



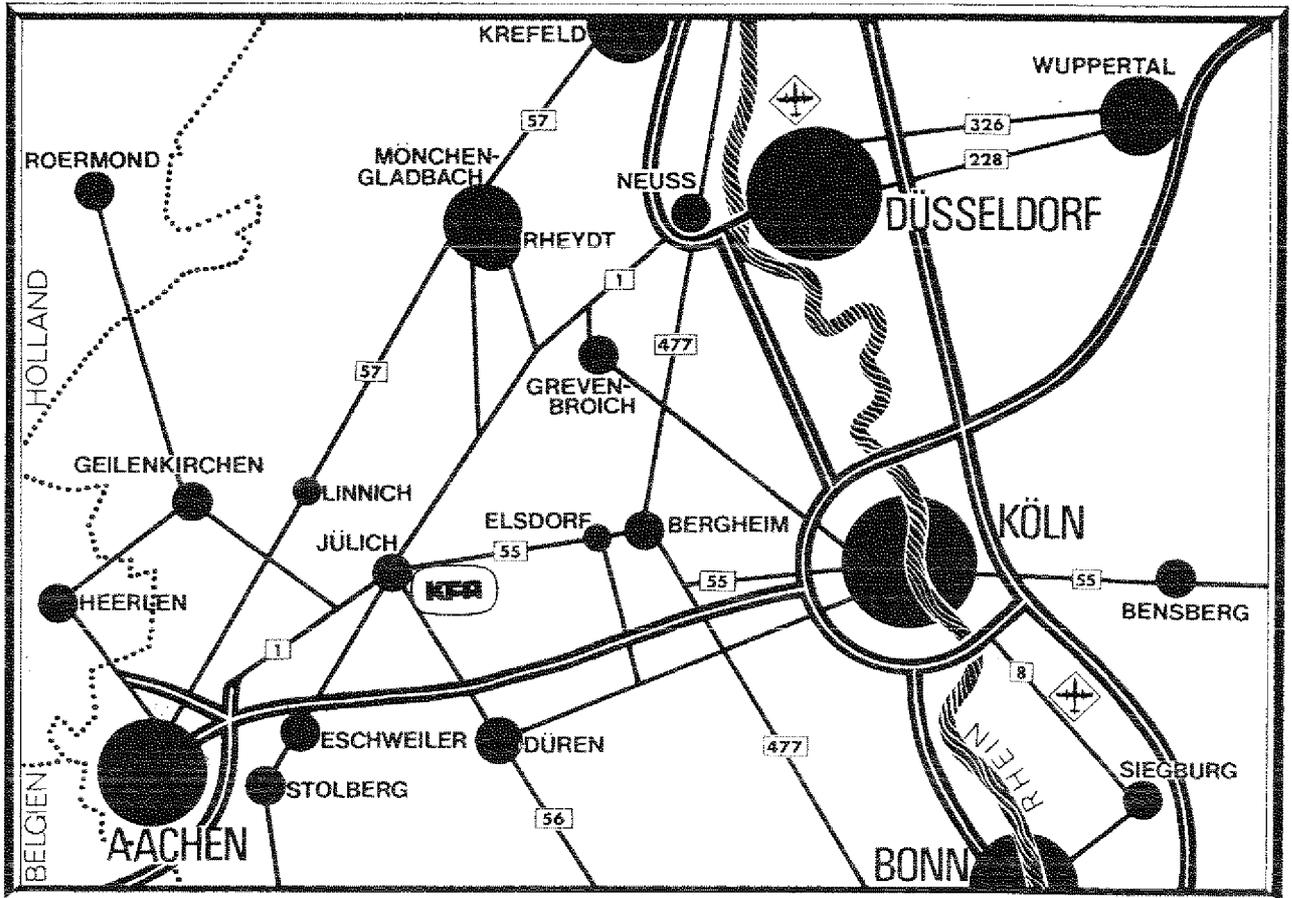
KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG
Institut für Reaktorentwicklung

**Schutzbehälter
für Hochtemperaturreaktoren
unter Berücksichtigung
von Umwelt- und Sicherheitsaspekten**

von
W. Kröger

**Jül - 1098 - RG
August 1974**

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1098
 Institut für Reaktorentwicklung Jül - 1098 - RG

Dok.: HTR Containment - Safety Aspect
 HTR Containment - Environmental Aspect

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Schutzbehälter
für Hochtemperaturreaktoren
unter Berücksichtigung
von Umwelt- und Sicherheitsaspekten**

von

W. Kröger

D 82 (Diss. T. H. Aachen)

CONTAINMENT FOR HIGH-TEMPERATURE REACTORS
UNDER SPECIAL CONSIDERATION
OF SAFETY AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

by
Wolfgang Kröger

ABSTRACT

This report gives a survey on the importance of both the HTR containment and its arrangement to ensure safe HTR operation without environmental loads. Therefrom can be deduced requirements and problems, the solutions of which are indicated by attempts.

It is shown the total release path of radioactive fission products, also the outlets or releases are determined at different conditions. The behaviour of the containment under extremely high external influences is discussed. The emplacement underground turns out as a possibility to handle heaviest accidents. The last chapter involves a proposal for the lay-out of a process-heat reactor.

SCHUTZBEHÄLTER FÜR HOCHTEMPERATURREAKTOREN
UNTER BERÜCKSICHTIGUNG
VON UMWELT- UND SICHERHEITSASPEKTEN

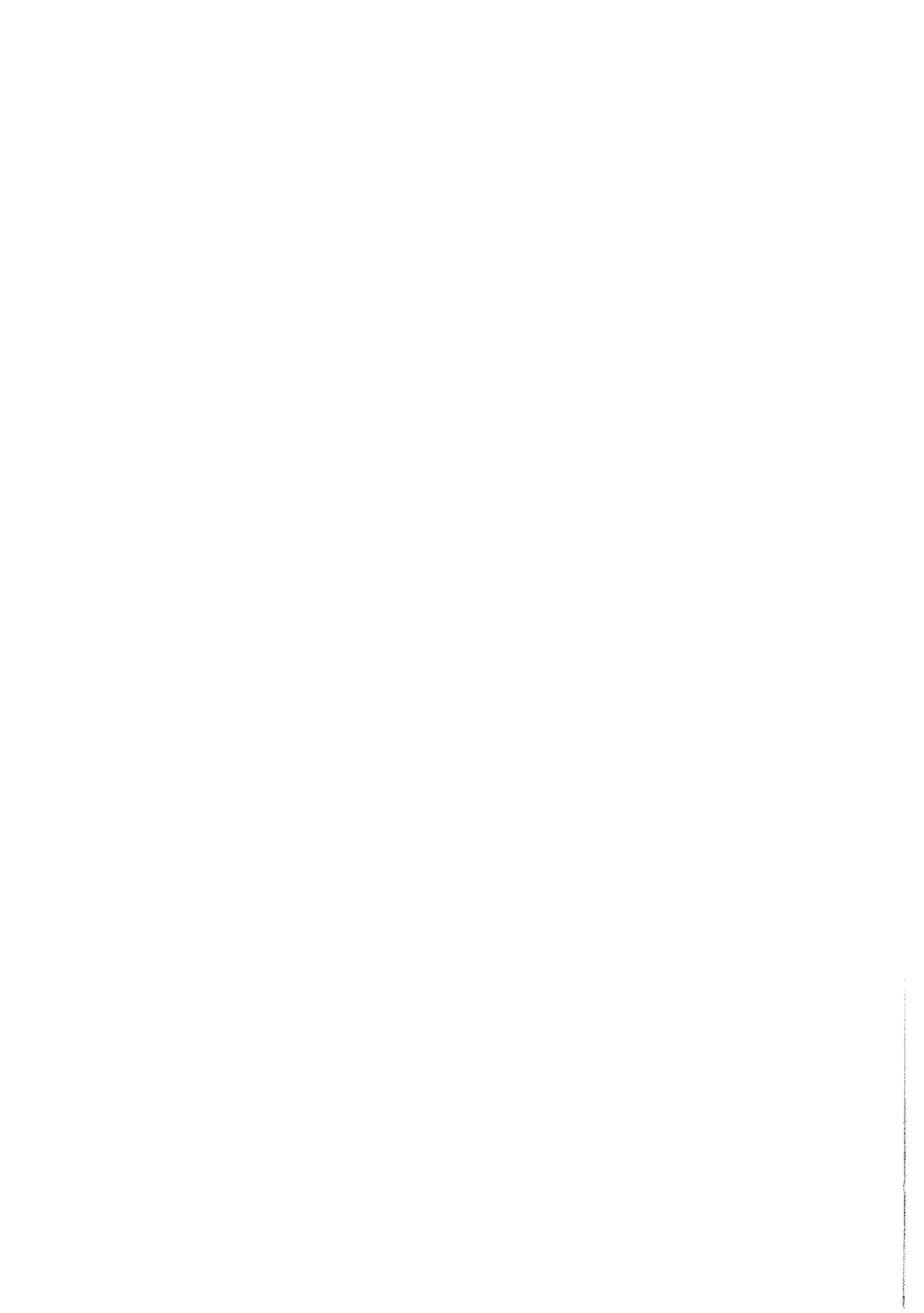
von
Wolfgang Kröger⁺⁾

KURZFASSUNG

Dieser Bericht gibt einen Überblick über die Bedeutung des Schutzbehälters und dessen Anordnung für die Sicherheit des HTR und seiner Umweltfreundlichkeit. Daraus leiten sich Anforderungen und Problemstellungen ab, zu denen Lösungsansätze aufgezeigt werden.

Der gesamte Freisetzungspfad radioaktiver Spaltprodukte wird dargestellt und Ableitungen bzw. Freisetzungen bei unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Das Verhalten des Schutzbehälters bei extremen äußeren Einflüssen wird aufgezeigt. Die unterirdische Anordnung erweist sich als eine Möglichkeit, extreme Unfälle beherrschbar zu machen. Das letzte Kapitel enthält einen Vorschlag für die Auslegung des Schutzbehälters eines Prozeßwärmereaktors.

⁺⁾ jetzt: Institut für Nukleare Sicherheitsforschung der KFA Jülich GmbH



INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Zusammenfassung	
1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG	1
2 DARSTELLUNG DES FREISETZUNGSWEGES DER SPALTPRODUKTE	3
2.1 Auswahl wichtiger Spaltprodukte	3
2.2 Primärkreisverhalten und Kühlgasaktivität	6
2.2.1 Einflußgrößen	6
2.2.2 Berechnung	7
2.3 Verhalten der Spaltprodukte im Schutzbehälter und Aktivität der Füllung	9
2.3.1 Einflußgrößen	9
2.3.2 Berechnung	13
2.4 Aktivitätsabgabe an die Umgebung	13
2.4.1 Abgabe über den Kamin	13
2.4.2 Abgabe über die Behälteroberfläche	14
2.5 Ausbreitung radioaktiver Emission	15
2.5.1 Atmosphärische Ausbreitung	15
2.5.2 Unterirdische Ausbreitung	20
2.5.2.1 Einflußgrößen	20
2.5.2.2 Berechnungsgrundlagen	22
2.5.2.3 Sorption	24
2.5.2.4 Dispersion	25
2.6 Belastungspfade und Strahlenwirkungen	26
2.7 Grenzwerte für die Dosisbelastung	29
3 EINFLUSS DES SCHUTZBEHÄLTERS AUF RADIOAKTIVE FREISETZUNGEN	30
3.1 Ableitungen während des bestimmungsgemäßen Betriebes	33
3.2 Freisetzen infolge des "größten anzunehmenden Unfalls" (GaU)	33
3.3 Art des Schutzbehälters	37
3.4 Freisetzen bei hypothetischen Unfällen	38
3.4.1 Überirdische Anordnung	39
3.4.2 Unterirdische Anordnung	41
4 EXTREME ÄUSSERE EINFLÜSSE UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DEN SCHUTZBEHÄLTER	48
4.1 Erdbeben	48
4.1.1 Entstehung, Ausbreitung	48
4.1.2 Bodenbewegungen bei freier Oberfläche	52
4.1.3 Klassifizierung	54
4.1.4 Seismizität	54
4.1.5 Verhalten des Kernreaktors bei starken Bodenbewegungen	56
4.1.5.1 Soil Amplification	57
4.1.5.2 Soil-Structure Interaction	58
4.1.5.3 Unterirdische Anordnung	62
4.1.6 Antwortverhalten des PR 3000 bei unterschiedlichen Anordnungen	63
4.1.7 Hinweise für die aseismische Auslegung von Kernkraftwerken	65

4.2	Flugzeugabsturz	66
4.2.1	Einflußgrößen	
4.2.2	Beanspruchung des Schutzbehälters	67
4.2.3	Unterirdische Anordnung	70
4.3	Druckweite, Brand, extreme Witterungseinflüsse	70
4.4	Sabotage	72
5	AUSLEGUNGSKRITERIEN DES SCHUTZBEHÄLTERS EINES HOCHTEMPERATURREAKTORS (PR 3000)	73
5.1	Gasdichter Spannbetonbehälter	73
5.2	Unterirdische Anordnung	75
5.2.1	Entscheidungsgründe	75
5.2.2	Technische Realisierung	77
5.2.3	Bauzeit und Kosten	79
5.3	Weitere Sicherheitsaspekte	81
5.4	Entwicklungspotential und zukünftige Forschungsaufgaben	81
	Literaturverzeichnis	83
ANHANG:	Benutzte Indices	A 1
	Benutzte Symbole	A 1

ZUSAMMENFASSUNG

Die steigende Anzahl und Standortleistung der Kernkraftwerke sowie die aus vielen Gründen angestrebten Standorte in Verdichtungsräumen ziehen noch schärfere Anforderungen an die Sicherheit und Umweltfreundlichkeit nach sich. Dabei nimmt das Schutzbehältersystem eine zentrale Position ein. Innerhalb dieses Bereiches können technische Maßnahmen ergriffen werden, um mögliche radioaktive Emissionen unter allen Bedingungen so klein wie möglich zu halten und um den Reaktor vor möglichen extremen äußeren Einflüssen zu schützen.

Effektive Maßnahmen setzen das genaue Verstehen des gesamten Freisetzungspfades der Spaltprodukte voraus. Er wird in die Stufen Kühlgasaktivität, Schutzbehälteraktivität, Emissionsstärke, Immissionsstärke und radiologische Belastung untergliedert, deren Verbindung durch Übertragungsfaktoren hergestellt wird. Die Einflußgrößen werden unter Berücksichtigung der Bedingungen des Hochtemperaturreaktors (HTR) qualitativ und teils quantitativ dargestellt.

Die Rechnungen zeigen den Einfluß des Schutzbehälters auf radioaktive Freisetzungen und beweisen gleichzeitig die große Umweltfreundlichkeit des HTR. In Verbindung mit einem gasdichten Schutzbehälter führt der bestimmungsgemäße Betrieb selbst bei großen Leistungseinheiten zu einer "Quasi-Nullfreisetzungsrate". Die radiologische Belastung der Umgebung nach dem "größten anzunehmenden Unfall" (GaU) liegt um einige Zehnerpotenzen unter den zulässigen Grenzwerten.

Weiterhin wird hypothetisch der Bruch des Schutzbehälters mit gleichzeitigem Auftreten schwerer nuklearer Unfälle angenommen und die unterirdische Anordnung des Nuklearteils diskutiert. Sie erweist sich infolge der rückhaltenden und verzögernden Eigenschaften des Untergrundes als eine Möglichkeit, die Auswirkungen hypothetischer Unfälle auf ein tolerierbares Maß zu reduzieren.

Der Schutzbehälter muß den Reaktor vor extremen äußeren Einflüssen schützen. Die Art der Belastungen und daraus resultierende Anforderungen werden dargestellt. Bei der Auslegung des Schutzbehälters müssen vor allem Erdbeben, Flugzeugabsturz und Sabotage berücksichtigt werden.

Die dynamischen Berechnungen für den Nuklearteil des Prozeßwärmereaktors PR 3000 zeigen, daß die erdbebeninduzierten Belastungen beherrschbar sind. Die unterirdische Anordnung beeinflußt positiv das dynamische Verhalten. Der Erfassung des Untergrundes kommt größte Bedeutung zu.

Bei oberirdischer Anordnung wird der "Flugzeugabsturz" Bemessungslastfall.

Die Sonderlastfälle werden bei unterirdischer Anordnung eliminiert oder in ihren Auswirkungen wesentlich beschränkt.

Die Ergebnisse der Teilbereiche münden in dem Konstruktionsvorschlag eines Schutzbehälters für den HTR - PR 3000. Der gasdicht ausgekleidete Spannbetonbehälter wird unterirdisch angeordnet und in einer offenen Baugrube errichtet. Durch die Verfüllung des Zwischenraumes Behälter - Grubenwand mit mechanisch festem und spaltproduktrückhaltendem Material wird ein weiterer Sicherheitsanschluß geschaffen und ein Höchstmaß an Standortunabhängigkeit gewährleistet. Große Baugruben sind technisch realisierbar. Die unterirdische Anordnung verursacht Bauzeitverzögerungen und Kostensteigerungen, die tolerierbar sind und bei Genehmigung verbrauchernaher Standorte abgedeckt werden.

Weitere wichtige Sicherheitsaspekte und das größte Entwicklungspotential sprechen für das Konstruktionsprinzip.

Um sich von teils stark konservativen Annahmen bei der Beurteilung des Schutzbehältersystems lösen zu können, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

I EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Als Schutzbehälter oder Containment bezeichnet man die bauliche Umhüllung des Nuklearteils. Er hat die Aufgabe, die Umgebung vor dem Reaktor und den Reaktor vor extremen äußeren Belastungen zu schützen. Das Schutzbehältersystem muß unter allen Umständen mögliche radioaktive Freisetzungen in tolerierbaren Grenzen halten und seine Funktionsfähigkeit garantieren.

Die Anforderungen an den Schutzbehälter wurden mit steigender Anzahl und Standortleistung der Kernreaktoren laufend verschärft. Für die Zukunft ist Ähnliches zu erwarten. Hinzu kommt der zunehmende Mangel an Standorten, die den heutigen Auswahlkriterien entsprechen. Die angestrebte Verbrauchernähe, die zur Senkung der hohen Energieübertragungskosten führt und den Einsatz nuklearer Prozeßwärmeerzeugung erleichtert, setzt eine Änderung der heutigen Genehmigungspraxis voraus. Eine Erhöhung des strahleninduzierten Risikos darf nicht die Folge dieser Entwicklung sein. Die leistungsspezifischen Immissionswerte müssen weiter reduziert und schwerste Unfälle in die Sicherheitsbetrachtungen einbezogen werden.

In all diesen Überlegungen nimmt das Schutzbehältersystem eine zentrale Position ein. Emissionen radioaktiver Stoffe können in einem wirtschaftlich vertretbaren Aufwand nicht völlig verhindert werden, sie lassen sich aber bei geeigneter Auslegung und Anordnung dieses Sicherheitseinschlusses soweit reduzieren, daß die friedliche Nutzung der Kernspaltung nur ein vernachlässigbares Risiko nach sich zieht.

Schutzbehälterfragen werden bei heutigem Entwicklungsstand hauptsächlich in Verbindung mit der Technologie der Leichtwasserreaktoren diskutiert. Umfangreiche Forschungsarbeiten zeigen Probleme und technische Lösungsmöglichkeiten für diesen Typ auf (siehe auch / 1/1 bis 1/5 /).

Theoretische und experimentelle Untersuchungen sowie Betriebserfahrungen der Versuchsanlagen beweisen die technische Realisierbarkeit, die hohe Sicherheit und Umweltfreundlichkeit des Hochtemperaturreaktors (HTR), außerdem zeigen Studien die wirtschaftlichen Einsatzmöglichkeiten. Aus diesen Gründen kann

von einem wachsenden Anteil der Hochtemperaturreaktoren an der Energieversorgung in der Zukunft ausgegangen werden. Trotz der zu erwartenden geringen Kühlgasaktivität, der inhärenten Sicherheit und hohen Integrität des Primärkreises wird man auch bei Hochtemperaturreaktoren einen Schutzbehälter vorsehen, da dieses Gesamtsystem extreme Sicherheit und Umweltfreundlichkeit mit annähernder Standortunabhängigkeit gewährleisten kann.

In dieser Studie wird der Problemkreis "Schutzbehälter" unter besonderer Berücksichtigung der HTR-Bedingungen diskutiert, dabei werden auch Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt und offene Fragen herausgestellt.

2 DARSTELLUNG DES FREISETZUNGSWEGES DER SPALTPRODUKTE

Radioaktive Emissionen aus kerntechnischen Anlagen sind "so klein wie möglich" zu halten. Dazu müssen sicherheitstechnische Maßnahmen entlang des Freisetzungsweges ergriffen werden, die nur effektiv sein können, wenn der gesamte Freisetzungsweg trotz seiner Komplexität zugänglich ist (Abb.2.1). Es ist zweckmäßig, den Gesamtweg in Bereiche zu unterteilen, die Aktivität in benachbarten Bereichen ins Verhältnis zu setzen und als Übertragungsfaktor T zu definieren. Er charakterisiert somit innerhalb eines Bereiches die Änderung der Gesamtaktivität und als T_j , die des nuklidspezifischen Aktivitätsbeitrages.

$$T_j = \frac{A_j}{A_{j-1}} \quad /2-1/$$

j: Bereichskennzeichnung

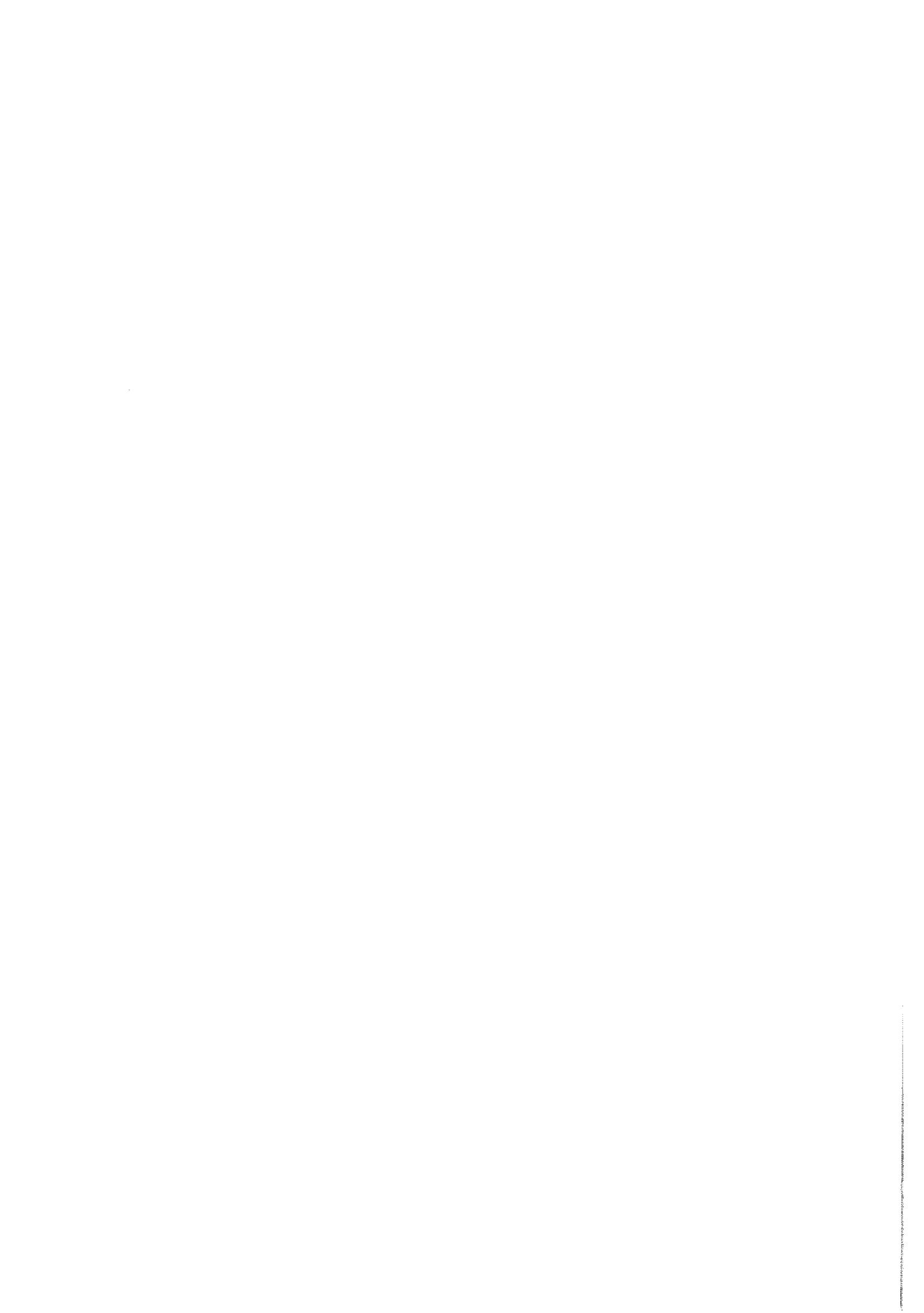
A: Aktivität (C)⁺

2.1 Auswahl wichtiger Spaltprodukte

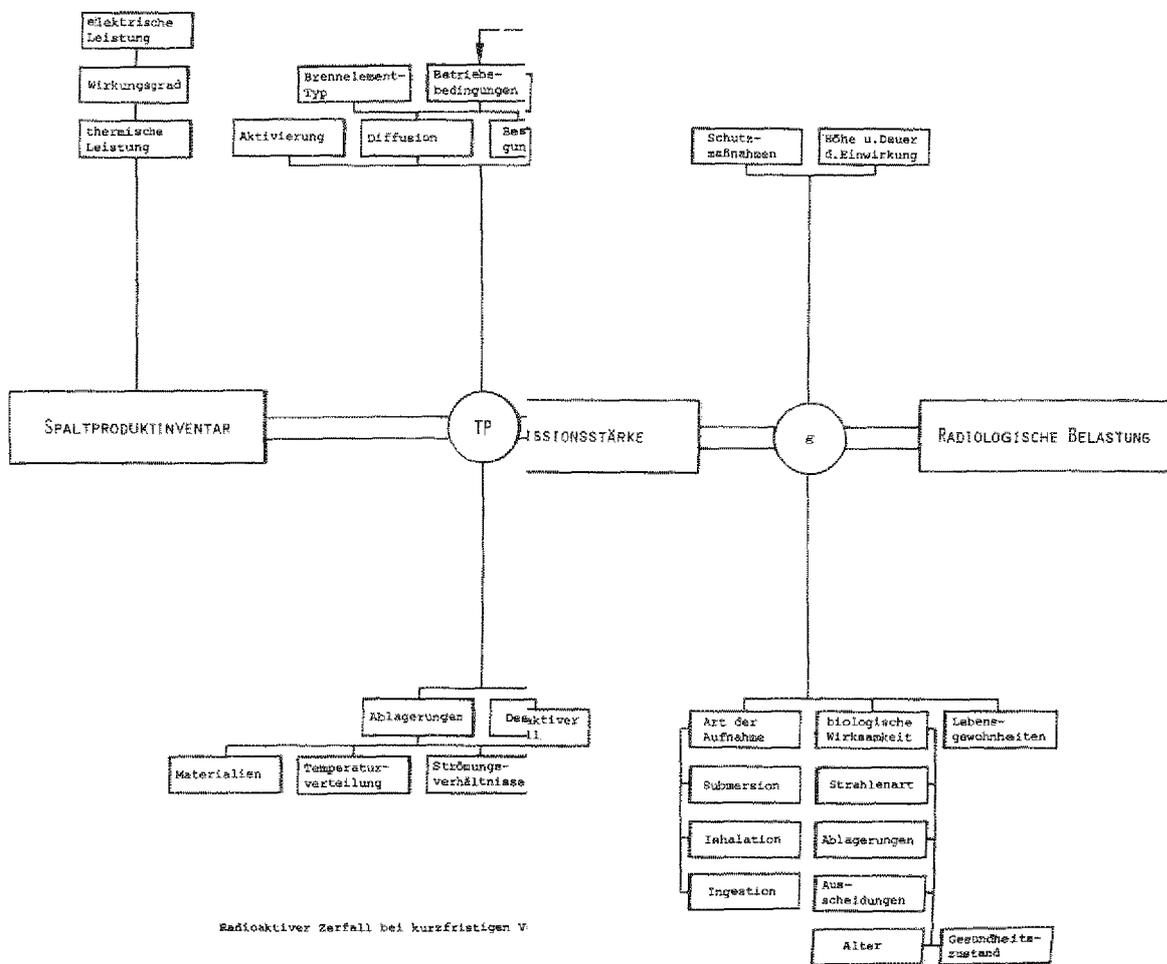
Das Spaltproduktinventar der Kernreaktoren setzt sich aus etwa 200 verschiedenen Isotopen zusammen, jedoch nur wenige gefährden die Umwelt. Das Gefährdungsmaß ergibt sich aus der Entstehungsrate des Nuklids, der Flüchtigkeit bzw. Rückhaltefähigkeit, den chemischen Eigenschaften, der Halbwertszeit, dem Verhalten bei Freisetzungen und der biologischen Wirksamkeit. In Tab. 2.1 sind die Eigenschaften der wichtigsten Spaltprodukte zusammengefaßt; auf Tritium ($T_{1/2} = 12$ a) soll in dieser Arbeit nicht eingegangen werden / 2/1 /.

Das flüchtige Jod stellt im Reaktorkreislauf ein besonderes Problem dar. Es kann atomar oder als molekulares J_2 vorliegen, mit anderen Spaltprodukten und Verunreinigungen reagieren, mit Primärkreismaterialien feste und/oder flüchtige Jodide bilden sowie organische (CH_3J) und anorganische Verbindungen eingehen. Silber (Ag), Cäsium (Cs) und Strontium (Sr) liegen im wesentlichen in atomarer Form vor.

⁺ (C) Einheit für die Aktivität
nach D. SMIDT, Reaktortechnik Bd. 2, Braun, Karlsruhe, S. 204
≡ (Ci), (c)



Übertragungsfaktor	TP - Primärkreis	Kühlgasaktivität/Aktivitätsinventar
TS	Schutzbehälter	Aktivität Schutzbehälterfüllung/ Kühlgasaktivität
TK	Belüftungssystem	Kamin Quellstärke/Aktivität Schutzbehälterfüllung
TO	undichte Oberfläche	Oberflächenquellstärke/Aktivität Schutzbehälterfüllung
	atmosphärische Ausbreitung	Immissionsstärke/atmosphärische Quellstärke
TO	unterirdische Ausbreitung	unterirdische Aktivitätskonzentration/ unterirdische Quellstärke
q	Dosiskonstante	Dosis/Immissionsstärke



.1: Freisetzungspfade der Spaltprodukte

Isotop	Spaltausbeute			R/B x 10 ⁵				Flüchtig- keit	Siedepunkt	Gefährdete Organe Art der Schädigung	Chem. Form im Kreislauf	Ablagerungs- neigung	Rückhaltenmöglichkeit
	Y (%)	Aktivitäts- inventar (kC/MWth)	Halbwertszeit T _{1/2}	(2/3)	(2/4)	(2/8)	(2/6)						
+++													
Kr 85m	1,3	12,7	4,4 h		5,8	3,0		gasf.	- 153 °C	alle Organe (äußere Strahlg.)	Edelgas	-	Tieftemperaturfallen
85	0,3+	0,3/2,1 ⁺⁺	10,6 a		30,0	1,0							
88	3,6	31,4	2,8 h		5,9	2,0							
Sr 89	4,8	40,0	50,5 d					mäßig	1366 °C	Knochen, Lunge (Ingestion, In- halation)	atomar	groß	Ionenaustauschvorgänge Adsorption
Sr 90	5,8	2,4 ⁺ /25,5 ⁺⁺	28 a		0,2 ⁺								
J 131	3,1	26,0	8 d	1,1	0,06	5,7		groß	185 °C	Schilddrüse (äußere Strahlg., (Ingestion, Inha- lation)	atomar molekular Jodid organische Verbindung	groß	phys. Adsorption chemische Reaktionen
132	4,7	40,0	2,3 h			3,5							
133	6,9	58,0	21 h										
134	7,8	66,0	53 m										
135	6,1	51,0	6,7 h										
Xe 133	6,6	55,3	5,3 d	0,9	5,4	1		gasf.	- 108 °C	alle Organe (äußere Strahlg.)	Edelgas	-	Tieftemperaturfallen
135	6,3	52,6	9,2 h			0,34							
138	5,5	47,0	17 m			0,12							
Cs 137	6,2	2,1 ⁺ /24 ⁺⁺	33 a	1,6	2,4	17 ⁺		mäßig	670 °C	alle Organe (Ingestion, Inha- lation)	atomar	groß	Ionenaustauschvorgänge Adsorption

+ 2 Betriebsjahre

++ 30 "

+++ Feed-TRISO/Breed-BISO-Partikelkonzept

TAB. 2.1: Eigenschaften der wichtigsten Spaltprodukte

2.2 Primärkreisverhalten und Kühlgasaktivität

2.2.1 Einflußgrößen

Quellen der Kühlgasaktivität sind

- die Urankontamination des "coatings" mit anschließendem Spaltprodukttransport,
- die strahlenbedingte und mechanische Beschädigung der "coated particles",
- Aktivierung im Strahlenfeld befindlicher Werkstoffe samt der Verunreinigungen / 2/2 / und vor allem
- die Spaltprodukt diffusion aus der Brennstoffzone zur Brennelementoberfläche.

Diese Erscheinungen werden in R/B-Faktoren zusammengefaßt, die das Verhältnis der Freisetzungsrates R zur Entstehungsrates B bilden. Bei langlebigen, nicht im Gleichgewicht befindlichen Spaltprodukten (Sr, Cs) werden die Raten über den betrachteten Zeitraum integriert und als "fractional release" bezeichnet. Quantitativ sind die nuklidspezifischen R/B-Faktoren abhängig von

- dem Brennelement- und "coated particle"-Typ,
- dem Strukturmaterial,
- dem Stand der Herstellungstechnik und
- dem Temperaturniveau.

Zur experimentellen Bestimmung dieser Faktoren für Hochtemperaturreaktoren sind an verschiedenen Orten (Dragon / 2/3 /, Jülich / 2/4 /, Peach Bottom, Cadarache / 2/6 / Versuchseinrichtungen mit Heißgasentnahmen installiert. Dabei wird die Kühlgasaktivität als Maß der Freisetzungsrates angesehen und auf die Entstehungsrates /2-2/ bezogen.

$$B_i = 3,13 \cdot 10^{16} \cdot Y_i \cdot L \quad (\text{Kerne/s}) \quad /2-2/$$

- i: Nuklidkennzeichnung
- λ : Zerfallskonstante (s^{-1})
- L: therm. Reaktorleistung (MW)
- Y: Spaltausbeute
- t: Betriebszeit (s)

Im Gegensatz zu den Edelgasen können sich "feste" Spaltprodukte auf dem Weg zum Entnahmeort ablagern. Diese Erscheinungen sind quantitativ noch nicht exakt

erfaßt und können die ermittelten Freisetzungsraten verfälschen. Das VAMPYR-I Versuchsprogramm am AVR Jülich liefert für den Hochtemperaturreaktor mit kugelförmigen Brennelementen wertvolle Ergebnisse, da sich das Gas auf hohem Temperaturniveau (850°C) befindet und oberhalb der Kohlesteinbrücke entnommen wird. Größere Ablagerungen über so kurze Strecken auf heißem Graphit und Kohlestein werden nach heutigen Erkenntnissen ausgeschlossen.

Ausgehend von der Diffusionsgleichung können R/B-Faktoren auch analytisch bestimmt werden / 2/7, 2/8 /. Die Ergebnisse sind in Tab.2.1 aufgeführt.

Radioaktiver Zerfall, Primärkreisleckage und Ablagerungen der "festen" Spaltprodukte an Oberflächen verringern die Kühlgasaktivität. Vor allem die Ablagerungen des Ag, Sr, Cs und J sind von entscheidender Bedeutung für die Berechnung der zu erwartenden Kühlgasaktivität und für die Ausbaubarkeit wichtiger Komponenten. Es ist bekannt / 2/3, 2/9 /, daß atomares Strontium und Caesium physikalisch an metallischer Oberfläche gebunden wird. Jod wird entweder atomar oder nach Bildung flüchtiger Jodide adsorbiert. Die Rückhalteigenschaften poröser Stoffe (z.B. Aktivkohle) sind so groß, daß mit Adsorption an Graphiteinbauten in "kalten Bereichen" zu rechnen ist. Bei Temperaturen oberhalb 800°C kann eine Diffusion der Nuklide in den metallischen Werkstoff nicht ausgeschlossen werden / 2/8 /.

Das Maß der Ablagerungen eines Nuklids beschreibt der "plate-out"-Faktor durch das Verhältnis der abgelagerten zu der in der Gasphase befindlichen Aktivität. Er wird im wesentlichen beeinflusst von

- dem chemischen Zustand des Nuklids und dem Partialdruck,
- dem Temperaturniveau und dem -gradienten,
- der Zusammensetzung des Kühlgases,
- der Art und Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit, Oxidschicht, usw.) des sorbierenden Materials und
- den Strömungsverhältnissen.

Besonders die Jodisotope können bei Temperaturerhöhungen und steigendem Luft- oder Wasseranteil des Kühlgases wieder desorbiert werden / 2/9 /.

2.2.2 Berechnung

Die Kühlgasaktivität A_p kann durch Multiplikation des Aktivitätsinventars J mit dem Übertragungsfaktor TP berechnet werden. Die Bereichskenngröße TP ist

zeitabhängig und läßt sich nach Lösung der folgenden Differentialgleichung bestimmen /2-2/.

$$\frac{dN_p}{dt} = R - (\lambda + \alpha_p + \beta_p) \cdot N_p + \alpha_p \cdot d_p \cdot N_p = R - (a_p + \lambda) \cdot N_p \quad (\text{kontin. Betrieb})$$

$$\frac{dN_p}{d\tau} = - (a_p + \lambda) \cdot N_p \quad (\text{nach Abschalten})$$

$$TP_i(t, \tau) = R_i/B_i \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + a_{Pi}} (1 - e^{-(\lambda_i + a_{Pi})t} e^{-a_{Pi} \cdot \tau}) \quad /2-3a/$$

$$TP_i = R_i/B_i \cdot \frac{\lambda_i}{\lambda_i + a_{Pi}} \quad (\text{Gleichgewichtsfall}) \quad /2-3b/$$

mit $a_p = \alpha_p (1 - d_p) + \beta_p$

- P: Primärkreiskennzeichnung
- N: Anzahl der Kerne
- τ : Zeit nach Abschaltung (s)
- α : Ablagerungskonstante (s^{-1})
- β : Leckage (s^{-1})
- d: Desorptionsgrad

Die leistungsbezogene Kühlgasaktivität des Nuklides i ergibt sich zu:

$$A_{Pi}^i(t, \tau) = TP_i(t, \tau) \cdot J_i^i \quad (\text{C/MWth}) \quad /2-4/$$

- i : Kennzeichnung der leistungsbezogenheit
- J^i : Aktivitätsinventar pro MWth (C/MWth)

Für Betriebsbedingungen mit "schlagartiger" Desorption d_{Pi}^+ zum Zeitpunkt t_x muß TP (t, τ) um TP^+ additiv erweitert werden.

$$TP_i^+ = \frac{A_{Pi}^i(\text{abgelagert}, t_x)}{J_i^i(t_x)} \cdot d_{Pi} \quad /2-5/$$

2.3 Verhalten der Spaltprodukte im Schutzbehälter und Aktivität der Füllung

2.3.1 Einflußgrößen

Die Aktivität der Schutzbehälterfüllung wird durch die Primärkreisleckage aufgebaut. Sie wird verringert durch Undichtigkeiten, durch radioaktiven Zerfall, durch Abgaben über das Zwangsbelüftungssystem und folgende Vorgänge innerhalb des Schutzbehälters, die auch gleichzeitig Möglichkeiten zur Rückhaltung aufzeigen / 1/2, 2/10,11,12,13,16,48/:

- (1) Sedimentation,
- (2) Anlagerung an Teilchen (Koagulation) infolge reversibler physikalischer Adsorption,
- (3) Koagulation infolge von Chemisorption (irreversibel),
- (4) Ablagerungen an großen Oberflächen

Die Ablagerungen auf Oberflächen sind von größter sicherheitstechnischer Relevanz. Der Ablagerungsgrad hängt von dem Massentransport des betrachteten Nuklids in die Nähe des sorbierenden Materials ab und dessen Sorptionseigenschaften, so daß eine Vielzahl von Parametern (Tab. 2.2) erfaßt werden muß.

Art, chemische Form, Konzentration und Teilchengröße des betrachteten Nuklids
Temperaturniveau und Temperaturdifferenz zur Wand
Art und Oberflächenbeschaffenheit des sorbierenden Materials
Strömungsgeschwindigkeit, Strömungsart (laminar, turbulent)
Druck, Zusammensetzung und kinematische Zähigkeit des Trägergases
Geometrische Verhältnisse des Behälters (Oberfläche/Volumen)

TAB. 2.2: Einflußgrößen bei der Ablagerung von Spaltprodukten auf Oberflächen

Koagulationserscheinungen können die Filterwirksamkeit positiv beeinflussen / 2/15 /. Die meisten nichtedelgasförmigen Spaltprodukte verhalten sich wie Aerosole. Unter vereinfachenden Annahmen kann die Adsorption auf großen Oberflächen /2-6/, Sedimentation /2-7/ und Koagulation /2-8/ abgeschätzt werden. Die Edelgase bleiben von Vorgängen innerhalb des Schutzbehälters unbeeinflusst.

Adsorption / 2/5, 2/14 /

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + v \frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{O}{V} \cdot K_{C_i} \cdot (C_i - C_{w_i}) + \lambda \cdot C_i = 0 \quad /2-6a/$$

$$\frac{\partial M_i}{\partial t} - K_{C_i} \cdot (C_i - C_{w_i}) + \lambda_i \cdot M_i = 0 \quad /2-6b/$$

- v: Strömungsgeschwindigkeit (cm/s)
- C: Nuklidkonzentration (Kerne/cm³)
- O: Oberfläche (cm²)
- V: Volumen (cm³)
- K_C: Massenübergangszahl (cm/s)
- C_w: Nuklidkonzentration direkt über der Wandoberfläche (Kerne/cm³)
- M: Oberflächenkonzentration (Kerne/cm²)

Sedimentation bei geschlossenem, luftgefülltem Behälter / 2/10 /

$$\frac{1}{C_i} \frac{dC_i}{dt} = - \frac{v_e}{H} = - s_i \quad /2-7/$$

$$v_{Se} = \frac{2/9 \cdot (\rho_i - \rho_s)}{\eta} r_i^2 \cdot g$$

- S: Kennzeichnung der Schutzbehälterfüllung
- v_{Se}: Sedimentationsgeschwindigkeit (cm/s)
- H: Höhe (cm)
- η: dynamische Zähigkeit (g/cm·s)
- ρ: Dichte (g/cm³)
- r: Teilchenradius (cm)
- g: Erdbeschleunigung (cm/s²)
- s: Sedimentationskonstante (s⁻¹)

Koagulation infolge Chemisorption / 2/10 /

$$\frac{1}{C_i} \cdot \frac{dC_i}{dt} = - \frac{4 \cdot \bar{v} \cdot r_s \cdot C_s \cdot D_i}{(D_i/r_s \cdot \xi_i \cdot \sqrt{R_i T/2g} + r_s/(r_s + \Delta_i))} \quad /2-8/$$

- D: Diffusionskonstante (cm²/s)
- T: Temperatur (°K)
- R: Gaskonstante (cm³/°K)
- Δ: mittlere freie Weglänge (cm)
- ξ: Koeffizient zur Beschreibung der Anlagerungswahrscheinlichkeit

Zukünftige Aufgaben bestehen hauptsächlich darin, die Experimente und deren Ergebnisse auf die Bedingungen großer Hochtemperaturreaktoren zu übertragen und die wichtigsten Einflußgrößen zu erfassen. Bisher ist man von einer Vielzahl kleiner, mit ruhender Luft gefüllter Behälter ausgegangen oder bei großen Behältern von zu hohen Freisetzungsraten. Systematische Parameterstudien müssen durchgeführt werden, in die Methoden der Ähnlichkeitslehre als wichtigstes Hilfsmittel einzubeziehen wären.

Die Bedeutung der einzelnen physikalischen Erscheinungen wird wesentlich von der Teilchen-Größenverteilung der freigesetzten Stoffe bestimmt. Die Möglichkeiten zur Verwendung analytischer Verteilungsfunktionen werden erschwert, wenn - wie im Falle des Jods - der chemische Zustand nicht eindeutig festliegt.

Jod wird hauptsächlich atomar oder als organische Verbindung (CH₃J) in den Schutzbehälter gelangen. Der Anteil des nur schlecht rückhaltbaren Methyliodids kann unter bestimmten Bedingungen im Schutzbehälter (Tab. 2.3) größer werden. Für HTR erscheint ein Anteil im "unteren Prozentbereich" als realistisch / 2/8 /.

<p>Hoher organischer Anteil</p> <p>Reduzierende Atmosphäre</p> <p>Große metallische Oberflächen für katalytische Wandreaktionen</p> <p>Lange Aufenthaltszeit</p> <p>Hohe Temperaturen</p> <p>Strahlung</p>
<p>TAB. 2.3: Methyliodidaufbau begünstigende Faktoren</p>

Zusammenfassend sind die Möglichkeiten zur analytischen Beschreibung des Spaltproduktverhaltens im Schutzbehälter als beschränkt anzusehen und in einer geschlossenen Form quantitativ noch nicht möglich. Qualitativ kann gesagt werden, daß Koagulation bevorzugt bei Teilchendurchmessern $0,33 \mu\text{m} \leq r \leq 10 \mu\text{m}$ stattfindet, die Sedimentation überproportional mit dem Teilchendurchmesser wächst und Ablagerungen bei großen Behältern wesentlich vom Massentransport zur Oberfläche abhängen. Alle Effekte werden von der Zeit und den bereits aufgeführten Parametern beeinflusst.

Große Ablagerungen konnten für Jod auf metallischen Oberflächen und auf Beton ($T < 600 \text{ }^\circ\text{K}$) nachgewiesen werden. Anstriche und Kunststoffe haben sich als schlecht absorbierend erwiesen (Abb. 2.2). Erhöht man den Luft- oder Wasserdampfanteil des Systems, können - ähnlich wie bei Temperaturerhöhungen - Spaltprodukte desorbiert werden (Abb. 2.3). Die möglichen chemischen Formen des Jods sind besonders zu beachten / 2/17 /.

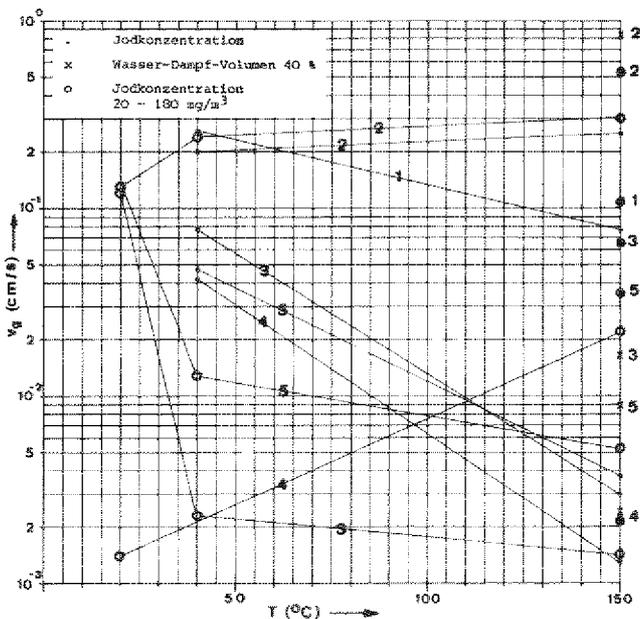


ABB. 2.2: Ablagerungsgeschwindigkeit v_g des Jods bei verschiedenen Materialien.

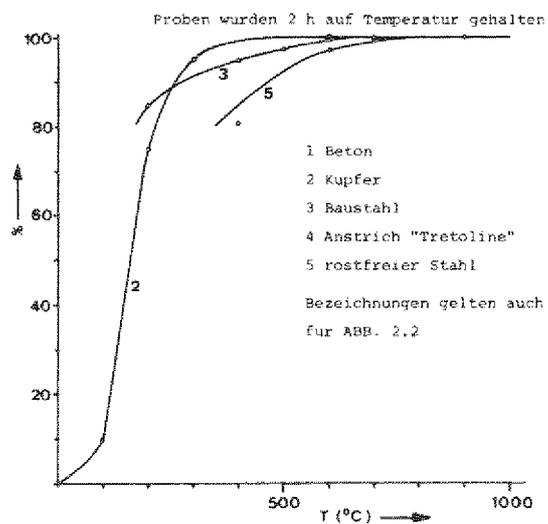


ABB. 2.3: Desorption des Jods (Daten nach /2/17/)

$$v_g : \frac{\text{abgelagerte Aktivität pro Fläche}}{\text{im Gasstrom verbleibende Aktivität}} \text{ (cm/s)}$$

Abschätzungen lassen eine Verringerung der Aerosol-Aktivität des Behältermediums gegenüber der Primärkreisleckage um etwa 70 ... 90 % je nach Betriebsbedingungen erwarten. Von einer Reduzierung der Edelgasaktivität kann nicht ausgegangen werden.

2.3.2 Berechnung

Der Übergangsfaktor TS läßt sich - ausgehend von den Differentialgleichungen

$$\frac{dN_s}{dt} = \beta \cdot N_p - (a_s + \lambda) N_s \quad (\text{kontinuierlicher Betrieb})$$

$$\frac{dN_s}{d\tau} = - a_s \cdot N_s \quad (\text{nach Abschalten})$$

unter Annahme konstanter Kühlgasaktivität wie folgt bestimmen:

$$TS_i(t, \tau) = \frac{\beta p_i}{a_{s_i} + \lambda_i} (1 - \exp(-(a_{s_i} + \lambda_i)t) \cdot \exp(-(a_{s_i} + \lambda_i)\tau) \quad /2-9a/$$

$$TS_i = \frac{\beta p_i}{a_{s_i} + \lambda_i} \quad (\text{Gleichgewichtsfall}) \quad /2-9b/$$

S: Schutzbehälterkennzeichnung

$$a_s = \frac{\alpha}{s} \cdot (1 - d_s) + \beta_s + b_s + s_s \quad (s^{-1})$$

$$b: \text{Belüftungskonstante } (s^{-1})$$

$$A_{S_i}'(t, \tau) = (TP_i(t, \tau) + TP_i^+) \cdot TS_i(t, \tau) \cdot J_i' \quad (C/MWth) \quad /2-10/$$

Desorption kann ggfs. analog /2-5/ berücksichtigt werden.

2.4 Aktivitätsabgabe an die Umgebung

2.4.1 Abgabe über den Kamin

Bei Vorhandensein einer Zwangsbelüftung des Schutzbehälters passiert die "Abluft" vor Abgabe an die Umgebung hochwirksame Filter. Dabei werden Aerosole auch bei höheren Temperaturen von mechanischen Schwebstofffiltern fast vollstän-

dig zurückgehalten.⁺ Atomares und molekulares (J_2 , CH_3J) Jod wird durch Ionenaustausch, Adsorption und Chemiesorption in imprägnierten Aktivkohle- oder Kieselgur-Filtern mit hohem Wirkungsgrad ($\eta > 99\%$) gebunden. Edelgase können praktisch nur an Tieftemperaturfallen ausgefiltert werden / 2/12 /. Für den Übertragungsfaktor und die Quellstärke folgt:

$$TK_i = b_s \cdot (1 - \eta_{F_i}^+) \quad (s^{-1}) \quad /2-11/$$

$$\dot{Q}_{K_i}^+ (t, \tau) = (TP_i^-(t, \tau) + TP_i^+(t, \tau)) \cdot TS(t, \tau) \cdot TK_i \cdot J_i \quad (C/s \text{ MWth}) \quad /2-12/$$

2.4.2 Abgabe über die Behälteroberfläche

Bei nicht ausreichender Gasdichtigkeit muß der Aktivitätsanteil erfaßt werden, der über die Oberfläche des Schutzbehälters in die Atmosphäre oder den Untergrund gelangt. Neben der Leckage geht die Filterwirksamkeit der Umhüllung in die Berechnung des Übertragungsfaktors und der Oberflächenquellstärke ein.

$$TO_i = TOA_i + TOU_i = \beta_s (1 - \eta_{S_i}^-) \quad (s^{-1}) \quad /2-13/$$

$$\dot{Q}_{O_i}^+ = (TP_i^-(t, \tau) + TP_i^+(t, \tau)) \cdot TS(t, \tau) \cdot TO_i \cdot J_i \quad (C/s \text{ MWth}) \quad /2-14/$$

A: Atmosphäre

U: Untergrund

O: Oberfläche

Die Filterwirksamkeit von Betonstrukturen gegenüber den wichtigsten Spaltprodukten hängt wesentlich von der Art, Größe und Häufigkeit der Risse ab. Für Rißbreiten im Bereich 10^{-4} m haben kleine Proben Rückhaltefaktoren von $> 10^3$ für molekulares Jod gezeigt / 2/18 /. Experimente bei natürlichem Gestein haben eine stärkere Rückhaltung des Sr und Cs gegenüber J ergeben (siehe 2.6.2). Das kann auch für Beton angenommen werden, der bezüglich der Rückhalteeigenschaften dem Naturgestein ähnlich ist / 2/19 /.

+ Auskunft Drägerwerk Lübeck: Typ M 2200 CH 17802: $\eta_{F_i} \geq 99,97\%$, $T < 600 \text{ }^\circ\text{K}$

2.5 Ausbreitung radioaktiver Emissionen

Die Ausbreitungsrechnungen stellen das Bindeglied zwischen der Emission und der Immission dar. Ihnen kommt bei der Genehmigung und Überwachung kerntechnischer Anlagen eine große Bedeutung zu. Wegen der geringen freigesetzten Mengen ist eine direkte Immissionsüberwachung nicht möglich, man kann aber von tolerierbaren Immissionswerten ausgehen und auf zulässige und kontrollierbare Emissionswerte rückrechnen.

2.5.1 Atmosphärische Ausbreitung

Gasförmige Emissionen breiten sich in der Atmosphäre infolge turbulenter Diffusion aus. Dabei führen thermische (Konvektion) und mechanische Turbulenzen, die von der Windgeschwindigkeit, von Windrichtungs- und Windstärkeschwankungen abhängen, zu einer Verdünnung der Abluftfahne / 2/20,23 /. Zur Beschreibung des Turbulenzverhaltens reicht es aus, wenn der Atmosphäre eine begrenzte Anzahl von Zuständen zugeordnet wird. Indikator ist das vertikale Temperaturprofil, für das eine mittlere Windgeschwindigkeit typisch ist. Der Abweichung des tatsächlichen vom adiabaten Temperaturprofil entsprechend, die an der Form der Abluftfahne mit bloßem Auge zu erkennen ist (Abb. 2.4), hat PASQUILL / 2/22 / Diffusionskategorien definiert.

Praktischen Rechnungen liegt das statistische Modell mit gaußförmiger Ausbreitungsverteilung an. Die Streuungen hängen von den Diffusionskategorien ab und werden von den Ausbreitungsparametern $\sigma_{x,y,z}(x)$ erfaßt. Unter den aufgeführten vereinfachenden Annahmen kann der Übertragungsfaktor TA, der in der Literatur als Ausbreitungsfaktor χ bezeichnet wird, und die Aktivität der Abluftfahne $S(x,y,z)$ bestimmt werden /2-15/.

$$\chi(x,y,z) = \frac{1}{\bar{v} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot \pi} \exp \left(- \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right) \quad (s/m^3) \quad /2-15/$$

σ : Ausbreitungsparameter (cm^2)
H: effektive Emissionshöhe (cm)
 \bar{v} : mittlere Windgeschwindigkeit (cm/s)

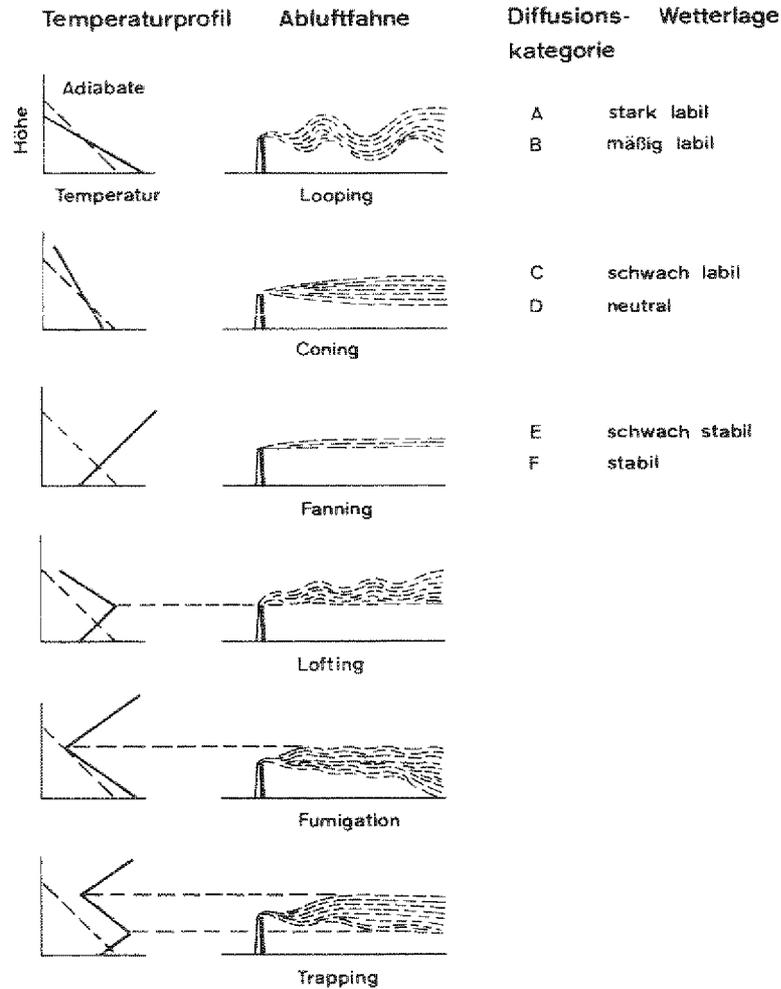


ABB. 2.4: Ausbreitungstypen und Stabilität der Schichtung

$$S'(x, y, z) = \dot{Q}' \cdot X(x, y, z) \quad (\text{C/m}^3 \cdot \text{MWth}) \quad /2-16/$$

- konstante Turbulenzverhältnisse in Ausbreitungsrichtung x
- mittlere Windgeschwindigkeit \bar{v} ($> 0,5 \text{ m/s}$) anstelle des Windprofils $v(z)$
- vollständige Reflexion am Boden (virtuelle Spiegelquelle bei $z = -H$)
- keine chemischen Umsetzungen
- keine Ablagerungen (Teilchengröße $< 10 \mu\text{m}$), keine Auswaschungen
- radioaktiver Zerfall unberücksichtigt
- homogene Ausbreitungsverhältnisse
- keine Überlagerungen mit anderen Quellen
- kontinuierliche Emission \dot{Q}

Für die Aktivität in Bodennähe unter der Ausbreitungsachse ($z = y = 0$) mit Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls folgt:

$$S_i^{\prime}(x, 0, 0) = \chi(x, 0, 0) \cdot \dot{Q}_i^{\prime} \cdot \exp(-\lambda_i \frac{x}{v}) = \frac{1}{v} \cdot \frac{\dot{Q}_i^{\prime}}{G_y(x) \cdot G_z(x) \cdot \pi} \cdot \exp(-\frac{H^2}{2G_z^2(x)} - \lambda_i \frac{x}{v})$$

(C/m³·MWth) /2-17/

Wegen der großen Reichweite der γ -Strahlung muß zur Bestimmung des Ausbreitungsfaktors χ_{γ} (s/m²) über alle Volumenelemente der Abluftfahne integriert werden, um deren Aktivitätsbeiträge zu erfassen. Ausbreitungsfaktoren χ (Abb. 2.5) zeigen eine starke Abhängigkeit von der Entfernung, den Diffusionskategorien und der effektiven Emissionshöhe. Die effektive Emissionshöhe H ergibt sich aus der Addition der Kaminhöhe und der Überhöhung des Abgases durch Impuls und Auftrieb / 2/25 /. Bei Emissionen über große Zeiträume gehen Langzeit-Ausbreitungsfaktoren $\bar{\chi}$ (Abb. 2.6) in die Rechnungen ein, denen gemäß der Richtlinie / 2/21 / mittlere Wetterlagen zugrunde gelegt werden. Den kurzzeitigen, zu einem beliebigen Zeitpunkt erfolgten Emissionen sind die schlechtesten, möglichen Ausbreitungsbedingungen zuzuordnen (Kurzzeitausbreitungsfaktoren $\hat{\chi}$, Abb. 2.7).

Die genannten Voraussetzungen können leider in den seltensten Fällen praktischer Ausbreitungsrechnungen erfüllt werden, so daß über Korrekturglieder die "einfachen" Rechnungen den realen Verhältnissen angepaßt werden müssen / 2/24,26, 27 /. Dazu gehören:

- (1) Aktivitätsminderung durch Fall-out, Wash-out und Rain-out,
- (2) Turbulenzstörungen durch Geländeunebenheiten, Bewuchs und Bebauung,
- (3) ausgeprägtes vertikales Windprofil, windschwache Situationen,
- (4) Erscheinungen im Lee des Kamins,
- (5) Sperrschichten,
- (6) chemische Umsetzungen,
- (7) Anfangsverdünnung, Überlagerungen,
- (8) zusätzliche Thermik durch Zerfallswärme.

Der Erfassung der tatsächlichen Windverhältnisse kommt dabei naturgemäß die größte Bedeutung zu.

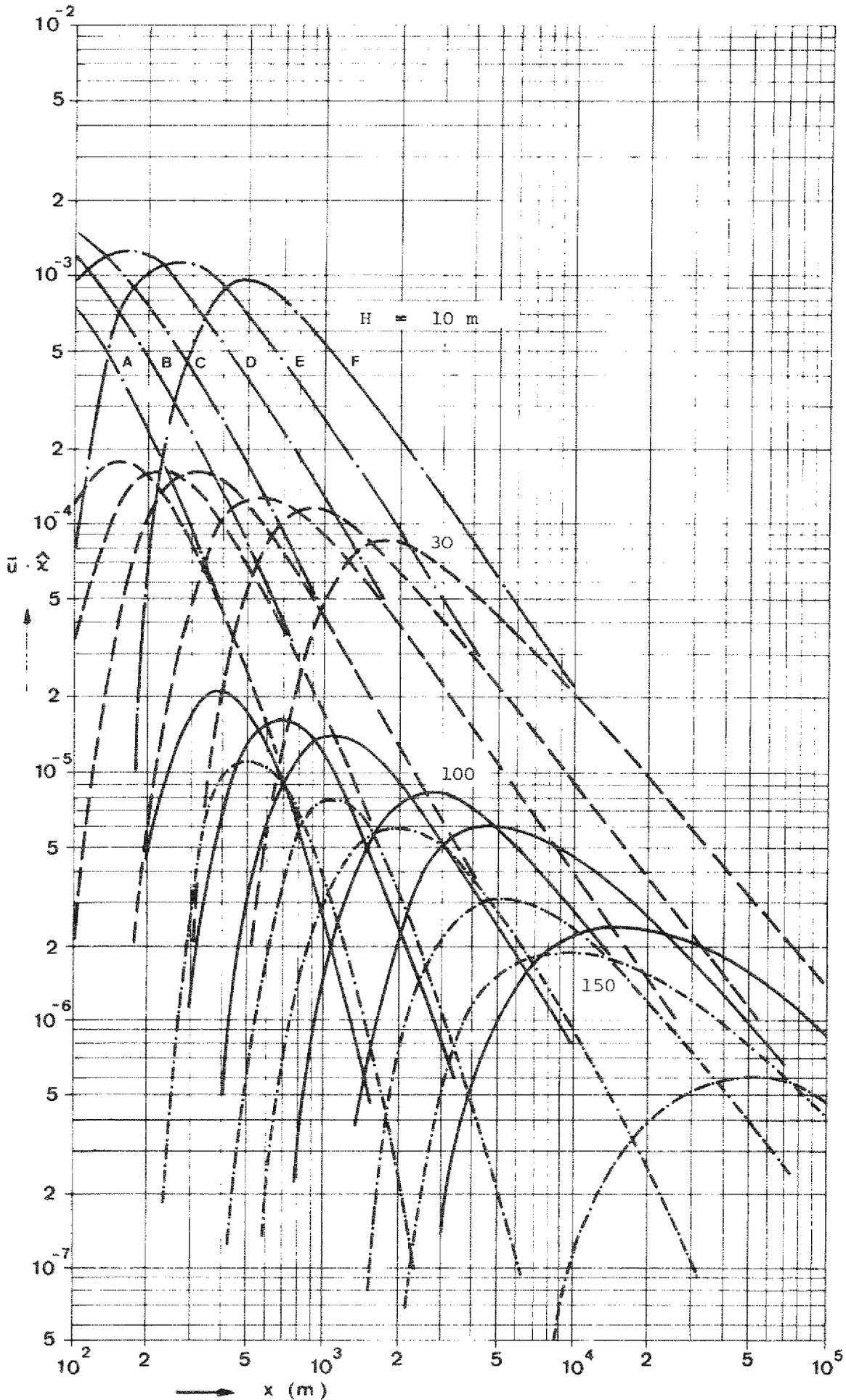


ABB. 2.5 : Abhängigkeit des Ausbreitungsfaktors $\bar{u} \cdot \hat{X}$ von der Wetterlage und der Emissionshöhe

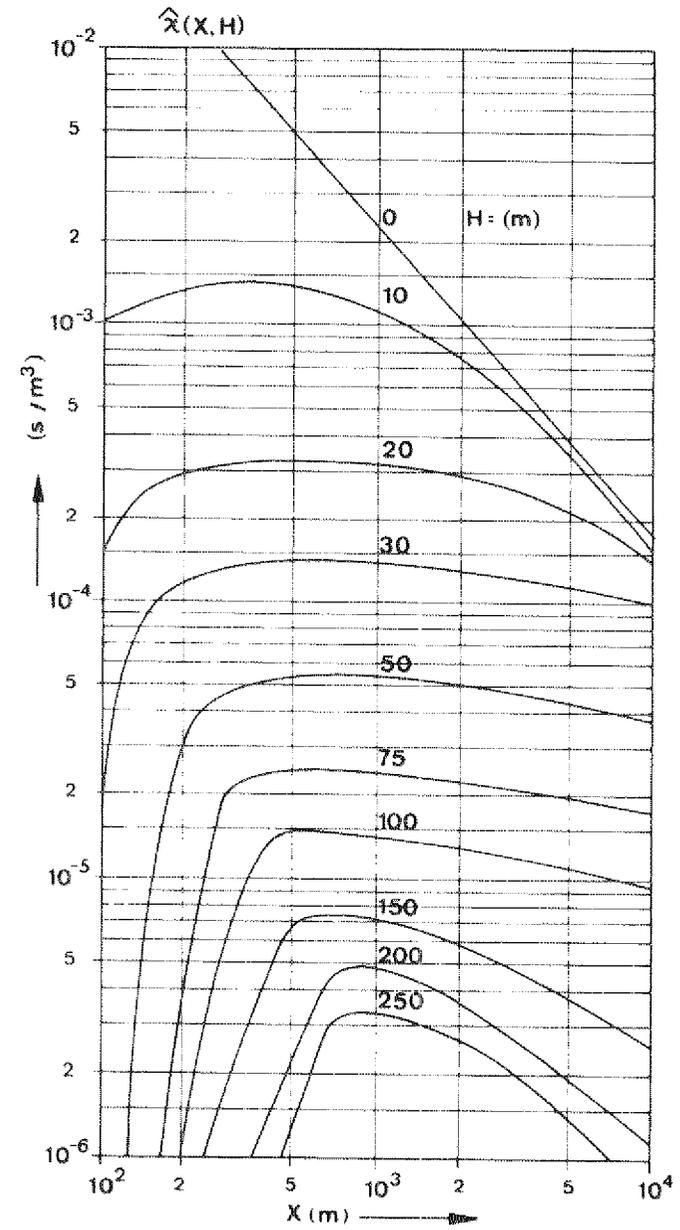
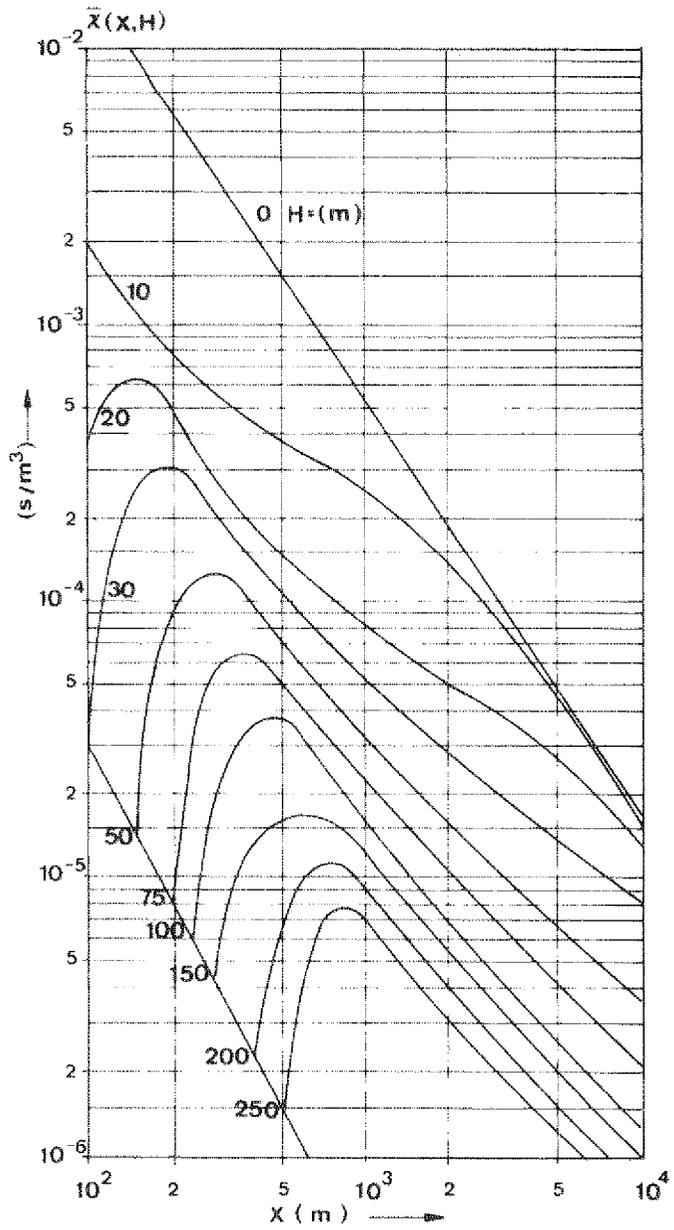


ABB. 2.6: Langzeitausbreitungsfaktoren $\bar{\chi}$
 (10 ° Sektor, 100 %ige Windrichtungshäufigkeit) / 2/21 /

ABB. 2.7: Kurzzeitausbreitungsfaktoren $\hat{\chi}$ / 2/21 /

2.5.2 Unterirdische Ausbreitung

2.5.2.1 Einflußgrößen

Radioaktive Spaltprodukte können nach Fall-out, Wash-out und Rain-out aus der Abluftfahne oder nach unterirdischer Freisetzung in den Untergrund gelangen und sich dort ausbreiten. Die unterirdische Ausbreitung (Migration) untersucht man in den USA im Zusammenhang mit den radiologischen Auswirkungen unterirdischer Kernexplosionen, unterirdischer Endlagerung und katastrophaler Reaktorunfälle. In Deutschland werden Studien / 2/28 / im Hinblick auf den Grundwasserschutz durchgeführt. Diese Arbeiten haben die rückhaltende und verzögernde Wirkung von Gesteinsformationen⁺ bewiesen / 2/29,44,45, u.a. /, die hervorgerufen wird durch:

- physikalische und chemische Sorption (vor allem Ionenaustausch),
- molekulare Diffusion und
- gasdynamische oder hydrodynamische Dispersion bei stetigem Fließen.

Diese Erscheinungen sind abhängig von chemischen und physikalischen Eigenschaften der Nuklide und des Trägermediums (Kontaminatoren) aber auch von den chemischen und physikalischen Eigenschaften des durchwanderten, sorbierenden Mediums und den Wasserverhältnissen. In Tab. 2.4 sind die Einflußgrößen und deren Auswirkungen aufgeführt.

Die Ausbreitungsrechnung muß sicher nachweisen, daß bis zu einem kritischen Punkt die Aktivitätskonzentration der Spaltprodukte auf zulässige Werte abgesunken ist. Dabei kann man sich auf die Edelgase Xe und Kr, das alkalische Cäsium (Kation), das alkalische Strontium (Kation) und das Halogen Jod (Anion) als die wichtigsten Spaltprodukte beschränken. Eine unzulässige Kontamination des Trinkwassers und der oberen genutzten Bodenschicht muß unter allen Bedingungen auszuschließen sein. Dazu ist für die lokalen Untergrundverhältnisse ein eingehendes Studium des Bodens, der Geologie und Hydrologie in Verbindung mit Ausbreitungsexperimenten erforderlich.

Wegen der vielen, zudem noch stark variierenden Ausbreitungsparameter können Vorausberechnungen aufgrund vereinfachender, theoretischer Ableitungen nur

+ Geologischer Oberbegriff: Gestein
Arten (geolog.): Lockergestein, Felsgestein
(bautechnisch): Boden, Fels

Abhängigkeit	Sorption	Desorption	Dispersion Transport in der Strömung	Diffusion
<u>Radionuklid</u>				
chemische Eigenschaften	o	o	o	o
chemischer Zustand	o	o	o	o
Konzentration, -gefälle	o	+	o	+
phys. Eigenschaften	o	o	o	o
Energie der phys.-chemischen Bindung	+	-	.	.
<u>Trägermedium</u>				
Aggregatzustand	o	o	o	o
Zusammensetzung	o	o	o	o
Strömungsgeschwindigkeit (Kontaktzeit)	-	o	+	
chem. Eigenschaften	o	o	o	o
phys. Eigenschaften	o	o	o	o
Viskosität	+		-	o
Temperatur, -gradient	o	+	o	+
<u>Gestein</u>				
Heterogenität	o	o	o	o
Korngröße	-	o	o	o
Selektivität	+	o	.	.
mineralogische und petrologische Zusammensetzung	o	o	o	o
Klüftigkeit/Porosität	o	o	+	o
Verwitterungen	o	o	o	o
<u>Wasserverhältnisse</u>				
Sättigungsgrad	o	o	o	o
pH-Wert	o	o	.	.
Gashaushalt	o	o	o	o
. kein Einfluß o Einfluß - negativer Einfluß + positiver Einfluß				
TABELLE 2.4: Beeinflussung der Migration von Radionukliden				

als unzulänglich angesehen werden. Sie stellen eine mehr oder weniger gute Näherung dar. Im Rahmen dieser Studie sollen Ansätze aufgezeigt werden, die eine eingrenzende Beurteilung der unterirdischen Ausbreitung ermöglichen. Sie liegen den Rechnungen in 3.4.2 zugrunde.

2.5.2.2 Berechnungsgrundlagen

Den Transport von Kontamination in wassergesättigtem porösen Medium beschreibt die folgende Gleichung / 2/30,31,32 / mit

- der Beschränkung auf irreversible Sorption,
- der Erfassung der Dispersion und
- der Voraussetzung stetigen laminaren achsparallelen Fließens.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{1-f}{f} \cdot \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} (D_s \cdot \frac{\partial C}{\partial s}) - \frac{\partial}{\partial s} (\bar{v}_s \cdot C) \quad /2-18/$$

M, C	Konzentration sorbierter nicht sorbierter Stoffe	(Ionen/g Untergrund) (Ionen/cm ³ Trägermedium)
f	Porosität des Untergrundes	
\bar{v}_s	mittlere interstitielle Geschwindigkeit	(cm/s)
D	Dispersionskonstante	(cm ² /s)
s	Koordinaten x, y, z	

Die Vernachlässigung der molekularen Diffusion stellt keine große Fehlerquelle dar, da es sich um einen Langzeitvorgang handelt, der erst bei sehr kleinen Strömungsgeschwindigkeit $\leq 10^{-4}$ cm/s die Migration beeinflusst / 2/31 /.

Nach Einführung des Verteilungskoeffizienten K_d und des Zeittransformationfaktors R_f wird /2-18/ zu:

$$\frac{\partial C}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial s} (D_s \cdot \frac{\partial C}{\partial s}) - \frac{\partial}{\partial s} (\bar{v}_s \cdot C) \quad /2-19/$$

$$\text{mit } K_d = \frac{M}{C} \text{ (cm}^3/\text{g)} \quad /2-20/$$

$$t = T (1 + \rho \frac{1-f}{f} \cdot K_d) = R_f \cdot T \quad /2-21/$$

Mithilfe des statistischen Modells kann /2-19/ gelöst werden.

$$AC_{u_i}(x,y,z,T_i) = \frac{Q_{u_i}}{8(\bar{n}T_i)^{3/2} \cdot (D_x D_y D_z)^{1/2}} \exp - \left(\frac{x^2}{4D_x T_i} + \frac{y^2}{4D_y T_i} + \frac{z^2}{4D_z T_i} \right) \quad /2-21/$$

AC Aktivitätskonzentration (C/cm³)

Q punktförmig freigesetzte Aktivität (C)

X,Y,Z Abstand vom Schwerpunkt der Ausbreitungswolke (cm)

Für die Maximalkonzentration im Schwerpunkt der Wolke folgt mit Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls:

$$AC'_{u_i}(0,0,0,T) = \frac{Q_{u_i}}{8(\bar{n}T_i)^{3/2} (D_x D_y D_z)^{1/2}} \exp(-\lambda_i T_i) \quad (C/cm^3 \text{ Mwth}) \quad /2-22/$$

$$TU_i = \frac{AC_{u_i}}{Q_{u_i}} \quad (cm^{-3}) \quad /2-23/$$

Für konservative Abschätzungen reicht oft die Beschränkung auf die eindimensionale Ausbreitung ohne Sorption ($T \rightarrow t$) aus. Auf die komplizierten Fließ- und Sorptionsvorgänge in möglichen Rissen und Spalten des Festgesteins ist dieses Modell schlecht zu übertragen.

Die "Wanderungszeit" für die Strecke x kann nach /2-24/ bestimmt werden:

$$T = \frac{x}{v_x \cdot R_f} \quad /2-24/$$

Dabei wird über die Kenngröße R_f vor allem der Einfluß der Porosität deutlich / 2/21 /.

Wegen der großen Schwankungsbreite und Auswirkungen der Ausbreitungsparameter haben die analytisch ermittelten Erwartungswerte nur dann eine Aussagekraft, wenn die realen Untergrundverhältnisse ausreichend genau erfaßt werden. Das ist jedoch nur für einen konkreten Standortbereich möglich / 2/33 /. Aus diesem Grunde empfiehlt es sich nicht, in Anlehnung an die atmosphärische Ausbreitung globale "Migrationsklassen" zu schaffen, obwohl nach geologischen Karten dem Untergrund eine begrenzte Anzahl geologischer Formationen zugeordnet werden kann. Außerdem weichen die lokalen geologischen und hydrologischen Verhält-

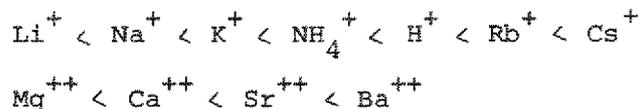
nisse oft erheblich von den Grobstrukturen ab und machen die auf ihnen basierenden Berechnungen für den lokalen Bereich wertlos.

2.5.2.3 Sorption

Kontaminatoren werden hauptsächlich durch Ionenaustausch im Gestein sorbiert. Kationenaustauschend wirken vor allem Tonminerale und organische Substanzen, die eingelagerte Ca-, Mg-, K- und Na-Ionen gegen in Lösung befindliche Ionen eintauschen / 2/34 /. Dabei stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein, der dem Massenwirkungsgesetz / 2/35 / folgt. Die Güte des Ionenaustauschers ergibt sich aus der

- Summe der auszutauschenden Ionen (Austauschkapazität),
- der auswählenden Wirkung auf das einzutauschende Ion (Selektivität) und
- der Größe der zugänglichen Oberfläche.

Letztere bestimmt vor allem die Geschwindigkeit, mit der sich der Gleichgewichtszustand einstellt. Das Gleichgewichtsverhältnis der Ionen hängt von deren Bindungsenergie ab. Für die Eintauschwahrscheinlichkeit für Alkali- und Erdalkalielemente lassen sich folgende Reihen aufstellen:



Für Cs und Sr ist deshalb eine hohe Eintauschrates und Fixierung zu erwarten. Die Rückhalteeigenschaften des Bodens charakterisieren die Verteilungskonstanten K_d / 2/30 /. Sie geben das Verhältnis der pro Masseneinheit des Untergrundes sorbierten Ionen zu den pro Volumeneinheit im Trägermedium verbleibenden Ionen an und können für den Gleichgewichtsfall über das Massenwirkungsgesetz berechnet werden, sollten jedoch experimentell überprüft werden, da sie die Migration stark beeinflussen.

Versuche haben die Rückhalteeigenschaften des Bodens gegenüber Kationen bestätigt / 2/36,37,39,41 /. Besonders gut sorbieren Rohlöß wegen seines hohen Calciumgehaltes und tonige Bodenarten (z.B. Montmorillonit-Tonmineral) die Spalt-

produkte Cs und Sr. Allgemein ist die Sorptionsrate des Cs um den Faktor 10 größer als die des Sr. Liegen die Eingangskonzentrationen bei 1/100 der Sättigungskapazität des Bodens, werden beide Elemente auf kürzester Distanz vollständig absorbiert / 2/40 /.

In einem geringeren Maße tauscht der Boden auch an Tonmineralien, Aluminium- und Eisenoxiden sowie organischen Substanzen Anionen aus / 2/34 /, so daß radioaktives Jod durch Ionenaustausch zurückgehalten werden kann / 2/38,42 /. Andere Sorptionsarten, wie z.B. physikalische Adsorption, führen in vielen Fällen zu einer stärkeren Rückhaltung, zumal die infolge Ionenaustausch gebildeten Jodide meist wasserlöslich sind.

Besondere Schwierigkeiten machen Desorptionserscheinungen. Sie können bei Änderung der Temperatur, des pH-Wertes und der Konzentration auftreten. Sie sind aber noch nicht soweit erforscht, um Aussagen zuzulassen, die über die in Tab. 2.4 aufgezeigten Abhängigkeiten hinausgehen. Laufende Arbeiten / 2/28,43 / beschäftigen sich mit diesem Problem.

2.5.2.4 Dispersion

Als Dispersion bezeichnet man den mechanischen Vermischungsprozeß in porösen Medien, der dann entsteht, wenn ein Medium ein anderes verdrängt, das mit ihm mischbar ist. Er findet in einer Übergangszone statt (Dispersionszone).

Den Dispersionsgrad bestimmen die Fließgeschwindigkeiten und der Dispersionskoeffizient D , der wiederum neben der Stromführung von der Fließgeschwindigkeit abhängt. BAETSLE / 2/31 / hat bei homogenem, sandigen Material mittlerer Körnung folgenden Zusammenhang zwischen den Dispersionskoeffizienten und der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit \bar{v}_x ermittelt:

$$\begin{aligned} \log D_x &= \log \bar{v}_x - 1 && /2-25/ \\ \log D_{y,z} &= 0,5 \log \bar{v}_x - 3,1 && /2-26/ \end{aligned}$$

Von großer sicherheitstechnischer Relevanz ist die Dispersion von Radionukliden, die im Grundwasser gelöst sind. Unter besonderen Bedingungen muß konvektive gasdynamische Dispersion beachtet werden.

Unterscheidet man beim Lockergestein bzw. Boden zwischen bindigem (z.B. Lehm) oder nichtbindigem, rolligem Material (z.B. Kies), so sind bei der ersten Bodenart nur sehr langsame Wasserbewegungen möglich (Sickerwasser). Der Grundwasserfluß setzt gesättigte Bodenarten mit ausreichender Permeabilität voraus. Wird der Grundwasserfluß nicht künstlich forciert, handelt es sich um relativ langsam ablaufende Vorgänge. Selbst der horizontale Fluß in einer sehr durchlässigen Bodenformation, die nach unten von einer undurchlässigen Schicht begrenzt wird, kann nur in wenigen Fällen als wesentlich bezeichnet werden. Zu erwartender Grundwasserfluß liegt im Bereich 10^{-4} bis 10^0 cm/s / 2/33 /.

2.6 Belastungspfade und Strahlenwirkungen

Die Direktstrahlung der vorbeiziehenden Abluftfahne und die in die Nahrungskette gelangenden Radionuklide können zu einer Gefährdung der Menschen führen (Tab. 2.5).

<p>Strahlenwirkungen der Abluftfahne:</p> <ul style="list-style-type: none">- Belastung durch äußere γ-Strahlung (Gesamtkörper)- Belastung durch äußere β-Strahlung (Gesamtkörper, Augenlinsen)- innere Strahlenbelastung durch Inhalation (Gesamtkörper, Schilddrüse) <p>Strahlenwirkungen durch Ablagerungen (Wash-out, Fall-out) aus der Abluftfahne:</p> <ul style="list-style-type: none">- äußere Belastung durch γ- und β-Strahlen (meist vernachlässigbar)- innere Belastung durch Ingestion (Gesamtkörper, Magen-Darmkanal, Schilddrüse, Knochen) <p>Strahlenwirkungen unterirdisch transportierter Radionuklide:</p> <ul style="list-style-type: none">- innere Belastung durch Ingestion
<p>TAB. 2.5: Strahlenwirkungen emittierter Radionuklide</p>

Der Übertragungsfaktor TB , der in der Literatur als Dosiskonstante g_i bezeichnet wird, stellt den Zusammenhang zwischen der Dosisleistung \dot{D} und der Immissionsstärke her.

Für Dosisleistung infolge atmosphärischer Ausbreitung bei bestimmungsgemäßem Reaktorbetrieb folgt:

$$\dot{D}'_{A_i}(t, \tau) = TP'_i(t, \tau) \cdot TS'_i(t, \tau) \cdot (TK_i \bar{X}_K + TO_i \bar{X}_O) \cdot g_{A_i} \cdot J'_i \quad (\text{rem/s MWth}) \quad /2-27/$$

g Dosiskonstante (rem m³/C · s)
für γ -Strahlung (rem m²/C · s)

Auf die Ermittlung der Dosisleistung während des nicht bestimmungsgemäßen Betriebes mit Berücksichtigung der unterirdischen Ausbreitung wird unter 3.2 und 3.3 eingegangen.

Die Dosiskonstanten müssen entsprechend der Belastungspfade neben einer Vielzahl von physikalischen und chemischen Vorgängen noch zusätzlich den körperlichen Zustand, das Alter und die Verhaltensgewohnheiten der Betroffenen einbeziehen (Tab. 2.6).

Belastungspfad	Parameter
Äußere β - und γ -Strahlung	Zerfallsenergie, Reichweite, Abschirmungen
Inhalation	Atemluftbedarf, Radionuklidkonzentration, Schutzmaßnahmen, biologische Wirksamkeit des Nuklids (Aufnahme und Ausscheidung, Halbwertzeiten, Bedeutung des gefährdeten Organs, Konzentration im Organ, Alter, Gesundheitszustand).
Ingestion	Ablagerungen aus der Abluftfahne, unterirdische Migration, Schutzmaßnahmen, direkte Aufnahme durch den Menschen, Aufnahme über die Nahrung, Radionuklidkonzentration, Ernährungsgewohnheiten, biologische Wirksamkeit.

TAB. 2.6: Die Strahlenwirksamkeit beeinflussende Parameter

Tabelle 2.7 führt die Dosiskonstanten g_{A_i} der wichtigsten Nuklide auf. Sie gelten bei Kennzeichnung (+) für die "kritische Bevölkerungsgruppe" (z.B. Kinder), ansonsten für den "Standardmenschen". Für die Ingestionsbelastung ist die Milch kritisches Nahrungsmittel.

2.7 Grenzwerte für die Dosisbelastung

Grundsätzlich dürfen kerntechnische Anlagen für die Bevölkerung nur ein vernachlässigbar geringes zusätzliches Risiko darstellen. Gemäß der Empfehlungen der International Commission on Radiological Protection (ICRP) und der darauf basierenden 1. Strahlenschutzverordnung / 2/47 / werden für Einzelpersonen aus der Bevölkerung folgende Dosisleistungslimits für die Gesamtheit aller kerntechnisch bedingten Strahlenquellen und die Beträge aus allen Belastungspfaden festgelegt:

Quartalsdosis darf höchstens halbe Jahresdosis betragen	
Gonaden, Knochenmark, Gesamtkörper (≙ weiches Gewebe)	0,5 rem/a
Haut, Knochen, Schilddrüse	3,0 rem/a
Schilddrüse für Kinder unter 16 Jahren	1,5 rem/a
übrige Einzelorgane	1,5 rem/a
Gonaden (Gesamtbevölkerung)	5 rem/30 a
Genehmigungswerte für den bestimmungsgemäßen Betrieb von KKW / 2/49 /	
Ganzkörper	30 m rem/a
Schilddrüse (Kleinkinder)	90 m rem/a

Da gleiche Umweltkontaminationen individuellen Eigenschaften entsprechend zu unterschiedlichen Belastungen führen, wären individuelle Dosisleistungslimits sinnvoll. Bei sicherheitstechnischen (Voraus)-Betrachtungen ist das natürlich nicht möglich, deshalb soll man nach den Empfehlungen von der am stärksten gefährdeten (kritischen) Bevölkerungsgruppe ausgehen, deren Mitgliedern Standardeigenschaften zugeordnet werden.

Die Einhaltung der so ermittelten, oben aufgeführten Grenzwerte stellt ein unvorstellbar geringes somatisches und genetisches Risiko dar. Soweit Aussagen überhaupt möglich sind, weisen sie auf eine durch Strahlung innerhalb der vorgegebenen Grenzen hervorgerufenen Krankheitswahrscheinlichkeit (z.B. Krebs) im Bereich von 10^{-5} Fällen pro Jahr und exponierter Person hin. Eine Aussage über genetische Schäden ist wegen der Langzeitwirkungen noch schwieriger. Untersuchungen (ICRP) lassen das zusätzliche Risiko als zulässig gering erscheinen. Alle Angaben gehen von pessimistischen Voraussetzungen aus, die nötig sind, solange dieses komplexe Wechselspiel nicht genauer erfaßt werden kann / 2/20,27,46/.

Für Katastrophenfälle sind 25 rem für die Ganzkörper- und Schilddrüsenbelastung als Grenzwerte anzusehen, bei deren Überschreitung Gegenmaßnahmen einzuleiten sind. Das gleiche gilt bei Überschreiten der Bevölkerungsdosis von 10^6 man rem.

3 EINFLUSS DES SCHUTZBEHÄLTERS AUF RADIOAKTIVE FREISETZUNGEN

Die Auslegung des Schutzbehälters bestimmt letztlich die radioaktiven Immissionen von Kernreaktoren. Die Vielzahl und Variationsbreite der Einflußgrößen hat zu einem breiten Typenspektrum geführt. Diese Arbeit soll den Behältertyp herausstellen, der nach heutigem Stand der Technik für den Hochtemperaturreaktor unter Einbeziehung wirtschaftlicher Aspekte ein Optimum darstellt. Wertmaßstab ist zunächst der Nachweis der Sicherheit und minimaler Umweltbelastung für den bestimmungsgemäßen Betrieb und den größten anzunehmenden Unfall. Ausserdem müssen hypothetische Unfälle in die Überlegungen mit einbezogen werden, da mit deren Beherrschung die Genehmigung geplanter Standorte in Verdichtungsräumen eng verknüpft sein wird / 3/1 /. Diese Standorte sind aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, der Wasserwirtschaft, des Landschafts- und Umweltschutzes allgemein anzustreben, für die Einführung der nuklearen Prozeßwärme sind sie von großer Bedeutung.

3.1 Ableitungen während des bestimmungsgemäßen Betriebes

Beschränkt man sich auf die atmosphärische Ausbreitung, kann mit /2-27/ die spezifische Dosisleistung und die maximal zulässige Standortleistung ermittelt werden. Jod-131 und Kr-85 haben sich als die kritischen Nuklide erweisen, deren Äquivalenzdosen folglich mit den Grenzwerten in Beziehung zu setzen sind.

In Tab. 3.1 sind die Einflußgrößen mit ihren Schwankungsbreiten und Auswirkungen auf die Übertragungsfaktoren aufgeführt. In den Berechnungsfällen I bis IV werden physikalisch und technisch relevante Werte angenommen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Erwartungswerte, die wie folgt zusammengefaßt werden können:

- 1) Radioaktives Jod stellt die potentiell grösste Gefahr für die Umgebung dar (a), allerdings erscheinen unter Berücksichtigung der physikalischen und chemischen Effekte (Ablagerungen) und bei Ausschluss der Ingestion in der näheren Umgebung (500 m) grosse Standortleistungen zulässig (b).

$$\dot{D}(t) = TP(t) \cdot TS(t) \cdot (TK \cdot \bar{X}_K + TO \cdot \bar{X}_O) \cdot g_A \cdot J^1 \quad (\text{rem/s MWth})$$

30. jähriger stationärer Betrieb 50% ige Windrichtungshäufigkeit $d_p = 0$ $1.9 \cdot 10^4$ Umläufe des Kühlgases/d $\lambda = 10^{-6}$ (Jod) $2 \cdot 10^{-9}$ (Krypton) R/B = $5.7 \cdot 10^{-5}$ $3 \cdot 10^{-4}$ keine Aktivgasreinigung	TP	TS · TK · \bar{X}_K^{max}	TS · TO · \bar{X}_O^{max} m ³	\dot{D}	L_{zul}
	$\int_0^t R dt \cdot \lambda$ $\int_0^t B dt \cdot (\lambda + \alpha_P + \beta_P)$	β_P	$\left[\begin{array}{l} b_S \cdot (1 - \eta_F) \cdot \bar{X}_K^{\text{max}} \\ \beta_S \cdot (1 - \eta_S) \cdot \bar{X}_O^{\text{max}} \end{array} \right]$	rem/a MWth	MWth
===== JOD-131					
a) vernachlässigbare Ablagerungen im Primärkreis und Schutzbehälter, ungefilterte Abgabe über Behälteroberfläche, Ingestion	$\alpha_P = 0$ $\beta_P = 10^{-7}$	$b_S = 0$	$\alpha_S = \eta_S = s_S = 0$ $H_0 = 30 \text{ m}$ $\bar{X}_O = 1.5 \cdot 10^{-4}$	Ingestion $g_A = 2.6 \cdot 10^5$	Genehmigungswert 90 mrem/a
	$5.7 \cdot 10^{-5}$		$1.5 \cdot 10^{-11}$	18	$5 \cdot 10^{-3}$
b) Ablagerungen im Primärkreis und Schutzbehälter, 'gefilterte' Abgabe über Behälteroberfläche, Inhalation	$\alpha_P = 5 \cdot 10^{-2}$ $\beta_P = 10^{-7}$	$b_S = 0$	$\alpha_S + s_S = 10^{-5}$ $\eta_S = 0.9$ $\beta_S = 10^{-5}$	Inhalation $g_A = 1.1 \cdot 10^7$	
	$1.1 \cdot 10^{-9}$		$7.5 \cdot 10^{-13}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$1.3 \cdot 10^5$
c) Ablagerungen im Primärkreis und Schutzbehälter, gefilterte Abgabe über das Belüftungssystem	$\alpha_P = 5 \cdot 10^{-2}$ $\beta_P = 10^{-7}$	$H_K = 100 \text{ m}$ $\bar{X}_K = 1.2 \cdot 10^{-5}$ $\eta_F = 0.99$ $\alpha_S + s_S = 10^{-5}$ $b_S = 10^{-5}$			
	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-15}$		$5 \cdot 10^{-9}$	$1.6 \cdot 10^7$
d) Ablagerungen im Primärkreis und Schutzbehälter, verzögerte Abgabe über das Belüftungssystem mit hochwirksamen Filtern	wie c)	$\eta_F = 0.999$ $\alpha_S + s_S = 10^{-4}$ $b_S = 10^{-6}$			
	$1.1 \cdot 10^{-9}$	$1.2 \cdot 10^{-17}$		10^{-11}	$0 \cdot 10^9$
===== KRYPTON-85					
a)+b)	$\alpha_P = 0$ $\beta_P = 10^{-7}$	$b_S = 0$	$\alpha_S = s_S = \eta_S = 0$ $H_0 = 30 \text{ m}$ $\bar{X}_O = 1.5 \cdot 10^{-4}$ $\beta_S = 10^{-5}$	β -Strahlung $g_A = 0.074$	30 mrem/a
	$3.4 \cdot 10^{-4}$		$1.5 \cdot 10^{-11}$	$2.2 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^3$
c)		$H_K = 100 \text{ m}$ $\bar{X}_K = 1.2 \cdot 10^{-5}$ $\alpha_S = s_S = \eta_S = 0$ $b_S = 10^{-5}$			
	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$		$1.8 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^4$
d)		wie c) $b_S = 10^{-6}$			
	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-12}$		$1.8 \cdot 10^{-6}$	$1.7 \cdot 10^4$
e) wie d) Erhöhung des Kamins		$H_K = 200 \text{ m}$ $\bar{X}_K = 6 \cdot 10^{-6}$			
	$3.4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-13}$		$0.0 \cdot 10^{-7}$	$3.4 \cdot 10^4$

TAB. 3.1 : Beeinflussung der Ableitungen von J-131 und Kr-85 aus Hochtemperatur-Reaktoren während des bestimmungsgemässen Betriebes

- 2) Die Abgabe über das filternde Belüftungssystem führt infolge der Spaltproduktückhaltung und der grösseren Emissionshöhe zu einer weiteren Reduzierung der radiologischen Belastung (c).
- 3) Bei gasdichten schwach belüfteten Schutzbehältern mit hochwirksamen Filtern und grösseren zu erwartenden Ablagerungen bleiben selbst bei grossen Leistungseinheiten die radioaktiven Freisetzungen um Grössenordnungen unter den Genehmigungswerten (d). Die Primärkreisleckage liegt bei 6 ‰/d .
- 4) Edelgase (Kr-85) können nur schlecht in wirtschaftlich vertretbarem Masse zurückgehalten werden, so dass sie sich für die radiologische Belastung der Umgebung als kritisch erweisen können. Massnahmen zum Abbau der Immissionswerte sind:
 - Verringerung der Freisetzungen aus den Brennelementen
 - Verringerung der Primärkreisleckage
 - Erhöhung des Kamins
 - Emissionen bei günstigsten Ausbreitungsbedingungen
 - Tiefteperaturfällen

Die Auslegungswerte können durch Multiplikation mit einem Sicherheitsfaktor bestimmt werden, der etwaige Bruchraten, Rechen- und allgemeine Datenunsicherheiten berücksichtigt. Besondere Aufmerksamkeit muß dem organischen Jod-Anteil ($\text{CH}_3 \text{ J}$) geschenkt werden. Wegen der schlechten Rückhaltenmöglichkeiten sind die Übertragungsfaktoren TS, TK, TO um jeweils eine Größenordnung höher anzusetzen, so daß ein Methyljodidanteil an der Gesamtjodmenge von einem Prozent zur gleichen Belastung wie das nichtorganische restliche Jod führt.

Die Ergebnisse, denen der kritische Belastungspfad zugrunde liegt, machen deutlich, daß der bestimmungsgemäße Betrieb eines Hochtemperaturreaktors selbst bei großen Leistungen keine Gefahr für die Umgebung darstellt. Ein geeignetes Schutzbehältersystem führt zur Reduzierung der Immissionsstärke um einige Zehnerpotenzen, so daß von einer "Quasi-Nullfreisetzungsrage" gesprochen werden kann. Möglichkeiten zur Rückhaltung der Spaltprodukte wurden in 2.3.1 und 2.4.1 aufgezeigt.

3.2 Freisetzungen nach dem "größten anzunehmenden Unfall" (GaU)

Nukleare Störfälle, die, verglichen mit anderen "Umweltereignissen", um Größenordnungen unwahrscheinlicher sind / 3/2 /, aber dennoch für möglich gehalten werden müssen, dürfen keine Gefährdung der Umgebung darstellen.

Für den Hochtemperatur-Prozeßwärme-Reaktor bei nichtintegrierter Bauweise, die aus Gründen der Zugänglichkeit, der freien Gestaltungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit als vorteilhaft erscheint, ist der "Kühlmittelverlust" als größter Unfall (GaU) anzunehmen / 3/3 /. Mögliche Unfälle bei HTR integrierter Bauweise haben geringere Auswirkungen, so daß die Beherrschung des Störfalles "Kühlmittelverlust" als Sicherheitsnachweis für HTR allgemein anzusehen ist.

Der Störfall läuft wie folgt ab:

- Austritt des Kühlmittels aus dem Primärkreis infolge eines Bruchs.
- Abschalten des Reaktors mit anschließender Nachwärmeabfuhr.
- Druck- und Temperatenausgleich zwischen Primärkreis und Schutzbehälter.
- Gefilterte Abgabe des Gasgemisches an die Umgebung.

Die daraus resultierende radiologische Belastung hängt ab von der Emissionsstärke, den Emissions- und Transmissionsbedingungen und somit wesentlich von dem Schutzbehältersystem. Die Dosis bei atmosphärischer Ausbreitung kann nach /3-1/ ermittelt werden. Zu den bereits aufgeführten Schwankungsbreiten

$$D'(t_x, \tau) = (TP(t_x) + TP^+(t_x)) \cdot TS(\tau) \left[\chi_K \int_0^{\tau_K} TK d\tau + \chi_O \int_0^{\tau_V} TO d\tau \right] g_A \cdot J'(rem/MWth) \quad /3-1/$$

- t_x = Zeitpunkt des Bruches (s)
- τ_V = Verweilzeit im Schutzbehälter (s)
- τ_K = Zeit, in der Aktivität an die Umgebung abgegeben wird. (s)

der Einflußgrößen kommen störfallbedingte Erscheinungen, die wie folgt aufgeschlüsselt werden können:

- (1) Wie aus Tab. 3.2 ersichtlich, müssen Desorptionserscheinungen bei störfallbedingter Änderung der Ablagerungsbedingungen beachtet werden. Es ist zu erwarten, daß die desorbierte Aktivität über der stationären Kühlgasaktivität liegt.

Voraussetzung	TP (t_x)	TP ⁺ (t_x)																																																										
Gleichgewichtszustand $d_p = 0$ $TU = 0$	$\int_0^{t_x} R dt = \frac{\lambda}{\alpha_p + \lambda + \beta_p} t_x$ $\int_0^{t_x} B dt$	$\int_0^{t_x} R dt = \frac{\lambda}{\lambda + \beta_p} t_x - TP) d_p^+ \quad /3-2/$ $\int_0^{t_x} B \cdot dt$																																																										
J-131	$\lambda = 10^{-6}$ $R/B = 5,7 \cdot 10^{-5}$																																																											
	$\alpha_p = 0 5 \cdot 10^{-2} 0,2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$ $\beta_p = 0 6 \cdot 10^{-8} > \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$d_p^+ = 0 0,1 1,0$																																																										
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TP (t_x)</th> <th>$\frac{R}{B}$</th> <th>α_p</th> <th>β_p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10^{-5}</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> </tr> <tr> <td>10^{-6}</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> </tr> <tr> <td>10^{-7}</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> </tr> <tr> <td>10^{-8}</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> </tr> <tr> <td>10^{-9}</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>$5 \cdot 10^{-2}$</td> <td>$\ll 5 \cdot 10^{-2}$</td> </tr> </tbody> </table>	TP (t_x)	$\frac{R}{B}$	α_p	β_p	10^{-5}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	10^{-6}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	10^{-7}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	10^{-8}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	10^{-9}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$			$5 \cdot 10^{-2}$	$\ll 5 \cdot 10^{-2}$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>TP⁺ (t_x)</th> <th>$\frac{R}{B}$</th> <th>TP</th> <th>β_p</th> <th>d_p</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10^{-5}</td> <td>$\ll R/B$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>1,0</td> </tr> <tr> <td>10^{-6}</td> <td>$\frac{5,7}{10^{-9}}$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>$\ll \lambda$</td> <td>0,1</td> </tr> <tr> <td>10^{-7}</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10^{-8}</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10^{-9}</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	TP ⁺ (t_x)	$\frac{R}{B}$	TP	β_p	d_p	10^{-5}	$\ll R/B$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	1,0	10^{-6}	$\frac{5,7}{10^{-9}}$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	0,1	10^{-7}					10^{-8}					10^{-9}				
TP (t_x)	$\frac{R}{B}$	α_p	β_p																																																									
10^{-5}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$																																																									
10^{-6}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$																																																									
10^{-7}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$																																																									
10^{-8}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$																																																									
10^{-9}	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$																																																									
		$5 \cdot 10^{-2}$	$\ll 5 \cdot 10^{-2}$																																																									
TP ⁺ (t_x)	$\frac{R}{B}$	TP	β_p	d_p																																																								
10^{-5}	$\ll R/B$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	1,0																																																								
10^{-6}	$\frac{5,7}{10^{-9}}$	$\ll \lambda$	$\ll \lambda$	0,1																																																								
10^{-7}																																																												
10^{-8}																																																												
10^{-9}																																																												
TAB. 3.2: TP, TP ⁺ (t_x) für Jod-131																																																												

+ Stationärer Betrieb bis zum Zeitpunkt t_x

- (2) Die in den Schutzbehälter gelangte Aktivität kann über einen längeren Zeitraum zurückgehalten werden, wenn dieser "gasdicht" ist. Dabei führen Ablagerungen innerhalb des Schutzbehälters und bei kurzlebigeren Spaltprodukten der radioaktive Zerfall zu einem Aktivitätsabbau, der von dem Zerfallsterm TS (τ) erfaßt wird /2-9a/. Dabei kommt der quantitativen Beschreibung von Ablagerungen große sicherheitstechnische Bedeutung zu (Tab. 3.3).

τ_V	1800	3600	5400	7200	9000	10800	86400	(s)
TS	0,98	0,96	0,95	0,93	0,91	0,9	0,4	$s_s + \alpha_s = 10^{-5}$ 10^{-4} 10^{-3}
TS	0,94	0,7	0,6	0,49	0,4	0,34	$1,8 \cdot 10^{-4}$	
TS	0,17	$3 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-38}$	

TAB. 3.3: Abbau der Aktivität durch Ablagerungen im Schutzbehälter

- (3) Bei möglichem längerfristigem Einschluß der Spaltprodukte können schlechteste Ausbreitungsbedingungen ausgeschlossen werden, so daß mittlere Ausbreitungsfaktoren ($\bar{\chi}$) anzunehmen sind, die gegenüber den schlechtesten die Immissionswerte um den Faktor 10 reduzieren.
- (4) Die Aktivitätsabgabe über das Belüftungssystem bedingt radiologische Belastungen, die mindestens um den Faktor $10^3 \dots 10^4$ kleiner sind als bei Abgabe des gleichen Aktivitätsbetrages über die Behälteroberfläche, da unterschiedliche Filterwirksamkeiten ($\eta_F \approx 1,1 \dots 11 \eta_S$) und Ausbreitungsfaktoren ($\bar{\chi}_H = 30 \text{ m} = 100 \cdot \bar{\chi}_{H = 100 \text{ m}}$) zu berücksichtigen sind.
- (5) Die Schornsteinüberhöhung kann den Ausbreitungsbedingungen entsprechend berücksichtigt werden / 2/25 /.

Bei dem radiologischen Sicherheitsnachweis ist zu beachten, daß die Gesamtdosis, die sich aus der Summation der Belastungsbeträge aller Spaltprodukte ergibt, unter den Unfallgrenzwert liegen muß. In den meisten Fällen reicht jedoch der Nachweis einer tolerierbaren Schilddrüsenbelastung nach Ingestion des J-131 mit besonderer Berücksichtigung des organischen Anteils aus, da die restlichen Spaltprodukte geringere Belastungen hervorrufen. In globale Betrachtungen, auf die nicht näher eingegangen werden soll, müssen die langlebigsten Spaltprodukte einbezogen werden.

Tab. 3.4 macht deutlich, daß der Störfall "Kühlmittelverlust" keine Gefährdung der Umwelt nach sich zieht. Selbst bei großen Leistungseinheiten können in Verbindung mit einem geeigneten Schutzbehältersystem unvergleichlich große Sicherheitsfaktoren eingehalten werden.

λ	s^{-1}	10^{-6}				
R/B		$5,7 \cdot 10^{-5}$				
α_p	s^{-1}	$5 \cdot 10^{-2}$				
β_p	s^{-1}	$6 \cdot 10^{-8}$				
d_p^+		0,1				
TP		10^{-9}				
TP ⁺		$5,7 \cdot 10^{-6}$				
						CH ₃ J-Anteil 5 %
		A	B	C	D	
$\alpha_s + s_s$	s^{-1}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-4}
b_s	s^{-1}	$\ll \beta_s$	$\gg \beta_s; \text{gross}$	$\gg \beta_s; \text{gross}$	$\gg \beta_s; \text{gross}$	$\gg \beta_s$
η_F		-	0,99	0,99	0,999	0,99
β_s	s^{-1}	gross	-	-	-	-
η_s		0,1	-	-	-	-
τ_V	s	10	$0,6 \cdot 10^3$	$9 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
TS $\int_{TK}^{TO} d\tau$		0,1	$0,9 \cdot 10^{-2}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-3}$
\bar{v}_{\max}				10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
$\lambda_{H=100 \text{ m}}$						
ψ_{\max}	s/m^3		10^{-5}			
$\lambda_{H=100 \text{ m}}$						
ψ_{\max}		10^{-4}				
$\lambda_{H=50 \text{ m}}$						
g_A	$\frac{\text{rem } m^3}{C \cdot s}$	$2,6 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^5$
J'	C/MWth	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$
D'	rem/MWth	0,4	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
L _{zul}	MWth	62,5	$7,1 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^5$	$9,3 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^6$

- A: nicht gasdichter Schutzbehälter, Aktivitätsabgabe über die Oberfläche.
 B: gasdichter Schutzbehälter, sofortige, gefilterte Abgabe über das Belüftungssystem.
 C: gasdichter Schutzbehälter, verzögerte, gefilterte Abgabe über das Belüftungssystem.
 D: gasdichter Schutzbehälter, verzögerte, gefilterte Abgabe über das Belüftungssystem. Erwartungswerte mit Berücksichtigung des Methyljodid-Anteils.

TAB. 3.4: Abhängigkeit der Dosis und installierbaren Leistung vom Schutzbehältertyp

3.3 Art des Schutzbehälters

Die vorherigen Abschnitte haben gezeigt, daß der HTR wegen der geringen Spaltproduktfreisetzung große Standortleistungen ohne aufwendige spaltproduktrückhaltende Maßnahmen ermöglicht. Die hohen sicherheitstechnischen Auflagen und das Ziel, die radioaktiven Emissionen "so klein wie möglich" zu halten, können allerdings am besten durch die gasdichte Einschließung des Nuklearteils berücksichtigt werden.

Der gasdichte, störfalldruckhaltende Schutzbehälter vereinigt in sich viele Vorteile. Er repräsentiert den Stand der Technik und ist wirtschaftlich vertretbar. Die definierten räumlichen Verhältnisse ermöglichen eine kontrollierbare Abgabe an die Umgebung unter günstigen Bedingungen, die annähernd vollständige Rückhaltung wichtiger Spaltprodukte durch hochwirksame Filter, den Aktivitätsabbau durch radioaktiven Zerfall innerhalb des Einschlusses, die Schaffung optimaler Ablagerungsbedingungen, die Einhaltung einer Druckdifferenz zur Umgebung und deren Schutz vor Direktstrahlung. Durch die Füllung des Behälters mit einem Schutzgas kann in Verbindung mit anderen sicherheitstechnischen Maßnahmen (5.3) der Störfall "Lufteinbruch" ausgeschlossen werden.

Die Dichtigkeit und mechanische Stabilität sind für die größten möglichen Belastungen nachzuweisen, die sich bei nicht integrierten Anlagen meist aus dem Störfall "Kühlmittelverlust" ergeben.

Das Maß der Gasdichtigkeit folgt aus einer Optimierung der Umweltbelastung und Sicherheit gegenüber den Kosten. Dieses Problem reduziert sich in vielen Fällen auf die Frage, ob man auf eine gasdichte metallische Innenauskleidung des Betonbehälters verzichten kann.

Die Höhe des Störfalldruckes wird von dem thermodynamischen Ausgangszustand des Kühlmittels und der Schutzbehälterfüllung vor dem Überströmvorgang und wesentlich von dem Verhältnis der Primärkreis- und Schutzbehältervolumina bestimmt / 3/4 /.

Mit der Reduzierung der Schutzbehältervolumina ist trotz des Druckanstiegs eine Kostenreduzierung verbunden, wie sich unter der Annahme isothermischen Überströmens und Gültigkeit der Kesselformel für den zylindrischen Teil zeigen läßt /3-3/.

$$K = \pi \cdot k \cdot H_S \left[\left(r_S + \frac{r_S}{\sigma_{zul}} \cdot P_{Po} \cdot \frac{1 + \frac{P_{So}}{P_{Po}} \cdot \frac{\pi \cdot (r_S^2 - r_P^2) \cdot H_S}{V_P} \cdot \frac{c_{V_{So}}}{c_{V_P}} \cdot \frac{1}{\alpha_P}}}{1 + \frac{\pi \cdot H_S \cdot (r_S^2 - r_P^2)}{V_P} \cdot \frac{c_{V_{Sx}}}{c_{V_P}} \cdot \frac{1}{\alpha_P}} \right)^2 - r_S^2 \right] \quad (\text{DM}) \quad /3-3/$$

- o vor Druckausgleich
- x nach Druckausgleich
- k f (Geometrie)
Kosten/Volumeneinheit (DM/m³)
- σ_{zul} zulässige Spannung (kp/cm²)
- c spez. Wärme (J/kg °K)
- α c_P/c_V
- P Druck (kp/cm²)
- r_P Außenradius der zusammengefaßten Einbauten (m)
- r_S Innenradius des Schutzbehälters (m)
- H_S Innenhöhe des Schutzbehälters (m)

3.4 Freisetzungen bei hypothetischen Unfällen

Das mit der Nutzung der Kernenergie verbundene Gefährdungspotential (6...7 C/Wth) führt immer wieder zur Diskussion des Restrisikos kerntechnischer Anlagen, das sich multiplikativ aus der Eintrittswahrscheinlichkeit und den Folgen eines Ereignisses ergibt.

Die Höhe des tolerierbaren Risikos muß in Beziehung stehen zu anderen Risiken des täglichen Lebens und ist letztlich eine gesellschaftspolitische Entscheidung.

Die Aufgabe der Sicherheitstechnik besteht darin, die "unbeschreiblich" geringe Eintrittswahrscheinlichkeit denkbarer Unfälle, deren Auswirkungen über denen des GaU liegen, nachzuweisen und weiter zu reduzieren. Andererseits erscheint es sinnvoll, hypothetische Unfälle anzunehmen und die Auswirkungen auf die Umgebung zu analysieren. Kann nachgewiesen werden, daß selbst hypothetische Unfälle nicht zu einer über die Unfallgrenzwerte hinausgehenden Belastung führen, wird die Frage nach dem Restrisiko gegenstandslos.

Obwohl nach heutigem Stand der Wissenschaft und Technik für den Schutzbehälter der Verlust der Funktionsfähigkeit nach menschlichem Ermessen auszuschlies-

sen und ein gleichzeitig auftretender Bruch des Primärkreises noch weniger wahrscheinlich ist, soll im folgenden von diesem hypothetischen Unfall ausgegangen werden. Die Auswirkungen bei über- und unterirdischer Anordnung werden gegenübergestellt.

3.4.1 Überirdische Anordnung

Um den Unfallablauf bzw. Druckausgleich zwischen der Behälterfüllung und der Umgebung erfassen zu können, sind Annahmen über die Art der Undichtigkeit des Schutzbehälters nötig. Denkbar wären ein Loch in der Behälterwand und durchgehende Risse in der Betonhülle.

Bei einem Loch in der Behälterwand kann der Ausgleichsvorgang wie der reibungsfreie, adiabate Ausfluß aus einem Gefäß behandelt werden.

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{R \cdot T_{S_0}}{M_{S_0}} \left[1 - \frac{P_A}{P_{S_0}} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \quad /3-4/$$

v Ausströmgeschwindigkeit (cm/s)
 P_A Umgebungsdruck (kp/cm²)
 M Molekulargewicht (g/mol)

Der Ausgleichsvorgang durch Risse im Beton kann durch eine reibungsbehaftete Spaltströmung erfaßt werden.

$$v = \frac{(P_{S_0} - P_A) \cdot h_R^2}{12 \bar{\eta} w_S} \quad (\text{cm/s}) \quad /3-5/$$

h_R Spalthöhe (cm)
 w_S Wandstärke des Schutzbehälters (cm)

Geht man von isothermer Expansion aus, ist die Dauer des Überströmvorganges pessimistisch abzuschätzen /3-6/.

$$\tau = \frac{V_S}{v(\tau) F} \ln \frac{P_{S_0}}{P_{S_x}} \quad /3-6/$$

F Bruch- bzw. Reißfläche (cm²)

Unter Berücksichtigung der für einen Prozeßwärmereaktor (PR 3000) typischen Annahmen zeigt Abb. 3.1 die Abhängigkeit der Überströmzeit von der Größe und Art des Strömungsquerschnittes.

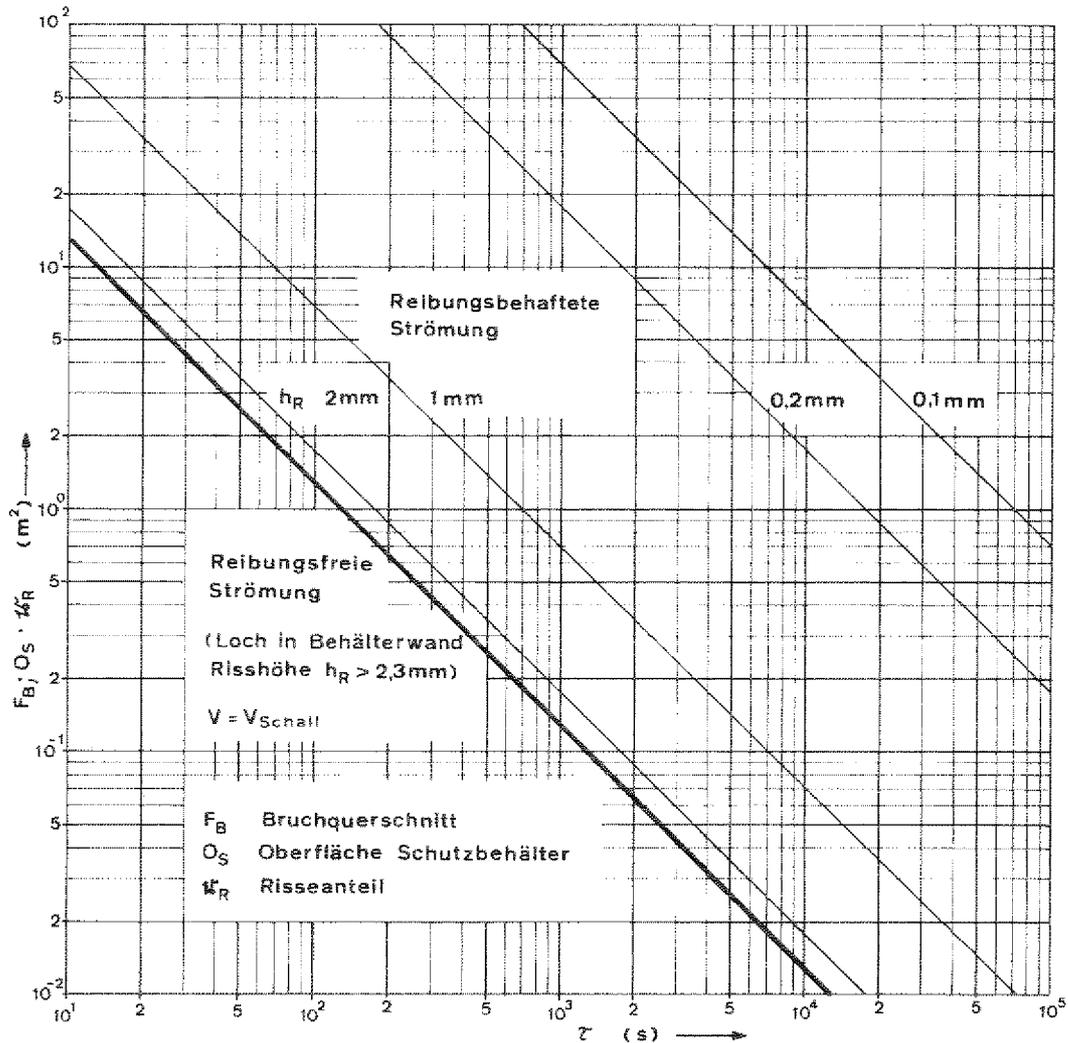


ABB. 3.1: Dauer des Überströmvorganges

Ausgehend von den Unfallgrenzwerten kann der Anteil des Aktivitätsinventars bestimmt werden, der ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen der Bevölkerung bei dem hypothetischen Unfall freigesetzt werden darf.

$$TP(\tau) = \frac{D_{Grenz}}{TS(\tau_V) \left(\tilde{\chi}_K \int_0^{\tau_K} TKd\tau + \tilde{\chi}_O \int_0^{\tau_V} TOd\tau \right) g_A \cdot J' \cdot L}$$

Die Auswertung ist wiederum für die Schilddrüsenbelastung durch Jod durchzuführen, allerdings kann die Inhalation als der kritische Belastungspfad angesehen werden. Ferner ist bei den Kurzzeitausbreitungsfaktoren $\tilde{\chi}$ die Schornsteinüberhöhung / 2/25 / zu berücksichtigen. Die in Tab. 3.5 aufgeführten Daten gelten als pessimistische Grenzwerte für den Fall großer Strömungsquerschnitte mit schnellem Druckausgleich; trotzdem führt das gleichzeitige Auftreten des Störfalles "Kühlmittelverlust" und "Bruch des Schutzbehälters" auch bei großen Leistungseinheiten (z.B. L = 3000 MWth, $TP_{zul} = 10^{-4}$) zu keiner unzulässig hohen Inhalationsbelastung der Umgebung. Bei kleineren Strömungsquerschnitten tritt die Abgabe über das Belüftungssystem als konkurrierender Vorgang auf, der in Verbindung mit größeren Ablagerungsraten zu einer erheblichen Reduzierung der Immissionswerte führt.

D_{Grenz}	rem	25	25
$TS(\tau_V) \int_0^{\tau_V} \tau d\tau$		0,1	10^{-2}
$\tilde{\chi}_O$	s/m^3	(H = 75 m) $2,5 \cdot 10^{-5}$	(H = 100 m) 10^{-5}
g_A	$\frac{rem \cdot m^3}{C \cdot s}$	$1,1 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^3$
J'	C/MWth	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$
$TP \cdot L$	MWth	0,35	8,7
		Loch	Risse
TAB. 3.5: Grenzwerte der Übertragungsfaktoren bei dem hypothetischen Unfall "Bruch des Schutzbehälters"			

3.4.2 Unterirdische Anordnung

Das umgebende Gestein (siehe 2.5.2.1) des unterirdisch angeordneten Nuklear- teils kann wegen der geringen Wasser- und Gasdurchlässigkeit, des hohen Rückhaltevermögens für Spaltprodukte und des entlastend wirkenden Boden- und Wasserdruckes als Sicherheitsausschluß angesehen werden. In einigen Ländern wird die Möglichkeit diskutiert, bei unterirdischer Anordnung dem umgebenden Gestein die Aufgaben des Primärcontainments zu übertragen / 3/5 /. Im Rahmen

dieser Arbeit soll es jedoch nur als zusätzliches Sicherheitselement betrachtet werden, das bei größerer Undichtigkeit des Schutzbehälters strömungsbegrenzend wirkt. Die Dauer des Ausgleichvorganges hängt in diesem Falle nicht mehr allein von der Art der Undichtigkeit des Behälters ab, sondern von der Durchlässigkeit des Felsgesteins oder Bodens und dem Verhältnis der Austrittsfläche zum Gesamtvolumen.

Die Durchlässigkeit des Gesteins wird bei einem Druckgradienten $\Delta p/\Delta x = 1 \text{ ata/m}$ für Wasser bei vorher trockenem Gestein experimentell ermittelt und kann dann auf die jeweiligen Bedingungen übertragen werden.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{\Delta p_1/\Delta x_1}{\Delta p_2/\Delta x_2} \cdot \frac{\eta_2}{\eta_1} \cdot \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \quad /3-6/$$

K Durchlässigkeit (cm/s) $\hat{=}$ Filtergeschwindigkeit
 γ spez. Gewicht (p/cm³)

Die Schutzbehälterleckage von innen nach außen kann ausgeschlossen werden, wenn bei ausreichender Tiefe der Boden- und Wasserdruck größer oder gleich dem maximalen Innendruck ist.

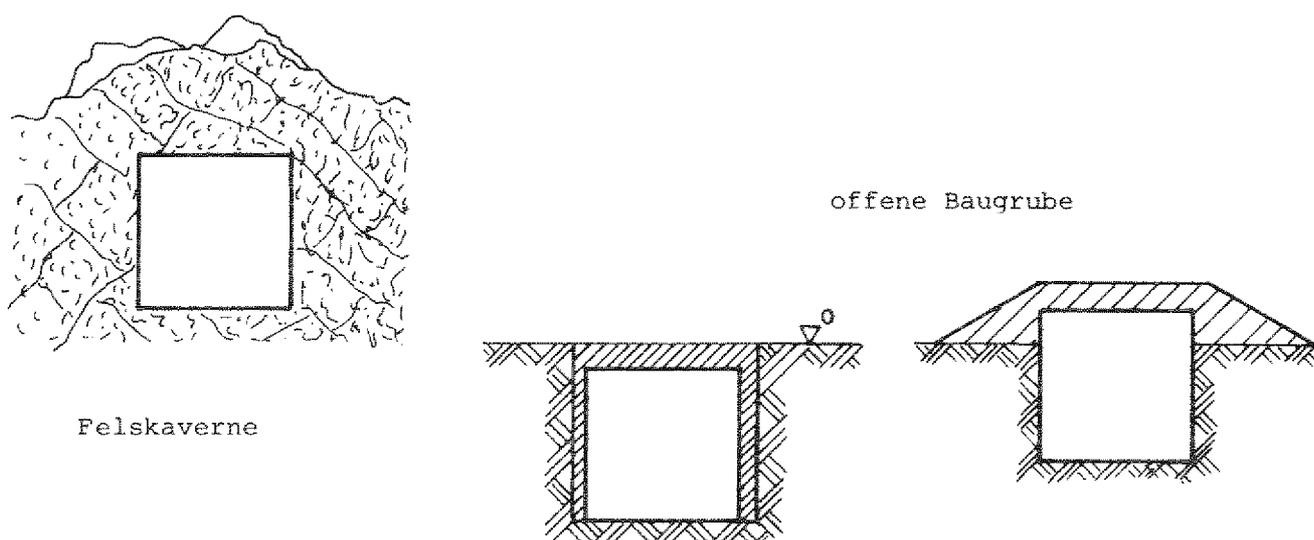


ABB. 3.2: Arten unterirdischer Anordnungen

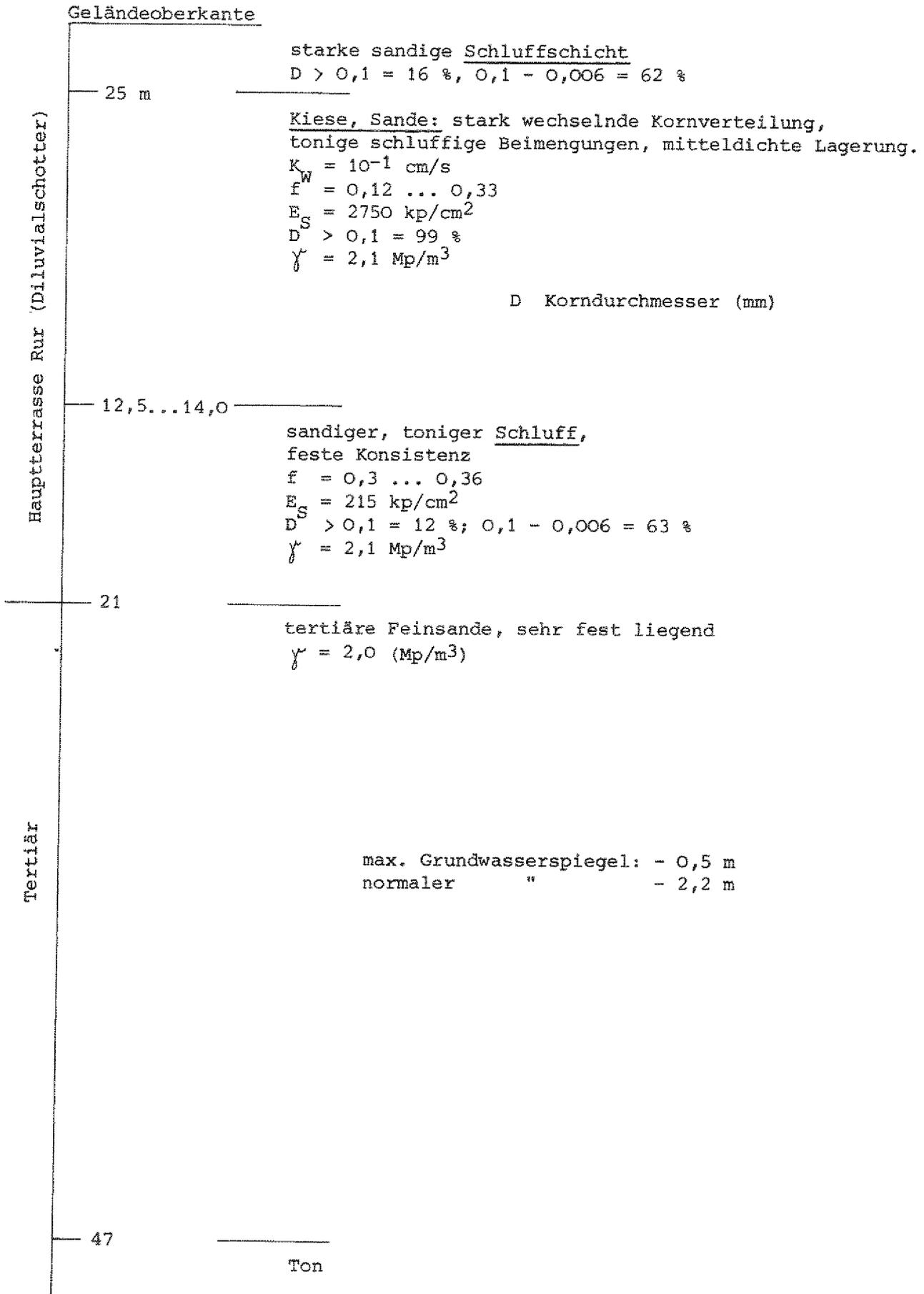


ABB. 3.3: Untergrund AVR Jülich / 3/6 /

Bei der unterirdischen Anordnung unterscheidet man zwischen der Errichtung des Nuklearteils in einer Felskaverne und in einer offenen Baugrube mit anschließender Verfüllung und Überschüttung. Wegen der geologischen Verhältnisse an den geplanten Standorten in Verdichtungsräumen der BRD, deren Genehmigung eng mit der Beherrschung hypothetischer Unfälle verbunden ist, sollen die weiteren Überlegungen von der unterirdischen Anordnung in einer offenen Baugrube ausgehen. Den Ausbreitungsrechnungen werden die spezifizierten Untergrundverhältnisse des AVR Jülich (Abb. 3.3) zugrunde gelegt.

Grob läßt sich der Untergrund in einen rolligen, nicht bindigen Kies-Sand-Bereich und bindigen Ton-Bereich unterscheiden. Die Auswirkungen auf die Ausbreitung radioaktiver Spaltprodukte werden aus der Abbildung 3.4 deutlich. Die Übertragungsfaktoren TU können nicht exakt bestimmt werden, da die Sorptionseigenschaften des Bodens und großräumige Grundwasserströmung nicht experimentell untersucht wurden, allerdings sind die Werte $R_F < 10^{-3}$ (Ton) bzw. $R_F < 0,1$ (Kies, Sand) für Sr und noch kleinere Werte für Cs als repräsentativ anzusehen. Für R_{FJod} ist für Kies, Sand ein Wert von annähernd 0,1 zu erwarten, bei Tonschichten mit großer Zeitverzögerung wird das Jodproblem infolge des radioaktiven Zerfalls eliminiert.

		Trinkwasserqualität / 2/47 /	Unfallgrenzwert (Vorschlag)
J-131	C/cm ³	1·10 ⁻⁹	10 ⁻⁷
Cs-137	"	2·10 ⁻⁸	2·10 ⁻⁶
Sr-90	"	1·10 ⁻¹⁰	1·10 ⁻⁸

TAB. 3.6: Grenzwerte für die Konzentration radioaktiver Stoffe im Grundwasser

Ausgehend von den aufgeführten Annahmen erweist sich Sr-90 als kritisches Nuklid und der Kies-Sand-Bereich als kritische Untergrundschicht. Fordert man, daß nach einer Entfernung von 1000 m die Aktivitätskonzentration unter den Unfallgrenzwerten liegt, so können ca. 10 C Sr-90 und 10⁴ C Cs-137 unverzögert, punktförmig in die Kies-Sand-Schicht trotz der relativ hohen Grundwassergeschwindigkeit $v_x = 10^{-2}$ cm/s eingebracht werden. Den gleichen Effekt

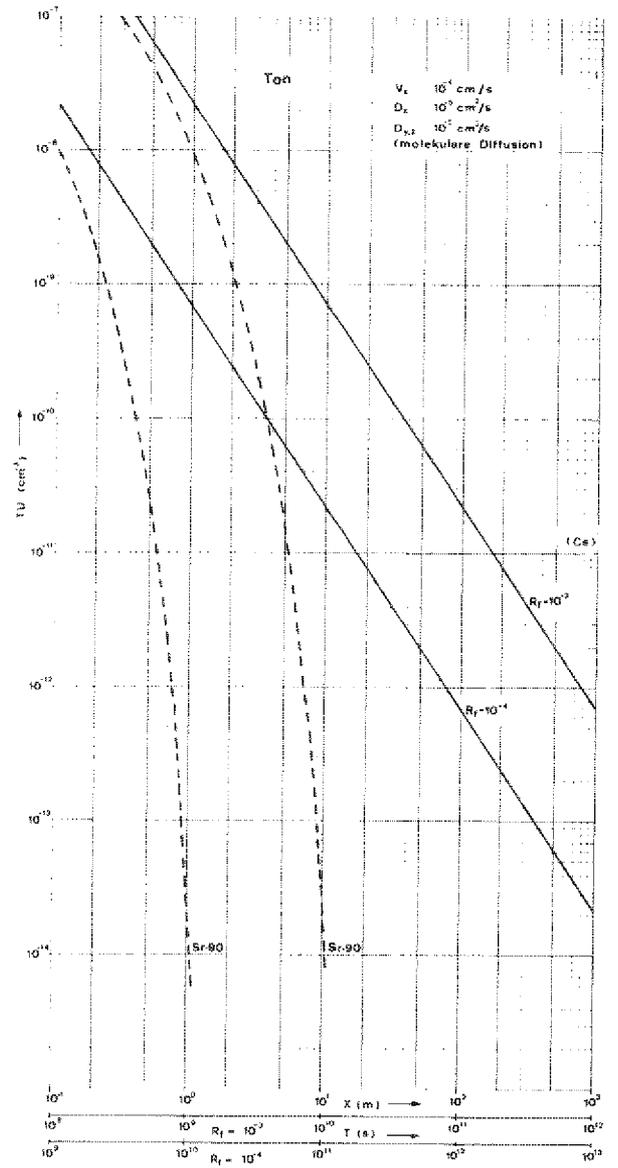
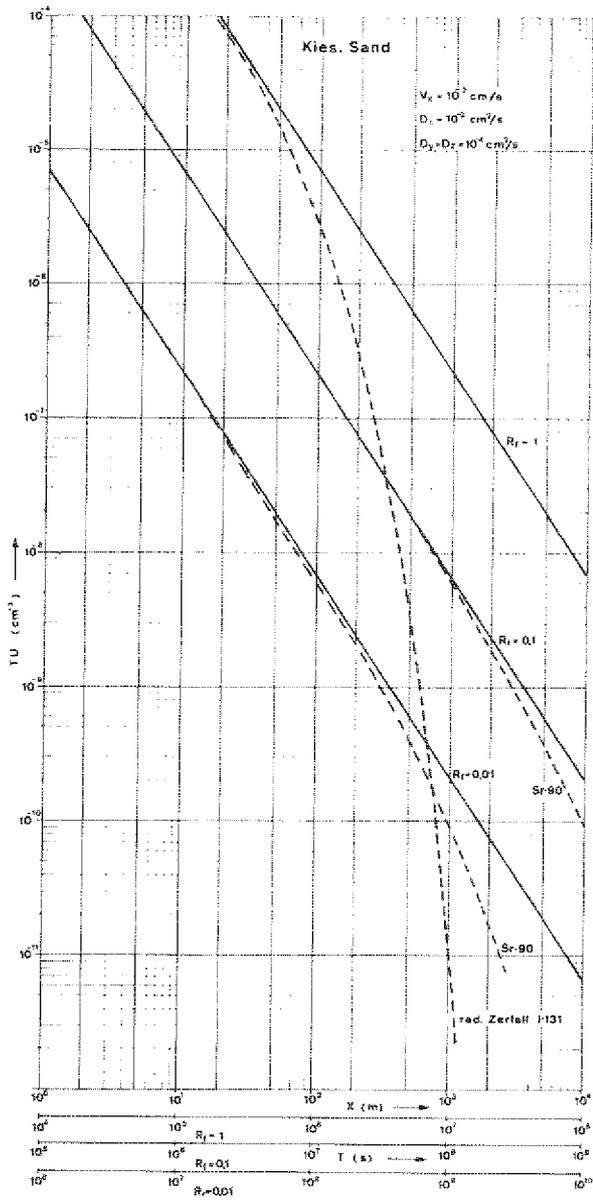


ABB. 3.4: Unterirdische Ausbreitungsfaktoren

bewirkt eine ca. 2 m dicke Tonschicht mit vorherrschender molekularer Diffusion. Von großer sicherheitstechnischer Bedeutung ist die räumliche Eingrenzung der "Wolke" über große Strecken mit stetigem Fließen in Ausbreitungsrichtung (Abb. 3.5). Berücksichtigt man die verzögerte Freisetzung mit Ablage-

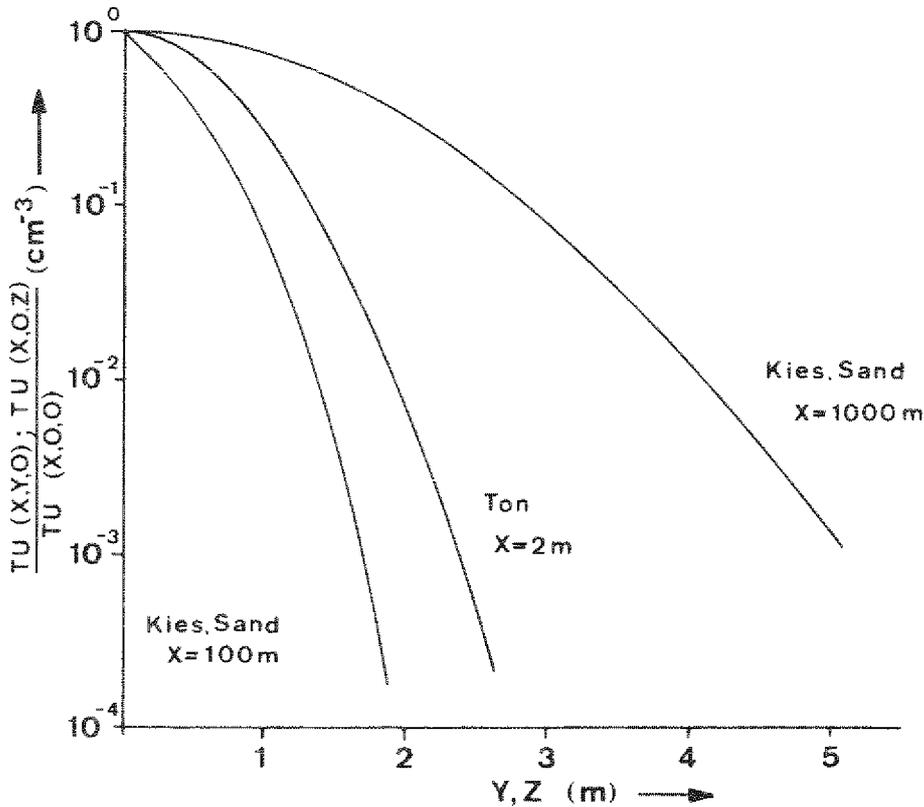


ABB. 3.5: Räumliche Eingrenzung der "Ausbreitungswolke"

ungen innerhalb des Primärkreises und Schutzbehälters und die Filterwirkung der Wand ferner Abweichungen von der Annahme unverzögerter, punktförmiger Injektion und zusätzliche gefilterte Abgabe eines Teils der Aktivität über das Belüftungssystem, so erscheint der hypothetische Unfall "Bruch des Schutzbehälters mit annähernd vollständiger Spaltproduktfreisetzung" als beherrschbar. Die stark verzögerte unterirdische Ausbreitung und räumliche Einengung ermöglicht Gegenmaßnahmen, die bei Katastrophen im nicht nuklearen Bereich angewandt werden (Ausbaggern, Abpumpen, Grundwassersperren).

Gut rückhaltende, undurchlässige Schichten (Ton) führen schon bei geringer Dicke zu einer weiteren räumlichen Einengung und zeitlichen Verzögerung des Ausbreitungsvorganges und erleichtern somit die sicherheitstechnische Beherrschung des hypothetischen Unfalls.

Der Druckausgleich zwischen der Schutzbehälterfüllung und der Umgebung stellt sich am schnellsten ein, wenn der Störfalldruck an der gesamten Bodenbehälter-Kontaktfläche ansteht und über sie abgebaut wird. In diesem Falle bestimmt die Gasdurchlässigkeit des Bodens die Dauer des Vorgangs. Sie liegt bei angenommener Freisetzung über die obere Kies-Sand-Schicht ($K_w \approx 10^{-3}$ m/s) bei etwa 1 h. Umgibt den gesamten Schutzbehälter eine undurchlässige bindige Bodenschicht ($K_w \approx 10^{-4} \dots 10^{-6}$ m/s) mit Druckabbau über die gesamte Oberfläche, dauert der Druckausgleich einige Stunden.

Zusammenfassend beweisen die pessimistischen Abschätzungen, dass bei unterirdischer Anordnung des Nuklearteils die Auswirkungen hypothetischer Unfälle grosser Anlagen infolge der rückhaltenden und verzögernden Wirkung des Erdreichs gegenüber Spaltprodukten auf ein tolerierbares Mass reduziert werden. In durchlässige Bodenschichten können Barrieren aus undurchlässigem Material (Ton) gebracht werden und somit ein Höchstmass an Standortunabhängigkeit erreicht werden. Weiterhin verzögern undurchlässige Bodenschichten Ausgleichsvorgänge zwischen Behälter und der Umgebung, so dass die Abgabe über den Kamin einen wichtigen Konkurrenzprozess darstellt. Die zeitlichen Verzögerungen schaffen die Voraussetzungen für effektive Gegenmassnahmen.

4 EXTREME ÄUSSERE EINFLÜSSE UND DEREN AUSWIRKUNGEN AUF DEN SCHUTZBEHÄLTER

Aus den bereits aufgeführten Gründen müssen Standorte in die engere Wahl gezogen werden, für die extreme äußere Belastungen des Kernkraftwerkes durch Erdbeben, Flugzeugabsturz, explodierende Gaswolke, Flächenbrand, extreme Witterungsbedingungen und Sabotage angenommen werden müssen. Der Schutzbehälter muß diesen Belastungen standhalten und sicherheitstechnisch relevante Anlagenteile schützen. Kernkraftwerke an diesen Standorten dürfen keine größere Gefährdung der Umwelt darstellen als vergleichbare, für deren Standort extreme äußere Belastungen auszuschließen sind / 4/1,2 /. Die Art der Belastungen und die daraus resultierenden Anforderungen an den Schutzbehälter sollen in diesem Kapitel dargestellt werden.

4.1 Erdbeben

Vorgänge, die den Erdbebenverlauf und die Auswirkungen bestimmen, sind in Abb. 4.1 schematisch aufgeführt.

4.1.1 Entstehung, Ausbreitung

Plötzliche Spannungsentladungen im Erdinnern erzeugen Druck- und Scherwellen, die sich in alle Richtungen ausbreiten. Sie werden an Oberflächen und Grenzschichten reflektiert oder in andere Wellenformen (Rayleigh-, Love Welle) umgesetzt (Abb. 4.2) und führen zu heftigen Erschütterungen der Erdoberfläche. Die vertikalen Bodenbeschleunigungen liegen bei etwa ein Drittel bis zwei Drittel der horizontalen Beschleunigungen, haben allerdings meist eine höhere Frequenz als die horizontalen.

Die vielfältigen Erscheinungsformen der Beben resultieren aus der

- Natur und Stärke der gespannten Energie,
- der Art der Auslösung,
- aus Vorgängen längs des Ausbreitungsweges und
- der Weglänge

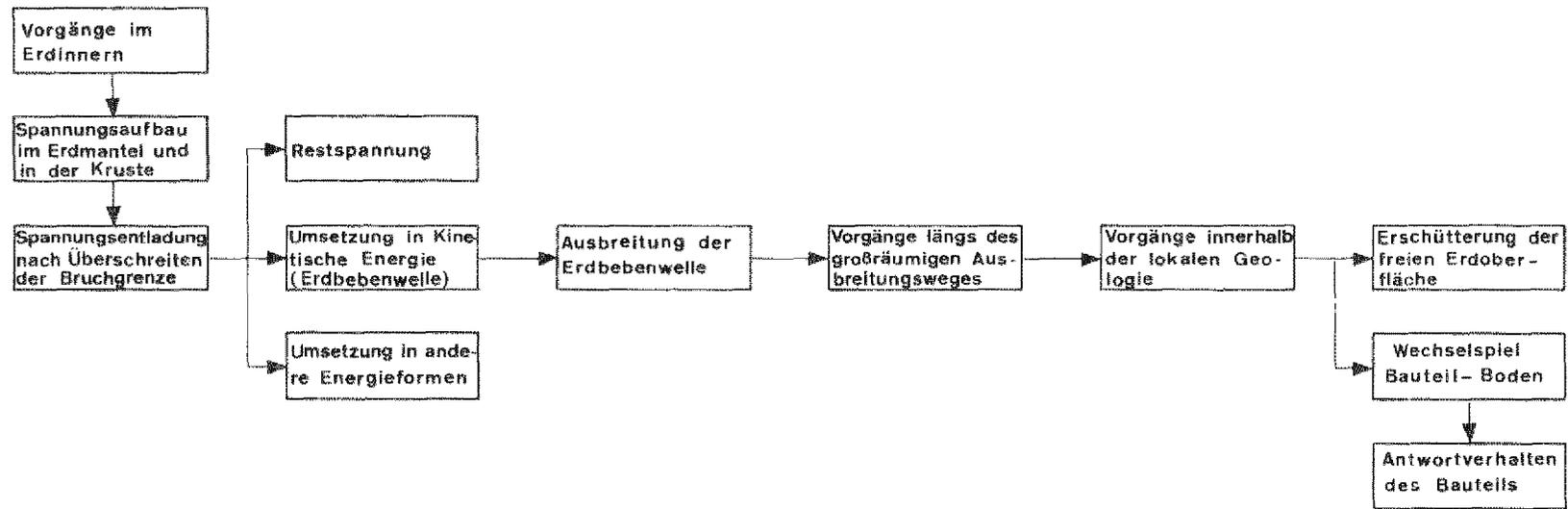


ABB. 4.1: Flußschema des tektonischen Bebens

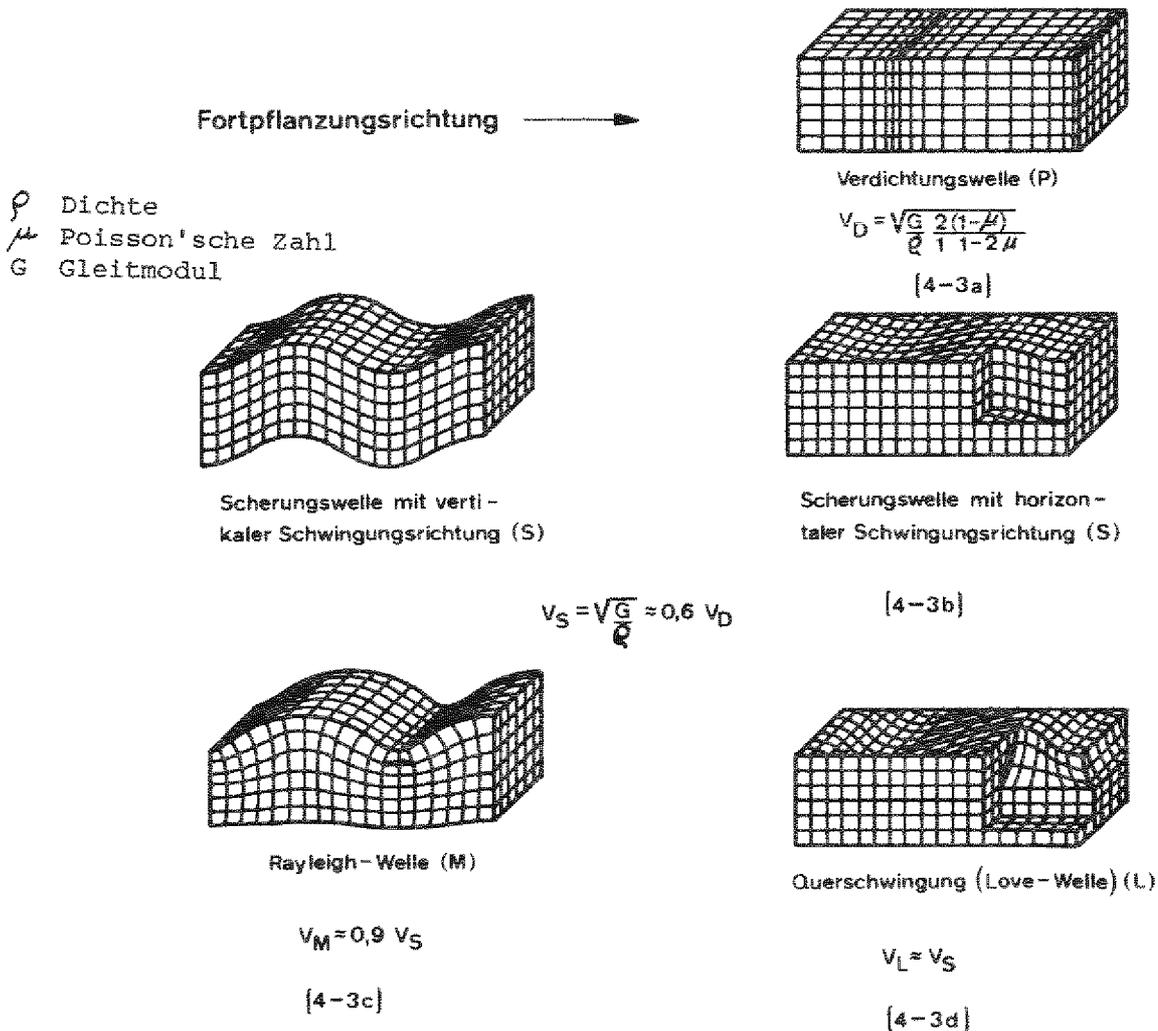


ABB. 4.2: Augenblicksbilder / 4/3 / und Geschwindigkeiten verschiedener Erdbenenwellenarten.

Bei den Bebenarten muß zwischen Einsturzbeben, vulkanischen und tektonischen Beben unterschieden werden. Vulkanische Beben entstehen durch Explosionen im Magmaherd und Vulkanschlot. Einsturzbeben folgen dem Zusammenbruch unterirdischer Hohlräume. Zusammen machen sie nur etwa 10 % aller Beben aus und sind außerdem wegen der geringen freigesetzten Energien von untergeordneter Bedeutung. Tektonische Beben sind Vorgänge im Erdinnern, die großräumige Spannungen in der Erdkruste und im Erdmantel aufbauen. Wird der auf alle Arten belastete, zergliederte geologische Körper über seine Bruchgrenze hinaus beansprucht, nimmt er schlagartig (25 bis 30 sec) einen neuen Gleichge-

wichtszustand ein. Dabei wird die abgebaute Spannungsenergie ΔE über die gesamte Bruchfläche zum größten Teil in kinetische Energie E_{kin} umgesetzt, die im Bereich von 10^4 bis 10^{20} (J) liegen kann / 4/5 /.

$$E_{kin} = q \cdot \Delta E \quad q = \text{seismischer Wirkungsgrad} \quad /4-1/$$

Die Bruchlänge ist ein Maß für die Stärke bzw. Energie des Bebens (Tab. 4.3). Das wird bei der Annahme mittlerer mechanischer Eigenschaften des Gesteins und etwa gleicher vertikaler Erstreckung sofort verständlich. TOCHER hat eine empirische Beziehung zwischen der Energie ΔE , der Bruchlänge l (km) und der maximalen Verschiebung s (cm) hergestellt.

$$\Delta E = 3.4 \cdot 10^{12} \cdot l \cdot s \text{ (J)} \quad /4-2/$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten können nach /4-3/ berechnet werden. Tab. 4.1 zeigt die Abhängigkeit von der Bodenart, so daß sich im Bereich der lokalen Geologie große Schwankungen ergeben können.

Bodenart	v_D (m/sec)	G (kp/cm ²)	ρ (g/cm ³)	μ
nasser Sand	400	435	1,5	0,45
gesättigter Sand	1300	4597	.	.
Lehm	1050	2992	.	.
obere Kiessandschichten	1620	7138	.	.
untere "	1820	9018	.	.
Sandstein	2030	11206	1,9	0,3

TAB. 4.1: Ausbreitungsgeschwindigkeiten in unbelasteten verschiedenen Bodenarten.

Besonderheiten der großräumigen und lokalen Geologie (Tab. 4.2) üben einen erheblichen Einfluß auf den Verlauf des Bebens aus. Oft sind an ähnlichen Geländen bei gleicher Entfernung vom Bebenzentrum sehr unterschiedliche Schäden zu beobachten. Eingehende geologische Untersuchungen, die zu einer lokalen Erdbebencharakteristik führen, müssen deshalb als wesentlicher Bestandteil einer seismischen Auslegung angesehen werden.

Starke Inhomogenitäten und Schichtungen längs des großräumigen Ausbreitungsweges
Verfestigungen (Setzen) lockerer Böden
Schaffung fließfähigen Materials
Abrutschen großer Erdmassen
Filterung der Erdbebenwelle (Verstärkung - 'soil-amplification') im Bereich der lokalen Geologie

TAB. 4.2: Besonderheiten längs des Ausbreitungsweges

4.1.2 Bodenbewegungen bei freier Oberfläche

Die Bodenbewegung bei freier Oberfläche nimmt mit zunehmendem Abstand vom Bebenzentrum ab (Abb. 4.3).

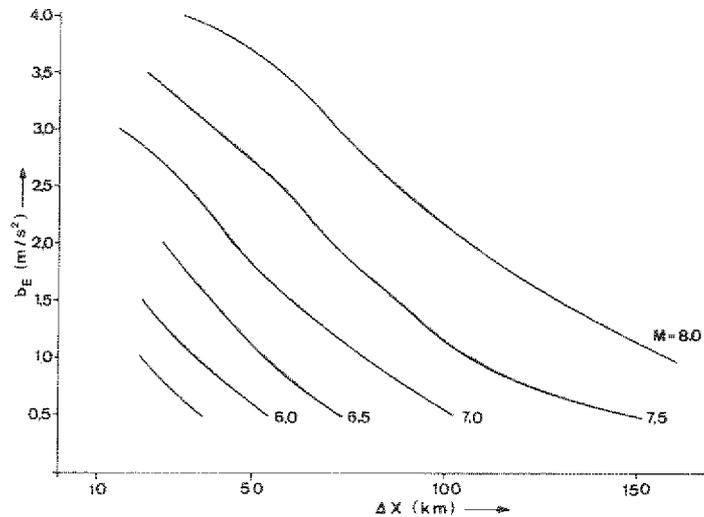


ABB. 4.3: Abnahme der Bodenbeschleunigung mit zunehmendem Abstand von der Verwerfung (nach / 4/9 /).

Sie werden von Seismographen aufgezeichnet. Die Seismogramme (Abb. 4.4) können allerdings nur unter erheblichem Aufwand direkt als Erregerfunktion bei dynamischen Berechnungen benutzt werden. Für ingenieurmäßige Auslegungen müssen sie nach geeigneten Methoden zugänglich gemacht werden / 4/4,8,9/.

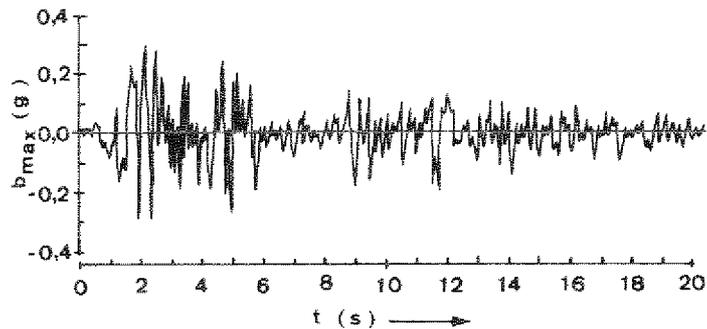


ABB. 4.4:
Seismogramm des
El-Centro-Bebens
(N-S Komponente,
Abstand vom Zentrum
6,5 km)

Mittels der Fourier-Transformation wird die Zeitfunktion in einfache harmonische Schwingungen mit zugehöriger Amplitude und Phase über den gesamten Frequenzbereich aufgelöst.

Bei der Response-Spektrum-Technik werden Ein-Massen-Schwinger unterschiedlicher Eigenfrequenz und Dämpfung dem Seismogramm entsprechend erregt und die Amplituden der Verschiebung, Geschwindigkeit oder Beschleunigung über der Frequenz mit dem Dämpfungsgrad als freiem Parameter aufgetragen. Das Auslegungs-Antwort-Spektrum ("Design-Spektrum") stellt eine der geographischen Region angepaßte Mittelung und Glättung verschiedener Antwort-Spektren dar. Für den westeuropäischen Raum wird das Berckhemer-Spektrum (Abb. 4.5 als Referenzbeben-Spektrum anerkannt.

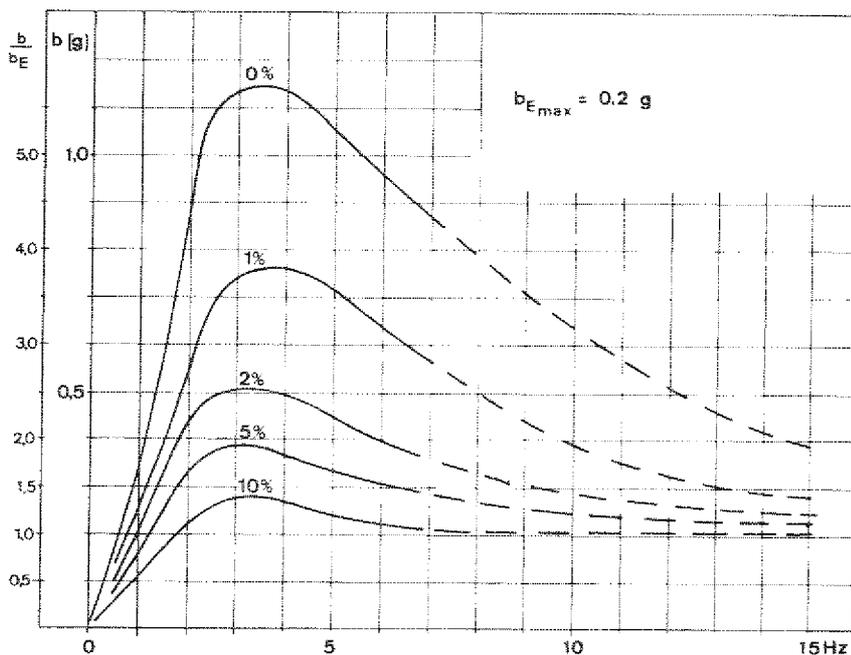


ABB. 4.5:
Standard-Antwort-Spek-
trum der Absolutbe-
schleunigung
(Berckhemer)

4.1.3 Klassifizierung

Der breite Bereich freigesetzter Energiebeträge und hervorgerufener Schäden führte zu einer Klassifizierung der Beben. Die sinnvollste Unterteilung müßte von der kinetischen Energie ausgehen, die im Erdbebenfall freigesetzt wird, der dann den Ausbreitungsverhältnissen entsprechend eine Erregerfunktion des Bauteils zugeordnet wird. Das ist in einer geschlossenen Form noch nicht möglich, so daß die von den Auswirkungen ausgehenden Unterteilungen benutzt werden müssen. Die physikalischen Größen konnten vor allem nach Auswertung natürlicher Bodenbewegungen und starker unterirdischer (Atombomben) Explosionen einander zugeordnet werden (Tab. 4.3). Diese Arbeiten lassen weitere Fortschritte erwarten.

Die um 1900 eingeführte Mercalli-Skala orientiert sich an Schadensphänomenen. Sie unterteilt die beobachteten erdbebenbedingten Schäden in 12 Intensitätsgrade. RICHTER entwickelte (1940/50) eine vorteilhaftere quantitative Klassifizierung. Er legte der Magnitudenunterteilung M den Maximalausschlag eines Wood-Anderson-Seismographen zugrunde, der 100 km vom Epizentrum entfernt auf tiefem, festem alluvialen Untergrund installiert sein muß. Da die Ausbreitungsverhältnisse die Messung beeinflussen, ist auch die Magnitude kein direktes Maß der Erdbebenstärke; für das gleiche Beben können unterschiedliche Magnituden festgestellt werden.

Die Magnitude läßt sich aus makroseismischen Daten nach der für europäische Verhältnisse gültigen Gleichung abschätzen.

$$M = 0,5 \cdot I_0 + \log h + 0,35$$

I_0 Maximalintensität /4-4/
 h Herdtiefe (km)

RICHTER hat zwischen der Magnitude und mittleren Energie der Welle (J) folgende empirische Beziehung hergestellt / 4/ 5 /:

$$\log E_{\text{kin}} = 6,4 + 1,5 M$$

/4-5/

4.1.4 Seismizität

Häufig auftretende Großbeben sind nur dann möglich, wenn Vorgänge im Erdinneren zu einem kontinuierlichen Spannungsaufbau führen und die Bruchfestig-

Modif. Mercalli Skala	Kurzbeschreibung der Auswirkungen	Magnitude M	Länge der Verwerung (km)	Registrierte Großbeben	b (m/s ²)	Dauer t (s)	Energie (J)	Häufigkeit/100 a	D Welt
III	innerhalb des Hauses wahrnehmbar, leichte Schwingungen								
IV	stärkere Schwingungen	4	1,3				10 ¹²		
V	außerhalb des Hauses wahrnehmbar, aufweckend		2,0				10 ¹³		
VI	von allen wahrnehmbar, erschreckend	5	3,4		0,9	2	10 ¹⁴		250
VII	Stehen bereitet Schwierigkeiten, Schäden an Gebäuden	5,6	5,4	32 Parkfield, Cal.	1,5	6	10 ¹⁵	8	140
		6	8		2,2	12		4	78
VIII	Zerstörungen an Gebäuden		14,4	24 Baja, California	2,9	18	10 ¹⁶	2/ 0,75	40
IX	Allgemeine Panik, allg. Gebäudeschaden	6,8 7,1	40	(56) 64 El Centro (40) Lima (66)	3,7	24	10 ¹⁷		19
X	Allgemeine Gebäudezerstörung		112		4,5	30			7,6
XI	Verbiegen von Schienensträngen, Zerstörung von Pipelines	8	304	400 San Francisco (02)	5		10 ¹⁸		2,1
		8,2 8,4		720 Alaska (64)					
XII	Vollständige Zerstörung	8,6	850	1000 Chile (60)	5	37			0,6
		9	1600				10 ¹⁹		

TAB. 4.3: Gegenüberstellung der Erdbebendaten und Klassifizierungen / 4/4,6,8,9 /

keit der Formation so groß ist, daß erhebliche Spannungen aufgebaut werden können. So fallen die großen Erdbebengebiete der Welt mit Festgesteinbruchzonen junger Tektonik (junge Kettengebirge) zusammen.

Vorhersagen über Stärke und Häufigkeit der Beben (Seismizität) basieren auf der Annahme, daß die Erdbebengeschichte mit ausreichend langen Aufzeichnungen und angemessen häufigen Erschütterungen als Maß für die zukünftige Erdbeben-tätigkeit anzusehen ist. Dabei sind Geologie, Tektonik und spezielle Standortfaktoren besonders zu berücksichtigen.

RICHTER u.a. hingegen schließen das Auftreten noch stärkerer Beben in der Zukunft nicht aus / 4/4 /.

Aus empirischen Werten wurde folgender Zusammenhang zwischen der Häufigkeit N und den Magnituden Klassen \bar{M} hergestellt / 4/7 /:

$$\log N = a + e (8 - \bar{M}) \quad /4-6/$$

- a Faktor Erdbebengeschichte
- e Faktor geologische Formation
- 0,4 ... 1,8 weltweit
- 0,4 ... 0,7 kontinental

In Deutschland sind der Köln-Aachener Raum, der Oberrheinische Graben und die Schwäbische Alb erdbebengefährdet / 4/5 /. Die bekannte Geologie und der über 1000 Jahre geführte Nachweis der Beben lassen die Annahme zu, daß in diesen Gebieten mit mittelfestem Untergrund die Intensität VIII ($b_{\max} \leq 0,2 g$) nicht überschritten wird und Beben dieser Stärke innerhalb von 50 ... 150 Jahren einmal vorkommen werden. Zum Vergleich ist die Seismizität im Westen der USA und Japan um den Faktor 100 größer als in den genannten westdeutschen Gebieten / 4/6 /.

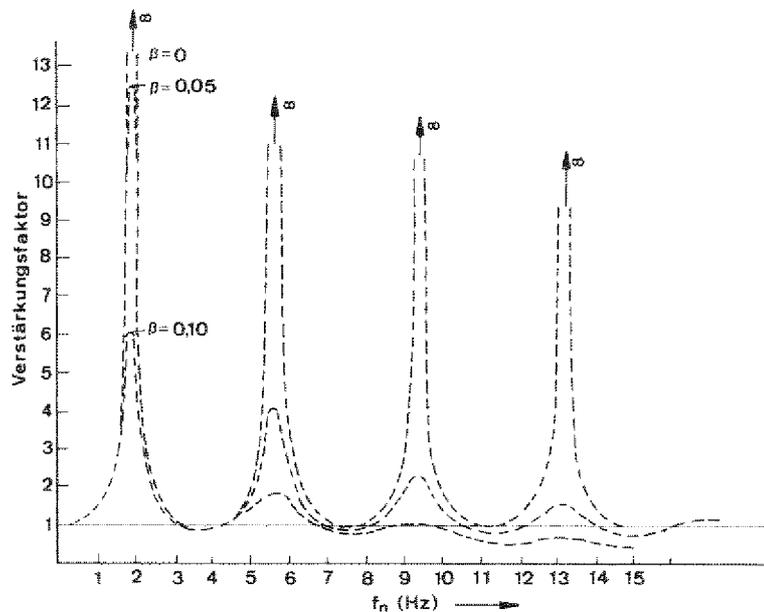
4.1.5 Verhalten des Kernreaktors bei starken Bodenbewegungen

Probleme bei der aseismischen Auslegung von Kernkraftwerken bestehen in der Ermittlung der größtmöglichen erdbebeninduzierten Bodenbewegung, der Energieübertragung auf das Fundament und des Antwortverhaltens des Bauteils samt der Einbauten / 4/4,8,9,10,11 /.

4.1.5.1 Soil Amplification

In den meisten Ländern - z.B. in der BRD - kann ein Standort in erdbebengefährdeten Gebieten so gewählt werden, daß längs des Ausbreitungsweges nur die filternde Wirkung der Bodenschichten auf die Erdbebenwelle ("soil amplification") berücksichtigt werden muß. Der Untergrund läßt sich physikalisch als schwingungsfähiges Gebilde darstellen, das von der Erdbebenwelle fußpunkt-erregt wird. Das Verhältnis der Ausgangswelle an der freien Oberfläche der homogenen Schicht zur Eingangswelle bezeichnet man als Übertragungsfunktion und deren Absolutwert (Amplitudenverhältnis) als Verstärkungsfunktion. Zur Ermittlung dieser Faktoren wurden Rechenmodelle entwickelt, deren Güte und Aufwendigkeit an die Homogenität des Untergrundes und Erfassung der Erdbebenwelle gekoppelt ist. Der Verstärkungsgrad ist eine Funktion des Verhältnisses der Erregerfrequenz f_E zur Eigenfrequenz f_n und des kritischen Dämpfungsgrades / 4/14 /.

ABB. 4.6:
Verstärkungsfaktoren einer homogenen Schicht auf Festgestein / 4/8 /.



Maximale Verstärkung tritt dann auf, wenn die Eigenfrequenz der Untergrundschicht f_n /4-7/ mit der Erregerfrequenz übereinstimmt. Die Erdbebenwelle setzt sich hauptsächlich aus Schwingungen im Bereich

$$f_n = \frac{2n-1}{4} \cdot \frac{v_s}{H_u}$$

H: Schichthöhe

/4-7/

n: Schwingungsordnung

von 1 ... 7 Hz zusammen, so daß sich für verschiedene Bodenarten Schichtdicken ($n = 1$) bestimmen lassen, bei denen eine mögliche Verstärkung der Erdbebenwelle zu beachten ist (Abb. 4.7). Mit erheblichen Verstärkungsfaktoren ist zu rechnen, wenn Schichten nicht verfestigten Materials auf Festgestein liegen (Richtwert 5).

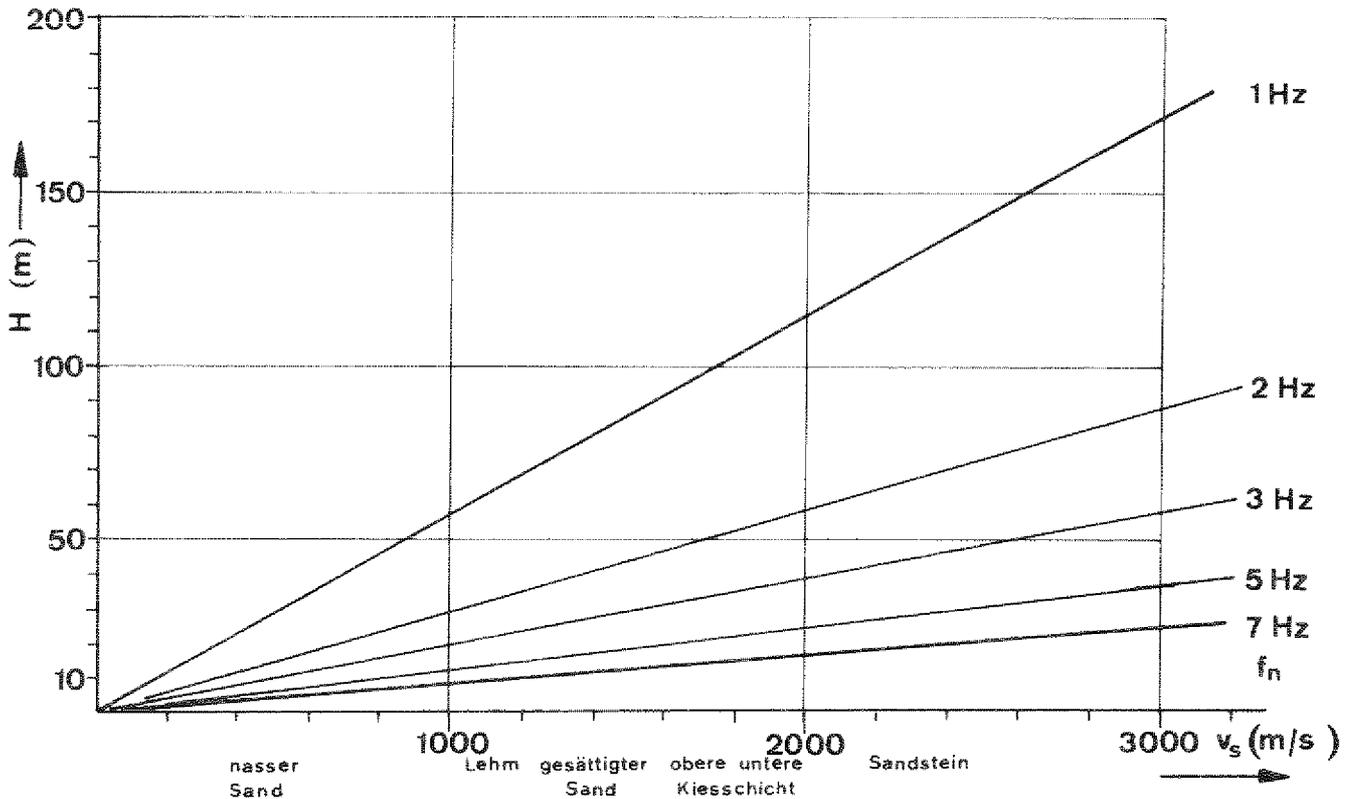


ABB. 4.7: Mächtigkeiten homogener Schichtungen mit möglicher Verstärkung der Erdbebenwelle.

Die in die Bestimmung der Übertragungsfaktoren eingehenden Parameter müssen aus Bodenuntersuchungen am konkreten Standort gewonnen werden. Einen guten Überblick über die anzuwendenden Rechen-Methoden bietet ROESSET / 4/8 /. In die Überprüfung der Ergebnisse konnten aufgetretene Großbeben bisher noch nicht einbezogen werden.

4.1.5.2 Soil-Structure Interaction

Bei massigen, steifen Bauteilen, zu denen der Schutzbehälter mit seinen Einbauten gehört, stimmt die Bewegung der Fundamentunterkante nicht mit der Bewegung der freien Oberfläche des Untergrundes überein. Ein Teil des Untergrundes steht in Wechselwirkung mit dem Bauteil (Soil-Structure Interaction). Zur Erfassung dieses Effekts lieferten während eines Bebens das "Hollywood Storage Building" und der daneben liegende Parkplatz die besten "experimentellen" Daten / 4/13-K2/1 /. Soil-Structure Interaction führt meist zu einer Verringerung der translatorischen Bewegung / 4/10,12 /.

Eine Schaukelbewegung des Bauteils tritt auf, wenn dessen Massenschwerpunkt nicht mit dem Schwerpunkt der horizontalen Gleitfläche übereinstimmt und der Untergrund deformierbar ist. Davon soll im Folgenden ausgegangen werden. Bei stark asymmetrischer Massenverteilung entstehen Torsionsschwingungen, außerdem muß der Einfluß der Nachbargebäude / 4/13-K2/9 / und Wechselwirkungen bei vertikalen Bewegungen / 4/14 / beachtet werden. Die Bedeutung dieser physikalischen Erscheinungen nimmt mit zunehmender Festigkeit des Untergrundes ab.

Die dynamische Analyse wird teilweise mit sehr großem Rechenaufwand nach der Methode der Finiten Elemente / 4/13-K2/4 / oder nach dem Feder-Masse-Modell durchgeführt. Dabei wird der in Wechselwirkung stehende Untergrund in das Schwingungssystem des Bauteils einbezogen (Abb. 4.8). Bei horizontaler und vertikaler Verschiebung und möglicher Drehbewegungen des Bauteils während des Erdbebens kommt es zu einer Druck-, Schub- und Torsionsbeanspruchung des Bodens / 4/18 /. Wegen der Steifigkeit und geringen Dämpfung des Bauteils beeinflussen die Federungs- und Dämpfungseigenschaften des Bodens entsprechend ihrer Elastizität entscheidend das dynamische Verhalten des Gesamtsystems. Die in Tab. 4.4 aufgeführten Bestimmungsgleichungen zeigen die Abhängigkeit der Federkonstanten und der Dämpfungsgrade von der Frequenz, der Kontaktfläche und den mechanischen Eigenschaften des Bodens. Mit steigender Frequenz ist eine Zunahme der Dämpfung und Abnahme der Federsteifigkeit verbunden.

Die in Wechselwirkung stehende Bodenmasse wird gewöhnlich als elastischer Halbraum angesetzt und der Bauteilmasse zugeschlagen. Wegen der günstigen Massenverteilung und hohen Steifigkeit kann der HTR-Schutzbehälter als Ein-Massen-Schwinger mit der Gesamtmasse des Nuklearteils und zwei Freiheitsgraden (gleichzeitige gleichgerichtete Translation und Rotation) behandelt werden, um die Auswirkungen der Wechselwirkung Boden/Bauteil zu erfassen / 4/15,16,19, 21 /. Ausgehend vom Momentengleichgewicht im Schwerpunkt /4-17/ und vom Kräftegleichgewicht in x-Richtung /4-18/ läßt sich die Erregerfrequenz des Systems bestimmen /4-19/.

$$M_m \ddot{\varphi} - G \cdot H_s \cdot \varphi + k_\varphi \cdot \varphi - (k_s \cdot H_s \cdot x - H_s^2 \cdot \varphi \cdot k_s) - (k_D \cdot h_s \cdot x) + h_s^2 \cdot k_D \cdot \varphi = 0 \quad /4-17/$$

Horizontale Schubbeanspruchung des Bodens

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{hS} &= k_{hS}(f) \cdot \bar{k}_{hS} & /4-8/ & \quad \tilde{C}_{hS} = C_{hS}(f) \cdot \bar{k}_{hS} \cdot \frac{r_W}{v_S} & /4-9/ \\ \bar{k}_{hS} &= \frac{32 (1-\mu) \cdot G \cdot r_W}{7 - 8\mu} & /4/13-K2/6/ & \quad C_{hS}(f) = 0,5709 + (0,022490 - 0,00276) & /4/13-K2/6/ \\ k_{hS}(f) &= 1 + (-0,0464 \cdot a_o - 0,00439) \cdot a_o & & \quad a_o = \frac{f \cdot r_W}{v_S} \cdot 2\pi & \end{aligned}$$

Horizontale Druckbeanspruchung des Bodens

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{hD} &= k_{hD}(f) \cdot \bar{k}_{hD} & /4-10/ & \quad \tilde{C}_{hD} \approx \bar{k}_{hD} \cdot \frac{\sqrt{F_W}}{v_D} \cdot C_{hD}(f) & /4-11/ \\ \bar{k}_{hD} &= \frac{2 \cdot G_o \cdot \sqrt{F_W}}{(1-\mu)} & /4/10/ & \quad C_{hD}(f) \stackrel{!}{=} 1 \\ k_{hD}(f) &\stackrel{!}{=} 1 & & & \end{aligned}$$

Vertikale Druckbeanspruchung des Bodens

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{vS} &= k_{vS}(f) \cdot \bar{k}_{vS} & /4-12/ \\ \bar{k}_{vS} &= \frac{4 \cdot G_o \cdot r_W}{1-\mu} & /4/8/ \\ k_{vS}(f) &\stackrel{!}{=} 1 \end{aligned}$$

Rotation

$$\begin{aligned} \tilde{k}_\varphi &= k_\varphi(f) \cdot \bar{k}_\varphi & /4-13/ & \quad \tilde{C}_\varphi = C_\varphi(f) \cdot \bar{k}_\varphi \cdot \frac{r_W}{v_S} & /4-14/ \\ \bar{k}_\varphi &= \frac{8 \cdot G \cdot R^3}{3 (1-\mu)} & /4/13-K2/6/ & & \\ k_\varphi(f) &= 1 + (0,0735 - 0,1849) \cdot a_o - 0,0949 \cdot a_o & & \quad C_\varphi(f) = -0,00131 + ((-0,0915 \cdot a_o + 0,2089) \cdot a_o + 0,0483) a_o \end{aligned}$$

Torsion

$$\begin{aligned} \tilde{k}_\Theta &= k_\Theta(f) \cdot \bar{k}_\Theta & /4-15/ \\ \bar{k}_\Theta &= \frac{16}{3} \cdot G \cdot r_W^3 & /4/8/ \\ k_\Theta(f) &\stackrel{!}{=} 1 \end{aligned}$$

Kritisches Dämpfungsverhältnis β

$$\beta = C/C_{krit} \quad /4-16/$$

$$C_{krit,h,v} = \sqrt{4 \cdot m \cdot k_{h,v}}$$

$$C_{krit,\varphi} = \sqrt{4 \cdot M \cdot k_\varphi}$$

Index W: in Wechselwirkung befindliche Fläche

~: dynamisch, -: statisch

f: Frequenz (s⁻¹)

m: Masse (kg)

M: Massenträgheitsmoment (kg·m²)

G_o: Gleitmodul ohne Belastung des Bodens (kp/cm²)

TAB. 4.4: Federkonstanten und Dämpfungsgrad des Bodens

$$m\ddot{x} + k_s (x - H_s \cdot \varphi) + k_D (x - h_s \cdot \varphi) = 0 \quad /4-18/$$

$$\omega_n = \frac{1}{2} (\omega_x^2 + \omega_{\varphi, \text{korr}}^2) \pm \sqrt{(\omega_x^2 + \omega_{\varphi, \text{korr}}^2)^2 - 4(\omega_x^2 \cdot \omega_{\varphi, \text{korr}}^2 - \frac{(k_s \cdot H_s + k_D \cdot h_s)^2}{m \cdot M_m})} /4-19/$$

mit

$$\omega_x^2 = \frac{k_s + k_D}{m} \quad (\text{s}^{-2})$$

$$\omega_{\varphi, \text{korr}}^2 = \frac{k_p + H_s^2 \cdot k_s + h_s^2 \cdot k_D - G \cdot H_s}{M_m}$$

M_m = Massenträgheitsmoment in S um y-Achse ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
 G = Gewicht (kp)

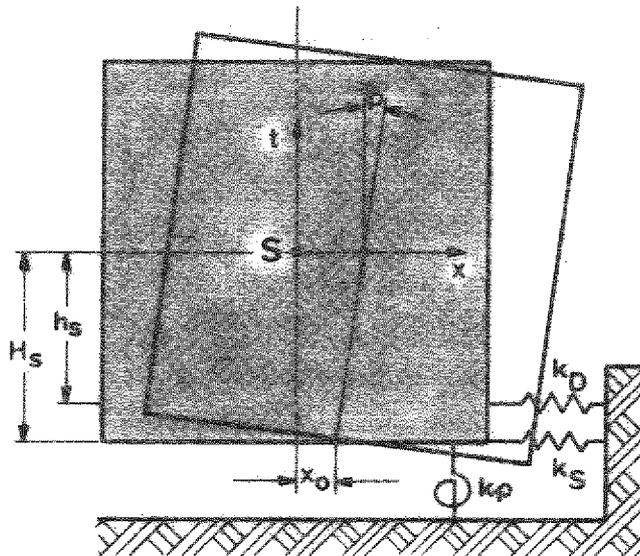


ABB. 4.8
 Ein-Massenschwinger
 mit zwei Freiheits-
 graden

Der zugehörige Response-Wert kann bei bekanntem Dämpfungsgrad dem Antwort-Spektrum entnommen werden. Die Multiplikation mit der größten Bodenbeschleunigung an der freien Oberfläche ergibt die maximale Schwerpunktsbeschleunigung.

Die beanspruchten Böden weisen einen relativ hohen Dämpfungsgrad auf (> 15 %), bei dem nur eine geringe Abhängigkeit der Response-Faktoren von der Frequenz besteht und somit Ungenauigkeiten bei der Eigenfrequenzbestimmung keine grossen Fehlerquellen sind.

4.1.5.3 Unterirdische Anordnung

Bei unterirdischer Anordnung von Kernkraftwerken muß die Wechselwirkung zwischen der Schutzbehälteroberfläche und dem umgebenden Gestein in das Schwingungssystem miteinbezogen werden. Die über die Oberfläche auf das System einwirkende zusätzliche Kraft hängt nach Größe und Richtung von der Federsteifigkeit und dem Dämpfungsgrad des Gesteins und dessen Relativbewegung zum Bauteil ab. CONSTANTINO / 4/13-K / 3 / hat für eine homogene Schichtung eine einfache Beziehung zur Berechnung der Kraft F aufgestellt,

$$F = \tilde{k}_{hD} (x_s - x_o) + \tilde{c}_{hO} (v_s - v_o) \quad /4-20/$$

x_o Verschiebung des Gesteins bei freier Oberfläche
 x_s Verschiebung des freistehenden Schutzbehälters
 $v_{s,o}$ entsprechende Geschwindigkeiten

die den möglichen "treibenden", hindernden oder neutralen Effekt der Einbettung verdeutlicht. Die Einbettungstiefe geht über die Federsteifigkeit /4-8/ in die Rechnung ein. Rückwirkungen auf die Eigenfrequenz und das Antwortverhalten bleiben unberücksichtigt. In die Beurteilung der Auswirkungen unterirdischer Anordnung auf das Erdbebenverhalten des Behälters sind somit die mechanischen Eigenschaften des Untergrundes, das dynamische Verhalten des Bauteils und die örtliche Seismizität einzubeziehen. Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, daß bei ausreichender Festigkeit ($v_D > 1000$ m/s) die Einbettung nicht zuletzt wegen der zusätzlichen Dämpfung positive Auswirkungen auf das dynamische Verhalten des Nuklearteils erwarten läßt. Bei der für das konkrete Projekt durchzuführenden dynamischen Analyse sind Inhomogenitäten, Schichtungen und plastische Verformungen des Bodens besonders zu beachten. Die Einbringung des Schutzbehälters in eine Felskaverne muß unter seismischen Gesichtspunkten als vorteilhaft angesehen werden.

4.1.6 Antwortverhalten des PR 3000 bei unterschiedlichen Anordnungen

Zur Ermittlung der erdbebenbedingten Belastungen und Verschiebungen muß der Nuklearteil eines HTR in mindestens drei Bereiche unterteilt werden:

- (1) Fundamentplatte,
- (2) zylindrischer Teil des Schutzbehälters mit oberem Abschluß,
- (3) Druckbehälter mit wärmetauschenden Elementen.

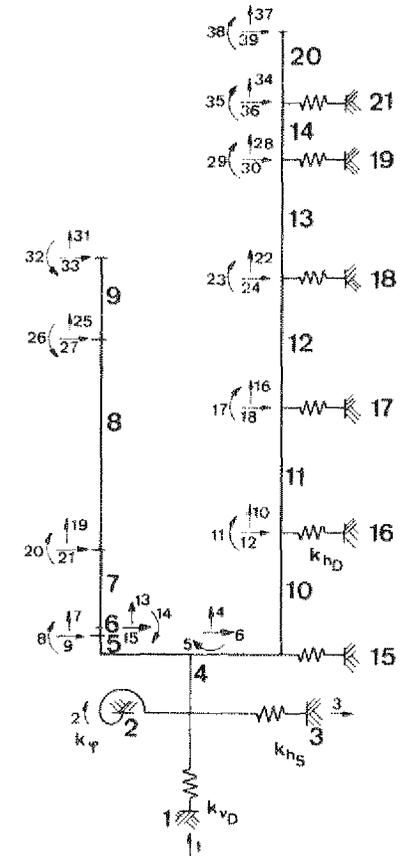
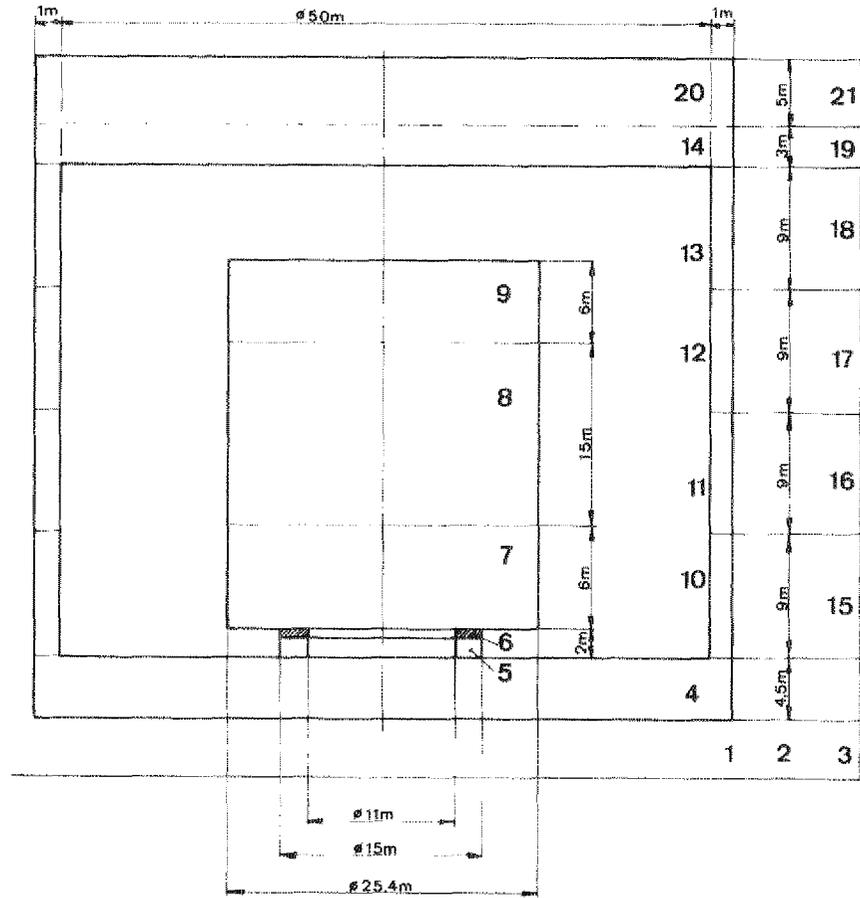
Ein höherer Genauigkeitsgrad läßt sich mit einer feineren Unterteilung des Schwingungssystems erreichen.

Für den PR 3000 wurden dynamische Rechnungen durchgeführt, denen ein Mehr-Massen-Schwingungsmodell zugrunde liegt / 4/22 /. Das dynamische Ersatzschaltbild des Nuklearteils wird in Abb. 4.9 entwickelt. Dabei wird die Einbettung durch seitliche Feder- und Dämpfungselemente erfaßt. Die mögliche Überschüttung des Reaktors geht als zusätzliche Masse in die Rechnung ein. Das dynamische Verhalten weiterer Einbauten (z.B. Rohrleitungssystem) wird nicht gesondert betrachtet. Die Abmessungen des Schutzbehälters ergaben sich aus der Auslegung gasdichten Stahlbetons gegen den Störfall "Kühlmittelverlust". Das angewandte Rechenverfahren benutzt die numerische Integration der Bewegungsgleichungen auf der Basis finiter Differenzen / 4/23 /.

Die in Abb. 4.10 - 13 dargestellten Ergebnisse können unter Berücksichtigung der aufgeführten Annahmen / 4/24 / wie folgt zusammengefaßt werden:

- (1) Positiver Einfluß der Einbettung auf das dynamische Verhalten des Schutzbehälters.
- (2) Positiver Einfluß festen Materials im oberen Schutzbehälterbereich (Einspannung, 4), negativer Einfluß der Überschüttung.
- (3) Bestimmender Einfluß des Neoprene-Lagers auf die erhebliche Relativbewegung des Spannbetonbehälters.
- (4) Unterschiedlicher Einfluß geänderter Randbedingungen auf Schutzbehälter und Großeinbauten (SBB: Fall 3).
- (5) Störfall "Kühlmittelverlust" bleibt Auslegungslastfall.

Der Vergleich der Einflußgrößen läßt die Annahme zu, daß für dünnwandige Schutzbehälter aus Spannbeton und Stahlbeton mit gasdichter metallischer Auskleidung keine wesentlich abweichenden Ergebnisse zu erwarten sind.

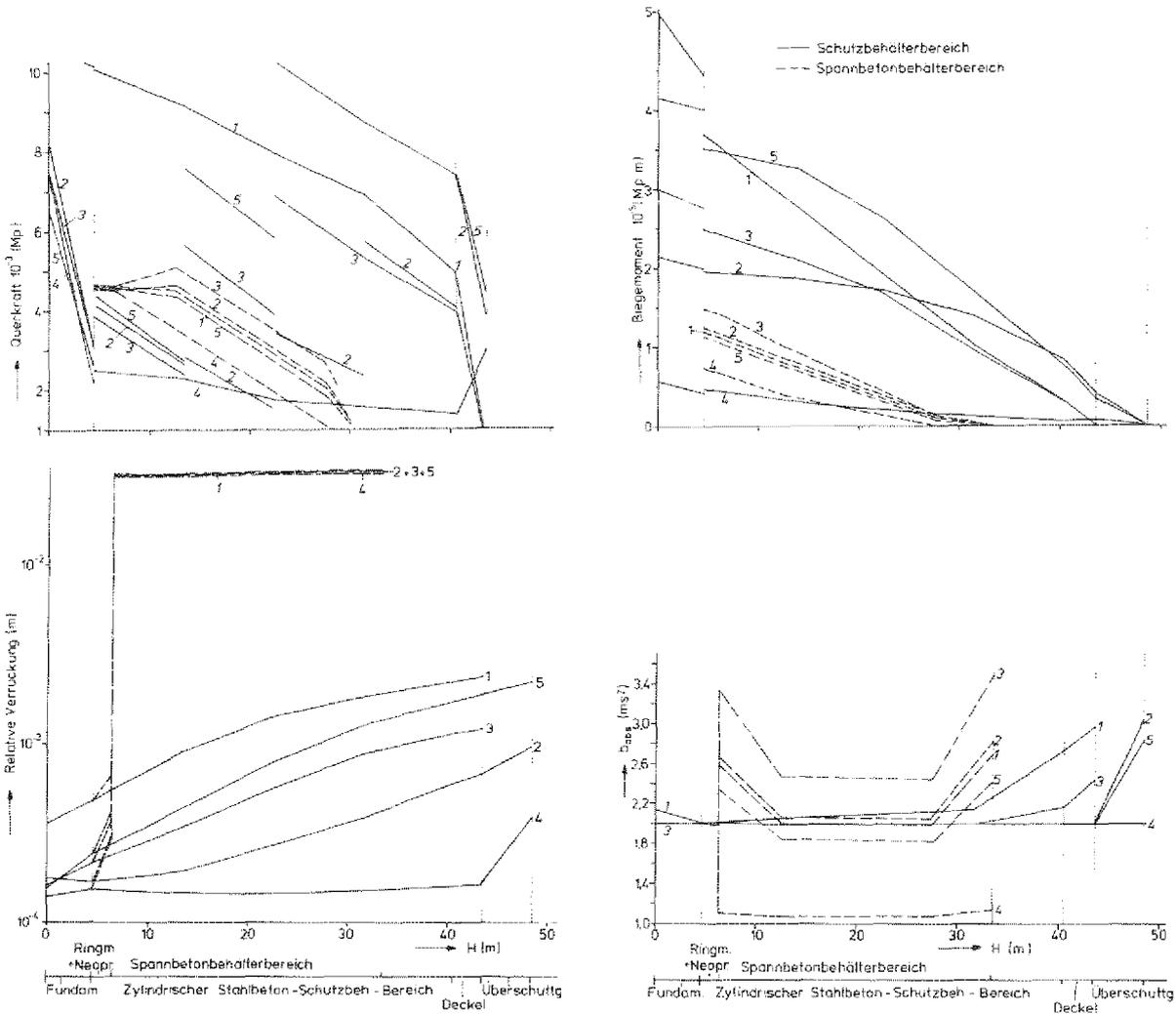


1... 21 Feldnummern
 1... 39 System-Freiheitsgrade

Gewichtsverteilung $G_4 \approx 26.000$ (t)
 $G_{5-9} \approx 32.000$ (t)
 $G_{10-14} \approx 62.000$ (t)
 $G_{20} \approx 18.000$ (t)

Untergrund: Sandsteinschichten $v_D = 2100$ (m/s)
 Umgebung: untere Kies-Sand-Schichten $v_D = 1800$ (m/s)

ABB. 4.9: Rechenmodell Schutzbehälter PR 3000



Eigenfrequenzen					Responsewerte					
1.	0,907 (Hz)	0,53	0,909 (Hz)	0,53	0,908 (Hz)	0,53	0,909 (Hz)	0,53	0,908 (Hz)	0,529
2.	5,5 "	1,1	7,5 "	1,03	6,9 "	0,998	7,6 "	1,14	5,39 "	0,98
3.	7,8 "	1,14	8,7 "	0,999	7,99 "	1,02	8,7 "	1,00	7,7 "	1,14
4.	9,6 "	1,00	8,7 "	1,00	9,55 "	1,0	13,5 "	1,00	8,7 "	1,00
5.	16,4 "	1,00								
1		2		3		4		5		

Eingangsbeschleunigung $b_{max} = 0,2 \text{ g}$
Berckheimer Spektrum

- 1 freistehend, ohne Überschlüttung
- 2 eingebettet, überschüttet
- 3 halbeingebettet, ohne Überschlüttung
- 4 eingebettet, überschüttet, Einfluß der Nachbarfundamente
- 5 halbeingebettet, überschüttet

ABB. 4.10 bis 4.13: Erdbebeninduzierte Belastungen des Nuklearteils

4.1.7 Hinweise für die aseismische Auslegung von Kernkraftwerken

Gemäß / 4/1 / müssen sicherheitstechnisch relevante Gebäude und Anlagenteile nach dem Auslegungsbeben⁺ weiterbetrieben werden können und während des Sicherheitsbebens⁺⁺ funktionsfähig bleiben. Für die Auslegung sind seismische und nichtseismische ständige Lasten zu kombinieren. Während des Sicherheitsbebens kann der Werkstoff über den elastischen Bereich hinaus beansprucht werden, sofern die Funktionsfähigkeit gewährleistet ist. Die daraus resultierende Beeinflussung des dynamischen Verhaltens muß vor allem bei Stahlbetonkonstruktionen gesondert betrachtet werden / 4/25,26 /.

Bei der Auslegung von Kernreaktoren in erdbebengefährdeten Gebieten sind folgende Auslegungskriterien besonders zu beachten:

- möglichst niedriger Schwerpunkt des Gesamtsystems.
- Steifigkeit und Stabilität der Hauptbereiche Fundament, Schutzbehälter und Druckbehälter.
- Verbindung der Nebensysteme mit den Hauptbereichen zur Einschränkung der Bewegungsfreiheit.
- fester Untergrund.
- ausreichender Abstand von Zonen mit Verwerfungen und anderen Bodenbewegungen.

4.2 Flugzeugabsturz

4.2.1 Einflußgrößen

Der Schutzbehälter hat den Reaktor vor dem abstürzenden Flugzeug oder Flugzeugteilen so zu schützen, daß dieses Ereignis keinen nuklearen Unfall nach sich ziehen kann. Der Aufprall führt zu einer dynamischen Beanspruchung durch

+ Auslegungserdbeben

Es ist unter Berücksichtigung der weiteren Umgebung des Standortes (in derselben seismotektonischen Einheit bis etwa 50 km Entfernung vom Standort) die für den Standort gültige größte Intensität zu bestimmen, die in der Vergangenheit nachweislich aufgetreten ist.

++ Sicherheitserdbeben

Es ist unter Berücksichtigung der seismotektonischen Struktur einer größeren Umgebung des Planungsraumes (bis etwa 200 km Entfernung vom Standort) die für den Standort gültige Intensität zu bestimmen, die nach wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht überschritten werden kann.

eine konzentrierte Flächenlast. Die Belastungsstärke wird von der Aufprallfläche des Flugzeuges und der Stoßkraft-Zeit-Funktion bestimmt. Letztere beschreibt den Verlauf der dynamischen Kraft $F(t)$ über der Impulsdauer und hängt ab von der Aufprallgeschwindigkeit, dem Aufprallwinkel, dem Gewicht des Flugzeuges pro Längeneinheit (Streckenlast) und der zur Zerstörung des Flugzeuges nötigen Kraft (Berstlast) / 4/27...32 /.

Allgemein gültige Auslegungsrichtlinien setzen eine Einengung des zu betrachtenden Typenspektrums und Geschwindigkeitsbereiches voraus. In /4/29 / beschränkt man sich in den Untersuchungen auf Starfighter F-104 und Boeing 707-320 als repräsentative Flugzeugtypen. Aus der Zusammenarbeit zwischen IRS, HOCHTIEF und BMI entstand ein Stoßlast-Zeit-Diagramm / 4/31 /, das von dem Militärflugzeug Phantom RF-4 E (Aufprallgeschwindigkeit = 774 km/h) ausgeht und wahrscheinlich zukünftigen Auslegungen zugrunde gelegt werden muß. In Abb. 4.14 sind die Stoßkraft-Zeit-Funktion ein für den senkrechten Aufprall auf die Schutzwand und die flugzeugtypenspezifischen Aufprallflächen gegenübergestellt.

4.2.2 Beanspruchung des Schutzbehälters

Das aufprallende Flugzeug kann zu einer Zerstörung des Schutzbehälters durch lokale Perforation ("Durchstanzen") oder durch unzulässige hohe Biegebeanspruchungen führen. Die Auslegung muß die erforderliche Wandstärke ergeben, die zum Schutz vor Überbeanspruchung des Bauteils nötig ist.

Die gegen Perforation nötige Wandstärke kann nach Methoden der Waffentechnik bestimmt werden, die in / 4/31 / zusammengestellt sind. Die Ergebnisse der verschiedenen Bestimmungsgleichungen weichen nicht wesentlich voneinander ab und sind pessimistisch, da sie für den Aufprall eines starren Körpers auf eine starre Wand gelten. /4-21/ ist dem Richtlinienentwurf / 4/30 / entnommen.

$$W_{s_{\text{erf}}} = \frac{1,43}{\beta_{w_N}} \cdot \frac{G_F}{(2r_F)^{1,8}} \cdot v_F^{4/3} \quad /4-21/$$

G_F	Gewicht des Flugzeuges	(kp)
v_F	Aufprallgeschwindigkeit	(m/s)
r_F	Radius der Aufprallfläche	(m)
β_{w_N}	Würfelnenddruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen	(kp/cm ²)

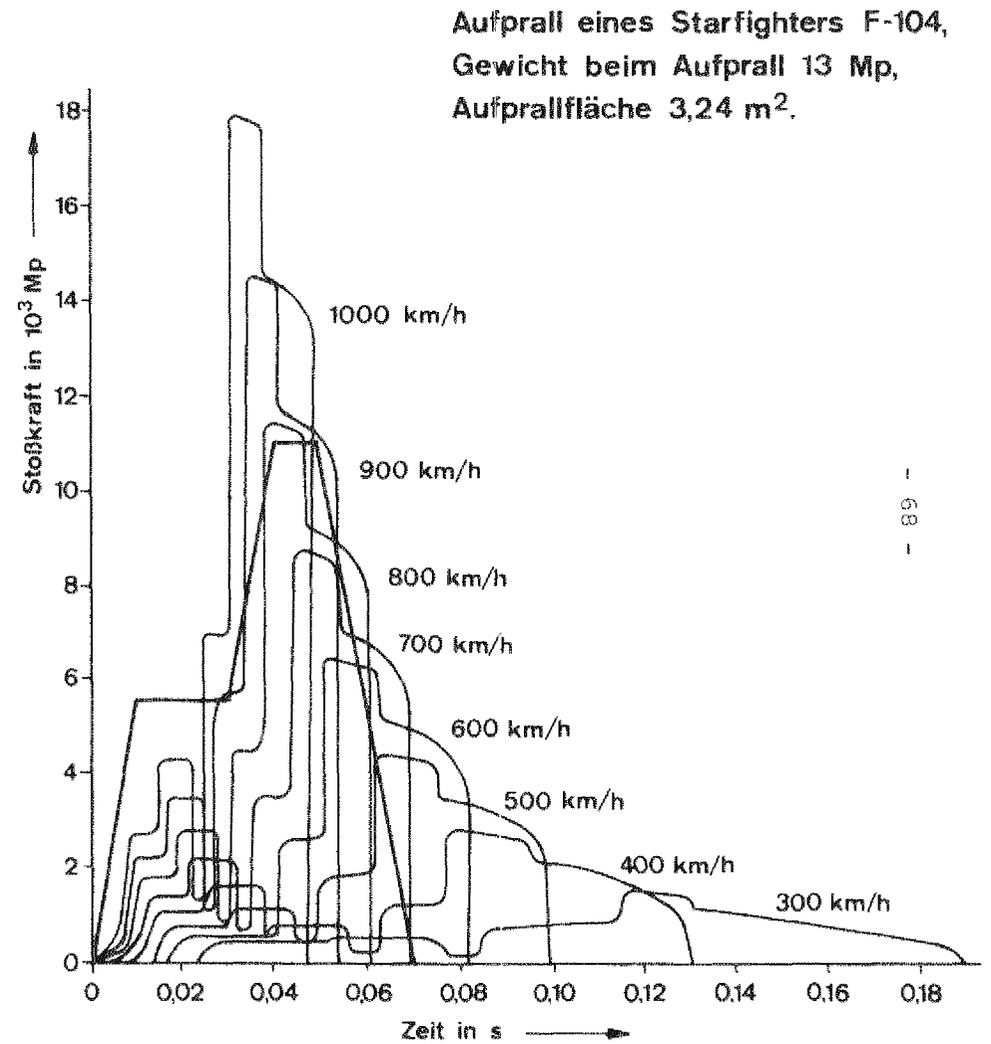
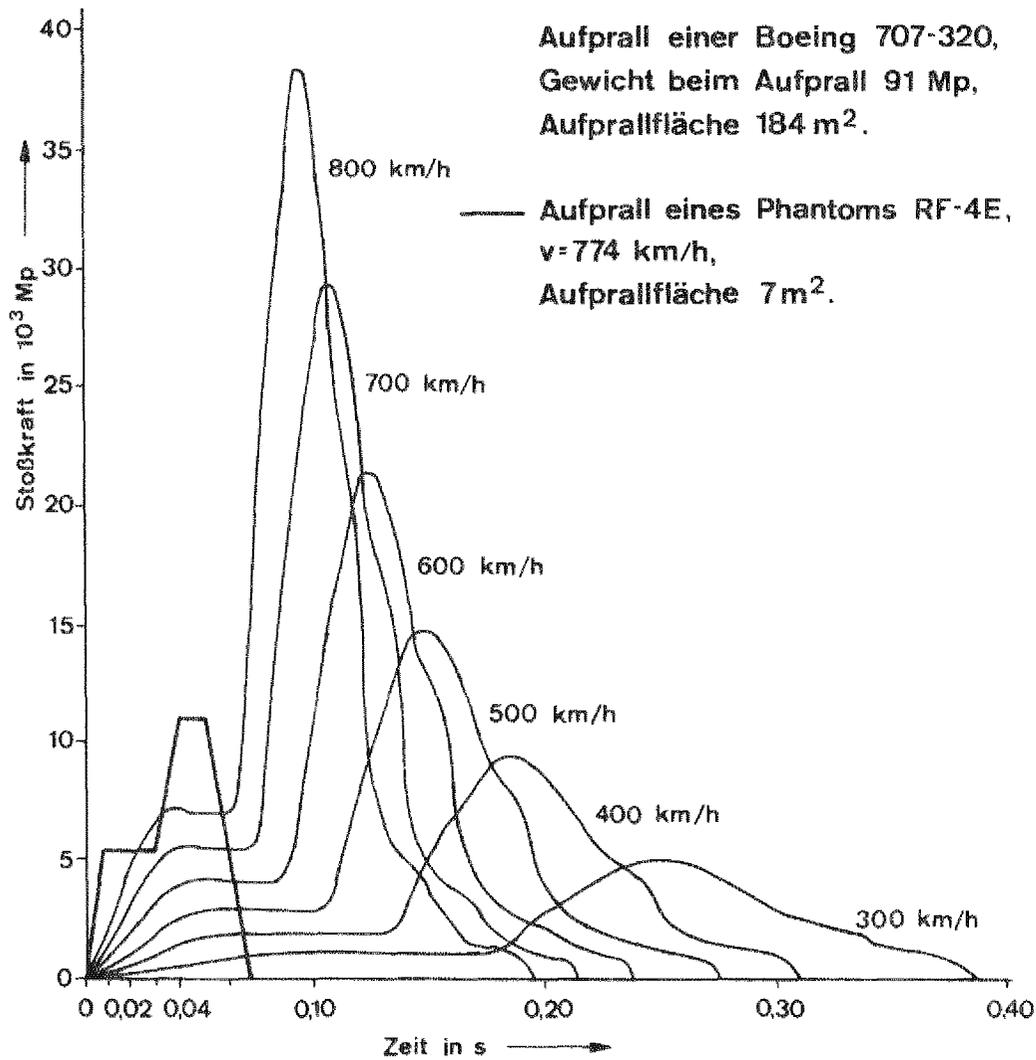


ABB. 4.14: Stosskraft-Zeit-Funktion (nach / 4/29,30 /)

Die erforderliche Wandstärke zum Schutz vor unzulässig hoher Biegebeanspruchung ist abhängig von der Belastung des getroffenen Bauteils, aber auch von dessen Form, den Abmessungen und dem dynamischen Verhalten. Die Erfassung der Gesamtstruktur erfordert einen erheblichen Aufwand, so daß für die Auslegung geeignete dynamische Ersatzsysteme geschaffen werden müssen. Zufriedenstellende Ergebnisse bezüglich der maximalen Beanspruchung liefert das Ein-Massen-Modell, das die Baustruktur durch die wirksame schwingende Masse und linear-elastischer Verformung ersetzt / 4/29 /. Durch Lösung der Bewegungsgleichung /4-22/ läßt sich die maximale Verschiebung, der dynamische Lastfaktor DLF (0 ... 2) und die statische Ersatzlast \bar{F} bestimmen.

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot x = F(t) \quad /4-22/$$

So wird das dynamische Problem auf ein statisches zurückgeführt.

$$DLF = \frac{\text{max. dynamische Verschiebung}}{\text{max. statische Verschiebung}} \quad /4-23/$$

$$\bar{F} = DLF \cdot F(t)_{\text{max}} \quad /4-24/$$

Die wirksame Masse m und die Federsteifigkeit k_x kann man näherungsweise aus der statischen Biegelinie ermitteln.

Für linearisierte Stofkraft-Zeit-Funktionen können dynamische Lastfaktoren mit geringem Aufwand / 4/28 / berechnet werden.

Die Beherrschung der bei einem Flugzeugabsturz auftretenden Biegebeanspruchung erfordert größere Wandstärken als der Schutz vor Perforation. Geht man von den zur Zeit gültigen Anforderungen aus, wird bei oberirdischer Anordnung der Flugzeugabsturz Bemessungslastfall. Die erforderlichen Wandstärken erreichen bei zylindrischen oder halbkugelförmigen Stahlbetonschalen etwa 2,5 m; außerdem müssen Auswirkungen auf die Bemessung des Fundamentes beachtet werden.

4.2.3 Unterirdische Anordnung

Durch unterirdische Bauweise wird der Lastfall "Flugzeugabsturz" für den Schutzbehälter eliminiert oder in seinen Auswirkungen erheblich reduziert.

Bei Einbringung des Nuklearteils in eine Felskaverne übernimmt das darüber liegende Gestein dessen Schutz. Die erforderliche Mächtigkeit des Gesteins kann nach den in 4.2.2 beschriebenen Methoden berechnet werden.

Bei Einbringung des Nuklearteils in eine offene Baugrube mit anschließender Verfüllung und Überschüttung nimmt der Boden entsprechend seiner Festigkeit und Höhe einen Teil der Belastung auf und wirkt vor allem dämpfend und lastverteilend /4-25/. Dabei muß die Überdeckung vor Durchdringung geschützt werden.

$$r_{F2} = r_{F1} + h_{\ddot{u}} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad /4-25/$$

$h_{\ddot{u}}$ Überdeckungshöhe (m)
 φ Winkel des Bodenspannungskegels

Die nötige Höhe kann nach / 4/33 / unter Annahme starrer Körper pessimistisch abgeschätzt werden.

$$h_{\ddot{u}} = \delta' \cdot \frac{G_F}{(2r_F)^3} \cdot v_F \quad /4-26/$$

δ'	Materialkonstante
$23 \cdot 10^{-6}$	Tonkalk
$16 \cdot 10^{-6}$	Lehm
$9 \cdot 10^{-6}$	Sand
$4,5-1,7 \cdot 10^{-6}$	Kalkstein
$0,74 \cdot 10^{-6}$	Stahlbeton
$0,48 \cdot 10^{-6}$	Granit

Bei unterirdisch angeordnetem Schutzbehälter mit ausreichender Überdeckung wird der Lastfall "Flugzeugabsturz" ohne zusätzliche Maßnahmen sicher beherrscht. Er ist nicht der Bemessungslastfall. Die unterirdische Anordnung bedingt nach heutigen Auslegungskriterien geringere Wandstärken und zeichnet sich durch eine hohe Anpassungsfähigkeit an zukünftige Anforderungen aus. Sie vermindert

den nötigen Rechenaufwand, da höchstens der senkrechte Aufprall auf den oberen Abschluß des Schutzbehälters zu erfassen ist, und führt wegen der kleineren dargebotenen Fläche zu einer weiteren Reduzierung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Lastfalls.

4.3 Druckwelle, Brand, extreme Witterungseinflüsse

Zu weiteren extremen Belastungen des Schutzbehälters können Explosionswellen, auslaufende brennbare Flüssigkeiten, extreme Witterungsbedingungen und Sabotage führen. Die Auswirkungen dieser Lastfälle auf den Schutzbehälter sollen in dieser Arbeit nur gestreift werden.

An Standorten, in deren näherer Umgebung chemische Betriebe, Tanks und große Transportwege liegen, sind Explosionen und damit verbundene Druckwellen in die dynamische Auslegung des Schutzbehälters einzubeziehen. Die Zeit-Funktion beschreibt den zeitlichen Druckverlauf und gibt den maximalen Überdruck und dessen Wirkungsdauer an (Abb. 4.15).

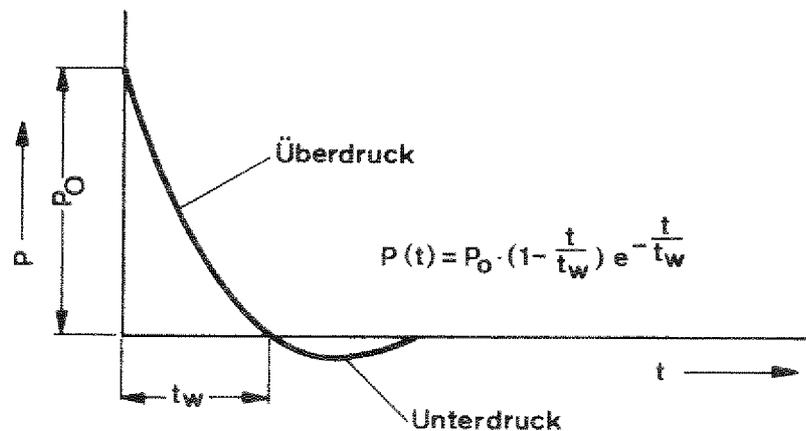


ABB. 4.15:

Zeit-Funktion der Druckwelle / 4/29 /

Berechnungen zeigen, daß ein nach den Richtlinien / 4/30 / gegen Flugzeugabsturz ausgelegter Schutzbehälter Druckwellen mit unrealistisch großem Überdruck ($> 2,5 \text{ kp/cm}^2$) und unrealistisch langer Wirkungsdauer ($> 0,4 \text{ s}$) standhält.

Auslaufende brennbare Flüssigkeiten können zu einem Oberflächenbrand mit thermischer Belastung des umgebenden Materials führen oder bei Undichtigkeiten in den Innenraum des Schutzbehälters gelangen und sich dort entzünden. Der gasdichte dickwandige Betonbehälter bietet meist ohne zusätzliche Maßnahmen ausreichenden Schutz.

Extreme witterungsbedingte Belastungen (z.B. Wirbelstürme) des Schutzbehälters sind für den mitteleuropäischen Raum auszuschließen.

Die Vorteile unterirdischer Bauweise gegenüber dem Lastfall "Flugzeugabsturz" besitzen auch für die zuletzt beschriebenen Belastungen volle Gültigkeit.

4.4 Sabotage

Die Sicherstellung eines ausreichenden Schutzes des Kernkraftwerkes vor Sabotage ist ein komplexes technisches, menschliches und politisches Problem. Das Ziel muß darin bestehen, die Möglichkeiten zur Sabotage bei vertretbarem Aufwand auf ein Minimum zu reduzieren und die Auswirkungen "schwerster Sabotage" auf ein tolerierbares Maß zu beschränken. Die dabei deutlich werdende Verknüpfung mit nuklearer Sicherheitsphilosophie läßt den Schluß zu, daß der Schutzbehälter - vor allem bei unterirdischer Anordnung - die Lösung des Sabotageproblems erleichtert.

5 AUSLEGUNGSKRITERIEN DES SCHUTZBEHÄLTERS EINES HOCHTEMPERATURREAKTORS (PR 3000)

Die vorherigen Kapitel haben gezeigt, daß mit geeignetem Schutzbehälter Kernreaktoren speziell Hochtemperaturreaktoren selbst bei großer Standortleistung während des bestimmungsgemäßen Betriebes und bei größten anzunehmenden Unfällen ein vernachlässigbares Risiko für die Umgebung darstellen.

Die bisherige Praxis der Standortgenehmigung basiert auf der Einhaltung von Ausschlusszonen, Sicherheitszonen und einem Sicherheitsabstand zu dicht besiedelten Gebieten. Eine Änderung scheint nur möglich, wenn die Bevölkerung auch vor "schwersten, nicht gänzlich auszuschließenden" Reaktorunfällen ausreichend geschützt werden kann / 3/1, 5/7 /. Unter diesen Bedingungen erscheint die Genehmigung von Kernkraftwerken auch in Verdichtungsräumen mit Verbrauchernähe als praktikabel. Deshalb sollen in die Auslegung des Schutzbehältersystems für Kernreaktoren auch hypothetische Unfälle mit einbezogen werden, außerdem ist allgemein ein Höchstmaß an Standortunabhängigkeit und Anpassungsfähigkeit an zukünftige Entwicklungen anzustreben. Die wesentlichen Auslegungskriterien des Schutzbehälters führt dieses Kapitel auf. Abb. 5.3 gibt eine Übersicht über den Nuklearteil des PR 3000.

5.1 Gasdichter Spannbetonbehälter

Der PR-Schutzbehälter muß gegen den Störfall "Kühlmittelverlust" mit maximalem Druck und maximaler Temperatur ($p = 3-4 \text{ ata}$, $T \approx 300 \text{ }^\circ\text{C}$) ausgelegt werden. Er sollte aus Gründen der Umweltbelastung, die so "gering wie möglich" zu halten ist, gasdicht sein und kann aus Sicherheitsgründen mit Inertgas und Druckdifferenz zur Umgebung gefüllt werden. Diese Anforderungen gelten bei Spannbeton-Druckbehälter nicht integrierter Bauweise und müßten geänderten Primärkreisbedingungen angepaßt werden. Ferner ist die Standsicherheit des Schutzbehälters gegenüber extremen äußeren Belastungen nachzuweisen.

Wegen der großen Abmessungen und Anforderungen erscheint Beton als der geeigneteste Werkstoff / 5/1 /. Die tolerierbare Gasdurchlässigkeit des Schutzbe-

hälters einschließlich der Durchführungen darf unter Störfallbedingungen einige Prozent/Tag betragen (s. 3). Untersuchungen / 2/19, 5/2 / haben ergeben, daß ausreichend dichter Stahlbeton ($\beta_s \approx 1 \text{ \%}/\text{d}$) ausgelegt und hergestellt werden kann. Dazu ist allerdings eine besondere Sorgfalt und aufwendige Kontrolle nötig, die bei der Ausführung des Großbehälters zu erheblichen Schwierigkeiten, Verzögerungen und Risiken führen können. Für gasdichten Stahlbeton ist bei kritischer Belastung (Zug) die Rissefreiheit ($\epsilon_{\text{Beton}} = \epsilon_{\text{Stahl}}$) nachzuweisen, so daß sich wegen der geringen Zugfestigkeit des Betons ($\sigma_{Z_{\text{zul}}} \approx 20 \text{ kp/cm}^2$) große Wandstärken w_s ergeben.

$$w_s = \frac{P_{\text{Störfall}} \cdot r_s}{\sigma_{Z_{\text{zul}}} \cdot (1+n \cdot \nu)} \quad /5-1/$$

$$n = \frac{E_{\text{Stahl}}}{E_{\text{Beton}}} = 10 \quad / \quad 5/3 \quad /$$

ϵ Dehnung

ν Bewehrungsanteil

Ein weiteres Problem besteht darin, die Gasdichtigkeit des Betons während der gesamten Betriebszeit zu garantieren. Seine Eigenschaften sind sehr stark vom Alter und den Betriebsbedingungen abhängig und in ihrer Komplexität noch nicht exakt quantitativ erfaßt. Aus diesen Gründen sollte - wie in der Praxis üblich - eine gasdichte metallische Auskleidung (Liner) vorgesehen werden, der zugleich als verlorene Schalung dient. Die Verwendung eines Kunststoffliners / 5/5,6 / scheidet bei Temperaturen oberhalb 250 °C aus. Die Standzeiten liegen außerdem nur bei etwa 10 Jahren / 5/4 /. Der Einsatz der Vorspanntechnik bedingt wegen der geringen Rissegefahr eine höhere Gasdichtigkeit der Betonstruktur, so daß unter besonderen Bedingungen (s. 5.3) eine gasdichte Auskleidung wegfallen kann.

Der Spannbetonbehälter bietet weiterhin den Vorteil geringer Wandstärken, da der Beton auf Druck beansprucht wird. Die Druckfestigkeit ist um den Faktor 10 ... 20 größer als die Zugfestigkeit. Er zeichnet sich durch extrem hohe Sicherheit aus und zieht bei der Druckprobe wegen seiner geringen Dehnung nur eine leicht beherrschbare Belastung des Liners nach sich. Trotz kurzzeitig

auftretender höherer Temperaturen kann auf eine thermische Isolierung verzichtet werden, wenn Beton geringer Wärmedehnung (Kalksteinbeton) eingesetzt wird; außerdem sind wegen der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Betons nur die äußersten Stellen gefährdet.

Die Gasdichtigkeit des Behälters kann durch ein Schnüffelrohrsystem, das auf den Liner aufgeschweißt oder in den Beton eingebracht wird, laufend überprüft werden.

5.2 Unterirdische Anordnung

5.2.1 Entscheidungsgründe

Die in Tab. 5.1 aufgeführten Vor- und Nachteile unterirdischer Anordnung gegenüber der oberirdischen zeigen, daß trotz vieler offener Fragen der Prozeßwärmereaktor mit gleichem Schutzbehälter unterirdisch angeordnet werden sollte.

Die unterirdische Ausbreitung der Spaltprodukte ist auch bei ungünstigen Bedingungen (s. 3.4) um den Faktor > 100 langsamer als die atmosphärische. Verbunden mit dieser sicherheitstechnisch sehr wesentlichen Zeitverzögerung ist die räumliche Eingrenzung der eingebrachten Kontamination. Hinzu kommt der Abbau der Aktivität um den Faktor $10^2 \dots 10^3$ durch Sorptionsvorgänge. Der Untergrund kann als weiterer Sicherheitseinschluß angesehen werden, der auch die Auswirkungen des hypothetischen Unfalls "Bruch des Schutzbehälters mit gleichzeitigem Auftreten schwerster Reaktorunfälle" auf ein tolerierbares Maß reduziert.

Die Errichtung des Nuklearteils in einer Kaverne innerhalb des gesunden undurchlässigen Festgesteins muß sicherheitstechnisch als optimal angesehen werden / 3/5, 5/8 /, führt aber zu einer strengen topographischen Abhängigkeit und ist in Verdichtungsräumen meist nicht möglich. Ein Ausweg ist die Anordnung des Nuklearteils in einer offenen Baugrube / 4/20/ mit anschließender Verfüllung der aus bautechnischen Gründen erforderlichen Räume zwischen Behälter und Grubenwand, bzw. zwischen dem oberen Behälterabschluß und der Geländeoberkante. Außerdem kann eine Überschüttung des Nuklearteils vorgesehen werden.

POTENTIELLE VORTEILE

1. Möglichkeiten zur Beherrschung hypothetischer Störfälle.
2. Verringerung des Sicherheitsabstandes zu Verdichtungsräumen.
3. Eliminierung der Lastfälle "Flugzeugabsturz", "Druckwelle", "extreme Witterungseinflüsse".
4. Zusätzlicher Schutz vor Direktstrahlung.
5. Schutz vor auslaufenden brennbaren Flüssigkeiten.
6. Günstigeres Verhalten im Erdbebenfall.
7. Besserer Schutz vor Sabotage.
8. Übernahme eines Teils der Schutzbehälteraufgaben durch das umgebende Gestein.
9. Zusätzliche Freiheiten bei der Auslegung und der Standortwahl, geringere Landerwerbskosten.
10. Annähernd konstante Umgebungsbedingungen für den Schutzbehälterwerkstoff (Temperatur, Feuchtigkeit).
11. Bessere Anpassungsfähigkeit an zukünftige Anforderungen.
12. Versorgungssicherheit in Kriegszeiten bei unterirdischer Anordnung der Gesamtanlage.

POTENTIELLE NACHTEILE

1. Begrenzung der Bauteilgröße (Felskavernen).
2. Grundwasserprobleme - vor allem während des Baus.
3. Höhere Kosten und längere Bauzeiten.
4. Geringere Flexibilität gegenüber späteren Veränderungen und technischen Neuerungen.

UNGEKLÄRTE GESICHTSPUNKTE

1. Beeinflussung der Öffentlichkeitsmeinung und des Genehmigungsverfahrens.
2. Motive des Landschaftsschutzes und der Ästhetik.
3. Erleichterung oder Erschwernis der Probleme am Ende des Reaktorbetriebes
4. Auswirkungen des Boden- und Wasserdrucks.

TAB. 5.1: Beurteilung der unterirdischen Bauweise

Das System bietet ähnliche Sicherheit wie die Felskaverne, wenn das Verfüllungsmaterial ausreichende Festigkeit aufweist (4.1.6.3) und undurchlässig für Spaltprodukte ist (3.4.2). Materialart, Verfestigungsgrad, Schichtdicke, Gas- und Wasserdurchlässigkeit, Sorptionseigenschaften und Porosität des definierten Zwischenraumes werden den jeweiligen Untergrundverhältnissen entsprechend festgelegt. Der Grad der Standortunabhängigkeit dieser Bauweise ist letztlich an die technische Realisierbarkeit der Baugrube gebunden (5.2.2).

5.2.2 Technische Realisierung

Die Sprengung von Kavernen in Fels ist den geologischen Verhältnissen entsprechend bis zu einer Spannweite von etwa 40 m möglich. Die Exkavation erfolgt über vertikale oder horizontale Stollen. Bisher wurden Kernkraftwerke in Halden, Norwegen (25 MWth), Agesta, Schweden (10 MWth), Chooz, Frankreich (266 MWe) und Lucens, Schweiz (8,5 MWe) in Felskavernen angeordnet. In USA, Skandinavien und Kanada werden Möglichkeiten zur unterirdischen Anordnung großer Kernkraftwerkseinheiten (1000 ... 2000 MWe) studiert / 3/5 /. Als größter in den Fels gebrachter Freiraum gilt die Maschinenkaverne des Cabova Bassa Kraftwerkes mit einer Höhe von 60 m, einer Spannweite von 29 m und einer Länge von 217 m. Somit kann die Schaffung von Felskavernen zur Aufnahme von Kernkraftwerken als technisch machbar angesehen werden. Begrenzungen ergeben sich dabei aus wirtschaftlichen Gründen / 5/9 /.

Für die Herstellung großer offener Baugruben in grundwassergefährdenden Schichten bieten sich folgende Verfahren an / 5/10,11 /:

- (1) Ablöschung
- (2) Spundwände mit rückwärtiger Verankerung
- (3) Schlitzwandumschließung
- (4) Injektionskörper
- (5) Frostkörper (Abb. 5.1)

Die Abmessungen, der Untergrund und die Grundwasserverhältnisse bestimmen die anzuwendenden Verfahren, deren Kombinationen sich meist als optimal erweisen.

Zu einer wesentlichen Erleichterung der Bauaufgabe führt die Abwesenheit von Grundwasser, von der allerdings nur in wenigen Fällen ausgegangen werden kann.

Legt man annähernd konstante Grubenabmessungen (Durchmesser = 55 m, Höhe 50 m) und mittelfesten Boden zugrunde, so läßt sich die Problemstellung auf die Beherrschung des anstehenden Grundwassers, des Wasserdruckes (Solbruchgefahr) und des Auftriebs konzentrieren. Als Lösungsmöglichkeiten müssen genannt werden:

- (1) Großräumige Grundwasserabsenkung durch ein Brunnen-system.
- (2) Unterbrechung des Grundwasserflusses und lokale Grundwasserabsenkung.
- (3) Wasserdichte Wand und Sole.
- (4) Lokale Vereisung.

Wegen der Auswirkungen auf die Umgebung (Setzungen) und Auswirkungen auf andere Grundwasserbenutzer wird die Grundabsenkung in vielen Fällen Schwierigkeiten nach sich ziehen / 5/12 /, so daß die wasserdichte Schlitzwandumschließung und der Frostkörper als technische Realisierungsmöglichkeiten übrig bleiben. Die Anwendung des Schlitzverfahrens wird mit zunehmender Baugrubentiefe (50 m) schwieriger. Besteht keine Verbindung zwischen den einzelnen Grundwasserstockwerken, kann durch eine gestaffelte Schlitzwand mit Übergängen in den nicht wasserführenden Schichten die Problemstellung dem Stand der Technik (Tiefen bis zu 35 m) angepaßt werden.

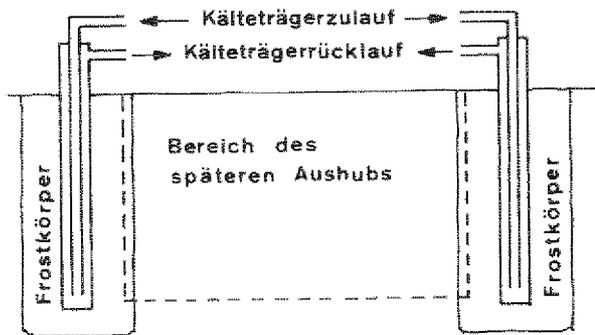


ABB. 5.1: Schematische Darstellung des Gefrierverfahrens

Das Gefrierverfahren setzt lediglich ausreichende Feuchtigkeit des Bodens voraus, um eine Stabilisierung durch Eisbildung zuzulassen. Es kann in jeder Tiefe und bei großen Abmessungen eingesetzt werden / 5/13,14 /, ohne Veränderung des Grundwasserspiegels. Hinzu kommt die geringe Abhängigkeit von der Untergrundbeschaffenheit und geringe Lärmbelästigung. Nachteilig wirken sich die Beeinträchtigung des Bauablaufes und der Energieverbrauch aus, der nötig ist, um den Frostkörper während der Bauzeit des Schutzbehälters zu erhalten. Die seit etwa 80 Jahren bekannte und praktizierte Technik wird vor allem bei der Abteufung von Schächten (max. Tiefe 600 m) und Herstellung großer Baugruben (Fort St. Vrain, 32 x 46 x 16 (23) m) angewandt. Der wirtschaftliche Einsatz des Verfahrens setzt Grundwassergeschwindigkeit 1 m/d voraus.

Mithilfe der Senkkasten-Bauweise kann die Herstellung der offenen Baugrube umgangen werden. Der Einsatz dieses Verfahrens kann im Spezialfall wirtschaftlich sein, vor allem in grundwasserfreien Zonen. Für den Absenkvorgang muß die Auftriebkraft und Reibung zwischen Behälteroberfläche und Boden überwunden

werden. Bei Vorhandensein von Grundwasser muß der Druck im Schneidenraum über dem hydraulischen Druck liegen, um einen Wassereinbruch zu verhindern (Druckluftgründung). Er darf nach deutschen Bestimmungen 3 ata nicht überschreiten und stellt bei Vorhandensein von Grundwasser eine Tiefenbegrenzung des Verfahrens dar. Aus sicherheitstechnischer Sicht muß der Wegfall der Verfüllungsschicht negativ beurteilt werden, so daß die Anlagekosten großer Kraftwerke um 2...4 % steigen.

5.2.3 Bauzeit und Kosten

Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß die unterirdische Bauweise eine Bauzeitverlängerung von etwa 7 - 14 Monaten nach sich zieht. Auswirkungen auf das Genehmigungsverfahren und die mögliche Witterungsunabhängigkeit sind nicht berücksichtigt; außerdem kann man ggfs. die Schaffung des unterirdischen Freiraumes aus dem Genehmigungsverfahren ausgliedern und vorziehen. Bei der Ermittlung der Kosten muß zwischen den Auswirkungen auf die Anlagekosten und die Energieerzeugungskosten unterschieden werden.

Die Mehrkosten der unterirdischen Bauweise entstehen im wesentlichen durch die Herstellung der Felskaverne oder Baugrube mit der anschließenden Verfüllung. Weitere Kostenfaktoren sind gegenläufig und ergeben einen vernachlässigbaren Gesamtbetrag. Kostenmindernd wirkt sich vor allem der Wegfall einiger Sonderlastfälle ("Flugzeugabsturz") aus. In eine quantitative Beurteilung müssen die jeweiligen Standortbedingungen einbezogen werden. Bisherige Erfahrungen und Abschätzungen / 3/5, 5/14,15,16,17,18,19 / lassen Mehrkosten für die Grubenherstellung an Standorten mit Grundwasser von 15...20 Mio DM (1974) erwarten; die Kosten für die Felskaverne schwanken um diesen Betrag. Legt man bei den Auswirkungen auf die Energieerzeugungskosten die Struktur des Strompreises zugrunde (Abb. 5.2), so bewirkt eine Steigerung der Anlagekosten um 1 % einen Anstieg des Strompreises um 2,3 % . Die mögliche größere Verbrauchernähe kann allerdings zu einer Senkung der Fernübertragungskosten und besserer Nutzung der Abwärme führen und die genannte Steigerungsrate (mindestens) kompensieren. Ähnliches gilt für den Bereich der nuklearen Wärmeversorgung.

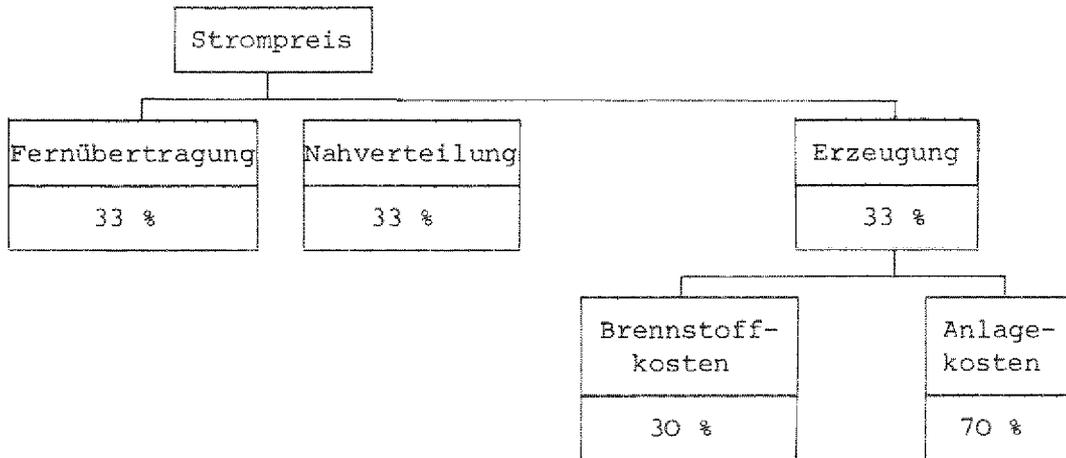
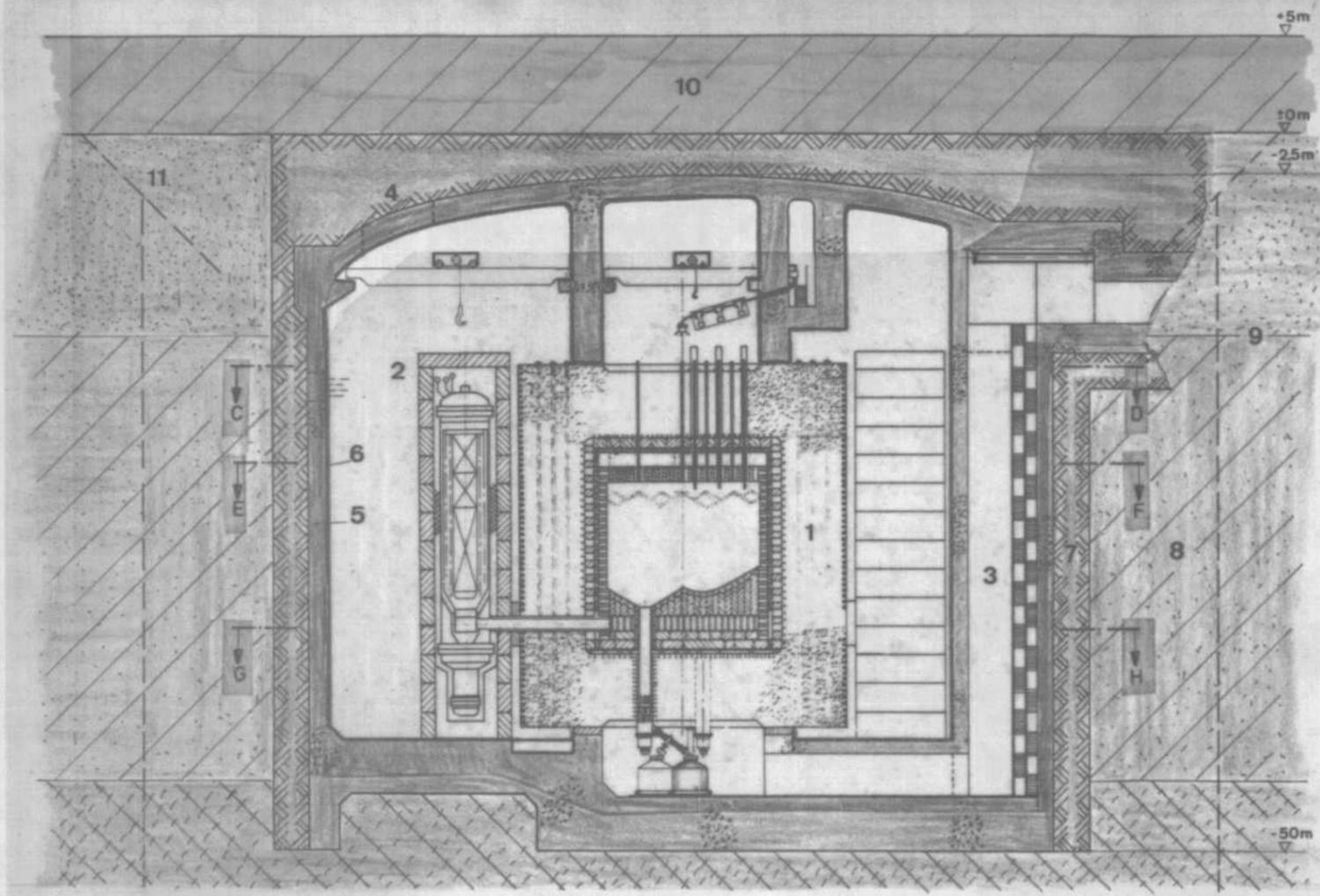


ABB. 5.2: Zusammensetzung des Strompreises

5.3 Weitere Sicherheitsaspekte

Weitere wichtige Sicherheitsfaktoren müssen als zusätzliche Motive für das vorgeschlagene System angesehen werden:

- (1) Grundwasserprobleme bestehen nur während der Herstellung der Baugrube und können mit bekannten technischen Mitteln gelöst werden.
- (2) Die Wasserdichtigkeit des Schutzbehälters wird durch die wasserundurchlässige Verfüllungsschicht und eine zusätzliche Dichtung, die man auf die Behälteroberfläche aufbringt (z.B. Betabest / 5/20 /), sichergestellt. Der ggfs. auferlegten Kontrollierbarkeit kann durch eine elektrisch prüfbare Isolierung entsprochen werden. Der wasserundurchlässige Spannbeton wirkt als weiterer Schutz.
- (3) Eine Kontamination des Trinkwassers ist bei ausreichendem Abstand von einem Trinkwasserwerk (≈ 1000 m) unter allen Bedingungen auszuschließen.
- (4) Der Störfall "Lufteinbruch" über die Behälteroberfläche wird eliminiert.
- (5) Die einzige mögliche Direktverbindung mit der Umgebung stellt die Schleuse dar. Selbst im Falle schwerster Sabotage, bei der die Funktion des Schleusensystems aufgehoben wird, können durch geeignete Maßnahmen (z.B. Zuschüttung) katastrophale Auswirkungen vermieden werden.
- (6) Der Untergrund verzögert erheblich den Ausgleich zwischen Störfallinnen- und Umgebungsdruck (3.4.2) und der Umgebung, der sich an den hypothetischen Verlust der Gasdichtigkeit des Schutzbehälters anschließt, so daß immer Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können.



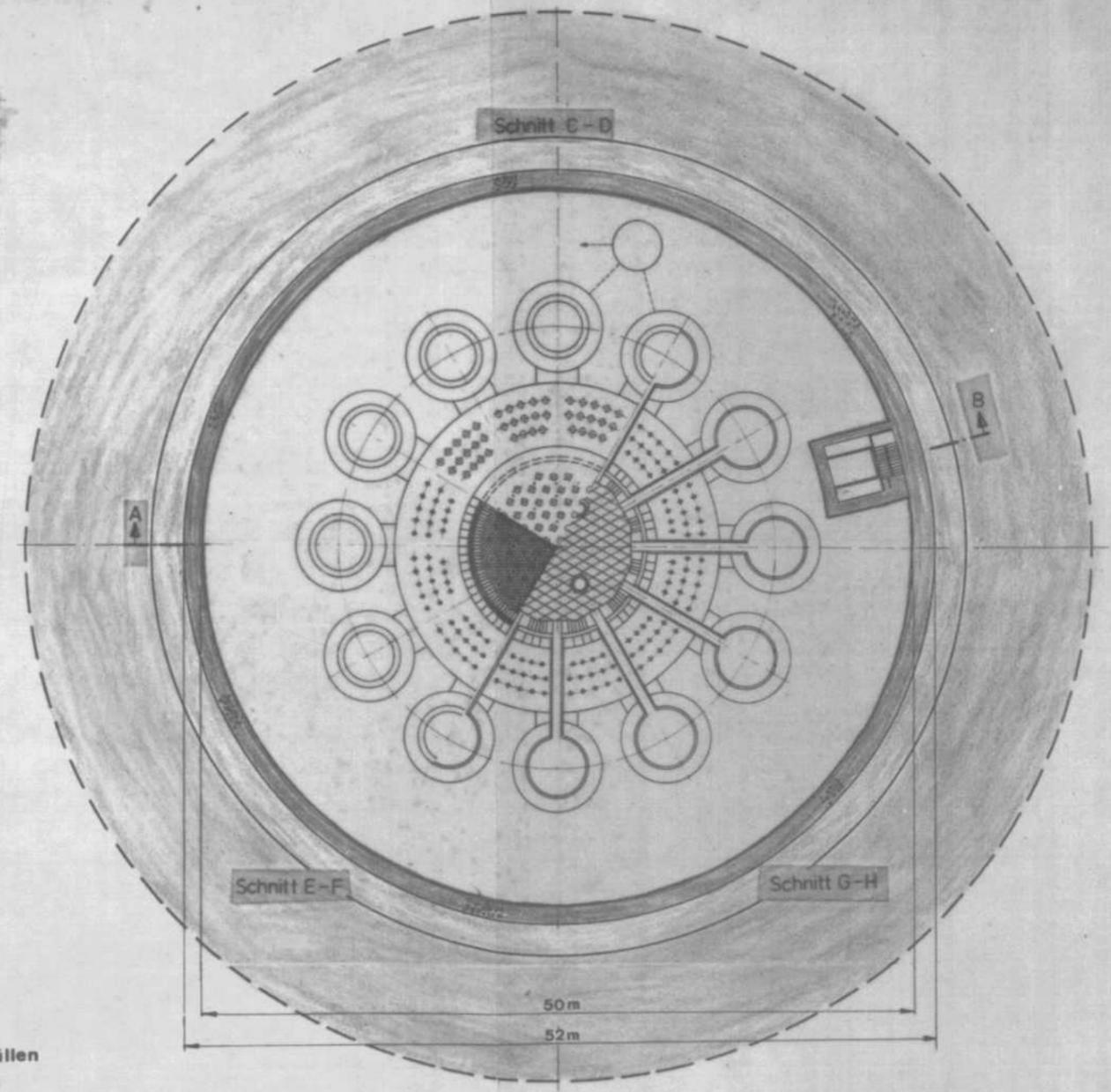
Schnitt A-B

ABB. 5.3:

Übersichtszeichnung Nuklearteil
PR 3000

Legende

- 1 Druckbehälter
- 2 Wärmetauschende Elemente
- 3 Brennelementschacht
- 4 Montageöffnung
- Spannbetonschutzbehälter
- Liner
- Sicherheitsanschluß durch Verfüllen
- 8 Frostkörper während des Baus
- Schichtung des Bodens
- 10 Überdeckungen
- 11 Abböschung bis zum Grundwasserspiegel



Schnitt C-D

Schnitt E-F

Schnitt G-H

- (7) Die notwendigen, umfangreichen Bodenuntersuchungen ermöglichen ein sicheres Bild über die lokale Geologie (4.1.7).
- (8) Mit zunehmender Bautiefe ist meist eine Verbesserung der Gründungsverhältnisse und eine Abnahme der Zusatzlast verbunden.
- (9) Bei der Auslegung und Herstellung des Schutzbehälters kann auf Entwicklungen und Erfahrungen der Industrie zurückgegriffen werden.

5.4 Entwicklungspotential und zukünftige Aufgaben

In die Gesamtbeurteilung des Systems müssen das Entwicklungspotential und zukünftige Aufgaben einbezogen werden:

- (1) Die Rückhalteeigenschaften des Bodens und der hydraulische Druck können in die sicherheitstechnische Auslegung des Schutzbehälters einbezogen werden und die Gasdichtungsanforderungen reduzieren (Wegfall des Liners).
- (2) Die entlastende Wirkung des Boden- bzw. Außendrucks kann in die mechanische Auslegung mit einbezogen werden.
- (3) Die Untergrundverhältnisse und bauweisenbedingte Einrichtungen, wie z.B. Pumpen, Grundwassersperren usw., können die Störfallanalyse und die Auslegung des Schutzbehälters wesentlich beeinflussen.
- (4) Das Auslegungsprinzip kann auf größere Kraftwerkseinheiten und Energieparks ausgedehnt werden.
- (5) Die Bauzeit und Fertigungskosten können durch Verwendung von vorgefertigten Beton- oder Gußteilen mit anschließender Verspannung gesenkt werden.
- (6) Das System kann sich leicht an den zukünftigen technischen und sicherheitstechnischen Bedingungen anpassen.
- (7) Eingebrachte Baumittel (z.B. Spundwand) können als bleibende Wand in das System integriert werden.

Die Aufgabe der teilweise sehr konservativen Annahmen bei der sicherheitstechnischen Beurteilung des Schutzbehälters setzt zukünftige Arbeiten in folgenden Bereichen voraus:

- (1) Verhalten der Spaltprodukte im Schutzbehälter großer Reaktoren.
- (2) Mögliches Bruchverhalten des Schutzbehälters und Rückhaltung der Spaltprodukte.
- (3) Beeinflussung der atmosphärischen Ausbreitung durch die örtlichen Standortverhältnisse.
- (4) Erdbebenprobleme bei unterirdischer Bauweise mit besonderer Berücksichtigung der Schichtungen und Inhomogenitäten des Untergrundes.
- (5) Unterirdische Freisetzungen und Ausbreitungen von Spaltprodukten.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1/ 1 STEIGELMANN, W.H., TAN, C.P.:
Containment-System Design and Construction Practices in the United States,
Reactor and Fuel Processing Technology, Vol. 12, No. 2, 69.
- 1/ 2 COTRELL, W.B., SAVOLAINEN, A.W.:
U.S. Reactor Containment Technology, Vol. I, Vol. II, ORNL-NSIC-5, 65.
- 1/ 3 GALL, W.R.:
Review of Containment Philosophy and Design Practice, Nucl. Safety,
Vol. 7, No. 1, 65.
- 1/ 4 PEDERSON, K.B., ed.:
Applied Nuclear Power Engineering, Cahners Books, 72.
- 1/ 5 IAEA Symp.: Containment and Siting of Nuclear Power Plants, 73.
- 1/ 6 BROSCHE, D., u.a.:
Statusbericht über Probleme der heutigen Containmentkonzepte, MRR 91, 71.
- 2/ 1 BOEHNERT, R., BONKA, H.:
Zu erwartende Tritiumverunreinigung durch Kernreaktoren in der Luft und
im Wasser bei homogener Verteilung bis zum Jahr 2000.
JÜL-763-RG, Mai 1971.
- 2/ 2 ROWLAND, P.R., u.a.:
The Presence of Ag-111 in the Dragon Primary Circuit.
DP Report 744, 71.
- 2/ 3 ROWLAND, P.R.:
The Distribution of Fission Products in a High-Temperature Gas Cooled
Reactor.
DP Report 702, 70.
- 2/ 4 ENGELHARD, v.d. DECKEN, u.a.:
Das Reaktorexperiment VAMPYR im AVR.
Reaktortagung 1973, Karlsruhe.
- 2/ 5 MIELKEN, G., WILL, M.:
Plate-out Evaluation as a Basic Criterion for Plant, Design, and Safety
Analysis in Indirect and Direct Cycle HTR Systems, Principles and Stan-
dards of Reactor Safety.
IAEA-SM-169/39, Wien, 1973.
- 2/ 6 v.d. DECKEN, ESSLER:
Das Bestrahlungsexperiment SAPHIR im Reaktor Pégase in Cadarache.
Reaktortagung 1973, Karlsruhe.

- 2/ 7 ROELLIG, K.:
Spaltgasfreisetzung von HTR-Brennelementen.
Reaktortagung, Hamburg, 1972.
- 2/ 8 MIELKEN, G.:
KFA, HHT; persönliche Mitteilung.
- 2/ 9 HOINKIS, E.:
A Review of the Adsorption of Iodine on Metal and Its Behaviour in Loops.
ORNL-TM-2916.
- 2/10 KEILHOLTZ, G.W., BARTON, C.J.:
Behaviour of Iodine in Reactor Containment Systems.
ORNL-NSIC-4, 1965.
- 2/11 IAEA:
Control of Iodine in Nuclear Industry.
Techn. Report Series No. 148, 1973.
- 2/12 KEILHOLTZ, G.W.:
Removal of Radioactive Noble Gases from Off-Gas Streams.
Nucl. Safety, 8 (67).
- 2/13 MEGAW, W.J., HAY, F.G.:
The Behaviour of Iodine Released in Reactor Containers.
Nucl. Science and Techn., 16 (1962).
- 2/14 WATSON, G.M., u.a.:
Effects of Containment-System Sizes on Fission Product Behaviour.
Nucl. Safety, 9 (1967).
- 2/15 FONTANA, M.H., BLOWNING, W.E.:
Effect of Particle Agglomeration on the Penetration of Filters Utilized
with Double Containment Systems.
ORNL-NSIC-1, 1963.
- 2/16 KELLER, K.:
Theoretische Behandlung des Aerosolverhaltens in geschlossenen zylindri-
schen Behältern.
KFK 1490, 1971.
- 2/17 MORRIS, J.B., NICHOLLS, B.:
The Deposition of Iodine Vapour on Surfaces.
Int. Symp. on Fission Product Release and Transport under Accident Con-
ditions, Oak Ridge, 65; CONF. 650407, I.
- 2/18 NELSON, C., u.a.:
Measurement of Particulate Filtration Efficiencies of Buildings.
11th AEC Air Cleaning Conference, 70, CONF. 700816, Vol. 2.
- 2/19 KRÖGER, W.:
Einführende Darstellung der Eigenschaften des Betons und seine Anwen-
dung als Werkstoff für Reaktorschutzbehälter.
KFA-IRE-IB-6/73.
- 2/20 VOGT, K.J.:
Umweltkontamination und Strahlenbelastung durch radioaktive Abluft
aus kerntechnischen Anlagen.
JÜL-637-ST, 1970.

- 2/21 Ausschuß "Ausbreitungsrechnung für radioaktive Abluft" des Arbeitskreises III/7 "Strahlenschutztechnik" der Deutschen Atomkommission: Empfehlungen zur Bestimmung der zulässigen Emission radioaktiver Stoffe aus Kernkraftwerken in die Atmosphäre, 1972.
- 2/22 SLADE, D.H., ed.:
Meteorology and Atomic Energy 1968, TID -24190.
- 2/23 HUEBSCHMANN, G.:
Emission und Ausbreitung radioaktiver Spaltprodukte in der Atmosphäre. Kerntechnik, 15 (73) 2.
- 2/24 FORTAK, H.:
Anwendungsmöglichkeiten von mathematischen meteorologischen Diffusionsmodellen zur Lösung von Fragen der Luftreinhaltung. Minister für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes NRW, 1972.
- 2/25 MANIER, G.:
Eine neue Methode zur Bestimmung der Schornsteinmindesthöhen. VDI-Ber. 149, 70, 157-62.
- 2/26 GILBERT, T.:
Über die Anwendung der Ausbreitungsrechnung in der Praxis. VDI-Ber. 149, 70, 163-68.
- 2/27 FUERSTE, W.:
Studie über die nukleare Sicherheit standortabhängiger Kernkraftwerke und deren Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit. BMFT-FB K 73-01, 1973.
- 2/28 Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz:
Untersuchungen über die Migration radioaktiver Lösungen in natürlichen porösen Medien. Studie für BMW, in Vorbereitung.
- 2/29 ORCUTT, R.G., u.a.:
Underground Movement of Radioactive Wastes, Sewage and Industrial Wastes, 7/57.
- 2/30 INOUE, Y, KAUFMANN, W.J.:
Prediction of Movement of Radionuclides in Solution through Porous Media. Health Physics, Vol. 9, 63, 705-15.
- 2/31 BAETSLE, L.H.:
Migration of Radionuclides in Porous Media. Progress in Nuclear Energy, Ser. XII (2,1), London, 69, 707-30.
- 2/32 BERTSCH, W., PUSCHMANN, G., SCHWILLE, F.:
Migration radioaktiver Nuklide in porösen Medien. Z. deutsch. geol. Ges. Sonderh. Hydrogeol. Hydrogeochem., 70, 193-207.
- 2/33 SCHWILLE, F., BERTSCH, W.:
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, persönliche Mitteilung.
- 2/34 SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL:
Lehrbuch für Bodenkunde, F. Enke Verlag, Stuttgart, 1970.

- 2/35 DORFNER, K.:
Ionenaustauscher.
de Gruyter, Berlin.
- 2/36 JACOBS, D.G., TAMURA, T.:
Retention and Movement of Radioisotopes in Soils.
Nucl. Safety 1(3), 60, 65-69.
- 2/37 SCHULZ, R.K.:
Soil Chemistry of Radionuclides.
Health Physics, Vol. 11, 65, 1317-1324.
- 2/38 KNÄLMANN, M.:
Die Konzentrationsabhängigkeit der Jodisorption in verschiedenen Böden.
ATKE 16-45 (247-252), 70.
- 2/39 BERTSCH, W., LINKE, R.:
Untersuchungen zur Sorption der Radionuklide Sr-85 und Cs-137 an Lokersedimenten des Oberrheines.
Deutsche Gewässerkundl. Mitt., Jg. 17 (73), H. 3, 76-82.
- 2/40 National Academy of Sciences - National Research Council:
The Behaviour of Radioactive Fall-out in Soils and Plants.
Publication 1092, 64.
- 2/41 JACOBS, D.G.:
Strontium Movement in the Soil.
Nucl. Safety 2(3), 61, 63-5.
- 2/42 JACOBS, D.G.:
Behavior of Radioactive Gases Discharged into the Ground.
Nucl. Safety 8 (2), 66/67, 175-8.
- 2/43 ORNL, Health Physics Division, Annual Progress Reports, UC-41- Health and Safety.
- 2/44 SOKOL, D.:
Ground Water Safety Evaluation - Project Gasbuggy.
PNE-1009, 71.
- 2/45 JAMNE, E.:
Studies on Underground Siting of Nuclear Power Stations in Norway,
pres. at "Novel Siting Solutions of Nuclear Plants", Nov. 73, San Francisco, USA.
- 2/46 BEATTIE, J.R.:
An Assessment of Environmental Hazard from Fission Product-Releases.
AHSB(S) R 64, 63.
- 2/47 1. Strahlenschutzverordnung, BGBl. I, Nr. 31, 430-452 (60).
- 2/48 HOSEMANN, J.P., u.a.:
Nukleare Schadstoffe in der Nachunfallatmosphäre eines Leichtwasser-Reaktor (LWR) -Containments.
KFK 1800, 73.
- 2/49 LINDACKERS, K.H.:
Sicherheit in der Kerntechnik.
Vortrag KFA-ISF Kolloquium, Jülich, 6, 74

- 3/1 RITTER, FRANZEN:
Vorträge, KTG-Fachseminar "Standortwahl von Kernkraftwerken in Verdichtungsräumen", Stuttgart, 74, unveröffentlicht.
- 3/2 LINDACKERS, K.H.:
Die Bedeutung technischer Risiken, atw, 6 (74), 284-7.
- 3/3 SCHULTEN, R., u.a.:
Industriekraftwerk mit Hochtemperaturreaktor PR 500 -"OTTO-Prinzip"- zur Erzeugung von Prozeßdampf.
JÜL-941-RG, 1973.
- 3/4 BARNERT, H.:
Druckausgleichsvorgänge zwischen Behältern.
JÜL-823-RG, 1972.
- 3/5 HUEBSCHMANN, W., NESTER, K.:
Strahlenbelastung durch Jod bei Reaktorunfällen mit Kühlmittelverlust und undichtem Schutzbehälter.
Reaktortagung 1973.
- 3/6 IAEA Consultants' Meeting on Underground Siting of Nuclear Power Plants.
Jan. 1974, Wien. Unveröffentlicht.
- 3/7 Genehmigungsverfahren AVR Jülich.
Bodengutachten Prof. Schultze, RWTH Aachen.

- 4/ 1 IRS:
Richtlinien für die Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen.
Entwurf, 1972.
- 4/ 2 Bautechnische Aufgaben bei Kernkraftwerken.
Konstruktiver Ingenieurbau, Heft 10, März 1971.
- 4/ 3 JUNG:
Kleine Erdbebenkunde.
- 4/ 4 LOMENICK, T.F., u.a.:
Earthquake and Nuclear Power Plant Design.
ORNL-NSIC-28, 70.
- 4/ 5 AHORNER, L., MURAWSKI, H.:
Die Verbreitung von schadenverursachenden Erdbeben auf dem Gebiet der BRD.
Zeitschr. f. Geophysik, 1970, 36, 313-43.
- 4/ 6 BORK, M., SCHWARZER, W.:
Earthquake Safety of Nuclear Power Plants Based on a Balanced Risk Concept.
IAEA/SM-169/20, Jülich, 1973.
- 4/ 7 SCHNEIDER, G.:
Die Festlegung eines Entwurfbebens nach seismotektonischen und tektonischen Parametern.
2nd SMIRT, Berlin, 73.
- 4/ 8 WHITMAN, R.V. ed.:
Seismic Design for Nuclear Power Plants.
- 4/ 9 HOUSNER, G.W.:
Earthquake Engineering.
Ch. 4, Ch. 5.
- 4/10 AKINO, K., TAJINI, H.:
A Seismic Design and Dynamic Analysis of Nuclear Power Plants.
Nucl. Struct. Eng. 1 (65), 120-5; 232-38.
- 4/11 SMITH, C.B., MATTHIESEN, R.B.:
Vibration Testing and Earthquake Response of Nuclear Reactors.
Nucl. App. and Techn. 7(1969), 6-34.
- 4/12 SCAVUZZO, R.J., u.a.:
Effects of Foundation Rotation on Seismic Inertia Forces of Nucl. Power Plant Structures.
Nucl. Eng. and Design, Vol. 24(73) 2, 195-202.
- 4/13 Soil Structure-Interaction, Session K 2, 2nd SMIRT, Berlin, 1973.
- 4/14 LITTLE, R.R., SCAVUZZO, R.J.:
Vertical Soil-Structure Interaction of Nuclear Power Plants Subjected to Seismic Excitation.
Nucl. Eng. and Design, 24(73) 2, 203-213.

- 4/15 SCAVUZZO, R.J.: Persönliche Mitteilung.
(Rensselaer Polytechnic Inst. of Connecticut, U.S.A.).
- 4/16 SCHNELLENBACH, G.:
(Ruhr-Universität Bochum, Inst. f. Konstr. Ing. Bau) persönliche Mitteilungen.
- 4/17 HISADA, T., u.a.:
Aseismic Design of Nuclear Power Plants in Japan.
Nucl. Eng. and Design, Vol. (20) 72, Nr. 2.
- 4/18 BARKAN, D.D.:
Dynamics of Bases and Foundations.
Mc-Graw-Hill.
- 4/19 Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, Chile, 69.
AKINO, K., u.a.: A 2, TAJIMI, W.: A 6.
- 4/20 BLAKE, A., u.a.:
A Concept for Underground Siting of Nuclear Power Reactors.
UCRL-51408, 73.
- 4/21 BIGGS, J.M.:
Introduction to Structural Dynamics.
McGraw-Hill, New York, 1964.
- 4/22 SCHILDBERG, K., SCHNELLENBACH, G., ZERNA, W.:
(Ruhr-Universität Bochum, Inst. f. Konstr. Ing. Bau);
Dynamische Berechnungen Nuklearteil PR 3000.
- 4/23 STANGENBERG, F.:
Berechnung von Strahlenbetonbauteilen bei Kernkraftwerken für extreme dynamische Beanspruchungen.
J 3/5, 2nd SMIRT, Berlin, 1973.
- 4/24 KRÖGER, W.:
Eingabedaten für dynamische Berechnungen Nuklearteil PR 3000.
Aktennotiz, 1973.
- 4/25 NEWMARK, N.M.:
Earthquake Response Analysis of Reactor Structures.
Nucl. Eng. and Design, 20(72) 2.
- 4/26 STRUCK, W., u.a.:
Probleme und Kenntnislücken bei der Beurteilung des Widerstandes von Stahlbetonbauteilen gegenüber stoßartiger Belastung.
J 3/4, 2nd SMIRT, Berlin, 1973.
- 4/27 RIERA, J.D.:
On the Stress Analysis of Structures Subjected to Aircraft Impact Forces.
Nucl. Eng. and Design 8(68) 415-26.
- 4/28 YANG, H.T.Y., GODFREY, D.A.:
Structural Analysis of Aircraft Impact on a Nuclear Containment Vessel and Associated Structures.
Nucl. Eng. and Design 11(70) 295-307.

- 4/29 BMFT:
Beanspruchung und Bemessung von Kernkraftwerksgebäuden bei den äußeren Einwirkungen Flugzeugabsturz und Druckwelle,
- 4/30 Institut für Bautechnik:
Richtlinien für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen in Kernkraftwerken für die Lastfälle Erdbeben, Explosionen und Flugzeugabsturz.
Berlin; in Vorbereitung.
- 4/31 DRITTLER, K., u.a.:
Zur Auslegung kerntechnischer Anlagen gegen Einwirkungen von außen, Teilaspekt Flugzeugabsturz.
IRS-W-7 (73).
- 4/32 CHELAPATI, C.V., KENNEDY, R.P.:
Probabilistic Assessment of Aircraft Hazard For Nuclear Power Plants.
Nucl. Eng. and Design, 19 (72), 333-64.
- 4/33 SCHARDIN, H., u.a.:
Wirkungen von Spreng- und Atombomben auf Bauwerke.
Ziviler Luftschutz 12 (54), 283-91.
- 5/ 1 WATERS, T.G.:
Reinforced Concrete as a Material for Containment, in: Nuclear Reactor Containment Buildings and Pressure Vessels.
- 5/ 2 GABRIEL:
(Hochtemperatur Reaktorbau GmbH, Mannheim); persönliche Mitteilung.
- 5/ 3 DIN 1045 Beton- und Stahlbetonbau, 1972.
- 5/ 4 HASKY (Bayer, Leverkusen); persönliche Mitteilungen.
- 5/ 5 SMITH, E.C.:
Plastic Liners for Candu Containment Structures.
Structural Division 10 (71), 2583-97.
- 5/ 6 EPSTEIN, L.F., u.a.:
Preliminary Gas Permeation Measurements on Plastics for Use as Concrete Containment Vessel Liners.
Nucl. Eng. and Design, 8 (68), 345-59.
- 5/ 7 NSIC STAFF:
Review of Methods of Mitigating Spread of Radioactivity From a Failed Containment System.
ORNL-NSIC-27, 68.
- 5/ 8 FONTANA, M.H.:
Underground Containment of Power Reactors.
Nuclear Safety, 3(61), 31-4.
- 5/ 9 WINKLER:
(Elektro-Watt-Ingenieurunternehmung, Zürich): persönliche Mitteilungen.
- 5/10 Grundbautaschenbuch.
Ernst & Sohn, Berlin.

- 5/11 KRÖGER, W.:
Schaffung großer unterirdischer Freiräume zur Errichtung von Kernkraft-
werken.
In Vorbereitung.
- 5/12 BERKENBUSCH:
Persönliche Mitteilungen. (Rheinbraun AG, Köln).
- 5/13 STOSS, K.:
Die Fortschritte des Gefrierverfahrens.
Glückauf. 108 (72), 20, 943-7.
- 5/14 BRAUN, STOSS:
Unterlagen, persönliche Mitteilungen.
(Deilmann-Haniel GmbH, Dortmund).
- 5/15 Studie HTR-Prozeßwärme-Anlagen (GHT, BF, RBW STEAG):
Teilbereich: Probleme der Untergrundbauweise, 1974.
- 5/16 FÜRST, W.:
Persönliche Mitteilungen. (STEAG Essen).
- 5/17 LÖRS:
Persönliche Mitteilungen. (Ph. Holzmann AG, HNL Düsseldorf).
- 5/18 BREMER:
Persönliche Mitteilungen. (Krupp Universal Bau, Essen).
- 5/19 ERLER, E.:
Persönliche Mitteilungen. (Hochtief AG, Essen).
- 5/20 HOFFMANN & HARTL, Nürnberg:
Firmenankunft.

ANHANG

Benutzte Indices

A	atmosphärische Ausbreitung
B	Bruch
D	Druck
E	Erdbeben
F	Filter, Flugzeug
h	horizontal
i	Spaltnuklid
K	Kamin
L	Love-Welle
o	vor Druckausgleich
O	Oberfläche
P	Primärkreis
R	Rayleigh-Welle
T	Teilchen
U	unterirdische Ausbreitung; Untergrund
v	vertikal
W	Wechselwirkung; Wasser
x	nach Druckausgleich
S	Schutzbehälterfüllung; Schub; Schwerpunkt

Benutzte Symbole

A	Aktivität	C
A'	leistungsbezogene Aktivität	C/MWth
AC	Aktivitätskonzentration	C/cm ³
b	Belüftungskonstante; Beschleunigung	s ⁻¹ ; m/s ²
B	Entstehungsrate	Kerne/s
c	spez. Wärme	J/kg °K
C	Nuklidkonzentration; Dämpfungsgrad	Kerne/cm ³
d	Desorptionsgrad	-
D	Diffusions-, Dispersionskonstante; Druck	cm ² /s; kp/cm ²
Ḋ	Dosisleistung	rem/s

E	Energie	J
f	Porosität; Frequenz, f_n Eigenfrequenz	-; Hz
F	Kraft	kp
g	Erdbeschleunigung; Dosiskonstante	cm/s ² ; rem·m ³ /s·C, rem m ² /s·C
G	Gleitmodul; Gewicht	kp/cm ² ; kp
H	Höhe, effektive Emissionshöhe	cm
J	Aktivitätsinventar	C
k	Federkonstante; spez. Kosten	kp/cm; DM/m ³
K_c	Massenübergangszahl	cm/s
K_d	Verteilungskoeffizient	cm ³ /g
l	Länge	m
L	thermische Reaktorleistung	MWth
m	Masse	kg
M	Oberflächenkonzentration; Magnitude; Massenträgheitsmoment	Kerne/cm ² ; -; kg m ²
N	Anzahl der Kerne, Bebenhäufigkeit	-; a ⁻¹
O	Oberfläche	cm ²
p	Druck	kp/cm ²
q	seismischer Wirkungsgrad	-
\dot{Q}	Quellstärke; Q punktförmig freigesetzte Aktivität	C/s; C
r	Radius	cm, m
R	Gaskonstante; Freisetzungsrate	cm/ ^o K; Kerne/s
R_f	Zeittransformationsfaktor	-
s	Sedimentationskonstante; Verschiebung	s ⁻¹ ; cm
S	Aktivitätskonzentration der Abluftfahne	C/m ² , C/m ³
t	Zeit	s
T	Temperatur; Übertragungsfaktor	^o K, ^o C; ...
v	Strömungsgeschwindigkeit	cm/s
V	Volumen	cm ³
w	Wandstärke	cm
Y	Spaltausbeute	-
α	Ablagerungskonstante	s ⁻¹
β	Leckage	s ⁻¹
β_{wN}	Würfelnendruckfestigkeit des Betons	kp/cm ²
ϵ	Dehnung	-
κ	c_p/c_v	-
λ	Zerfallskonstante	s ⁻¹

η	dynamische Zähigkeit; Wirkungsgrad	g/cm·s
μ	Poisson'sche Zahl	-
ν	Bewehrungsanteil	-
σ	Ausbreitungsparameter; Spannung	cm ² ; kp/cm ²
χ	Ausbreitungsfaktor	s/m ³ , s/m ²
ρ	Dichte	g/cm ³
γ	spez. Gewicht	p/cm ³
φ	Winkel	
τ	Zeit	s
ω	Kreisfrequenz	s ⁻¹

Mit ist bewußt, daß die vorliegende Arbeit durch intensive Zusammenarbeit und Diskussionen mit anderen wesentlich gefördert wurde. Eine persönliche Danksagung würde eine zu lange Namensliste nach sich ziehen, deshalb kann ich an dieser Stelle allen nur pauschal danken.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. R. SCHULTEN für die Stellung des Themas und die großzügige Unterstützung zur Durchführung der Arbeit danken sowie Herrn Prof. Dr. rer. nat. E. MERZ für das fördernde Interesse bei der Übernahme des Korreferates.

