

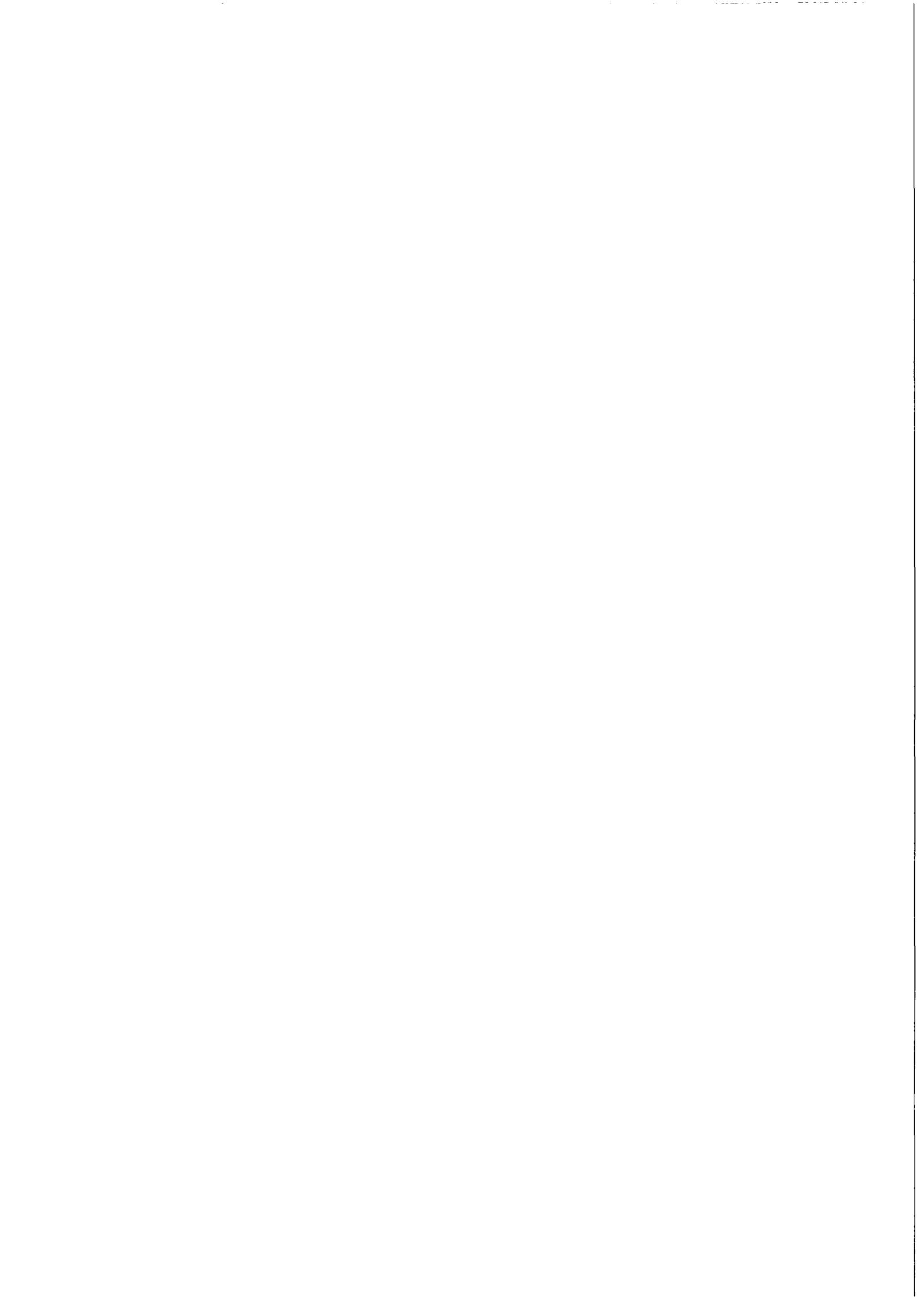
KfK 3548

Juli 1983

Niederschlag und Washout im Unfallfolgenmodell der Deutschen Risikostudie — Kernkraftwerke

**S. Vogt, W. Hübschmann, P. Wittek
Hauptabteilung Sicherheit**

Kernforschungszentrum Karlsruhe



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Sicherheit

KfK 3548

Niederschlag und Washout im Unfallfolgenmodell
der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke

von

S. Vogt, W. Hübschmann, P. Wittek

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Kurzfassung

In der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke (DRS) wird die Auswaschung der Radioaktivität aus der Aktivitätsfahne und die dadurch verursachte Abnahme der Aktivität durch eine Exponentialfunktion beschrieben. Der Washout-Koeffizient bestimmt dabei in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität den jeweils ausgewaschenen und am Boden abgelagerten Bruchteil der Aktivität. Aus den fein aufgelösten Niederschlagsmessungen des Kernforschungszentrums Karlsruhe (10minütige Niederschlagsmengen) wurden die mittlere Niederschlagsintensität und -dauer in drei Intensitätsstufen ermittelt. Niederschlagsangaben des Deutschen Wetterdienstes (DWD) wurden mit Hilfe eines Schlüssels diesen Intensitätsstufen zugeordnet.

Es wird vorgeschlagen dieses Washout-Modell in das Unfallfolgenmodell der DRS, Phase B zu implementieren. Der Einfluß verschiedener Washout-Modelle und -Parameter auf die Ergebnisse der DRS (Zahl der Fröhschäden) wird gezeigt.

Abstract

Precipitation and Washout in the Consequence Model of the German Reactor Risk Study

In the German Reactor Risk Study (GRRS), the washout of radioactivity contained in the activity plume and the decrease of its activity content is described by an exponential function. The fraction of the plume activity being washed out and deposited on the ground is determined by the washout coefficient. It depends on the precipitation intensity. Average precipitation intensity and duration in three intensity ranges have been evaluated on the basis of the short term precipitation measurements (10 minute precipitation) performed in the Karlsruhe Nuclear Research Center. Precipitation observations of the German Weather Service have been assigned to these intensity ranges using a transformation key.

II

This washout model is proposed to be implemented into the consequence model of the GRRS, phase B. The influence of various washout models and parameters on the results of the GRRS (number of early fatalities) is being shown.

	Seiten
1. Einleitung	1
2. Datenmaterial und Aufbereitung	1
2.1 Vorhandene Niederschlagsdaten	1
2.2 Daten des KfK	2
2.3 Daten des DWD	3
3. Washout-Koeffizient	5
4. Washout-Modelle	6
4.1 Amerikanische Reaktor-Sicherheits-Studie (RSS)	6
4.2 Deutsche Risikostudie - Kernkraftwerke (DRS), Phase A	7
4.3 Washout-Modell der DRS, Phase B	7
5. Sensitivitätsuntersuchungen	9
6. Literatur	12

1. Einleitung

In der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke (DRS) /DR79/ werden die Folgen unkontrollierter Freisetzungen radioaktiver Stoffe in die Atmosphäre analysiert. Solche als unfallbedingte Freisetzung bezeichneten Ereignisse sind außerordentlich selten.

Bei den Berechnungen der amerikanischen Reaktor-Sicherheitsstudie (RSS) /RS75/ sowie in der deutschen Studie /FA81/ zeigte sich, daß die Unfallfolgen örtlich dann besonders schwerwiegend sein können, wenn die Freisetzung bei Wetterlagen mit Niederschlag erfolgt. Durch Niederschlag wird das radioaktive Material (Aerosole und elementares Jod) verstärkt am Boden abgelagert. Hierdurch erhöht sich die externe Bestrahlung vom Boden - und damit die gesundheitliche Gefährdung - gegenüber Wetterabläufen ohne Niederschlag. Der vorliegende Bericht beschreibt zunächst das für die DRS vorliegende Datenmaterial und dessen Aufbereitung. In Abschnitt 4 wird gezeigt, wie bisher das Auswaschen (washout) in der amerikanischen RSS bzw. in der deutschen Studie behandelt wurde. Daraufhin wird ein Washout-Modell beschrieben, welches die Kenntnis über Niederschläge soweit wie möglich berücksichtigt und welches in der Phase B der DRS verwendet werden sollte. Zum Schluß wird der Einfluß der unterschiedlichen Modelle im Unfallfolgenmodell UFOMOD auf die Schadensfolgen untersucht.

2. Datenmaterial und Aufbereitung

2.1 Vorhandene Niederschlagsdaten

Die Modelle der atmosphärischen Ausbreitung innerhalb der Unfallfolgenmodelle simulieren die Änderungen im Wettergeschehen meist in einstündigen Intervallen. Eine Anwendung solcher Modelle an bestimmten Standorten ist oftmals nur bedingt möglich, da die entsprechenden Eingabedaten in der geforderten Detaillierung und Auflösung weder am Standort noch in dessen näherer Umgebung erfaßt und archiviert sind.

In der DRS wurden daher alle 19 zu betrachtenden Standorte in vier meteorologische Standortregionen eingeordnet, innerhalb derer jeweils ein Satz meteorologischer Daten benutzt wird. Die Grenzziehung für eine Region ergibt sich aus der Forderung nach einheitlichen Ausbreitungsverhältnissen und topo- bzw. geographischer Ähnlichkeit. Die Standorte, die Standortregionen und die zugeordneten meteorologischen Meßstationen sind in Tab. 1 aufgelistet. Die Informationen über Niederschlag an diesen vier Stationen sind jedoch unterschiedlicher Natur. Die Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Hannover und München geben den Niederschlag in verschlüsselter Form an, während im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) und im Kernkraftwerk Obrigheim (KWO) Informationen über die Niederschlagsmenge und im KfK zusätzlich über die Niederschlagsdauer vorliegen.

2.2 Daten des KfK

Seit Dezember 1972 werden im KfK die für die Berechnung der Ausbreitung von Schadstoffen relevanten Daten erfaßt und als digitale Werte gespeichert /DI76/. Alle gespeicherten Mittelwerte gelten für eine Zeit von 10 Minuten. Bei Niederschlag wird am Ende eines jeden 10-min-Zyklus die gefallene Niederschlagsmenge auf 1/100 mm genau registriert. Die erste Auswertung soll die Frage beantworten: Wie lange regnet es während eines Niederschlagsereignisses, und wieviel Regen ist dann gefallen?

Von einem Niederschlagsereignis wird dann gesprochen, wenn innerhalb von 10 Minuten mindestens 2/100 mm Niederschlag gefallen sind. Die Dauer ist mindestens 10 Minuten, und das Ereignis ist beendet, sobald während eines darauffolgenden 10-min-Zyklus kein Niederschlag mehr angezeigt wird.

Tab. 2 zeigt folgendes: Unabhängig davon, wie lange ein Niederschlag dauert, erbringen 87 % der Niederschlagsereignisse nicht mehr als 1 mm Regen. Fast 5 % der Niederschläge erbringen mehr als 3 mm. Während 57,0 % der Niederschläge höchstens 10 Minuten anhalten, dauern 12,9 % der Niederschläge länger als eine Stunde.

Die Aussagen der Tab. 2 können nicht unmittelbar in ein Washoutmodell der DRS einfließen. In der Studie wird nämlich ein Konzept der Wetterabläufe verwendet, bei dem sich die Wetterbedingungen stündlich zur vollen Stunde ändern. Die Auswahl der Wetterabläufe erfolgt ohne Berücksichtigung von Anfang oder Ende eines Regenereignisses. Daher ist ein zeitliches Übereinstimmen (Beginn und Ende) von Wetterablauf und Regenereignis selten und rein zufällig. Außerdem ist die Auswaschrates (s. u.) nicht von der stündlichen Niederschlagsmenge I_h sondern von der Niederschlagsintensität \dot{I} (in Menge je Zeiteinheit) abhängig.

Eine weitere Auswertung der Niederschlagsdaten des KfK erfolgte daher im Hinblick auf die Ermittlung einer mittleren Regendauer während einer Stunde sowie einer mittleren, aus 10-min-Meßwerten errechneten Niederschlagsintensität \dot{I} für jede Niederschlagsstufe. Dabei wird für jede Stunde mit Niederschlag geprüft, wie viele 10-min-Werte Regen aufweisen. Für alle Stunden mit Niederschlag der Jahre 1973 bis 1981 wird dann eine mittlere Regendauer innerhalb einer Stunde bestimmt. Dabei erfolgt die Zuordnung der jeweiligen "Regenstunde" in eine Niederschlagsstufe über die Intensität \dot{I} . Tab. 3 zeigt beispielhaft für sechs Stunden, wie die mittlere Regendauer und die Niederschlagsintensität berechnet werden. In Tab. 4 ist das Ergebnis dieser Auswertung von 10 570 Stunden mit Niederschlag aufgelistet. Es zeigt sich, daß für Niederschläge mit \dot{I} größer 1 mm/h die bisherige Annahme einer Niederschlagsdauer von 30 min eine Unterschätzung der Niederschlagsdauer darstellte.

2.3 Daten des DWD

Die Stationen des DWD messen die Gesamtniederschlagsmenge zweimal pro Tag mit einem Hellmannschen Regenmesser ohne Registrierung der Niederschlagszeit und der Intensität. Fällt zum Zeitpunkt der stündlichen Wetterbeobachtungen Niederschlag, so wird dies vom Beobachter in Form einer Schlüsselzahl festgehalten. Bei der Angabe der Schlüsselzahl soll das Wetter innerhalb der jeweiligen Stunde vor der Beobachtung mitberücksichtigt werden.

Die ersten 3 Spalten der Tab. 5 sind dem Beobachterhandbuch des DWD entnommen und zeigen die Zuordnung zwischen Schlüsselzahl und Niederschlag. Eine unmittelbare Umsetzung jeder dieser Zahlen in eine Regenintensität würde eine unrealistisch hohe Genauigkeit vortäuschen. Es werden stattdessen die Niederschlagsstufen 0, 1, 2 und 3 eingeführt.

Stufe	Niederschlagsintensität I
0	0
1	$0,02 \leq \dot{I} < 1 \text{ mm/h}$
2	$1 \leq \dot{I} < 3 \text{ mm/h}$
3	$\geq 3 \text{ mm/h}$

Jeder Niederschlag wird einer der Stufen zugeordnet. Eine Unterteilung der Stufe 1 wie in Tab. 4 ist anhand des Datenmaterials des DWD nicht zweckmäßig. Der letzten Spalte der Tab. 5 kann entnommen werden, wie häufig eine bestimmte Schlüsselzahl in Hannover 1970 gemeldet wurde. Addiert man die Häufigkeiten der Schlüsselzahlen 50 bis 99, so ergeben sich in 18,92 % der Zeit Niederschläge in fester oder flüssiger Form. Diese Angabe erscheint allerdings zu hoch, verglichen mit der im KfK beobachteten Häufigkeit. Daher werden Schlüsselzahlen mit sehr niedriger Niederschlagsintensität der Stufe null zugeordnet, in der kein Niederschlag angenommen wird. Die Häufigkeiten aller Schlüsselzahlen die in Stufe 1 bis 3 eingeordnet wurden, ergibt dann 15,27 %. Dies ist zu vergleichen mit der Summe der Zeiten mit Niederschlag im KfK (14,55 %, s. Tab. 4) in den Jahren 1973 bis 1982.

Ein weiteres Prüfkriterium für die Güte der Zuordnung ist der Jahresniederschlag, der sich a) aus der Häufigkeit der drei Stufen, den mittleren Intensitäten und den mittleren Dauern der Tab. 4, sowie b) aus den täglichen, integralen Messungen mit einem Hellmannschen Regenmesser ergibt. Der Quotient des direkt gemessenen Niederschlags, dividiert durch die aus der Zuordnung ermittelte Summe, beträgt 1,06 für München und 1,05 für Hannover.

Jahresniederschlag	DWD München	DWD Hannover
berechnet	876 mm	738 mm
gemessen	927 mm	777 mm

3. Washout-Koeffizient

Neuere Veröffentlichungen befürworten eine direkte Bestimmung des λ entsprechend der Regenintensität I , /BR81/. Der vorgeschlagene funktionale Zusammenhang lautet:

$$\lambda = a \cdot I^b$$

I bedeutet die Regenintensität als Augenblickswert, angegeben in mm pro Stunde; a und b sind Konstanten. Gestützt auf eine Literaturübersicht schlägt Brenk die in Tab. 6 aufgelisteten Werte für a und b für elementares Jod vor /BR81/.

Für Aerosole ist in der Literatur ein größeres Spektrum von Zahlenwerten und funktionalem Zusammenhang zwischen λ und I zu finden. Die Kurven und Konstanten streuen über einen Bereich von mehr als vier Zehnerpotenzen. In /GE63/, /BA70/, /ES72/, /AC73/ und /HI76/ findet man einen konstanten Wert für λ , in /WO69/ und /DA70/ einen linearen Zusammenhang und in /BU69/, /PE70/, /SL78/ eine exponentielle Beziehung zwischen λ und I .

Als Resümee dieser Arbeiten schlägt Brenk die in Tab. 6 angegebenen Werte vor. Schrödl und Urban /SC81/ vergleichen die mit den verschiedenen Exponenten erhaltenen Zahlenwerte des Washout-Faktors bei Regenintensitäten zwischen 1 und 6 mm/h. Sie halten einen Wert von 0,8 für b für angemessen. Für die Phase B der Risikostudie schlagen wir die in Tab. 6 in der letzten Zeile aufgelisteten Werte vor, die sich mit den Werten von Schrödl und Urban decken. Es ist

zu beachten, daß diese λ -Werte sich entsprechend den Angaben in der Literatur nicht auf die meist gemessene stündliche Niederschlagsmenge I_h , sondern auf die Niederschlagsintensität \dot{I} während der tatsächlichen Niederschlagsdauer beziehen.

4. Washout-Modelle

4.1 Reaktor-Sicherheits-Studie (RSS)

Das Auswaschen der Aktivität aus der Aktivitätsfahne wurde im Unfallfolgenmodell CRAC der RSS /RS75/ mit dem gebräuchlichen Ansatz beschrieben: Der ausgewaschene Teil der Aktivität ist proportional der Aktivitätskonzentration $A(t)$.

$$dA = -\lambda A(t)dt. \quad (1)$$

Dementsprechend nimmt der verbleibende Anteil f_w der Aktivität in der Aktivitätsfahne wie folgt ab:

$$f_w = e^{-\lambda \Delta t_r} \quad (2)$$

Δt_r ist die Zeit, in der die Fahne dem Niederschlag ausgesetzt ist. λ ist der sogenannte Washout-Koeffizient. Nach /SL68/ ist dieser abhängig von der Niederschlagsintensität I . In CRAC wurde jedoch λ entsprechend dem Niederschlagstyp angenommen, da das amerikanische meteorologische Datenmaterial keine Information über die Niederschlagsintensität selbst enthielt. Der Niederschlagstyp wurde über die Ausbreitungskategorie ermittelt. Danach tritt Aufgleitregen (warm frontal storms) bei den Ausbreitungskategorien E und F auf; schauerartige Niederschläge (convective storms) sind den Ausbreitungskategorien A bis D zugeordnet.

Die gewählten Zahlenwerte für λ enthält Tab. 7. Bezüglich der Regendauer lag nur die Information "Niederschlag" bzw. "kein Niederschlag" in der jeweiligen Stunde vor. Als mittlere Dauer des Niederschlags

in solchen Stunden wurde 0,5 h gewählt. Diese Annahme stützt sich auf verschiedene Arbeiten /MA70/, /AU72/ und /ZA73/.

4.2 Deutsche Risikostudie - Kernkraftwerke (DRS), Phase A

Der modellmäßige Ansatz der Behandlung des Auswaschvorganges in der DRS stimmt zwar mit dem CRAC-Modell überein. Die Zuordnung von λ zum Niederschlagstyp ist jedoch fragwürdig und auf deutsche Verhältnisse nicht übertragbar. Die Aufschlüsselung der meteorologischen Daten einschließlich der Niederschlagsmenge, die am KfK kontinuierlich erfaßt werden /VO83/, zeigt dies deutlich, s. Tab. 8. Niederschlag fällt in 11,1 % der Gesamtzeit, wobei die Ausbreitungskategorie A bis D 8,4 % und die Kategorien E oder F 2,7 % beitragen.

Würde der Washout-Koeffizient nach /RS75/ festgelegt, so wäre in 8,4 % der Gesamtzeit ein hoher Washout-Koeffizient und nur in 2,7 % ein niedriger Koeffizient zu wählen. Tatsächlich sind Niederschläge geringer Intensität bis 0,5 mm/h mit 7,2 % weitaus häufiger als solche hoher Intensität (z. B. > 3 mm/h, Häufigkeit 0,44 %).

Daher wurde in der DRS, Phase A der Washout-Koeffizient in Beziehung zur stündlichen Niederschlagsmenge gesetzt, s. Tab. 8. Gemäß den Zielsetzungen in Phase A (weitgehende Vergleichbarkeit mit der RSS) stimmen die Zahlenwerte für λ mit Ausnahme einer neu eingeführten mittleren Stufe mit den amerikanischen Werten überein. Die Niederschlagsdauer wurde, wie in der RSS, pauschal zu je 0,5 h in jeder Niederschlagsstunde angenommen.

4.3 Washout-Modell der DRS, Phase B

In Abschnitt 4.1 ist gezeigt, daß sowohl der Washout-Koeffizient λ als auch die Dauer Δt des Niederschlags bestimmen, wieviel und wie schnell die Aktivität aus der Fahne ausgewaschen wird. Tab. 2 und 4 zeigen aber deutlich, daß die in der amerikanischen und deutschen Risikostudie gemachte Annahme über eine pauschale mittlere Regendauer von 0,5 h für jede Stunde mit angezeigtem Niederschlag zumindest für die Niederschlagsstufe 2 und 3 nicht haltbar ist.

Der Anteil, der in der i -ten Stunde mit Niederschlag in der Fahne verbleibt ist:

$$fw_i = fw_{i-1} e^{-\lambda_i \Delta t_i} \quad (3)$$

In einem realistischen Washout-Modell wären beide Größen λ und Δt für jede Stunde i mit Niederschlag entsprechend den gemessenen bzw. abgeleiteten Werten einzugeben.

Da aber, wie bereits ausgeführt, diese Information nur an wenigen Stationen vorliegen, wird das Modell des Washout so verbessert, daß dieser zwar nicht notwendigerweise im Einzelfall, aber im Mittel eines Jahres realistischer beschrieben wird. Unter der Annahme, daß jedes Niederschlagsereignis eine andere Aktivitätsfahne trifft, kann auf folgende Weise gemittelt werden:

$$\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^{-\lambda_i \Delta t_i} = e^{-\bar{\lambda} \bar{\Delta t}} \quad (4)$$

K Anzahl der Stunden mit Niederschlag.

Weiterhin gilt

$$\bar{\lambda} = a \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K I_i \right)^b \quad (5)$$

Für die Ermittlung von $\bar{\lambda}$ und $\bar{\Delta t}$ in Gleichung (4) und (5) werden wiederum die Niederschlagsdaten des KfK der Jahre 1973 bis 1982 herangezogen, s. Abschnitt 2.2 und 3 sowie Tabn. 4 und 6. Die Festlegung der λ_i erfolgt entsprechend Abschnitt 3.

Tab. 9 zeigt das Ergebnis der Berechnungen sowohl für Jod als auch für Aerosole. Die unterschiedliche Behandlung von Jod und Aerosolen wirkt sich vor allem in der dritten Niederschlagsklasse aus. Die Auswaschung von Aerosolen ist hier etwa 1,4mal effektiver als diejenige von Jod. Der Einfluß auf die Ergebnisse der Risikostudie ist im folgenden Abschnitt gezeigt.

5. Sensitivitätsuntersuchungen

In den vorangegangenen Abschnitten 4.1 bis 4.3 wurden verschiedene Möglichkeiten der Washout-Modellierung gezeigt. Unter Modell wird hier die Festlegung des "Washout"-Koeffizienten und der Niederschlagsdauer verstanden. In diesem Abschnitt wird der Einfluß der verschiedenen Modelle auf die berechneten Unfallfolgen in der DRS gezeigt. Die folgenden fünf Modelle wurden im Unfallfolgenmodell (UFOMOD) nacheinander verwendet, s. Tab. 10:

1. Niederschlagsdauer 0,5 h; Washout-Koeffizienten der Phase A der DRS, s. Abschnitt 4.2.
2. Niederschlagsdauer 0,5 h; Washout-Koeffizienten entsprechend Abschnitt 3, Tab. 6.
3. Niederschlagsdauer 1 h; Washout-Koeffizienten wie bei Variante 2.
4. Errechnete, mittlere Niederschlagsdauer; errechneter, mittlerer Washout-Koeffizient in Abhängigkeit von der Niederschlagsstufe entsprechend Abschnitt 4.3.
5. Direkte Bestimmung des Washout-Koeffizienten aus dem stündlichen Niederschlag unter Berücksichtigung der Niederschlagsdauer. Konstanten zur λ -Berechnung entsprechend Tab. 6.

Nur im Modell 5 wird die gesamte im KfK zur Verfügung stehende meteorologische Information optimal verwertet. Daher dient das Ergebnis der Berechnung mit Modell 5 als Vergleichsmaßstab.

Die Rechnungen mit dem Unfallfolgenmodell beschränkt sich auf die Freisetzungskategorie FK1 und FK2 sowie Standorte in der meteorologischen Standortregion Oberrheinische Tiefebene. Nur für diese Region sind die meteorologischen Daten im notwendigen Umfang vorhanden, um die beschriebenen 5 Varianten zu rechnen.

Anhand eines der 115 in der DRS verwendeten Wetterabläufe wird zunächst der Einfluß der Modelle erläutert. Der betrachtete Wetterablauf weist in der ersten Stunde 0,1 mm Niederschlag bei einer Andauer von 30 Minuten auf. In der zweiten Stunde beträgt die Niederschlagsmenge 1,1 mm, wobei es die ganze Stunde regnet. Die am Ende jeder Stunde in der Fahne verbliebene Restaktivität läßt sich aus Abb. 1 ersehen.

Variante 1 zeigt eine deutlich geringere Restaktivität als die übrigen Modelle. Ausschlaggebend dafür sind die zugrundegelegten wesentlich höheren Washout-Koeffizienten. Die Varianten 2 bis 5 stützen sich auf den in Abschnitt 3 angegebenen funktionalen Zusammenhang zwischen λ und Niederschlagsintensität. Modell 2 und 3 stellen Zwischenlösungen zwischen dem pauschalen Modell der Phase A (Modell 1) und den realistischen Modellen 4 und 5 dar. Ist die zur Verfügung stehende Information auf die pro Stunde gefallene Niederschlagsmenge beschränkt, so wird häufig eine Niederschlagsdauer von 1 h angenommen; dies entspricht Variante 3. Verglichen mit Modell 5 ergibt sich eine zu geringe Restaktivität in der Fahne. Ursächlich dafür sind die unterschiedliche, tatsächliche und angenommene Niederschlagsdauer sowie das, die erste Niederschlagsstufe repräsentierende, höhere λ im Modell 3. Wird dagegen, wie in Phase A, die Niederschlagsdauer pauschal zu 0,5 h angenommen (Modell 2), so führt das zu einer Überschätzung der Restaktivität in der Fahne aufgrund der halbierten Niederschlagsdauer in der 2-ten Stunde. Die

beste Übereinstimmung mit Modell 5 zeigt erwartungsgemäß Modell 4. Das bestätigt die Brauchbarkeit dieses Modells und der darin enthaltenen Mittelungen.

Die Anzahl früher Todesfälle (akutes Strahlensyndrom) ist in Tab. 11 in Form von Kennzahlen angegeben, wobei auf die Ergebnisse des Modells 5 normiert ist. Den größten Anteil (ca. 80 - 90 %) an der Zahl der Todesfälle für FK1 hat der Expositionspfad Bodenstrahlung. Die Ergebnisse des ausgewählten Wetterablaufes stehen dabei in guter Übereinstimmung zur Abb. 1. Das Resultat des Modells 4 liegt in diesem speziellen Fall unter dem des Modells 5, weil in der 2-ten Stunde prozentual weniger Aktivität abgelagert wird. Die Mittelwerte der Frühschäden aus 115 Wetterabläufen, die nach dem in UFOMOD üblichen Verfahren ausgewählt waren, bestätigen die Aussagen im allgemeinen und zeigen im besonderen, daß die Unterschätzung durch Modell 4 beim ausgewählten Wetterablauf ein Einzelfall war. Allerdings ist die Zahl der Wetterabläufe, welche Frühschäden verursachen und im Falle von FK1 durchweg mit Niederschlag verbunden sind, mit ca. 10 % relativ gering. Deshalb wurden in weiteren Rechnungen mit den Modellen 4 und 5 Wetterabläufe ausgewählt, die in mindestens einer der ersten 4 Stunden Niederschlag aufweisen. Die wiederum auf das Modell 5 normierten Ergebnisse sind der Tab. 11, letzte Spalte, zu entnehmen.

Spätschäden werden, wie erwartet, weit weniger beeinflusst. Die Abweichungen, bezogen auf das Ergebnis des Modells 5, betragen 0,4 - 4 % für FK1 und 0,1 - 5 % für FK2. Die unteren Grenzen (0,4 und 0,1 %) gehören zum Ergebnis des Modells 4. Der Einsatz des realistischen Modells 5 für Unfallfolgenrechnungen ist aus Mangel an notwendigen meteorologischen Daten nur für wenige Standorte kerntechnischer Anlagen möglich. Eine vertretbare Alternative besteht in der Verwendung des "Mittelwert-Modells" 4 in der Phase B der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke.

6. Literatur

- /AC73/ ACRES Consulting Services Ltd. - Applied Earth Science Consultants Inc., Atmospheric Loading of the Upper Great Lakes, Vol. 2 (Report of Canada, Center of Inland Waters), (1974)
- /AU72/ P. M. Austin, R. A. Houze;
"Analysis of the Structure of Precipitation Patterns in New England",
J. Appl. Meteorol., 11, pp. 926-935 (1972)
- /BA70/ V. N. Bakulin et al.;
Turbulent Exchange and Wash-Out by Measurement of Natural Radioactivity in Surface Air,
Geophys. Res., 75 (18): 3669-3674 (1970)
- /BR81/ H. D. Brenk, K. J. Vogt;
The Calculation of Wet Deposition from Radioactive Plumes.
Nuclear Safety Vol. 22 No. 3, S. 362-371 (1981)
- /BU69/ I. I. Burtsev, L. N. Burtseva, S. G. Malakhov;
Characteristics of the Washout of a ^{32}P Aerosol Injected into a Cloud.
USAEC Report UCRL-Trans-10404, University of California, Livermore, Lawrence Livermore Laboratory, NTIS, October (1969)
- /DA70/ M. T. Dana;
Scavenging of Soluble Dye Particles by Rain, in Precipitation Scavenging. AEC Symposium Series, Richland, Wash., June 2-4, Rudolf J. Engelmann and W. George N. Slinn (Coordinators), CONF-700601, pp. 137-147, NTIS, December (1970)
- /DI70/ H. Dilger;
Das meteorologische Meßsystem des Kernforschungszentrums Karlsruhe,
KFK 2347, S. 1-8 (1978)

- /DR79/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke;
Eine Untersuchung zu dem durch Störfälle in Kernkraftwerken
verursachten Risiko, Hauptband, Verlag TÜV Rheinland (1979)
- /ES72/ N. A. Esmen;
Particle Retention Efficiency of Scavenging by Rainfall,
paper presented to Division of Water, Air, and Waste Chemistry,
163rd American Chemical Society National Meeting,
April 9-14, 1972, Boston, Mass. (1972)
- /FA81/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit.
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 8 -
Unfallfolgenrechnung und Risikoergebnisse.
Verlag TÜV Rheinland (1981)
- /GE63/ H. W. Georgii;
On the Effect of Rainfall on the Sulfur Dioxide Concentration
in the Atmosphere,
Int. J. Air Water Pollut. 7: 1057-1059 (1963)
- /HI76/ B. B. Hicks;
An Evaluation of Precipitation Scavenging Rates of Background
Aerosol, in Radiological and Environmental Research Division
Annual Report, Part 4: Atmospheric Physics, January-December,
ERDA Report ANL-76-88 (Pt 4) pp. 66-75, Argonne National
Laboratory, NTIS (1976)
- /MA70/ J. S. Marshall, C. D. Holtz;
Pattern Analysis of One Summer's Multilevel Maps of Montreal Rain,
Monthly Weather Rev., 98, pp. 335-345 (1970)
- /PE70/ K. R. Peterson and T. V. Crawford;
Precipitation Scavenging in a Large-Cloud Diffusion Code,
in Precipitation Scavenging, AEC Symposium Series, Richland,
Wash., June 2-4, Rudolf J. Engelmann and W. George N. Slinn
(Coordinators), CONF-700601, pp. 425-432, NTIS, December (1970)

- /RS75/ N. C. Rasmussen;
Reactor Safety Study.
An Assessment of Accident Risks in U. S. Commercial Nuclear
Power Plants (NUREG-75/014);
WASH-1400 (1975)
- /SC81/ E. Schrödl, H. Urban;
Literaturstudie zum Kurzzeit-Washout-Faktor von Aerosolen.
GRS-A-609 (1981)
- /SL68/ D. H. Slade et al.;
Meteorology and Atomic Energy - U. S. Atomic Energy Commission.
TID-24190 (1968)
- /SL78/ W. G. N. Slinn;
Parameterizations for resuspension and for wet and dry
deposition of particles and gases for use in radiation dose
calculations.
Nucl. Safety, 19, No. 2 (1978)
- /VO83/ S. Vogt;
Three- and Four-parameter Diffusion Statistics as a Basis
for Calculating the Long-term Pollution Load.
KfK 3477, S. 1-83 (1983)
- /WO69/ M. A. Wolf, M. T. Dana;
Experimental Studies in Precipitation Scavenging, in
Battelle Pacific Northwest Laboratories Annual Report for
1968 to the AEC, USAEC Report BNWL-1051, Part 1, pp. 18-25,
Battelle Pacific Northwest Laboratories, NTIS (1969)
- /ZA73/ I. I. Zawadski;
Statistical Properties of Precipitation Patterns,
J. Appl. Meteorol., 12, pp. 459-472 (1973)

Nr.	Standort	Meßstation
	<u>Norddeutsche Tiefebene</u> -----	
1	Brokdorf	Hannover, Deutscher Wetterdienst
2	Brunsbüttel	
3	Esenshamm	
4	Hamm-Schmehausen	
5	Krümmel	
6	Stade	
7	Vahnum	
	<u>Oberrheinische Tiefebene</u> -----	
8	Biblis	Kernforschungszentrum Karlsruhe
9	Neupotz	
10	Philippsburg	
11	Wyhl	
	<u>Süddeutsche Hochebene</u> -----	
12	Grafenrheinfeld	München, Deutscher Wetterdienst
13	Gundremmingen	
14	Isar - Ohu	
	<u>Tallagen</u> -----	
15	Borken	Kernkraftwerk Obrigheim
16	Grohnde	
17	Mülheim-Kärlich	
18	Neckarwestheim	
19	Würgassen	

Tab. 1: Standorte der Leichtwasserreaktor-Kernkraftwerke in der DRS

Niederschlags- summe S in mm	Andauer bis höchstens												Häufigkeits- summe
	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	9 h	>9 h	
$0,02 \leq S \leq 0,5$	56,7	9,2	6,2	3,9	2,1	0,9	1,1	-	-	-	-	-	80,1
$0,5 < S \leq 1,0$	0,1	0,7	0,8	1,1	0,9	0,9	2,1	0,3	-	-	-	-	6,9
$1,0 < S \leq 3,0$	0,1	0,2	0,6	0,6	0,7	0,7	3,0	1,4	0,5	0,2	0,1	-	8,1
$S > 3,0$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	1,1	0,9	0,7	0,5	0,8	0,2	4,9
Summe	57,0	10,2	7,7	5,7	3,8	2,7	7,3	2,6	1,2	0,7	0,9	0,2	100,0

Tab. 2: Andauer sowie gefallener Niederschlag von 10 375 Niederschlagsereignissen der Jahre 1973 bis 1982 am KfK (Angaben in %)

Niederschlags- menge in mm		dauer in min.	Intensität \dot{I} in mm/h	Niederschlags- intensitäts- stufe
3,7		50	4,44	3
1,2		40	1,8	2
0,3		10	1,8	2
0,2		20	0,6	1
1,2		60	1,2	2
0,45		30	0,9	1

Niederschlags- intensitäts- stufe		Mittelwerte	
Nr.	mm/h	Niederschlagsdauer in min	Intensität in mm/h
1	0,02-0,99	$(20+30)\frac{1}{2} = 25$	$(0,6+0,9)\frac{1}{2} = 0,75$
2	1-3	$(40+10+60)\frac{1}{3} = 36,7$	$(1,8+1,8+1,2)\frac{1}{3} = 1,6$
3	> 3	=50	=4,44

Tab. 3: Beispielhafte Berechnung der mittleren Regendauer sowie der mittleren Intensität für sechs vorgegebene Stunden

Stufe	Niederschlagsintensität \dot{I} in mm/h	mittlere Dauer des Niederschlags in min	mittlere Intensität \bar{I} während des Niederschlags in mm/h	Häufigkeit in %
1a	$0,02 < \dot{I} < 0,5$	22	0,22	8,32
1b	$0,5 \leq \dot{I} < 1,0$	38	0,69	3,24
1	$0,02 < \dot{I} < 1,0$	26	0,35	11,56
2	$1,0 \leq \dot{I} < 3,0$	45	1,60	2,43
3	$\dot{I} \geq 3,0$	43	5,86	0,58
Σ (1 bis 3)				14,57

Tab. 4: Mittlere Niederschlagsdauer und Intensität innerhalb einer Stunde (Mittel über 10 570 Niederschlagsstunden)

Schlüssel- zahl	Typ	Beschreibung		Intensität		zuge- ordnete Stufe	Häufigkeit in % in Hannover im Jahr 1970
		Stärke	mit/ohne Unterbrechung	in mm/h	in mm/10 min		
50	Niesel	leicht	mit	≤ 0,2	-	0*	0,7
51	"	"	ohne	≤ 0,2	-	1	1,2
52	"	mäßig	mit	0,2÷0,5	-	0	0
53	"	"	ohne	0,2÷0,5	-	1	0,3
54	"	stark	mit	> 0,5	-	1	0
55	"	"	ohne	> 0,5	-	2	0,03
56	Niesel, ge- frierend	leicht	-	≤ 0,2	-	0	0,02
57	"	mäßig bis stark	-	0,2÷0,5	-	1	0
58	Niesel mit Regen	leicht	-	≤ 0,5	< 0,1	1	1,1
59	"	mäßig bis stark	-	0,5÷4	0,1÷0,7	2	0,2
60	Regen	leicht	mit	< 0,5	< 0,1	1	1,5
61	"	"	ohne	< 0,5	< 0,1	1	4,7
62	"	mäßig	mit	0,5÷4	0,1÷0,7	1	0,02
63	"	"	ohne	0,5÷4	0,1÷0,7	2	1,7
64	"	stark	mit	> 4	> 0,7	2	0
65	"	"	ohne	> 4	> 0,7	3	0,08
66	Regen, ge- frierend	leicht	-	< 0,5	< 0,1	1	0,13
67	"	mäßig oder stark	-	0,5÷4	0,1÷0,7	2	0,01
68	Regen oder Sprühregen und Schnee	leicht	-	< 0,5	< 0,1	1	0,22
69	"	mäßig oder stark	-	0,5÷4	0,1÷0,7	2	0,07
70	Schnee	leicht	mit	< 0,05	-	0	0,47
71	"	"	ohne	< 0,05	-	0	2,12
72	"	mäßig	mit	0,05÷0,4	-	1	0
73	"	"	ohne	0,05÷0,4	-	1	1,2
74	"	stark	mit	> 0,4	-	2	0
75	"	"	ohne	> 0,4	-	3	0,16
76	Eisnadeln	-	-	-	-	0	0
77	Schnee- griesel	-	-	0,2÷0,5	-	0	0,16
78	Schnee- sterne, vereinzelt	-	-	-	-	0	0,18
79	Eiskörner	-	-	0,5÷4	0,1÷0,7	2	0,03
80	Regen- schauer	leicht	-	-	< 0,4	2	1,78
81	"	mäßig oder stark	-	-	0,4÷8	3	0,08
82	"	sehr stark	-	-	> 8	3	0
83	Schnee- regen- schauer	leicht	-	< 0,5	< 0,1	1	0,07
84	"	mäßig oder stark	-	0,5÷4	0,1÷0,7	3	0,02
85	Schnee- schauer	leicht	-	-	< 0,4	1	0,41
86	"	mäßig oder stark	-	-	0,4÷8	3	0,02
87	Graupel- schauer	leicht	-	-	< 0,4	1	0,08
88	"	mäßig oder stark	-	-	0,4÷8	3	0
89	Hagel- schauer	leicht	-	-	< 0,4	2	0
90	Hagel- schauer	mäßig oder stark	-	-	0,4÷8	3	0
95	Gewitter, mäßig	leicht oder mäßig	-	-	< 0,4	3	0,16
96	Gewitter mit Hagel oder Graupel	leicht oder mäßig	-	-	< 0,4	3	0
97	Gewitter	stark	-	-	2÷8	3	0
99	Gewitter mit Hagel oder Graupel	"	-	-	2÷8	3	0
Häufigkeitssumme der Niederschlagsintensitätsstufen						0	3,65
						1	10,93
						2	3,82
						3	0,52
						0÷3	18,92
						1÷3	15,27

*im Washout-Modell wird kein Niederschlag angenommen

Tab. 5: Niederschlagsklassifizierung nach DWD sowie Zuordnung zu Intensitätsstufen für Niederschlagsmodell der DRS

Quelle	Elementares Jod		Aerosole	
	a	b	a	b
Brenk /BR81/	$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,6	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,5
GRS-Vorschlag SC81/			$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,8
Werte für Phase B der DRS	$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,6	$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,8

Tab. 6: Konstanten für die Berechnung des Washout-Koeffizienten λ

	Niederschlagsmenge I	Elementares Jod und Aerosole	Edelgase
DRS Phase A	$0,02 < I < 1 \text{ mm/h}$	$1 \cdot 10^{-4} / \text{s}$	0
	$1 \leq I < 3 \text{ mm/h}$	$5 \cdot 10^{-4} / \text{s}$	0
	$I \geq 3 \text{ mm/h}$	$10 \cdot 10^{-4} / \text{s}$	0
RSS	warm frontal storms (Kategorien E - F)	$1 \cdot 10^{-4} / \text{s}$	0
	convective storms (Kategorien A - D)	$10 \cdot 10^{-4} / \text{s}$	0

Tab. 7: Washout-Koeffizienten

Niederschlagsmenge in mm/h		Ausbreitungskategorie								
Bereich	Mittel	A	B	C	D	$\Sigma(A-D)$	E	F	$\Sigma(E-F)$	Summe
0,02-0,5	0,16	0,064	0,103	0,492	4,549	5,208	1,348	0,664	2,012	7,22
0,51-3,0	1,18	-	0,001	0,182	2,610	2,793	0,484	0,142	0,626	3,42
>3,0	5,82	-	0,003	0,028	0,345	0,376	0,051	0,011	0,062	0,44
Summe		0,064	0,107	0,702	7,504	8,377	1,883	0,817	2,700	11,08

Tab. 8: Niederschlagshäufigkeit in Prozent in Abhängigkeit von der Ausbreitungskategorie und der Niederschlagsmenge pro Stunde
(Halbstundenwerte der Jahre 1973 bis 1982, gemessen im KfK.) Zahlenwerte abgeleitet aus /V083/.

\dot{I} in mm/h		$\bar{\lambda}$ in 1/s	$\bar{\Delta t}$ in h
$0,02 < \dot{I} < 1,0$	Aerosol	$0,34 \cdot 10^{-4}$	0,51
	Jod	$0,42 \cdot 10^{-4}$	0,47
$1,0 \leq \dot{I} < 3,0$	Aerosol	$1,17 \cdot 10^{-4}$	0,72
	Jod	$1,06 \cdot 10^{-4}$	0,73
$\dot{I} \geq 3,0$	Aerosol	$3,29 \cdot 10^{-4}$	0,58
	Jod	$2,31 \cdot 10^{-4}$	0,62

Tab. 9: Mittlerer Washout-Koeffizient mit mittlerer Niederschlagsdauer für Jod und Aerosole im Washout-Modell der DRS, Phase B

Modell Nr.	Washout-Koeffizient $\bar{\lambda}$ in $10^{-4}/s$						Niederschlagsdauer Δt in h innerhalb einer Stunde					
	Aerosol			Jod			Aerosol			Jod		
	I ¹⁾	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1	1	5	10	1	5	10	-	0,5	-	-	0,5	-
2	0,29 ⁴⁾	1,22	3,4	0,37	1,10	2,37	-	0,5	-	-	0,5	-
3	0,29	1,22	3,4	0,37	1,10	2,37	-	1,0	-	-	1,0	-
4	0,34	1,17	3,29	0,42	1,06	2,31	0,51	0,72	0,58	0,47	0,73	0,62
5	0,8 · I	0,8		0,8 · I	0,6 ³⁾		K/60 ²⁾			K/60		

1) Niederschlagsstufen entsprechend Abschnitt 2.3

2) K = Niederschlagsdauer in min innerhalb 1 h

3) $\dot{I} = \frac{60 \cdot I}{K}$; I = Niederschlagsmenge nach 1 h

4) Das benötigte I ergibt sich aus der mittleren stündlichen Niederschlagsmenge jeder Stufe in den Jahren 1973 - 1982 nach /VO83/

Tab. 10: Annahmen zur Modellierung des Auswaschvorganges

Frei- setzungs- kategorie	Modell	Anzahl der Frühschäden		
		ausgewählter Wetterablauf	Mittelwert 115 Wetterabläufe der Phase A	Mittelwert 115 Wetterabläufe mit Regen
FK1	1	13,8	15,5	-
	2	0,2	0,2	-
	3	2,3	2,2	-
	4	0,8	1,3	1,0
	5	1,0	1,0	1,0
FK2	1		1,5	-
	2		1,0	-
	3		1,1	-
	4		1,1	0,9
	5		1,0	1,0

Tab. 11: Einfluß der Washout-Modelle auf die normierte Zahl der Frühschäden

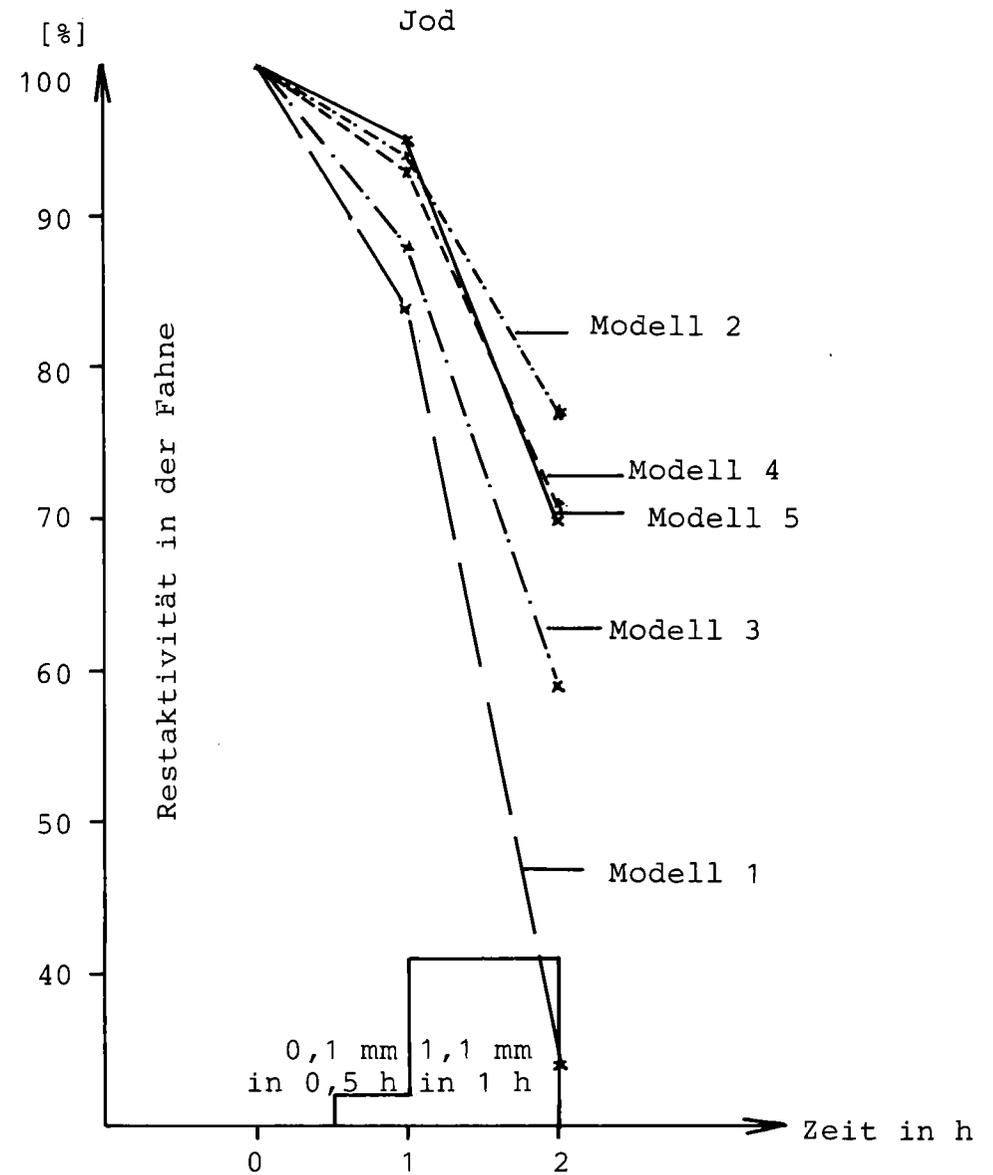
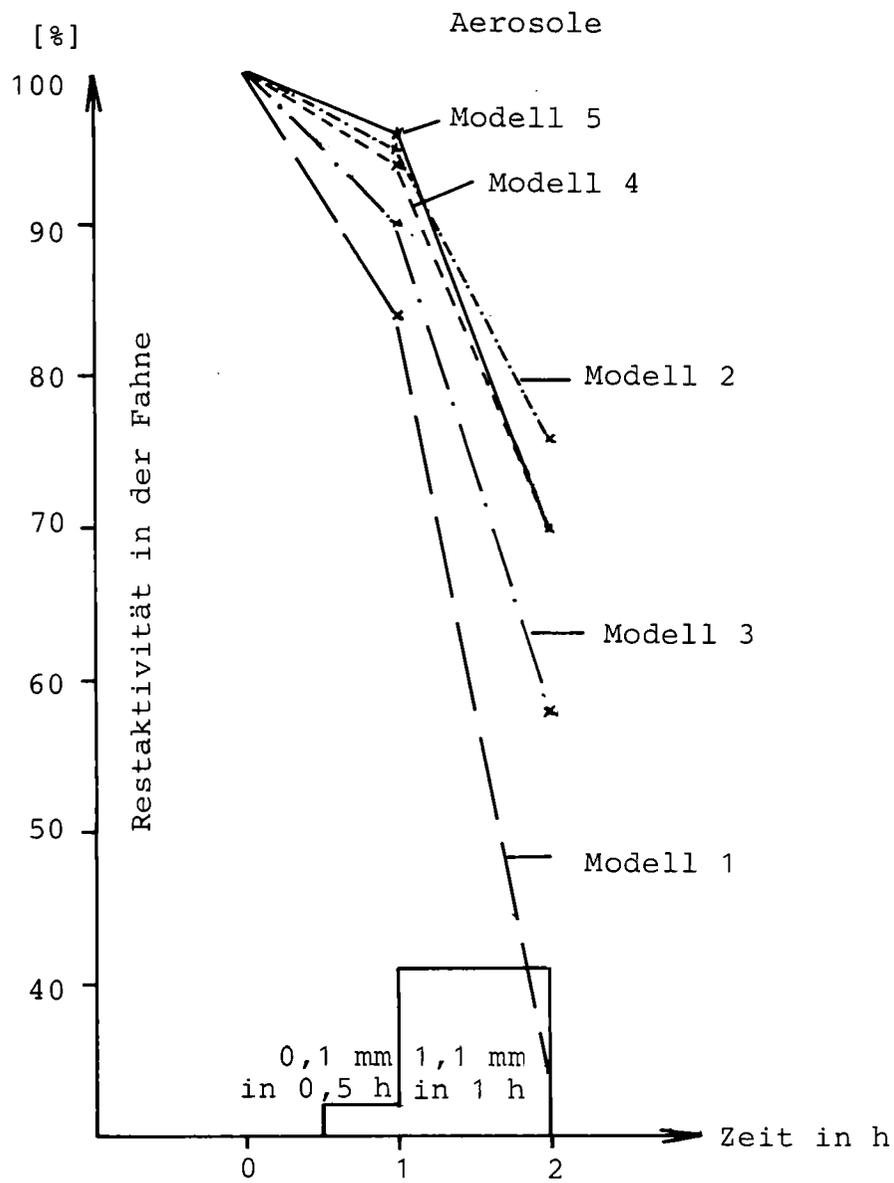


Abb. 1: Zeitlicher Verlauf der Aktivitätsreduktion in der Fahne durch Washout