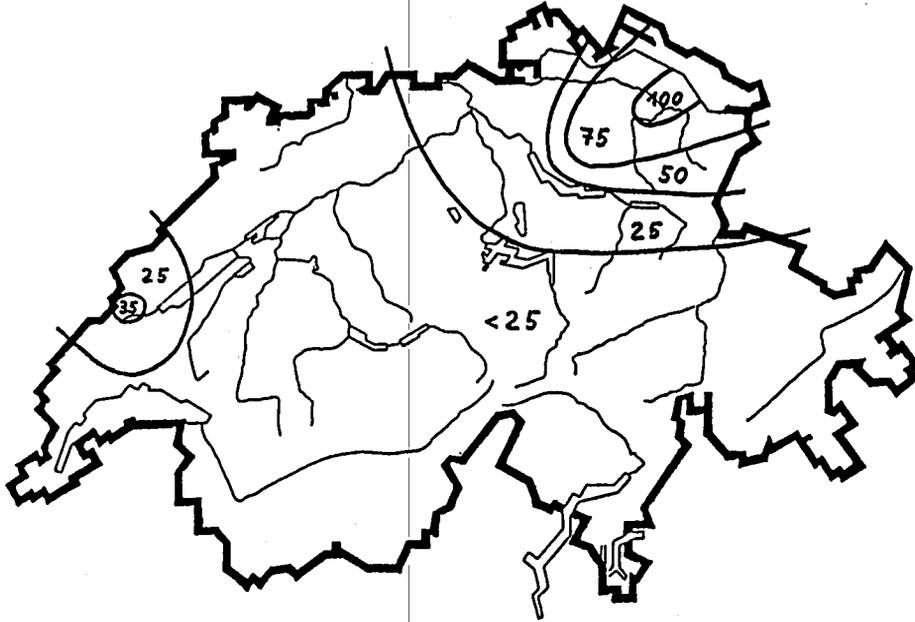


Abb. 22: Ortsdosisleistung in $\mu\text{R/h}$ am 2.5.1986 (Ref. 9)
(1 $\mu\text{Sv/h} = 100 \mu\text{rem/h} \approx 100 \mu\text{R/h}$)

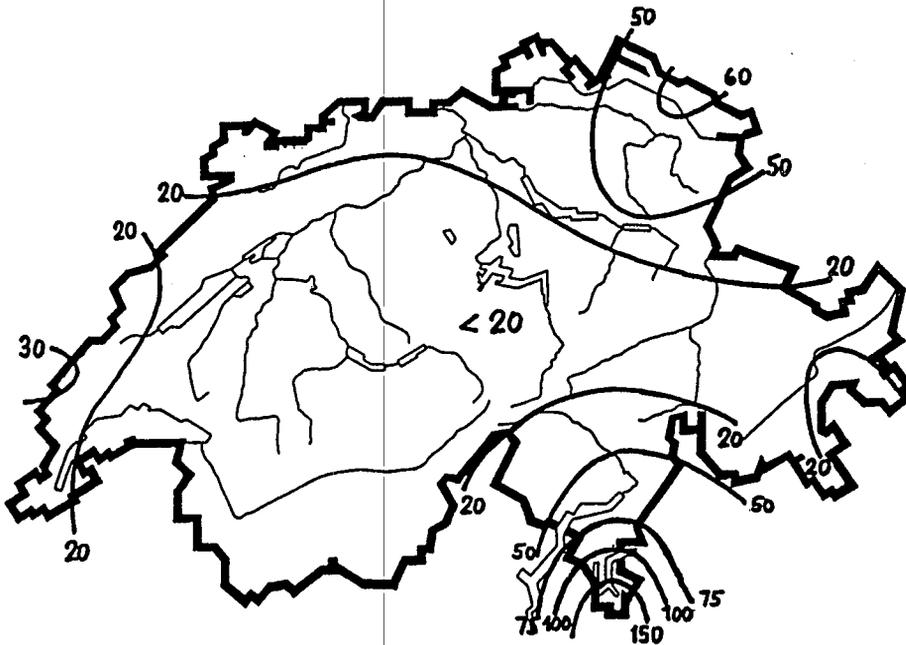


Abb. 23: Ortsdosisleistung in $\mu\text{R/h}$ am 5.5.1986
(Ref. 9)

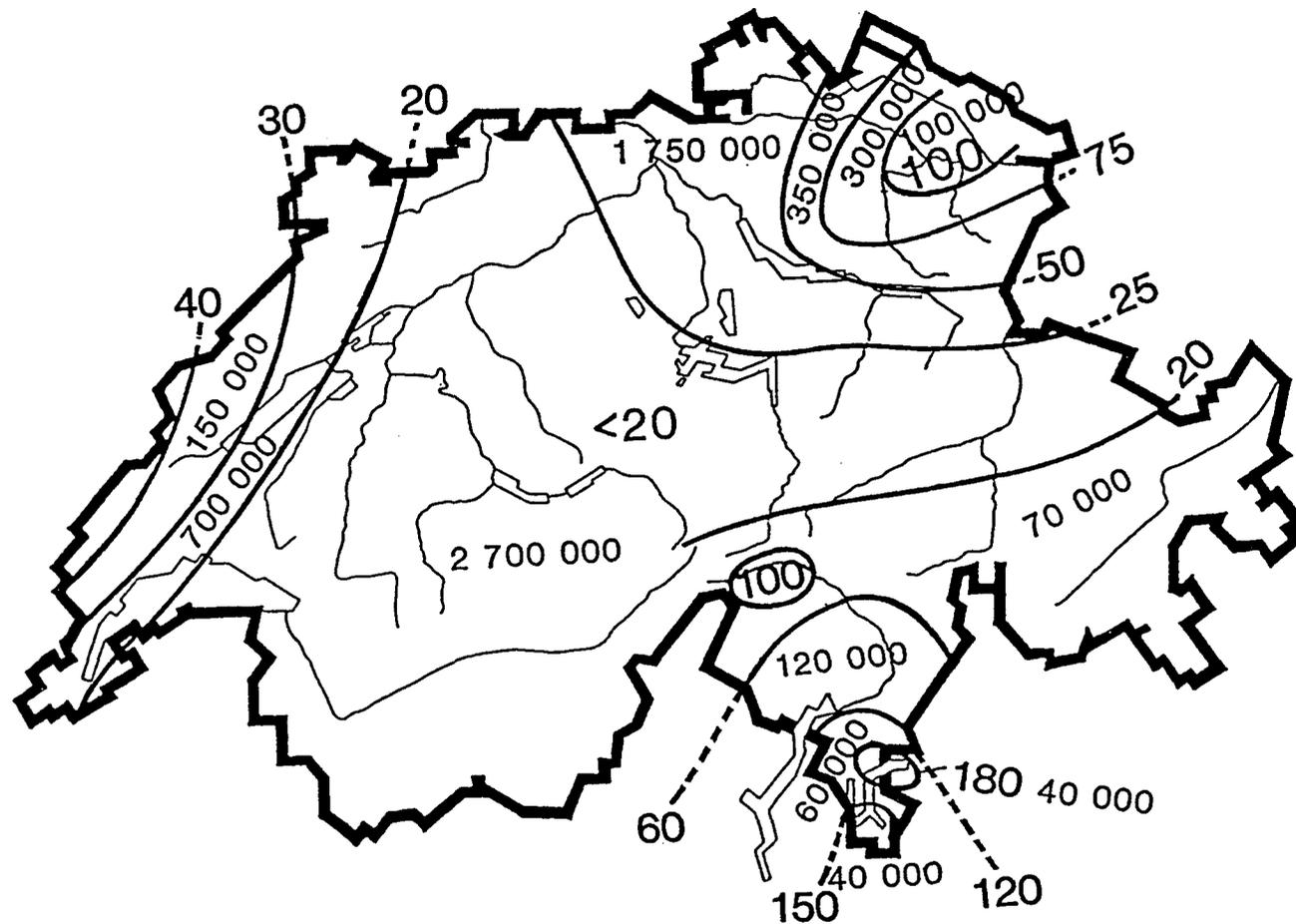


Abb. 24: Maximale Ortsdosisleistung

Grosse Schrift: Strahlungsintensität in $\mu\text{R/h}$ (eingeschlossen: Natürlicher Untergrund mit ca. $10 \mu\text{R/h}$)
 Zur Umrechnung in μSv müssen diese Zahlen durch 100 dividiert werden.

Kleine Schrift: Einwohnerzahl in den entsprechenden Dosisbereichen.

J-131 in Kuh-Milch

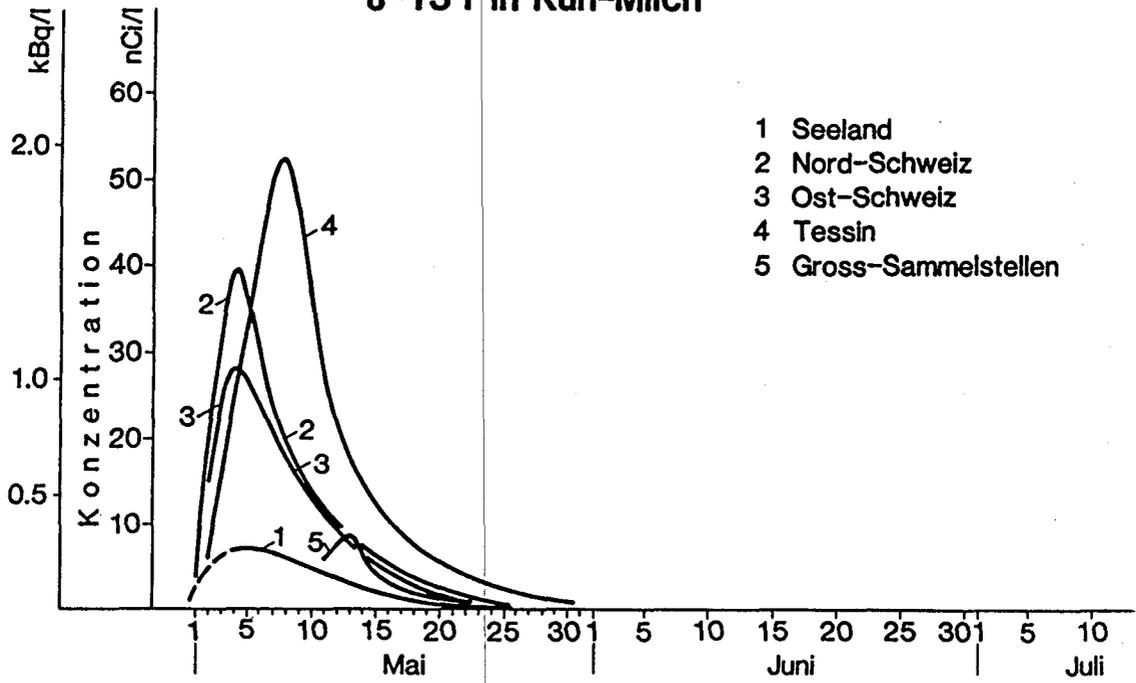


Abb. 25 (Ref. 9)

Cs-137 in Milch

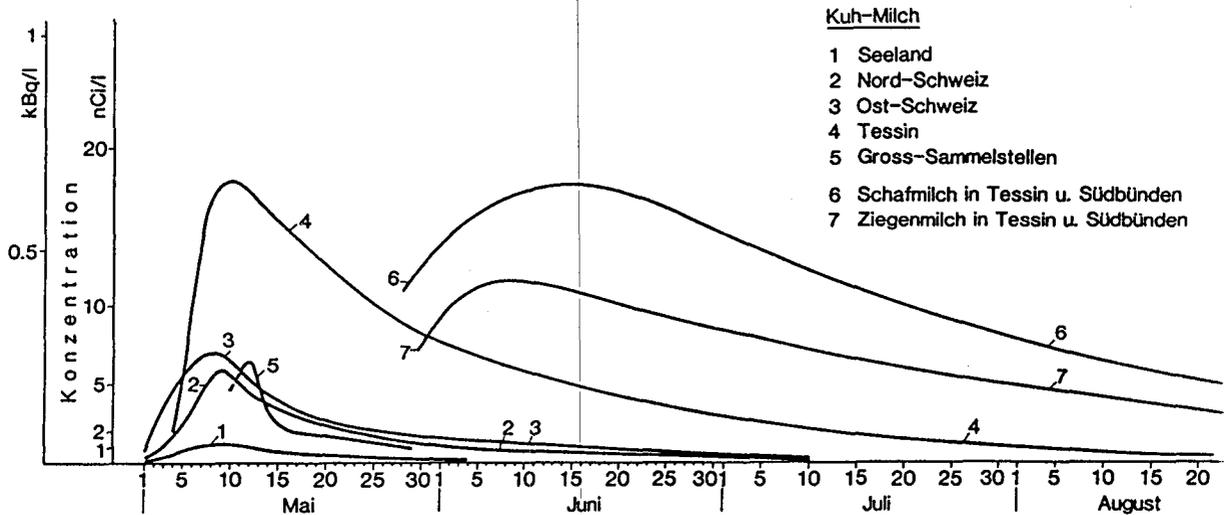


Abb. 26 (Ref. 9)

Ferner ist in Abb. 26 die Milchkontamination an Cs-137 im Tessin für Kühe, Schafe und Ziegen ersichtlich. Dabei erkennt man für Schafe, Ziegen und Kühe verschiedene Kurven.

Bei den Milchprodukten ist ein hoher Jodanteil in der Molke und somit in allen daraus resultierenden Produkten festgestellt worden.

Ein sehr wichtiger Aspekt ist hier ebenfalls die Kontamination der Muttermilch. In Abb. 27 ist der Aktivitätsverlauf von I-131 in der Muttermilch in der Nordschweiz im Raum Würenlingen und als Vergleich die Kuhmilch in dieser Region dargestellt. Man erkennt dabei eine nur sehr geringe Kontamination der Muttermilch. Nur Kleinkinder, die mit Kuhmilch ernährt wurden, gehörten somit zur kritischen Bevölkerungsgruppe.

5.5.2 Aktivität im Gemüse und Salat

In Abb. 28 ist der Jod- und Cäsiumgehalt von Blattgemüse und Salat als Funktion der Zeit für die ganze Schweiz dargestellt. Generell ist hierbei festzustellen, dass etwa ab dem 15. Mai bereits eine bedeutend geringere Kontamination im Vergleich zum Monatsbeginn bei diesen Freilandgewächsen vorliegt und das Maximum der Kontamination für Jod bei 3700 Bq/kg (100 nCi/kg) und für Cäsium bei 3300 Bq/kg (90 nCi/kg) lag. Durch sorgfältiges Waschen konnte die Jod-Kontamination auf etwa die Hälfte und die Cäsium-Kontamination auf etwa einen Drittel reduziert werden. Die Alarmorganisation hat deshalb in den Tagen der Messkampagne angeordnet, nur gewaschenes Gemüse und gewaschenen Salat auszumessen. Bemerkenswert ist, dass die Jod- und Cäsiumkontamination von Gemüse schnell und für beide Isotope in gleichem Masse zurückgegangen ist.

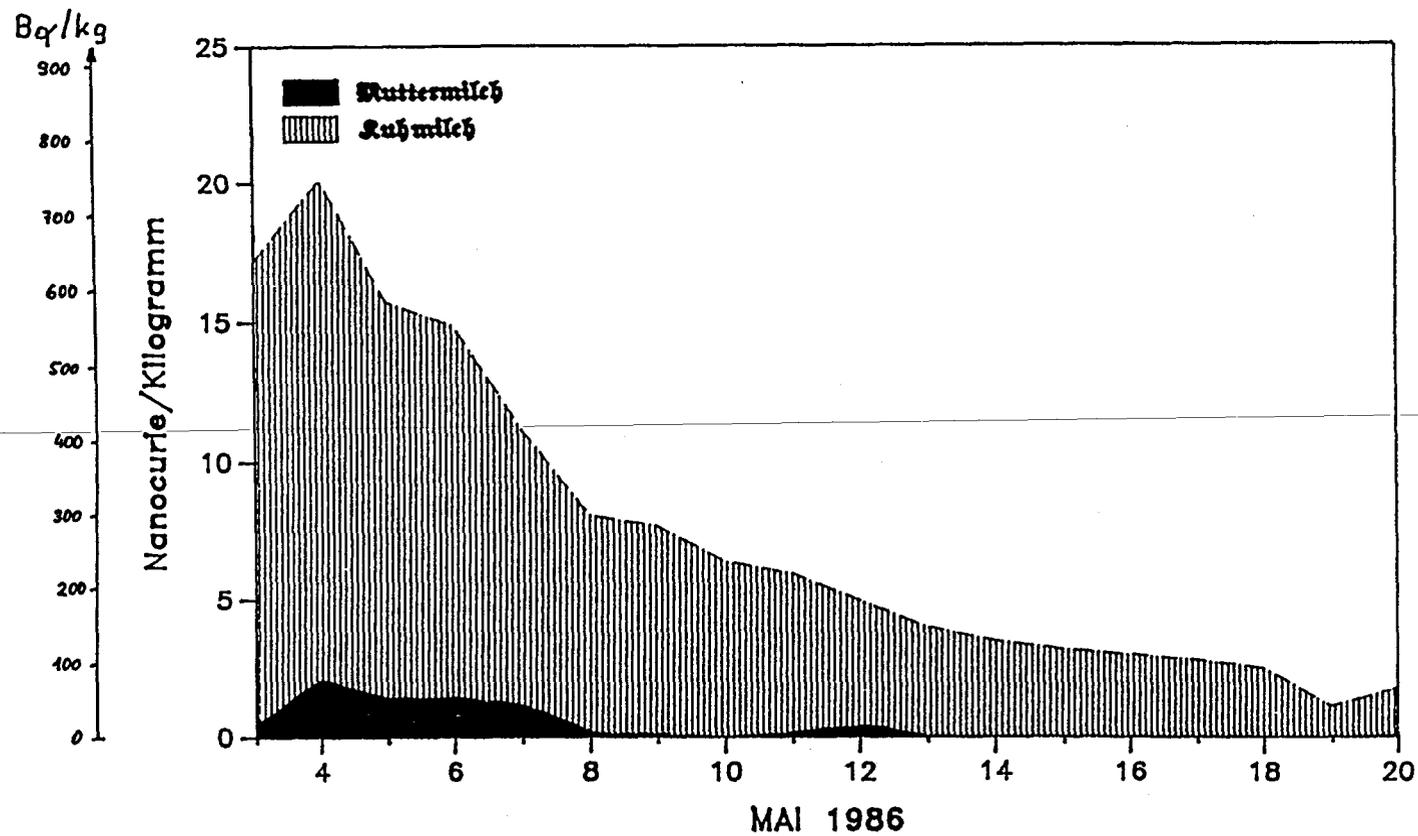


Abb. 27: Kuh- und Muttermilchbelastung durch I-131 in der Nordschweiz im Raum Würenlingen (Ref. 11)

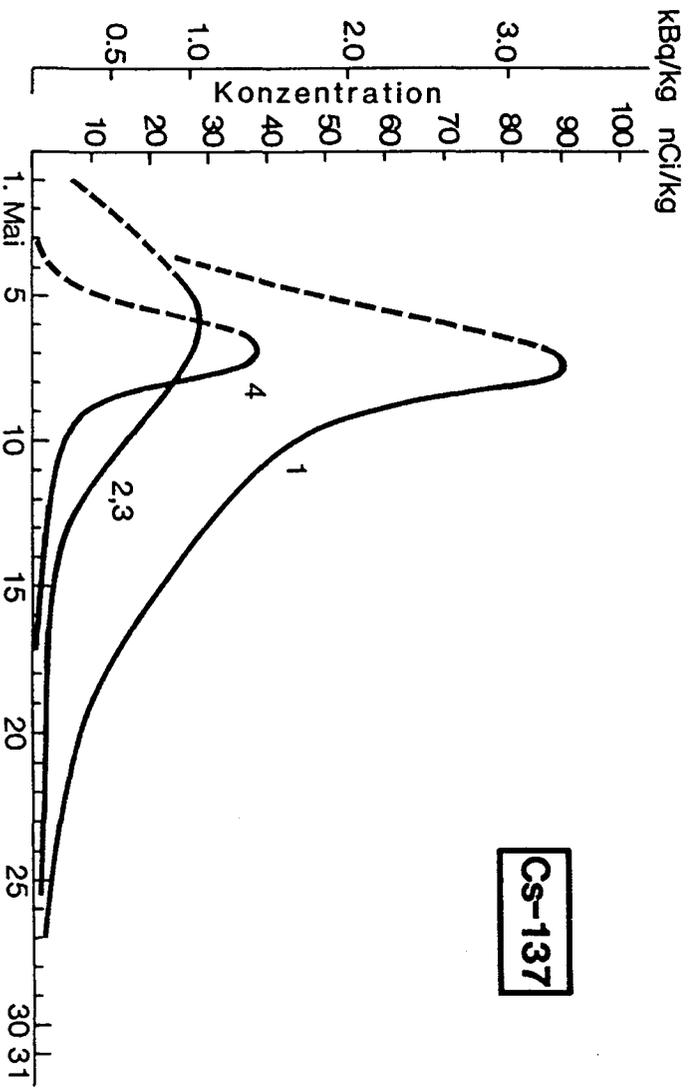
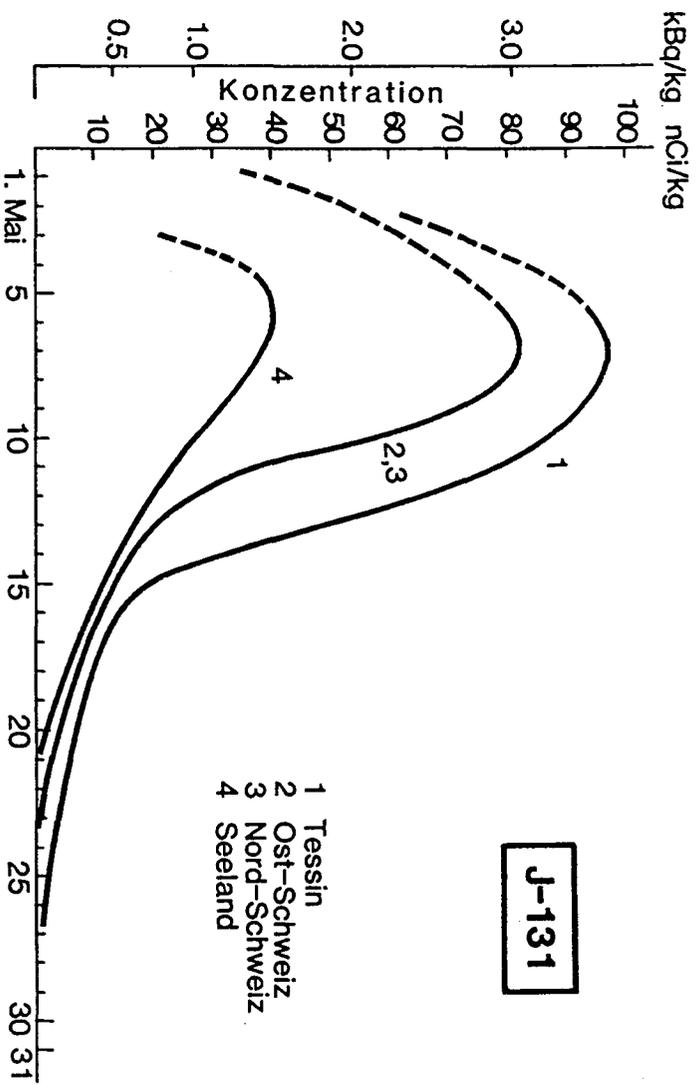


Abb. 28: Kontamination von Blattgemüse und Salat in der ganzen Schweiz

5.5.3 Aktivität im Fleisch

In Abb. 29 ist der Cäsiumgehalt von Rindfleisch und von Schafffleisch in der Schweiz (ohne Tessin und Süd-Bünden) dargestellt. In Abb. 30 ist für das Tessin die Cäsiumkontamination von Rind-, Kalb-, Schaf- und Ziegenfleisch sowie Wild angegeben. Daraus erkennt man analog zum Dosisleistungsverhalten ein späteres Maximum der Aktivitätswerte im Tessin (Maximalwert 4500 Bq/kg (120 nCi/kg) bei Ziegenfleisch) und eine dadurch bedingte verzögerte Abnahme dieser Werte.

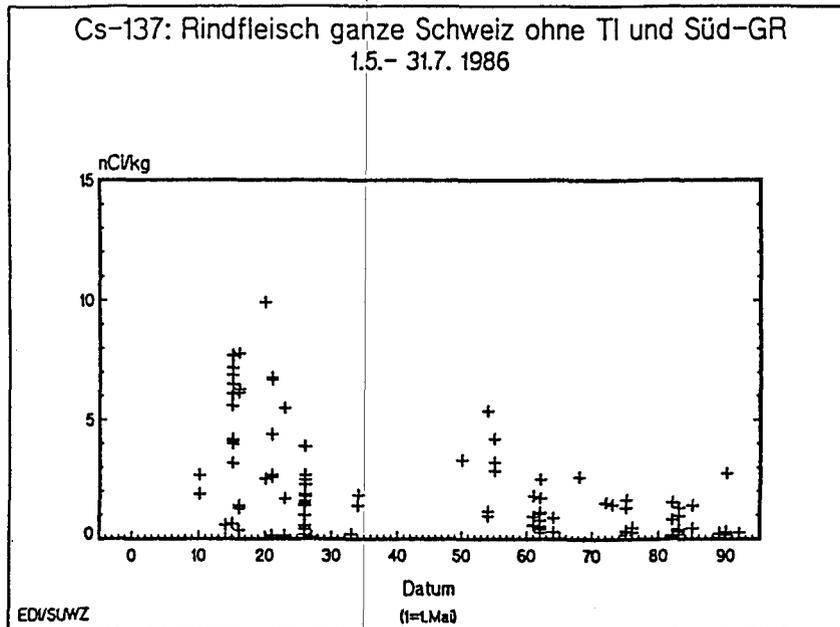
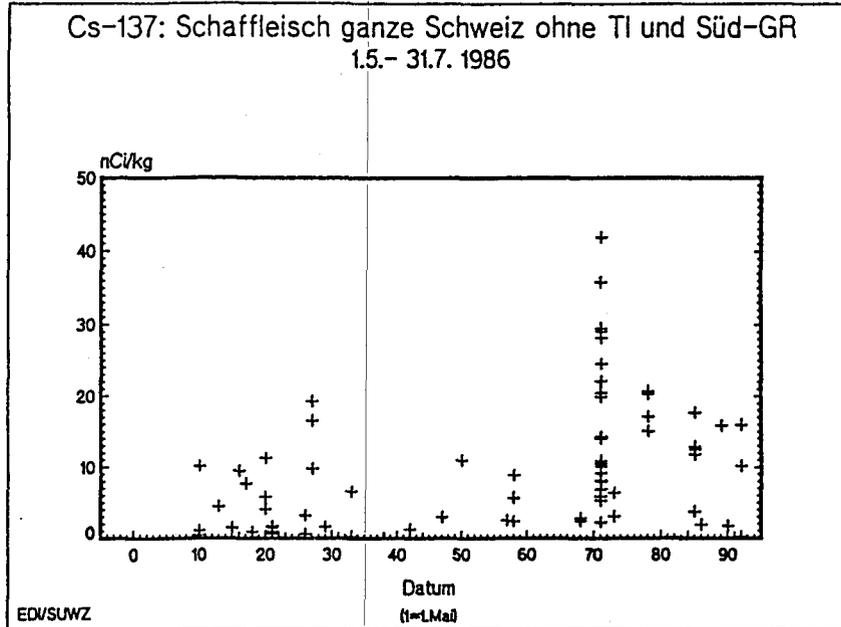
5.5.4 Aktivität in anderen Nahrungsmitteln

Stichprobenartige Erhebungen der Kontamination wurden praktisch bei allen saisonal verfügbaren Nahrungsmitteln durchgeführt. Wegen den geringen täglichen Aufnahmeraten und den festgestellten Kontaminationen haben sie im Vergleich zu den vorher besprochenen Produkten eine geringere Bedeutung. Weiters wurden alle Nahrungsmittelimporte stichprobenartig auf Kontamination untersucht wobei daraus einige Beanstandungen resultierten. Gegenwärtig (Oktober 1986) ist lediglich der Cäsiumgehalt in Fischen aus dem Luganersee hervorzuheben. Es wurden Werte bis 3500 Bq/kg (100 nCi/kg) gemessen. Deshalb wurde ein Fischereiverbot für diesen See erlassen. Die Cäsiumkontamination von Fischen aus anderen Seen und Fließgewässern liegt um mindestens einen Faktor 3 tiefer, weshalb sich keine Notwendigkeit für Beschränkungen ergeben hat.

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der maximalen Kontaminationsmesswerte sowie der effektiv beobachteten Halbwertszeiten beim Abklingen der akuten Kontaminationsphase.

Nahrungsmittel und Nuklide	Maximale Messwerte Bq/kg (nCi/kg)	beobachtete Halbwertszeiten (Tage)
Kuhmilch I-131	~ 2'000 (55)	~ 5
Cs-137	~ 650 (18)	10-20
Schaf- und I-131	~10'000 (270)	~ 5
Ziegenmilch Cs-137	~ 650 (18)	10-20
Salat, I-131	~ 3'700 (100)	~ 3
Gemüse Cs-137	~ 3'300 (90)	~ 3
Kuh- und Rindfleisch Cs-137	~ 1'000 (27)	30
Ziegen- und Schaffleisch Cs-137	~ 4'000 (110)	20

Abb. 29: Kontamination von Rind- und Schafffleisch. Messresultate aus der ganzen Schweiz ohne Tessin und Süd-Bünden (Ref. 14).



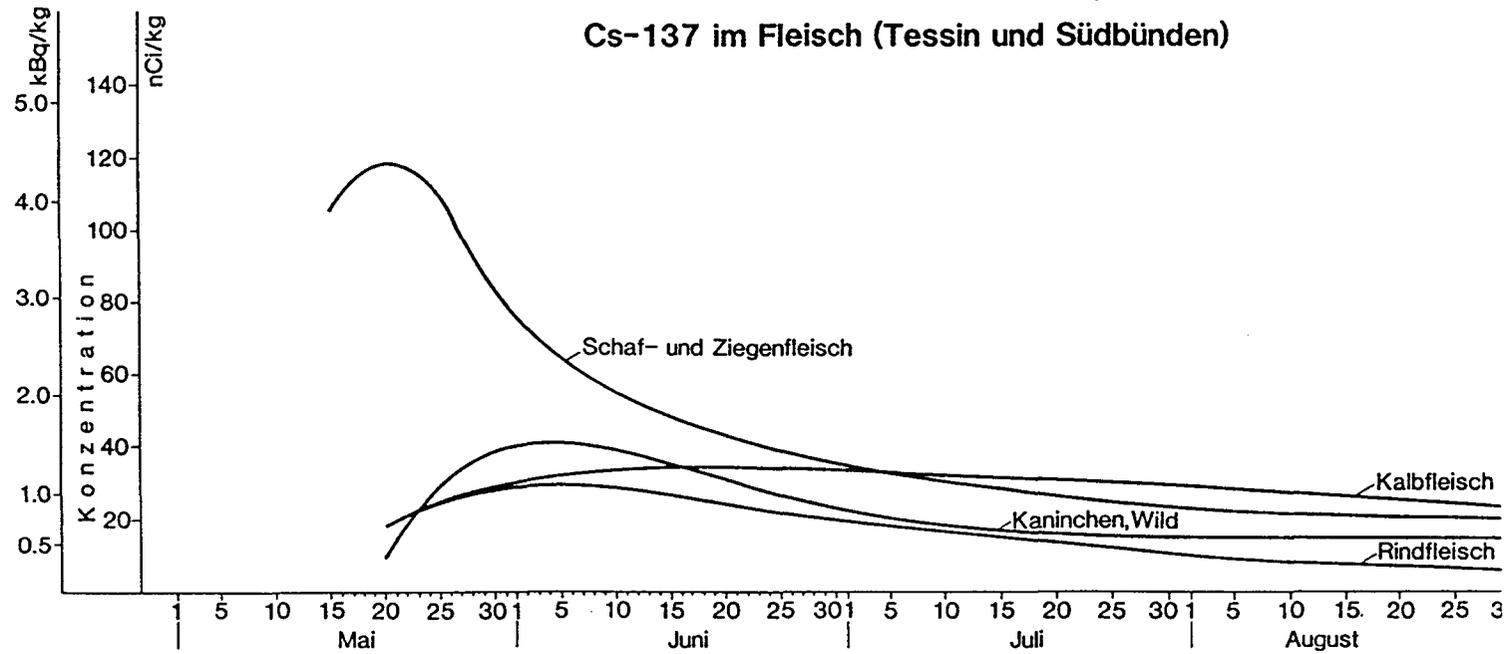


Abb. 30 (Ref. 9)

5.6 Schutzmassnahmen

5.6.1 Entscheidungsbasis

Um Entscheidungen fällen zu können, brauchte es einerseits Schutzziele, die festlegten, welche Dosen nicht überschritten werden sollten. Zudem brauchte es Messdaten, welche den radiologischen Zustand möglichst genau erfassen und einen Satz Dosistabellen, welcher ermöglicht, die aufgenommene Radioaktivität in Dosen umzurechnen.

Zur Bewältigung der durch Chernobyl geschaffenen Situation war die Alarmorganisation bestehend aus Kommission für AC-Schutz und Nationaler Alarmzentrale aufgebildet worden. Es war deshalb vernünftig, auf das Dosis-Massnahmen-Konzept der Alarmorganisation mit seinen Schutzzielen als Grundlage zurückzugreifen. Damit lautete die Zielsetzung: Die internen Dosen sollen kleiner als 5 mSv (500 mrem) bleiben. Da die externen Dosen klein waren, und da der Grossteil der Dosis aus Chernobyl im ersten Jahr aufgenommen wird, ist diese Zielsetzung praktisch identisch mit den Schutzzielen der ICRP, welche wie folgt formuliert werden können:

- Die Dosis des meistbetroffenen Bevölkerungsteils (critical group) soll 5 mSv pro Jahr (500 mrem) nicht überschreiten. Für den Grossteil der Bevölkerung soll die Dosis möglichst unter 1 mSv pro Jahr (100 mrem) liegen. Auch die SSV0 gibt die gleiche Limite von 500 mrem (5 mSv) pro Jahr an.
- Die Schilddrüsendosis für die meistbetroffene Bevölkerung soll 50 mSv pro Jahr (5 rem) nicht übersteigen. Für den Grossteil der Bevölkerung soll sie möglichst unter 30 mSv pro Jahr (3 rem) liegen.

Es lag somit nahe, das Schutzkonzept der Alarmorganisation sicher einzuhalten und wenn immer möglich auch dasjenige der ICRP.

Als Berechnungsgrundlage für die Ingestionsdosen dienten die jüngst veröffentlichten Dosistabellen des Instituts für Strahlenhygiene in Neuherberg (BRD), welche ihrerseits auf den Modellen und Berechnungsverfahren der ICRP-Publikation 30 basieren.

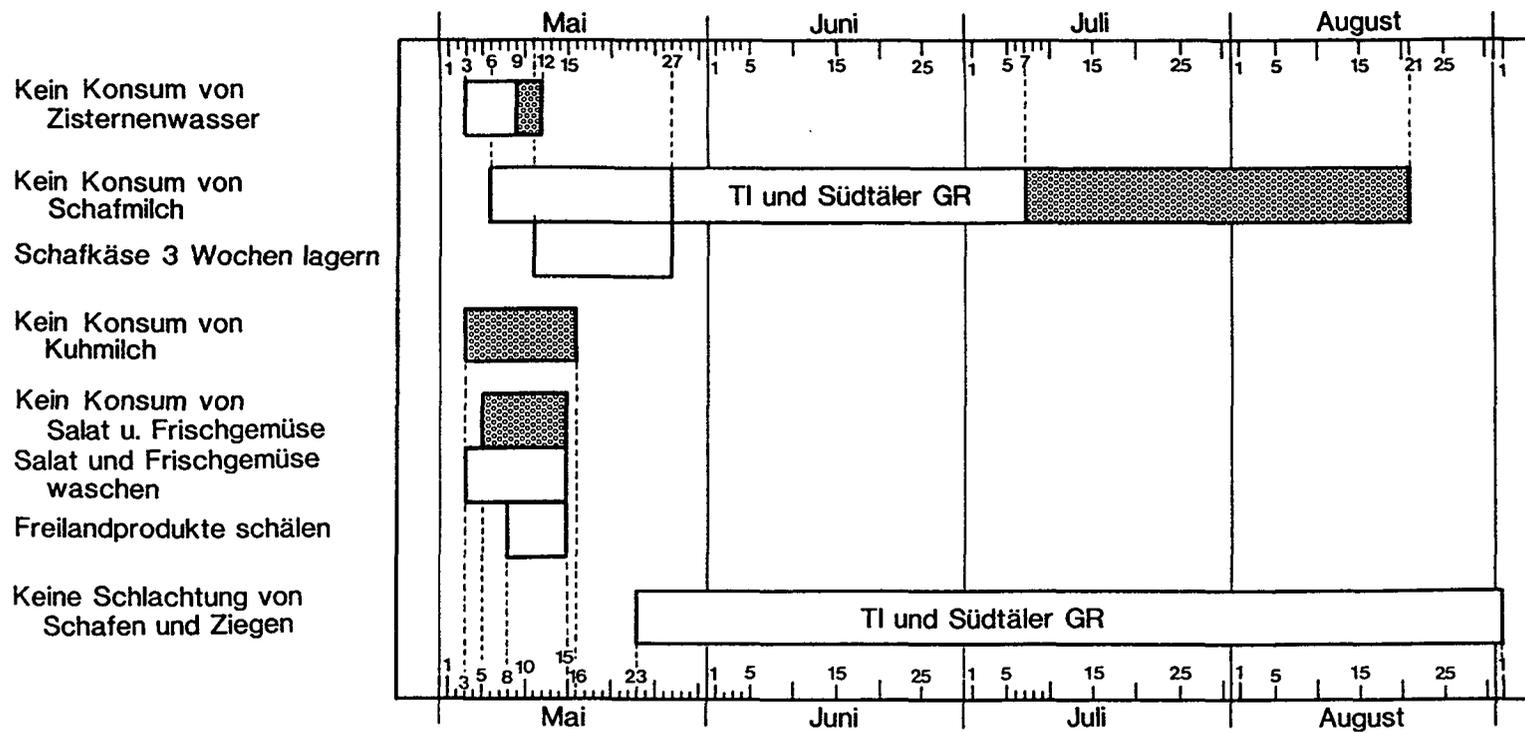
Es lohnt sich an dieser Stelle, sich nochmals die Situation bezüglich Messdaten von anfangs Mai vor Augen zu halten. Damals lagen erst wenige Messdaten vor, die z.T. erheblich streuten und deshalb kein zuverlässiges Bild ergaben. Maximalwerte und der zu erwartende Rückgang der Kontamination waren unsicher. Es war von Anfang an klar, dass das Wetter die radiologische Lage auch beeinflussen würde. Zudem waren einzelne wichtige Messdaten nicht sofort verfügbar, da die Messverfahren dafür recht zeitaufwendig sind (z.B. Strontium-Bestimmung). In dieser Situation mussten nun Entscheidungen bezüglich Schutzmassnahmen getroffen werden; und zwar für Jod sehr rasch, damit sie überhaupt noch wirksam werden konnten. Die Unsicherheit in der Prognose machte die Entscheidung schwierig. Es war unvermeidlich, dass subjektive und intuitive Gesichtspunkte die Entscheidung beeinflussten. Es ist deshalb auch nicht verwunderlich, dass in anderen Staaten ganz andere Entscheidungen gefällt worden sind.

5.6.2 Getroffene Schutzmassnahmen

Da jede angeordnete, verbindliche Schutzmassnahme ihren Preis kostet, war von Anfang an klar, dass eine solche Massnahme auch eine deutliche Dosisreduktion bringen musste, um vernünftig zu sein. Massnahmen, die bei der kritischen Gruppe im besten Fall 0,1 mSv (10 mrem) Dosisersparung bringen würden, waren bei einem Schutzziel von 5 mSv (500 mrem) lediglich mit Kosten verbunden, brachten aber keine wirkliche Dosisreduktion und wurden deshalb verworfen. Massnahmen, die 0,5 mSv (50 mrem) Dosisersparung bringen würden, wurden als gut beurteilt, es gab aber kaum solche, die soviel Dosisersparung versprachen. Zwischen diesen beiden Werten liegt eine Grauzone, d.h. in diesem Bereich war schwer auszumachen, ob eine Massnahme nun vernünftig sei oder nicht. Aus der Diskussion dieser Situation entstand der schweizerische Weg zur Bewältigung des Problems "Dosen als Folge von Chernobyl", der mit wenigen Ausnahmen auf Massnahmen verzichtete und sich auf offizielle Empfehlungen beschränkte. Als eigentliche Massnahmen gab es lediglich den von der Tessiner Regierung eingesetzten und von den offiziell-

ten Stellen in Bern begrüßten Konsummilch-Transport vom Nordtessin in den Südtessin, um die Gesamtaktivität der Konsummilch auch im Südtessin bei maximal 555 Bq/l (15 nCi) zu begrenzen (siehe 5.7.2). Weiters das vom EDI erlassene Fischerei-Verbot im Luganersee.

Zusätzlich gab es eine Reihe von Empfehlungen, die in Abb. 31 zusammengefasst sind. Die Empfehlung, bei deren Befolgung die Dosisersparung am grössten war, war die Aufforderung zum Verzicht auf Frischmilch für Kleinkinder und werdende Mütter. Auf diese Empfehlung soll noch kurz eingegangen werden. In den ersten Tagen des Fallouts waren in der Schweiz $\sim 1.5 \cdot 10^{15}$ Bq (40'000 Ci) Jod-131 deponiert worden. Von Anfang an bestand kein Zweifel, dass dieses Jod nur wenige Wochen lang Probleme bringen würde, denn es zerfällt rasch (Halbwertszeit = 8 Tage). Man wusste aber auch, dass unter diesen Umständen innerhalb weniger Tage hohe Jodaktivitäten in der Milch auftreten würden. Zudem hatte man Grund zur Annahme, dass diese Milch für erwachsene Personen keine Probleme bringen würden. Tatsächlich hat die Joddosis selbst bei den meistbetroffenen Erwachsenen als Folge des Milchkonsums keine 0,1 mSv (10 mrem) erreicht. Säuglinge und Kleinkinder sind hingegen in einer ganz anderen Situation. Als Folge des grossen Milchkonsums und der kleinen Schilddrüse wird für sie das Jod-131 12 mal gefährlicher eingestuft als für Erwachsene. Wollte man aber den Kleinkindern nicht eine wesentlich höhere Dosis als den Erwachsenen als Folge der Jodkontaminationen zumuten, so war, mindestens in der kritischen Zeit, ein Verzicht auf Frischmilch für Kleinkinder und Säuglinge anzustreben. Diese Problematik hat dann zur Empfehlung geführt, dass Kleinkinder und werdende Mütter auf Frischmilch verzichten sollen. Aufgrund der Ueberschüsse an Frischmilch sowie der stark angestiegenen Nachfrage nach Pulvermilch kann geschlossen werden, dass diese Empfehlung sehr gut befolgt worden ist.



Zeichenerklärung:



Gesamtbevölkerung



Kinder unter 2 Jahren, schwangere Frauen, stillende Mütter

Abb. 31:

Rekapitulation der Empfehlungen

5.7 Dosisüberblick

5.7.1 Grundlagen der Dosisberechnung

Bei einem Kernkraftwerkunfall setzen sich die Personendosen aus 4 Komponenten zusammen, nämlich:

- Externe Dosis aus der vorüberziehenden radioaktiven Wolke
- Inhalationsdosis
- Externe Dosis, verursacht durch die am Boden deponierten radioaktiven Substanzen
- Interne Dosis, verursacht durch den Verzehr (Ingestion) radioaktiver Nahrungsmittel.

Im Fall Chernobyl betragen die Anteile der Wolkendosis und der Inhalationsdosis etwa 1 % der Totaldosis und können deshalb vernachlässigt werden. Auf lange Sicht gesehen dominiert die externe Bodendosis; für das Jahr 1986 hingegen brachte die Ingestionsdosis den grössten Beitrag.

5.7.1.1 Externe Dosis

Die externe Dosis berechnet sich nach folgender Formel:

$$H_{\text{eff extern}} = \dot{H} \cdot t$$

$H_{\text{eff extern}}$ = Ganzkörperdosis die durch die externe Bestrahlung hervorgerufen wird [Sv]

\dot{H} = Ortsdosisleistung [Sv/h]

t = Verweilzeit im Freien [h]

Abb. 21 zeigt den Verlauf der Ortsdosisleistung \dot{H} in der Nordschweiz und im Tessin. Im Verlauf der ersten Monate nach dem Unfall ist \dot{H} deutlich

kleiner geworden; heute aber ist dieser Wert nahezu stabil und wird auch im Verlauf der nächsten Jahre nur wenig abnehmen. Die grösste Erhöhung der Ortsdosisleistung als Folge von Chernobyl haben wir im Tessin. Summiert man diese erhöhten Ortsdosisleistungen für das ganze Jahr 1986, so erhält man rund 1,6 mSv (160 mrem). Das entspricht einer Zusatzdosis von etwa 0,4 mSv (40 mrem) für Personen im Tessin, die täglich durchschnittlich 6 Stunden im Freien verbringen.

5.7.1.2 Ingestionsdosis

Die Ingestionsdosis berechnet sich nach folgender Formel:

$$H_{\text{eff Ingestion}} = C \cdot K \cdot D \cdot t$$

$H_{\text{eff Ingestion}}$ = Ganzkörperdosis, die durch die Ingestion hervorgerufen wird [Sv]

C = Nahrungsmittelkontamination [Bq/kg]

K = Konsumrate [kg/Tag]

D = Dosisfaktor [Sv/Bq]

t = Ingestionszeitraum [Tage]

Abb. 32 gibt die verwendeten Konsumraten und Dosisfaktoren an. Letztere basieren auf Berechnungen des Instituts für Strahlenhygiene in Neuherberg bei München und für diese Berechnungen ist wiederum so weit als möglich das Datenmaterial der ICRP verwendet worden.

5.7.2 Individualdosen

Bei der Berechnung der Individualdosen als Folge von Chernobyl wurde von den meistbetroffenen Regionen ausgegangen. Das meistbetroffene Gebiet der

Abb. 32: Dosisfaktoren und Konsumraten für die verschiedenen Bevölkerungsgruppen

Dosisfaktoren für Ingestion (Ref. 12)

Nuklid	Dosisfaktoren [Sv/Bq]		
	Erwachsene	Kinder 10 a	Kinder 1 a
I-131 ¹⁾	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Cs-137	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$9,3 \cdot 10^{-9}$	$9,3 \cdot 10^{-9}$
Cs-134	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$

Konsumraten für die verschiedenen Bevölkerungsgruppen

Konsumraten	Erwachsene	Kinder 10 a	Kleinkinder 0-2 a
Milch (l/d)	0,5	0,5	0,7
Gemüse und Salat (kg/d)	0,2	0,2	0,030 ²⁾
Fleisch (kg/d)	0,1	0,1	--
Sonderfleisch a) (kg/d)	0,025	0,025	--
Sonderfleisch b) (kg/d)	0,025	0,025	0,020

a) = Schaf- und Ziegenfleisch

b) = Kaninchen, Wild, Huhn, Innereien, Fische

1) = Der angegebene Dosisfaktor wird zur Berechnung der durch I-131 verursachten effektiven Ganzkörperdosis benutzt. Die Schilddrüsendosis ist 33-mal grösser

2) = Dieser Wert gilt für den Monat Mai, in dem das Angebot an Gemüsesorten noch nicht so umfassend ist wie später im Jahr (ab Juni waren Gemüse und Salat kaum noch kontaminiert)

Schweiz ist das Südtessin. Wie schon erwähnt muss im Südtessin mit einer externen Dosis von 0,4 mSv für das Jahr 1986 gerechnet werden.

Zu beachten ist, dass im Südtessin vorsorgliche Massnahmen zur Verminderung der Dosen getroffen worden sind. So wurde Milch aus dem Sopraceneri, die wenig radioaktiv war, im Südtessin als Konsummilch in den Handel gebracht. Das hat die Dosen reduziert, kompliziert aber die Dosisberechnungen. Zur Berechnung der Dosen im Monat Mai wurden deshalb Messdaten aus dem am zweitstärksten betroffenen Gebiet der Schweiz (der Nordschweiz) verwendet, und zwar sowohl für die Milch als auch für Salat und Gemüse. Die Dosis ist somit im Prinzip für den Schweizer berechnet worden, der Ende Mai aus der Nordschweiz ins Südtessin gezügelt ist. Wie schon erwähnt gab es im Tessin vorsorgliche Massnahmen zur Dosisverminderung. Bezüglich Cs-137 wurde durch Vermischen mit wenig aktiver Milch aus dem Nordtessin dafür gesorgt, dass auch im Südtessin die Aktivität der Konsummilch unter 185 Bq/l (5 nCi/l) blieb. Für die Dosisberechnung wurde deshalb für die erste Hälfte des Junis eine Aktivität von 185 Bq/l eingesetzt. Nachher wurde der in Abb. 26 gezeigte Verlauf der Cs-137 Aktivität (Kurve 4) für die Dosisberechnung verwendet.

Im übrigen wurden die Daten so ausgewertet, dass die Messpunkte auf der Graphik mit einer Umrandung versehen wurden, wobei nur vereinzelt Ausreisser in Kauf genommen wurden. Diese Methode hat somit nicht zum Ziel, die Durchschnittsdosis im meistbetroffenen Gebiet zu ermitteln, sondern man berechnet auf diese Art die Dosis der meistbetroffenen Personen im meist betroffenen Gebiet. Mit Hilfe von Ganzkörpermessungen konnte gezeigt werden, dass die berechneten Werte recht vernünftig sind. Zudem konnte aber auch gezeigt werden, dass der Durchschnittsschweizer nur etwa 10 % der berechneten Dosen akkumuliert hat.

Nachdem das Fallout-Spektrum sorgfältig untersucht worden war, war es offensichtlich, dass Jod-131 sowie Cäsium-134/137 die eigentlichen Problemisotope waren. Ebenso offensichtlich war, dass die Ingestions-Dosen für das Jahr 1986 fast ausschliesslich aus dem Verzehr der durch den Fallout kontaminierten Nahrungsmittel resp. Futtermittel resultierten. Das heisst, die

Kontamination des Grases brachte über Milch und Fleisch die grössten Dosen, die Kontamination von Salat und Gemüse brachte lediglich für den Monat Mai nicht vernachlässigbare Zusatzdosen. Verglichen mit der direkten Kontamination ist die Aktivitätsaufnahme über die Wurzeln für 1986 ohne Bedeutung. Abschätzungen über den Dosisbeitrag zusätzlicher Nahrungsmittel sowie über den Dosisbeitrag zusätzlicher Nuklide zeigten, dass diese kaum mehr als 20 % (10 % für zusätzliche Nahrungsmittel + 10 % für zusätzliche Nuklide) der berechneten Dosis als Folge von Jod und Cäsium in Milch, Fleisch und Gemüse ausmachen. Deshalb wurde die berechnete Dosis um 20 % erhöht, um diesem Beitrag Rechnung zu tragen.

Abbildung 33 zeigt die nach obigem Schema berechneten Ingestionsdosen für die meistbetroffenen Personen im meistbetroffenen Gebiet. Zu diesen Ingestionsdosen muss noch die externe Dosis von 0,4 mSv (40 mrem) addiert werden. Somit ergeben sich folgende Werte für das Jahr 1986:

Chernobyl-Dosis (für das Jahr 1986) der meistbetroffenen Bevölkerung aus den meistbetroffenen Gebieten in der Schweiz	mSv	mrem
Erwachsene	1,5	150
Kinder (10-jährig)	1,4	140
Kleinkinder		
- Empfehlungen nicht befolgt	2,0	200
- Empfehlungen befolgt	1,0	100

In der Westschweiz, im Mittelland und im Wallis war die entsprechende Dosis ca. 10 mal kleiner.

Abb. 33: Prognose der Ingestionsdosis für 1986

Gültig für die meist betroffenen Personen im meistbetroffenen Gebiet.

Nahrungsmittel	I-131 (Bq)	Cs-137 ¹⁾ (Bq)	Schilddrüsen- dosen (mSv)	effektive Ganzkörperdosis (mSv)
Erwachsene				
Milch	6'300	9'150	2,7	0,31
Gemüse	5'200	1'650	2,2	0,11
Fleisch		19'900		0,5
Rest ²⁾				0,2
Summe	11'500	30'700	4,9	~ 1,1
Kind, 10-jährig				
Milch	6'300	9'150	5,8	0,33
Gemüse	5'200	1'650	4,8	0,17
Fleisch		19'900		0,34
Rest ²⁾				0,20
Summe	11'500	30'700	10,6	~ 1,0
Kind, 1-jährig (Empfehlungen befolgt)				
Milch	1'800	11'600	6,5	0,4
Gemüse	200	100	0,7	0,02
Fleisch		2'400		0,04
Rest ²⁾				0,1
Summe	2'000	14'100	7,2	~ 0,6
Kind, 1-jährig (Empfehlungen nicht befolgt)				
Milch	8'800	12'800	32,0	1,20
Gemüse	800	250	3,0	0,09
Fleisch		2'400		0,04
Rest ²⁾				0,25
Summe	9'600	15'450	35,0	~ 1,6

1) Bei der Berechnung wurde Cs-134 berücksichtigt. Die Cs-134-Aktivität war überall 55 % derjenigen von Cs-137.

2) Korrektur für restliche Nahrungsmittel und restliche Nuklide (siehe 5.7.2)

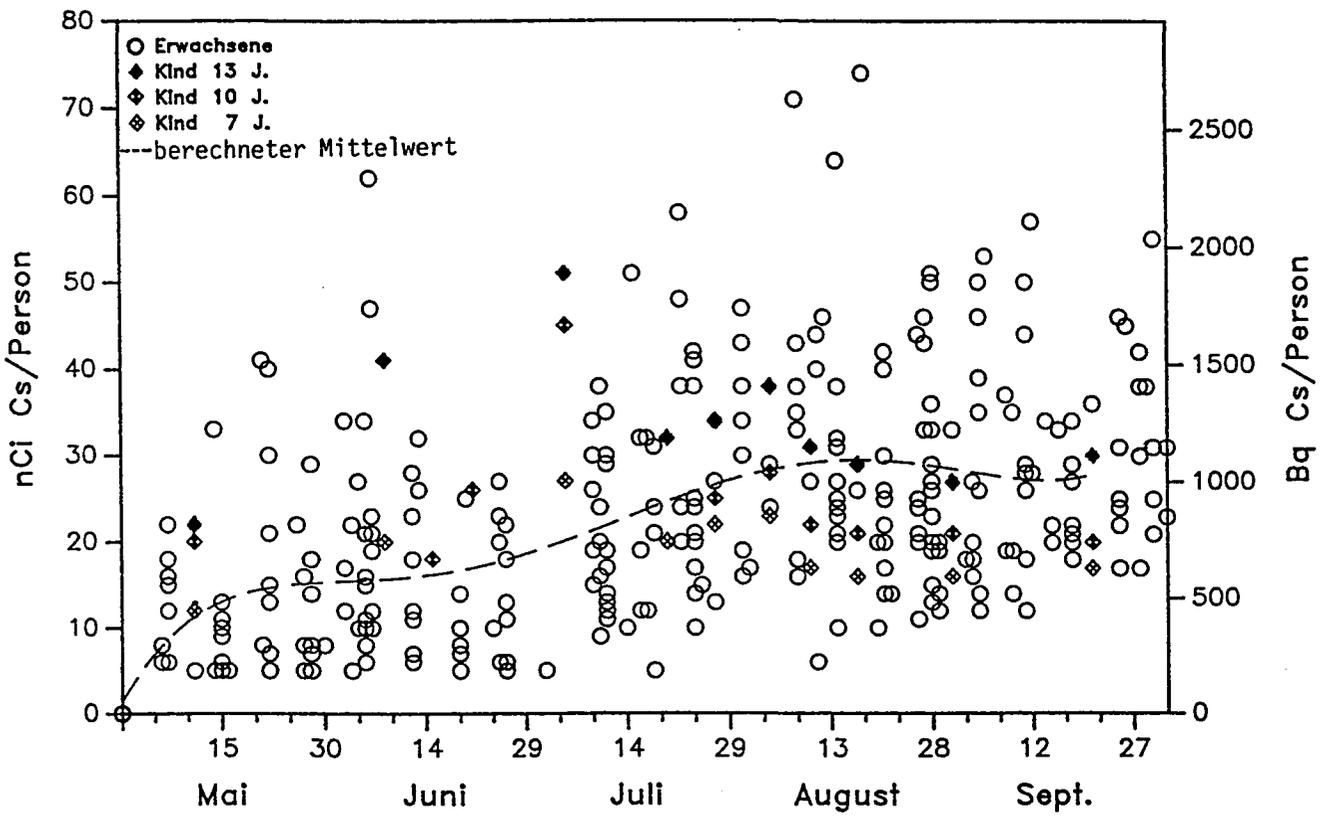
5.7.3 Kollektivdosen

Die Kollektivdosis für die Schweiz wird berechnet, indem man die Durchschnittsdosis des Schweizers mit der Anzahl der Einwohner unseres Landes multipliziert. Die Berechnung der Individualdosen hat ergeben, dass diese für die verschiedenen Altersklassen nur wenig voneinander abweichen. Es wurde deshalb nur eine, für alle Altersklassen repräsentative Durchschnittsdosis abgeschätzt. Diese Berechnungsart ist angebracht, wenn man bedenkt, dass nur 10 % der Einwohner jünger als 9 Jahre sind, und dass es schwierig abzuschätzen ist, wie gut die Empfehlungen befolgt worden sind.

Aus der Karte mit den maximalen Ortsdosisleistungen (Abb. 24) lässt sich berechnen, dass der Durchschnittswert für die Schweiz bei 15 % des Maximalwertes im Tessin liegen muss. Zieht man zudem in Betracht, dass die Ingestionsdosen für die meistbetroffene Personengruppe im meistbetroffenen Gebiet berechnet worden sind, (d.h. im Prinzip für Selbstversorger) und dass der Durchschnittsschweizer kaum jeden Tag 6 Stunden im Freien verbringt, so scheint 10 % der berechneten Dosen ein vorsichtiger Wert für die Durchschnittsdosis zu sein. Diese Annahme ist durch Ganzkörpermessungen im EIR bestätigt worden. Insgesamt sind ~ 240 Personen aus ganz verschiedenen Teilen der Schweiz im EIR auf Cäsium-134 und 137 ausgemessen worden. Wie erwartet fand man bei Selbstversorgern aus dem Tessin die höchsten Werte, nämlich 90 % der berechneten Cs-Inkorporation bei der Messung am 20. Juli resp. 75 % am 20. August. Der Durchschnittswert von 150 Personen, die im Zeitraum Mitte Juli bis anfangs September ausgemessen worden waren, betrug aber nur 8,5 % der berechneten Cäsium-Inkorporation. Abb. 34 zeigt die Messresultate für Personen aus dem Mittelland.

Aufgrund dieser Daten und Ueberlegungen kann somit geschlossen werden, dass die Dosis des Durchschnittsschweizers als Folge von Chernobyl für 1986 nicht mehr als 0,15 mSv (15 mrem) beträgt. 6,4 Mio. Personen multipliziert mit 0,15 mSv ergibt eine Kollektivdosis für 1986 von 960 manSv (96'000 manrem).

Abb. 34: Ganzkörpermessungen (Cs-134 und Cs-137 Aktivität) an Personen aus dem Mittelrand (Ref. 11)



5.7.4 Nutzen der Schutzmassnahmen

Beim Ereignis Chernobyl bestand das Ziel der Schutzmassnahmen darin:

- Leicht vermeidbare Dosen möglichst zu vermeiden. Diesem Zweck dienen Empfehlungen bezüglich Jagd und Fischerei, Verwendung von Schaf- und Ziegenmilch, vorsorgliche Massnahmen bezüglich Milchkonsum im Tessin usw.
- Die bezüglich Strahlenwirkung empfindlichste Bevölkerungsgruppe, nämlich noch ungeborene Kinder und Kleinkinder möglichst zu schützen.

Die gewählte Form der Empfehlungen hatte den Nachteil, dass der Schutz nicht offiziell verordnet und durchgeführt worden war. Sie hatte aber den Vorteil, dass im Fall der Feten und Kinder in der meistbetroffenen Zeit im Monat Mai eine Nulldosis angestrebt werden konnte. Abb. 33 zeigt, dass das Einhalten der Empfehlungen deutliche Dosisreduktionen gebracht hat. Alles in allem kann bei Einhaltung der Empfehlungen zum Schutz der Kinder und Feten eine Reduktion der Kollektivdosis dieser Bevölkerungsgruppe von 40 manSv (4'000 manrem) abgeschätzt werden wobei diese Dosisreduktion in erster Linie der verminderten Aufnahme von Jod-131 zuzuschreiben ist. Eine solche Dosisreduktion mag bei Kleinkindern, die strahlensensitiver sind als Erwachsene, die statistisch berechneten tödlichen Spätfolgen um einen Fall vermindern und, da in erster Linie Schilddrüsendosen reduziert worden sind, die Zahl der heilbaren Schilddrüsen-Krebskrankheiten um ein paar Fälle vermindern. Abb. 35 gibt eine Zusammenstellung dieser Erwartungen.

Abb. 35: Nutzen der Empfehlung zum Verzicht auf Frischmilch	
Zahl der Kinder unter 2 Jahren in der Schweiz	: ~225'000
Maximale Dosiseinsparung	: ~1 mSv (100 mrem)
Durchschnittliche Dosiseinsparung ¹⁾	: ~0,2 mSv (20 mrem)
Eingesparte Kollektivdosis bei allgemeiner Einhaltung der Empfehlung	: ~45 manSv (4500 manrem)
Eingesparte Schilddrüsendosis, auf Ganzkörperäquivalentdosis umgerechnet	: ~35 manSv (3500 manrem)
Verhütete tödliche Krebsfälle (statistisch berechnet, Risikofaktor gemäss ICRP)	: ~ 1
Verhütete heilbare Schilddrüsen-Kreisl-erkrankungen (statistisch berechnet)	: ~ 4

1) Da beim Milchkonsum von den Messresultaten aus der Nordschweiz ausgegangen worden ist (s. 5.7.2), ist ein Durchschnittswert von 20 % angebracht (siehe auch Abb. 24).

6. Vergleich Unfall Chernobyl mit anderen Belastungen

Die zusätzliche Bestrahlung der Schweizer Bevölkerung als Folge von Chernobyl soll in diesem Abschnitt noch kurz mit der "normalen" alljährlich anfallenden Strahlenbelastung verglichen werden. Aehnlichkeiten sowie Unterschiede der verschiedenen Bestrahlung werden aufgezeigt. Zudem werden die gesundheitlichen Folgen diskutiert.

6.1 Vergleich mit natürlicher Strahlenbelastung

Die natürliche Strahlenbelastung des Schweizers beträgt im Durchschnitt etwa 3 mSv pro Jahr (300 mrem). Ueber 50 % davon wird durch das Radon in der Atemluft verursacht. Zu beachten ist, dass, ähnlich wie die Folgedosen von Chernobyl, auch die natürliche Strahlenbelastung je nach Lebensstil und Region stark variiert. 1,5 mSv pro Jahr (150 mrem/a) ist als natürliche Strahlenbelastung ein Wert, der ebenso gut möglich ist wie 50 mSv pro Jahr (5000 mrem/a). Abb. 36 zeigt die Verhältnisse bezüglich Radon. Die Durchschnittsdosis des Schweizers als Folge von Chernobyl für 1986 liegt etwa bei 0,15 mSv (15 mrem). Als Extremwert sind 2 mSv (200 mrem) berechnet worden. Zur natürlichen Strahlenbelastung sind also in diesem Jahr beim Durchschnittsschweizer rund 5 % Zusatzdosis als Folge von Chernobyl hinzugekommen. Selbst für die meistbelasteten Personen in der meistbelasteten Region hat Chernobyl kaum eine Verdoppelung der Strahlenbelastung in diesem Jahr gebracht. Zusammengefasst sieht das folgendermassen aus:

Schwankungsbereich der natürlichen Strahlenbelastung in der Schweiz (Ref. 13)

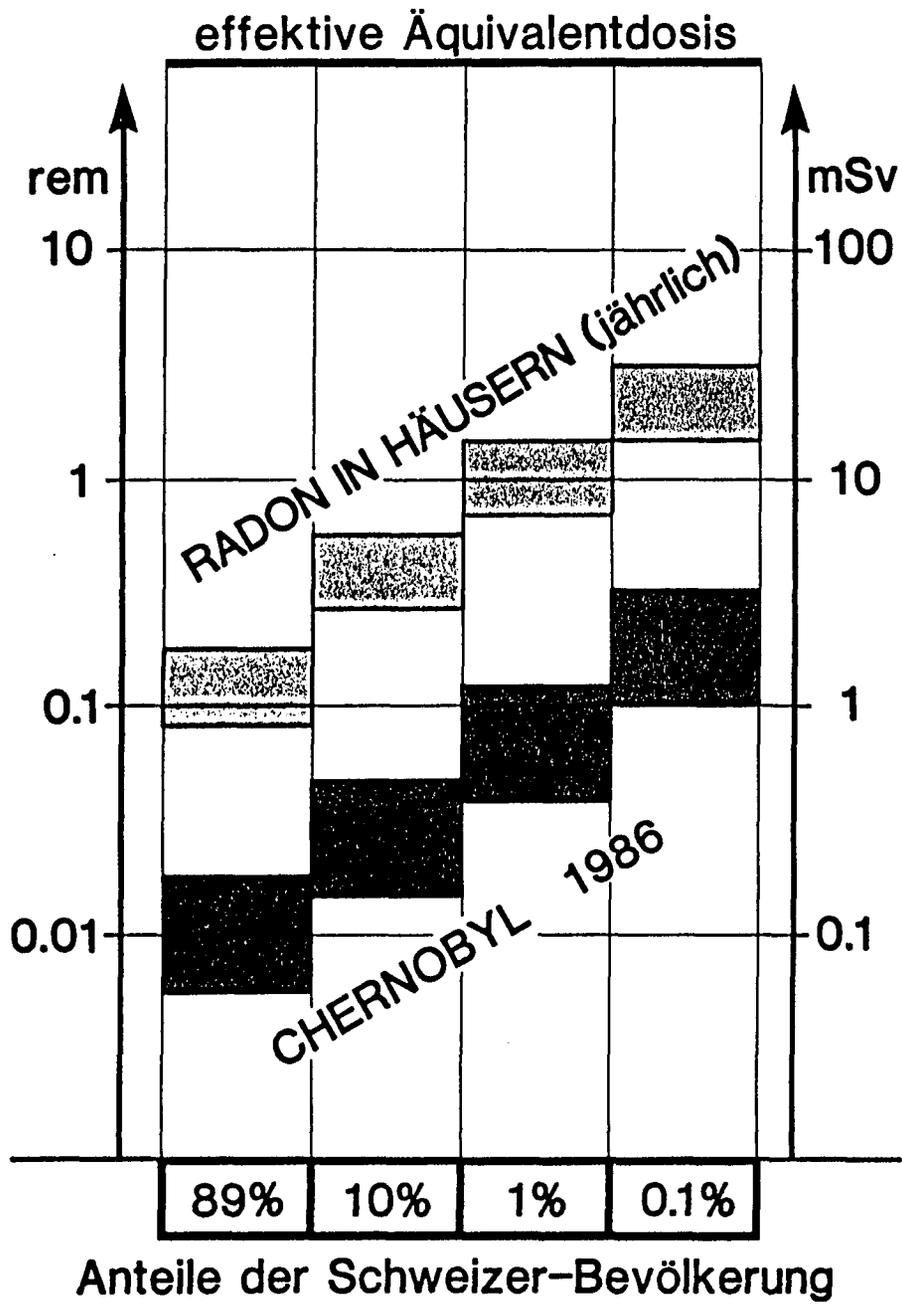
Bestrahlung aus dem Boden	: 0,4 - 2,0 mSv/Jahr (40 - 200 mrem)
Bestrahlung aus dem Weltall	: 0,3 - 0,8 mSv/Jahr (30 - 80 mrem)
Bestrahlung wegen Radon	: 1,4 - 3,8 mSv/Jahr (140 - 380 mrem)

(mittlere Werte aus verschiedenen Regionen)

im Vergleich dazu:

Röntgendiagnostische Aufnahmen	: 0 - > 10 mSv/Jahr (0 - >1 rem)
Unfall Chernobyl, 1986	: 0,05 - 2,0 mSv (5 - 200 mrem)

Abb. 36: Vergleich der 1986 anfallenden Dosen wegen Chernobyl mit den jährlich anfallenden Dosen als Folge des Radons in den Wohnräumen (Ref. 11)



Der Vergleich der Folgedosen von Chernobyl mit der natürlichen Strahlenbelastung ist mindestens für die vom Cäsium verursachten Dosen absolut zulässig. Das Cäsium ist bezüglich Metabolismus dem Kalium-40 nahe verwandt und letzteres ist für den grössten Teil der natürlichen internen Strahlenbelastung verantwortlich. Nebst dem radioaktiven Cäsium hat in erster Linie das Jod-131 Dosen verursacht. Zwar kennt die Natur kein Nuklid, das einen erwähnenswerten Beitrag zur natürlichen Strahlendosis liefert und mit Jod-131 vergleichbar ist. Jod-131 ist aber ein Nuklid, das in der Medizin seit Jahrzehnten bei Tausenden von Patienten in wesentlich höheren Dosen eingesetzt worden ist, ohne dass unerwartete Nebeneffekte beobachtet worden sind.

Erwähnenswert ist, dass der Fallout von Chernobyl nur minime Mengen von α -Strahlern enthalten hat. Im Gegensatz dazu wird über 50 % der natürlichen Dosis von α -Strahlern verursacht, nämlich vom Radon und seinen Folgeprodukten. Dies ist wichtig, da im tiefen Dosisbereich die α -Strahler mit gutem Grund für gefährlicher eingeschätzt werden als die β - und γ -Strahler. Es wird auch geschätzt, dass Radon aus Boden und Baumaterialien für mehr als 100 Lungen-Krebsfälle pro Jahr verantwortlich ist.

6.2 Vergleich mit Bombenfallout

Zu berücksichtigen ist der unterschiedliche zeitliche Verlauf des Fallout-Anfalls. Der Bombenfallout ist primär in den Jahren 1956 bis 1966 kontinuierlich deponiert worden, wogegen der Fallout von Chernobyl innerhalb weniger Tage anfiel. Im Gegensatz zu Chernobyl war die Verteilung des Bombenfallouts in der Schweiz aber recht homogen. Zu beachten ist, dass die Nuklide, die den grössten Anteil der Dosis verursacht haben, in beiden Fallouts identisch sind. Abb. 37 gibt genauere Daten über den relativen Anstieg der langlebigen Depositionen (Cs-137 und Sr-90) als Folge von Chernobyl. Die Cs-137 Kontamination des Bodens verdoppelte sich etwa im Durchschnitt und wurde im Südtessin ca. 6 mal grösser als unmittelbar vor Chernobyl gemessen.

6.3 Berechnete Strahleneffekte als Folge von Chernobyl

Wegen der Kontamination des geernteten Heus werden die Folgedosen von Chernobyl zu einem nicht vernachlässigbaren Teil noch 1987 anfallen. Für das Jahr 1986 ist für die Schweizer Bevölkerung eine Kollektivdosis von 960 manSv abgeschätzt worden (s. 5.7.3). Für 1987 werden von uns 370 manSv voranschlagt. Darnach werden die Dosen nur noch sehr verdünnt anfallen und eine einigermaßen zuverlässige Prognose ist schwierig. Es wird hier deshalb primär versucht, die Folgen der meistbelasteten Jahre abzuschätzen (d.h. 1986 + 1987 mit total 1330 manSv oder 133'000 manrem). Dabei werden die Risikowerte der ICRP verwendet.

Abb. 37: Vergleich des Fallouts von Chernobyl mit dem Bomben-Fallout					
A. Relativer Anstieg der Bodenkontamination als Folge von Chernobyl					
Zustand 1986	vor Chernobyl	nach Chernobyl			
		Durchschnittswert	Südtessin		
Radioaktives Cäsium-137	100 %	~ 200 %	~ 600 %		
Radioaktives Strontium-90	100 %	101 %	104 %		
B. Durchschnittsdosen in mSv als Folge der Bombentest und als Folge von Chernobyl					
	Dosen bis 1985	1986	1987	1988	1990
Bombentests	~ 1,5	~ 0,02	~ 0,02	~ 0,02	~ 0,02
Chernobyl	-	~ 0,15	~ 0,06	~ 0,02	~ 0,02

6.3.1 Genetische Effekte

Der überwiegende Anteil (~ 90 %) der Dosen als Folge von Chernobyl ist als Ganzkörperdosen angefallen (Cäsium und externe Bestrahlung). Folglich kann man die 1330 manSv als Gonadendosis annehmen. Nun ist aber nur derjenige Anteil der Gonadendosis von Bedeutung, welcher von jungen Menschen aufgenommen wird, die sich noch fortpflanzen werden. Im Durchschnitt sind das Leute von ~ 30 Jahren und jünger. Aus der Altersverteilung der Schweizer Bevölkerung lässt sich berechnen, dass nur 45 % der kollektiven Gonadendosis signifikant sind; das ergibt 600 manSv (60'000 manrem). Der Risikowert für alle zukünftigen Generationen berechnet, ist gemäss ICRP Publikation 26 rund 0.02 pro Sv. Statistische Berechnungen ergeben somit 12 schwerwiegende Fälle von Erbkrankheiten, die im Verlauf von ungefähr 10 Folgegenerationen wegen Chernobyl in der Schweiz auftreten können. Zu bedenken ist, dass gemäss heutiger Erkenntnis rund 10 % der Menschen an Krankheiten leiden oder später leiden werden, die ganz oder teilweise genetisch bedingt sind. Die natürliche Mutationsrate, die zu Erbschäden führt, sollte nicht unterschätzt werden.

6.3.2 Krebserkrankungen

Der offizielle Risikowert der ICRP für strahlenverursachte Krebskrankheiten ist 0.0125 pro Sv. Mit diesem Risikowert wird im beruflichen Strahlenschutz gearbeitet. Da in der allgemeinen Bevölkerung aber ein grosser Anteil aus jungen, strahlensensibleren Menschen besteht, ist es wohl vorsichtiger, mit dem Wert 0.02 pro Sv zu rechnen, der ebenfalls in ICRP-Publikation 45 verwendet wird.

Gemäss diesem Risikowert wären somit 27 tödliche Krebsfälle als Folge der Chernobyl-Dosen zu erwarten. Zusätzlich muss mit einer etwa gleich grossen Zahl an heilbaren Krebserkrankungen gerechnet werden. Diese Krebsfälle würden sich etwa verdoppeln, wenn man die Folgedosen nicht nur bis zu den Jahren 1986 und 1987 sondern bis zum endgültigen Zerfall des Cäsiums-137 mitberücksichtigen würde.

Zu beachten ist, dass obige Zahlen recht unsicher und eher zu hoch angesetzt sind. Es gibt radiobiologische Hinweise, die eher dafür plädieren, dass so kleine Dosen überhaupt keine Effekte haben.

Diese berechneten, zusätzlichen Krebsfälle werden in einer Zeitspanne von ~ 50 Jahren anfallen; das ergibt etwa einen zusätzlichen Todesfall pro Jahr. Vergleicht man die berechneten Folgen von Chernobyl und die ebenfalls berechneten Folgen der natürlichen Strahlung mit den in mehreren Studien recht gut belegten Folgen des Rauchens, so sieht das folgendermassen aus:

	tödliche Krebsfälle pro Jahr in der Schweiz
Chernobyl	~ 1
Natürliche Strahlung	~ 400
Rauchen	~ 2'300
Alle Ursachen	15'000

* * * * *

Verdankung

Für die Zusammenstellung dieses Berichtes wurden zahlreiche Daten verschiedener Organisationen und Laboratorien der Schweiz benützt, welche an entsprechender Stelle angegeben sind. Ihnen allen sei hier ein Dank ausgesprochen. Insbesondere ist der grosse Einsatz der NAZ zu erwähnen, die etwa 12'000 Labordaten aufgearbeitet hat.

Referenzen

- [1] Guidebook on the Introduction to Nuclear Power
IAEA, Technical Reports Series No 217, 1982
- [2] Der Unfall im Kernkraftwerk Chernobyl,
Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-S-39, Juni 1986
ISBN3-923875-11-8
- [3] Informationsaustausch USNRC-HSK
- [4] The Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant and its
Consequences
Draft August 1986, Working Document for the IAEA Post-Accident Review
Meeting
- [5] Draft Report on Chernobyl Accident,
Institut de protection et de sûreté nucléaire, 11 Juin 1986
- [6] Deposition of radionuclides from the Chernobyl Cloud,
Meteorological Office and National Radiological Protection Board, UK
- [7] Radiological Consequences in Italy of the Chernobyl Accident,
ENEA-DISP, Rome June 1986, DOC/DISP(86) 1
- [8] Informationsaustausch WHO-HSK
- [9] Informationsaustausch NAZ resp. Gesamtleitung Chernobyl-HSK
- [10] Informationsaustausch Kernkraftwerke-HSK
- [11] Informationsaustausch EIR-HSK
- [12] Dosisfaktoren für Inhalation oder Ingestion von Radionuklidverbindungen
Institut für Strahlenhygiene des Bundesgesundheitsamtes, Neuherberg,
ISH-Heft 63, Heft 78 und Heft 80

- [13] Ueber die Auswirkungen des Reaktorunfalles in Chernobyl auf die Bevölkerung in der Schweiz,
EIR-Schule für Strahlenschutz, Würenlingen 1986

- [14] Bundesamt für Gesundheitswesen.
Verstrahlungslage in der Schweiz nach dem Unfall in Chernobyl.
Sept. 86.

- [15] IAEA Safety Series No 75-INSAG-1
Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl-Accident, Wien, September 1986