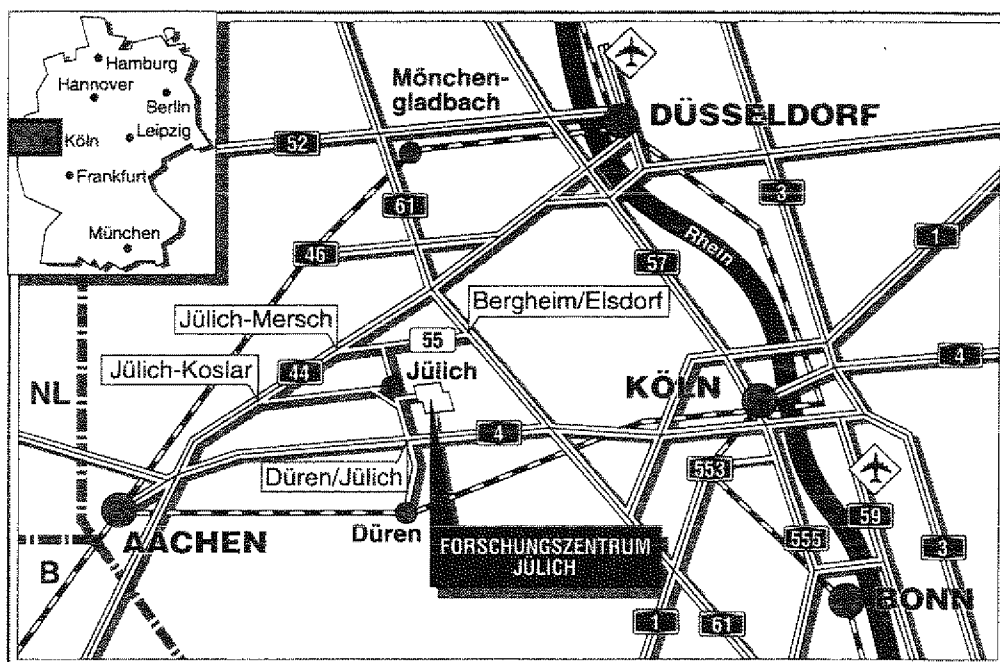


*Institut für Sicherheitsforschung  
und Reaktortechnik*

**Sicherheitstechnische Untersuchungen  
zum Störfallverhalten des HTR-100**



**Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 2539**

ISSN 0366-0885

Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik Jül-2539

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek  
Postfach 1913 · D-5170 Jülich · Bundesrepublik Deutschland  
Telefon: 02461/61-6102 · Telefax: 02461/61-6103 · Telex: 833556-70 kfa d

# **Sicherheitstechnische Untersuchungen zum Störfallverhalten des HTR-100**

**Ergänzungsband mit vertiefenden Einzelbeiträgen  
zum Bericht Jül-Spez-477**

J. Wolters, J. Mertens, J. Altes, R. Bongartz, G. Breitbach,  
P.H. David, G. Degen, H.G. Ehrlich, K.H. Escherich, E. Frank,  
W. Hennings, W. Jahn, R. Koschmieder, J. Marx, G. Meister,  
R. Moormann, W. Rehm, K. Verfondern





SAFETY RELATED STUDIES  
ON THE ACCIDENT BEHAVIOUR OF THE HTR-100

SUPPLEMENTARY VOLUME WITH DETAILED INDIVIDUAL CONTRIBUTIONS  
ON THE JÜL-477 REPORT

**SUMMARY**

**1. SCOPE AND OBJECTIVES**

The aim of investigations on the HTR-100 accident behaviour was to verify the safety concept of the plant for balance and to quantify the radiological risk to be expected in operating an HTR-100 double unit system. Moreover, aspects of the investment risk were considered.

The spectrum of initiating events ranged from so-called transients to leaks in the primary circuit and steam generator and even included earthquakes. Some of the event trees derived were highly complex and extensive due to the situation of the steam generator above the core and with regard to the double unit plant concept with increased possibilities of accident control, but also with respect to potential accident propagation. Correspondingly sophisticated analyses were required to identify risk-relevant event sequences, but ultimately only a few courses of events were concerned.

**2. PLANT RISK**

An HTR-100 plant produces 250 MW(th) per reactor. The limitation to this comparatively low output, a low power density and a core geometry with a relatively large surface permit the omission of active core cooling without significantly affecting fission product retention in the fuel elements. The fission product decay heat is in this case transferred to a two-line natural circulation cooling water system via the surface of the reactor steel pressure vessel so that the reactor concrete cell is cooled. Unlike larger reactors, the radiological risk is therefore not determined by active core cooling failure which, due to natural convection in the primary circuit of a pressu-

rized reactor, is only possible in the event of a failure of the steam generator feed system, whereas blower failure is an additional cause in a depressurized primary loop. Although local temperatures of 1620°C are reached in a depressurized reactor, which ultimately also lead to the release of radiologically relevant fission products from the fuel elements in a small section of the core, cesium and strontium are retained practically completely in the core region due to redeposition on colder graphite surfaces and only iodine and silver are released from the core as radiologically relevant fission products. However, this only occurs at a time when the average gas temperatures in the primary circuit decrease again due to natural convection which also takes place in a pressureless reactor. The associated coolant contraction prevents fission product transport from the reactor pressure vessel.

Another essential feature reducing the risk of cooling accidents is the fact that the reactor pressure vessel safety valves blow off into the gas store. Active core cooling failure in the pressurized reactor therefore does not lead to gas release into the environment, although the pressure increases to a level where one of the safety valves responds. Primary circuit depressurization with corresponding reactor core heatup can only develop if several engineered safeguards are assumed to fail in addition to active core cooling.

A failure of active core cooling after accident-initiating leakage of the primary circuit is also highly improbable because the afterheat removal system is designed to cope with this event and possesses very high availability for reasons of plant availability and investment protection.

The radiological risk of the HTR-100 is essentially determined by accident sequences initiated by heating tube leakage at the steam generator and causing release of part of the fission products deposited on the steam generator surface during operation.

The highest releases of noble gases and iodine are caused by a sequence of events due to failure of the steam generator relief system comprising the two pressure reducing stations so that the steam generator pressure increases due to continued natural convection heating until the main steam safety valves respond.

If the valve in the defective leg then fails in the open position, there will be a direct connection between the primary loop and the environment causing slow depressurization of the primary system through the leak and open safety valve. Such depressurization temporarily leads to condensation at the steam generator due to rapid cooling of the primary circuit through the intact steam generator leg causing about 6 % of the metallic fission products deposited there to be detached. The radiologically relevant nuclides released near ground level comprise 78 GBq of cesium-137, 1.2 GBq of strontium-90 and 880 GBq of iodine-131. More than 90 % of this iodine quantity is assumed to originate from "hydrolyzed" fuel particles with defective

coating. A frequency of about  $2 \times 10^{-7}$  per plant and year is to be expected for the sequence described above.

Cesium release is dominated by a sequence induced by steam generator leakage involving failure of the feed system for the intact steam generator leg and escape of part of the gas mixture from the primary system into the environment due to a defective relief valve. The high temperatures of the steam generator heating tubes lead to increased remobilization of deposited fission products. The release rates determined are 410 GBq of Cs-137, 6.5 GBq of Sr-90 and 95 GBq of I-131; the release path leads through the stack. This sequence with a frequency of  $2 \cdot 10^{-7}$  per plant year contributes approximately 40 % to the collective risk and thus constitutes the highest single contribution.

A major ( $\leq 33 \text{ cm}^2$ ) leak in the gas purification system furnishes almost the same contribution due to its relatively high frequency ( $1 \cdot 10^{-5}$ /plant year). Contaminated dust and part of the coolant gas activity are released through the stack without being filtered until the system is automatically shut off. This accident should be differentiated from sequences due to minor leaks ( $\leq 1 \text{ cm}^2$ ) with building relief through aerosol filters. In both cases, however, the amounts of radioactive substances released are so small that they are controlled as design basis accidents within the meaning of § 28.3 of the Radiation Protection Ordinance. This is important because they are probably to be classified as design basis accidents due to their probability of occurrence.

The risk contribution possibly caused by earthquakes proved to be negligible. A conceivable release sequence identified was earthquake-induced failure of the steam generator support in conjunction with rupture of the four headers and a pipe break in the section of the steam circuit not designed against earthquakes. However, partial depressurization until closure of the steam valves only releases very small amounts of radioactive substances. At any rate, this sequence falls within a frequency range which is not normally considered any more in risk analyses.

Environmental exposure for all risk-relevant accidents is so low that accident consequence calculations do not reveal any lethal radiation doses and practically no stochastic fatal injuries. These calculations neither assumed acute protective measures nor long-term resettlement or decontamination; such measures are thus not necessary in order to prevent fatalities.

The radiological risk caused by an HTR-100 plant is therefore to be classified as very low. The initiating events selected as representative and the event sequences studied in detail cover the risk-relevant event spectrum well into the hypothetical range.



SICHERHEITSTECHNISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM  
STÖRFALLVERHALTEN DES HTR-100

ERGÄNZUNGSBAND MIT VERTIEFENDEN EINZELBEITRÄGEN  
ZUM BERICHT JÜL-SPEZ-477

ZUSAMMENFASSUNG

1. ZIELSETZUNG UND UMFANG

Ziel der Untersuchungen zum Störfallverhalten des konzipierten HTR-100 war die Überprüfung des Sicherheitskonzeptes der Anlage auf Ausgewogenheit sowie die Quantifizierung des radiologischen Risikos, das beim Betrieb einer HTR-100-Doppelblockanlage zu erwarten wäre. Außerdem wurden auch Aspekte des Investitionsrisikos betrachtet.

Das Spektrum der betrachteten auslösenden Ereignisse reichte von den sogenannten Transienten über Lecks am Primärkreislauf und Lecks im Dampferzeuger bis hin zum Erdbeben. Die sich daraus entwickelnden Ereignisbäume erwiesen sich teilweise als sehr komplex und umfangreich, nicht zuletzt wegen der Dampferzeuger-Anordnung über dem Core und aufgrund des Doppelblock-Anlagenkonzeptes mit erweiterten Möglichkeiten bei der Störfallbeherrschung, aber auch zur potentiellen Störfallausbreitung. Entsprechend aufwendige Analysen waren erforderlich, um die risikorelevanten Ereignisabläufe zu identifizieren; im Endeffekt waren dies aber nur wenige Abläufe.

2. RISIKO DER ANLAGE

In einer HTR-100-Anlage werden pro Reaktor 250 MW(th) erzeugt. Die Begrenzung auf diese vergleichsweise kleine Leistung, eine niedrige Leistungsdichte sowie eine Coregeometrie mit relativ großer Oberfläche erlauben es, auf eine aktive Corekühlung zu verzichten, ohne den Einschluß der Spaltprodukte in den Brennelementen wesentlich zu vermindern. Die Wärme aus dem Zerfall der Spaltprodukte wird in diesem Fall über die Oberfläche des

stählernen Reaktordruckbehälters an ein zweisträngiges, mit Wasser im Naturumlauf arbeitendes Kühlsystem abgegeben, durch das die Beton-Reaktorzelle gekühlt wird. Der Ausfall der aktiven Corekühlung - bei unter Druck befindlichem Reaktor wegen der Nutzung der Naturkonvektion im Primärkreislauf nur durch Versagen der Dampferzeugerbespeisung möglich, während bei druckentlastetem Primärkreislauf als Ursache zusätzlich das Versagen der Gebläse hinzukommt - bestimmt daher nicht, wie bei größeren Reaktoren, das radiologische Risiko. Bei druckentlastetem Reaktor werden lokal zwar Temperaturen von 1620°C erreicht, die letztlich auch in einem kleinen Teil des Cores zur Freisetzung radiologisch relevanter Spaltprodukte aus den Brennelementen führen. Von den geringen Mengen werden aber Cäsium und Strontium schon infolge der Wiederanlagerung an kälteren Graphitoberflächen praktisch vollständig im Corebereich zurückgehalten; an radiologisch relevanten Spaltprodukten treten daher nur Jod und Silber aus dem Core aus. Dies geschieht jedoch erst zu einem Zeitpunkt, wenn die mittleren Gastemperaturen im Primärkreislauf durch die auch bei drucklosem Reaktor stattfindende Naturkonvektion wieder fallen. Die damit verbundene Kontraktion des Kühlmittels verhindert einen Transport der Spaltprodukte aus dem Reaktordruckbehälter.

Wesentlich für die verminderte Risikorelevanz von Kühlungsstörungen ist auch, daß die Sicherheitsventile des Reaktordruckbehälters in das Gaslager abblasen. Der Ausfall der aktiven Corekühlung bei unter Druck befindlichem Reaktor führt daher nicht zur Abgabe von Gas in die Umgebung, obwohl der Druck so weit ansteigt, daß eins der Sicherheitsventile anspricht. Eine Druckentlastung des Primärkreislaufs mit entsprechender Aufheizung des Reaktorkerns kann sich daraus nur entwickeln, wenn man zusätzlich zum Ausfall der aktiven Corekühlung das Versagen mehrerer Sicherheitseinrichtungen unterstellt.

Auch der Ausfall der aktiven Corekühlung nach störfallauslösenden Lecks am Primärkreislauf ist sehr unwahrscheinlich, da das Nachwärmeabfuhrsystem hierfür ausgelegt ist und aus Gründen der Anlagenverfügbarkeit und des Investitionsschutzes eine sehr hohe Verfügbarkeit besitzt.

Als wesentlich mitbestimmend für das radiologische Risiko des HTR-100 erwiesen sich Störfallabläufe, die von einem Heizrohrleck am Dampferzeuger ausgelöst werden und eine Wiederfreisetzung von Teilen der Spaltprodukte zur Folge haben, die während des Betriebes auf der Dampferzeugeroberfläche abgelagert wurden.

Die höchsten Freisetzungen bezüglich Edelgasen und Jod hat eine Ereigniskette zur Folge, die dadurch entsteht, daß die Entlastung des Dampferzeugers über die beiden Druckreduzierstationen versagt und der Druck im Dampferzeuger aufgrund der Weiterbeheizung durch die Naturkonvektion bis zum Ansprechen der Frischdampf-Sicherheitsventile ansteigt.

Falls das Ventil im defekten Strang dann in Offenstellung versagt, entsteht eine direkte Verbindung zwischen Primärkreislauf und Umgebung. Die Folge ist eine langsame Druckentlastung des Primärkreislaufs über das Leck und das offene Sicherheitsventil. Während der Druckentlastung kommt es aufgrund der raschen

Abkühlung des Primärkreislaufs über den intakten Dampferzeugerstrang vorübergehend zur Kondensation am Dampferzeuger, was dazu führt, daß etwa 6 % der dort abgelagerten metallischen Spaltprodukte abgelöst werden. An radiologisch relevanten Nukliden werden dabei 78 GBq Cäsium-137, 1,2 GBq Strontium-90 und 880 GBq Jod-131 bodennah freigesetzt. Von der angegebenen Jodmenge stammen mehr als 90 % aus der "Hydrolyse" von Brennstoffpartikeln mit defekter Beschichtung. Die Häufigkeit der beschriebenen Kette ist mit rund  $2 \cdot 10^{-7}$  pro Anlage und Jahr zu erwarten.

Hinsichtlich der Cäsium-Freisetzung dominiert eine von einem Dampferzeugerleck induzierte Kette, in deren Verlauf die Bespeisung des intakten Dampferzeugerstranges ausfällt und aufgrund eines defekten Entlastungsventils ein Teil des Gasgemisches aus dem Primärkreislauf in die Umgebung gelangt. Die hohen Temperaturen der Dampferzeuger-Heizrohre führen zu einer verstärkten Remobilisierung abgelagerter Spaltprodukte. Die ermittelten Freisetzungswerte betragen 410 GBq CS-137, 6,5 GBq Sr-90 und 95 GBq J-131; der Freisetzungspfad führt über den Kamin. Der Ablauf, dessen Häufigkeit ebenfalls bei  $2 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr liegt, liefert mit rund 40 % den größten Einzelbeitrag zum Kollektivrisiko.

Einen nahezu gleichgroßen Beitrag liefert aufgrund seiner relativ großen Häufigkeit ( $1 \cdot 10^{-5}$ /Anlagenjahr) ein größeres ( $\leq 33 \text{ cm}^2$ ) Leck in der Gasreinigungsanlage. Bis zur automatischen Absperrung wird kontaminierter Staub und ein Teil der Kühlgasaktivität ungefiltert über den Kamin freigesetzt. Davon abzugrenzen sind Störfallabläufe infolge kleiner Lecks ( $\leq 1 \text{ cm}^2$ ) mit Gebäudeentlastung über Aerosolfilter. In beiden Fällen sind die Mengen freigesetzter radioaktiver Stoffe jedoch so gering, daß sie noch als Auslegungstörfälle im Sinne des § 28.3 der Strahlenschutzverordnung beherrscht werden. Dies ist deshalb wichtig, weil sie von ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit her vermutlich als solche Störfälle einzustufen sind.

Der Beitrag zum Risiko, der möglicherweise durch Erdbeben verursacht wird, erwies sich als vernachlässigbar. Als denkbare Freisetzungskette wurde das erdbebenbedingte Versagen der Dampferzeuger-Abstützung in Verbindung mit dem Abriß der vier Sammelleitungen und einem Rohrleitungsbruch im nicht gegen Erdbeben ausgelegten Teil des Dampfkreislaufes identifiziert. Die Teildruckentlastung bis zur Schließung der Dampfarmaturen setzt aber nur sehr kleine Mengen radioaktiver Stoffe frei. Ohnehin fällt die Kette in einen Häufigkeitsbereich, der in Risikoanalysen üblicherweise nicht mehr betrachtet wird.

Die Umgebungsbelastungen für alle risikorelevanten Störfälle sind so niedrig, daß die Unfallfolgenrechnungen keine letalen Strahlendosen und praktisch keine stochastischen Schäden mit Todesfolge ausweisen. Bei diesen Rechnungen wurden weder akute Schutzmaßnahmen noch langfristige Umsiedlung oder Dekontamination angenommen; solche Maßnahmen sind also zur Vermeidung von Todesfällen nicht notwendig.

Das durch eine HTR-100-Anlage verursachte radiologische Risiko ist demnach als sehr gering einzustufen. Die als repräsentativ ausgewählten auslösenden Ereignisse und die im Detail untersuchten Ereignisabläufe erfassen das risikorelevante Ereignisspektrum bis in den hypothetischen Bereich hinein.



## INHALTSÜBERSICHT

### Vorwort

- I Ereignisabläufe und Systemanalysen
- II Thermodynamik des Primärkreislaufes und  
Komponentenbelastung
- III Vorgänge bei Dampferzeugerleckagen
- IV Ermittlung des durch Erdbeben verursachten  
Risikobeitrages
- V Spaltproduktfreisetzung aus dem Core des HTR-100 unter  
Normalbetriebs- und Störfallbedingungen
- VI Quellterme und Auswirkungen für Druckentlastungs-,  
Wassereinbruch- sowie Transientenstörfälle/Unfälle



## VORWORT

Das damalige Institut für Nukleare Sicherheitsforschung (ISF) der KFA, heute Bestandteil des neugegründeten Instituts für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik (ISR), hat auf Anregung der Firma ABB/HRB eine risikoorientierte Analyse zum Störfallverhalten des HTR-100 erstellt. Aus Praktikabilitätsgründen wurde Ende 1988 zunächst ein zusammenfassender Bericht vorgelegt /1/, dessen Erstellung Rückwirkungen auf die damals schon entworfenen Fachbeiträge hatte.

Der vorliegende Band enthält nun die daraufhin überarbeiteten Einzelbeiträge, auf denen der oben zitierte Bericht basiert. Er soll zu einem vertieften Verständnis der Analyse beitragen und die Einzelarbeiten zitierfähig machen.

Inzwischen entsprechen die Untersuchungen nicht mehr dem neuesten Kenntnisstand; beispielsweise ist jetzt die Freisetzung aus Brennstoffpartikeln durch Oxidationsvorgänge deutlich geringer anzusetzen /2/. Dennoch haben die Analysen wegen der Besonderheiten der Anlage - etwa der oberhalb des Cores angeordnete Dampferzeuger - auch über den unmittelbaren Anlaß hinaus ihren Wert für die Konzeption und die Beurteilung ähnlicher Konzepte.

- /1/ Zum Störfallverhalten des HTR-100 - Eine risikoorientierte Analyse -  
Jül-Spez-477, ISSN 0343-7639
- /2/ S. Drecker, R. Koschmieder, G. Meister, R. Moormann:  
Fission Product Release in HTR Steam Ingress Events by  
UO<sub>2</sub>-Oxidation  
Jahrestagung Kerntechnik 1991, Tagungsbericht, ISSN 0720-9207



# **I. EREIGNISABLÄUFE UND SYSTEMANALYSEN**

von

R. Bongartz, W. Hennings, J. Marx, J. Mertens

1. ANLAGENBESCHREIBUNG
2. EREIGNISABLÄUFE
3. ZUVERLÄSSIGKEITSANALYSEN



# 1. ANLAGENBESCHREIBUNG

von  
J. Mertens

## Inhalt

## Seite

|       |                                                                      |      |
|-------|----------------------------------------------------------------------|------|
| 1.0   | Einleitung                                                           | 1-1  |
| 1.1   | Überblick                                                            | 1-1  |
| 1.2   | Auslegung der Reaktoren und Primärkreisläufe                         | 1-1  |
| 1.3   | Aufbau und Auslegung des Sekundärkreises<br>(Dampfkraftanlage)       | 1-4  |
| 1.4   | Sicherheitskonzept                                                   | 1-6  |
| 1.5   | Schutz gegen Einwirkungen von außen (EVA)                            | 1-18 |
| 1.6   | Konzept zur Störfallbeherrschung                                     | 1-18 |
| 1.6.1 | Wirkungsweise der Sicherheitssysteme bei der<br>Störfallbeherrschung | 1-19 |
| 1.6.2 | Wirkungsweise von Betriebssystemen bei der<br>Störfallbeherrschung   | 1-21 |
|       | Literatur                                                            | 1-23 |





## 1.0 Einleitung

Dieses Kapitel enthält eine knappe Beschreibung der Anlage sowie eine Darstellung des Sicherheits- und des Störfallbeherrschungskonzeptes und ist im wesentlichen als Zusammenfassung der entsprechenden Abschnitte von /1/ zu verstehen.

### 1.1 Überblick

Der HTR-100 ist als Doppelblockanlage konzipiert und soll zur parallelen Produktion von Prozeßdampf und Strom genutzt werden; die Anlage leistet 516 MW(th).

Die Abbildung 1-1 zeigt den Grundriß der Gesamtanlage und einen Längsschnitt in der Ebene eines Reaktors. Das Reaktorgebäude umschließt zwei identisch aufgebaute Hallen, die je einen Reaktor enthalten; deren Druckbehälter sind in zylindrischen Betonkavernen angebracht, die als biologische Schilde dienen.

Das Reaktornebengebäude enthält im wesentlichen die betrieblichen Ver- und Entsorgungssysteme und Hilfseinrichtungen für die Reaktoranlage.

Im Zwischengebäude sind im wesentlichen das An- und Abfahrssystem und das Speisewassersystem angeordnet. Es ist konventionell ausgelegt.

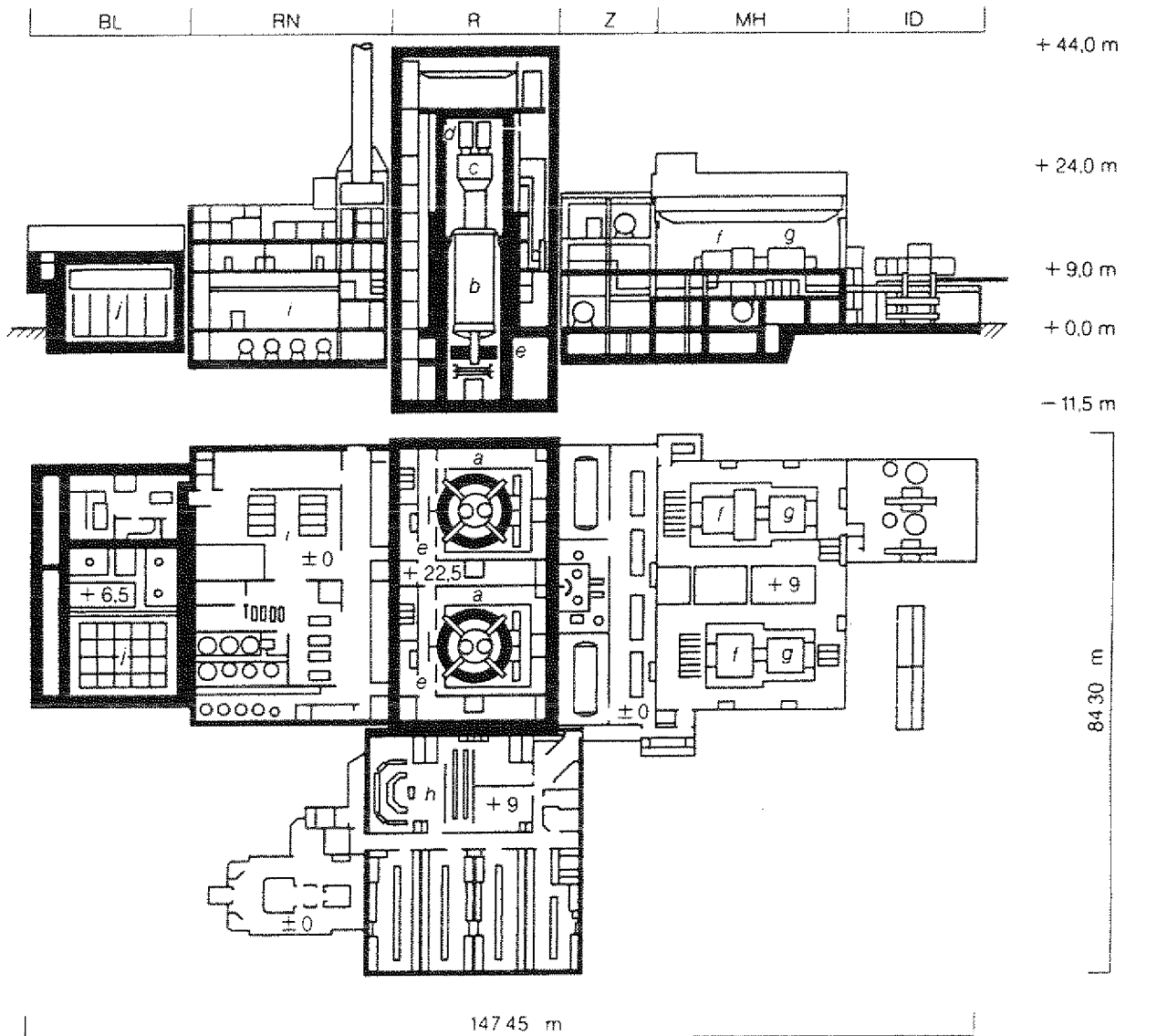
Im Maschinenhaus sind eine Hochdruckturbine und eine Mittel/Niederdruckturbine mit ihren Generatoren angeordnet.

Das Industriedampfgebäude enthält die Wärmetauscher, Behälter und Pumpen zur Erzeugung des Industriedampfes. Große Komponenten ragen ins Freie.

### 1.2 Auslegung der Reaktoren und Primärkreisläufe

Die beiden zu einer HTR-100-Anlage gehörenden Reaktoren und Primärkreisläufe haben folgende Hauptmerkmale:

1-2



a - Reaktordruckbehälter  
b - Reaktor  
c - Dampferzeuger  
d - Gebläse  
e - Biologischer Schild

f - Turbine  
g - Generator  
h - Warte  
i - Heiße Werkstatt  
j - Faßlager

BL - Brennelementlagergebäude  
RN - Reaktornebengebäude  
R - Reaktorgebäude  
Z - Zwischengebäude  
MH - Maschinenhaus  
ID - Industriedampfgebäude

Abb. 1-1: Grundriß und Längsschnitt der Gesamtanlage

- alle Komponenten des Primärkreislaufs sind in einem Stahl-druckbehälter angeordnet,
- der Dampferzeuger mit Abwärtsverdampfung befindet sich oberhalb des Kerns und ist aus zwei getrennt bespeisbaren Strängen aufgebaut; das Kühlgas Helium strömt von unten nach oben und wird von zwei Gebläsen umgewälzt,
- das Core wird im Mehrfachdurchlauf beschickt; Coreleistung und Coregeometrie sind so gewählt, daß der Ausfall der Zwangskühlung sowohl bei Reaktor unter Druck als auch bei druckentlastetem Reaktor im Sinne eines Auslegungsstörfalles beherrscht werden kann,
- der Reaktor ist uneingeschränkt durch Einsatz von Absorbern im Seitenreflektor abschaltbar, wobei zur Kaltabschaltung kleine Absorberkugeln (KLAK) in Reflektorvorsprünge ("Nasen") eingebracht werden. Teile des ersten Abschaltsystems, das aus Stäben in Reflektorbohrungen besteht, dienen auch zur Leistungsregelung.

Für das Primärsystem einschließlich des Dampferzeugers gelten folgende Hauptauslegungsdaten, jeweils bezogen auf ein Core:

|                                                                             |                       |                                    |                |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------|
| Thermische Leistung                                                         | 258 MW                | Mittlere Anfangsanreicherung       | 9 Gew.-Prozent |
| Durchmesser und Höhe des aktiven Kerns                                      | 3,4 bzw. 8,0 m        | Mittlerer Abbrand                  | 99,4 GWd/t     |
| Vorsprünge des Seitenreflektors, über die ganze Corehöhe reichend ('Nasen') | 4                     | Überschußreaktivität               | 1,8 %Δk/k      |
| Leistungsdichte (mittel)                                                    | 4,2 MW/m <sup>3</sup> | Reflektorstäbe                     | 24             |
| Heliumtemperatur kalt/heiß                                                  | 255/740 °C            | -davon zur Regelung                | 8              |
| Gasdurchsatz                                                                | 103 kg/s              | Systeme mit kleinen Absorberkugeln | 4              |
| Systemdruck                                                                 | 70 bar                | Speisewasser                       |                |
| Brennstoff                                                                  | UO <sub>2</sub>       | -Massenstrom (je Strang)           | 50,6 kg/s      |
| Partikeltyp                                                                 | Triso                 | -Temperatur                        | 180 °C         |
| Schwermetall pro Brennelement                                               | 14,5 g                | Frischdampf                        |                |
| Anteil an Graphitelementen                                                  | 45%                   | -Temperatur                        | 530 °C         |
|                                                                             |                       | -Druck                             | 190 bar        |

### 1.3 Aufbau und Auslegung des Sekundärkreises (Dampfkraftanlage)

In der Dampfkraftanlage sollen nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung aus Frischdampf der beiden Reaktoren (180 bar/525°C) über eine Hochdruck(HD)- und eine Mittel/Niederdruck(MD/ND)-Turbine

- Industriedampf von 270°C, 16 bar mit einem Massenstrom von 170-500 t/h und
- Strom von ca. 175-100 MW elektrischer Bruttoleistung erzeugt werden.

Zur Erfüllung einer hohen Verfügbarkeit ist der Wasser-Dampf-Kreislauf weitgehend zweisträngig aufgebaut. Die Schaltung ist so ausgeführt, daß

- bei Abschaltung einer Reaktoranlage oder
- bei Ausfall eines Dampferzeugerbündels oder
- bei Ausfall der HD- oder MD/ND-Turbine oder
- bei Herausschaltung eines Frischdampf(FD)-Stranges zwecks Prüfungen

die Dampfkraftanlage für Strom- und Dampferzeugung weitergefahren werden kann. Abbildung 1-2 zeigt die Prinzipschaltung.

Der Frischdampf von beiden Dampferzeugern strömt über einen gemeinsamen Sammler in eine HD-Gegendruck-Entnahmeturbine und von dort zu einer MD/ND-Entnahme-Kondensationsturbine.

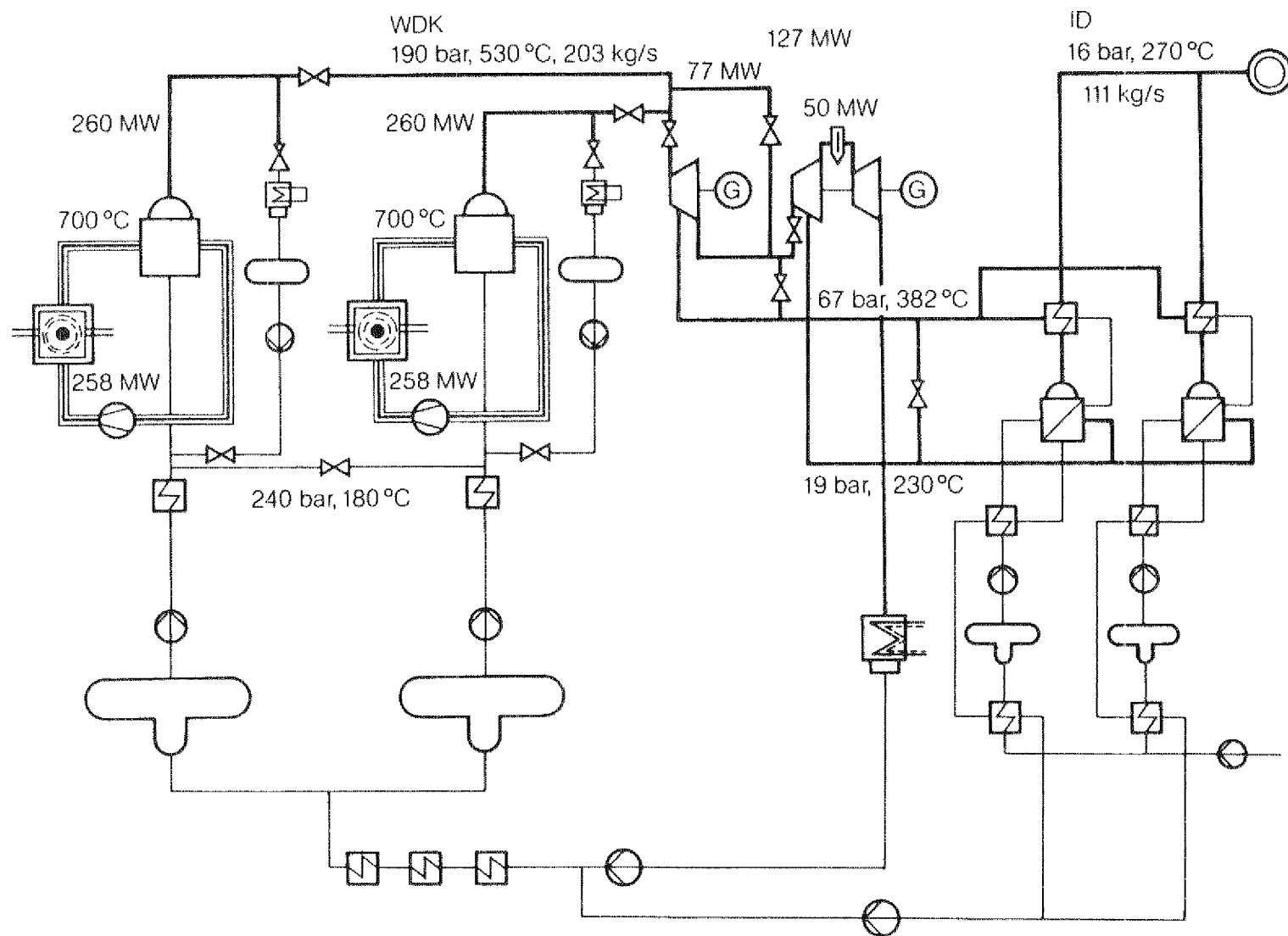
Der Abdampf der MD/ND-Turbine wird in einem Luftkondensator niedergeschlagen; das Kondensat wird nach Entgasung und mehreren Vorwärmungen wieder als Speisewasser in die beiden Dampferzeuger gefördert. Jeder Reaktor hat einen eigenen Speisewasserstrang.

Die Industriedampfanlage ist zwecks hoher Verfügbarkeit ebenfalls zweisträngig aufgebaut. Das rücklaufseitig aus dem Indu

Abb. 1-2: Prinzipschaltbild des Wasser/Dampf-Kreislaufs

WDK = Wasser-Dampf-Kreislauf

ID = Industriedampfsystem



strieddampfnetz kommende Kondensat wird vorgewärmt und in einem Dampfumformer mit anschließendem Überhitzer in Dampf überführt.

Der Heizdampf für den Überhitzer wird aus einer Anzapfung der HD-Turbine, derjenige für den Dampfumformer aus einer Anzapfung der MD/ND-Turbine geregelt entnommen. Das anfallende Kondensat wird in den Wasser-Dampf-Kreislauf zurückgefördert. Der Industriedampf-Kreislauf ist somit vom Wasser-Dampf-Kreislauf über die Wärmetauscher entkoppelt, so daß beide Kreisläufe mit unterschiedlicher Wasserqualität gefahren werden können.

Dieser weitgehend zweisträngige Aufbau der gesamten Dampfkraftanlage ermöglicht einen Weiterbetrieb der Anlage auch bei Revision einzelner Anlagebereiche und bei betrieblichen Störungen; so kann beispielsweise ein Frischdampfstrang mit zugehörigem Reaktor für Revision unter Weiterbetrieb des zweiten Reaktors herausgeschaltet werden.

#### 1.4 Sicherheitskonzept

Die Abbildung 1-3 zeigt ein vereinfachtes Schema der Gesamtanlage. Die Tabelle 1-1 enthält eine Auflistung mehrsträngiger Systeme mit der Angabe ihres Redundanzgrades.

#### Abschaltung

Der HTR-100 hat - wie auch bei anderen Konzepten üblich - zwei Abschaltssysteme, von denen das erste zur Schnellabschaltung und zur Regelung und das zweite zur Langzeitabschaltung dient. Das erste System umfaßt 24 Reflektorstäbe, von denen 16 ständig zur Schnellabschaltung reserviert und ganz ausgefahren sind. Das zweite System besteht aus insgesamt 2.4 Millionen kleinen Absorberkugeln, verteilt auf vier Behälter, die zur Langzeitabschaltung in Bohrungen der Graphitnasen fallengelassen und zum Anfahren des Reaktors pneumatisch zurückgefördert werden.

Das zweite Abschaltssystem muß auch bei Reaktivitätsstörfällen eingesetzt werden, wenn der Reaktor ohne Einschränkungen abgekühlt werden soll.

| System                                                                                                    | Zahl der Stränge und Leistung pro Strang                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Betonkühlsystem                                                                                           | nominell 2 x 50 %,                                                         |
| als NWA-Sicherheitssystem pro Core                                                                        | wahrscheinliche Wirksamkeit nach Untersuchungen des Herstellers: 2 x 100 % |
| Einrichtungen zur sekundärseitigen Druckentlastung als Vorbereitung zur NWA mit dem An- und Abfahrssystem |                                                                            |
| pro Reaktor                                                                                               | 2 x 100 %<br>(1 x 100 % bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung)            |
| An- und Abfahrssystem im NWA-Betrieb                                                                      |                                                                            |
| pro Core, ohne Abfahren des 2. Reaktors                                                                   | 1 x 200 %<br>(theoretische Leistungsfähigkeit)                             |
| pro Core, mit Abfahren des 2. Reaktors                                                                    | 2 x 200 %                                                                  |
| pro Doppelblockanlage                                                                                     | 2 x 100 %                                                                  |
| Druckentlastungssystem des Reaktor-druckbehälters                                                         |                                                                            |
| Sicherheitsventile zum Gaslager, bezogen auf Auslegungsstörfälle                                          | 3 x 100 %                                                                  |
| Bedarfsfiltersystem des Reaktorgebäudes                                                                   |                                                                            |
| pro Doppelblockanlage                                                                                     | 3 x 33 %                                                                   |
| Hilfsstromversorgung                                                                                      |                                                                            |
| pro Reaktor                                                                                               | 2 x 100 %                                                                  |
| Notstromversorgung                                                                                        | 2 x 100 %                                                                  |

Tabelle 1-1: Redundanzgrade mehrsträngiger Systeme

Legende zu Abbildung 1-3

- (1) Core
- (2) Dampferzeuger (zweistufig)
- (3) Gebläse
- (4) Reaktordruckbehälter (auch: Druckführende Umschließung)
- (5) Betonkühlsystem
- (6) Flächenkühler
- (7) Zwischenkühler
- (8) Vorratsbehälter
- (9) Abblaseventil
- (10) Biologischer Schild
- (11) Reaktorgebäude
- (12) Primärkreis-Sicherheitsventil
- (13) Primärkreis-Entlastungsventil
- (14) Gasreinigungsanlage
- (15) Lagerbehälter (Teil der druckführenden Umschließung bei Primärkreis-Druckentlastung)
- (16) Zuluftanlage
- (17) Abluftanlage
- (18) Bedarfsfilteranlage
- (19) Abluftkamin
- (20) Druckstoßventil
- (21) Druckstoßklappe
- (22) Betriebskühlwassersystem primär
- (23) Nebenkühlwassersystem
- (24) Zellenkühlsystem
- (25) An- und Abfahrssystem (AuAS)
- (26) Entlastungsregelventil
- (27) AuAS-Reduzierstation
- (28) AuAS-Dampfkondensator
- (29) AuAS-Speisewasserbehälter
- (30) AuAS-Speisewasserpumpen
- (31) Wasser-Dampf-Kreislauf
- (32) Kondensatpumpen
- (33) Speisewasserbehälter (Reaktor A)
- (34) Speisewasserpumpen (Reaktor A)
- (35) Frischdampf-Sicherheitsventil
- (36) Hochdruck-Umleitstation (Abblasen in Industriedampfkreis)
- (37) Verbindungsleitung (wasserseitig) der AuAS von Reaktor A und B
- (38) Verbindungsleitung (dampfseitig) der AuAS von Reaktor A und B



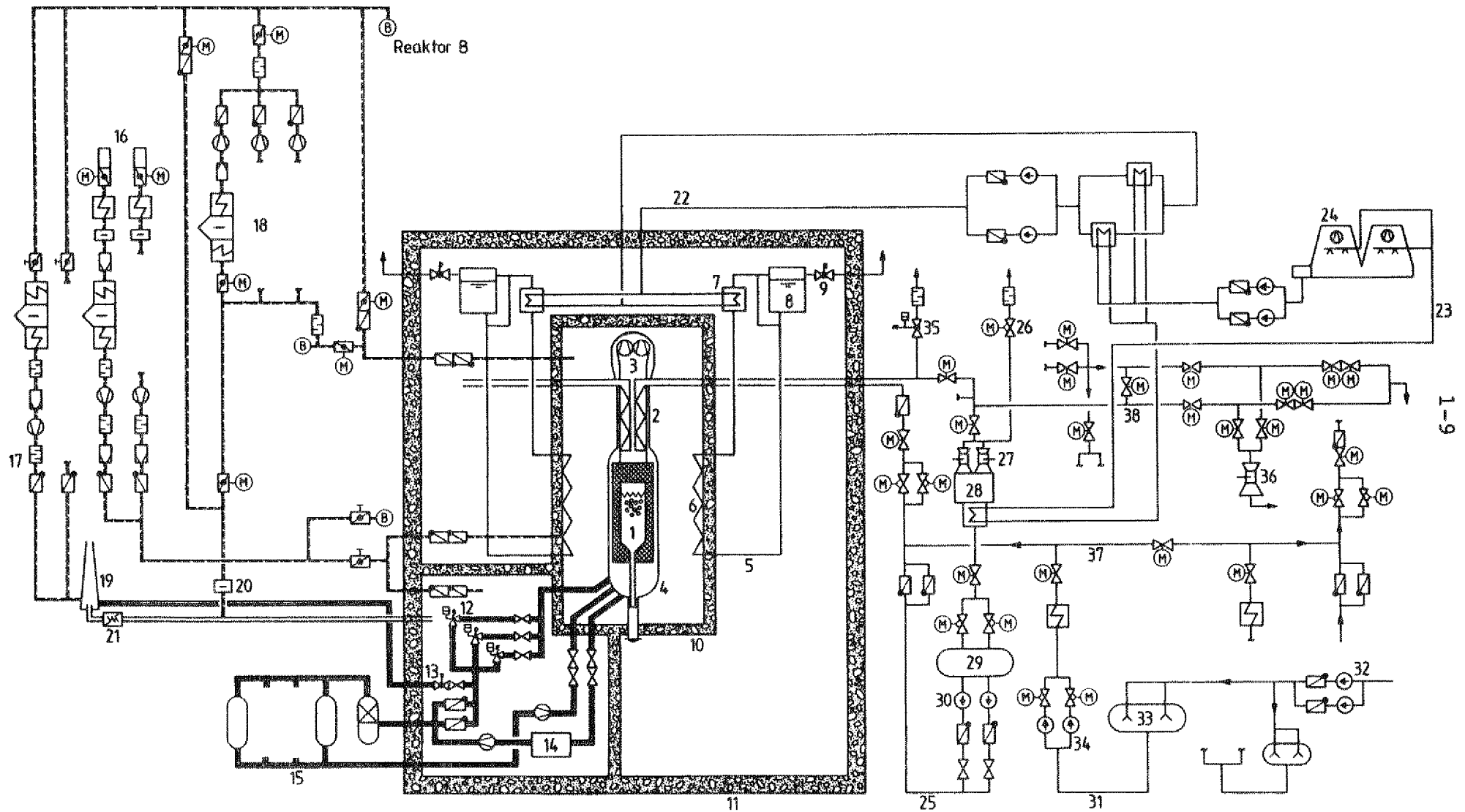


Abb. 1-3: Schematische Darstellung der Gesamtanlage

### Nachwärmeabfuhr

Die Nachzerfallswärme nach Reaktorabschaltungen kann beim HTR-100 auf zwei verschiedenen Wegen abgeführt werden, und zwar über die Dampferzeuger oder über das Betonkühlsystem der Reaktorzelle.

Beim Abfahren des Kraftwerkes aus dem Normalbetrieb werden die Coreleistung und der Wasser-Dampf-Kreislauf parallel von 100 % auf ca. 10 % geregelt langsam zurückgefahren. Danach erfolgt die Umschaltung auf das betriebliche An- und Abfahrssystem. Der Naßdampf wird im Dampfkondensator des An- und Abfahrssystems niedergeschlagen und über das Nebenkühlwassersystem mit Zellenkühler rückgekühlt. Das Kondensat wird über die Speisewasserleitung dem Dampferzeuger wiederzugeführt, so daß der An- und Abfahrkreislauf in sich geschlossen ist.

Auch bei betrieblichen Störungen und den meisten Störfällen mit Reaktorschnellabschaltung wird die Nachwärme über das betriebliche An- und Abfahrssystem (AuAS) abgeführt.

Gleichzeitig mit der Auslösung einer Reaktorschnellabschaltung wird als automatische Aktion das Schnellabfahren des Reaktors als Vorbereitung der langfristigen Nachwärmeabfuhr mit dem An- und Abfahrssystem (AuAS) eingeleitet. Dazu werden der Kühlmittel- und Speisewasserdurchsatz auf eine Mindestmenge reduziert, die Frischdampfleitung zur Turbine wird abgesperrt und der Frischdampfdruck wird über die Umleitstation von 190 auf 120 bar abgesenkt. Anschließend wird nach einigen Schaltmaßnahmen die Nachzerfallswärme mit dem An- und Abfahrssystem abgeführt.

Kommt die Druckabsenkung über den betrieblichen Sekundärkreis nicht ordnungsgemäß zustande, wird sofort das AuAS angefordert. Die Absenkung des Dampfdruckes erfolgt dann über das Entlastungsregelventil des AuAS.

Zu jedem der beiden Reaktoren einer Doppelblockanlage gehört je ein An- und Abfahrssystem mit eigener Nachkühlkette. Jedes der Systeme kann den zugehörigen oder beide Reaktoren kühlen. Die

einzelnen AuAS haben teilweise redundante Komponenten, sind aber im Prinzip einsträngig. Die beiden Systeme zusammen stellen hinsichtlich Dampferzeugerbespeisung und Zahl der Wärmesenken sowohl für einen einzelnen Reaktor als auch für beide zusammen ein redundantes NWA-System dar. Die Nutzung des jeweils anderen AuAS zur NWA aus einem Core erfordert allerdings das vorherige Abfahren auch des anderen Reaktors. Außerdem sind Umschaltmaßnahmen nötig, und die beiden An- und Abfahrssysteme sind streckenweise vermascht, wenn sie als redundante Systeme genutzt werden sollen.

Pro Reaktor sind zwei Helium-Umwälzgebläse vorgesehen. Bei Ausfall beider Gebläse ist der Wärmetransport aus dem Reaktor an den Dampferzeuger durch Naturkonvektion innerhalb des Primärkreises ausreichend, um die Nachzerfallswärme mit dem An- und Abfahrssystem abzuführen. Im Druckentlastungsstörfall reicht ein Gebläse zur Wärmeübertragung an den Dampferzeuger aus. Bei Ausfall eines Dampferzeugerstranges kann in allen Fällen mit dem verbleibenden zweiten Strang die Nachzerfallswärme abgeführt werden.

Bei Nichtverfügbarkeit des An- und Abfahrssystems wird die Nachzerfallswärme über ein Kühlsystem auf der Innenseite des biologischen Schildes (Betonkühlsystem) abgeführt; dies ist der bereits genannte andere Weg der Nachwärmeabfuhr. Die Nachzerfallswärme wird hierbei aus dem Reaktorkern durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion über die Außenwand des Reaktordruckbehälters an den Flächenkühler des Betonkühlsystems transportiert. Das im Naturumlauf strömende Wasser des Betonkühlsystems wird rückgekühlt oder bindet bei Ausfall dieser Rückkühlung die Wärme durch Verdampfung; aus einem Vorratsbehälter fließt kaltes Wasser in den Flächenkühler nach. Der Wasserinhalt des Vorratsbehälters reicht für eine Nachwärmeabfuhr bis zu zwei Tagen ohne die mögliche Nachspeisung aus.

Das Betonkühlsystem, das im Normalbetrieb die Verlustwärme des Reaktors abführt und so den Beton vor zu hohen Temperaturen

schützt, ist zweisträngig vorhanden und benötigt als NWA-System im offenen Kreislauf keine angetriebenen Komponenten.

Aus Gründen des Komponentenschutzes (vgl. Kapitel II) ist die NWA über das Betonkühlssystem nur für seltene Fälle geplant.

### Aktivitätseinschluß

Die erste Spaltproduktbarriere ist die Beschichtung der coated particles in den Brennelementen. Diese Eigenschaft von HTR-Brennelementen ist vielfach beschrieben, beispielsweise in /2/, und da es beim HTR-100-Konzept keine speziellen Aspekte gibt, wird hier nicht weiter auf diese Barriere eingegangen.

Weitere Barrieren sind der Reaktordruckbehälter und das Reaktorschutzgebäude mit seiner Raumunterteilung.

Der Reaktordruckbehälter besteht aus dem Werkstoff 20 MnMoNi 55 und ist zur Druckbegrenzung und Verhinderung einer Überbeanspruchung mit einem redundanten Druckentlastungssystem in Form von drei Sicherheitsventilen mit Ansprechdrücken von 77,0, 80,4 und 83,8 bar ausgestattet. Auslegungsbestimmend für das Druckentlastungssystem ist der durch Ausfall der Nachwärmeabfuhr resultierende Druckanstieg im Reaktordruckbehälter. Das Abblasen der Sicherheitsventile erfolgt über Rückschlagklappen in Helium-Lagerbehälter der Gasreinigungsanlage. In der Abblassestrecke befindet sich ein Entlastungsventil zum Kamin (in Form eines Sicherheitsventils) mit einem Ansprechdruck von 85 bar.

Die Dichtungen der Behälterabschlüsse des Reaktordruckbehälters werden auf Leckagen überwacht, so daß entstehende Undichtigkeiten am Primärsystem zuverlässig und frühzeitig erkannt werden.

Ebenfalls zur Einschließung des Reaktorkühlmittels gehören die Leitungen der Gasreinigungsanlage und der Beschickungsanlage einschließlich deren Absperrarmaturen sowie die vor diesen Absperrarmaturen oder am Reaktordruckbehälter direkt anschließenden Meßrohrleitungen einschließlich deren Absperrarmaturen. Sie werden so ausgelegt, daß zwar Leckagen auftreten können, der

freie Druckentlastungsquerschnitt aber auf maximal  $1 \text{ cm}^2$  begrenzt bleibt.

Aufgrund der Anlagenkonzeption ergeben sich drei vom Hersteller deterministisch unterschiedene Raumkategorien im Kontrollbereich innerhalb des Reaktorgebäudes.

Kennzeichnend für die Raumkategorie 1 (R1) ist die Auslegung gegen Kühlmittelleckagen über einen maximalen Druckentlastungsquerschnitt von  $33 \text{ cm}^2$ , abgeleitet aus dem Bruch einer Rohrleitung mit DN 65. Die entsprechenden Raumbereiche sind gegen einen inneren Überdruck von 0,5 bar ausgelegt und haben zur Einhaltung dieses Druckes ein automatisch öffnendes und schließendes Entlastungssystem.

Die Raumkategorie 2 (R2) umfaßt Räume mit primärgasführenden Komponenten oder Leitungen, deren Auslegung nur freie Druckentlastungsquerschnitte von  $1 \text{ cm}^2$  zuläßt. Diese Leckagen können gefiltert abgegeben werden. Die normale Abluftanlage enthält Aerosolfilter; bei Störfällen, die eine erhöhte Jodfreisetzung aus den Brennelementen zur Folge haben könnten, wird eine Bedarfsfilteranlage mit Jodfiltern zugeschaltet.

Die Kategorie R1 umfaßt die Räume der Gasreinigungsanlage; zur Kategorie R2 zählt unter anderem die Reaktorkaverne.

### Stromversorgung

Das Stromversorgungskonzept unterscheidet zwischen Betriebsstromversorgung, Hilfsstromversorgung und Notstromversorgung. Bild 1-4 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

Die Betriebsstromversorgung ist zweisträngig aufgebaut und ist so gestaltet, daß bei Störungen nur das Betriebssystem eines Reaktors betroffen wird. Bei mehrsträngigen Betriebssystemen, die keinem Reaktor zugeordnet sind, bleibt ein Strang verfügbar.

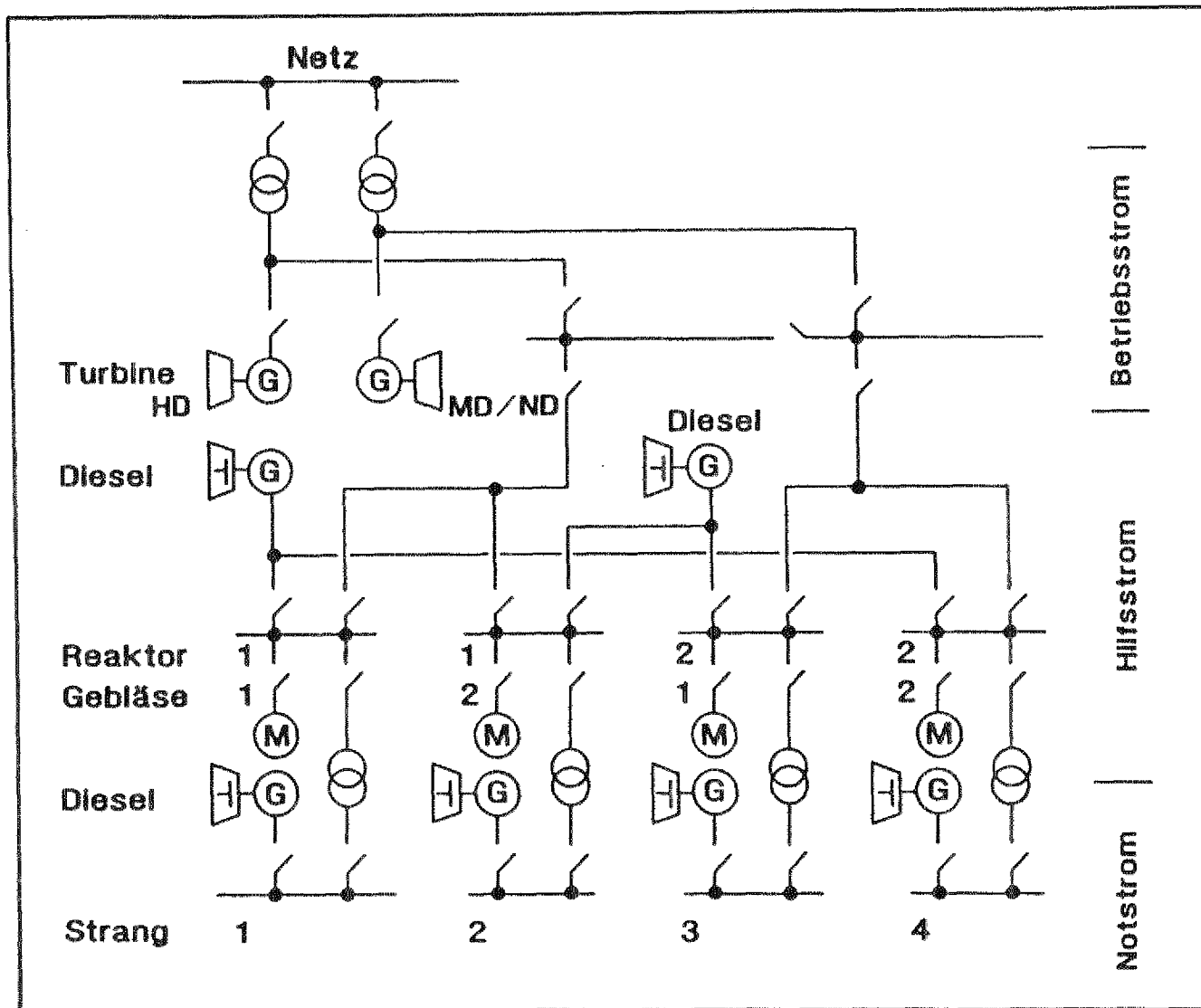


Abb. 1-4: Konzept der Stromversorgung

Die Hilfsstromversorgung ist wie die betriebliche Versorgung zweisträndig aufgebaut. Die Zuordnung der Systeme zur Stromversorgung erfolgt nach dem gleichen Schema wie bei der Betriebsstromversorgung. Bei Netzausfall werden die Schienen der Hilfsstromversorgung über zwei Dieselaggregate versorgt ("große Diesel"). Die Schaltung ist derart gewählt, daß auch bei Ausfall eines Dieselaggregates stets pro Reaktor mindestens ein Gebläse und ein Strang des An- und Abfahrsystems für die Nachwärmeabfuhr betrieben werden können.

Die Notstromversorgung ist viersträndig redundant aufgebaut; sie ist sicherheitsrelevant und entspricht in ihrer Ausführung den Anforderungen des KTA-Regelwerkes. Die Schienen der Notstromversorgung werden bei Ausfall der Einspeisung aus der Hilfsstromversorgung über vier individuell zugeordnete Notstromdieselaggregate ("kleine Diesel") versorgt. Die Dimensionierung dieser Aggregate ist so bemessen, daß über das Reaktorschutzsystem hinaus die gesamte Leitanlage versorgt werden kann.

#### Reaktorschutzsystem, Dampferzeuger-Aggregateschutz

Für jeden der beiden Reaktorblöcke wird ein eigenes, unabhängiges Reaktorschutzsystem (RSS) installiert. Die Reaktorschutzsysteme erkennen Störfälle über geeignete Kriterien und lösen geeignete Schutzaktionen aus. Die Abbildung 1-5 enthält Störungen, Anregekriterien und Schutzaktionen.

Hinzu kommen Schutzaktionen, die vom Dampferzeuger-Aggregateschutz ausgelöst werden (siehe Abbildung 1-6). Die zugehörigen Anregekriterien werden den RSS-Anregekriterien ausführungs- und qualitätsmäßig gleichgestellt.

Das Konzept zur Störfallbeherrschung ist in einem separaten Kapitel (1.6) beschrieben.

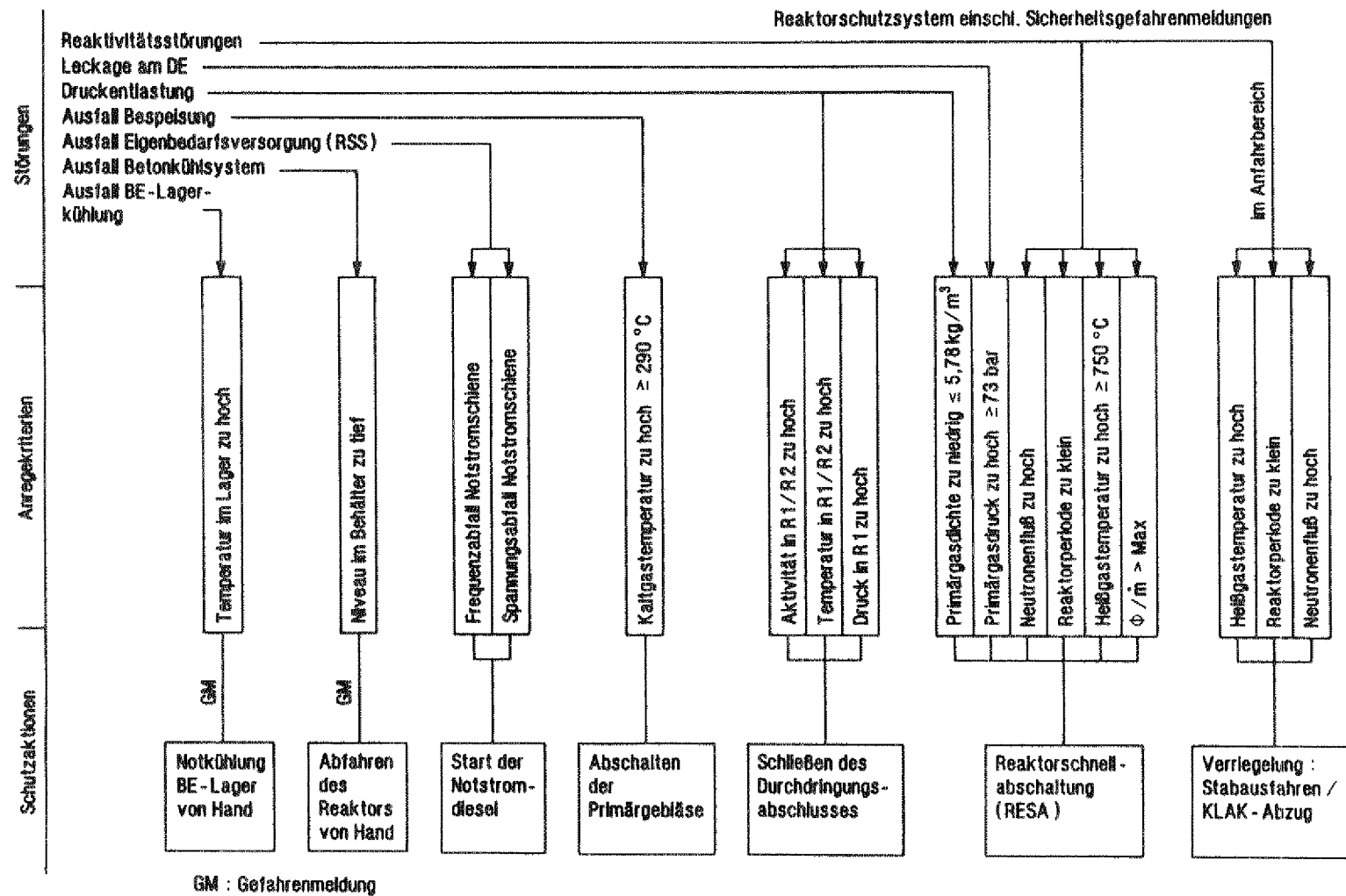


Abb. 1-5: Funktionen der Reaktorschutzsysteme



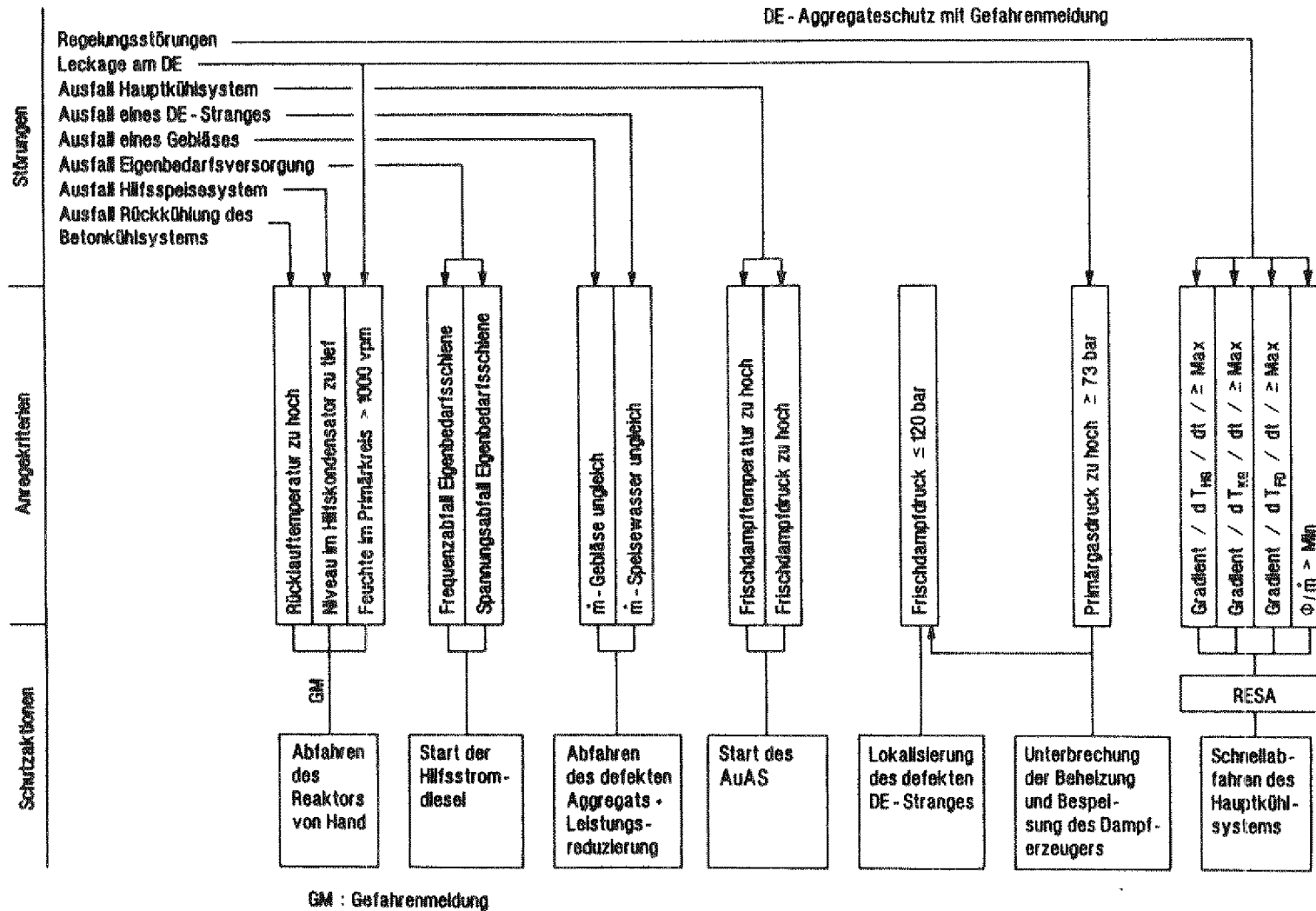


Abb. 1-6: Funktionen des Dampferzeuger-Aggregateschutzes

### 1.5 Schutz gegen Einwirkungen von außen (EVA)

Der EVA-Schutz berücksichtigt naturbedingte und zivilisatorische Einwirkungen wie Erdbeben, Explosionsdruckwellen und Flugzeugabstürze unter Zugrundelegung der üblichen Lastannahmen /3/. Die sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteile werden in entsprechend ausgelegten Gebäuden angeordnet und gegen die verbleibenden EVA-Störfalleffekte ausgelegt.

Voll-EVA-Schutz besteht für das Reaktorgebäude und das Brennelementlagergebäude. Der sicherheitstechnische Teil des Schaltanlagengebäudes ist gegen Erdbeben ausgelegt. Die Bodenwannen der Aktivwasseraufbereitung sowie das Reingaslager, jeweils im Reaktornebengebäude untergebracht, sind gegen unzulässige Folgeschäden ausgelegt.

Weiterhin sind folgende Anlagenteile in vollem Umfang EVA-geschützt:

- der Reaktordruckbehälter einschließlich der Absperrarmaturen seiner Anschlußleitungen
- die Abschaltssysteme
- das Betonkühlsystem (zur Sicherstellung der Nachwärmeabfuhr).

Die sicherheitstechnisch wichtige Leittechnik (RSS/MRS) und ihre Stromversorgung wird im Reaktorschutz- und Schaltanlagengebäude angeordnet und gegen Erdbeben ausgelegt. Die zur Risikominimierung nach Flugzeugabsturz und äußerer Druckwelle erforderlichen leittechnischen Anlagenteile einschließlich ihrer Stromversorgung werden in gegen diese Einwirkungen geschützten Räumen angeordnet.

### 1.6 Konzept zur Störfallbeherrschung

Der Hersteller nennt als Maßnahmen zur Störfallbeherrschung die vier folgenden, grundlegenden Punkte:

- mehrfache Barrieren zum Aktivitätseinschluß
- gestaffelte Maßnahmen der Nachwärmeabfuhr

- ausreichende Maßnahmen zur Erreichung des kalten unterkritischen Zustandes und
- sichere Energieversorgung.

Das Störfallbeherrschungskonzept des Herstellers ist so aufgebaut, daß neben Sicherheitssystemen auch betriebliche Systeme zur Störfallbeherrschung genutzt werden.

Prinzipiell sind jedoch alle Auslegungsstörfälle auch ausschließlich mit Sicherheitssystemen beherrschbar; durch das gestufte Vorgehen möchte der Hersteller diese Situationen hinreichend selten machen.

#### 1.6.1 Wirkungsweise der Sicherheitssysteme bei der Störfallbeherrschung

Beim HTR-100 sind Sicherheitssysteme vorgesehen, um die Einschließung des Reaktorkühlmittels zu gewährleisten (Reaktordruckbehälter mit Druckentlastungseinrichtung, Primärgasleitungen mit erster Absperrarmatur) oder bei bereits begonnenen Störfällen das Abschalten des Reaktors - auch langfristig -, die Abfuhr der Nachzerfallswärme und den Einschluß der Aktivität in der Anlage sicherzustellen. Folgende Anlagenteile werden als Sicherheitssysteme eingestuft:

- Reaktordruckbehälter einschließlich primärgasführende Rohrleitungen mit erster Absperrarmatur
- Druckentlastungseinrichtung des Reaktordruckbehälters
- Einbauten des Reaktordruckbehälters (keramische und metallische)
- Brennelemente
- Reflektorstäbe in der Funktion 'Einfahren'
- Absorberkugelsystem (KLAKE) in den Funktionen 'Abschalten'
- Betonkühlsystem (ohne Rückkühlkette)
- Umluftanlage des Schaltanlagegebäudes (sicherheitsrelevante Teile)

- Druckentlastungssystem des Reaktorgebäudes (Räume der Gasreinigungsanlage)
- Meß-, Regel- und Steuereinrichtungen (Reaktorschutzsystem, Störfallinstrumentierung, Notsteuerstellen)
- Notstromversorgung

Nicht alle diese Systeme werden bei allen Störfällen benötigt.

Folgende störfallauslösenden Ereignisse führen unmittelbar zu einer vom Reaktorschutzsystem ausgelösten Schnellabschaltung:

- Reaktivitätsstörungen im Leistungsbetrieb
- Leckage am Dampferzeuger
- Druckentlastung (über ein Leck im Primärkreislauf).

Als Sicherheitssysteme werden außerdem folgende Einrichtungen speziell angefordert oder benötigt:

Bei Erkennung eines Druckentlastungsstörfalls löst das Reaktorschutzsystem zusätzlich die Absperrung der NW-65-Anschlußleitungen des Reaktordruckbehälters aus. Der auftretende Druckanstieg wird durch das Entlastungssystem des Reaktorgebäudes beherrscht.

Zur Nachwärmeabfuhr wird - im Sinne der Störfallbeherrschung - in allen Fällen das Betonkühlsystem verwendet.

Der Ausfall der Dampferzeugerbespeisung führt über das Reaktorschutzsystem zum Abschalten der Primärgebläse. Der resultierende Druckanstieg im Primärkreislauf wird durch das Druckentlastungssystem des Reaktordruckbehälters beherrscht.

Der Ausfall der Eigenbedarfsversorgung führt zum Start der Notstromdiesel, die das Reaktorschutzsystem versorgen.

Bei Reaktivitätsstörungen im Anfahrbetrieb werden Stabausfahren und KLAKE-Abzug verriegelt.

Weitere Differenzierungen werden vom Reaktorschutzsystem nicht vorgenommen. Mit den beschriebenen Schutzaktionen und Sicher-

heitssystemen werden die Auslegungsstörfälle beim HTR-100 beherrscht.

#### 1.6.2 Wirkungsweise von Betriebssystemen bei der Störfallbeherrschung

Bei Störungen werden auch vom Dampferzeuger-Aggregateschutz über Anregekriterien Schutzaktionen zur Störfallbeherrschung ausgelöst. Diese Schutzaktionen sind

- Reaktorschnellabschaltung und Schnellabfahren des Hauptkühlsystems bei Transienten (mit langfristiger Nachwärmeabfuhr über das An- und Abfahrssystem)
- Start des An- und Abfahrsystems bei Ausfall des Hauptkühlsystems
- spezielle Maßnahmen bei Dampferzeugerlecks (s.u.)
- Start der Hilfsstromdiesel bei Ausfall der Eigenbedarfsversorgung.

Im wesentlichen bedeutet dies die Nachwärmeabfuhr mit dem An- und Abfahrssystem bei allen Störfällen sowie die Sicherstellung der dazu benötigten Energieversorgung. Erst wenn das An- und Abfahrssystem nicht verfügbar ist, erfolgt die Nachwärmeabfuhr ausschließlich über das Betonkühlsystem.

Bei Auftreten eines Dampferzeugerlecks dienen die vom Dampferzeugeraggregateschutz ausgelösten Aktionen darüber hinaus zur Begrenzung der in den Primärkreislauf gelangenden Wassermenge und zur Auswahl des intakten Dampferzeugerstranges für die NWA mit dem An- und Abfahrssystem. Die speziellen Maßnahmen bestehen in der Unterbrechung der Speisewasserzufuhr, im dampfseitigen Isolieren der Dampferzeugerstränge gegeneinander, im Identifizieren des defekten Stranges mittels Druckvergleich sowie im Freischalten des intakten Stranges zur NWA-Bespeisung.

Schäden an Dampferzeugerheizrohren mit sehr kleinen Leckraten werden durch Abfahren der Anlage von Hand (auf Feuchteanzeigen in der Warte hin) beherrscht.

Zu den Betriebssystemen, die zur Störfallbeherrschung eingesetzt werden, zählt auch die Bedarfsfilteranlage des Kontrollbereichs. Sie wird der betrieblichen Abluftanlage mit deren Aerosolfiltern zugeschaltet, enthält zusätzliche Jodfilter und dient zur Abgabe von Leckagen aus dem Primärkreislauf bis zu 0,2 kg/s. Bei kleinen Lecks kann die Gebäudeentlastung auf diese Art ständig gefiltert vorgenommen werden, bei großen Lecks erfolgt die erste Entlastungsphase ungefiltert, danach wird die Abluftanlage benutzt. Auch hier kann gegebenenfalls die Bedarfsfilteranlage zugeschaltet werden.

Literatur

- /1/ HTR-1100-BA-GHRA 001864
- /2/ Schenk, Pitzer, Nabilek:  
Spaltproduktfreisetzungsverlauf von Kugelbrenn-  
elementen bei Störfalltemperaturen  
Jül-2091, Oktober 1986
- /3/ RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren  
(in der Fassung vom 14.10.1981)





## 2. EREIGNISABLÄUFE

von  
J. Mertens

### Inhalt

|                                                                                                        | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 2.1 Wassereinbruchstörfälle                                                                            | 2-1   |
| 2.1.1 Einleitung                                                                                       | 2-1   |
| 2.1.2 Freisetzungspfade                                                                                | 2-2   |
| 2.1.3 Störfallabläufe nach Dampferzeugerlecks als Anforderungsfälle für die RDB-Druckabsicherung       | 2-3   |
| 2.1.4 Störfallabläufe nach Dampferzeugerlecks mit Spaltproduktfreisetzungen über den Sekundärkreislauf | 2-10  |
| 2.1.5 Diskussion spezieller Systemausfälle                                                             | 2-12  |
| 2.1.5.1 Nichtschließen der Frischdampf-Armaturen vor der Turbine                                       | 2-13  |
| 2.1.5.2 Ausfall der Gebläseabschaltung                                                                 | 2-13  |
| 2.1.5.3 Ausfall des Klak-Systems                                                                       | 2-14  |
| 2.1.5.4 Ausfall der Reaktorschnellabschaltung                                                          | 2-14  |
| 2.1.5.5 Ausfall der Störfalldetektion                                                                  | 2-15  |
| 2.1.6 Verhalten des RDB-Entlastungspfades bei Störfallabläufen nach einem Dampferzeuger-Heizrohrleck   | 2-16  |
| 2.1.6.1 Abläufe mit NWA                                                                                | 2-16  |
| 2.1.6.2 Abläufe ohne NWA                                                                               | 2-19  |
| 2.1.7 Zusammenfassung                                                                                  | 2-20  |
| 2.2 Druckentlastungstörfälle                                                                           | 2-22  |
| 2.3 Transienten                                                                                        | 2-24  |
| 2.3.1 Beschreibung der Abläufe                                                                         | 2-24  |
| 2.3.2 Zusammenfassung                                                                                  | 2-27  |
| 2.4 Bildung von Freisetzungskategorien                                                                 | 2-28  |
| Literatur                                                                                              | 2-31  |



## 2.1 Wassereinbruchstörfälle

### 2.1.1 Einleitung

Das spezifische Kennzeichen der Störfallbeherrschung bei Dampferzeugerheizrohrlecks sind Schutzaktionen, die automatisch ausgelöst werden, wenn im Primärkreislauf ein Druckanstieg von drei bar erreicht wird. Die hier vorgestellten Analysen beschränken sich auf Heizrohrlecks, deren Leckrate so groß ist, daß ein normales Handabfahren der Anlage ohne Erreichen dieses Druckwertes nicht mehr möglich ist. Hieraus ergibt sich eine untere Grenze der Leckgröße. Als obere Grenze wurde der Querschnitt eines Heizrohres gewählt. Konservativ wurden die Auswirkungen von Lecks an der oberen Grenze des so definierten Bereiches, der von wenigen  $\text{mm}^2$  und etwa  $2 \text{ cm}^2$  reicht, mit einer gemittelten Häufigkeit ( $10^{-2}/\text{a}$ ) für Lecks innerhalb dieses Spektrums kombiniert.

Durch abdeckende Untersuchungen und Überlegungen wurde sichergestellt, daß durch Lecks innerhalb des gewählten Spektrums die wesentlichen Störfälle ausgelöst werden (vgl. Kapitel III).

Alle angegebenen Häufigkeiten beziehen sich zunächst auf einen Reaktor der Doppelblockanlage; auf die Häufigkeiten bezüglich der Gesamtanlage wird am Schluß des Kapitels 'Wassereinbruchstörfälle' zusammenfassend eingegangen.

Die bereits angesprochene Vielzahl von Schutzaktionen hat bei Ausfällen von Komponenten oder Systemen eine große Zahl verschiedener Störfallabläufe zur Folge. Der besseren Verständlichkeit und Übersichtlichkeit wegen wird im Folgenden anhand der möglichen Freisetzungswege für Spaltprodukte in die Umgebung und anhand der notwendigen Bedingungen für das Entstehen dieser Freisetzungspfade ein Klassifizierungsschema aufgestellt, mit dessen Hilfe die einzelnen Störfallabläufe geordnet werden. Deren jeweilige Besonderheiten werden nur insoweit diskutiert, wie eine Einordnung es erfordert.

Für einen großen Teil der möglichen Ereigniskombinationen wurden Häufigkeiten unter  $10^{-8}/a$  ermittelt. Für die Analysen wurde dieser Wert als Abschneidekriterium gewählt; seltenere Abläufe sind nur dann ausgewiesen, wenn nicht unmittelbar deutlich wird, daß ihre Folgen von Ereignisabläufen mit wesentlich größerer Häufigkeit abgedeckt werden. Bei der Diskussion der ausgewiesenen sehr seltenen Abläufe muß gelegentlich auf Plausibilitätsbetrachtungen zurückgegriffen werden. Vertiefende Untersuchungen waren im Rahmen einer Risikoanalyse mit Vorstudiencharakter wie der vorliegenden nicht möglich und müssen einer umfassenden Studie vorbehalten bleiben.

#### 2.1.2 Freisetzungspfade

Das Störfallbeherrschungskonzept des HTR-100 bei Dampferzeugerheizrohrlecks sieht vor, daß einige Schutzaktionen durch das Reaktorschutzsystem, andere zusätzlich durch den Dampferzeuger-Aggregateschutz ausgelöst werden (vgl. Kapitel I, Abschnitt 1.5). Bei den hier beschriebenen probabilistischen Analysen wurde nicht zwischen diesen beiden Gruppen von Schutzaktionen unterschieden.

Das Störfallbeherrschungskonzept basiert auf folgenden Grundgedanken, die eine Staffelung enthalten:

- Nachwärmeabfuhr möglichst mit dem intakten Dampferzeugerstrang nach Isolierung des defekten Stranges zur Beendigung des Wassereinbruchs
- gleichzeitig Betrieb des Betonkühlsystems als Wärmesenke für den Fall, daß die Nachwärme nicht über den Dampferzeuger abgeführt werden kann
- Abblasen der Primärkreis-Sicherheitsventile in Behälter der Gasreinigungsanlage, falls störfallbedingt der Ansprechdruck der Ventile (gestaffelt ab 77 bar) erreicht wird. Der Abströmpfad in die Behälter führt über zwei parallele Rückschlagklappen; das Gesamtsystem ist gegen Überdruck gesichert

durch ein Entlastungsventil mit einem Ansprechdruck von 85 bar, das direkt in den Kamin abbläst.

Die Störfallablaufanalysen ergaben, daß grundsätzlich zwei Freisetzungspfade in die Umgebung zu unterscheiden sind. Der eine Pfad führt über das Dampferzeugerleck und den Sekundärkreis und kann aus mißglückten Schutzaktionen des Dampferzeuger-Aggregateschutzes resultieren. Der andere Freisetzungsweg führt bei einigen Störfallabläufen über die Druckabsicherung des Reaktordruckbehälters (RDB).

#### 2.1.3 Störfallabläufe nach Dampferzeugerlecks als Anforderungsfälle für die RDB-Druckabsicherung

Thermodynamische Analysen (vgl. Kapitel II und III) haben ergeben, daß bei planmäßig funktionierender Bespeisung des Dampferzeugers auch ohne Einbeziehung der Gaslagerbehälter ein Primärkreislaufdruck von 85 bar nicht erreicht wird. Bei Nichtbespeisung des Dampferzeugers reicht die Behälterkapazität aus, um den sich einstellenden Ausgleichsdruck unter 85 bar zu halten. Lediglich dann, wenn der defekte Dampferzeugerstrang nicht vollständig isoliert wird und daher bei der NWA kontinuierlich Wasser in den Primärkreislauf gelangt, kann es nach einigen Stunden (vgl. Kapitel III) zu einem Ausgleichsdruck von 85 bar kommen.

Die beschriebenen Zusammenhänge erlauben eine Klassifizierung von Ereignisabläufen im Hinblick auf die Anforderungen an die Druckabsicherung des Reaktordruckbehälters.

Die Abbildungen 2-1 und 2-2 zeigen die Ereignisbäume zum auslösenden Ereignis 'Leck in einem Dampferzeuger-Heizrohr'. Sie sind der besseren Übersichtlichkeit wegen zweigeteilt: Bild 2-1 zeigt die Abläufe, bei denen alle Maßnahmen bis zur sekundärseitigen Druckabsenkung über die Hochdruck-Reduzierstation einschließlich gelingen und nur danach Fehler auftreten; Bild 2-2 enthält die restlichen Ereignisketten. Abhängig vom Druckaufbau im Primärkreislauf schließt sich eins der beiden Ereignis-



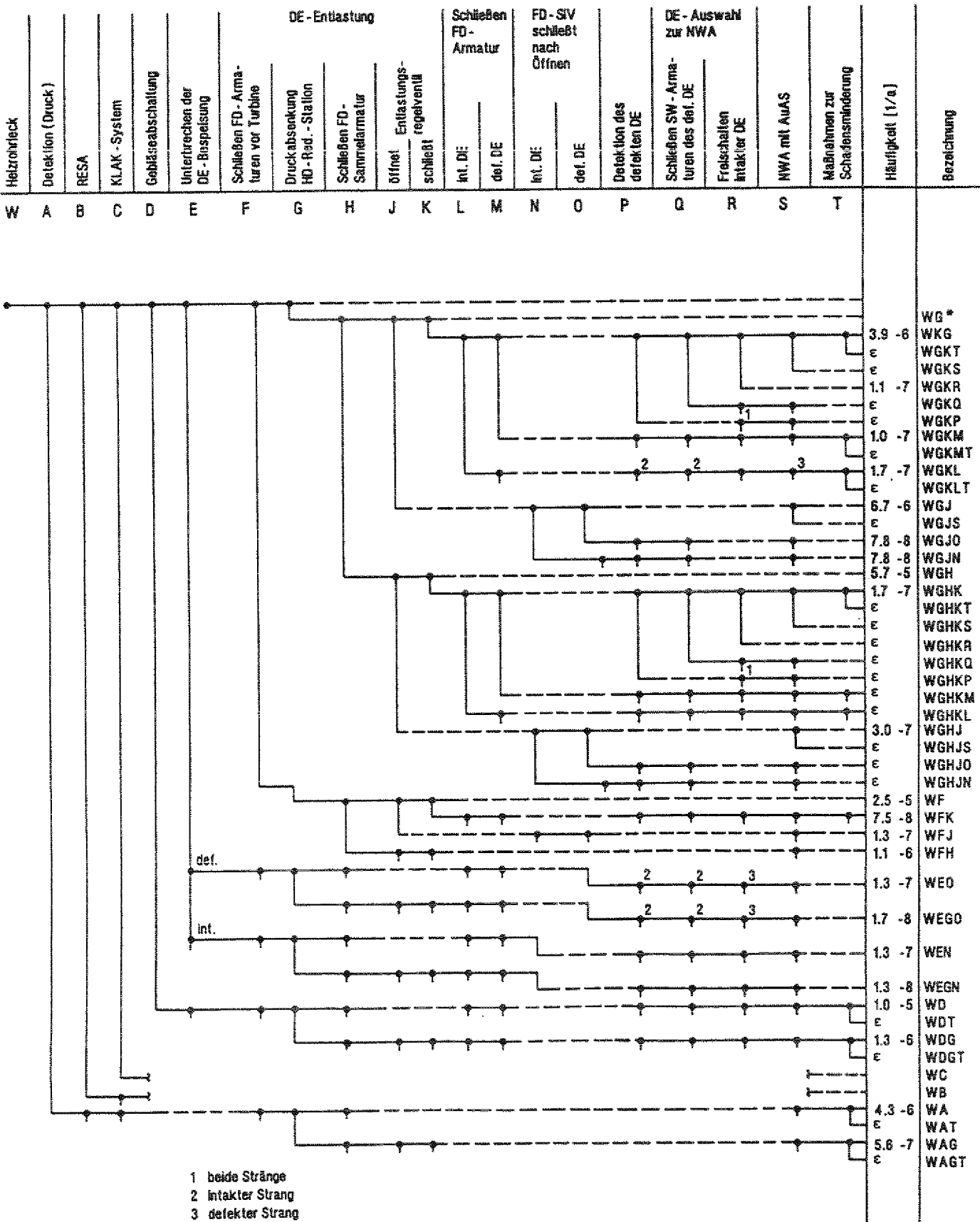
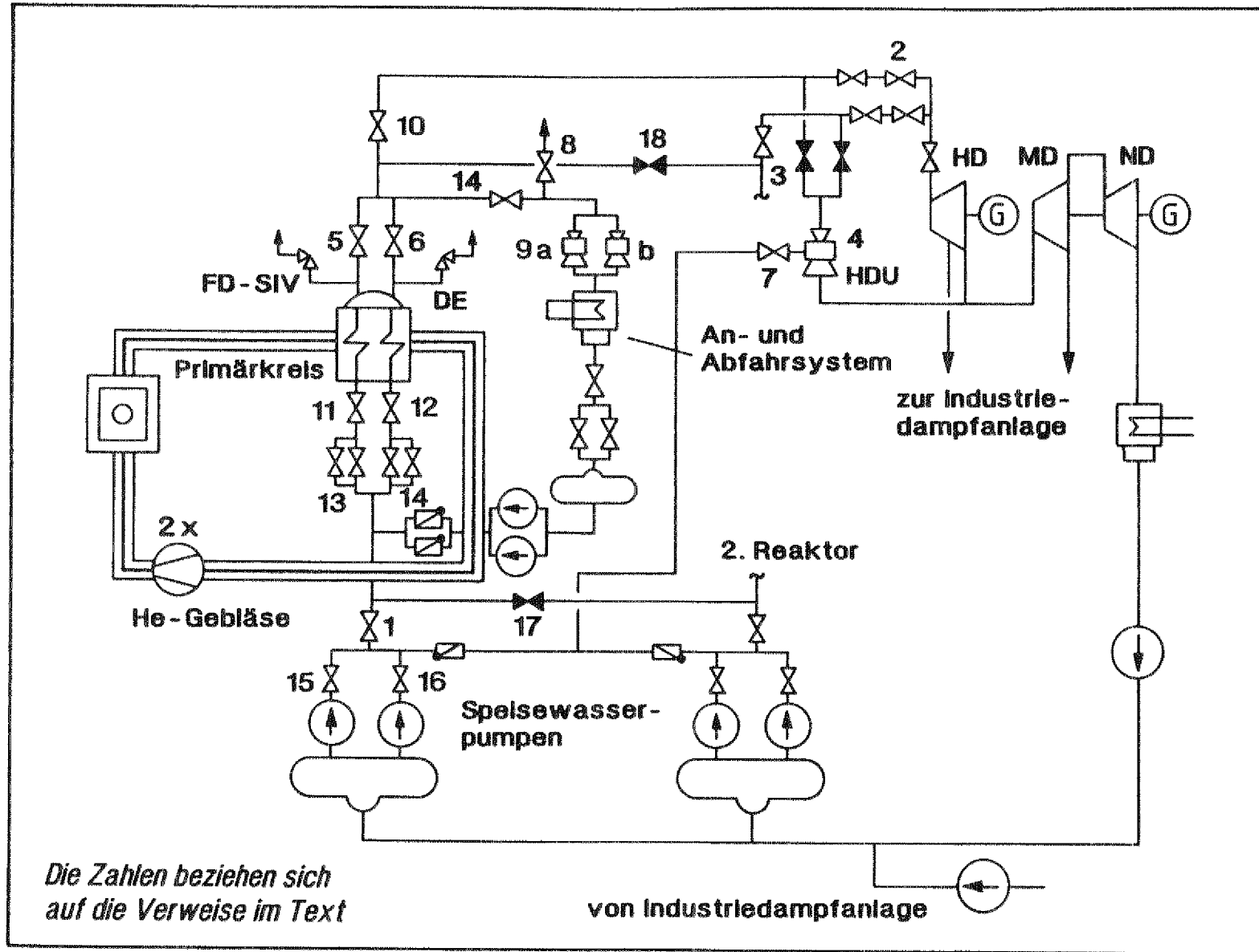


Abb. 2-2: Ereignisabläufe nach einem Dampferzeuger-Heizrohrleck  
(Teil 2)

Abb. 2-3: Schematische Darstellung der Dampferzeugerbespeisung





ablaufdiagramme an (Abbildungen 2-4 und 2-5), in denen das Verhalten der RDB-Druckabsicherung beschrieben wird.

Die Abbildung 2-3 zeigt in einem einfachen Kreislaufschema neben anderen Komponenten oder Systemen diejenigen, die speziell zur Beherrschung von Dampferzeuger-Heizrohrlecks verwendet werden. Die Nummerierung im folgenden Text nimmt Bezug auf diese Abbildung.

Die Ereignisabläufe werden zu drei Gruppen zusammengefaßt. Die erste Gruppe (G-W1) bilden die Abläufe, bei denen der Dampferzeuger ordnungsgemäß bespeist wird. Bei den Abläufen wird nicht danach unterschieden, ob primärseitig Zwangs- oder Naturkonvektion besteht, da die druckbestimmenden Temperaturen im Kaltgasraum davon kaum abhängen (vgl. Kapitel III, Abschnitt 2.5). Daher ist die erste Gruppe von Ereignisketten dadurch gekennzeichnet, daß zwar der Ansprechdruck des am niedrigsten eingestellten RDB-Sicherheitsventils erreicht wird, der Ausgleichsdruck aber - auch ohne Inanspruchnahme des Gaslagers - mit Sicherheit nicht 85 bar erreicht. In diese Gruppe fallen die Ereignisabläufe W, WL, WH (alle Bild 2-1) sowie WG\* (Bild 2-2). Dabei spielt die Kette WG\* mit ihren nicht gezeichneten Verzweigungen eine Sonderrolle: sie bedeutet eine Erhöhung der Häufigkeiten aller Ketten in Bild 2-1 um 13 % (außer W), da die sekundärseitige Druckabsenkung über das Entlastungsregelventil (8, Abfrage J/K) eine vollwertige Redundanz zur Druckabsenkung über die Hochdruck-Umleitstation (4, Abfrage G, Nichtverfügbarkeit pro Anforderung: 0.13) darstellt. Die Gruppenhäufigkeit von W1 beträgt  $10^{-2}/a$ .

In die zweite Gruppe (G-W2) fallen die Ereignisabläufe, bei denen keine Dampferzeugerbespeisung zustande kommt. Die Gruppe enthält auch solche Abläufe, bei denen aufgrund einer ausbleibenden Trennung zwischen den DE-Strängen beide Stränge in den Primärkreislauf ausdampfen. Die Häufigkeit dieser Gruppe beträgt  $3,1 \cdot 10^{-4}/a$  und stammt zu fast 99 % aus den Ereignisabläufen, bei denen lediglich der intakte Dampferzeugerstrang nicht zur NWA freigeschaltet wird, also speisewasser- oder dampfsei-

tig abgesperrt bleibt (Abfrage R, Ketten WR, WQR, WPR, WMR, WLR, WLQR, WLPR, WHR, WHQR, WHPR, WHMR und WHLR, alle Bild 2-1, und WGKR, Bild 2-2. Hinzu kommen die entsprechenden Verzweigungen von WG\*.). In einigen dieser Fälle, den Ketten mit 'Q', ist zwar die Speisewasserseite des defekten Stranges offen geblieben; da dessen Dampfseite jedoch abgesperrt ist, kommt der Mindestdurchsatz nicht zustande. Für diese Fälle wurde angenommen, daß das AuAS wieder abgeschaltet wird. Ketten mit fälschlichem Weiterbetrieb liegen unterhalb des Abschneidekriteriums ( $10^{-8}/a$ ).

Ausfälle des An- und Abfahrsystems (einschließlich der Umschaltung auf das System des zweiten Reaktors) tragen lediglich zu einem Prozent zur Fallgruppe G-W2 bei. Es sind im einzelnen die Ketten WS, WMS, WUS, WHS und die entsprechenden Verzweigungen von WG\*. Auch die mit  $3,8 \cdot 10^{-8}/a$  sehr seltene Kette WH' wurde in G-W2 eingeordnet. Sie erfaßt den Verlust von Dampf oder Wasser beim NWA-Betrieb des AuAS, wenn die Frischdampf-Sammelarmatur (10, Abfrage H) fälschlich offen bleibt und auch die Hochdruck-Umleitstation 4 selbst beziehungsweise die vorgelagerte Armatur 3 nicht schließen. Für diese Situation wurde angenommen, daß das AuAS wegen Speisewassermangel abgeschaltet wird.

Die Ereignisabläufe der Gruppe G-W2 haben zur Folge, daß mindestens das erste der druckgestaffelten Sicherheitsventile des Reaktordruckbehälters anspricht und der Ansprechdruck des nachgeschalteten Entlastungsventils (85 bar), das in den Kamin abbläst, nur dann nicht erreicht wird, wenn die Rückschlagklappen zum Gaslager öffnen.

Die dritte Gruppe (G-W3) wird gebildet von den Ereignisabläufen, die in eine Bespeisung des Dampferzeugers (DE) unter Einbeziehung des defekten Stranges münden. Der Hauptbeitrag entsteht durch Nichtschließen der Frischdampfarmatur im defekten DE-Strang (beispielsweise die Armatur 5), wodurch dieser Strang während der NWA rückwärts bespeist wird (Ketten WM,  $2,3 \cdot 10^{-4}/a$  und WHM). Zu einer Mitbespeisung des defekten Stranges kommt es auch, wenn er nach erfolgreicher Detektion speisewasserseitig

nicht geschlossen werden kann (11, Abfrage Q). Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Unterbrechung der DE-Bespeisung (vgl. Kapitel 3.3.2.4) zwar prinzipiell erfolgreich war, die Armatur 13 aber dabei offengeblieben ist. Die betreffenden Ereignisabläufe sind mit WQ, WMQ, WLQ, WHQ, WHMQ sowie WHLQ bezeichnet. Etwa eine Größenordnung seltener sind Fälle, in denen beide Stränge bespeist werden, weil die Detektion des defekten Stranges versagt hat oder nicht möglich war (in den Analysen wurde unterstellt, daß in solchen Fällen beide Stränge freigeschaltet werden). Dies ist bei den Ketten WP, WMP, WLP, WLM, WHP, WHMP der Fall. Eine Verwechslung der Stränge ergibt sich, wenn die Armaturen 10 und 6 (Abfragen H und L) fälschlich offenbleiben; die NWA erfolgt dann ausschließlich über den defekten Strang (Kette WHL,  $1,7 \cdot 10^{-5}/a$ ).

Die kumulierte Häufigkeit beträgt für die Gruppe G-W3  $3,3 \cdot 10^{-4}/a$ ; auch hier tragen WG\*-Verzweigungen mit 13 % bei. Dies bedeutet, daß mit einer relativ hohen Häufigkeit längerfristig Wasser in den Primärkreis eingespeist wird; ohne Gegenmaßnahmen kann dies nach etwa 10 Stunden zu Freisetzungen in die Umgebung führen (vgl. Kapitel III, Abschnitt 4).

Es wäre daher im Falle eines mitbespeisten defekten Dampferzeugerstranges zweckmäßig, das An- und Abfahrssystem rechtzeitig abzuschalten.

Entsprechende Maßnahmen sind im Störfallbeherrschungskonzept nicht vorgesehen. Eine zufriedenstellende Analyse aller relevanten Aspekte und die Formulierung von Maßnahmen hätten den Rahmen - vor allem den Zeitrahmen - der vorliegenden Studie gesprengt; andererseits erscheint es nicht gerechtfertigt, mögliche Gegenmaßnahmen zu vernachlässigen. Da außerdem die Situation anhand des Druckverlaufs im Primärkreis prinzipiell erkennbar ist, wurde für die vorliegende Studie unterstellt, daß die Situation erkannt und das An- und Abfahrssystem mit hinreichender Zuverlässigkeit abgeschaltet wird. Die Ereignisabläufe werden deswegen wie solche der Gruppe G-W2 behandelt.

Die Gegenmaßnahmen können allerdings aus den genannten Gründen nicht quantifiziert werden. Um eine ausreichende Zuverlässigkeit zu erreichen, wären als technische Maßnahme je eine zusätzliche Armatur pro Strang auf der Dampfseite des Dampferzeugers denkbar; nach der Leckdetektion müßte dann die Armatur im als defekt erkannten DE-Strang geschlossen werden. So würde auch ein Zuverlässigkeitsverlust bezüglich der Funktion 'Wiederöffnen' im intakten Strang vermieden.

#### 2.1.4 Störfallabläufe nach Dampferzeugerlecks mit Spaltproduktfreisetzungen über den Sekundärkreislauf

Die Abbildung 2-2 enthält auch diejenigen Ereignisabläufe, bei denen sich der Primärkreislauf im wesentlichen über das Dampferzeugerleck und den Sekundärkreislauf druckentlastet. Prinzipiell kann es in einem Teil der Fälle auch noch zu einer Entlastung über die RDB-Druckabsicherung in den Kamin kommen; dies setzt jedoch Zufallsausfälle im Entlastungssystem voraus. Die Folgen sind wegen der günstigeren Freisetzungsbedingungen in Relation zur Entlastung über den Sekundärkreislauf weniger bedeutend und außerdem abgedeckt durch Abläufe der Gruppen G-W2 und G-W3. Für das Entstehen eines Entlastungspfades über den Sekundärkreislauf, mit dem ungefilterte und bodennahe Spaltproduktfreisetzungen verbunden sind, kommen drei Schlüsselereignisse in Betracht, die alle zu ähnlichen Freisetzungshäufigkeiten führen:

- Das Nichtschließen des Entlastungsregelventils (8) nach Ausfall der sekundärseitigen Druckabsenkung über die Hochdruck-Reduzierstation, verbunden mit dem Nichtschließen der Frischdampfarmatur im defekten (5) oder im intakten (6) DE-Strang.

In Abbildung 2-2 sind dies die Ketten WGKM,  $1,0 \cdot 10^{-7}$  pro Jahr, und WGKL,  $1,7 \cdot 10^{-7}$  pro Jahr. Die Werte unterscheiden sich, weil im ersten Fall der Handantrieb der FD-Armatur (5) eingerechnet werden kann, im zweiten Fall jedoch nicht, da

ein Absperren von Hand zu spät käme, um eine Verwechslung der DE-Stränge bei der Detektion zu verhindern.

In beiden Fällen kommt es zunächst zu einem fortdauernden Wassereinbruch während der DE-Bespeisung zur Nachwärmeabfuhr und später, nach Sinken des Druckes auf der Sekundärseite, zur Druckentlastung des Primärkreislaufs über das DE-Leck und die Entlastungsregelstation (siehe auch Kapitel II, Abschnitt 3.2.1). Prinzipiell besteht für die Betriebsmannschaft die Möglichkeit, unter Verzicht auf die DE-Bespeisung die Druckentlastung durch Schließen der Armatur 14 zu beenden (vgl. Kapitel 3.5).

- Der Totalausfall der Dampferzeugerentlastung, der wegen der Dampferzeugerbeheizung durch die Helium-Naturkonvektion zum Ansprechen eines der beiden Frischdampf-Sicherheitsventile führt (die Wahrscheinlichkeiten sind gleich, jeweils 0,5), wobei die relevante Ereigniskette das zufällige Nichtschließen des Ventils im defekten DE-Strang enthält (WGJO,  $7,8 \cdot 10^{-8}$ ); die Folge ist eine sofort beginnende Druckentlastung des Primärkreislaufs über das defekte Ventil. Bleibt das andere Ventil offen, wird der defekte DE-Strang als intakt identifiziert und zur NWA benutzt. Der Ereignisablauf WGJN wird daher in die Gruppe G-W3 eingeordnet (siehe obigen Abschnitt 2.1.3).
- Die fälschliche Weiterbespeisung des defekten, frischdampfseitig isolierten Dampferzeugerstranges, wobei dessen Frischdampf-Sicherheitsventil durch Wasser beschädigt wird und nicht wieder dicht schließt (WEO,  $1,3 \cdot 10^{-7}/a$ , und WEGO,  $1,7 \cdot 10^{-8}/a$ ).

Die ungewollte Weiterbespeisung des Dampferzeugers kann mit gleicher Häufigkeit den defekten wie auch den intakten Strang betreffen. Eine Weiterbespeisung beider Stränge ist erheblich seltener und führt auch zu keinem grundsätzlich anderen Störfallablauf als die Bespeisung des defekten Stranges.

Durch die ungewollte Weiterbespeisung steigt der Druck im Dampferzeuger schlagartig an, und wenn nur ein Strang betroffen ist, wird dieser als der intakte Strang identifiziert. Die Ketten WEO und WEGO enthalten also auch die NWA über den defekten DE-Strang. Eine Weiterbespeisung nur des intakten Stranges führt zur NWA mit Wasserverlust über das FD-Sicherheitsventil.

Die drei aufgeführten Schlüsselereignisse führen zu je einem Freisetzungsfall (siehe Abschnitt 4).

#### 2.1.5 Diskussion spezieller Systemausfälle

In den folgenden Abschnitten werden Systemausfälle diskutiert, die zu Ereignisabläufen führen, deren Konsequenzen im Rahmen der vorliegenden Studie nicht im Detail analysiert wurden. Der Hauptgrund liegt darin, daß durch die Ausdehnung des Häufigkeitsbereichs bis  $10^{-8}/a$  Ereigniskombinationen mit Störfallphänomen auftreten, deren radiologische Relevanz bei größeren HTR (THTR, HTR-500) durch die Folgen von Kühlungsausfällen abgedeckt ist und die daher nicht näher untersucht zu werden brauchen, deren Bedeutung bei kleinen Anlagen wie dem HTR-100 jedoch nicht so eindeutig als gering eingestuft werden kann. Hier ergeben sich neue Fragestellungen, zu deren *quantitativ* befriedigender Beantwortung häufig auch die Methoden fehlen. Dies gilt ebenfalls für einige Fragestellungen, die aus der speziellen Konstruktion des HTR-100 und der Konzeption als Doppelblockanlage entstehen.

Dies heißt jedoch nicht, daß eine *qualitative* Einordnung dieser Ereignisabläufe nicht möglich wäre, und eine solche Einordnung wird in den folgenden Unterkapiteln auch vorgenommen. Entscheidend ist nämlich - bei aller Vielfalt der denkbaren Abläufe - das Ausmaß der Spaltproduktfreisetzung, und bei vernünftiger Betrachtung lassen sich keine wesentlich anderen Freisetzungsbedingungen erkennen. Allerdings wären im Verlauf einer umfassenden Risikoanalyse absichernde Untersuchungen notwendig.

#### 2.1.5.1 Nichtschließen der Frischdampf-Armaturen vor der Turbine

Ein Nichtschließen der Frischdampf-Armaturen (2) vor der Turbine hat zur Folge, daß beide Reaktoren sekundärseitig nicht getrennt werden; dies führt bei der sekundärseitigen Druckentlastung sehr wahrscheinlich zur Schnellabschaltung auch des zweiten Reaktors (die verfügbaren Unterlagen ließen nicht eindeutig erkennen, welches Signal die Abschaltung auslöst). Die vorgesehene Druckabsenkung ist allerdings nur noch über die Entlastungsregelstation (8) möglich, wobei die dazu angesteuerte Sammelarmatur (10) schließen muß (Kette WF in Bild 2-2). In diesem Fall ergeben sich keine neuen Gesichtspunkte (außer der Schnellabschaltung des zweiten Reaktors). Schließt die Sammelarmatur (10) nicht (WFH), führt auch dies zur Abschaltung des zweiten Reaktors. Ist danach der Frischdampfdruck auf 120 bar gesunken, schließen die Entlastungsstation (8) sowie die Frischdampfarmaturen (5 und 6) im Dampferzeuger des ersten Reaktors; anschließend kann der defekte Dampferzeugerstrang identifiziert werden, und die Nachwärme erfolgt für beide Reaktoren mit den An- und Abfahrssystemen. Zusätzliche Ausfälle führen zu Ereignisablaufhäufigkeiten unterhalb von  $10^{-8}/a$ .

#### 2.1.5.2 Ausfall der Gebläseabschaltung

Der Ausfall der Gebläseabschaltung nach einem Dampferzeuger-Heizrohrleck (Ketten WD und WDG,  $10^{-5}$  bzw.  $1,3 \cdot 10^{-6}/a$ , vgl. auch Abschnitt 3.2.7.4) hat einen zusätzlichen Druckanstieg im Reaktordruckbehälter (RDB) zur Folge und führt zu hohen Temperaturen des Dampferzeugers und des Behälters. Die RDB-Sicherheitsventile begrenzen den Druck auf 105 % des Auslegungsdruckes, so daß ein Behälterversagen nicht zu befürchten ist (siehe II.2.1). Bei Ausfall eines Ventils werden rund 110 % des Auslegungsdruckes erreicht; auch dies würde noch kein Behälterversagen bedeuten. Bei Ausfall von zwei oder von allen drei Ventilen liegt der entsprechende Ereignisablauf unter  $10^{-8}/a$ . Bei funktionierenden Ventilen ergeben sich gegenüber den Störfall-

sequenzen mit Gebläseabschaltung keine gravierenden Aspekte im Hinblick auf grundsätzlich andere Abläufe.

#### 2.1.5.3 Ausfall des Klak-Systems

Entsprechend einer Vereinbarung, die im Verlauf dieser Studie mit dem Anlagenhersteller getroffen wurde, ist in die Ereignisabläufe zum Wassereinbruch die Handauslösung des Klak-Systems dreißig Minuten nach Störfallbeginn aufgenommen worden. Unterbleibt diese Maßnahme, ist ein Kaltfahren des Reaktors mit der Transiente, die sich rein thermodynamisch aus der vom Hersteller genannten Prozeßführung ergibt, nicht möglich, sondern der Reaktor wird während der Transiente kritisch. Das ursprünglich geplante Vorgehen schien daher inkonsistent.

Unter Risikogesichtspunkten sind das Nichtauslösen oder Ausfälle des Klak-Systems - isoliert betrachtet - nicht relevant, da wegen der Reaktivitätswirkung des ersten Abschaltsystems, also der Reflektorstäbe, das Core für etliche Stunden nur bei niedrigeren als den Normalbetriebstemperaturen kritisch werden kann. Es ist zwar nicht auszuschließen, daß der Prozeßablauf zum Ausfall oder zur vorsorglichen Abschaltung des An- und Abfahrsystems führen kann, für die Drucktransiente im Primärkreislauf sind die Ausgangsbedingungen dann jedoch günstiger als beim Startversagen des AuAS oder der Nichtbespeisung des Dampferzeugers innerhalb anderer Störfallabläufe (beispielsweise die Kette WR, Abb. 2-1). Durch den Ausfall des Klak-Systems ergeben sich somit keine Hinweise auf ungünstigere Störfallfolgen.

#### 2.1.5.4 Ausfall der Reaktorschnellabschaltung

Der Ausfall der Reaktorschnellabschaltung, die bei Auftreten eines Dampferzeugerlecks ausgelöst wird, ist mit einer bedingten Häufigkeit von  $1,4 \cdot 10^{-7}/a$  zu erwarten (vgl. Kapitel 3.3). Im Zuge der hier vorzustellenden Analysen ist das dynamische Verhalten der Anlage, ausgelöst vom Reaktivitätsanstieg durch



den Wasserdampf, nicht berechnet worden. Für Analysen mit Vorstudiencharakter erscheint dies aus folgenden Gründen gerechtfertigt:

- Im Prinzip kann der Reaktivitätsanstieg auch über die Reaktorregelung kompensiert werden - soweit die Reaktorschnellabschaltung nicht aufgrund mechanischen Versagens der Stäbe ausgefallen ist.
- Bei Ausfall der Schnellabschaltung besteht die Möglichkeit, den Reaktor von Hand durch Auslösen des Klak-Systems abzuschalten. Falls die Auslösung vor Beginn der NWA erfolgt, stellt dies für die weitere Störfallbeherrschung eine Redundanz zur Schnellabschaltung dar.
- Um den auftretenden Reaktivitätsanstieg (1,2 Nile, /1/) allein über den negativen Temperaturkoeffizienten abzufangen, ist ein Temperaturanstieg von etwa 400°C notwendig, bezogen auf die mittlere Coretemperatur. Dies bedeutet, daß selbst die heißesten Brennelemente dadurch noch nicht in ihrer Spaltproduktrückhaltefähigkeit beeinträchtigt würden.

Beim Betrieb des An- und Abfahrsystems zur NWA ist zu erwarten, daß die Dampftemperaturen erheblich über den Frischdampftemperaturen des Normalbetriebs liegen. Ob dies zum Ausfall des Systems führen kann, konnte im Rahmen dieser Studie nicht mehr untersucht werden. Auch eventuelle Belastungen des Reaktorbehälters durch die höheren Heißgastemperaturen konnten nicht mehr analysiert werden. Daß der Reaktor längerfristig nicht abgeschaltet wird, ist allerdings sehr unwahrscheinlich und sicherlich seltener als  $10^{-8}/a$ .

#### 2.1.5.5 Ausfall der Störfalldetektion

Beim HTR-100 wird das störfallauslösende Ereignis 'Leck in einem Dampferzeuger-Heizrohr' über den ansteigenden Primärkreislaufdruck erkannt. Der Dampferzeuger-Aggregateschutz löst daraufhin die speziellen Maßnahmen zur Störfallbeherrschung aus. Fällt die Druckdetektion aus (Ketten WA und WAG in

Bild 2-2,  $4,3 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $5,6 \cdot 10^{-7}/a$ ), werden die Anregekriterien erreicht, die zur Detektion von Reaktivitätsstörungen dienen, nämlich Neutronenfluß zu hoch oder Reaktorperiode zu klein oder Heißgastemperatur zu hoch. Über diese Anregekriterien wird durch das Reaktorschutzsystem eine Anlagenabschaltung mit nachfolgendem NWA-Betrieb über beide Dampferzeugerstränge ausgelöst. Es kommt zwar zum Ansprechen der RDB-Ventile, wegen des nachgeschalteten Gaslagers sind aber Freisetzungen in die Umgebung extrem unwahrscheinlich, zumindest in der frühen Störfallphase. Ohne Gegenmaßnahmen erfolgt jedoch eine kontinuierliche Wassereinspeisung in den Primärkreislauf, die nach einiger Zeit trotz der Pufferwirkung des Gaslagers zur Druckentlastung des Primärkreislaufs in die Umgebung führen kann. Die Situation ist also vergleichbar mit dem fälschlichen Bespeisen des defekten Dampferzeugers (Fallgruppe G-W3); der Ablauf ist hier vermutlich schneller, allerdings auch zwei Größenordnungen seltener.

#### 2.1.6 Verhalten des RDB-Entlastungspfades bei Störfallabläufen nach einem Dampferzeuger-Heizrohrleck

##### 2.1.6.1 Abläufe mit NWA

Die Abbildung 2-4 zeigt das Ereignisablaufdiagramm für das RDB-Druckentlastungssystem bei einem Dampferzeuger-Heizrohrleck und planmäßiger Störfallbeherrschung, also Isolierung des defekten DE-Stranges und Nachwärmeabfuhr mit dem intakten Strang (die Gruppe G-W1 in Abschnitt 2.1.3). Bei ordnungsgemäßer Funktion des Entlastungssystems (Kette G-W1) kommt es zu keinerlei Freisetzungen in die Umgebung. Auch ein Nichtöffnen beider Rückschlagklappen (C) ergibt noch keinen Pfad in die Umgebung, da der Ansprechdruck des Entlastungsventils (D/E/F) von 85 bar nicht erreicht wird, weder im RDB selbst noch im Entlastungspfad. Ein Ausfall der Dichtfunktion des Entlastungsventils führt zu einer Gesamthäufigkeit von  $8,4 \cdot 10^{-7}$ . Ein Versagen des RDB-Ventils in Offenstellung (B) ist wegen des erwähnten Druckverlaufs im RDB (auch ohne Entlastung  $< 85$  bar) nicht relevant (Ketten G-W1B und G-W1BC), solange das Entlastungsventil nicht undicht ist (Abfrage D). Ein Nichtöffnen des RDB-Ventils ist

|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|--|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|----------|--|--|--|
|  | DE-Heizrohrleck,<br>NWA über int. DE-Strang,<br>def. Strang isoliert | Primärkreis-<br>Sicherheits-<br>ventile | öffnen (Ventil mit<br>dem niedr. Druck) | schließ | Öffnen der Rückschlag-<br>klappen (1v2) | bleibt auslegungs-<br>gemäß geschlossen | öffnet auslegungs-<br>gemäß | schließt |  |  |  |
|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  |                                                                      |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  | Häufigkeit [1/a]                                                     |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  | Bezeichnung                                                          |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |
|  | Freisetzungsfall                                                     |                                         |                                         |         |                                         |                                         |                             |          |  |  |  |

Abbildung 2-4: Verhalten der RDB-Druckabsicherung bei Dampf-  
erzeugerlecks und auslegungsgemäßer NWA

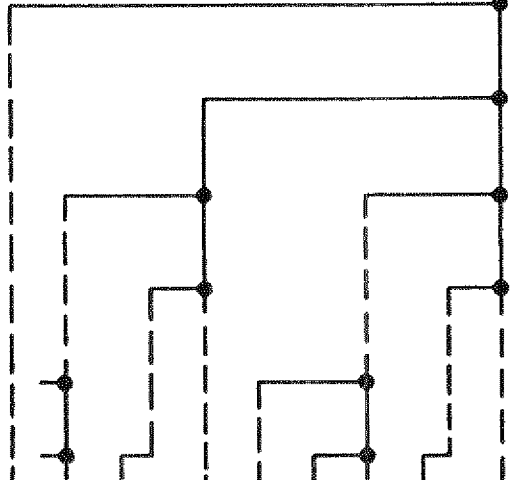
| Primärkreis-Sicherheits-ventile                                                    |                | Entlastungsventil                         |                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| DE-Heizrohrleck<br>keine NWA                                                       | öffnen (1 v 3) | Öffnen der Rückschlag-<br>klappen (1 v 2) | bleibt auslegungs-<br>gemäß geschlossen |
| A                                                                                  | schließt       | D                                         | öffnet auslegungs-<br>gemäß             |
| B                                                                                  |                | E                                         | schließt                                |
| C                                                                                  |                | F                                         |                                         |
| D                                                                                  |                |                                           |                                         |
| E                                                                                  |                |                                           |                                         |
| F                                                                                  |                |                                           |                                         |
| G-W2                                                                               |                |                                           |                                         |
|  |                |                                           |                                         |
| Häufigkeit [1/a]                                                                   |                |                                           |                                         |
| Bezeichnung                                                                        |                |                                           |                                         |
| Freisetzungsfall                                                                   |                |                                           |                                         |
| 6,4 - 4                                                                            | G-W2           | —                                         |                                         |
| 5,4 - 8                                                                            | G-W2D          | W5                                        |                                         |
| 4,5 - 8                                                                            | G-W2C          | W5                                        |                                         |
| Σ                                                                                  | G-W2CF         | —                                         |                                         |
| Σ                                                                                  | G-W2CE         | —                                         |                                         |
| 1,5 - 5                                                                            | G-W2B          | —                                         |                                         |
| Σ                                                                                  | G-W2BD         | W5                                        |                                         |
| Σ                                                                                  | G-W2BC         |                                           |                                         |
| <1,0 - 7                                                                           | G-W2A          |                                           |                                         |

Abbildung 2-5: Verhalten der RDB-Druckabsicherung bei Dampferzeugerlecks

belanglos (G-W1A), da der Behälter in keiner Weise gefährdet wäre - nicht einmal der Ansprechdruck des zweiten RDB-Ventils von 80,4 bar würde erreicht (vgl. auch Kapitel III, Abschnitt 2.4).

#### 2.1.6.2 Abläufe ohne NWA

Die Abbildung 2-5 zeigt das Ereignisablaufdiagramm für das RDB-Druckentlastungssystem bei Ausfall der NWA über den Dampferzeuger. Zu betrachten sind wieder das Verhalten der Primärkreis-Sicherheitsventile (Öffnen/Schließen), das Verhalten der Rückschlagklappen (Öffnen/Schließen) und das Verhalten des Entlastungsventils (auslegungsgemäßes Öffnen sowie Wiederschließen und Verlust der Dichtfunktion bei Anforderung).

Der Fall G-W2 beschreibt den beherrschten Ablauf; der Primärkreislauf wird teilweise in das Gaslager entlastet, und Freisetzungen in die Umgebung werden vollständig vermieden. Da ein Verlust der Dichtfunktion des Entlastungsventils zum Kamin bei Anforderung nicht vollständig ausgeschlossen werden kann (Abfrage D), ergibt sich im Ablauf der Kette G-W2D die Freisetzung eines Teils des Helium/Dampfgemisches aus dem RDB in die Umgebung. Die angegebene Häufigkeit von  $5,4 \cdot 10^{-8}/a$  beruht auf einer Nichtverfügbarkeit von  $8,4 \cdot 10^{-5}/Anforderung$  für den Verlust der Absperrfunktion des Entlastungsventils unterhalb von 50 % des beabsichtigten Ansprechdrucks.

Öffnen beide Rückschlagklappen nicht (Abfrage C), kommt es ebenfalls - jetzt bei ordnungsgemäßer Funktion des Entlastungsventils - zur teilweisen Druckentlastung des Primärkreislaufs in die Umgebung (Ereignisablauf G-W2C,  $4,5 \cdot 10^{-8}/a$ ). Eine zusätzliche Undichtigkeit des Ventils führt zu hypothetischen Ketten ( $< 10^{-8}/a$ ). Ein Nichtschließen von mindestens einem der RDB-Sicherheitsventile hat, zusammen mit dem vorzeitigen Öffnen des Entlastungsventils, eine weitgehende Entlastung des Primärkreislaufs in die Umgebung zur Folge (Kette G-W2BD,  $< 10^{-8}/a$ ). Das Verhalten des Entlastungsventils ist dabei analog zur Kette G-W2D modelliert. Eine ebenfalls teilweise Druckentlastung des

Primärkreislaufs resultiert aus der Ereigniskombination GW2BC ( $< 10^{-8}/a$ ).

Der Wert für das Nichtöffnen aller drei Primärkreis-Sicherheitsventile ( $1,7 \cdot 10^{-4}/A$ , vgl. Kapitel 3.3.2.12.1) gilt für geringfügiges Überschreiten des Ansprechdrucks. Im Ablauf der Kette G-W2A würde jedoch ein Helium-Partialdruck von 95 bar, also etwa 130 % des niedrigsten der drei Ansprechdrücke, erreicht. Ein Überdruckversagen des RDB liegt daher sicherlich unter  $10^{-7}/a$ .

Als Notfallmaßnahme wäre eine gezielt von Hand herbeigeführte Druckentlastung des RDB über die Gasreinigungsanlage (GRA) denkbar. Allerdings ist anzunehmen, daß bei größeren Drucktransienten der betroffene Primärkreislauf von der Gasreinigungsanlage abgetrennt wird, da beide Kreisläufe über die GRA verbunden sind und der zweite Reaktor sonst nicht weiterbetrieben werden könnte (die Absperrung ist im Störfallbeherrschungskonzept des Herstellers allerdings nicht verzeichnet). Es ist daher nicht möglich, auf der Basis der vorhandenen Unterlagen die notwendigen Eingriffe zu bewerten. Allerdings ist ein Potential vorhanden, die Häufigkeit der Kette G-W2A weiter zu vermindern.

#### 2.1.7 Zusammenfassung

Die Analysen zu Ereignisabläufen infolge Dampferzeuger-Heizrohrlecks beim HTR-100 haben ergeben, daß grundsätzlich zwei Freisetzungspfade in die Umgebung zu unterscheiden sind. Der eine Weg führt über das Heizrohrleck und den fehlerhaft offenen Sekundärkreis, der andere über das Entlastungssystem des Reaktordruckbehälters.

Die verschiedenen Möglichkeiten für Freisetzungen über den Sekundärkreis lassen sich kurz zusammenfassen:

- bei der sekundärseitigen Druckentlastung des Dampferzeugers bleiben mehrere Ventile offen; die Häufigkeit errechnet sich zu  $5,4 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr,

- es kommt keine sekundärseitige Dampferzeugerentlastung zustande, und wegen der weiterlaufenden Beheizung (Heliumkonvektion) öffnet sich ein Frischdampf-Sicherheitsventil, welches fehlerhaft nicht schließt ( $1,6 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr),
- der defekte und frischdampfseitig isolierte Dampferzeugerstrang wird weiterbespeist, wodurch dessen Frischdampf-Sicherheitsventil beschädigt wird ( $2,9 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr).

Mit welcher Häufigkeit es über das RDB-Entlastungssystem zu Freisetzungen kommt und wieviel des Helium/Dampfgemisches in die Umgebung gelangen kann, hängt von der Zuverlässigkeit der NWA mittels Dampferzeugerbespeisung und ihrer vorbereitenden (Schalt)-Maßnahmen und damit vom Druck im RDB ab, außerdem auch vom Verhalten der Komponenten im Entlastungspfad (mindestens eins der RDB-Ventile spricht immer an):

- bei funktionierender NWA kommt es mit einer Häufigkeit von  $1,7 \cdot 10^{-6}$  pro Anlagenjahr zur Freisetzung eines geringen Teils des Helium/Dampfgemisches in die Umgebung; die Häufigkeit ist wahrscheinlich überschätzt, aber zur Zeit nicht genauer bestimmbar, da die Kette ein wesentlich zu frühes Öffnen (und Offenbleiben) des Entlastungsventils zum Kamin erfassen muß,
- der NWA-Ausfall führt ebenfalls zu einer - jetzt umfangreicheren - Teilentlastung des Primärkreislaufs in die Umgebung, wenn das Entlastungsventil wie oben beschrieben versagt; die Häufigkeit pro Anlagenjahr beträgt hier  $2,0 \cdot 10^{-7}$ .

Andere Fehlfunktionen im Entlastungspfad, beispielsweise das Nichtöffnen der Rückschlagklappen zum Gaslager, werden durch die beschriebenen Ereigniskombinationen abgedeckt.

## 2.2 Druckentlastungsstörfälle

Eine probabilistische Analyse von Druckentlastungsstörfällen mit Primärkreislecks als auslösenden Ereignissen erfordert eigentlich eine sehr detaillierte Kenntnis des Anlagendesigns, insbesondere, um die Häufigkeit des auslösenden Ereignisses ermitteln zu können. Da dies auf der Basis der verfügbaren Informationen nicht möglich war, wurden für die Häufigkeiten Richtwerte verwendet, die auch schon in anderen, vergleichbaren HTR-Analysen angesetzt worden waren.

Die Unterteilung der Lecks in zwei Gruppen - 'große' und 'kleine' Lecks - folgt aus dem vom Hersteller entwickelten Beherrschungskonzept: Bei kleinen Lecks, die einen freien Druckentlastungsquerschnitt von  $1 \text{ cm}^2$  nicht überschreiten, ist beim gleichzeitigen Ausfall der aktiven Corekühlung eine Umschaltung auf eine spezielle Störfall-Filteranlage zur Jodrückhaltung mit Abgabe des Primärkreisinventars über den Kamin vorgesehen (ohne Umschaltung befinden sich nur Aerosolfilter im Abluftpfad). Bei größeren Lecks ist zunächst eine Druckentlastung direkt in den Kamin vorgesehen; nach automatischer Schließung dieses Pfades und wird der Gebäudebereich wie bei kleinen Lecks gefiltert entlastet.

Der Hersteller begrenzt den Querschnitt größerer Lecks deterministisch auf  $33 \text{ cm}^2$  und leitet dieses Vorgehen aus dem Querschnitt der größten Anschlußleitungen (eben  $33 \text{ cm}^2$ ) an den Reaktordruckbehälter (RDB) ab. Größere Lecks könnten nur am RDB selbst entstehen; sie werden vom Hersteller mit dem Argument einer entsprechenden Auslegung ausgeschlossen. Der Hersteller geht noch weiter und schließt deterministisch für den Reaktordruckbehälter und dessen Anschlußleitungen bis zur ersten Absperrarmatur Lecks mit einem Querschnitt von mehr als  $1 \text{ cm}^2$  aus. Nach seinen Angaben können größere Lecks, also mit Querschnitten bis  $33 \text{ cm}^2$ , nur in den Räumen der Gasreinigungsanlage auftreten.



Probabilistisch gesehen sind Lecks nicht in der beschriebenen Weise begrenzt, und am RDB sind auch größere Lecks als  $33\text{cm}^2$  prinzipiell denkbar. Da jedoch, wie eingangs erläutert, die Anlage dem Planungsstadium entsprechend noch nicht ausreichend detailliert dokumentiert war, orientieren sich die Analysen weitgehend am deterministischen Konzept des Herstellers.

Auf die graphische Darstellung von Ereignisabläufen wird verzichtet, da nur einige wenige Abläufe zu Freisetzungen führen.

Als Häufigkeit für kleine Leckagen wurde  $5 \cdot 10^{-4}/\text{a}$  angenommen, ein Wert, der also bei genauer Kenntnis des Anlagendesigns zu überprüfen wäre. Die Zahl gilt für eine Doppelblockanlage, da die Lecks vorwiegend an gemeinsamen Systemen (vor allem der Gasreinigungsanlage) auftreten. Der Ausfall der Abgabe über Jod- und Aerosolfilter und den Kamin errechnet sich zu  $6,1 \cdot 10^{-1}/\text{A}$  (vgl. Kapitel 3.4).

Eine eventuell mögliche Absperrung des Lecks ist nicht berücksichtigt, da hierzu ausreichende Informationen fehlen.

Zur Gebäudeentlastung bei Störfällen ist ein Start der die zusätzlichen Jodfilter enthaltenden Abluftanlage und die Umschaltung von der betrieblichen Abluftanlage auf die erstgenannte notwendig. Beide Anlagen münden in den Kamin. Bei den Analysen wurde vorausgesetzt, daß die Umschaltung auf die spezielle Filterstrecke erst dann erfolgt, wenn deren Gebläse laufen und die Strecke freigeschaltet ist. Der Ausfall der Gebäudeentlastung in den Kamin mit der Folge bodennaher Freisetzungen ist dann extrem selten.

Ereignisabläufe mit zusätzlichem Ausfall der NWA über die Dampferzeuger sind bei Abgabe über die Störfall-Filteranlage mit  $1,1 \cdot 10^{-7}/\text{a}$  und sonst mit  $6,6 \cdot 10^{-8}$  zu erwarten, jeweils pro Anlage und Jahr. Der NWA-Ausfall wird dominiert von der Nichtverfügbarkeit der Dampferzeugerbespeisung. Der Ausfall der Gebläse, von denen mindestens eines im druckentlasteten Fall benötigt wird, ist von untergeordneter Bedeutung.

Die zunächst ungefilterte Freisetzung nach großen Lecks (also bis  $33 \text{ cm}^2$ ) ist im Bereich von  $10^{-5}$  pro Anlage und Jahr zu erwarten, wobei die Entlastung beide Primärkreisläufe betrifft, da sie über die gemeinsame Gasreinigungsanlage führt. Die angegebene Häufigkeit von  $10^{-5}$ /Anlagenjahr gilt auch für das auslösende Ereignis selbst, da die vorgesehene automatische Leckabsperrrung erst nach dieser ersten Entlastungsphase wirksam werden kann. Eine dauernde Freisetzung über das nichtabgesperrte Leck und unter Umgehung der Störfallfilter fällt nicht in den relevanten Häufigkeitsbereich  $>10^{-8}$ . Der zusätzliche Ausfall der NWA braucht dann ebenfalls nicht betrachtet zu werden.

## 2.3 Transienten

### 2.3.1 Beschreibung der Abläufe

Unter Transienten werden hier alle Ereignisabläufe verstanden, die damit beginnen, daß durch ein Ungleichgewicht zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr eine Reaktorschnellabschaltung ausgelöst und die Nachwärmeabfuhr über den Dampferzeuger angefordert werden. Ein eventueller Ausfall der NWA führt zu einem Druckanstieg im Primärkreislauf und zur Entlastung des Reaktor-druckbehälters über die Sicherheitsventile. Die Ereignisabläufe ähneln weitgehend den in Abschnitt 2.1.6 beschriebenen.

Die Häufigkeit des Ausfalls der NWA mittels Dampferzeugerbespeisung bei einem Reaktor und bei beiden zusammen sind ausführlich im Kapitel 3.2 dargelegt. Sie bilden die Eingangsgrößen für die Ereignisabläufe der Abbildung 2-6, die aus dem Verhalten der Überdrucksicherungen entstehen. Die beiden Fälle können zusammengefaßt werden, da sie für die Überdrucksicherung des jeweils betroffenen Reaktors die gleichen Anforderungen bedeuten. Die Abfragen im Ereignisablaufdiagramm beziehen sich auf die Überdrucksicherung eines Reaktors; beim Ausfall beider AuAS durchlaufen zwar beide Reaktoren eine Transiente, jedoch sind gleichzeitige Fehlfunktionen in den beiden Abblasestrecken vernachlässigbar selten.

|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          |                  |             |                  |
|--|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------|----------|------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------|------------------|-------------|------------------|
|  | Ausfall der Nachwärmeabfuhr über die Dampferzeuger<br>(an einem oder beiden Reaktoren) | Primärkreis-Sicherheitsventile | öffnen | schließt | Öffnen der Rückschlagklappen | bleibt auslegungsgemäß geschlossen | öffnet auslegungsgemäß | schließt | Häufigkeit [1/a] | Bezeichnung | Freisetzungsfall |
|  | T (9,7 · 10 <sup>-4</sup> /a)                                                          |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | 9,7-4            | T           | —                |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | 8,2-8            | TDF         | T                |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | 6,8-8            | TC          | T                |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | —                | TCF         |                  |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | —                | TCE         |                  |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | 2,2-5            | TB          | —                |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | —                | TBDF        |                  |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | —                | TBC         |                  |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | —                | TA          | —                |
|  |                                                                                        |                                |        |          |                              |                                    |                        |          | 1,7-7            |             |                  |

Abb. 2-6: Verhalten der RDB-Druckabsicherung bei Ausfall der Dampfzugerbespeisung

In allen dargestellten Fällen wird die Nachwärme über die jeweiligen Betonkühlsysteme abgeführt. Dabei kommt es nach etwa 30 Minuten zum Ansprechen des ersten der RDB-Sicherheitsventile. Da ein fehlerhaft zu frühes Öffnen und Offenbleiben des Entlastungsventils zum Kamin nicht ausgeschlossen werden kann, gelangt bei der Kette TDF trotz funktionierender Rückschlagklappen das aus dem Druckbehälter abgegebene Gas auch in die Umgebung (Häufigkeit  $8,2 \cdot 10^{-8}$  pro Anlagenjahr).

Ähnliche Folgen hat ein Nichtöffnen der Rückschlagklappen bei funktionierendem Entlastungsventil (Kette TC,  $6,8 \cdot 10^{-8}$  pro Anlagenjahr). Bei beiden Ketten gelangen etwa 20 Prozent des Heliums in die Umgebung.

Alle weiteren Ereignisketten mit Freisetzung liegen unterhalb der als Abschneidekriterium gewählten Häufigkeit von  $10^{-8}/a$  (TDF, TCE, TBDF, TBC). Die Ketten T und TB haben keine Entlastung in die Umgebung zur Folge.

Ein Nichtöffnen aller Primärkreis-Sicherheitsventile (Kette TA) führt nicht zwangsläufig zum Versagen des RDB (vgl. Abschnitt 2.1.6). Auch hier ist als Gegenmaßnahme eine gezielte Druckentlastung möglich.

Zu den Transientenstörfällen gehört auch der in Abbildung 2-6 nicht enthaltene Ausfall aller Wärmesenken einschließlich des Betonkühlsystems. Die Häufigkeit dieser Transiente hängt unter anderem von der Auslegung des Betonkühlsystems ab (vgl. Tabelle 1-1); ein Wert unter  $10^{-8}$  pro Anlagenjahr zeichnet sich ab. Die Behältertemperaturen sind höher als beim Ausfall der Dampferzeugerbespeisung allein. Sowohl für ein eventuelles Behälterversagen als auch für die gezielte Entlastung von Hand, die in diesem Fall als Notmaßnahme möglich ist, stehen probabilistische Bewertungen noch aus.

Zu betrachten ist noch der Fall, daß bei planmäßiger Reduzierung der Dampferzeugerbespeisung eines der beiden Gebläse nicht in der Drehzahl reduziert oder abgeschaltet werden kann. Die Häufigkeit solcher Abläufe liegt nach dem letzten Planungsstand bei  $6,4 \cdot 10^{-6}$  pro Reaktor und Jahr (für die ursprüngliche Auslegung mit einem statt zwei Leistungsschaltern ergab sich  $1,4 \cdot 10^{-4}$  pro Reaktor und Jahr). Es kommt dabei zu einer ausgeprägten Temperaturspitze von etwa  $500^{\circ}\text{C}$  im oberen Behälterbereich, der für rund 10 Minuten heißer als  $400^{\circ}\text{C}$  wird. Da bei funktionierender Überdrucksicherung der Auslegungsdruck nur um 5 Prozent überschritten wird und der Auslegung Primärspannungen zugrunde gelegt wurden, die etwa 10 % unter der für Kurzzeitbelastungen zulässigen Streckgrenze bei  $500^{\circ}\text{C}$  liegen, ist ein Versagen des Behälters nicht zu unterstellen.

### 2.3.2 Zusammenfassung

Transienten mit Ausfall der Nachwärmeabfuhr führen beim HTR-100 nicht zwangsläufig zu einer erhöhten Abgabe von Spaltprodukten in die Umgebung. Erst bei Fehlfunktionen in den Drucksicherungssystemen der Reaktorbehälter kommt es zur Abgabe eines Teils des Kühlgasinventars. Die Häufigkeit solcher Abläufe liegt bei  $1,5 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr.

Es ist zwar abgeschätzt worden, welche Folgen für den Reaktorbehälter zu erwarten sind, wenn er längere Zeit unter hohem Überdruck oder ohne Kühlung bei Betriebsdruck (einschließlich Helium-Zwangsumwälzung) bleibt. Die vorhandenen Auslegungsreserven müssen allerdings noch mit Methoden der probabilistischen Strukturmechanik quantifiziert werden. Im vernünftigerweise zu betrachtenden Häufigkeitsbereich ( $> 10^{-8}$  pro Anlagenjahr) ist jedoch ein massives Versagen nicht zu erwarten.

## 2.4 Bildung von Freisetzungskategorien

Die Bildung von Freisetzungskategorien im ursprünglichen Sinn ist im Fall der HTR-100-Analyse nicht notwendig, da nur wenige Ereignisabläufe überhaupt zu Spaltproduktfreisetzungen führen, sich dann aber doch deutlich voneinander unterscheiden.

Insgesamt wurden acht solcher Freisetzungsfälle identifiziert (Tabelle 2-1). Fünf davon gehören zu Wassereinbruchstörfällen, zwei sind auf ein Leck am Primärkreislauf zurückzuführen, und ein weiterer resultiert aus Transienten. Sie sind mit W1, W2, W3, W4, W5, DS, D sowie T bezeichnet, wobei W für Wassereinbruch, D für Druckentlastung, S für Staub (als Aktivitätsträger) und T für Transienten steht.

Die Fälle W1 bis W3 entsprechen den in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Abläufen, die zu Freisetzungen über den Sekundärkreislauf führen.

Der Freisetzungsfall W1 resultiert aus dem Ereignisablauf WGJO (vgl. Abschnitt 2.1.4), also dem Ausfall der beiden Möglichkeiten zur sekundärseitigen Dampferzeugerentlastung; dies führt zum Ansprechen eines der Frischdampf-Sicherheitsventile - hier das im defekten Strang, welches dann in Form eines Zufallsversagens nicht wieder schließt. Die Häufigkeit des Ablaufs beträgt  $1,6 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr, also bezogen auf den Betrieb von zwei Dampferzeugern. Die Folgen sind eine langsame, direkte und bodennahe Druckentlastung des Primärkreislaufs in die Umgebung, wobei die Nachwärmeabfuhr über den intakten Dampferzeugerstrang erfolgt.

Der zweite Fall (W2) erfaßt das Nichtschließen des Entlastungsregelventils nach Ausfall der sekundärseitigen Druckabsenkung über die Hochdruck-Reduzierstation, verbunden mit dem Nichtschließen der Frischdampfarmatur im defekten oder im intakten DE-Strang. Hier kommt es bei zunächst weiterlaufender NWA zur bodennahen Druckentlastung des Primärkreislaufs, sobald der sekundärseitige Druck entsprechend gesunken ist. Die Druckentlastung kann durch Eingriff der Betriebsmannschaft beendet werden (vgl. Abschnitt 2.1.4). Zu W2 gehören die Ketten WKGM und

| Kurzbezeichnung                                     | W1                                                                                                                                                                                   | W2                                                                                                                                                                                                           | W3a                                                                                                                                                                                                                      | W3b                  | W4                                                                                                                                                                                         | W5                                                                                                                                                                                                       | DS                                                                                                                                                                                               | D                                                                                                                                                                     | T                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Auslösendes Ereignis und charakteristische Merkmale | <ul style="list-style-type: none"> <li>- DE-Heizrohrleck</li> <li>- Ausfall der DE-Druckentlastung</li> <li>- Versagen des FD-SiV in Offenstellung</li> <li>- NWA über DE</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- DE-Heizrohrleck</li> <li>- Offenbleiben des Entlastungsregelventils</li> <li>- Nichtschließen einer FD-Armatur</li> <li>- NWA über DE, zeitlich begrenzt</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- DE-Heizrohrleck auf FD-Seite   SpW-Seite</li> <li>- Weiterbespeisung des defekten Stranges</li> <li>- Folgeversagen (Offenbleiben) des FD-SiV</li> <li>- NWA über DE</li> </ul> |                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- DE-Heizrohrleck</li> <li>- konzeptgemäße DE-Entlastung und -isolierung</li> <li>- NWA über DE</li> <li>- EV zum Kamin öffnet vorzeitig</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- DE-Heizrohrleck</li> <li>- konzeptgemäße DE-Entlastung und -isolierung</li> <li>- Ausfall der DE-Bespeisung</li> <li>- EV zum Kamin öffnet vorzeitig</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leck am Primärkreislauf (33 cm<sup>2</sup>)</li> <li>- direkte Gebäudeentlastung über Kamin</li> <li>- Leckabspernung</li> <li>- NWA über DE</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Leck am Primärkreislauf (1 cm<sup>2</sup>)</li> <li>- Gebäudeentlastung über Aerosolfilter</li> <li>- NWA über DE</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transiente (Ausfall der DE-Bespeisung)</li> <li>- EV zum Kamin öffnet vorzeitig</li> <li>- NWA über Betonkühlsystem</li> </ul> |
| Häufigkeit pro Jahr und Anlage                      | 1,6x10 <sup>-7</sup>                                                                                                                                                                 | 5,4x10 <sup>-7</sup>                                                                                                                                                                                         | 1,5x10 <sup>-7</sup>                                                                                                                                                                                                     | 1,5x10 <sup>-7</sup> | 1,7x10 <sup>-6</sup>                                                                                                                                                                       | 2,0x10 <sup>-7</sup>                                                                                                                                                                                     | 1,0x10 <sup>-5</sup>                                                                                                                                                                             | 5,0x10 <sup>-4</sup>                                                                                                                                                  | 1,5x10 <sup>-7</sup>                                                                                                                                                    |
| Freisetzungseigenschaften                           | Sekundärkreis, bodennah                                                                                                                                                              | Sekundärkreis, bodennah                                                                                                                                                                                      | Sekundärkreis, bodennah                                                                                                                                                                                                  |                      | RDB-Druckabsicherung, Kamin                                                                                                                                                                | RDB-Druckabsicherung, Kamin                                                                                                                                                                              | Reaktorgebäude, Kamin                                                                                                                                                                            | Reaktorgebäude, Aerosolfilter, Kamin                                                                                                                                  | RDB-Druckabsicherung, Kamin                                                                                                                                             |
| - Pfad                                              |                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                          |                      |                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                         |
| - Beginn nach Störfalleintritt [h]                  | 0                                                                                                                                                                                    | 1,5                                                                                                                                                                                                          | 0,5                                                                                                                                                                                                                      |                      | 0                                                                                                                                                                                          | 0                                                                                                                                                                                                        | 0                                                                                                                                                                                                | 0                                                                                                                                                                     | 0                                                                                                                                                                       |
| - Dauer [h]                                         | 30                                                                                                                                                                                   | 1                                                                                                                                                                                                            | 6                                                                                                                                                                                                                        | 30                   | 0,2                                                                                                                                                                                        | 2                                                                                                                                                                                                        | 0,02                                                                                                                                                                                             | 100                                                                                                                                                                   | ~1 (schubweise)                                                                                                                                                         |

Tabelle 2-1: Beschreibung der Freisetzungsfälle

WKGL (Bild 2-2); die Häufigkeit beträgt  $5,4 \cdot 10^{-7}$  pro Anlage und Jahr.

Der Freisetzungsfall W3 schließlich entsteht durch die fälschliche Weiterbespeisung des defekten, frischdampfseitig isolierten Dampferzeugerstranges, wobei dessen Frischdampf-Sicherheitsventil beschädigt wird und nicht mehr dicht schließt (Abläufe WEO und WEGO in Bild 2-2). Im Hinblick auf die Benetzung der Rohroberflächen des Dampferzeugers sind zwei Lecklagen zu unterscheiden: zum Fall W3a gehört ein DE-Heizrohrleck auf der Frischdampfseite, zu Fall W3b ein Leck auf der Speisewasserseite (vgl. Kapitel III, Abschnitt 5). Die Folge ist eine relativ schnelle (Fall W3a) oder langsame (Fall W3b) Druckentlastung, ebenfalls bodennah. Die Häufigkeit der Fälle W3a und W3b beträgt je  $1,5 \cdot 10^7$  pro Anlagenjahr.

Die Freisetzungsfälle W4 und W5, die ihren Ursprung auch in einem Dampferzeugerleck haben, beschreiben Freisetzen über die Druckentlastungseinrichtung des RDB und über den Kamin. Im Fall W4 wird nur ein sehr geringer Teil des Helium/Dampfgemisches freigesetzt, allerdings mit der relativ hohen Häufigkeit von  $1,7 \cdot 10^{-6}$  pro Anlagenjahr (Abläufe G-W1D und GW1CD in Abbildung 2-4, siehe dazu Abschnitt 2.1.6.2). Der Fall W5 erfaßt eine wesentlich umfangreichere Teildruckentlastung des Primärkreislaufs (G-W2D, G-W2C und G-W2BD, Bild 2-5), allerdings kann er mit  $2,0 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr eine Größenordnung seltener eingestuft werden.

Zwei weitere Freisetzungsfälle, DS und D, ergeben sich aus den Analysen zu Druckentlastungsstörfällen. Der Fall DS repräsentiert die Freisetzung von Kühlgasaktivität und kontaminiertem Staub in der ersten, ungefilterten Entlastungsphase nach Auftreten eines größeren (bis  $33 \text{ cm}^{-2}$  Querschnitt) Lecks am Primärkreislauf. Die Freisetzung erfolgt über Kamin; die Häufigkeit des Falles liegt bei  $1,0 \cdot 10^{-5}$  pro Jahr und Anlage. Der Freisetzungsfall D dagegen gehört zu Störfallabläufen nach kleinen Lecks und enthält die Druckentlastung über den Kamin



und die betriebliche Abluftanlage. Die Häufigkeit pro Anlagenjahr beträgt  $5,0 \cdot 10^{-4}$ .

Der letzte Freisetzungsfall (T) erfaßt die von Transienten ausgelösten Störfallabläufe. Hier konnten alle Sequenzen zusammengefaßt werden, die allein aufgrund des Ausfalls der Dampferzeugerbespeisung zum Ansprechen eines RDB-Sicherheitsventils und gegebenenfalls zu (teilweisen) Druckentlastungen des Primärkreislaufs über den Kamin in die Umgebung führen. Auch hier wird vereinfachend das Versagen der Rückschlagklappen und des Entlastungsventils in der Abblasestrecke zusammengefaßt. Die Häufigkeit des repräsentativen Freisetzungsfalles, der Teil-Druckentlastungen erfaßt, wurde mit  $1,5 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr ermittelt.

#### Literatur

/1/ HTR-1100-BA-GHRA-001864 (HRB)



### 3. ZUVERLÄSSIGKEITSANALYSEN

#### GLIEDERUNG:

- 3.1. Einleitung
- 3.2. Transienten
- 3.3. Dampferzeugerlecks
- 3.4. Lecks im Primärkreislauf
- 3.5. Zuverlässigkeitskenngrößen
- 3.6. Menschliche Fehlhandlungen

#### 3.1 EINLEITUNG

Im Abschnitt "Zuverlässigkeitsanalysen" ist die Ermittlung der Häufigkeiten der auslösenden Ereignisse, der Ausfallwahrscheinlichkeiten der Systemfunktionen und der Häufigkeiten der Ereignisabläufe für jede der folgenden drei Gruppen auslösender Ereignisse getrennt dokumentiert:

- Transienten - Kapitel 3.2.
- Dampferzeugerlecks - Kapitel 3.3.
- Lecks im Primärkreis - Kapitel 3.4.

Analysemethoden und -daten sind in /3.1-1/ beschrieben.

---

/3.1-1/ Hennings, W.: Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte. Ein Statusbericht. Band 1: Ereignisabläufe, Systemzuverlässigkeiten, Freisetzungshäufigkeiten. JÜL-SPEZ-388 Band 1, Mai 1987

3.1-2

## 3.2 TRANSIENTEN

von W. Hennings, R. Bongartz

## INHALTSVERZEICHNIS

|           |                                                                                                |        |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.2.1     | ZUSAMMENFASSUNG . . . . .                                                                      | 3.2-3  |
| 3.2.2     | ANALYSEMETHODIK, GLIEDERUNG DER DOKUMENTATION                                                  | 3.2-7  |
| 3.2.3     | ERSTE ERGEBNISSE, OPTIMIERUNG DER AUSLEGUNG .                                                  | 3.2-9  |
| 3.2.4     | EREIGNISABLÄUFE MIT AUSFALL DER PRIMÄRGAS -<br>ZIRKULATION . . . . .                           | 3.2-11 |
| 3.2.4.1   | ...nach Betriebsausfall eines Gebläses .                                                       | 3.2-11 |
| 3.2.4.2   | ...nach Standard - Schnellabfahrprozedur                                                       | 3.2-12 |
| 3.2.5     | EREIGNISABLÄUFE MIT AUSFALL DER WÄRMEABFUHR AUS<br>DEM DAMPFERZEUGER . . . . .                 | 3.2-14 |
| 3.2.5.1   | Standard - Schnellabfahrprozedur . . . .                                                       | 3.2-15 |
| 3.2.5.2   | Speisewassermangel . . . . .                                                                   | 3.2-19 |
| 3.2.5.3   | Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)                                                   | 3.2-21 |
| 3.2.5.4   | Turbinen - Schnellabschaltung (ND - Turbine)                                                   | 3.2-23 |
| 3.2.5.5   | Ausfall Kondensatorvakuum . . . . .                                                            | 3.2-23 |
| 3.2.5.6   | Während des Leistungsbetriebs entdeckter<br>Ausfall des An- und Abfahrsystems eines Blocks . . | 3.2-24 |
| 3.2.5.7   | Ausfall der elektrischen Eigenbedarfs-<br>versorgung in Block A . . . . .                      | 3.2-25 |
| 3.2.5.8   | Ausfall der elektrischen Eigenbedarfs-<br>versorgung in beiden Blöcken . . . . .               | 3.2-25 |
| 3.2.6     | AUSFALL DES BETONKÜHLSYSTEMS ODER DER<br>RÜCKKÜHLKETTEN ALS AUSLÖSENDES EREIGNIS . . . . .     | 3.2-27 |
| 3.2.7     | FEHLERBAUMANALYSEN . . . . .                                                                   | 3.2-29 |
| 3.2.7.1   | Teststrategie . . . . .                                                                        | 3.2-29 |
| 3.2.7.2   | Frischdampf - Entlastung . . . . .                                                             | 3.2-31 |
| 3.2.7.2.1 | ...nach Anforderung der Schnellabfahr-<br>prozedur in Block A . . . . .                        | 3.2-31 |
| 3.2.7.2.2 | ...nach Anforderung der Schnellabfahr-<br>prozedur in beiden Blöcken . . . . .                 | 3.2-33 |
| 3.2.7.2.3 | ...nach Ausfall der elektrischen Eigen-<br>bedarfsversorgung . . . . .                         | 3.2-33 |
| 3.2.7.3   | Abschalten der Hauptspeisewasserzufuhr .                                                       | 3.2-35 |

## 3.2-2

|           |                                                                            |        |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.2.7.3.1 | Abschalten der Hauptspeisewasserzufuhr von Block A . . . . .               | 3.2-35 |
| 3.2.7.3.2 | Fehlerhafte Hauptspeisewasserzufuhr von Block B . . . . .                  | 3.2-36 |
| 3.2.7.4   | Abschalten der Hauptkühlgasgebläse . . . . .                               | 3.2-38 |
| 3.2.7.5   | An- und Abfahrssystem . . . . .                                            | 3.2-40 |
| 3.2.7.6   | Zuschalten der Querverbindung der An- und Abfahrssysteme . . . . .         | 3.2-41 |
| 3.2.7.7   | Nebenkühlwassersystem, Betriebskühlwassersystem, Betonkühlsystem . . . . . | 3.2-42 |
| 3.2.7.7.1 | Versagen aktiver Einrichtungen . . . . .                                   | 3.2-42 |
| 3.2.7.7.2 | Versagen passiver Einrichtungen . . . . .                                  | 3.2-44 |
| 3.2.7.8   | Menschliche Fehlhandlungen . . . . .                                       | 3.2-46 |
| 3.2.7.9   | Ersatzausfallraten für Fehlerbaummodule . . . . .                          | 3.2-47 |
| 3.2.7.10  | Kennzeichnungssystem für Fehlerbaumeingänge . . . . .                      | 3.2-52 |
| 3.2.8     | LITERATURVERZEICHNIS . . . . .                                             | 3.2-53 |
| 3.2.9     | ABBILDUNGEN: FEHLERBAUM- UND EREIGNISABLAUFDIAGRAMME . . . . .             | 3.2-55 |

### 3.2.1 Zusammenfassung

Nach dem Sprachgebrauch der Reaktortechnik sind "Transienten" Ereignisabläufe, die durch ein Ungleichgewicht von Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr ausgelöst werden. Ereignisabläufe, die durch Lecks in der druckführenden Umschließung ausgelöst werden, sind also keine Transienten.

Transienten führen zunächst zur Anforderung der Nachwärmeabfuhr (NWA) über den Dampferzeuger (DE).

Fällt diese aus, so muß die Nachwärme über das Betonkühlsystem abgeführt werden, wobei erhöhte Komponentenbelastungen auftreten. Dieser Fall wird als Auslegungsstörfall beherrscht, es ist aber noch nicht endgültig geklärt, ob der betroffene Reaktor danach den Leistungsbetrieb wiederaufnehmen darf.

Der gleichzeitige Ausfall der NWA über den DE und über das Betonkühlsystem führt zum Überschreiten von Auslegungsgrenzen. Die Häufigkeit dieses Falls ist aber hinreichend gering, um sicher nicht mehr unter die Auslegungsstörfälle zu fallen.

Folgende Gruppen auslösender Ereignisse wurden betrachtet:

1. Ausfall der Primärgas - Zirkulation (sowohl Zwangs- als auch Naturkonvektion),
2. Ausfall der Wärmeabfuhr aus dem Dampferzeuger,
3. Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten.

Der Ausfall der Primärgas - Zirkulation bei bespeistem DE führt jedoch nicht zu den erwähnten erhöhten Komponentenbelastungen, da zwar infolge unzureichender Primärgaszirkulation die Temperaturen im Reaktorkern ansteigen, wegen der weiterlaufenden DE - Bespeisung aber die Kaltgasräume, der DE und der Reaktordruckbehälter bei normalen Temperaturen bleiben.

Für Fälle mit Ausfall der DE - Bespeisung, mit gleichzeitigem Ausfall der DE - Bespeisung und des Betonkühlsystems sowie mit Ausfall der DE - Bespeisung infolge Weiterlaufs eines Hauptgebläses ergeben sich die in den folgenden Abbildungen aufgeführten Summenhäufigkeiten.

### 3.2-4

| =====                                 |                                             |                        |                        |
|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|------------------------|
| Auslösendes Ereignis                  | Häufigkeit für "Ausfall DE - Bespeisung" in |                        |                        |
|                                       | Block A                                     | Block B                | beiden Blöcken         |
|                                       | (Versagen der Umschaltung)                  |                        | (Versagen              |
|                                       |                                             |                        | beider AuAS)           |
| =====                                 |                                             |                        |                        |
| RESA/SAF Block A                      | $1,2 \times 10^{-4}/a$                      |                        | $2,2 \times 10^{-4}/a$ |
|                                       | [f= 4]                                      |                        | [f= 3]                 |
| RESA/SAF Block B                      |                                             | $1,2 \times 10^{-4}/a$ | $2,2 \times 10^{-4}/a$ |
|                                       |                                             | [f= 4]                 | [f= 3]                 |
| Turbinen-schnell-<br>abschaltung      | $4,2 \times 10^{-5}/a$                      | $4,2 \times 10^{-5}/a$ | $5,2 \times 10^{-5}/a$ |
|                                       | [f= 7]                                      | [f= 7]                 | [f= 6]                 |
| Ausfall Konden-<br>satorvakuum        | $3,5 \times 10^{-5}/a$                      | $3,5 \times 10^{-5}/a$ | $4,4 \times 10^{-5}/a$ |
|                                       | [f= 4]                                      | [f= 4]                 | [f= 4]                 |
| Anford.Hilfsstrom<br>in einem Block   | $\varepsilon$                               | $\varepsilon$          | $\varepsilon$          |
| Anford.Hilfsstrom<br>in beid. Blöcken | $7,8 \times 10^{-6}/a$                      | $7,8 \times 10^{-6}/a$ | $3,1 \times 10^{-5}/a$ |
|                                       | [f= 9]                                      | [f= 9]                 | [f=11]                 |
| =====                                 |                                             |                        |                        |
| SUMME                                 | $2,0 \times 10^{-4}/a$                      | $2,0 \times 10^{-4}/a$ |                        |
|                                       |                                             |                        | $5,7 \times 10^{-4}/a$ |
|                                       | $4,0 \times 10^{-4}/a$                      | [f= 3]                 | [f= 3]                 |
| =====                                 |                                             |                        |                        |

Erwartungswerte, f=Unsicherheitsfaktor der Lognormalverteilung  
 $\varepsilon$  = 'vernachlässigbar'

Die Häufigkeit des Ausfalls der DE-Bespeisung in nur einem Block ist aus dem Grund geringer als für gleichzeitigen Ausfall in beiden Blöcken, weil die Möglichkeit der Umschaltung (Querverbindung) besteht, solange noch irgendein Strang eines AuAS funktioniert.

Abbildung 3.2-1: Häufigkeiten für Ausfall der DE-Bespeisung



| Auslösendes Ereignis                      | Häufigkeit für "Ausfall DE - Bespeisung UND Ausfall Betonkühlsystem" in |                                  |                                   |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|                                           | Block A                                                                 | Block B                          | beiden Blöcken                    |
| RESA/SAF Block A                          | $6,6 \times 10^{-9}/a$<br>[f=21]                                        |                                  | $\varepsilon$                     |
| RESA/SAF Block B                          |                                                                         | $6,6 \times 10^{-9}/a$<br>[f=21] | $\varepsilon$                     |
| Turb.schnellab. oder Ausf.Kond.           | $2,5 \times 10^{-9}/a$<br>[f=26]                                        | $2,5 \times 10^{-9}/a$<br>[f=26] | $\varepsilon$                     |
| Anford.Hilfsstrom in einem Block          | $\varepsilon$                                                           | $\varepsilon$                    | $\varepsilon$                     |
| Anford.Hilfsstrom in beid. Blöcken        | $3,2 \times 10^{-8}/a$<br>[f=43]                                        | $3,2 \times 10^{-8}/a$<br>[f=43] | $\varepsilon$                     |
| Leck Betonkühls. oder Ausfall Rückkühlung | $2,5 \times 10^{-7}/a$<br>[f= 8]                                        | $2,5 \times 10^{-7}/a$<br>[f= 8] | $<1,1 \times 10^{-7}/a$<br>[f= 8] |
| SUMME                                     | $2,9 \times 10^{-7}/a$                                                  | $2,9 \times 10^{-7}/a$           |                                   |
|                                           | $5,8 \times 10^{-7}/a$ [f= 9]                                           |                                  | $<1,1 \times 10^{-7}/a$           |

Erwartungswerte, f=Unsicherheitsfaktor der Lognormalverteilung  
 $\varepsilon$  = 'vernachlässigbar'

Abbildung 3.2-2: Häufigkeiten für gleichzeitigen Ausfall der DE - Bespeisung UND des Betonkühlsystems

|       |                                         |                          |
|-------|-----------------------------------------|--------------------------|
| ===== |                                         |                          |
|       | Auslösendes Ereignis: RESA/SAF Block A  |                          |
|       | Häufigkeit für "Ausfall DE - Bespeisung |                          |
|       | infolge Gebläseweiterlaufs" in Block A  |                          |
| ===== |                                         |                          |
|       | unveränderte Auslegung,                 | 4,6 x10 <sup>-4</sup> /a |
|       | jährlicher Test                         | [f=27]                   |
| ----- |                                         |                          |
|       | 2 Leistungsschalter je                  | 6,2 x10 <sup>-5</sup> /a |
|       | Gebläse, jährlicher Test                | [f=60]                   |
| ----- |                                         |                          |
|       | unveränderte Auslegung,                 | 3,6 x10 <sup>-5</sup> /a |
|       | monatlicher Test                        | [f=27]                   |
| ----- |                                         |                          |
|       | 2 Leistungsschalter je                  | 3,8 x10 <sup>-7</sup> /a |
|       | Gebläse, monatlicher Test               | [f=60]                   |
| ===== |                                         |                          |

Erwartungswerte, f=Unsicherheitsfaktor der Lognormalverteilung

Abbildung 3.2-3: Häufigkeiten für Ausfall der DE -  
Bespeisung infolge Gebläseweiterlaufs

### 3.2.2 Analysemethodik, Gliederung der Dokumentation

Analysemethoden und -daten sind in /3.2-1/ beschrieben.

Die Fehlerbaumanalysen berücksichtigen nur die in /3.2-2/ beschriebenen Systeme. Insbesondere wurden die Auswirkungen des Ausfalls folgender Hilfssysteme auf die Verfügbarkeit der NWA - Systeme *nicht* untersucht:

- Lüftungsanlage,
- Energieversorgung der Armaturen,
- Energieversorgung der Meß- und Regeltechnik und der Ansteuerung

Falls Abhängigkeiten in oder mit diesen Hilfssystemen bestehen, können diese die Unverfügbarkeit der NWA - Systeme dominieren, dies ist aber bei Auslegung der Hilfssysteme nach dem Stand der Technik im allgemeinen nicht zu erwarten.

Da der "Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten" keine Transiente ist, aber im weiteren Ereignisablauf eine Transiente auslöst, wurde dieser separat analysiert und beschrieben (Kapitel "Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten als auslösendes Ereignis" auf Seite 3.2-27). Die Analyse umfaßt die folgenden Schritte:

1. Identifikation der auslösenden Ereignisse,
2. Ereignisablaufanalyse für jedes der auslösenden Ereignisse,
3. Fehlerbaumanalyse für Teilsysteme  
(z.B. Frischdampfentlastung, An- und Abfahrssystem, Nebenkühlwassersystem),
4. Numerische Berechnung der Häufigkeit jedes in 2. identifizierten Ereignisablaufs durch Kopplung der entsprechenden Teilfehlerbäume,
5. Berechnung der Summenhäufigkeiten der Anlagenzustände "Ein Block NWA über Betonkühlsystem", "Beide Blöcke NWA über Betonkühlsystem", "Ein Block keine NWA" und "Beide Blöcke keine NWA".

Das Kapitel "Erste Ergebnisse, Optimierung der Auslegung" auf Seite 3.2-9 enthält die Analyseergebnisse für die in /3.2-2/ dokumentierte, ursprüngliche Anlagenauslegung, sowie die daraufhin vorgenommenen Auslegungsänderungen.

Die folgenden Kapitel "Ereignisabläufe mit Ausfall der Primärgas - Zirkulation" auf Seite 3.2-11 bis "Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten als auslösendes Ereignis" auf Seite 3.2-27 beschreiben die Ereignisablaufanalysen, das Kapitel "Fehlerbaumanalysen" auf Seite 3.2-29 die Fehlerbaumanalysen.

Da die Berechnung der Häufigkeiten sich an den Ereignisabläufen orientiert, werden die errechneten Häufigkeiten der Ereignisabläufe im Anschluß an deren Beschreibung in den Kapiteln "Ereignisabläufe mit Ausfall der Primärgas - Zirkulation" auf Seite 3.2-11 bis "Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten als auslösendes Ereignis" auf Seite 3.2-27 dokumentiert, obwohl sie vom Analyseablauf her hinter die Beschreibung der Fehlerbaumanalysen einzuordnen wären.

Im Kapitel "Zusammenfassung" auf Seite 3.2-3 werden die Häufigkeiten der einzelnen Ereignisabläufe zu Häufigkeiten der Anlagenzustände zusammengefaßt.

### 3.2.3 Erste Ergebnisse, Optimierung der Auslegung

Die Diskussion der ersten Ergebnisse mit dem Hersteller des HTR-100 zeigte die Notwendigkeit von Verbesserungen der Auslegung. Da es zu aufwendig wäre, die Häufigkeiten aller Ereignisabläufe für die ursprüngliche und die jetzige Auslegung jeweils bei jährlichem und monatlichem Test des An- und Abfahrssystems zu beschreiben, soll als Beispiel hierfür der Ausfall der Nachwärmeabfuhr (NWA) über den Dampferzeuger (DE) nach dem auslösenden Ereignis "Standard - Schnellabfahrprozedur" (SAF) dienen. Die erste Zeile in Abbildung 3.2-4 auf Seite 3.2-10 zeigt die Häufigkeiten dieser Ereignisabläufe für die ursprüngliche Auslegung (nach /3.2-2/) bei jährlichem Test des An- und Abfahrssystems (AuAS).

Da der Zielwert des Herstellers von  $10^{-4}/a$  für Ereignisabläufe mit alleiniger NWA über das Betonkühlsystem bei weitem nicht erreicht wurde, wurden neben anderen die folgenden Auslegungsänderungen vorgenommen:

- Statt des - zwar nicht in /3.2-2/ festgelegten, aber für die Analyse zunächst vereinbarten - Testintervalls von 1 Jahr für das AuAS wurden vierwöchentliche, versetzte Tests angesetzt. Die Häufigkeiten wurden hierdurch auf die Werte der zweiten Zeile in Abbildung 3.2-4 auf Seite 3.2-10 gesenkt.
- In der Zirkulationsleitung des AuAS, in der Hauptspeisewasser- und der Hauptfrischdampfleitung wurde jeweils eine zusätzliche Motor - Absperrarmatur vorgesehen, die Rückschlagarmatur in der AuAS - Speisewasserleitung erhielt eine parallele redundante Armatur.

Danach ergeben sich die Häufigkeiten in der dritten Zeile der Abbildung 3.2-4 auf Seite 3.2-10 sowie alle anderen in diesem Bericht aufgeführten Ergebnisse. Die Häufigkeit für NWA über Betonkühlsystem konnte also erheblich verringert werden.

|                                                | Block A NWA über<br>Betonkühlsystem | Beide Blöcke NWA<br>über Betonkühls. |
|------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Auslegung<br>laut /3.2-2/,<br>jährlicher Test  | $1,9 \times 10^{-2}/a$ [3]          | $3,3 \times 10^{-2}/a$ [5]           |
| Auslegung<br>laut /3.2-2/,<br>4-wöchentl. Test | $3,7 \times 10^{-4}/a$ [4]          | $4,2 \times 10^{-4}/a$ [4]           |
| jetzige Auslegung,<br>4-wöchentl. Test         | $1,2 \times 10^{-4}/a$ [4]          | $2,2 \times 10^{-4}/a$ [3]           |

Erwartungswert [Unsicherheitsfaktor]

Die Häufigkeit des Ausfalls der DE-Bespeisung in nur einem Block ist aus dem Grund geringer als für gleichzeitigen Ausfall in beiden Blöcken, weil die Möglichkeit der Umschaltung (Querverbindung) besteht, solange noch irgendein Strang eines AuAS funktioniert.

Abbildung 3.2-4: Häufigkeiten für NWA über Betonkühlsystem nach Schnellabfahren Block A: ursprüngliche und geänderte Auslegung

### 3.2.4 Ereignisabläufe mit Ausfall der Primärgas - Zirkulation

Nach der obigen Definition von "Transienten" werden hier nur Ereignisabläufe behandelt, bei denen im Reaktor anfangs Normalbetriebsdruck herrscht. Druckentlastungsstörfälle werden im Kapitel 3.4 behandelt.

Der Ausfall der Primärgas - Zirkulation (d.h. beide Gebläseabsperrorgane (GAO) sind geschlossen oder nur ein GAO ist geöffnet und das zugehörige Gebläse fördert nicht) führt bei bespeistem DE nicht zu erhöhten Komponentenbelastungen, da zwar infolge unzureichender Primärgaszirkulation die Temperaturen im Reaktorkern ansteigen, wegen der weiterlaufenden DE - Bespeisung aber die Kaltgasräume, der DE und der Reaktordruckbehälter bei normalen Temperaturen bleiben. Diese Ereignisabläufe werden daher hier nicht weiter verfolgt. Ihre Häufigkeit ist lediglich eine Frage der Anlagenverfügbarkeit, nicht aber des Umgebungsrisikos.

Bei den GAO gehen wir davon aus, daß es sich um die beim THTR verwendete Konstruktion handelt. Sie können entweder hydraulisch geschlossen werden, und zwar fernbedient von der Warte oder der Notsteuerstelle aus, oder durch die Schließfeder, nachdem entweder die beiden Schnellschluß - Magnetventile von der Notsteuerstelle aus oder zwei Handventile im Ölversorgungsraum geöffnet werden. Das Öffnen eines GAO ist nur bei verfügbarem Hydraulik - Druck möglich, da dabei die Schließfeder wieder gespannt werden muß.

Auslegungsgemäß ist beim HTR-100 der Schließbefehl für das jeweils andere GAO verriegelt, wenn ein GAO bereits geschlossen ist.

Folgende Ereignisabläufe können daher zu einer der genannten Ausfallkombinationen führen:

#### 3.2.4.1 ...nach Betriebsausfall eines Gebläses

Häufigkeit des auslösenden Ereignisses:

Median  $1,3 \times 10^{-5} / \text{h}$  [f=10]

Das zugehörige GAO wird geschlossen, der Reaktor wird mit reduzierter Leistung weiterbetrieben, bis ein Abfahren zwecks Reparatur des Gebläses möglich ist (angenommen: Im Mittel 1/2 Jahr). In dieser Zeit tritt ein Betriebsausfall des zweiten Gebläses auf, Wahrscheinlichkeit (Median):

$$1 - \exp(-1,3 \times 10^{-5} / h \times 4380 h) = 5,5 \times 10^{-2} \quad [f=10]$$

Öffnen des geschlossenen GAO gelingt nicht,

Wahrscheinlichkeit (Median):

$$1,3 \times 10^{-2} \quad [f=10]$$

Häufigkeit für Ausfallkombination:

$$\text{Median } 8,1 \times 10^{-5} / a \quad [f=172], \quad EW = 1,1 \times 10^{-2} / a$$

Folge: Beide Gebläse ausgefallen, nur ein GAO offen.

Der Erwartungswert der Häufigkeit ist relativ hoch, dies liegt aber hauptsächlich an dem sehr großen Unsicherheitsfaktor von 172, der die tatsächlich vorhandene Unsicherheit bei der Beurteilung der Ausfallrate der Gebläse korrekt wiedergibt. Wegen der nur geringen Auswirkungen auf die Anlage sind genauere Häufigkeitsangaben aber auch nicht erforderlich.

#### 3.2.4.2 ...nach Standard - Schnellabfahrprozedur

Angenommene Häufigkeit des auslösenden Ereignisses: 1/a

Grund: Hersteller und Betreiber streben an, nur alle 4 Jahre eine Revisionsphase einzulegen, zusätzlich wird eine so hohe Verfügbarkeit angestrebt, daß nur etwa einmal pro Jahr mit der Auslösung der Standard-SAF zu rechnen sei. Die bisherigen Betriebserfahrungen deuten eine höhere Häufigkeit für Reaktorschnellabschaltungen an. Bezogen auf das auslösende Ereignis ist die Annahme  $H(\text{SAF})=1/a$  also vergleichsweise optimistisch, dies wird aber zumindest teilweise wieder kompensiert durch die Annahme jährlicher Tests der Komponenten des Hauptkühlsystems.

Im Verlauf der SAF werden die Gebläse vorübergehend abgeschaltet. Durch nichtselbstmeldenden Ausfall der Verriegelung schließen beide Gebläse - Absperr - Organe (GAO).

2-von-3-Schaltung Inverter (XS316 und XS304):



$\lambda(\text{Median}) = 0,5 \times 10^{-6} / \text{h}$  [f=3], jährlicher Test  
 Wahrscheinlichkeit (Median):  
 $1,9 \times 10^{-5} / \text{Anf.}$  [f=9]

Anschließend Nichtöffnen beider GAO infolge mechanischen Versagens ( $\lambda(\text{CMF})$  abgeleitet von Motorarmatur):

$p(\text{unabh. Ausfall}) = 1,3 \times 10^{-2} / \text{Anf.}$  [Med., f= 10]  
 $\lambda(\text{CMF}) = 8,0 \times 10^{-9} / \text{h}$  [Med., f=23]

Wahrscheinlichkeit (Erwartungswert)  
 $= 8,5 \times 10^{-3}$  [UA, f=100] +  $2,2 \times 10^{-4}$  [CMF, f=23]  
 $= 8,7 \times 10^{-3}$  [f=100], Median =  $1,8 \times 10^{-4}$

Häufigkeit für Ausfallkombination:

Median =  $3,4 \times 10^{-9} / \text{a}$  [f=164]  
 Erwartungswert =  $4,2 \times 10^{-7} / \text{a}$

Die Häufigkeit ist gegenüber der von entsprechenden Ereignisabläufen "...nach Betriebsausfall eines Gebläses" auf Seite 3.2-11 vernachlässigbar gering bei gleich geringen Auswirkungen.

### 3.2.5 Ereignisabläufe mit Ausfall der Wärmeabfuhr aus dem Dampferzeuger

Die Wärmeabfuhr aus dem Dampferzeuger erfolgt im Leistungsbetrieb über das Hauptkühlsystem, beim An- und Abfahren sowie bei Störungen und Störfällen über das An- und Abfahrssystem (AuAS). Die Wärmeabfuhr aus dem Dampferzeuger ist erst dann ausgefallen, wenn weder das Hauptkühlsystem noch das An- und Abfahrssystem zur Verfügung steht. Auslösende Ereignisse hierfür sind also Betriebszustände, Störungen und Störfälle, die zum Abfahren, Abschalten oder Ausfall des Hauptkühlsystems führen. Als repräsentative Ereignisse werden hier analysiert:

- "Standard - Schnellabfahrprozedur" auf Seite 3.2-15
- "Speisewassermangel" auf Seite 3.2-19
- "Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)" auf Seite 3.2-21
- "Turbinen - Schnellabschaltung (ND - Turbine)" auf Seite 3.2-23
- "Ausfall Kondensatorvakuum" auf Seite 3.2-23
- "Während des Leistungsbetriebs entdeckter Ausfall des An- und Abfahrssystems eines Blocks" auf Seite 3.2-24
- "Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in Block A" auf Seite 3.2-25
- "Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in beiden Blöcken" auf Seite 3.2-25

### 3.2.5.1 Standard - Schnellabfahrprozedur

Die Standard - Schnellabfahrprozedur (SAF) wird nach allen Störungen und Störfällen angefordert, die auch eine Reaktor - Schnellabschaltung (RESA) auslösen. Die Häufigkeit der SAF wird mit  $1/a$  angenommen (pro Reaktorblock).

Grund: Hersteller und Betreiber streben an, nur alle 4 Jahre eine Revisionsphase einzulegen, zusätzlich wird eine so hohe Verfügbarkeit angestrebt, daß nur etwa einmal pro Jahr mit der Auslösung der Standard-SAF zu rechnen sei. Die bisherigen Betriebserfahrungen deuten eine höhere Häufigkeit für Reaktorschnellabschaltungen an. Bezogen auf das auslösende Ereignis ist die Annahme  $H(SAF)=1/a$  also vergleichsweise optimistisch, dies wird aber zumindest teilweise wieder kompensiert durch die Annahme jährlicher Tests der Komponenten des Hauptkühlsystems. Eine Erhöhung der Häufigkeit der SAF auf  $3/a$  würde die Häufigkeit des Ausfalls der DE-Bespeisung in beiden Blöcken -ausgelöst durch SAF- nur um den Faktor 2 erhöhen.

Da beide Reaktorblöcke baugleich sind, kann als auslösendes Ereignis die Anforderung der SAF in Block A angenommen werden.

Nach Auslösung von RESA und SAF laufen folgende Vorgänge automatisch ab: Die Hauptspeisewasserzufuhr wird auf 10% gedrosselt. (Wir nehmen an, daß dies mit Hilfe der Hauptspeisewasser - Regelventile AHRV11 und AHRV12 geschieht, die direkt hinter den beiden Hauptspeisewasserpumpen angeordnet sind.) Die Frischdampfleitung zur Turbine wird abgesperrt (Armaturen AHMV2 und AHMV4) und der Frischdampf über die HD - Umleit - Station (H-UST) abgeleitet, bis der Frischdampfdruck auf 80 bar abgesunken ist. Dann werden die HD - Umleit - Station, die ihr vorgeschaltete Motorarmatur (AHMV3), die Motorarmatur (AHMV1) in der Hauptfrischdampfleitung und die Hauptspeisewasser - Regelventile (AHRV11, AHRV12) geschlossen, die Hauptspeisewasserpumpen (AHSP1, AHSP2) abgeschaltet und das Hauptspeisewasser - Absperrventil (AHMV10) geschlossen und die weitere Nachwärmeabfuhr vom AuAS übernommen. Dabei wird das Entlastungsregelventil nicht benötigt.

Ein nicht ordnungsgemäßer Verlauf der ersten NWA - Phase über die HD - Umleit - Station wird über Komponentenschutzkriterien erkannt und führt zur sofortigen Anforderung des AuAS, wobei dann das Entlastungs - Regelventil (ERV) funktionieren muß (Ereignisablaufdiagramm Abbildung 3.2-7 auf Seite 3.2-56).

Kann der Dampferzeuger weder über die HD - Umleit - Station noch über das Entlastungsregelventil entlastet werden oder ist das AuAS des Blocks A nicht verfügbar, so kann von Hand die Querverbindung zum AuAS des Blocks B zugeschaltet werden. Zuvor muß Block B jedoch ebenfalls abgefahren werden. Da nun von Block A überhaupt kein Frischdampf an das Hauptkühlsystem abgegeben werden kann und von Block B nur noch die der ersten NWA - Phase entsprechende Menge, werden beide Turbinen abgeschaltet, und es kann auch kein Industriedampf in ausreichender Menge und Qualität abgegeben werden, was zur Abschaltung auch der Industriedampfanlage führt. Der in der ersten NWA - Phase von Block B anfallende Frischdampf kann daher nicht über die HD - Umleit - Station abgegeben werden, sondern nur über das Entlastungsregelventil des Blocks B.

Versagt dieses oder das AuAS des Blocks B, so ist bei beiden Blöcken die NWA über den Dampferzeuger ausgefallen (Ereignisablaufdiagramm Abbildung 3.2-7 auf Seite 3.2-56, Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA Block A", Abbildung 3.2-12 auf Seite 3.2-61).

Hierfür ergibt sich eine mittlere Unverfügbarkeit von  $2,2 \times 10^{-4}$  [Erwartungswert, Unsicherheitsfaktor 3].

Hauptbeiträge sind zu 81% Common-Mode-Ausfälle, nämlich

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rückschlagarmaturen in AuAS - Spw.- Leitung, öffnen nicht (4v4)             | 34% |
| AuAS - Speisepumpen, starten nicht (4v4)                                    | 27% |
| Reduzierstationen der AuAS - Kondensatoren, öffnen oder regeln nicht (4v4)  | 11% |
| Rückschlagarmaturen hinter AuAS - Zirkulationspumpen, schließen nicht (2v2) | 4%  |
| Schalterversagen der Zellenkühlturm - Ventilatoren (4v4)                    | 3%  |
| AuAS - Kondensator - Niveau - Regelventile, öffnen oder                     |     |

regeln nicht (4v4)

2%

Der dominierende Beitrag, Startversagen von 4 von 4 Pumpen mit einem Erwartungswert von rund  $10^{-4}$ /Anf. (bei einer Fehlererkenntniszeit von 2 Wochen), erscheint hoch, liegt aber nur um den Faktor 2 über der in der DRS Phase B verwendeten Wahrscheinlichkeit von  $5 \times 10^{-5}$  (Pumpe, startet nicht, 4 von 4, Fehlererkenntniszeit 2 Wochen /3.2-6/), was in Anbetracht der noch immer bestehenden großen Unsicherheiten bei der Quantifizierung von Common - Mode - Ausfällen als gute Übereinstimmung zu werten ist. Die errechnete Unverfügbarkeit von  $2,3 \times 10^{-4}$ /Anf. ist für ein derart komplexes System als realistischer Wert zu betrachten.

Versagt die Zuschaltung der Querverbindung, so ist nur bei Block A die NWA über den DE ausgefallen (Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umschaltung auf AuAS Block B nach RESA Block A", Abbildung 3.2-14 auf Seite 3.2-63).

Mittlere Unverfügbarkeit:

$1,2 \times 10^{-4}$  [Erwartungswert, Unsicherheitsfaktor 4].

Hauptbeiträge sind folgende Ursachengruppen jeweils in Kombination mit dem Versagen der Zuschaltung der Querverbindung zum Block B:

|                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Frischdampf - Entlastung über Hauptkühlsystem schließt nicht                   | 21% |
| Frischdampf - Entlastung über Hauptkühlsystem UND ERV öffnet oder regelt nicht | 20% |
| Reduzierstationen der AuAS - Kondensatoren, öffnen oder regeln nicht           | 16% |
| AuAS - Speisepumpen, starten nicht                                             | 15% |

Die bisher erläuterte Betrachtungsweise ist konservativ, da z.B. ein funktionsfähiges ERV in Block A zusammen mit einem funktionsfähigen AuAS in Block B bei verfügbarer Querverbindung im Prinzip bei beiden Blöcken eine hinreichende NWA über den DE gewährleisten könnte. Weiterhin könnte es möglich sein, trotz Abschaltung beider Turbinen und der Industriedampfanlage die DE über die HD - Umleit - Station zu entlasten, z.B. nach Öffnen der Armatur -HMP5 und der ND - Turbinen - Umleit - Station (NTUST) in den Kondensator (siehe Abbildung 3.2-5 auf Seite 3.2-34). Bei Ausnutzung dieser Möglichkeiten stünden zur Entlastung drei Red-

undanten (HD - Umleit - Station, ERV Block A, ERV Block B) zur Verfügung und für die langfristige NWA beide AuAS (Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA Block A, optimistische Bewertung", Abbildung 3.2-13 auf Seite 3.2-62).

Die Untersuchung des damit verbundenen Verbesserungspotentials ergab, daß sich bezüglich des Ausfalls der NWA über DE in Block A und Versagen der Zuschaltung der Querverbindung zu Block B nichts ändern würde. Bezüglich des Ausfalls der NWA über DE in beiden Blöcken würde dadurch die mittlere Unverfügbarkeit auf  $2,16 \times 10^{-4}/a$  [ $f=3,5$ ] reduziert, d.h. auf 92% des konservativ errechneten Wertes. Wir halten diese Werte jedoch für zu optimistisch, da fraglich ist, ob die HD - Umleit - Station nach Abschaltung beider Turbinen und der Industriedampfanlage zur DE - Entlastung benutzt werden kann und ob jedes der Entlastungsregelventile unabhängig vom Zustand der übrigen Komponenten die DE - Entlastung beider Blöcke übernehmen kann. Selbst wenn dies alles zuträfe, ist weiterhin fraglich, ob für die erforderliche Fehlerdiagnose und die Zusammenschaltung der intakten Systemteile genügend Zeit zur Verfügung steht. Schließlich ist der bei optimistischer Modellierung erreichbare Verfügbarkeitsgewinn so gering, daß sich der erhöhte Analyse- und Nachweisaufwand nicht lohnen würde.

### 3.2.5.2 Speisewassermangel

Die Gesamthäufigkeit von Ereignissen mit Speisewassermangel wurde nicht analysiert, weil dafür die Beschreibung der Kraftwerksanlage nicht detailliert genug war und sowohl die Konsequenzen als vermutlich auch die Häufigkeit geringer als die von Ausfällen des Kondensator - Vakuums sind. Stellvertretend sei hier das folgende auslösende Ereignis genannt: "Ausfall der zweiten Speisewasserpumpe während der Reparatur der ersten".

Häufigkeit Ausfall eine Pumpe von zwei:

$$2 \times 2,7 \times 10^{-4} / \text{h} \times 8760 \text{h/a} = 4,7/\text{a} \quad [\text{Median, } f=3]$$

Mittlere Reparaturdauer: 8h (sicher konservativ)

Wahrscheinlichkeit für Ausfall der zweiten Pumpe innerhalb von 8h:

$$1 - \exp(-2,7 \times 10^{-4} / \text{h} \times 8 \text{h}) = 1,1 \times 10^{-3} \quad [\text{Median, } f=3]$$

Häufigkeit für unabhängige Ausfälle beider Pumpen:

$$4,7/\text{a} \times 1,1 \times 10^{-3} = 5,1 \times 10^{-3} / \text{a} \quad [\text{Median, } f=9]$$

Häufigkeit für abhängige Ausfälle beider Pumpen:

$$3,6 \times 10^{-7} / \text{h} \times 8760 \text{h/a} = 3,2 \times 10^{-3} / \text{a} \quad [\text{Median, } f=1,6]$$

Gesamthäufigkeit:

$$\text{Erwartungswert } 1,6 \times 10^{-2} / \text{a, Median } 7,8 \times 10^{-3} / \text{a, } f=7$$

Konsequenzen:

Da beim betroffenen Reaktorblock sofort mit Eintritt des auslösenden Ereignisses der Speisewasserfluß ausfällt, gehen wir davon aus, daß die Standard - Schnellabfahrprozedur nicht möglich ist, sondern sofort das Entlastungsregelventil angefordert wird. Der weitere Verlauf ist wie bereits bei SAF/RESA (Kapitel "Standard - Schnellabfahrprozedur" auf Seite 3.2-15) beschrieben.

Die mittlere Unverfügbarkeit beider AuAS einschließlich ERV beträgt  $2,9 \times 10^{-4}$  [EW,  $f=4$ ] (Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA beider Blöcke", Abbildung 3.2-15 auf Seite 3.2-64).

Hauptbeiträge siehe "Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)" auf Seite 3.2-21.

Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von

$$1,6 \times 10^{-2} / \text{a} \times 2,9 \times 10^{-4} = 4,6 \times 10^{-6} / \text{a}$$

Die mittlere Unverfügbarkeit des AuAS Block A einschließlich ERV UND Versagen der Zuschaltung der Querverbindung zu Block B beträgt  $2,3 \times 10^{-4}$  [EW,  $f=4$ ] (Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umsch. auf AuAS Block B nach RESA beider Blöcke", Abbildung 3.2-16 auf Seite 3.2-64).

Hauptbeiträge siehe "Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)" auf Seite 3.2-21.

Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von  $1,6 \times 10^{-2}/a \times 2,3 \times 10^{-4} = 3,7 \times 10^{-6}/a$



### 3.2.5.3 Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)

Die HD - TSA wird in der Regel durch Öffnen der HD - Turbinen - Umleit - Station (HTUST) beherrscht. Versagt diese, so wird SAF bei beiden Blöcken ausgelöst. Dabei werden die Armaturen AHMV2, AHMV4, BHMV2 und BHMV4 geschlossen, die Armaturen AHMV3, BHMV3 und die HD - Umleit - Station geöffnet. Dadurch fällt die Abgabe von Heizdampf für die Industriedampfüberhitzer aus. Dies führt zur Schutzabschaltung der Industriedampfanlage. Außerdem wird kein Dampf an dem Eintritt der MD - Turbine geliefert, woraufhin diese ebenfalls schnellabgeschaltet wird. Damit sind alle Wärmenenken der HD - Umleit - Station ausgefallen und in beiden Blöcken wird das Entlastungsregelventil und das An- und Abfahrssystem angefordert.

Die Häufigkeit der HD-TSA wird mit  $1/a$  angenommen (Median,  $f=3$ , pro Reaktorblock).

Grund: Hersteller und Betreiber streben an, nur alle 4 Jahre eine Revisionsphase einzulegen, zusätzlich wird eine so hohe Verfügbarkeit angestrebt, daß nur etwa einmal pro Jahr mit der Auslösung der Standard-SAF zu rechnen sei. Die bisherigen Betriebserfahrungen deuten eine höhere Häufigkeit für TSA an. Bezogen auf das auslösende Ereignis ist die Annahme  $H(TSA)=1/a$  also vergleichsweise optimistisch. Dies wird aber zumindest teilweise wieder kompensiert durch die Annahme jährlicher Tests der Komponenten des Hauptkühlsystems.

Die mittlere Unverfügbarkeit der HD - Turbinen - Umleit - Station einschließlich Ansteuerung, Regelung, Einspritzwasser - Regelventil und dessen Ansteuerung beträgt:

$$\begin{aligned} & 4,0 \times 10^{-3} \text{ [Med., } f=4] + 14,4 \times 10^{-6} / \text{h} \times 8760 \text{h} / 2 \text{ [Med., } f=3,8] \\ & = 4,0 \times 10^{-3} \text{ [Med., } f=4] + 6,05 \times 10^{-2} \text{ [Med., } f=3,8] \\ & = 6,7 \times 10^{-2} \text{ [Med., } f=3,6], \text{ EW} = 9,0 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

Die mittlere Unverfügbarkeit beider AuAS einschließlich ERV beträgt  $2,9 \times 10^{-4}$  [EW,  $f=4$ ] (Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA beider Blöcke", Abbildung 3.2-15 auf Seite 3.2-64).

*Hauptbeiträge* sind (insgesamt 89%):

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rückschlagarmaturen in AuAS - Spw.- Leitung, öffnen nicht (4v4)             | 25% |
| AuAS - Speisepumpen, starten nicht (4v4)                                    | 20% |
| Entlastungs - Regelventile, öffnen oder regeln nicht (2 unabh. Ausf.)       | 18% |
| Entlastungs - Regelventile, öffnen oder regeln nicht (2v2)                  | 11% |
| Reduzierstationen der AuAS - Kondensatoren, öffnen oder regeln nicht (4v4)  | 8%  |
| Rückschlagarmaturen hinter AuAS - Zirkulationspumpen, schließen nicht (2v2) | 3%  |
| Schalterversagen der Zellenkühlturm - Ventilatoren (4v4)                    | 2%  |
| AuAS - Kondensator - Niveau - Regelventile, öffnen oder regeln nicht (4v4)  | 1%  |

Die dominierenden Beiträge sind nahezu die gleichen wie nach RESA/SAF, hier kommt lediglich das Versagen der Entlastungs - Regelventile hinzu.

Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von

$$9 \times 10^{-2}/a \times 2,9 \times 10^{-4} = 2,6 \times 10^{-5}/a \quad [f=6]$$

für den Ausfall der NWA über DE in beiden Blöcken.

Die mittlere Unverfügbarkeit des AuAS Block A einschließlich ERV UND Versagen der Zuschaltung der Querverbindung zu Block B beträgt  $2,3 \times 10^{-4}$  [EW,  $f=4$ ], (Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umsch. auf AuAS Block B nach RESA beider Blöcke", Abbildung 3.2-16 auf Seite 3.2-64).

*Hauptbeitrag* ist:

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Entlastungs - Regelventil, öffnet oder regelt nicht, UND Versagen der Querverbindung zum Nachbarblock | 72% |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von

$$9 \times 10^{-2}/a \times 2,3 \times 10^{-4} = 2,1 \times 10^{-5}/a \quad [f=7]$$

für den Ausfall der NWA über DE in Block A bzw. Block B.

#### 3.2.5.4 Turbinen - Schnellabschaltung (ND - Turbine)

Die ND - TSA wird in der Regel durch Öffnen der ND - Turbinen - Umleit - Station (NTUST) beherrscht. Versagt diese, so wird SAF bei beiden Blöcken ausgelöst. Weiterer Verlauf und Häufigkeiten siehe "Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)" auf Seite 3.2-21.

Funktioniert die NTUST, aber versagt das Öffnen der Armatur -HMOV5 zwischen Austritt der HD - Turbine und Dampfleitung zum Industriedampfumformer, dann fällt die Industriedampfanlage aus. Der von der HD - Turbine abgegebene Dampf kann vermutlich vollständig von der NTUST aufgenommen werden und in den Kondensator abgeführt werden. Daher ergeben sich keine weiteren Konsequenzen.

#### 3.2.5.5 Ausfall Kondensatorvakuum

Der Ausfall des Kondensatorvakuum ist nach /3.2-5/ mit 0,15/Jahr zu erwarten. Er führt unmittelbar zur Anforderung der SAF in beiden Blöcken.

Für die AuAS gelten die gleichen Fehlerbäume und die gleichen Unverfügbarkeiten wie in Kapitel "Turbinen - Schnellabschaltung (HD - Turbine)" auf Seite 3.2-21.

Daraus ergibt sich eine Häufigkeit von

$$0,15/a \times 2,9 \times 10^{-4} = 4,4 \times 10^{-5}/a \quad [f=4]$$

für den Ausfall der NWA über DE in beiden Blöcken sowie eine Häufigkeit von

$$0,15/a \times 2,3 \times 10^{-4} = 3,5 \times 10^{-5}/a \quad [f=4]$$

für den Ausfall der NWA über DE in Block A bzw. Block B.

### 3.2.5.6 Während des Leistungsbetriebs entdeckter Ausfall des An- und Abfahrsystems eines Blocks

Es ist vorgesehen, die Stränge des AuAS vierwöchentlich zu testen (strangweise um je 2 Wochen versetzt), ohne dabei den Leistungsbetrieb zu unterbrechen. (Eine Revision mit Stillstand eines Reaktorblocks ist nur jährlich vorgesehen.) Zum Test des Entlastungsregelventils wird die Motorarmatur in der AuAS - Frischdampfleitung geschlossen, die im Normalbetrieb offen ist. Versagt das Wiederöffnen dieser Armatur (angenommen, in Block A), dann muß zur Reparatur dieser Armatur dieser Block abgefahren werden. Dies ist aber nur mit Hilfe des AuAS des Blocks B möglich. Dieser muß daher zuerst abgefahren werden. Da sich Block B in der Mitte eines Testintervalls befindet, empfiehlt es sich, dessen ERV und AuAS zuvor zu testen. Bei diesem Test entdeckte Ausfälle können dann vor der Anforderung instandgesetzt werden, mit Ausnahme der Motorarmatur in der AuAS - Frischdampfleitung.

Häufigkeiten:

Ausfallrate Motorarmatur öffnet nicht nach Schließen (30%):

$$\lambda = 2,4 \times 10^{-6} / \text{h} \text{ [Med., } f=3 \text{]}$$

Häufigkeit auslösendes Ereignis:

$$1/a \times [1 - \exp(-2,4 \times 10^{-6} / \text{h} \times 672 \text{h})] = 1,04 \times 10^{-2} / a$$

$$\text{EW} = 1,3 \times 10^{-2} / a \text{ [} f=3 \text{]}$$

Häufigkeit für "Motorarmatur in AuAS - FD - Leitung Block A öffnet nicht wieder UND Umschaltung auf Block B gelingt nicht":

$$\text{EW} = 1,3 \times 10^{-2} / a \text{ [} f=3 \text{]} \times 2,4 \times 10^{-2} \text{ [} f=2,6 \text{]}$$

$$= 3,1 \times 10^{-4} / a \text{ [} f=4,3 \text{]}$$

Häufigkeit für "Motorarmaturen in AuAS - FD - Leitungen Block A UND Block B öffnen nicht wieder":

$$1/a \times [1 - \exp(-2,4 \times 10^{-6} / \text{h} \times 672 \text{h})]$$

$$\times [1 - \exp(-2,4 \times 10^{-6} / \text{h} \times 336 \text{h})]$$

$$= 1,30 \times 10^{-6} / a \text{ [} 4,3 \text{]}$$

### 3.2.5.7 Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in Block A

Der Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in Block A (Fehlerbaum "Auslösendes Ereignis Ausfall Eigenbedarf auf Schiene BBA", Abbildung 3.2-8 auf Seite 3.2-57) wird zu 95% von Ausfallkombinationen verursacht, die direkt zum Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in beiden Blöcken führen. Sie sind im folgenden Kapitel beschrieben.

### 3.2.5.8 Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in beiden Blöcken

Zum Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung in beiden Blöcken tragen hauptsächlich folgende Ausfallkombinationen bei (UND - Verknüpfung der Fehlerbäume "Auslösendes Ereignis Ausfall Eigenbedarf auf Schiene BBA", Abbildung 3.2-8 auf Seite 3.2-57, und "Auslösendes Ereignis Ausfall Eigenbedarf auf Schiene BBB", Abbildung 3.2-9 auf Seite 3.2-58):

|                                        |                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Netzausfall                            | 0,11/a [f= 3]                       |
| UND HD-T-Umleit - Station regelt nicht | $1,4 \times 10^{-5}$ /h [f= 4]      |
|                                        | EW = $9,0 \times 10^{-3}$ /a [f= 6] |

|                                        |                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------|
| Netzausfall                            | 0,11/a [f= 3]                       |
| UND ND-T-Umleit - Station regelt nicht | $1,4 \times 10^{-5}$ /h [f= 4]      |
|                                        | EW = $9,0 \times 10^{-3}$ /a [f= 6] |

|                                                 |                                     |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Netzausfall                                     | 0,11/a [f= 3]                       |
| UND kein Abfangen auf Eigenbedarf (HD)          | 0,11/a [f= 3]                       |
| UND kein Abfangen auf Eigenbedarf (ND)          | 0,11/a [f= 3]                       |
| (kein Abfangen auf Eigenb.: Wahrsch. gekoppelt) |                                     |
|                                                 | EW = $2,7 \times 10^{-3}$ /a [f=12] |

Summe (Erwartungswert) =  $2,1 \times 10^{-2}$ /a [f=4]

Infolge Ausfall der Spannung auf beiden Eigenbedarfsschienen fällt die Hauptwärmesenke beider Blöcke aus. Die Frischdampf - Entlastung über die HD - Umleit - Station des Hauptkühlsystems

ist daher nicht möglich. Es wird in beiden Blöcken direkt das Entlastungsregelventil (ERV) und das An- und Abfahrssystem (AuAS) angefordert. Die Energieversorgung der AuAS muß von den Hilfsstromdieseln übernommen werden.

Fallen beide Diesel aus, so sind beide AuAS sowie beide Betriebskühlwassersysteme und beide Nebenkühlwassersysteme ausgefallen. Die Betonkühlssysteme beider Blöcke müssen dann die Wärme durch Abblasen über ihre Sicherheitsventile abgeben. Öffnet ein Sicherheitsventil nicht, so sind in diesem Block alle Wärmesenken ausgefallen.

Diese Ereigniskette bildet mit einer Häufigkeit von  $3,2 \times 10^{-8}/a$  [EW, f=43]

den Hauptbeitrag an durch *Transienten* ausgelöstem Ausfall aller Wärmesenken. (Noch größer ist lediglich der Beitrag von Ereignisketten nach Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten als auslösendem Ereignis (keine Transienten).)

konnte, wurde unterstellt, daß das Nichtöffnen des Sicherheitsventils an einem Strang des Betonkühlsystems zum Ausfall dieses Strangs führt.

- Da für die Sicherheitsventile der Betonkühlssysteme keine abhängigen Ausfälle quantifiziert werden konnten, kann nur die (theoretische) *Obergrenze* der Häufigkeit des Ausfalls aller Wärmesenken in *beiden* Blöcken angegeben werden, die bei  $1,1 \times 10^{-7}/a$  [Erwartungswert, Unsicherheitsfaktor 8] liegt.

### 3.2.6 Ausfall des Betonkühlsystems oder der Rückkühlketten als auslösendes Ereignis

Die Häufigkeit dieser auslösenden Ereignisse wird nicht separat berechnet, sondern ergibt sich aus demselben Fehlerbaum, der für das auslösende Ereignis "RESA/SAF" gilt, indem nicht die Nichtverfügbarkeit, sondern die Ausfallhäufigkeit des Systems berechnet wird.

Insgesamt ergibt sich für den Ausfall aller Wärmesenken einschließlich Ausfalls des Sicherheitsventils eines Betonkühlsystems pro Reaktorblock eine Häufigkeit von  $2,5 \times 10^{-7}/a$  [Erwartungswert, Unsicherheitsfaktor 8].

Den Hauptbeitrag (80%) bilden -abgesehen vom Notstromfall- Ereignisabläufe, die durch Ausfall der Nebenkühlwasserpumpen in Block A ausgelöst werden und in deren weiterem Verlauf sowohl die Umschaltung auf das AuAS des Blocks B als auch die Umschaltung der Rückkühlung des Betonkühlsystems auf das Betriebskühlwassersystem des Blocks B mißlingt. Weitere 4% bilden Ereignisabläufe, die durch Leck im Flächenkühler ausgelöst werden und in deren weiterem Verlauf abhängige Ausfälle beider AuAS vorliegen.

Da im Rahmen der Voranalyse einige wichtige Fragen nicht geklärt werden konnten, hängt das genannte Ergebnis wesentlich von folgenden, vermutlich pessimistischen Versagensannahmen ab:

- Es wurde unterstellt, daß bereits das Versagen eines Strangs des Betonkühlsystems hier zum unerwünschten Ereignis "Ausfall aller NWA-Systeme" führt.
- Bei Ausfall der Rückkühlung steigt der Druck im Betonkühlsystem bis zum Öffnungsdruck des Sicherheitsventils. Öffnet dieses nicht beim vorgesehenen Druck, so steigt der Druck weiter an, bis die schwächste Stelle im System nachgibt. Der vorgesehene Ansprechdruck des Sicherheitsventils liegt bei 2 bar. Der Vorratsbehälter ist auf 6 bar ausgelegt, der übrige Kreislauf auf 17 bar. Da das Verhalten des Betonkühlsystems nach Nichtöffnen des Sicherheitsventils nicht geklärt werden



### 3.2.7 Fehlerbaumanalysen

#### 3.2.7.1 Teststrategie

Da der Hersteller eine möglichst hohe Zuverlässigkeit des An- und Abfahrsystems anstrebt, um die Verfügbarkeit des Kraftwerks hoch und die Häufigkeit von Transienten mit größeren Komponentenbelastungen niedrig zu halten, wurde nach Diskussion der ersten Analyseergebnisse von der ursprünglichen Vereinbarung jährlicher Tests abgewichen und vierwöchentliche, versetzte Tests des An- und Abfahrsystems vereinbart.

Die meisten aktiven Komponenten des An- und Abfahrsystems (AuAS) sind zwar - über beide Reaktorblöcke betrachtet - vierfach vorhanden, jedoch besteht keine echte Viersträngigkeit. Getrennte Tests der beiden Redundanten innerhalb des AuAS eines Blocks halten wir für nicht praktikabel. Demnach werden alle Komponenten des AuAS eines Blocks im Abstand von vier Wochen gleichzeitig getestet, die des anderen Blocks demgegenüber um zwei Wochen versetzt.

Da das Nebenkühlwassersystem als Wärmesenke für das AuAS unentbehrlich ist, muß auch dieses eine hohe Zuverlässigkeit erreichen. Wir unterstellen daher auch für die Standby - Pumpen des Nebenkühlwassersystems sowie für die Funktion "Lüfter der Zellenkühltürme hochfahren oder beischalten" vierwöchentliche Tests, und zwar zusammen mit dem Test des AuAS des jeweiligen Blocks.

Schließlich sind auch die Motorarmaturen in den Verbindungsleitungen der beiden AuAS vierwöchentlich zu testen (wir nehmen an, zusammen mit dem Test des AuAS des Blocks A).

Eine Ausnahme bilden die Rückschlagklappen in den AuAS - Speisewasserleitungen, die nur jährlich testbar sind (nur nach Abschalten des Hauptkühlsystems des betreffenden Blocks).

Die Armaturen und Schalter des Hauptkühlsystems, die nur beim Übergang in den NWA - Betrieb betätigt werden, werden als jährlich getestet angesehen.

Für abhängige Ausfälle wird - entsprechend der in /3.2-1/ festgelegten Methodik - für jährlich getestete Komponenten ebenfalls ein jährliches Testintervall verwendet, bei vierwöchentlich versetzt getesteten Komponenten wird für

- 2-von-2-Ausfälle ein Testintervall von 4 Wochen,
- 2-von-4-Ausfälle ein Testintervall von 4 Wochen,
- 4-von-4-Ausfälle ein Testintervall von 2 Wochen

verwendet.

### 3.2.7.2 Frischdampf - Entlastung

#### 3.2.7.2.1 ...nach Anforderung der Schnellabfahrprozedur in Block A

Die Standard - Schnellabfahrprozedur (SAF) wird nach allen Störungen und Störfällen angefordert, die auch eine Reaktor - Schnellabschaltung (RESA) auslösen.

Da beide Reaktorblöcke baugleich sind, kann als auslösendes Ereignis die Anforderung der SAF in Block A angenommen werden.

Nach Auslösung von RESA und SAF wird die Hauptspeisewasserzufuhr auf Mindestmenge gedrosselt, die Frischdampfleitung zur Turbine abgesperrt und der Frischdampf über die HD - Umleit - Station abgeleitet, bis der Frischdampfdruck auf 80 bar abgesunken ist. Dann werden die HD - Umleit - Station, die ihr vorgeschaltete Motorarmatur, die Motorarmatur in der Hauptfrischdampfleitung und die Hauptspeisewasser - Regelventile geschlossen, die Hauptspeisewasserpumpen abgeschaltet und das Hauptspeisewasser - Absperrventil geschlossen und die weitere Nachwärmeabfuhr vom AuAS übernommen. Dabei wird das Entlastungsregelventil nicht benötigt.

Folgende Ausfallkombinationen führen zum Ansprechen des Dampferzeuger - Komponentenschutzes und damit zum *Ausfall der Frischdampf - Entlastung über das Hauptkühlsystem* und zur Anforderung des AuAS und des Entlastungsregelventils des Blocks A - Komponentenbezeichnungen siehe Abbildung 3.2-5 auf Seite 3.2-34 -:

- H-UST öffnet nicht
- oder AHMV3 öffnet nicht
- oder H-UST regelt nicht
- oder (AHMV2 schließt nicht UND AHMV4 schließt nicht)
- oder AHRV11 (Speisewasserregelventil hinter Hauptspeisepumpe 1)  
reduziert Speisewasserdurchsatz nicht auf 10%
- oder AHRV12 (Speisewasserregelventil hinter Hauptspeisepumpe 2)  
reduziert Speisewasserdurchsatz nicht auf 10%

Kommt zu einer dieser Ausfallkombinationen der Ausfall des Entlastungsregelventils (ERV) hinzu, so ist die Frischdampf - Entlastung von Block A ausgefallen, und das Zuschalten der Querverbindung zu Block B ist erforderlich.

Wenn die *Frischdampfleitung zur Turbine offen bleibt*, strömt Dampf aus Block B nach Block A zurück, und die Frischdampf - Entlastung von Block A gelingt erst dann, wenn auch Block B abgefahren und die Turbine abgeschaltet wird. Die folgende Ausfallkombination ist daher äquivalent mit dem Ausfall der Frischdampf - Entlastung in Block A:

(AHMV2 schließt nicht UND AHMV3 schließt nicht UND AHMV1 schließt nicht)

Wenn die *Entlastung über die HD - Umleit - Station offen bleibt*, kommt es nach Abschalten der Hauptspeisewasserpumpen zu einem unzulässigen Druckabfall im Dampferzeuger des Blocks A. Es muß unterstellt werden, daß der DE daraufhin durch seinen Komponentenschutz abgesperrt und das AuAS abgeschaltet wird. Wir nehmen an, daß jedoch nach Abschaltung von Block B und damit des gesamten Hauptkühlsystems über diesen Pfad kein Dampf mehr abgegeben werden kann, so daß dann Block A über die Querverbindung zu Block B und das An- und Abfahrssystem (AuAS) des Blocks B (=Standardmaßnahme nach Mißlingen der Inbetriebnahme des AuAS Block A) gekühlt werden kann. Die folgende Ausfallkombination macht daher ebenfalls direkt das Zuschalten der Querverbindung zu Block B erforderlich:

(H-UST schließt nicht UND AHMV3 schließt nicht UND AHMV1 schließt nicht)

3.2.7.2.2 ...nach Anforderung der Schnellabfahrprozedur in beiden Blöcken

Da nach kurzer Zeit keine ausreichende Frischdampfproduktion mehr stattfindet, werden beide Turbinen und die Industriedampfanlage abgeschaltet, und somit steht für die HD - Umleit - Station keine Wärmesenke mehr zur Verfügung. Es wird in beiden Blöcken das Entlastungsregelventil angefordert.

3.2.7.2.3 ...nach Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung

Nach Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung stehen die Hauptspeisewasserpumpen des betroffenen Blocks (bzw. beider Blöcke) nicht zur Verfügung. Es wird in beiden Blöcken das Entlastungsregelventil angefordert.

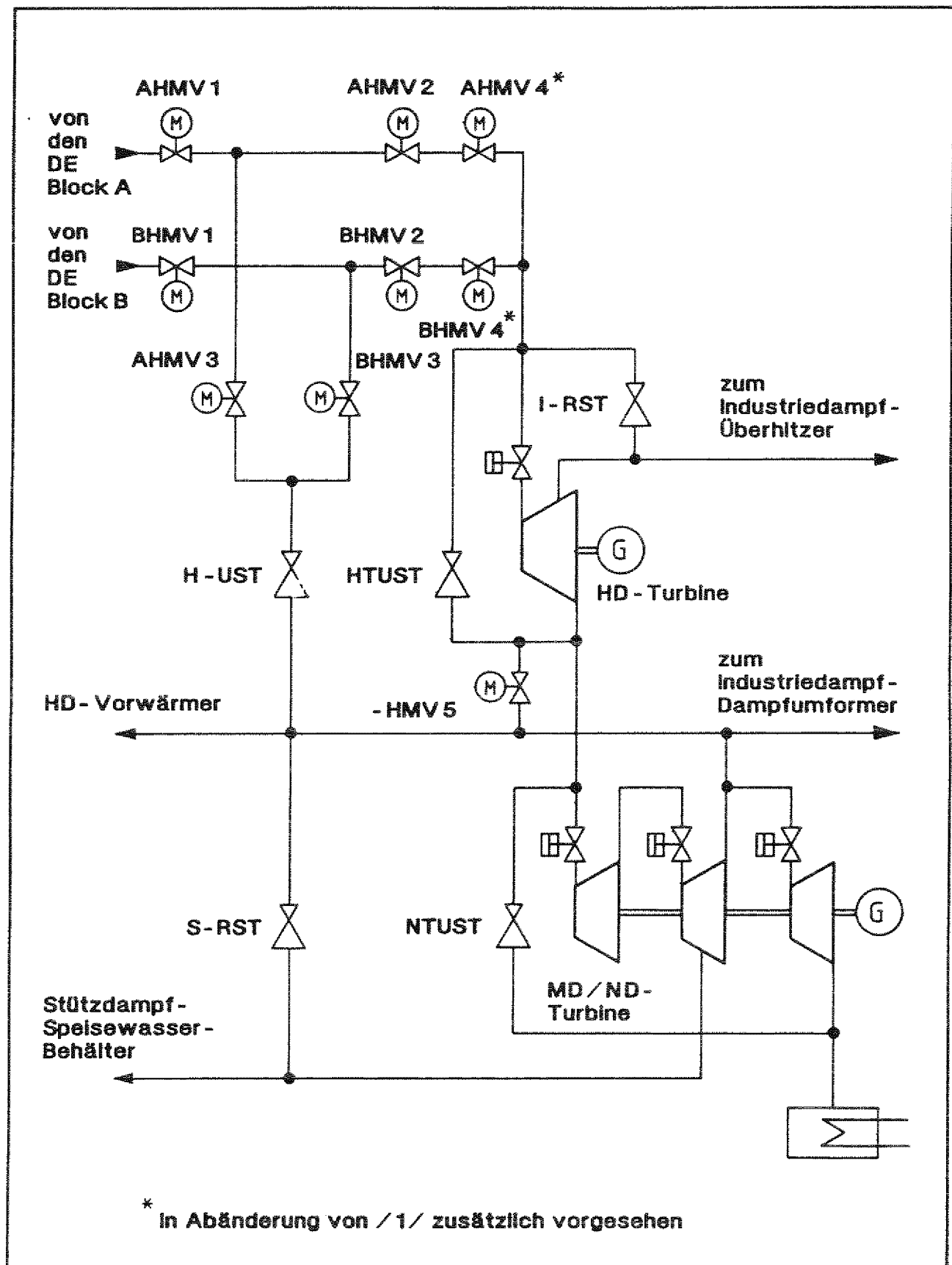


Abbildung 3.2-5: Frischdampf-Leitungs-Führung im Bereich HD-Umleit-Station und Turbine

### 3.2.7.3 Abschalten der Hauptspeisewasserzufuhr

Nach abgeschlossener Frischdampf - Entlastung über die HD - Umleit - Station bzw. bei Anforderung der Entlastung über das Entlastungsregelventil (ERV) werden die HD - Umleit - Station, die ihr vorgeschaltete Motorarmatur, die Motorarmatur in der Hauptfrischdampfleitung und die Hauptspeisewasser - Regelventile geschlossen, die Hauptspeisewasserpumpen abgeschaltet und das Hauptspeisewasser - Absperrventil geschlossen.

#### 3.2.7.3.1 Abschalten der Hauptspeisewasserzufuhr von Block A

Die Hauptspeisewasserzufuhr ist nicht abgeschaltet, wenn

- kein Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung vorliegt  
UND
- eine Hauptspeisewasserpumpe nicht abgeschaltet wird (Nicht-öffnen des Leistungsschalters AHSP1 oder AHSP2)  
UND
- das zugehörige Regelventil (AHRV11 oder AHRV12) nicht schließt  
UND
- das Absperrventil AHMV10 in der Hauptspeisewasserleitung nicht schließt (gegenüber Konzeptbericht /3.2-2/ zusätzlich vorgesehen).

Wenn die Hauptspeisewasserzufuhr in Block A nicht abgeschaltet ist, (Abzweig-Leistungsschalter einer Hauptspeisepumpe öffnet nicht UND Absperrventil in Hauptspeisewasserleitung schließt nicht), hängt der weitere Ablauf davon ab, ob die Reduzierung des Hauptspeisewasserdurchsatzes auf 10%, die zur Frischdampf - Entlastung über die HD - Umleitstation erforderlich ist, ordnungsgemäß vorgenommen wurde oder ob das Hauptspeisewasser - Regelventil der nicht abgeschalteten Hauptspeisepumpe ausgefallen in der 100%-Stellung verblieben ist.

Wurde die Durchflußmenge reduziert, dann ist das Regelventil lediglich nicht vollständig geschlossen. Da nur eine Pumpe weiter-

läuft, beträgt der Hauptspeisewasserdurchsatz maximal 5%. Die An- und Abfahrpumpen liefern einen zusätzlichen Speisewasserstrom, der Gesamtstrom durch den DE beträgt zwischen 10% (=Soll) und 15%. Wir nehmen an, daß diese Betriebsart nicht zum Überschreiten von Komponentenschutzkriterien führt.

Hat das Hauptspeisewasser - Regelventil in Normalbetriebs - Stellung versagt, dann wird der Dampferzeuger vom Komponentenschutz abgesperrt, und das AuAS geht nicht in Betrieb. Bei weiterlaufendem Hauptspeisewasser kann die DE-Bespeisung auch nicht durch Umschalten auf das AuAS des anderen Blocks erfolgen. Dieser Fall trägt zum Ausfall der Dampferzeugerbespeisung im betroffenen Block bei. Er ist aber nicht in den in diesem Bericht dokumentierten Häufigkeiten enthalten, da zunächst davon ausgegangen wurde, daß er erst verzögert zum Ausfall der Dampferzeugerbespeisung führe und es danach nicht mehr zum Überschreiten von Auslegungstemperaturen komme.

Die Hauptspeisewasser - Regelventile werden durch betriebliche Regelungsvorgänge regelmäßig verfahren. Für die 80% der Fehlerursachen, die auch zur Ausfallart "regelt nicht" führen, ist daher ein kürzeres Testintervall als 1 Jahr anzusetzen. Dies wird ausführlicher in Kapitel 3.3.2.4 erläutert.

Bei Berücksichtigung dieses Falls würde sich die Häufigkeit des Ausfalls der Dampferzeugerbespeisung in beiden Blöcken praktisch nicht, die Häufigkeit des Ausfalls der Dampferzeugerbespeisung in einem Block um 20% erhöhen. Die Einbeziehung dieses Falls in die vorliegende Dokumentation der Voranalyse (mit der Konsequenz, alle Fehlerbaumzeichnungen überarbeiten zu müssen) halten wir daher nicht für erforderlich.

#### 3.2.7.3.2 Fehlerhafte Hauptspeisewasserzufuhr von Block B

Wenn weder die Rückschlagarmatur AHRS6 in der Einspritzwasserleitung noch das Absperrventil AHMV10 in der Hauptspeisewasserleitung noch die Regelventile AHRV11 und AHRV12 schließen, strömt nach Abschalten der Hauptspeisewasserpumpen des Blocks A Hauptspeisewasser aus Block B nach Block A. Konservativ nehmen wir an, daß dies zum Absperrern des DE des Blocks A durch den Kompo-



nenschutz führt. Nach Abfahren des Blocks B kann der DE des Blocks A jedoch wieder gespeist werden.

#### 3.2.7.4 Abschalten der Hauptkühlgasgebläse

Bei Auslösung der Standard - Schnellabfahrprozedur (SAF) wird die Drehzahl der Hauptkühlgasgebläse soweit reduziert, daß sich ein Durchsatz von ca. 10% einstellt. Versagt die Drehzahlreduktion, so wird vermutlich der Dampferzeuger - Komponentenschutz den zu großen Kühlgasdurchsatz erkennen und Gegenmaßnahmen einleiten. Denkbar ist entweder die Abschaltung des betreffenden Gebläses oder der Abbruch der SAF und Übergang zur NWA mit dem An- und Abfahrssystem (AuAS), wobei ebenfalls zunächst die Gebläse (für ca. 3 Minuten) abgeschaltet werden.

Die Ursache für das Versagen der Drehzahlreduktion kann im Frequenzumformer ( $\lambda=3 \times 10^{-6}/h$  [Median,  $f=10$ ])<sup>1</sup> oder in der Regelung/Ansteuerung liegen ( $\lambda=3 \times 10^{-6}/h$  [Median,  $f=3$ ])<sup>1</sup>, Summe:  $6 \times 10^{-6}/h$  [Median,  $f=7$ ]. Die Drehzahlregelung der Kühlgasgebläse wird bei allen Lastwechselvorgängen getestet. Da noch keine näheren Informationen über die Betriebsweise des Kraftwerks vorliegen, legen wir für den Abstand zwischen Lastwechseln eine Lognormalverteilung mit einem Median von 4 Wochen und einem Unsicherheitsfaktor 10 zugrunde. Für das Versagen der Drehzahlreduktion mittels des Frequenzumformers ergibt sich demnach eine mittlere Nichtverfügbarkeit von  $2 \times 10^{-3}/\text{Anf.}$  [Median,  $f=20$ ] pro Gebläse.

Für die Abschaltung des Gebläses steht laut Schaltplan /3.2-2/ ein Leistungsschalter vor dem Frequenzumformer zur Verfügung. Es ist aber *denkbar*, daß aus verschiedenen Gründen zwischen Frequenzumformer und Gebläse ein weiterer Leistungsschalter vorgesehen wird. Der bzw. die Schalter sind nur bei einer Leistungsreduktion des Reaktors (Betrieb bei ca. 70% mit nur einem Gebläse) testbar, die nur jährlich geplant ist. Mit einer Ausfallrate von  $8 \times 10^{-6}/h$  [Median,  $f=4$ ] ergibt sich für einen Leistungsschalter bei jährlichem Test eine mittlere Nichtverfüg-

---

<sup>1</sup> geschätzt, da über deren Auslegung noch keine Informationen existieren

barkeit von  $3,4 \times 10^{-2}$ /Anf. [Median,  $f=4$ ], für zwei Leistungsschalter von  $1,6 \times 10^{-3}$ /Anf. [Median,  $f=16$ ] pro Gebläse.

Die Anwendung der Gesamtausfallrate "Abzweig öffnet oder schließt nicht" auf den Fall "öffnet nicht (jährlicher Test)" ist sicher konservativ, derzeit steht aber keine realistischere Ausfallrate zur Verfügung.

Insgesamt ergibt sich für den Weiterlauf eines Gebläses mit 50% Durchsatz nach RESA/SAF - Auslösung bei jährlichem Test der Leistungsschalter eine Häufigkeit pro Reaktor von  $1 \times 10^{-3}$ /a [EW,  $f=27$ ] (EIN Leistungsschalter) bzw.  $1 \times 10^{-4}$ /a [EW,  $f=60$ ] (ZWEI Leistungsschalter).

Durch vierwöchentlichen Test der Leistungsschalter läßt sich eine Verbesserung um den Faktor 12 bzw. 144 erreichen, d.h. eine Häufigkeit pro Reaktor für den Weiterlauf eines Gebläses von  $8 \times 10^{-5}$ /a [EW,  $f=27$ ] (EIN Leistungsschalter) bzw.  $1 \times 10^{-6}$ /a [EW,  $f=60$ ] (ZWEI Leistungsschalter).

Der Gebläse - Weiterlauf führt vermutlich zu einer Beschädigung der Anlage im Sinn des Investitionsrisikos infolge zu hoher Temperaturen des Dampferzeugers und des Behälters, jedoch nicht zwangsläufig zu einer Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung.

### 3.2.7.5 An- und Abfahrssystem

Der Betrieb des eigentlichen An- und Abfahr - Kreislaufs ist nur möglich, wenn der Dampferzeuger (DE) zuvor auf 120 bar oder niedriger entlastet wurde. Dies geschieht entweder über die HD - Umleit - Station (bis auf 80 bar) oder über das Entlastungsregelventil (bis auf 120 bar) (siehe Kapitel "Frischdampf - Entlastung" auf Seite 3.2-31).

Das An- und Abfahrssystem eines Blocks fällt aus bei

- Ausfall beider AuAS - Kondensator - Reduzierstationen AARED1, AARED2 (2x100%), deren GNI, Druckregelungen oder Einspritzwasser - Regelventilen
- Ausfall beider AuAS - Kondensator - Niveau - Regelventile AAKNRV1, AAKNRV2 (2x100%) oder deren Regelung
- Ausfall beider AuAS - Speisewasserpumpen AASP1, AASP2 (2x100%)
- Nichtöffnen beider Mindestmengen - Rückschlagarmaturen AARS1, AARS2
- Ausfall einer AuAS - Speisewasserpumpe und Nichtschließen der zugehörigen Mindestmengen - Rückschlagarmatur (Die Mindestmengen - Rückschlagarmaturen sind zwar während des Leistungsbetriebs geschlossen, es muß aber angenommen werden, daß zumindest bei einem Teil der Pumpenausfälle die Pumpe zunächst startet und damit die Rückschlagarmatur aufdrückt und erst danach ausfällt. Da diese Ausfallkombination nur einen geringen Beitrag bildet, ist keine realistischere Modellierung erforderlich.)
- Nichtschließen der Rückschlagarmatur AARS3 hinter der Zirkulationspumpe
- Nichtschließen beider Absperrarmaturen AAMV6, AAMV7 (Normal offen) in der Zirkulations - Rücklaufleitung zum AuAS - Speisewasserbehälter (abweichend von /3.2-2/ sind 2 Armaturen statt nur 1 angenommen)
- Nichtöffnen beider parallelen Rückschlagarmaturen AARS5, AARS6 in der AuAS - Speisewasserleitung (abweichend von /3.2-2/ sind 2 Armaturen statt nur 1 angenommen)

*3.2.7.6 Zuschalten der Querverbindung der An- und Abfahrssysteme*

Die Querverbindung der An- und Abfahrssysteme kann nicht zugeschaltet werden, wenn

- die Motorarmatur -AMV8 in der Verbindung der Frischdampfleitungen nicht öffnet,
- die Motorarmatur -AMV9 in der Verbindung der Speisewasserleitungen nicht öffnet oder
- das Betriebspersonal die erforderlichen Handmaßnahmen nicht durchführt (Schnellabfahren des Blocks B auslösen, Motorarmaturen in den Verbindungsleitungen öffnen).

### 3.2.7.7 Nebenkühlwassersystem, Betriebskühlwassersystem, Betonkühlsystem

Das Nebenkühlwassersystem (NKWS) ist als Wärmesenke für die Rückkühlung des An- und Abfahrkondensators und ggf. der Hilfsstromdiesel erforderlich, außerdem bildet es die Wärmesenke für das Betriebskühlwassersystem.

Das Betriebskühlwassersystem (hier interessiert nur das Betriebskühlwassersystem primär, BKWSP) ist als Wärmesenke u.a. für die Rückkühlung des Betonkühlsystems erforderlich. Diese kann bei Ausfall eines BKWSP auf das BKWSP des anderen Blocks umgeschaltet werden. Der Ausfall beider BKWSP führt zur Anforderung der Sicherheitsventile der Betonkühlsysteme.

Der Ausfall der Nebenkühlwassersysteme in beiden Blöcken führt daher zum Ausfall sowohl der An- und Abfahrssysteme als auch der Rückkühlung der Betonkühlsysteme in beiden Blöcken.

#### 3.2.7.7.1 Versagen aktiver Einrichtungen

Sowohl im NKWS als auch im BKWSP ist während des Leistungsbetriebs eine Pumpe in Betrieb, die andere steht in Reserve und wird bei Ausfall der in Betrieb befindlichen automatisch angefordert. Da in /3.2-2/ keine Angabe dazu gemacht wird, wird unterstellt, daß die Pumpen des NKWS und des BKWSP an die Hilfsstromschienen angeschlossen sind, d.h. bei Ausfall der elektrischen Eigenbedarfsversorgung von den Hilfsstromdieseln versorgt werden.

Im NWA - Betrieb muß das Nebenkühlwasser zusätzlich die über den AuAS - Kondensator abgeführte Wärme aufnehmen. Dies wird durch eine erhöhte Aufheizspanne des Nebenkühlwassers erreicht, ein Hochfahren der laufenden oder ein Beischaalten der zweiten Pumpe ist nicht erforderlich. Da Ausfälle der laufenden Pumpen selbstmeldend sind, haben diese eine hohe Verfügbarkeit.

Der Luftdurchsatz der Zellenkühltürme muß im NWA - Betrieb jedoch erhöht werden, um trotz der erheblich höheren Wärmezufuhr die Nebenkühlwasser - Vorlauftemperatur auf dem erforderlichen Sollwert halten zu können. Hierzu kann entweder die Leistung eines

in Betrieb befindlichen Ventilators erhöht oder der zweite Ventilator beigeschaltet werden, je nachdem, in welchem Betriebszustand sich die Ventilatoren vor Beginn des NWA - Betriebs befanden. Laut /3.2-2/ wird die Nebenkühlwasser - Vorlauftemperatur über die Fahrweise der Kühlturmventilatoren *von Hand* eingestellt. Da die ordnungsgemäße Funktion der Kühlturmventilatoren für die Funktion des An- und Abfahrssystems zur NWA erforderlich ist, *muß* zum Einhalten einer ausreichenden Zuverlässigkeit die Nebenkühlwasser - Vorlauftemperatur über eine *automatische* Steuerung der Kühlturmventilatoren geregelt werden, und diese Automatik sowie die Funktionen "Hochlaufen" und "Beischalten eines Ventilators" müssen *monatlich getestet* werden (in Block B um zwei Wochen versetzt).

Die Kühlturmbelüftung wird als ausgefallen angesehen, wenn weder der in Betrieb befindliche Ventilator hochgefahren noch der in Reserve stehende beigeschaltet wird. Abhängige Ausfälle werden zwischen den in Betrieb befindlichen bzw. zwischen den in Reserve stehenden Ventilatoren unterstellt (blockübergreifend), jedoch nicht zwischen in Betrieb und in Reserve stehenden. Da das Hochfahren der betriebenen Ventilatoren durch Polumschaltung erfolgt, muß beim Hochfahren ein Schütz öffnen und ein zweites schließen. Versagt das Hochfahren, so muß der Reserveventilator mit voller Leistung beigeschaltet werden. Dies geschieht über das gleiche Schütz, das zum Hochfahren eingeschaltet werden muß. Für die Schütze, deren Schließfunktion gefordert wird, werden daher blockübergreifende 4-von-4-Ausfälle unterstellt.

Die Wahrscheinlichkeit des Versagens des Betonkühlsystems (BKS) bei Anforderung der NWA wird - wie in Kapitel "Analysemethodik, Gliederung der Dokumentation" auf Seite 3.2-7 dargelegt - gekoppelt mit dem jeweiligen Fehlerbaum "Versagen der DE-Bespeisung" gerechnet.

Die Wahrscheinlichkeit des Betriebsversagens des BKS während der längerfristigen NWA muß aus rechentechnischen Gründen getrennt ermittelt werden: Fehlerbaum "Ausfall Betonkühlssysteme Block A", Abbildung 3.2-34 auf Seite 3.2-80. Setzt man als erforderliche Betriebsdauer des BKS 100 Stunden nach Ausfall der DE-Bespeisung

an, so ergibt sich für diesen Zeitraum eine vernachlässigbar geringe Ausfallwahrscheinlichkeit des BKS von  $1,1 \times 10^{-6}$  [EW, f=6,8].

#### 3.2.7.7.2 Versagen passiver Einrichtungen

Hierunter fallen die Rohrleitungen, Behälter und Wärmetauscher der drei Systeme (NKWS, BKWSP, BKS).

Aufgrund fehlender detaillierter Unterlagen mußten die Rohrleitungslängen zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit grob abgeschätzt werden, was aber wegen der modellmäßigen Linearität zwischen Rohrlänge und Versagenswahrscheinlichkeit die Qualität der Ergebnisse wenig beeinflusst. Viel wesentlicher sind die Schwierigkeiten bei der Festlegung geeigneter Ausfallraten. Die aus der Literatur vorliegenden Angaben sind meist aus Erfahrungen in konventionellen Anlagenbereichen gewonnen worden und streuen breit. Die Schadensdefinitionen sind unterschiedlich und nicht ohne weiteres vergleichbar, und auch Material, Betriebsbedingungen und Qualitätsanforderungen sind unterschiedlich oder häufig nicht genau bekannt. In der Phase A der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke (DRS A) wurde aus diesen Angaben für Rohrleitungen, die nicht zum Primärkreislauf zählen, eine pauschale Versagensrate von  $10^{-9}$  pro Meter und Jahr ohne Angabe eines Unsicherheitsfaktors bestimmt. Demgegenüber wurde für die PSH-Studie /3.2-5/ für Leitungen >3" eine Rate von  $2,5 \times 10^{-10}$  pro Meter und Jahr mit Unsicherheitsfaktor 80 empfohlen. Wegen der unzureichenden Angaben in der DRS-A wird auf dieses (ebenfalls weit zurückliegende) Datenmaterial zurückgegriffen. Diese Datensituation ist insgesamt nicht befriedigend, genügt aber dem Zweck der "Vorphase", eine erste Risikoeinschätzung des HTR-100 vorzunehmen.

Als Rohrlängen wurden abgeschätzt für:

- |                                        |          |
|----------------------------------------|----------|
| • Nebenkühlwassersystem                | ca. 500m |
| • Betriebskühlwassersystem primär      | ca. 500m |
| • Betonkühlsystem (ohne Flächenkühler) | ca. 100m |



Ebenfalls mit großen Unsicherheiten behaftet ist die Ermittlung der Versagensrate der Flächenkühler des Betonkühlsystems. Im kerntechnischen Bereich sind gleiche Systeme bislang nicht realisiert worden. Am ehesten vergleichen läßt sich dieses System mit Linerkühlssystemen mittlerer und großer HTRs, von denen bislang aber lediglich zwei gebaut wurden und kommerziell genutzt werden (Fort St. Vrain seit 1977 und THTR seit 1986). Die vorliegenden Betriebserfahrungen sind für die Ableitung einer Versagensrate noch völlig unzureichend; zudem werden beim HTR-100 die Flächenkühler des Betonkühlsystems passiv durch Naturumlauf bei niedrigen Drücken von 2 bar im Normalbetrieb und etwa 6 bar bei ausgefallener Rückkühlung betrieben.

Daher sind auch die für die DRS-B für den Bruch kleiner Leitungen des Primärkreislaufs von Druckwasserreaktoren ermittelten Versagensraten /3.2-4/ nicht als übertragbar anzusehen.

In der PSH-Studie /3.2-5/ wurde für den Bruch kleiner Leitungen <3" eine von der GRS empfohlene Rate von  $10^{-9}$  pro Meter und Jahr mit Unsicherheitsfaktor 47 verwendet. Dieser Wert gründet auf Betriebserfahrungen verschiedenster Herkunft mit breit streuenden Schadensraten.

Mangels fehlender besser übertragbarer Daten wird dieser Wert für die Ermittlung der Versagensrate der Rohrleitungen der Flächenkühler in Ansatz gebracht. Allerdings bleiben auch hier Zweifel, ob die ermittelte Versagenshäufigkeit den tatsächlichen Erfahrungen entsprechen würde.

Die Rohrlänge der Flächenkühler - Stränge wurde zu je 2000m bestimmt.

### 3.2.7.8 Menschliche Fehlhandlungen

Das Sicherheitskonzept des HTR-100 sieht die Einbeziehung von Personalhandlungen zur Nutzung der Sicherheitsreserven vor, die sich aus der Doppelblock - Anlage ergeben. Sie sind im einzelnen in Kapitel 3.6 dokumentiert.

Es handelt sich dabei im wesentlichen um Aktionen, die nach einem Ausfall des An- und Abfahrsystems (AuAS) die Übernahme der NWA durch das AuAS des zweiten Blocks ermöglichen (Fehlerbaumeingang "-AU-----OP--"). Hierfür wurde eine Versagenswahrscheinlichkeit von  $9,4 \times 10^{-3}$  [Med.,  $f=4,8$ ] ermittelt.

Darüberhinaus sieht das Anlagenkonzept Umschaltungen im Nebenkühlwassersystem und im Betriebskühlwassersystem primär vor. Hier ist von Bedeutung die Umschaltung der Rückkühlung des Betonkühlsystems eines Blocks auf das Betriebskühlwassersystem des anderen Blocks. Die Versagenswahrscheinlichkeit dieser Aktion von  $1,4 \times 10^{-2}$  [Med.,  $f=4$ ] wurde gegenüber der Nichtverfügbarkeit der zu betätigenden Handarmaturen (zusammen  $6,4 \times 10^{-2}$  [Med.,  $f=2$ ]) vernachlässigt.

Als ungeplante Handlung wurde die Nachspeisung von Wasser in das Betonkühlsystem nach einem Leck im Flächenkühler in Betracht gezogen (Fehlerbaumeingang ABKS1NSP--OP bzw. ABKS2NSP--OP). Da die Randbedingungen und die Wirksamkeit dieser Handlung jedoch unsicher sind, wurde ihr Nichtgelingen bei den Fehlerbaumrechnungen konservativ mit der Wahrscheinlichkeit 1 bewertet.

## 3.2.7.9 Ersatzausfallraten für Fehlerbaummodule

Druckmessung - eine Meßkanalgruppe:

-----

Unabhängige Ausfälle Druckmeßkanal, Drift oder Totalausfälle:

$\lambda = 34,9 \times 10^{-6} / \text{h}$  [Median,  $f=3$ ] selbstmeldend

Ausgabe eines unveränderlichen Werts, unabh. Ausf.:

$\lambda = 0,3 \times 10^{-6} / \text{h}$  [Median,  $f=3$ ] Test jährlich

Ausgabe eines unveränderlichen Werts, abh. Ausf.:

$\lambda = 7,0 \times 10^{-8} / \text{h}$  [Median,  $f=4$ ] Test jährlich

(aus DRS-A, F2, S.104)

=> Gesamtausfallrate 2-von-3 Meßkanäle:

$\lambda = 7,0 \times 10^{-8} / \text{h}$  [Median,  $f=4$ ] Test jährlich

(Das Ergebnis wird zu mehr als 97% von abhängigen Ausfällen bestimmt.)

Druckmessung - mehrere Meßkanalgruppen:

-----

Ausgabe eines unveränderlichen Werts, abh. Ausf.:

$\lambda = 7,0 \times 10^{-9} / \text{h}$  [Median,  $f=4$ ] Test jährlich

(aus DRS-A, F2, S.104)

## Entlastungsregelventil:

-----

|                          |                                         |
|--------------------------|-----------------------------------------|
| Regelventil, Standby     | 10,0 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f= 4,7] |
| Druckmeßkanal abh. Ausf. | 0,07 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f= 4 ]  |
| SUMME                    | 10,0 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f= 4,7] |

dto, abh. Ausf. 2-von-2 (blockübergreifend):

|                        |                                         |
|------------------------|-----------------------------------------|
| Regelventil, Standby   | 0,017 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=23 ] |
| 2 Druckmeßkanalgruppen | 0,007 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f= 4 ] |

|       |                                         |
|-------|-----------------------------------------|
| SUMME | 0,020 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=21 ] |
|-------|-----------------------------------------|

=====

## Reduzierstation:

-----

|                               |      |                    |                |
|-------------------------------|------|--------------------|----------------|
| Reduzierstation öffnet nicht  | 4,0  | $\times 10^{-3}$   | [Med., f= 4 ]  |
| Reduzierstation regelt nicht  | 3,0  | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4 ]  |
| Druckmeßkanal abh. Ausf.      | 0,07 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4 ]  |
| Einspritzwasser - Regelventil | 10,0 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4,7] |

-----

|                                |        |                    |                |
|--------------------------------|--------|--------------------|----------------|
| SUMME öffnet oder regelt nicht | 4,0    | $\times 10^{-3}$   | [Med., f= 4 ]  |
|                                | + 14,4 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 3,8] |

=====

|                      |       |                  |               |
|----------------------|-------|------------------|---------------|
| dto., schließt nicht | + 4,0 | $\times 10^{-3}$ | [Med., f= 4 ] |
|----------------------|-------|------------------|---------------|

=====

## Reduzierstation, abh. Ausf. 2-von-4:

|                               |       |                    |                |
|-------------------------------|-------|--------------------|----------------|
| Reduzierventil                | 0,017 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f=23 ]  |
| 2 x Magnetventil              | 0,36  | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4,6] |
| Druckmeßkanal                 | 0,07  | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4 ]  |
| Einspritzwasser - Regelventil | 0,017 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f=23 ]  |

-----

|       |      |                    |                |
|-------|------|--------------------|----------------|
| SUMME | 0,53 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 5,1] |
|-------|------|--------------------|----------------|

=====

## Reduzierstation, abh. Ausf. 4-von-4:

|                               |       |                    |                |
|-------------------------------|-------|--------------------|----------------|
| Reduzierventil                | 0,011 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4,6] |
| 2 x Magnetventil              | 0,072 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4,6] |
| 2 Druckmeßkanalgruppen        | 0,007 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4 ]  |
| Einspritzwasser - Regelventil | 0,011 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 4,6] |

-----

|       |       |                    |                |
|-------|-------|--------------------|----------------|
| SUMME | 0,117 | $\times 10^{-6}/h$ | [Med., f= 3,4] |
|-------|-------|--------------------|----------------|

=====

AuAS - Kondensator - Niveau - Regelventil:

```

-----
Regelventil          10,0 x10-6/h [Med., f= 4,7]
Druckmeßkanal        vernachlässigbar
=====

```

AuAS - Kondens. - Niveau - Regelventil, abh. Ausf. 2-von-4:

```

Regelventil          0,017x10-6/h [Med., f=23 ]
Druckmeßkanalgruppe  0,07 x10-6/h [Med., f= 4  ]
-----
SUMME                0,062x10-6/h [Med., f=12,7]
=====

```

AuAS - Kondens. - Niveau - Regelventil, abh. Ausf. 4-von-4:

```

Regelventil          0,011x10-6/h [Med., f= 4,6]
2 Druckmeßkanalgruppen 0,007x10-6/h [Med., f= 4  ]
-----
SUMME                0,021x10-6/h [Med., f= 3,3]
=====

```

AuAS - Speisewasserpumpe, startet nicht:

-----  
 Pumpe 25,0  $\times 10^{-6}$ /h [Med., f= 3 ]  
 =====

AuAS - Speisewasserpumpe, startet nicht, abh. Ausf. 2-von-4:

Pumpe 0,007  $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=42 ]

Abzweig 0,0018 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=44 ]

-----  
 SUMME 0,0109 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=36 ]  
 =====

AuAS - Speisewasserpumpe, startet nicht, abh. Ausf. 4-von-4:

Pumpe 0,047 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=30 ]

Abzweig 0,013 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=44 ]

-----  
 SUMME 0,079 $\times 10^{-6}$ /h [Med., f=27 ]  
 =====

### 3.2.7.10 Kennzeichnungssystem für Fehlerbaumeingänge

Das verwendete Kennzeichnungssystem sei anhand des folgenden Beispiels erläutert:

| Ausfallkombination |                          |         | Bezeichnung    |
|--------------------|--------------------------|---------|----------------|
| A 1                | (Block A, Ventil 1)      | unabh.  | AAMV1-----OU   |
| A 2                | (Block A, Ventil 2)      | unabh.  | AAMV2-----OU   |
| B 1                | (Block B, Ventil 1)      | unabh.  | BAMV1-----OU   |
| B 2                | (Block B, Ventil 2)      | unabh.  | BAMV2-----OU   |
| A 1, A 2           | (Block A, beide Ventile) | 2-von-4 | AAMV1+2----OC2 |
| B 1, B 2           | (Block B, beide Ventile) | 2-von-4 | BAMV1+2----OC2 |
| A 1, B 1           | (beide Bl., Ventil 1)    | 2-von-4 | -AMV1+1----OC2 |
| A 1, B 2           | (je 1 V. in jed. Blk.)   | 2-von-4 | -AMV1+2----OC2 |
| A 2, B 1           | (je 1 V. in jed. Blk.)   | 2-von-4 | -AMV2+1----OC2 |
| A 2, B 2           | (beide Bl., Ventil 2)    | 2-von-4 | -AMV2+2----OC2 |
| A 1, A 2, B 1, B 2 | (alle 4 V.)              | 4-von-4 | -AMV1+2----OC4 |



### 3.2.8 Literaturverzeichnis

- /3.2-1/ Hennings, W.: Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte. Ein Statusbericht. Band 1: Ereignisabläufe, Systemzuverlässigkeiten, Freisetzungshäufigkeiten. JÜL-SPEZ-388 Band 1, Mai 1987
  
- /3.2-2/ BBC/HRB: HTR 100 Doppelblockanlage 2x258MW<sub>th</sub>. Beschreibung der Gesamtanlage für Strom- und Prozeßdampferzeugung. HTR-1100-BA-GHRA 001864, Dez. 1985
  
- /3.2-3/ Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 3. Verlag TÜV Rheinland, Juli 1980, ISBN 3-88585-014-1
  
- /3.2-4/ Beliczey, S., Schulz, H.: Nutzung bruchmechanischer Methoden und Betriebserfahrungen bei der Formulierung von Eintrittshäufigkeiten für Lecks in Rohrleitungen von Druckwasserreaktoren. 12. MPA-Seminar, Stuttgart, 9.-10.10.1986.
  
- /3.2-5/ Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen, Hauptband zur Phase Ib. JÜL-SPEZ-136 Band 1, Dezember 1981.
  
- /3.2-6/ Hörtner, H.: Systemtechnische und Ereignisablauf-Analysen. Fachsitzung "Ergebnisse der Phase B der Deutschen Risikostudie Kernkraftwerke", Jahrestagung Kerntechnik '86, Aachen, April 1986



## 3.2.9 Abbildungen: Fehlerbaum- und Ereignisablaufdiagramme

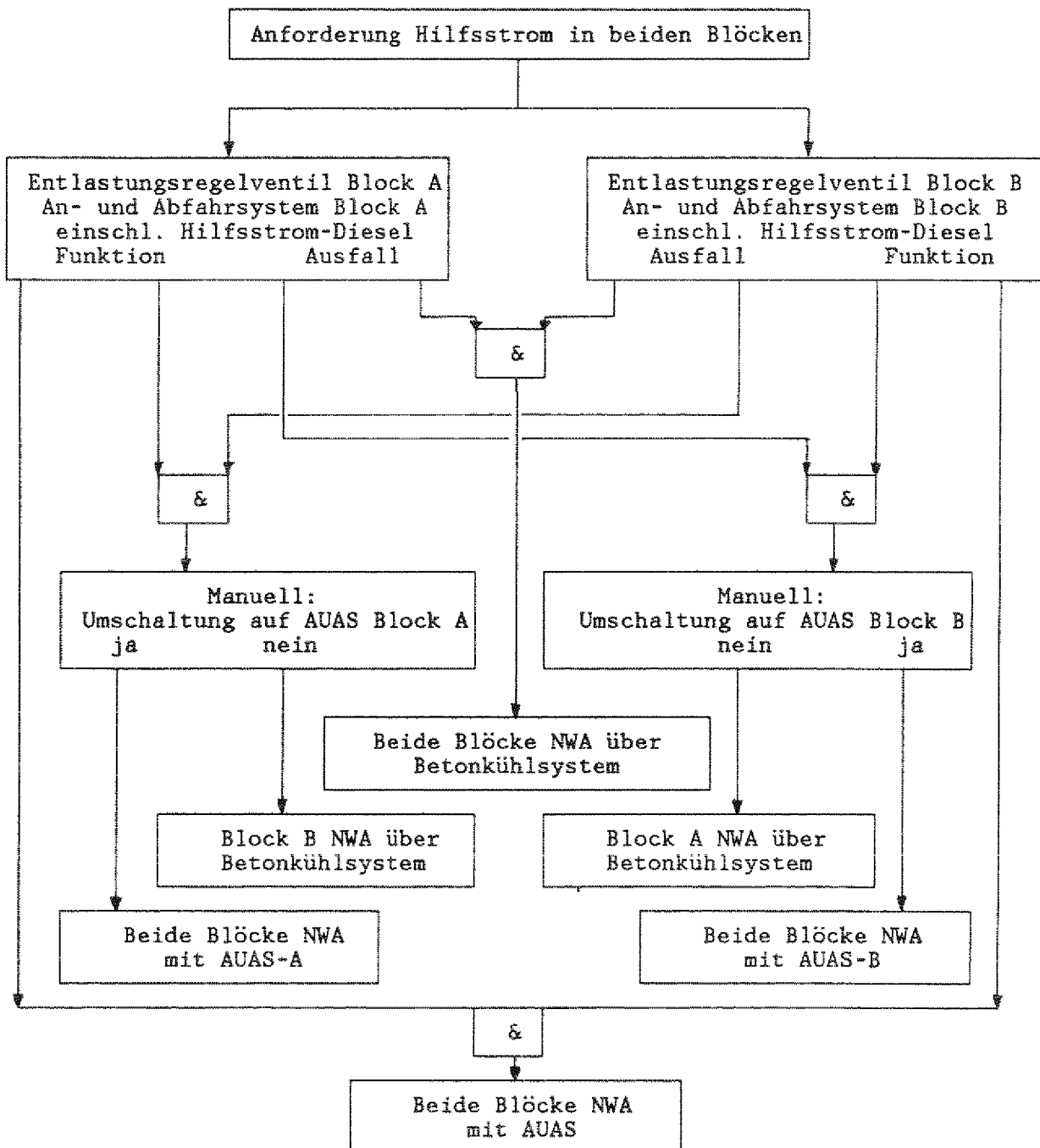


Abbildung 3.2-6: Ereignisabläufe nach Anforderung der Hilfsstromdiesel in beiden Blöcken

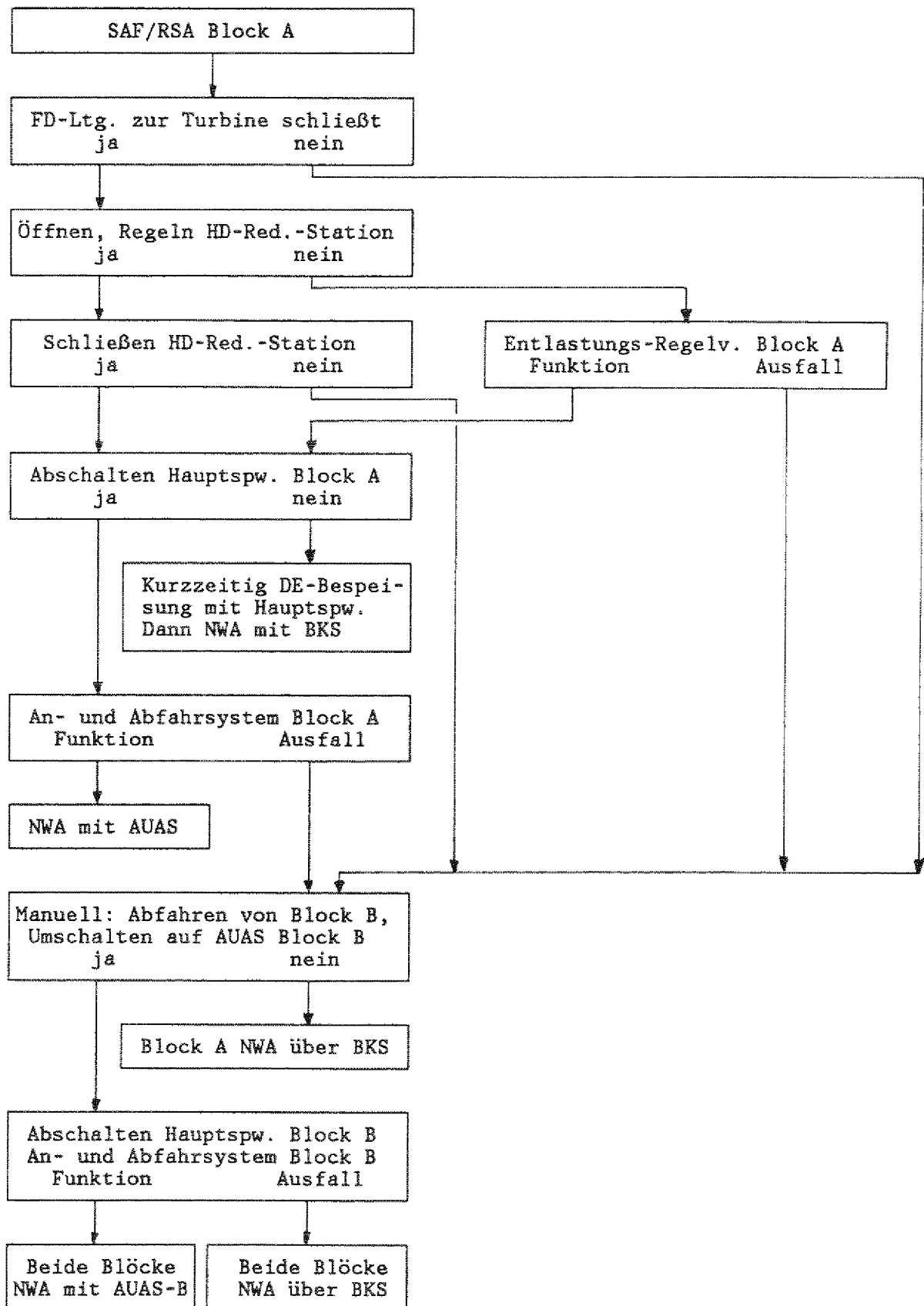
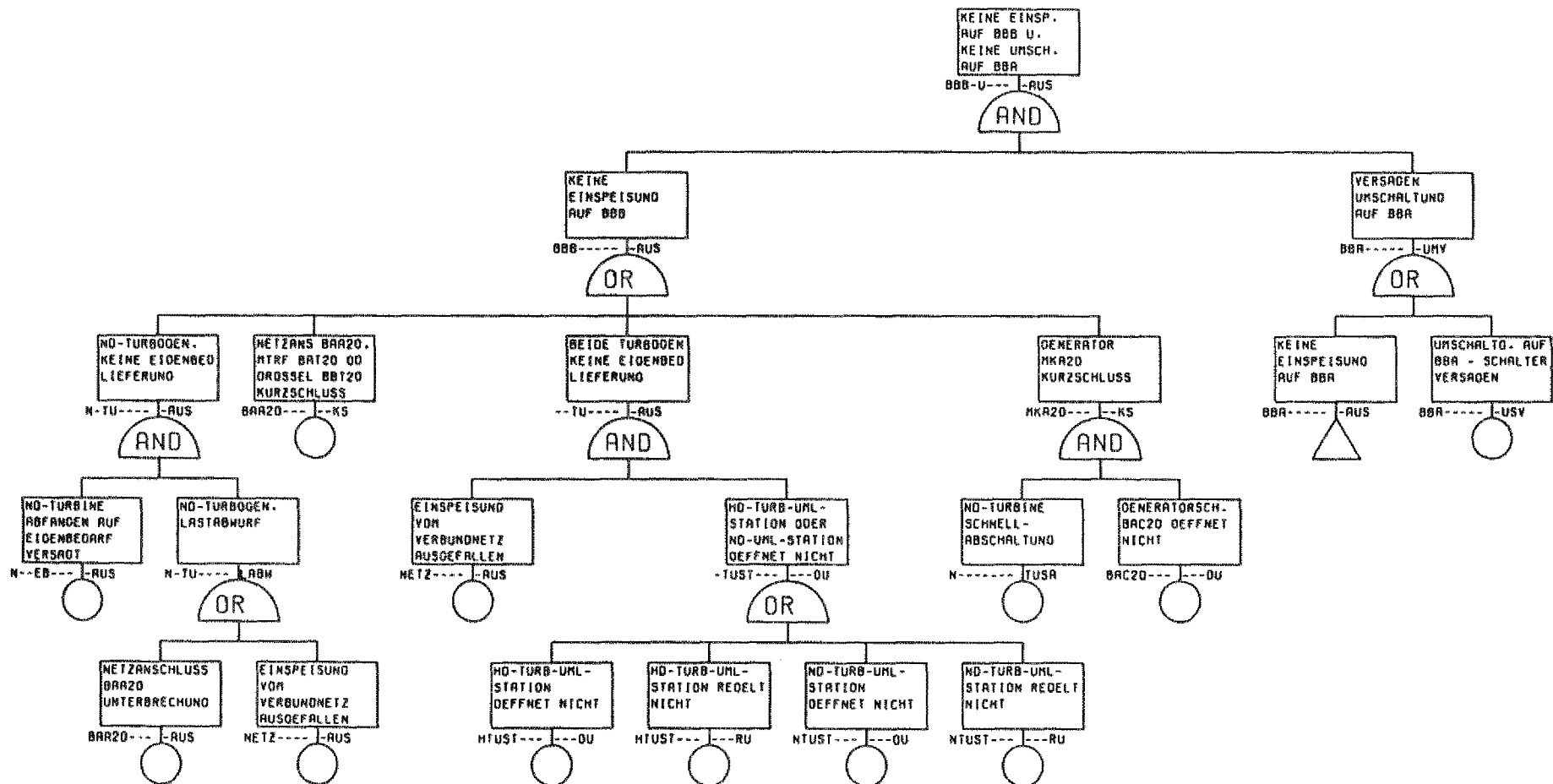


Abbildung 3.2-7: Ereignisabläufe nach Auslösung von Reaktorschnellabschaltung und Schnellabfahrprozedur



Abbildung 3.2-9: Fehlerbaum "Auslösendes Ereignis Ausfall Eigenbedarf auf Schiene BB"



AUSLOESENDES EREIGNIS AUSFALL EIGENBEDARF AUF SCHIENE BBB

Abbildung 3.2-10: Fehlerbaum "Kein Hilfsstrom auf Schiene BDA"

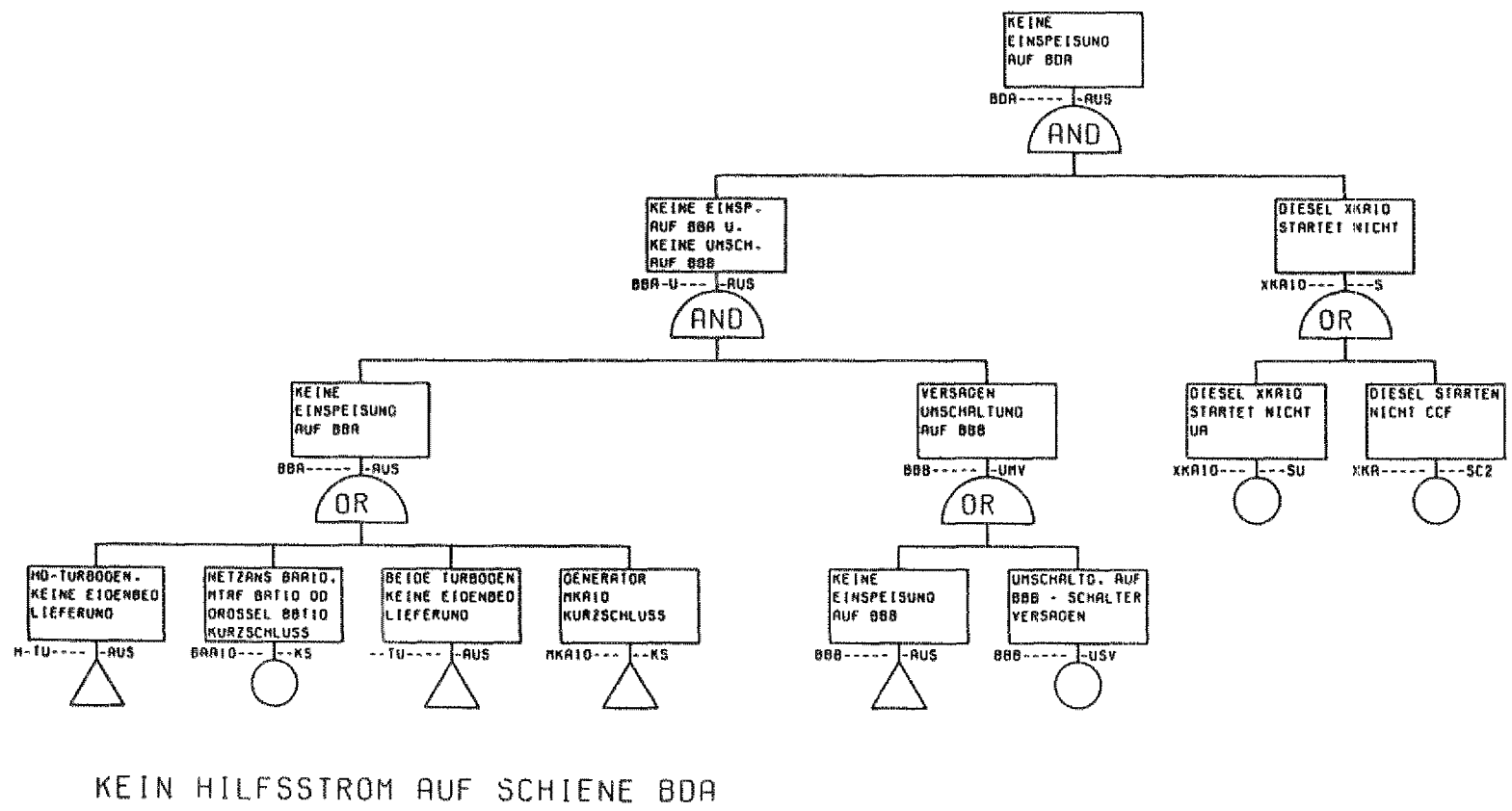
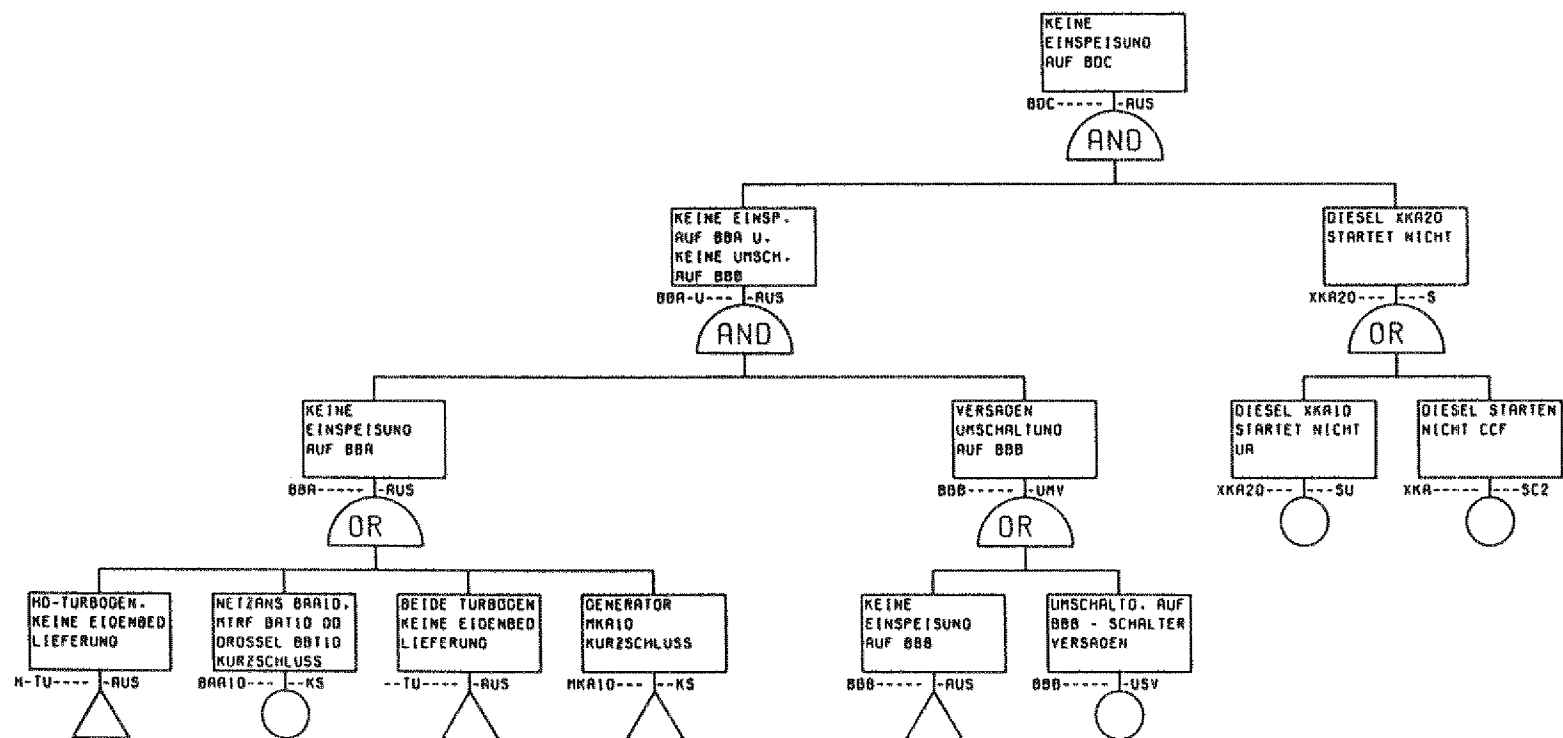


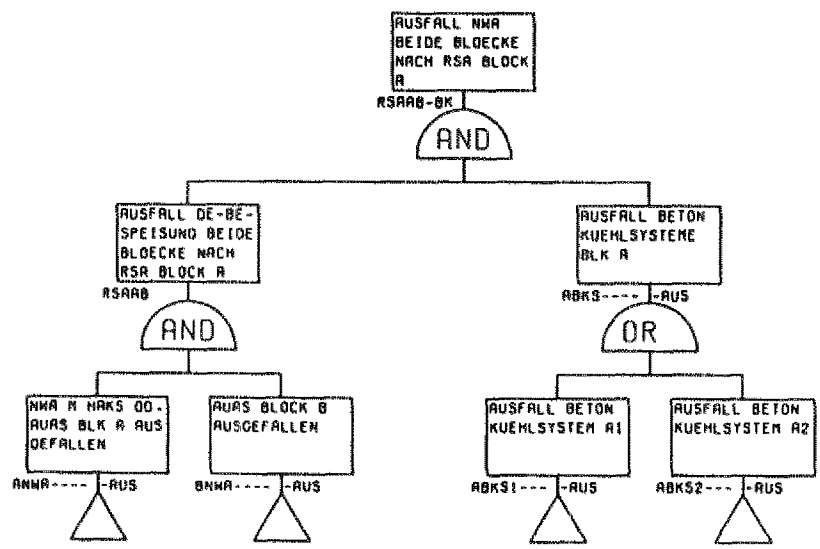
Abbildung 3.2-11: Fehlerbaum "Kein Hilfsstrom auf Schiene BDC"



KEIN HILFSSTROM AUF SCHIENE BDC

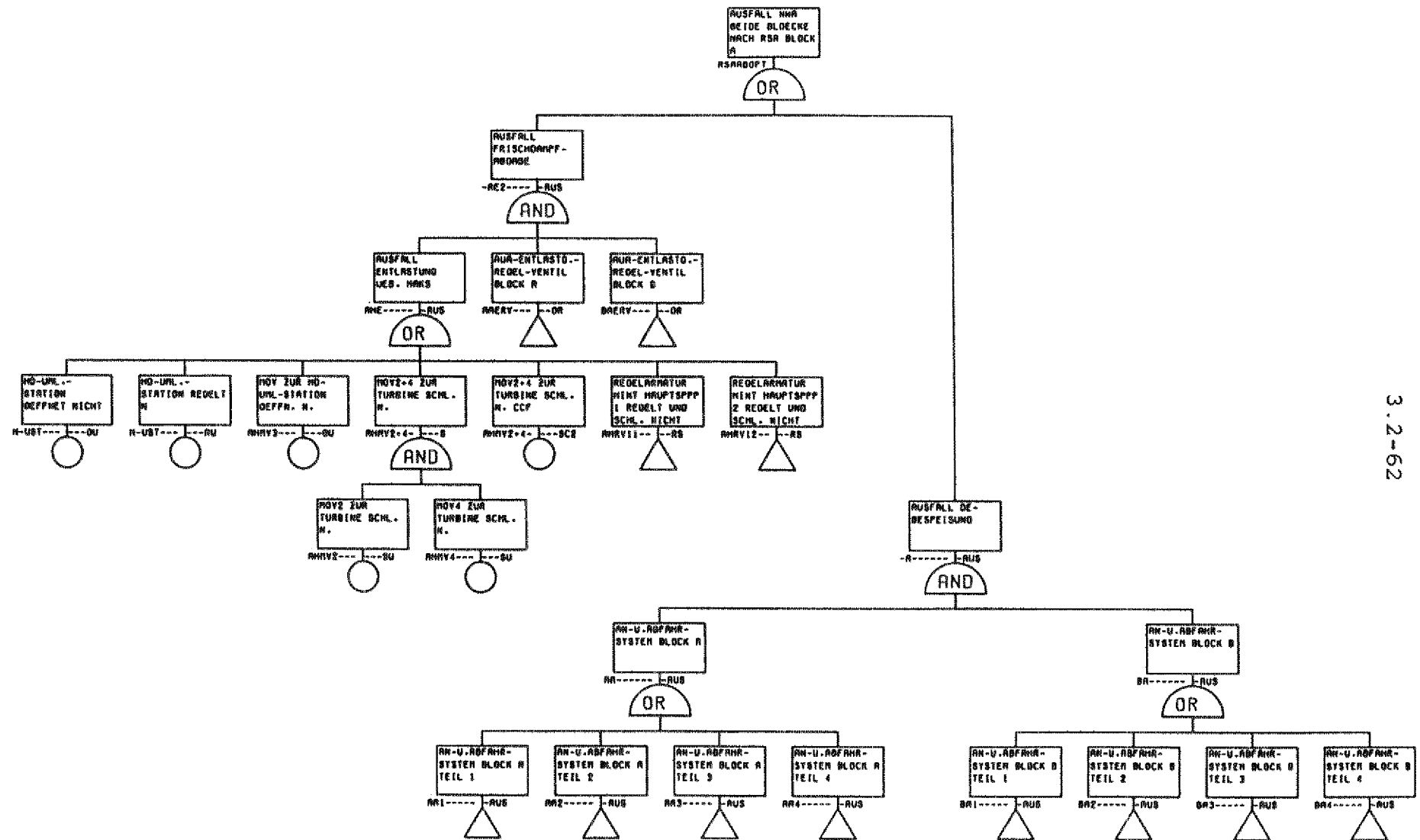


Abbildung 3.2-12: Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA Block A"



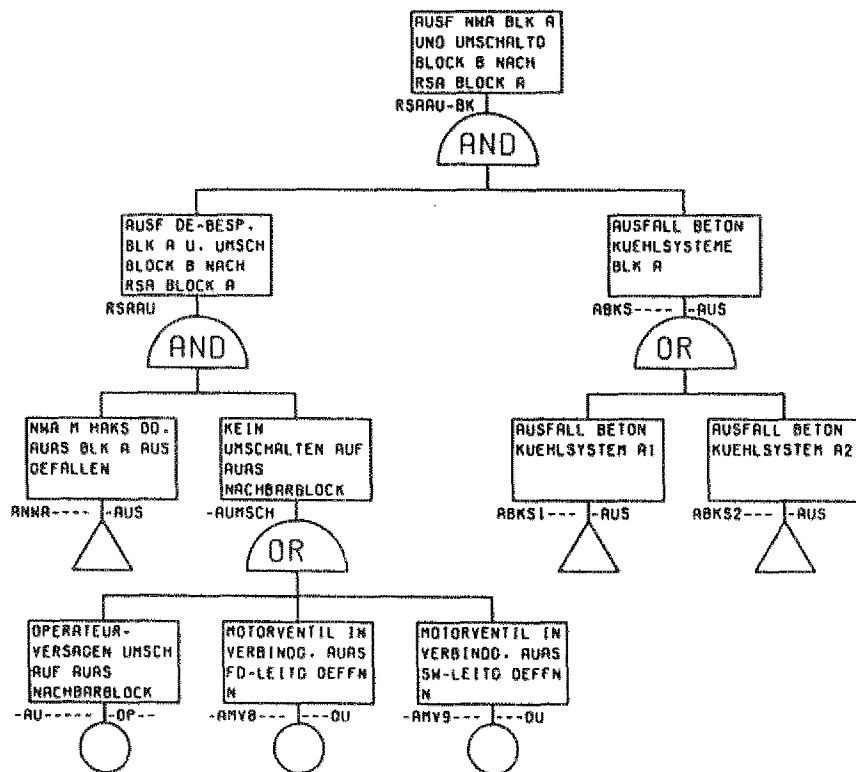
AUSFALL NWA BEIDE BLOECKE NACH RSA BLOCK A

Abbildung 3.2-13: Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach RESA Block A, optimistische Bewertung"



3.2-62

AUSFALL NWA BEIDE BLOCCKE NACH RESA BLOCK A OPTIMIST. BEWERTUNG



AUSFALL NWA BLOCK A UND KEINE UMSCHALTUNG AUF AUAS BLOCK B NACH RSA BLK A

Abbildung 3.2-14: Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umschaltung auf AUAS Block B nach RSA Block A"

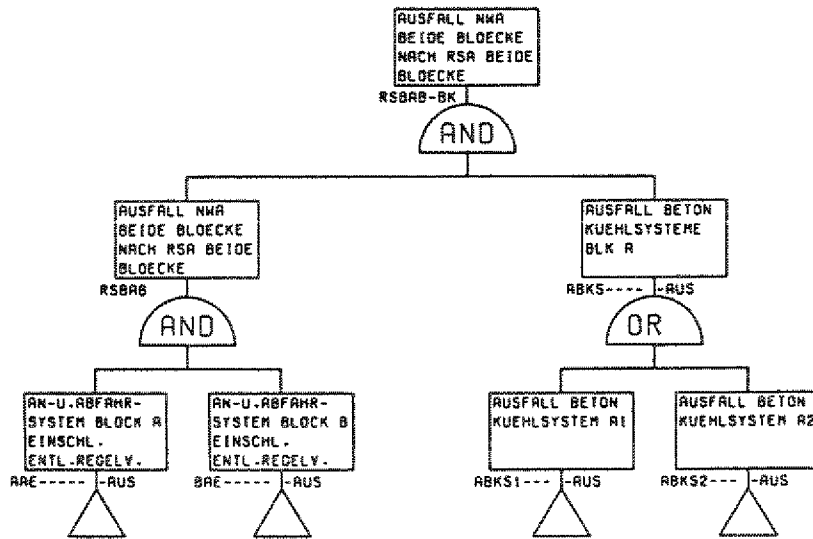


Abbildung 3.2-15: Fehlerbaum "Ausfall NWA beide Blöcke nach RESA beide Blöcke"

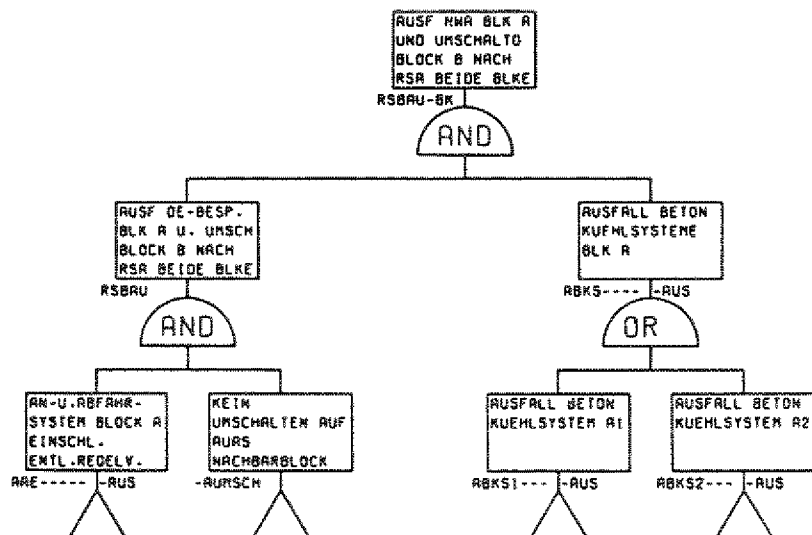


Abbildung 3.2-16: Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umschaltung auf AuAS Block B nach RESA beide Blöcke"

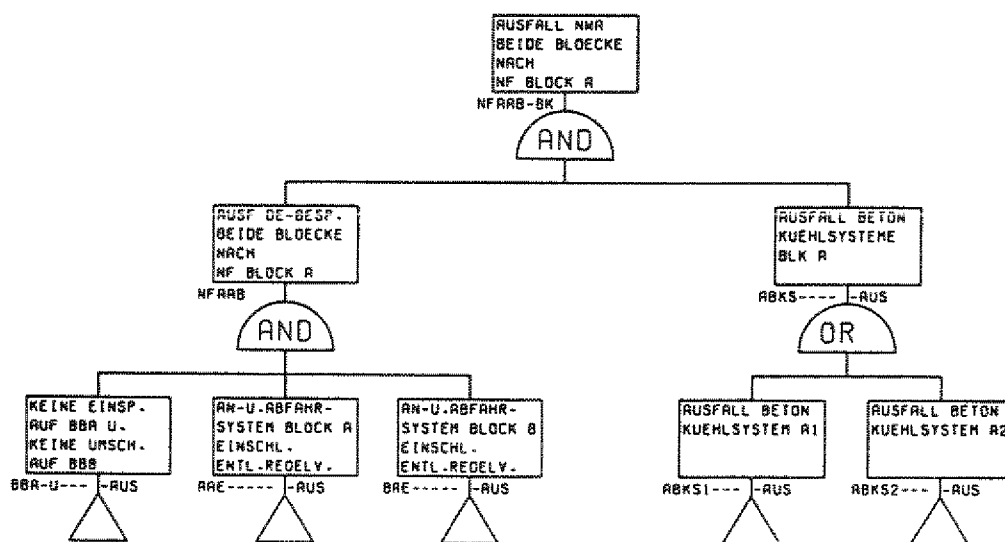


Abbildung 3.2-17: Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach Anforderung Hilfsstrom in Block A"

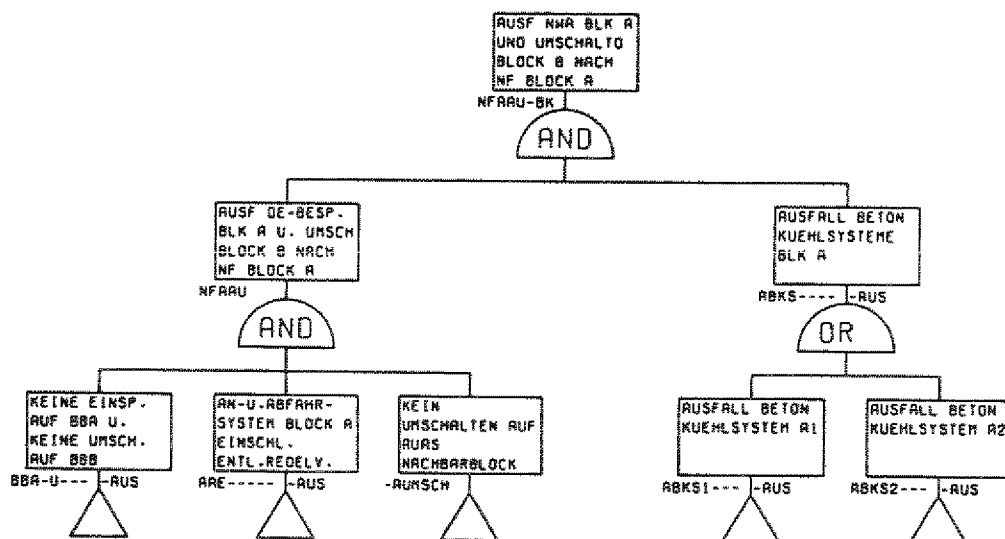


Abbildung 3.2-18: Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umschaltung auf AuAS Block B nach Anforderung Hilfsstrom in Block A"

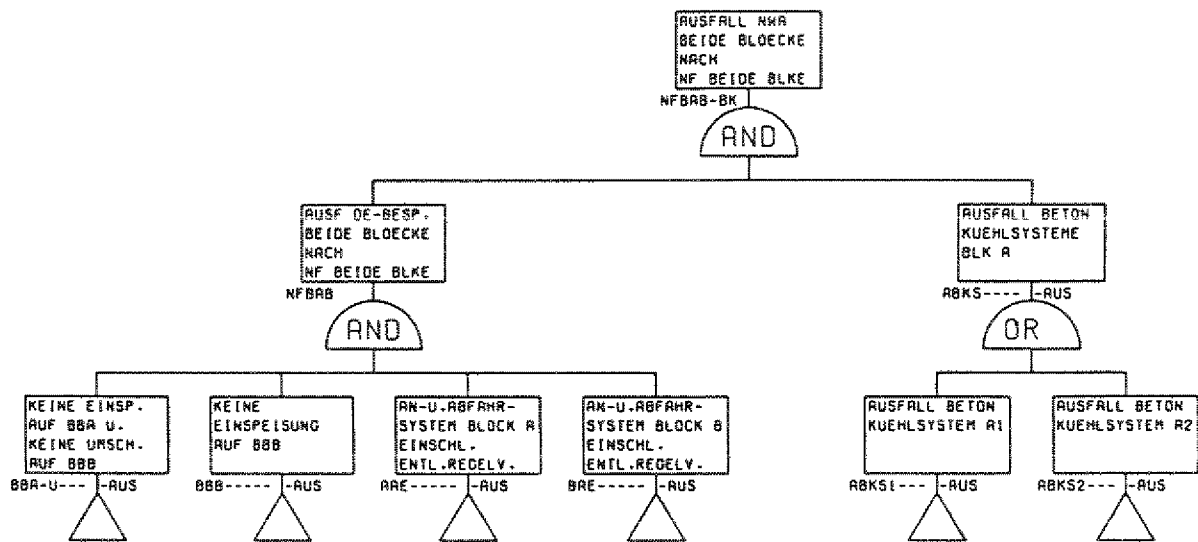


Abbildung 3.2-19: Fehlerbaum "Ausfall NWA beider Blöcke nach Anforderung Hilfsstrom in beiden Blöcken"

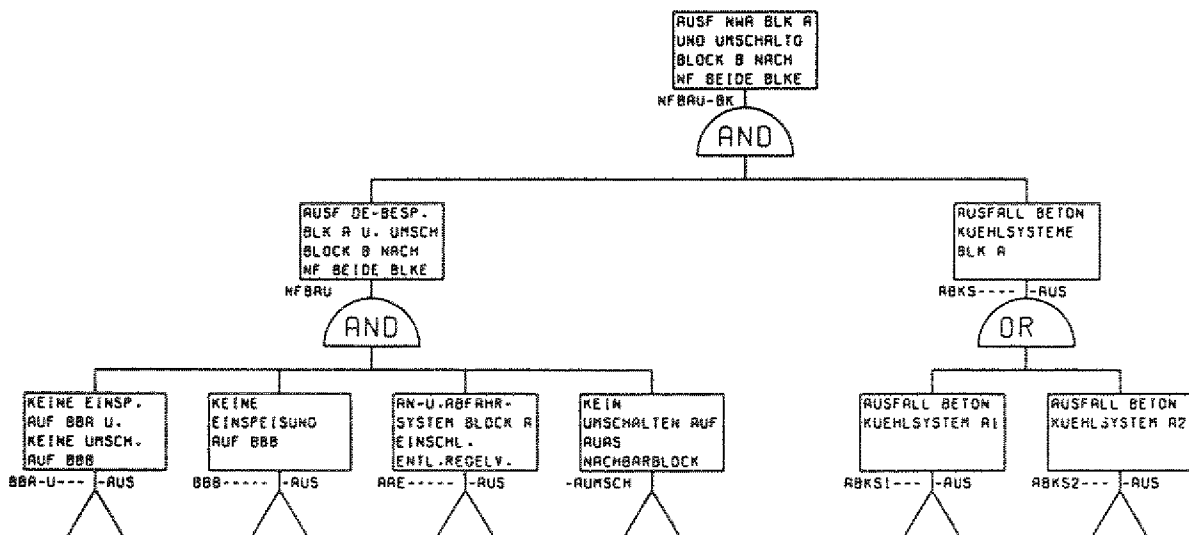


Abbildung 3.2-20: Fehlerbaum "Ausfall NWA Block A und keine Umschaltung auf AuAS Block B nach Anforderung Hilfsstrom in beiden Blöcken"

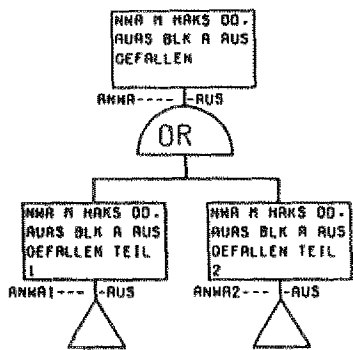
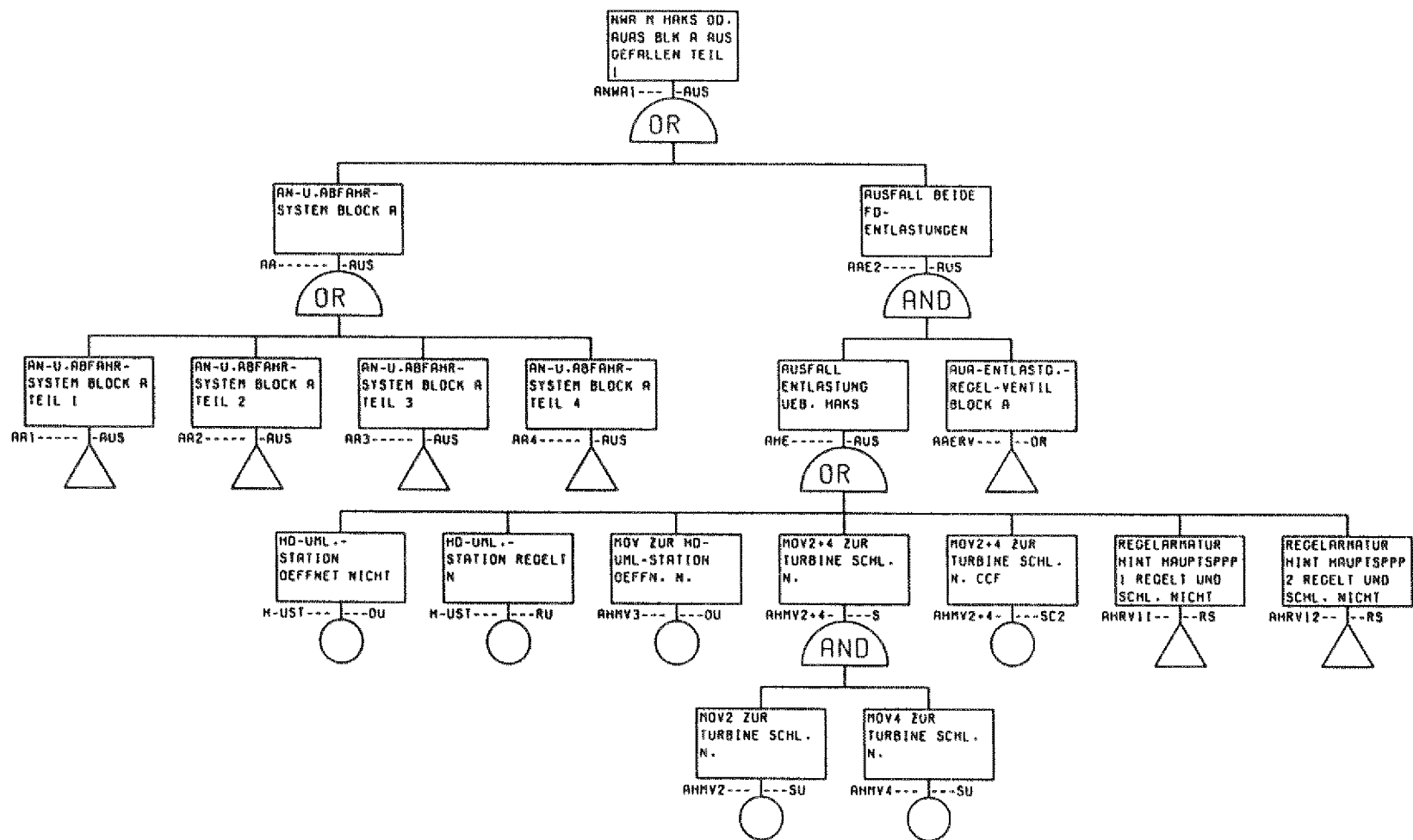


Abbildung 3.2-21: Fehlerbaum "NWA mit HAKS oder AUAS Block A ausgefallen"

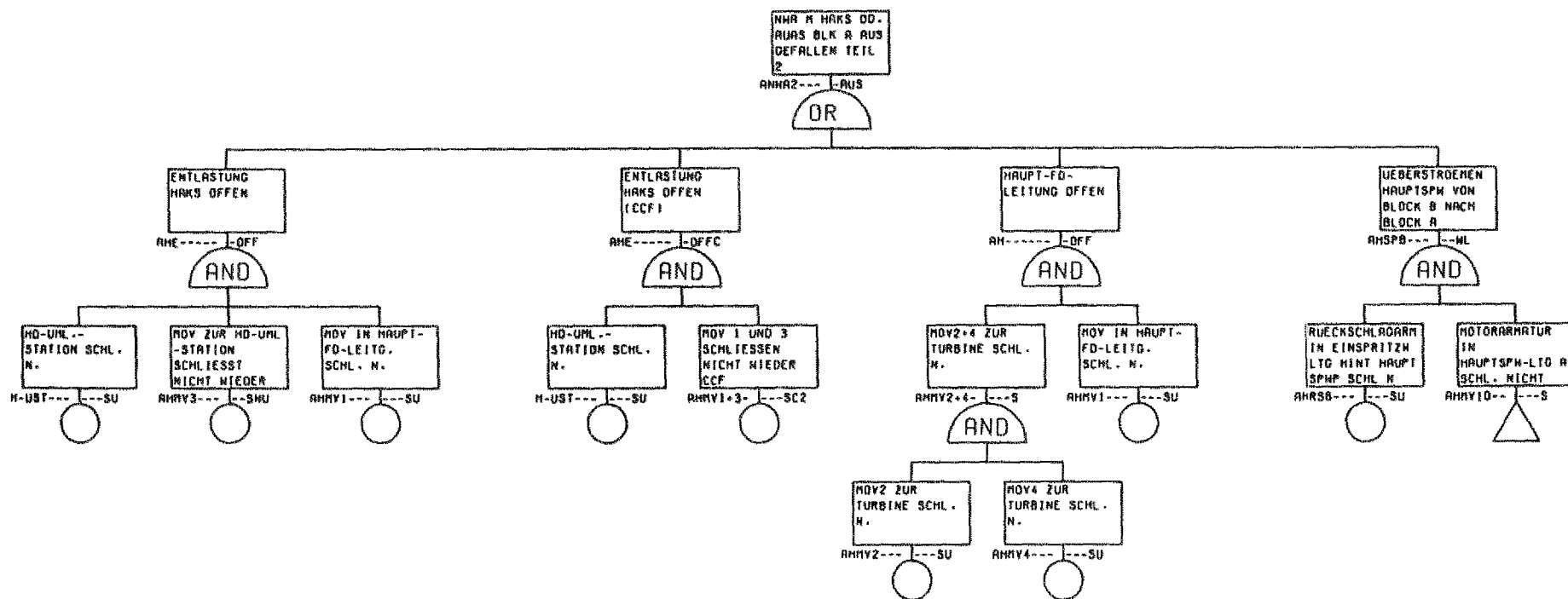
Abbildung 3.2-22: Fehlerbaum "NWA mit HAKS oder AuAS Block A ausgefallen" Teil 1



NWA MIT HAKS ODER AUAS BLOCK A AUSGEFALLEN TEIL 1



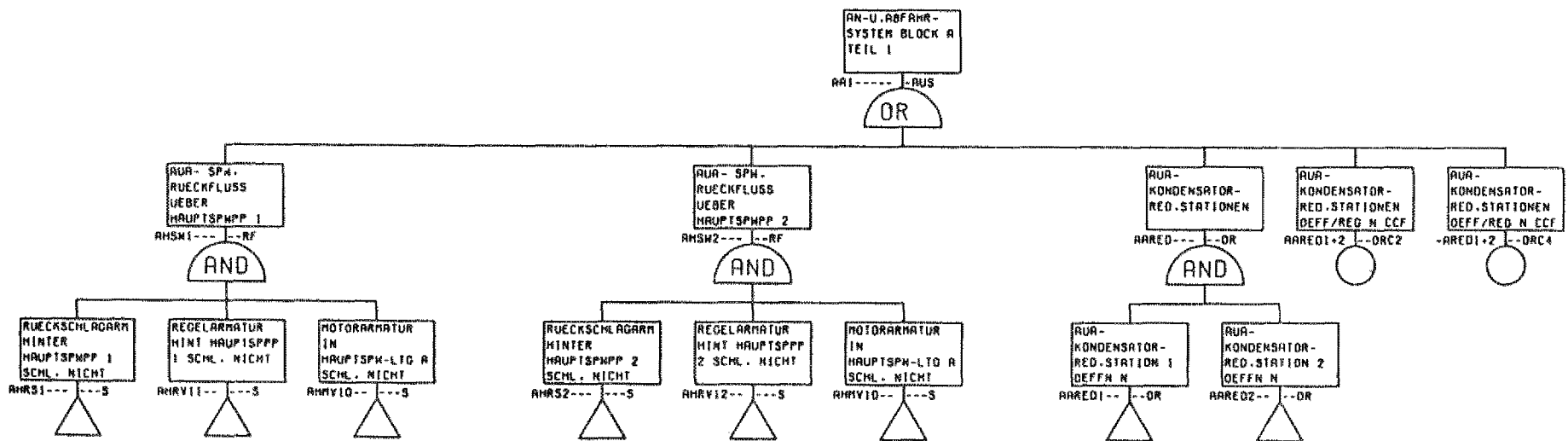
Abbildung 3.2-23: Fehlerbaum "NWA mit HAKS oder AuAS Block A ausgefallen" Teil 2



NWA MIT HAKS ODER AUAS BLOCK A AUSGEFALLEN TEIL 2

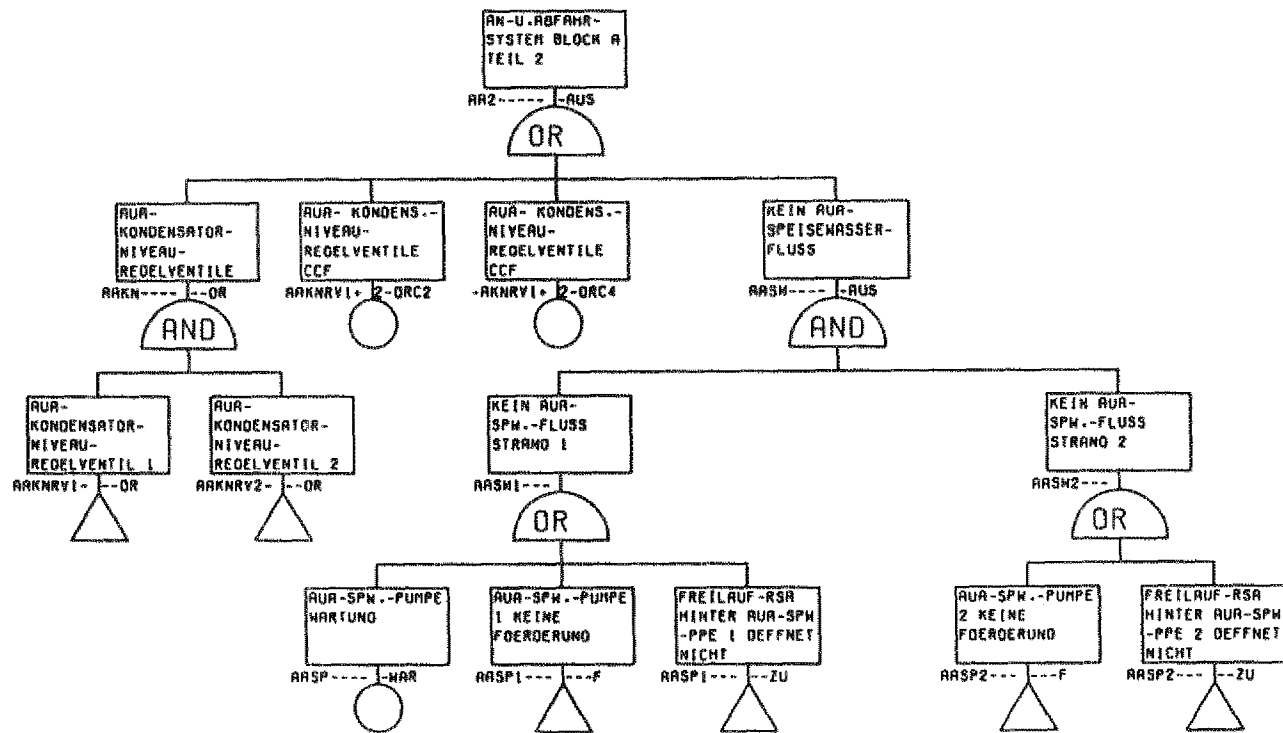
Abbildung 3.2-24: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block A" Teil 1

3.2-70



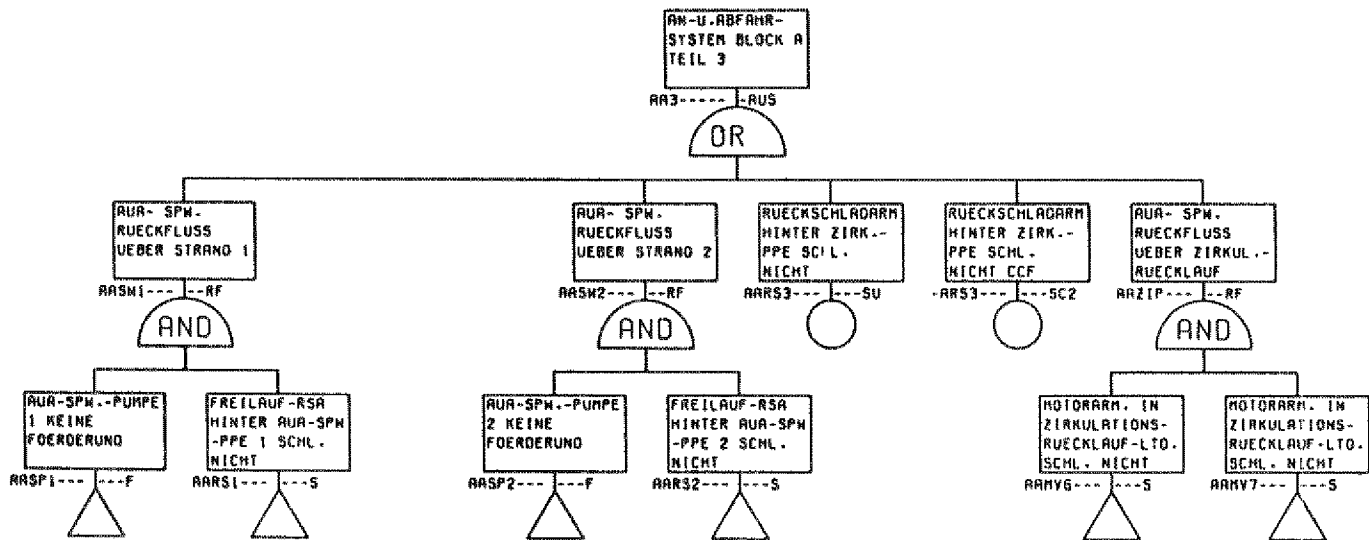
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK A TEIL 1

Abbildung 3.2-25: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block A" Teil 2.

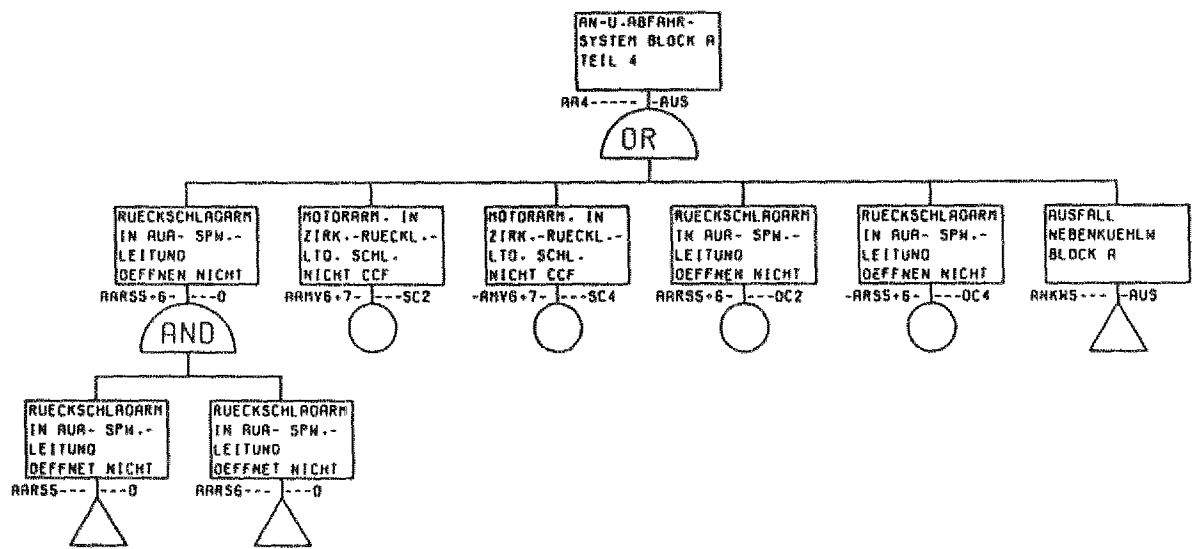


AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK A TEIL 2

Abbildung 3.2-26: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block A" Teil 3



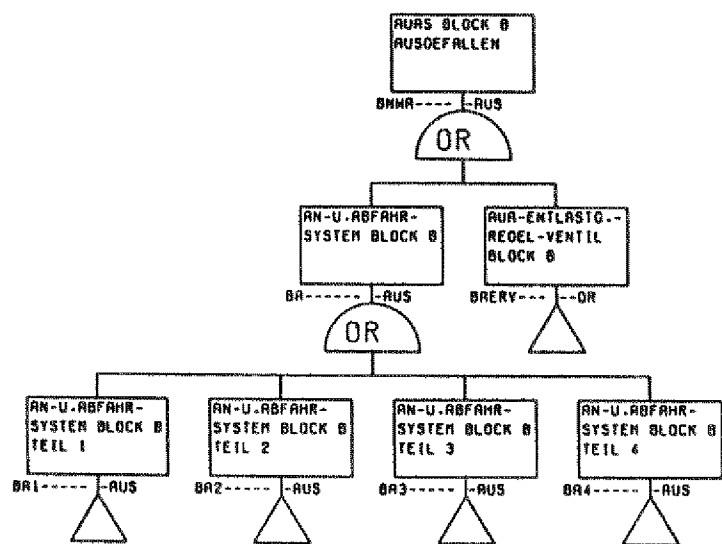
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK A TEIL 3



AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK A TEIL 4

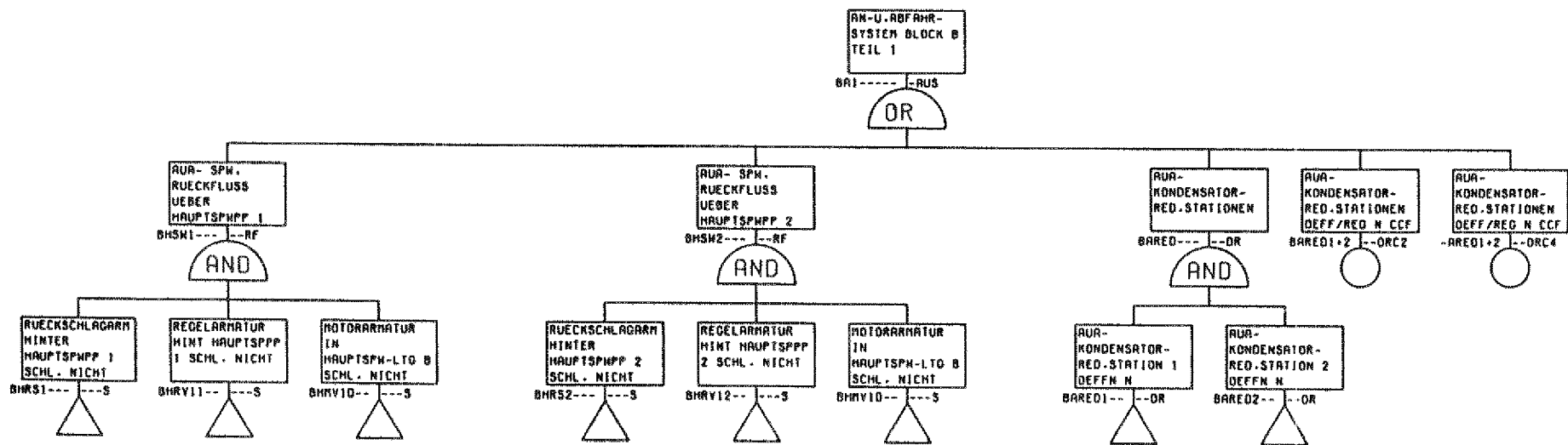
Abbildung 3.2-27: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block A" Teil 4

Abbildung 3.2-28: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block B"



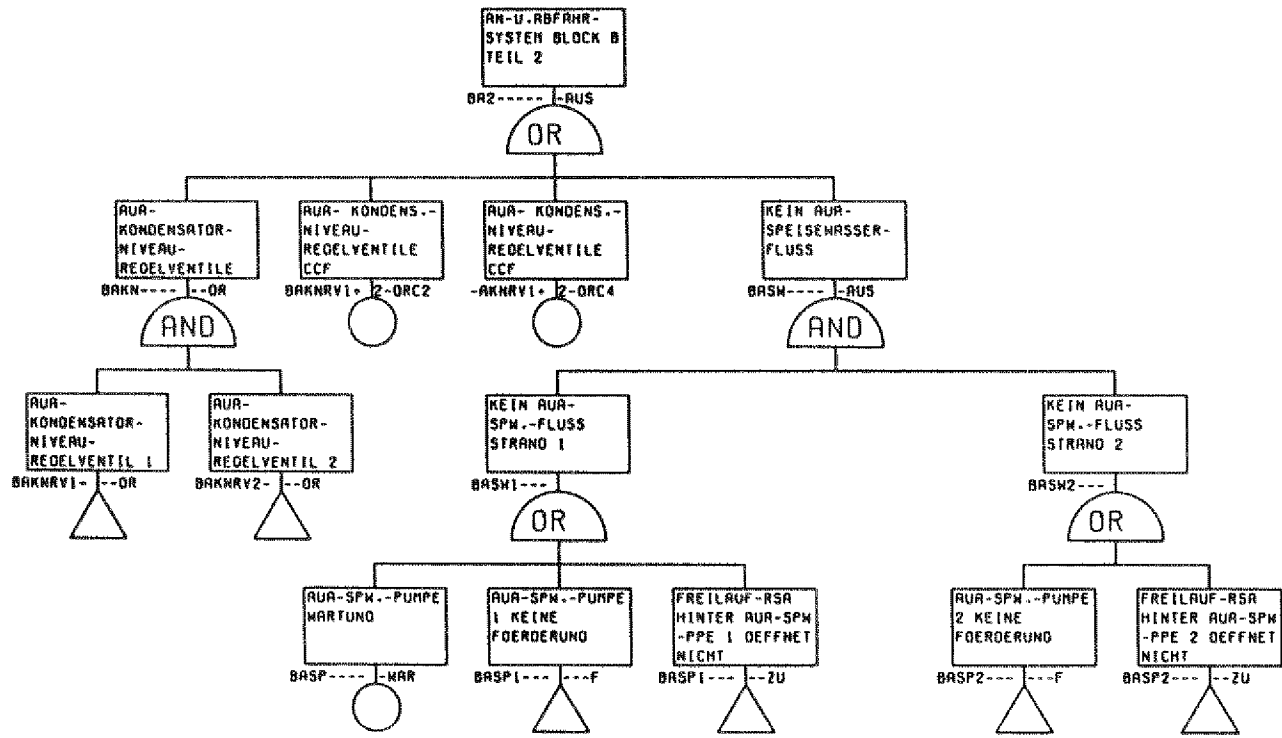
AUS BLOCK B AUSGEFALLEN

Abbildung 3.2-29: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block B" Teil 1



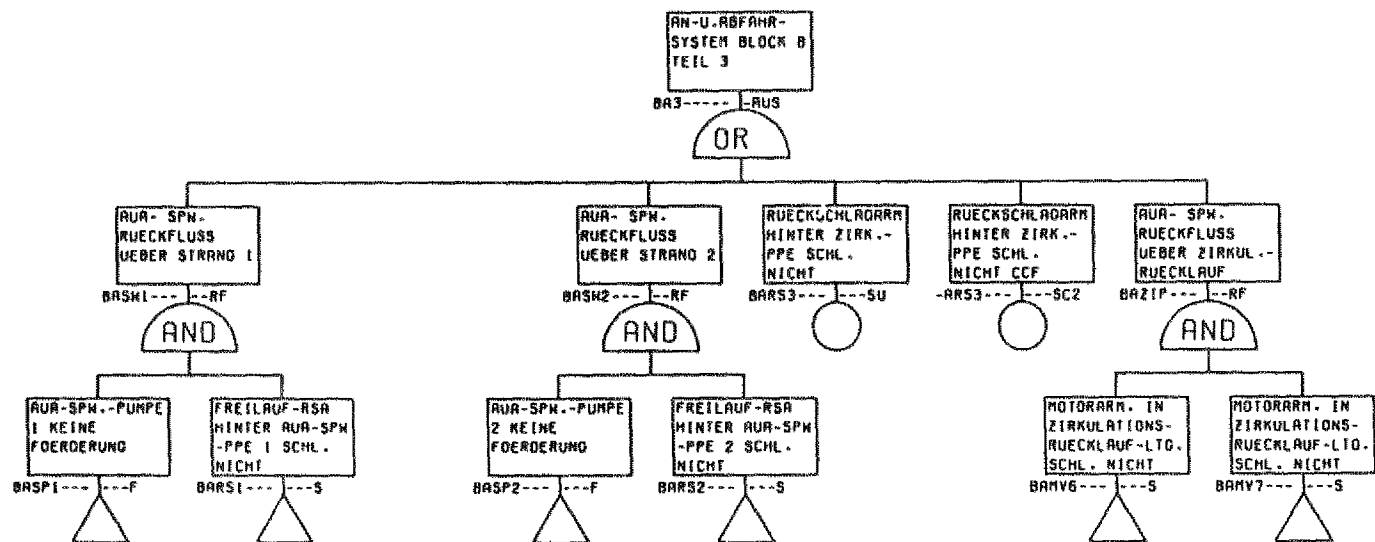
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK B TEIL 1

Abbildung 3.2-30: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block B" Teil 2



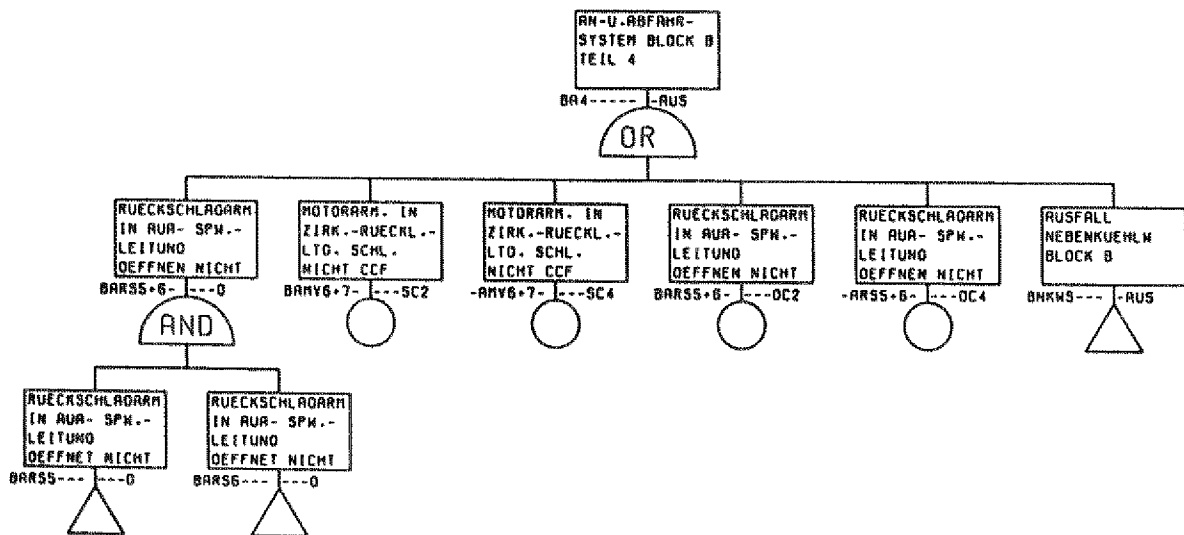
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK B TEIL 2





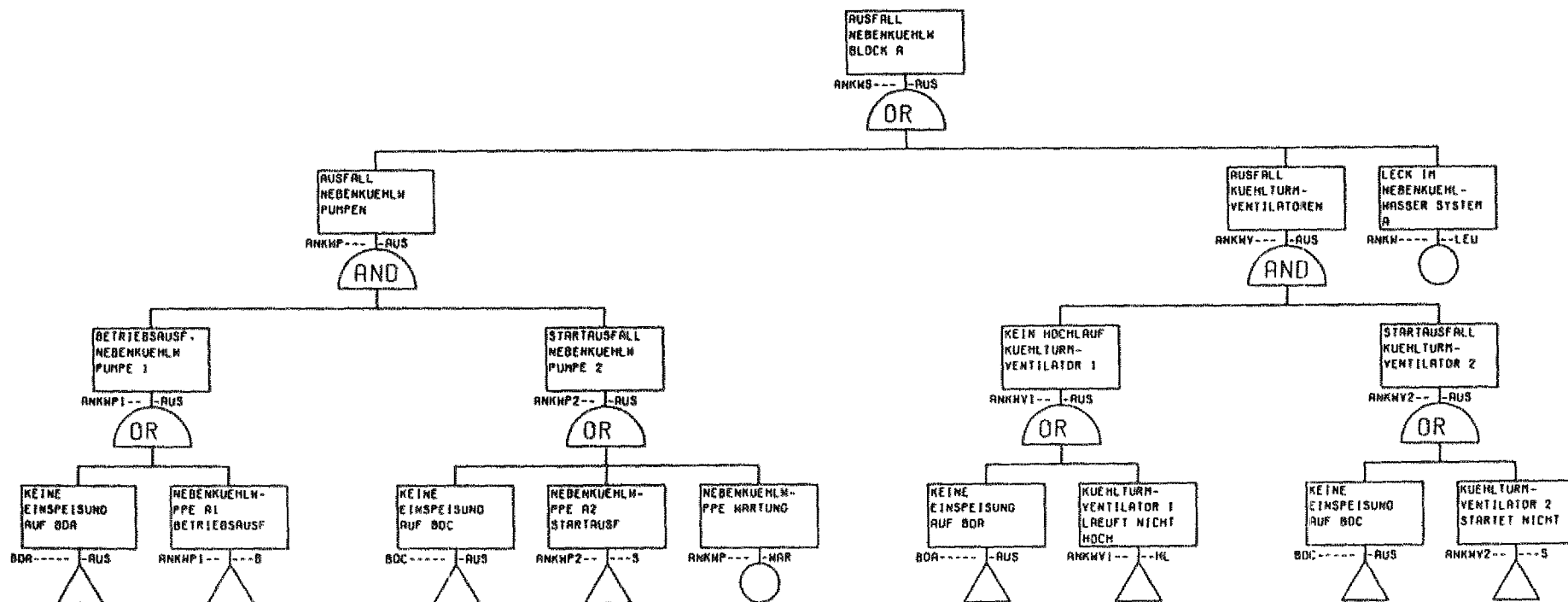
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK B TEIL 3

Abbildung 3.2-31: Fehlerbaum "Ausfall An- und Abfahrssystem Block B" Teil 3



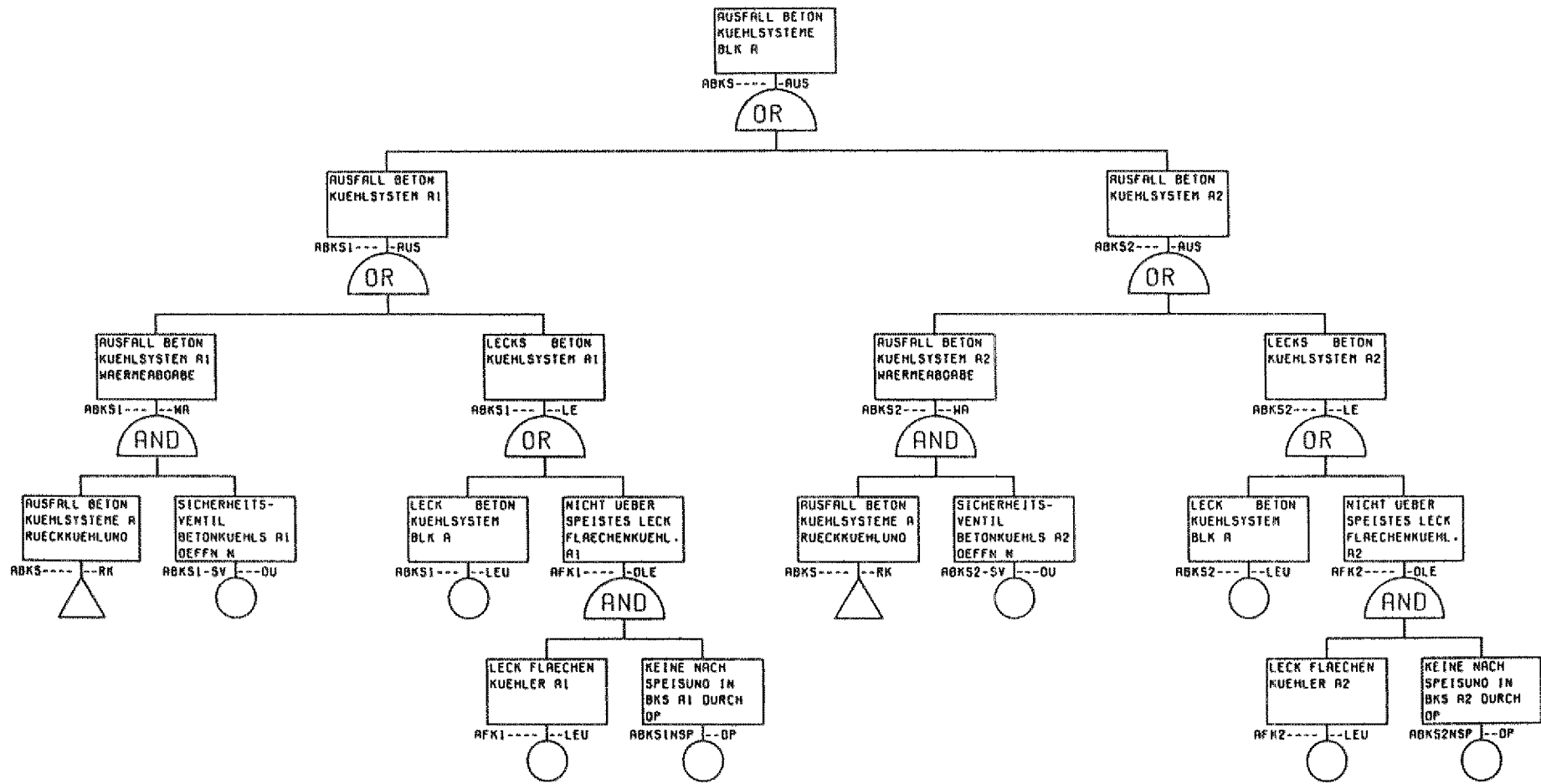
AN- UND ABFAHRSYSTEM BLOCK B TEIL 4

Abbildung 3.2-33: Fehlerbaum "Ausfall Nebenkühlwasser-  
system Block A bei NWA - Anforderung"



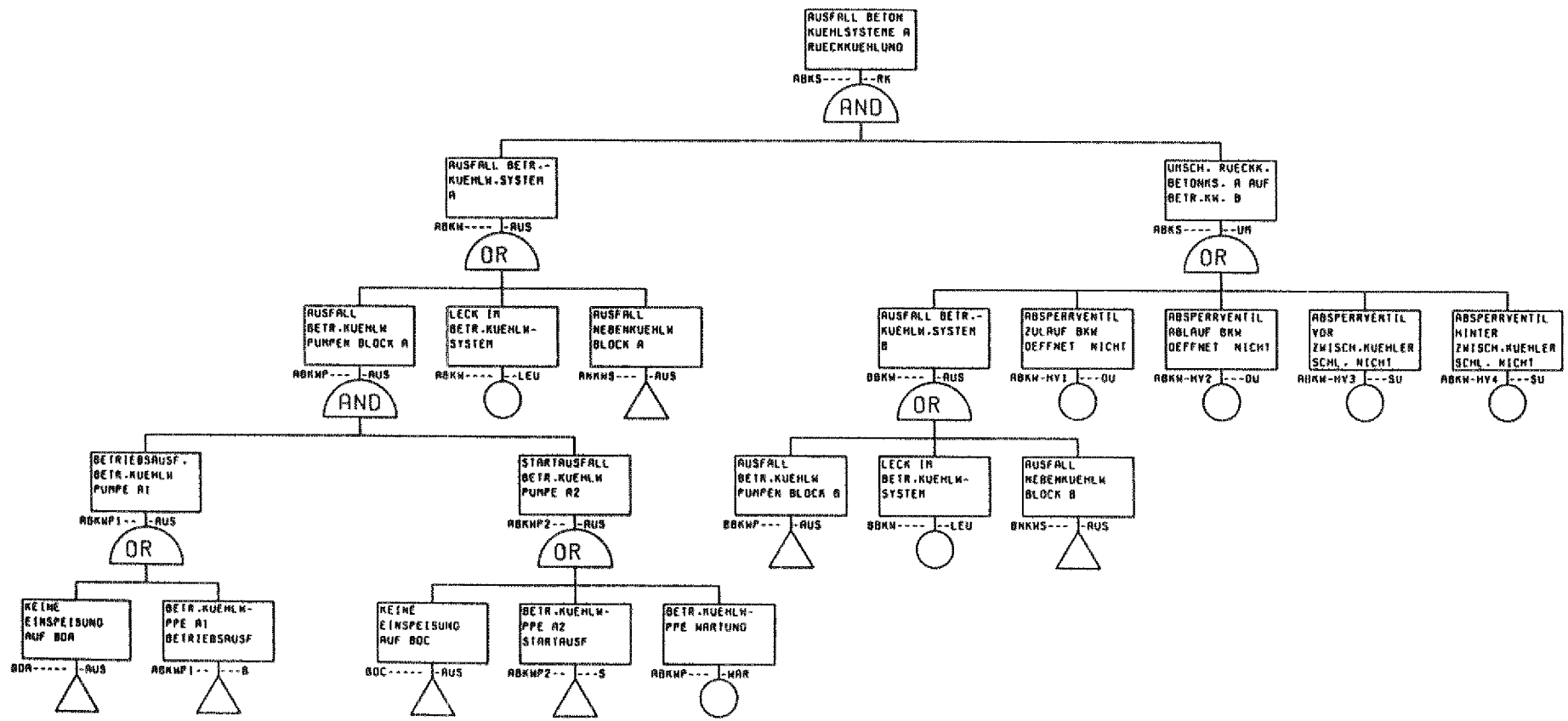
AUSFALL NEBENKUEHLWASSERSYSTEM BLOCK A BEI NWA-ANFORDERUNG

Abbildung 3.2-34: Fehlerbaum "Ausfall Betonkühlsysteme Block A"



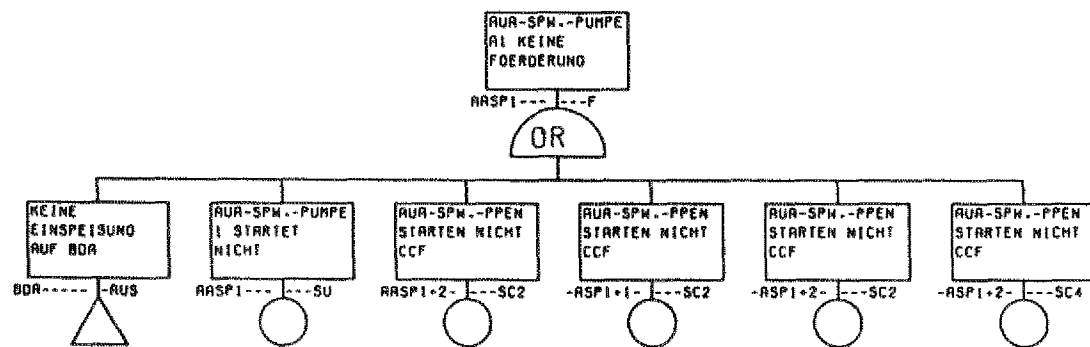
AUSFALL BETONKUEHLSYSTEME BLOCK A

Abbildung 3.2-35: Fehlerbaum "Ausfall Rückkühlung der Betonkühlsysteme Block A"

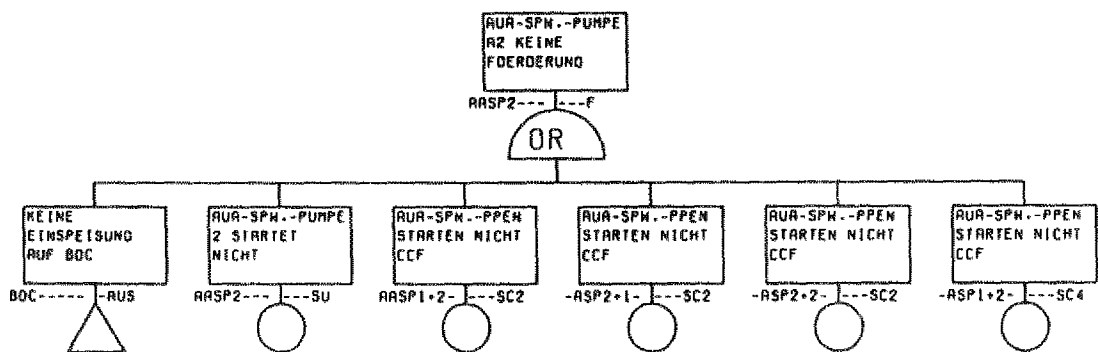


AUSFALL BETONKUEHLSYSTEME BLOCK A RUECKKUEHLUNG

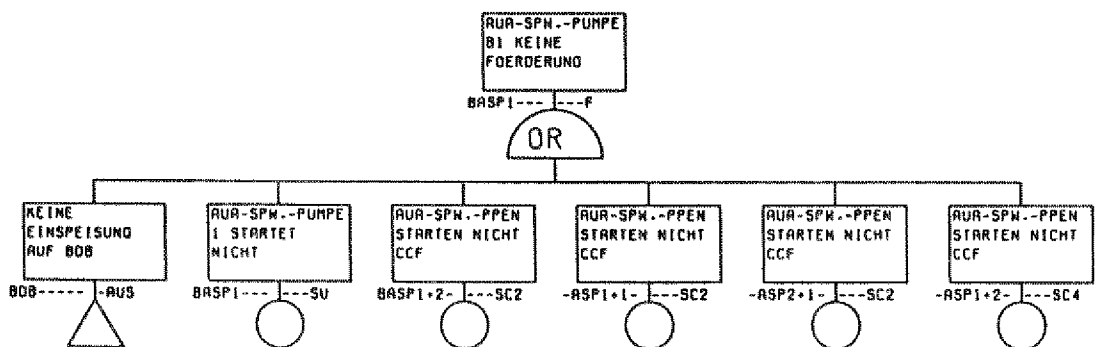
Abbildung 3.2-36: Modellierung von CCF, Beispiel: AUA-Speisewasser - Pumpe



MODELLIERUNG VON CCF. BEISPIEL: AUAS-SPEISEWASSER-PUMPE



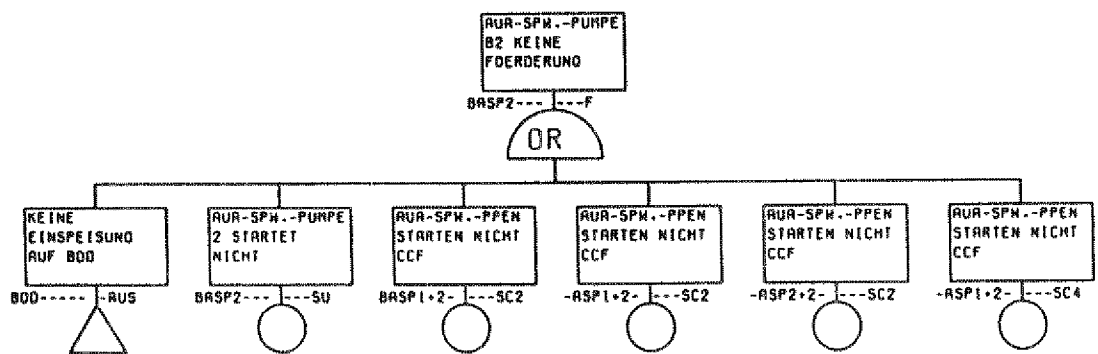
MODELLIERUNG VON CCF, BEISPIEL: AUAS-SPEISEWASSER-PUMPE



MODELLIERUNG VON CCF, BEISPIEL: AUAS-SPEISEWASSER-PUMPE



Abbildung 3.2-39: Modellierung von CCF, Beispiel: AuAS - Speisewasser - Pumpe



MODELLIERUNG VON CCF, BEISPIEL: AUAS-SPEISEWASSER-PUMPE

| Komponenten-<br>Kennzeichnung                            | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | Tl<br>in h | Tl0<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|----------------------------------------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| <b>Turbinen und Reduzierstationen im Hauptkühlsystem</b> |               |              |          |            |             |        |                                  |
| H-UST-----OU                                             | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| H-UST-----SU                                             | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 54     | 4.00                             |
| H-UST-----RU                                             | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 55     | 3.80                             |
| HTUST-----OU                                             | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| HTUST-----RU                                             | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 55     | 3.80                             |
| H-----TUSA                                               | 1.140E-04/h   | 8.50         | selbstm. |            |             | 0      | 3.00                             |
| H--EB----AUS                                             | 1.000E-01/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 153    | 3.00                             |
| NTUST-----OU                                             | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| NTUST-----RU                                             | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 55     | 3.80                             |
| N-----TUSA                                               | 1.140E-04/h   | 8.50         | selbstm. |            |             | 0      | 3.00                             |
| N--EB----AUS                                             | 1.000E-01/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 153    | 3.00                             |
| <b>An- und Abfahrssystem</b>                             |               |              |          |            |             |        |                                  |
| -AERV-----ORC2                                           | 2.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 21.00                            |
| -AKNRV1+1-ORC2                                           | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 12.70                            |
| -AKNRV1+2-ORC2                                           | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 12.70                            |
| -AKNRV2+1-ORC2                                           | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 12.70                            |
| -AKNRV2+2-ORC2                                           | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 12.70                            |
| -AKNRV1+2-ORC4                                           | 2.100E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 45     | 3.30                             |
| -AMV8-----OU                                             | 8.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 33     | 3.00                             |
| -AMV9-----OU                                             | 1.400E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 31     | 3.20                             |
| -AMV6+6----SC2                                           | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 23.00                            |
| -AMV6+7----SC2                                           | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 23.00                            |
| -AMV7+6----SC2                                           | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 23.00                            |
| -AMV7+7----SC2                                           | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 23.00                            |
| -AMV6+7----SC4                                           | 1.100E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 35     | 5.00                             |
| -ARED1+1--ORC2                                           | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 53     | 5.10                             |
| -ARED1+2--ORC2                                           | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 53     | 5.10                             |
| -ARED2+1--ORC2                                           | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 53     | 5.10                             |
| -ARED2+2--ORC2                                           | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 53     | 5.10                             |
| -ARED1+2--ORC4                                           | 1.170E-07/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 53     | 3.40                             |
| -ARS1+1----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS1+2----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS2+1----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS2+2----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS1+2----OC4                                           | 1.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 63     | 5.00                             |
| -ARS1+1----SC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS1+2----SC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS2+1----SC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS2+2----SC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| -ARS1+2----SC4                                           | 1.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 63     | 5.00                             |
| -ARS3-----SC2                                            | 3.400E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 58     | 30.00                            |
| -ARS5+5----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| -ARS5+6----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| -ARS6+5----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| -ARS6+6----OC2                                           | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| -ARS5+6----OC4                                           | 1.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 5.00                             |
| -ASP1+1----SC2                                           | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 36.00                            |

Abbildung 3.2-40: Zuordnung der Zuverlässigkeitskenngrößen zu den Fehlerbaumeingängen (Blatt 1 v. 5)

Abbildung 3.2-41: Zuordnung der Zuverlässigkeitskenngrößen  
zu den Fehlerbaumeingängen (Blatt 2 v. 5)

| Komponenten-<br>Kennzeichnung | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | Tl<br>in h | Tl0<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| -ASP1+2----SC2                | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 36.00                            |
| -ASP2+1----SC2                | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 36.00                            |
| -ASP2+2----SC2                | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 36.00                            |
| -ASP1+2----SC4                | 7.900E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 11     | 27.00                            |
| -AU-----OP--                  | 9.400E-03/Anf | 4.00         | Wahrsch. |            |             | 0      | 4.80                             |
| AAERV-----ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 4.70                             |
| AAKNRV1+2-ORC2                | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 12.70                            |
| AAKNRV1---ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 4.70                             |
| AAKNRV2---ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 45     | 4.70                             |
| AAMV6-----SU                  | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 3.50                             |
| AAMV6+7----SC2                | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 23.00                            |
| AAMV7-----SU                  | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 35     | 3.50                             |
| AARED1-----OU                 | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| AARED2-----OU                 | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| AARED1-----RU                 | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 55     | 3.80                             |
| AARED2-----RU                 | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 55     | 3.80                             |
| AARED1+2---ORC2               | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 53     | 5.10                             |
| AARS1-----OU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 3.00                             |
| AARS1+2----OC2                | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| AARS1-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 3.00                             |
| AARS1+2----SC2                | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 40.00                            |
| AARS2-----OU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 3.00                             |
| AARS2-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 63     | 3.00                             |
| AARS3-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 58     | 3.00                             |
| AARS5-----OU                  | 1.700E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 3.00                             |
| AARS6-----OU                  | 1.700E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 3.00                             |
| AARS5+6---OC2                 | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| AASP1-----SU                  | 2.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 3.00                             |
| AASP2-----SU                  | 2.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 3.00                             |
| AASP1+2----SC2                | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 11     | 36.00                            |
| AASP-----WAR                  | 3.800E-02/Anf | 84.00        | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| BAERV-----ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 45     | 4.70                             |
| BAKNRV1+2-ORC2                | 6.200E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 45     | 12.70                            |
| BAKNRV1---ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 45     | 4.70                             |
| BAKNRV2---ORU                 | 1.000E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 45     | 4.70                             |
| BAMV6-----SU                  | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 35     | 3.50                             |
| BAMV6+7----SC2                | 1.700E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 35     | 23.00                            |
| BAMV7-----SU                  | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 35     | 3.50                             |
| BARED1-----OU                 | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| BARED2-----OU                 | 4.000E-03/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| BARED1-----RU                 | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 55     | 3.80                             |
| BARED2-----RU                 | 1.440E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 55     | 3.80                             |
| BARED1+2---ORC2               | 5.290E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 53     | 5.10                             |
| BARs1-----OU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 3.00                             |
| BARs1+2---OC2                 | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 40.00                            |
| BARs1-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 3.00                             |
| BARs1+2----SC2                | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 40.00                            |
| BARs2-----OU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 3.00                             |
| BARs2-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 63     | 3.00                             |
| BARs3-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 58     | 3.00                             |
| BARs5-----OU                  | 1.700E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 3.00                             |
| BARs6-----OU                  | 1.700E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 3.00                             |

Abbildung 3.2-42: Zuordnung der Zuverlässigkeitskenngrößen zu den Fehlerbaumeinigängen (Blatt 3 v. 5)

| Komponenten-<br>kennzeichnung          | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | TI<br>in h | TIO<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|----------------------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| BARS5+6----OC2                         | 1.300E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 57     | 40.00                            |
| BASP1-----SU                           | 2.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 11     | 3.00                             |
| BASP2-----SU                           | 2.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 11     | 3.00                             |
| BASP1+2-----SC2                        | 1.090E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 11     | 36.00                            |
| BASP-----WAR                           | 3.800E-02/Anf | 84.00        | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| <b>Elektrische Anlagen</b>             |               |              |          |            |             |        |                                  |
| BAA10-----KS                           | 1.100E-05/h   | 30.00        | selbstm. |            |             | 137    | 4.00                             |
| BAA10-----AUS                          | 1.400E-06/h   | 30.00        | selbstm. |            |             | 151    | 10.00                            |
| BAA20-----KS                           | 1.100E-05/h   | 30.00        | selbstm. |            |             | 137    | 4.00                             |
| BAA20-----AUS                          | 1.400E-06/h   | 30.00        | selbstm. |            |             | 151    | 10.00                            |
| BAC10-----OU                           | 2.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 121    | 4.00                             |
| BAC20-----OU                           | 2.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 121    | 4.00                             |
| BBA-----USV                            | 1.200E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 123    | 4.00                             |
| BBB-----USV                            | 1.200E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 123    | 4.00                             |
| NETZ-----AUS                           | 1.000E-05/h   | 0.50         | selbstm. |            |             | 0      | 3.00                             |
| XKA-----SC2                            | 1.600E-04/Anf | 5.00         | Wahrsch. |            |             | 145    | 24.00                            |
| XKA10-----SU                           | 8.100E-03/Anf | 5.00         | Wahrsch. |            |             | 145    | 2.40                             |
| XKA20-----SU                           | 8.100E-03/Anf | 5.00         | Wahrsch. |            |             | 145    | 2.40                             |
| <b>Betonkühlsystem</b>                 |               |              |          |            |             |        |                                  |
| ABKS1-SV---OU                          | 4.400E-04/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 71     | 4.70                             |
| ABKS2-SV---OU                          | 4.400E-04/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 71     | 4.70                             |
| ABKS1-----LEU                          | 2.860E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| ABKS2-----LEU                          | 2.860E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| ABKS1NSP--OP                           | 1.000E+00/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| ABKS2NSP--OP                           | 1.000E+00/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| BBKS1-SV---OU                          | 4.400E-04/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 71     | 4.70                             |
| BBKS2-SV---OU                          | 4.400E-04/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 71     | 4.70                             |
| BBKS1-----LEU                          | 2.860E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| BBKS2-----LEU                          | 2.860E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| BBKS1NSP--OP                           | 1.000E+00/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| BBKS2NSP--OP                           | 1.000E+00/Anf | 1.00E+06     | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| <b>Betriebskühlwassersystem primär</b> |               |              |          |            |             |        |                                  |
| -BKWP1+1---BC2                         | 3.600E-07/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 1.60                             |
| -BKWP2+2---SC2                         | 7.000E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 9      | 42.00                            |
| ABKWP-----WAR                          | 3.800E-02/Anf | 84.00        | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| ABKWP1-----BU                          | 1.600E-04/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 3.00                             |
| ABKWP2-----SU                          | 9.500E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 9      | 3.90                             |
| ABKW-----LEU                           | 1.430E-11/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| ABKW-HV1---OU                          | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| ABKW-HV2---OU                          | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| ABKW-HV3---SU                          | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| ABKW-HV4---SU                          | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| BBKWP1-----BU                          | 1.600E-04/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 3.00                             |

| Komponenten-<br>Kennzeichnung | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | Tl<br>in h | T10<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| BBKP2-----SU                  | 9.500E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 9      | 3.90                             |
| BBKW-----LEU                  | 1.430E-11/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| BBKW-HV1---OU                 | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| BBKW-HV2---OU                 | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| BBKW-HV3---SU                 | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| BBKW-HV4---SU                 | 1.300E-02/Anf | 8.00         | Wahrsch. |            |             | 35     | 3.50                             |
| AFK1-----LEU                  | 3.000E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 10.00                            |
| AFK2-----LEU                  | 3.000E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 10.00                            |
| BFK1-----LEU                  | 3.000E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 10.00                            |
| BFK2-----LEU                  | 3.000E-10/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 10.00                            |

#### Hauptkühlsystem

|                  |             |      |          |       |    |     |       |
|------------------|-------------|------|----------|-------|----|-----|-------|
| -H MV10-----SC2  | 1.700E-08/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 31  | 23.00 |
| -HRS1+1-----SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 30.00 |
| -HRS1+2-----SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 30.00 |
| -HRS2+1-----SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 30.00 |
| -HRS2+2-----SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 30.00 |
| -HRS1+2-----SC4  | 1.200E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 5.00  |
| -HRV11+11--SC2   | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV11+12--SC2   | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV12+11--SC2   | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV12+12--SC2   | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV11+12--SC4   | 2.200E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 5.00  |
| -HRV11+11-RSC2   | 1.360E-08/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV11+12-RSC2   | 1.360E-08/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV12+11-RSC2   | 1.360E-08/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV12+12-RSC2   | 1.360E-08/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 23.00 |
| -HRV11+12-RSC4   | 8.800E-09/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 5.00  |
| -HSP1+1-----OC2  | 1.800E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 125 | 44.00 |
| -HSP1+2-----OC2  | 1.800E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 125 | 44.00 |
| -HSP2+1-----OC2  | 1.800E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 125 | 44.00 |
| -HSP2+2-----OC2  | 1.800E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 125 | 44.00 |
| -HSP1+2-----OC4  | 1.300E-08/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 125 | 44.00 |
| AH MV1-----SU    | 1.400E-05/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 3.00  |
| AH MV2-----SU    | 8.000E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 3.00  |
| AH MV4-----SU    | 8.000E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 3.00  |
| AH MV2+4-----SC2 | 1.700E-08/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 23.00 |
| AH MV3-----OU    | 8.000E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 3.00  |
| AH MV1+3-----SC2 | 4.800E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 23.00 |
| AH MV3-----SWU   | 4.200E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 33  | 3.00  |
| AH MV10-----SU   | 1.400E-05/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 31  | 3.20  |
| AHRS1-----SU     | 4.200E-07/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 3.00  |
| AHRS2-----SU     | 4.200E-07/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 3.00  |
| AHRS1+2-----SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 30.00 |
| AHRS6-----SU     | 4.200E-07/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 58  | 3.00  |
| AH RV11-----SU   | 3.000E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 3.00  |
| AH RV12-----SU   | 3.000E-06/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 3.00  |
| AH RV11+12--SC2  | 3.400E-09/h | 8.00 | getestet | 8736. | 0. | 39  | 23.00 |
| AH RV11-----RSU  | 1.200E-05/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 3.00  |
| AH RV12-----RSU  | 1.200E-05/h | 8.00 | getestet | 336.  | 0. | 39  | 3.00  |

Abbildung 3.2-43: Zuordnung der Zuverlässigkeitskenngrößen zu den Fehlerbaumeingängen (Blatt 4 v. 5)

| Komponenten-<br>Kennzeichnung | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | Tl<br>in h | Tl0<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| AHRV11+12-RSC2                | 1.360E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 23.00                            |
| AHRV13-----RU                 | 1.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 168.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| AHRV14-----RU                 | 1.500E-05/h   | 8.00         | getestet | 168.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| AHSP1-----OU                  | 8.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |
| AHSP2-----OU                  | 8.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |
| AHSP1+2----OC2                | 1.800E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 44.00                            |
| BHMV10-----SU                 | 1.400E-05/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 31     | 3.20                             |
| BHRS1-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 58     | 3.00                             |
| BHRS2-----SU                  | 4.200E-07/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 58     | 3.00                             |
| BHRS1+2----SC2                | 3.400E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 58     | 30.00                            |
| BHRV11-----SU                 | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| BHRV12-----SU                 | 3.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| BHRV11+12--SC2                | 3.400E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 23.00                            |
| BHRV11----RSU                 | 1.200E-05/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| BHRV12----RSU                 | 1.200E-05/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| BHRV11+12-RSC2                | 1.360E-08/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 23.00                            |
| BHSP1-----OU                  | 8.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |
| BHSP2-----OU                  | 8.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |
| BHSP1+2----OC2                | 1.800E-09/h   | 8.00         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 44.00                            |
| <b>Nebenkühlwassersystem</b>  |               |              |          |            |             |        |                                  |
| -NKWP1+1---BC2                | 3.600E-07/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 1.60                             |
| -NKWP2+2---SC2                | 7.000E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 9      | 42.00                            |
| -NKWV1+1---SC2                | 1.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 129    | 26.00                            |
| -NKWV1+2---SC2                | 1.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 129    | 26.00                            |
| -NKWV2+1---SC2                | 1.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 129    | 26.00                            |
| -NKWV2+2---SC2                | 7.000E-09/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 21     | 42.00                            |
| -NKWV1+2---SC4                | 5.000E-09/h   | 8.00         | getestet | 336.       | 0.          | 129    | 26.00                            |
| ANKWP-----WAR                 | 3.800E-02/Anf | 84.00        | Wahrsch. |            |             | 0      | 1.00                             |
| ANKWP1-----BU                 | 1.600E-04/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 3.00                             |
| ANKWP2-----SU                 | 9.500E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 9      | 3.90                             |
| ANKWV1-----SU                 | 1.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 129    | 10.00                            |
| ANKWV2-----SU                 | 2.400E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 21     | 6.00                             |
| ANKWV1+2---SC2                | 1.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 0.          | 129    | 26.00                            |
| ANKW-----LEU                  | 1.400E-11/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |
| BNKWP1-----BU                 | 1.600E-04/h   | 8.00         | selbstm. |            |             | 10     | 3.00                             |
| BNKWP2-----SU                 | 9.500E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 9      | 3.90                             |
| BNKWV1-----SU                 | 1.000E-06/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 129    | 10.00                            |
| BNKWV2-----SU                 | 2.400E-05/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 21     | 6.00                             |
| BNKWV1+2---SC2                | 1.000E-08/h   | 8.00         | getestet | 672.       | 336.        | 129    | 26.00                            |
| BNKW-----LEU                  | 1.400E-11/h   | 24.00        | selbstm. |            |             | 0      | 80.00                            |

Abbildung 3.2-44: Zuordnung der Zuverlässigkeitskenngrößen  
zu den Fehlerbaumeingängen (Blatt 5 v. 5)

### 3.3 Lecks im Dampferzeuger

von  
R. Bongartz

#### Inhalt

|                                                                                              | Seite  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.3.0 Einleitung                                                                             | 3.3-1  |
| 3.3.1 Schutzaktionen und Leckspektrum                                                        | 3.3-1  |
| 3.3.2 Fehlerbaumanalysen                                                                     | 3.3-3  |
| 3.3.2.1 Druckmessung                                                                         | 3.3-3  |
| 3.3.2.2 Reaktorabschaltung                                                                   | 3.3-4  |
| 3.3.2.2.1 Reaktorschnellabschaltung                                                          | 3.3-8  |
| 3.3.2.2.2 Reaktorabschaltung mit Kleinabsorberkugeln<br>(KLAK)                               | 3.3-9  |
| 3.3.2.3 Abschalten der Hauptkühlgebläse                                                      | 3.3-10 |
| 3.3.2.4 Unterbrechung der Dampferzeuger-Bespeisung                                           | 3.3-11 |
| 3.3.2.5 Dampferzeugerentlastung                                                              | 3.3-17 |
| 3.3.2.5.1 Dampferzeugerentlastung über Hochdruck-<br>Umleitstation                           | 3.3-17 |
| 3.3.2.5.2 Dampferzeugerentlastung über Entlastungs-<br>regelventil des An- und Abfahrsystems | 3.3-18 |
| 3.3.2.6 Dampfseitige DE-Absperrung                                                           | 3.3-22 |
| 3.3.2.7 Frischdampf-Überdrucksicherung                                                       | 3.3-22 |
| 3.3.2.8 Identifizierung des defekten Dampferzeugers                                          | 3.3-24 |
| 3.3.2.9 Freischalten des intakten Dampferzeugers<br>für die NWA                              | 3.3-24 |
| 3.3.2.10 Isolieren des defekten Dampferzeugers                                               | 3.3-27 |
| 3.3.2.11 NWA mit dem An- und Abfahrssystem (AuAS)                                            | 3.3-29 |
| 3.3.2.12 Primärkreis-Überdrucksicherung                                                      | 3.3-40 |
| 3.3.2.12.1 Öffnen der Primärkreis-Sicherheitsventile                                         | 3.3-42 |
| 3.3.2.12.2 Schließen der Primärkreis-Sicherheitsventile                                      | 3.3-44 |
| 3.3.2.12.3 Öffnen des Gaslagers                                                              | 3.3-44 |
| 3.3.2.12.4 Entlastungspfad in die Umgebung öffnet                                            | 3.3-46 |
| Liste der Abbildungen                                                                        | 3.3-50 |
| Literatur                                                                                    | 3.3-51 |





### 3.3.0 Einleitung

Mit Wassereinbrüchen in das HTR-Core sind physikalisch-chemische Effekte wie Druckaufbau und Graphitoxidation verbunden, die zum einen zu einer höheren Spaltproduktaktivität im Kühlgas und zum anderen zur Öffnung des Primärkreislaufs über ansprechende Sicherheitsventile führen können.

#### 3.3.1 Schutzaktionen und Leckspektrum

Zur Begrenzung der Störfallfolgen sieht das Störfallbeherrschungskonzept folgende Aktionen vor:

Oberhalb einer bestimmten Feuchtekonzentration (1000-2000 ppmV) erfolgt eine Notgefahrenmeldung, die noch keine automatischen Schutzaktionen auslöst.

Ist das Dampferzeugerleck so klein, daß der Primärkreisdruck unterhalb 73 bar bleibt, entfallen die Anregung des Reaktorschutzsystems (RSS) und des DE-Aggregateschutzes und damit automatische Aktionen; statt dessen sieht das Betriebshandbuch vor, zunächst die Reduzierung der Reaktorleistung innerhalb von 25 min auf Mindestleistung (50 %) vorzunehmen und anschließend das Normalabfahren einzuleiten.

Durchläuft aber der Primärkreisdruck den genannten Grenzwert, werden folgende automatische Schutzaktionen ausgelöst:

- |     |      |                                                                                                                                                      |
|-----|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| t = | 0 s  | RESA durch Einfall der Absorberstäbe (24) im Seitenreflektor                                                                                         |
|     | 0 s  | Abschalten der Primärgebläse mit Abbremsen der Gebläsedrehzahl (in 20 s $m_G$ auf 0)                                                                 |
|     | 5 s  | Abschalten Hauptspeisewasserpumpen, Absperren Hauptspeisewasserstrang und - nach Konzeptänderung auch - der Speisewasser-Einzelstränge               |
|     | 25 s | Beginn des Absenkens des Frischdampfdrucks über HD-Umleitstation bzw. bei deren Ausfall über Entlastungsregelventil des An- und Abfahrsystems (AuAS) |

Die Druckabsenkung erfolgt geregelt nach einer vorgegebenen Druck-Zeit-Kurve.

- 120 s Frischdampfdruck erreicht 120 bar. Absperren der Frischdampf-Einzelstränge und - falls noch nicht erfolgt - der Frischdampf-Sammelleitung zur Turbine.
- x Identifizierung des defekten Dampferzeugerstranges
- (ca.170 s) über Messung des Differenzdrucks zwischen den beiden Strängen. Öffnen der Speisewasser- und Frischdampf- absperrrarmatur im intakten Strang des Dampferzeugers.
- y Start der Speisewasserpumpen des AuAS. Der Speisewaserdurchsatz wird auf 10 % des Normalbetriebsdurchsatzes eingestellt.
- y Öffnen der Reduzierstationen zum AuAS-Kondensator. Beginn des Absenkens des Frischdampfdrucks auf 80 bar.
- y+100 s Hochfahren der Primärgasgebläse auf vorgegebene Drehzahl ( $V = \text{Konst.}$ ). Die Drehzahl ist so gewählt, daß unter den Bedingungen des Normalbetriebes bei zwei laufenden Gebläsen ein Durchsatz von 10 % des Normalbetriebswertes erreicht wird. Bei einem laufenden Gebläse reduziert sich der Durchsatz nochmals um 30 % auf 7 % des Normalbetriebswertes.
- y+600 s Frischdampfdruck erreicht 80 bar.

Im folgenden werden nun die einzelnen Schutzaktionen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit mit Hilfe von Fehlerbaumanalysen beurteilt, anschließend zu für das Risiko dominierenden Ereigniskombinationen verknüpft und dann deren Häufigkeiten ermittelt.

Kleine Leckagen, die nicht zu automatischen Schutzaktionen führen, werden wegen ihrer erkennbar geringen Bedeutung hier nicht weiter behandelt. (s. Kap. III.2.1)

Die Einteilung des möglichen Leckspektrums erfolgt analog zu Analysen anderer Konzepte, jedoch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Systemanforderungen und der vorliegenden Betriebserfahrungen in drei Klassen:

- Sehr kleine Lecks, die die automatischen Schutzaktionen nicht mehr gewährleisten.
- Kleine bis mittlere Lecks, die zu den automatischen Schutzaktionen führen, bis hin zum Bruch eines Heizrohres.
- Große Lecks bis zum Bruch von Rohrplattenanschlußzylindern (Speisewasser- und Frischdampfsammler)

Bei der Festlegung der Grenze zwischen den ersten beiden Kategorien wurde unterstellt, daß alle Leckgrößen, die das Reaktorschutzsystem zum Ansprechen bringen, auch einwandfrei automatisch lokalisiert werden können. Dies ist für Lecks im unteren Bereich der mittleren Kategorie bei der gewählten Methode des Druckvergleichs zwischen dem intakten und defekten Strang zwar fraglich, es wird jedoch erwartet, daß es andere Methoden gibt, die dies gewährleisten und kein grundsätzlich anderes Störfallverhalten der Anlage verursachen.

In Anlehnung an die in /3.3.1/ verwendeten Daten werden die Leckhäufigkeiten zu 0,13 pro Reaktor und Jahr für kleine,  $1 \text{ E-2}$  für mittlere und  $3 \text{ E-5}$  für große Lecks mit Unsicherheitsfaktoren (f) von 5, 12 und 30 angesetzt. Bei der Bestimmung der Leckhäufigkeit wurden die beiden Dampferzeugerstränge eines Reaktors aufgrund ihrer geringen Leistungsgröße als eine Einheit betrachtet.

### 3.3.2 Fehlerbaumanalysen

#### 3.3.2.1 Druckmessung

Zur Erkennung von Wassereinbrüchen und Auslösung der Schutzaktionen steht neben dem Kriterium 'Primärkreisdruck  $\geq 73 \text{ bar}$ ' kein weiteres diversitäres Anregekriterium zur Verfügung. Wie in solchen Fällen üblich, wird daher die redundant aufgebaute Druckmeßkanalgruppe doppelt ausgeführt.

Die beiden Druckmeßkanalgruppen sind jeweils vierfach redundant; die Ausgangssignale jeder Gruppe werden vom Reaktorschutzsystem und DE-Aggregateschutz nach einem '2v4' Auswahlverfahren ausgewertet.

Zu jedem Maßkanal gehört ein Grenzwertmelder, der das Analogsignal in ein gepulstes verwandelt und an die RSS-Logik weitergibt.

Das Schutzsystem löst, wenn mindestens 2 der 4 Meßkanäle einer Gruppe das Erreichen des Grenzwertes signalisieren, die Reaktorschnellabschaltung aus. Die Druckentlastung des Dampferzeugers sowie die Anforderung des An- und Abfahrsystems werden bei Erreichen des Grenzwertes über den DE-Aggregateschutz ausgelöst. Die Auswertung des in Abb. 3.3-1 dargestellten Fehlerbaums ergab eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $4,3 \cdot 10^{-4}$  pro Anforderung (EW,  $f=4$ ). Bestimmend hierfür ist der Ausfall der Druckmeßfühler aufgrund von Common-Mode-Fehlern.

Die Zuverlässigkeitskenngrößen sind Kapitel 3.5 entnommen.

#### 3.3.2.2 Reaktorabschaltung

Für die Abschaltung des Reaktors sind zwei diversitäre Einrichtungen vorgesehen:

- 24 Absorberstäbe (16 ausschließlich zur Schnellabschaltung, 8 übernehmen außerdem Regelungsaufgaben), die in Bohrungen des Seitenreflektors einfallen (Abb. 3.3-2)
- 4 Behälter mit Absorberkugeln, die in die Nasen im Reaktorkern einfallen (Abb. 3.3-2)

Das Schnellabschaltsystem ist so ausgelegt, daß es den Reaktor beliebig lange heiß unterkritisch halten kann. Für die Beherrschung von Wassereinbruchstörfällen ist in der Heißabschaltbilanz derjenige Reaktivitätszuwachs berücksichtigt, der durch die Wirkung von 200 kg Wasser im Reaktorkern entsteht.

Ein Abkühlen des Reaktors auf beliebige Temperaturen ist bei Wassereinbruchstörfällen nur dann zweifelsfrei möglich, wenn zuvor das zweite Abschaltsystem (KLAKE-System) eingesetzt wird. Die vom Anlagenhersteller vorgesehene NWA-Prozedur macht eine Handauslösung des KLAKE-Systems etwa 30 Minuten nach dem NWA-Start erforderlich, wenn ein Wiederkritischwerden vermieden und der Kern schnell abgekühlt werden soll. Dieses Resultat der eigenen

thermodynamischen Rechnungen war der Anlaß, für die Analysen das Störfallbeherrschungskonzept in Abstimmung mit dem Hersteller entsprechend zu erweitern.

Das zweite Abschaltssystem ist in der Lage, den Reaktor beliebig lange kalt unterkritisch zu halten. Bei genügend schnellem Einsatz wirkt es als diversitäre Schnellabschaltung; dabei hängt der Einsatzpunkt vom Störfallablauf ab.

| Komponenten-<br>kennzeichnung | Lambda   P  | MITR<br>in h | Komp.art | Ti<br>in h | Ti0<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|-------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| ACMDM1                        | 7.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 4,00                             |
| APKGWG24                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM24                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG23                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM23                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG22                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM22                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG21                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM21                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG14                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM14                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG13                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM13                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG12                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM12                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |
| APKGWG11                      | 2.000E-08/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 168    | 3,00                             |
| APKDM11                       | 3.000E-07/h | 24,0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 3,00                             |

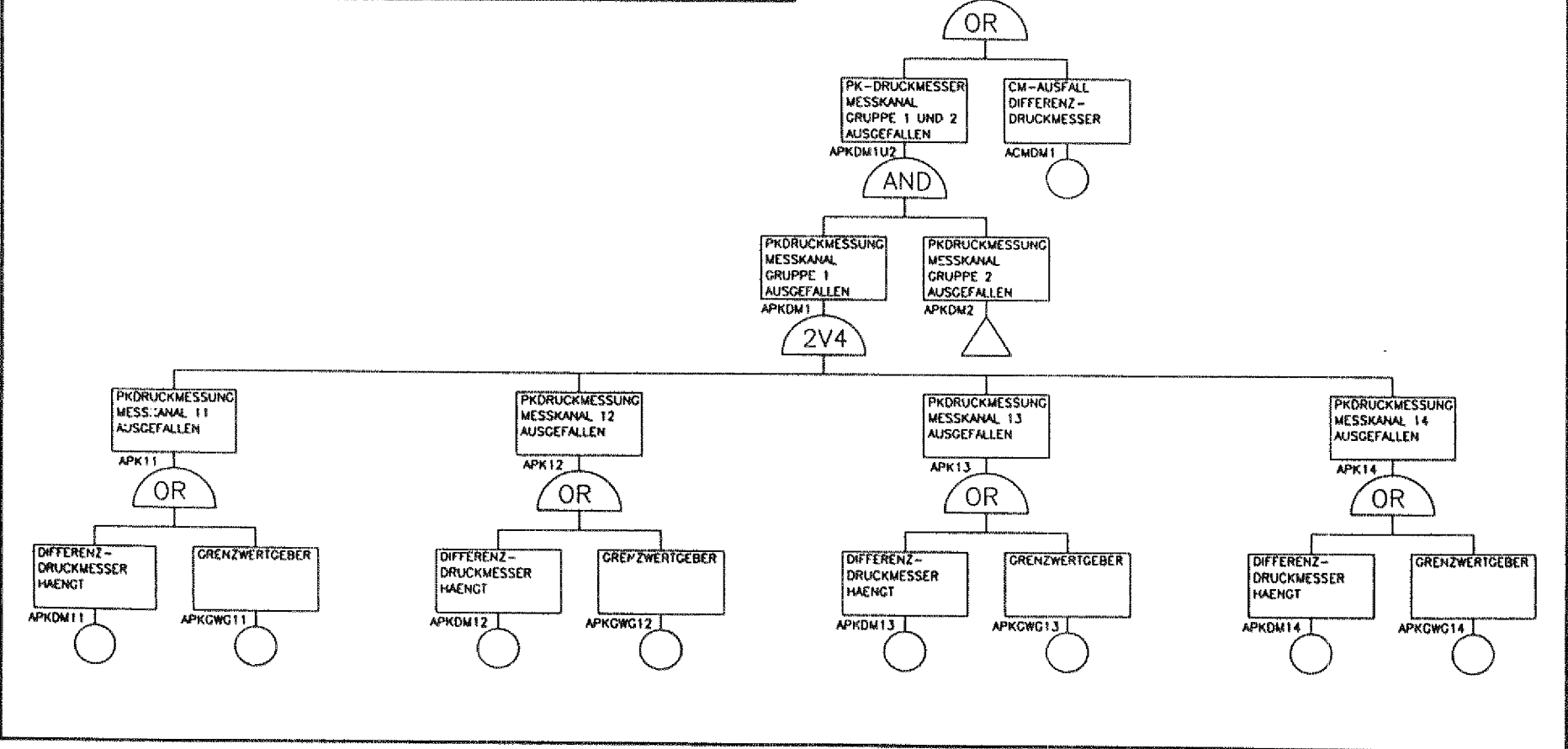


Abb. 3.3-1: Fehlerbaum 'Primärkreis-Druckmessung'

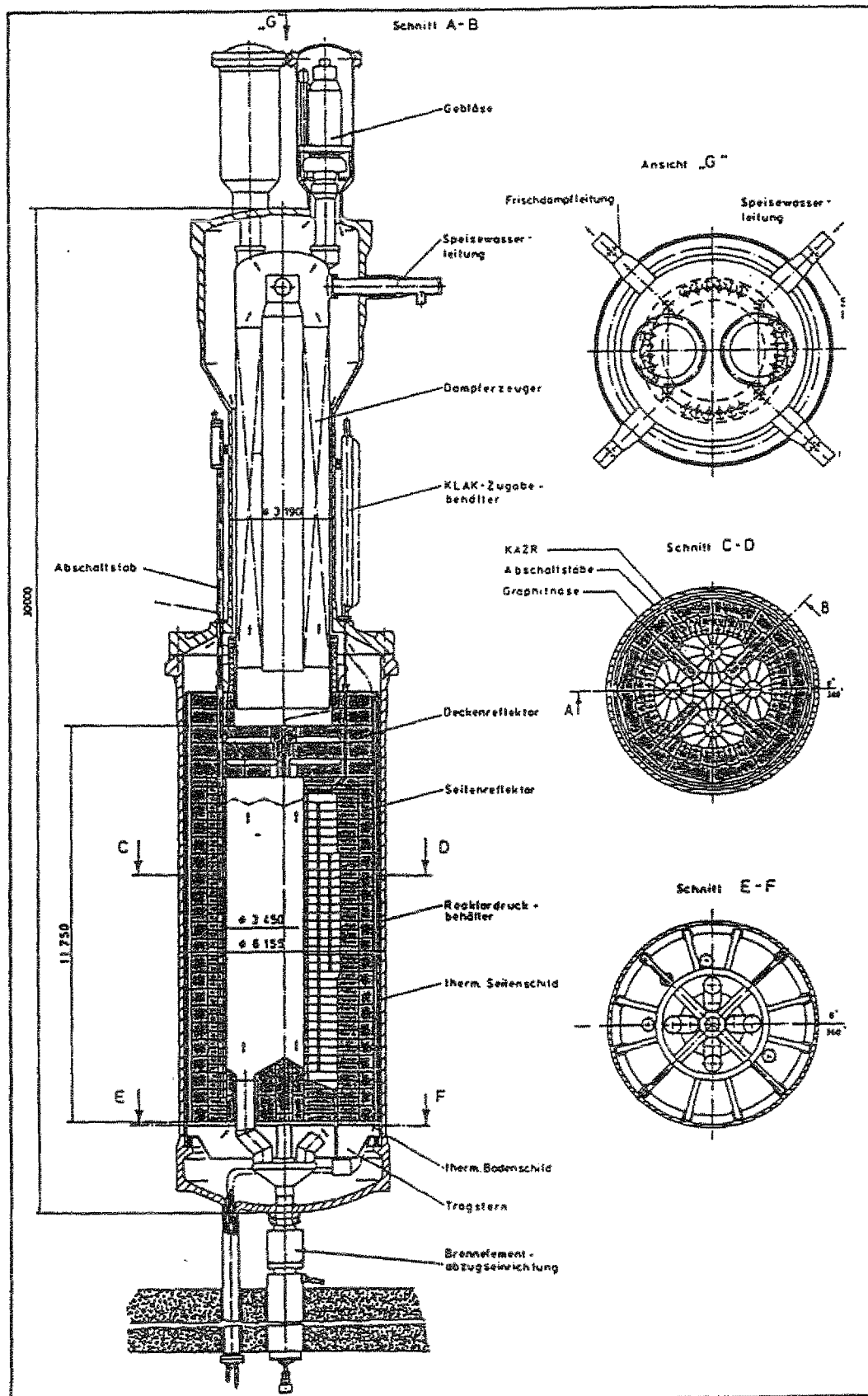


Abb. 3.3-2: Reaktordruckbehälter mit Einbauten

#### 3.3.2.2.1 Reaktorschnellabschaltung

Für die Schnellabschaltung des Reaktors stehen 24 Absorberstäbe, die in Bohrungen des Seitenreflektors einfallen, zur Verfügung (Abb. 3.3-2). Ihr Aufbau ist dem der THTR-Reflektorstäbe vergleichbar.

Die Schnellabschaltung erfolgt, wenn die obere Endstellungsverriegelung durch Unterbrechung der Energieversorgung (2 diversitäre Einrichtungen) aufgehoben wird und die Stäbe durch Schwerkraft einfallen.

Nach dem Abschalten aller Spannungsquellen bleibt der Motor über Kettenrad und Getriebe mit dem Stab verbunden und begrenzt somit die Fallgeschwindigkeit der Stäbe.

Zur Auslösung RESA sind Voraussetzung:

- richtige Meßwerterfassung
- Meßwertverarbeitung
- Grenzwertmeldung
- logische Verknüpfung
- Befehlsausgabe an die nachgeschaltete Steuerung der aktiven Sicherheitseinrichtung.

Sie werden zum Teil separat bewertet (Druckmessung) oder als funktionierend (Logikteil des RSS) unterstellt. Bei der Bestimmung der Unverfügbarkeit der RESA wird somit nur das Versagen der Abschlußrelais und das Versagen der Mechanik betrachtet.

Für das Nichtöffnen der Relais wird bei Berücksichtigung von common mode failures eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $1,2 \text{ E-6/Anf.}$  (Median,  $f=4,5$ ) angesetzt. Dieser Wert mußte den Analysen zur 'Deutschen Risikostudie Phase A' entnommen werden /3.3-2/.

Da für das mechanische Versagen des Systems keine Zuverlässigkeitskenngrößen vorliegen, wird konservativ der in /3.3-2/ für Stabversagen verwendete Wert von  $1,4 \text{ E-7/h}$  (Median,  $f=4$ ) angesetzt.



Bei einem Common-Mode-Anteil von 1% ergibt sich für das Versagen der Mechanik ein Wert von  $8,7 \text{ E-6/Anf.}$ . Da eine RESA/Jahr unterstellt wird, wurde ein Testintervall von 8736 h angenommen.

Die beiden Anteile, Abschlußrelais und Verfahrenstechnik ergeben somit eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $1,4 \text{ E-5}$  (EW,  $f=3,5$ ) für das 1. Abschaltssystem des HTR-100 pro Anforderung.

#### 3.3.2.2.2 Reaktorabschaltung mit Kleinabsorberkugeln (KLAK)

Die 2. Abschalteinrichtung, das KLAK-System, wird manuell von der Warte aus angefordert. Aus vier Vorratsbehältern rieseln per Schwerkraft kleine Absorberkugeln in Hohlräume von vier Graphitnasen, die in das Core hineinragen (Abb. 3.3-2).

Zur Entleerung der Behälter sind zwei unabhängige Auslösemechanismen vorgesehen:

- a) Anheben des Auslösekegels
- b) Absenken des Auslöseringes

Der Antrieb für den Auslösekegel benötigt das aktive Eingreifen eines Steuermediums. Hierbei wird über ein pneumatisches Ventil Druckluft in die Hubkammer des KLAK-Auslösekegels geleitet, wodurch dieser vom Auslösering abhebt und dessen Öffnung freigibt. Im anderen Fall wird über ein zweites pneumatisches Ventil die Hubkammer des Auslöseringes entlastet; durch Schwerkraft sinkt der Ring und legt auf diese Weise seine Öffnung frei.

Für die Zuverlässigkeitsbeurteilung der 2. Abschalteinrichtung konnte aufgrund der begrenzten Unterlagen und Kenntnisse nur eine erste Abschätzung vorgenommen werden. Fehlende Detailinformationen wurden durch konservative Annahmen ergänzt. So wurden bei den vermutlich gleichartig aufgebauten pneumatischen Ventilen Fehler aus gemeinsamer Ursache, speziell im Bereich der Magnetventilsteuerung unterstellt, die gleichzeitig beide Auslösemechanismen der vier KLAK-Behälter lahmlegen können. Allerdings sind die verfahrens- und leittechnischen Einrichtungen bei einem

kurzfristig vom Operateur zu aktivierenden System vernachlässigbar.

Wegen fehlender reaktor-physikalischer Rechnungen wurde der erforderliche Auslösezeitpunkt der 2. Abschalteinrichtung bei Wassereinbruchstörfällen und ausgebliebener Schnellabschaltung konservativ bis spätestens 5 min. nach Anforderung der Schnellabschaltung angenommen (s. Kap. 2.1).

Somit steht dem Operateur zur Erfassung der Störfallsituation und zur Entscheidungsfindung nur ein sehr kleines Zeitfenster zur Verfügung. Dies bestimmt die Zuverlässigkeit der 2. Abschalteinrichtung.

Eine erste Abschätzung ergab für das Ausbleiben der Hansauslösung eine Wahrscheinlichkeit von etwa 0,1; bei 30 min. an verfügbarer Zeit verbessert sich dieser Wert auf mindestens  $1 \text{ E-}2$  pro Anforderung. Bei einer notwendigen schnellen Handauslösung stellt die 2. Abschalteinrichtung somit nur eine sehr begrenzte Alternative zum Schnellabschaltsystem dar.

Die Bewertung der 2. Abschalteinrichtung im Detail war wegen eines unvorhergesehenen Personalengpasses nicht möglich.

#### 3.3.2.3 Abschalten der Hauptkühlgasgebläse

Bei Übergang vom Leistungs- in den NWA-Betrieb müssen die Hauptkühlgasgebläse vorübergehend abgeschaltet werden, um während der Entlastung des Dampferzeugers eine zu starke Beheizung zu vermeiden. Gelingt dies nicht, sind unerwünscht hohe Temperaturbelastungen von Dampferzeuger und Druckbehälter die Folge.

Wir unterstellen, daß der Abschaltbefehl für die Hauptkühlgasgebläse sowohl die Gebläse-Leistungsschalter auslöst als auch den Drehzahl Sollwert der Frequenzumformer auf Null setzt, womit zwei redundante und diversitäre Komponenten für die Abschaltung zur Verfügung stehen.

Die Leistungsschalter werden jährlich getestet. Die Sollwertverstellung der Kühlgasgebläse wird bei allen Lastwechselvorgängen getestet. Wegen fehlender Informationen wurde der Abstand zwischen Lastwechseln zu 4 Wochen angesetzt.

Für die Leistungsschalter wurde eine Ausfallrate von  $\lambda = 8 \text{ E-6/h}$  (Median,  $f=4$ ), für die Frequenzumformer von  $3 \text{ E-6/h}$  (Median,  $f=10$ ) und für die Regelung/Ansteuerung von  $3 \text{ E-6/h}$  (Median,  $f=3$ ) berücksichtigt. Damit ergibt sich für einen Leistungsschalter pro Gebläse eine mittlere Nichtverfügbarkeit (Erwartungswert) von  $5 \text{ E-2}$  ( $f=4$ ), bei zwei Leistungsschaltern pro Gebläse (je einer vor und hinter dem Frequenzumformer) von  $6,6 \text{ E-3}$  ( $f=16$ ).

Der ungewollte Weiterlauf eines der beiden vorhandenen Gebläse ist demnach bei einem Leistungsschalter mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1 \text{ E-3}$  ( $f=27$ ) und bei zwei Leistungsschaltern von  $1 \text{ E-4}$  ( $f=60$ ) zu erwarten.

Diese Angaben sind dem Kap. 3.2.7.4, das auf Einzelheiten näher eingeht, entnommen.

#### 3.3.2.4 Unterbrechung der Dampferzeuger-Bespeisung

Bei Wassereinbruchstörfällen sieht das Beherrschungskonzept u.a. die Unterbrechung der DE-Bespeisung vor.

Die Unterbrechung der DE-Bespeisung war ursprünglich allein durch Abschaltung der beiden Speisewasserpumpen vorgesehen. Die hohe Wahrscheinlichkeit von etwa 0,1 pro Anforderung, daß eine der beiden Pumpen ungewollt weiterfördert (Leistungsschalter öffnet nicht;  $\lambda = 8 \text{ E-6/h}$ , Median,  $f=4$ ,  $T=8736 \text{ h}$ ) und zur Überspeisung und letztlich Beschädigung der FD-Sicherheitsventile - wenn die Dampferzeuger zur Leckortung austrittsseitig zugefahren werden - führt, veranlaßten den Hersteller anhand der Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen schrittweise das Auslegungskonzept zu verbessern.

Der erste Schritt sah vor, den auf der Druckseite jeder Speisewasserpumpe vorhandenen Absperrschieber (später durch Regelventil ersetzt) bei Störfalleintritt über das Reaktorschutzsystem anzusteuern und zu schließen (Abb. 3.3-5; Nr. 15,16). Diese Maßnahme führte zu einer Verbesserung von etwa einer Größenordnung.

Im nächsten Schritt wurde zusätzlich die Absperrung der Speisewasser-Sammelleitung durch Einbau eines Absperrventils (Abb. 3.3-5; Nr. 1) eingeplant.

Die Fehlerbaumanalyse lieferte für dieses verbesserte Konzept eine Wahrscheinlichkeit für die ungewollte DE-Bespeisung von  $1.1 \text{ E-3/A (EW, f=4,9)}$ .

Wegen der risikobestimmenden Bedeutung, die von der ungewollten DE-Bespeisung für die HTR-100-Anlage ausgeht, wurde das Auslegungskonzept letztlich nochmals optimiert.

Zunächst wurde das aus /3.3-3/ abgeleitete Speisewasser-Regelkonzept korrigiert. Bei Laständerungen erfolgt die Durchsatzregelung nunmehr über Regelventile hinter den SW-Pumpen. Sie ersetzen an dieser Stelle die Absperrschieber. Die Regelventile in den beiden DE-Strängen werden zur Angleichung der Frischdampf-temperatur und damit zur Feinabstimmung des SW-Durchsatzes herangezogen. Außerdem werden diese nun zur Unterbrechung der DE-Bespeisung ebenfalls geschlossen.

Sollten sie dabei in Geschlossenstellung versagen, reicht für die Wiederbespeisung der DE zum Zweck der NWA der Durchsatz über die parallel geschalteten Schwachlastregelventile, die dann von der Warte aus geöffnet werden müssen.

Bei der probabilistischen Bewertung dieses Absperrkonzeptes sind in der Beurteilung der Regelventile besondere Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Die Fehlerentdeckung an gesteuerten Regelventilen geschieht häufiger als bei anderen Armaturenarten über Grenzwertmeldung und Betriebsüberwachung aufgrund der Auswirkungen auf die Prozeßführungsgrößen. Die spezielle Betriebsweise, die ein ständiges Verfahren in Intervallen erfordert, läßt Störungen am Antrieb oder der Komponente relativ schnell über die Meldeanlage bzw. durch die Betriebsüberwachung erkennen /3.3-4/. Dem ist bei der Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Ventils Rechnung zu tragen.

Von den in /3.3-4/ betrachteten 200 Ventilschäden mit Auswirkung auf die Komponentenfunktion entfielen ca. 60 % auf die Ansteuerung, den elektrischen Antrieb und Abzweig. Dieser Anteil wird weitgehend bei jeder Ventilanforderung entdeckt.

Der restliche Anteil entfällt vor allem auf die Armatur selbst (20 %) und das Stelleinrichtungsgetriebe (18 %). Ein erheblicher Teil der auf diese Betriebsmittel entfallenden Schäden kann ebenfalls als quasi selbstmeldend angesehen werden, da lediglich 20 % der 200 Ventilschäden erst durch Prüfung (15 %) und Inspektion entdeckt wurden.

Von den 200 Ventilschäden entfällt die Hälfte auf die Gruppe der Ausfallarten 'öffnet-', 'schließt-' oder 'regelt nicht'; die andere Hälfte verteilt sich auf Ausfallarten wie Kennatendrift, Instabilität, innere und äußere Leckagen etc..

Für den Zweck dieser Arbeit wird angenommen, daß der Anteil der erst durch Prüfung und Inspektion entdeckten Schäden in beiden Gruppen gleich ist. Diese Annahme ist für die hier interessierende erste Gruppe wegen des überwiegend selbstmeldenden Charakters der Ausfallart 'regelt nicht' vermutlich konservativ.

Bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für das Schließ- bzw. Öffnungsversagen der Regelventile wird nun wie folgt vorgegangen.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit wird additiv aus den Anteilen quasi selbstmeldender Ausfälle (80 %) und erst durch Tests entdeckbare Ausfälle (20 %) ermittelt. Die Korrelation dieser Anteile mit den Erkennungszeiten ist beim zuletztgenannten einfach, da sie dem Testintervall - in unserem Fall ein Jahr - entspricht.

Für den Anteil quasi selbstmeldender Ausfälle ist die Zeitbestimmung schwieriger, da sie von der Anlagenfahrweise, der Störanfälligkeit, von Netzanforderungen und anderen Zwängen abhängt.

Für den Anteil quasi selbstmeldender Ausfälle wird ein Zeitintervall von 336 h (14 Tage) angesetzt. Als Basisausfallrate findet entsprechend Kapitel 3.5 eine Ausfallrate von  $1,5 \cdot 10^{-5}/h$  (Median,  $f=3$ ), die sowohl für die Ausfallart 'öffnet-',

'schließt-' als auch 'regelt nicht' gilt, Verwendung. Sie ist gemäß den obigen Anteilen aufzuteilen.

Daraus ergibt sich für das Öffnungs- bzw. Schließversagen der Regelventile hinter den Speisewasserpumpen und in den SW-Einzelsträngen der Dampferzeuger eine Wahrscheinlichkeit von  $1,9 \text{ E-2/Anf.}$  (EW,  $f=2,7$ ). Dem stünde eine unrealistisch hohe Ausfallwahrscheinlichkeit von  $8,2 \text{ E-2/Anf.}$  gegenüber, falls die Ausfallrate ausschließlich mit einem jährlichen Testintervall korreliert worden wäre.

Unter Zugrundelegung dieser Ausfallbeurteilung von Regelventilen ergibt die Auswertung des in Abb. 3.3-4 dargestellten Fehlerbaums eine Wahrscheinlichkeit für die ungewollte Weiterbespeisung eines der beiden Dampferzeugerstränge von  $2,7 \text{ E-5}$  (EW,  $f=15$ ).

Die Wahrscheinlichkeit, daß ein bestimmter Dampferzeugerstrang ungewollt weiterbespeist wird, beträgt  $1,3 \text{ E-5}$  ( $f=15$ ) und daß beide ungewollt weiterbespeist werden,  $8,7 \text{ E-7}$  ( $f=17,5$ ).

| Komponenten-<br>Kennzeichnung | Lambda   P  | MTTR<br>in h | Komp.art | Ti<br>in h | Ti0<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|-------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| CARV2+A                       | 3.400E-09/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 23.00                            |
| CARV1+A                       | 3.400E-09/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 23.00                            |
| CARV2+B                       | 3.400E-09/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 23.00                            |
| CARV1+B                       | 3.400E-09/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 23.00                            |
| LARVAB12                      | 2.200E-09/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 5.00                             |
| ADB CARVS                     | 3.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 1.00                             |
| ADBCARVF                      | 1.200E-05/h | 24.0         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBCBRVS                      | 3.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBCBRVF                      | 1.200E-05/h | 24.0         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBSRVIS                      | 3.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBSRVIF                      | 1.200E-05/h | 24.0         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBSRVIS                      | 3.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBSRVZF                      | 1.200E-05/h | 24.0         | getestet | 336.       | 0.          | 39     | 3.00                             |
| ADBSRV1                       | 1.400E-05/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 31     | 3.20                             |
| ADBP22AR                      | 7.000E-07/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 0      | 7.00                             |
| ADBEA2ON                      | 8.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |
| ADBCPTAB                      | 7.000E-07/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 0      | 3.00                             |
| ADBEA1ON                      | 8.000E-06/h | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 125    | 4.00                             |

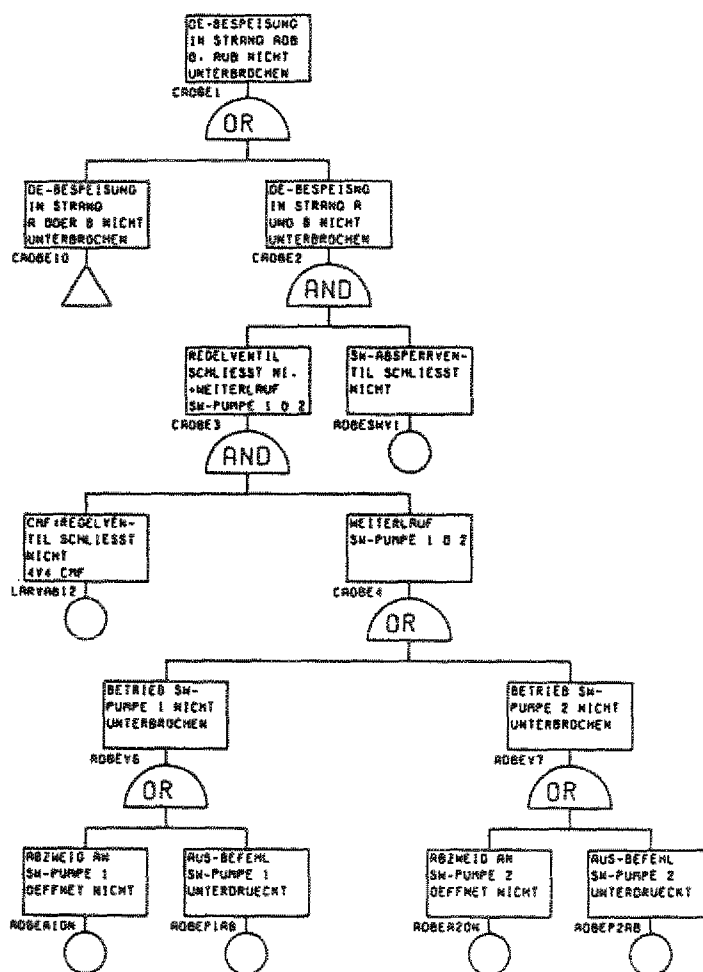


Abb. 3.3-4: Fehlerbaum 'Unterbrechung der DE-Bespeisung'



Abb. 3.3-4: Fortsetzung Fehlerbaum 'Unterbrechung der DE-Bespeisung'



### 3.3.2.5 Dampferzeugerentlastung

Die zur Störfallbeherrschung erforderliche Dampferzeugerentlastung kann bei Wassereinbruchstörfällen über zwei Wege erfolgen:

- 1) über die Hochdruck-Umleitstation (HDU) des Wasser-/Dampf-kreislaufs
- 2) über das Abblaseregelventil des An- und Abfahrsystems.

#### 3.3.2.5.1 Dampferzeugerentlastung über Hochdruck-Umleitstation

Das Erreichen des Grenzwertes 'Primärkreisdruck  $\geq 73$  bar' löst über den DE-Aggregateschutz die Unterbrechung der DE-Beheizung und Bespeisung aus sowie die Anregung der folgenden Prozeduren zur DE-Entlastung über die HDU (Abb. 3.3.-5):

- 1) Öffnen der Absperrarmatur (3) des betroffenen Sekundärkreislaufs vor der HDU,
- 2) Schließen der Absperrarmaturen (2) in der Frischdampfleitung zur HD-Turbine,
- 3) Öffnen der HDU (4),
- 4) Öffnen des Einspritzwasserregelventils (7).

Die Dampferzeugerentlastung erfolgt bei Wassereinbruchstörfällen in drei Stufen (120 s) bis auf 120 bar, um die anschließende Lokalisierung des defekten DE-Stranges sicher oberhalb des Primärkreisniveaus vornehmen zu können.

Der Entlastungsvorgang wird automatisch unterhalb 120 bar Frischdampfdruck durch Schließen der Absperrarmatur (10) in der FD-Sammelleitung für beide DE-Stränge beendet. Die vollständige Druckentlastung erfolgt erst bei Inbetriebnahme des AuAS über redundante Reduzierstationen im AuA-Kreislauf.

Die Auswertung des in Abb. 3.3-6 dargestellten Fehlerbaumes ergab eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 0,13 pro Anforderung (EW,  $f=2,1$ ) für die DE-Entlastung über die HDU. Für alle Komponenten wurde ein jährliches Testintervall angenommen; die Zuverlässigkeitskenngrößen sind Kap. 3.5 entnommen.

Die ursprüngliche Auslegung mit nur einem Absperrventil (2) in den Frischdampfsammelleitungen vor der Turbine (Abb. 3.3-5) ergab eine Ausfallwahrscheinlichkeit für die Dampferzeugerentlastung von 0,16/Anf.. Durch die Konzeptänderung wird demnach nur eine geringfügige Verbesserung erzielt.

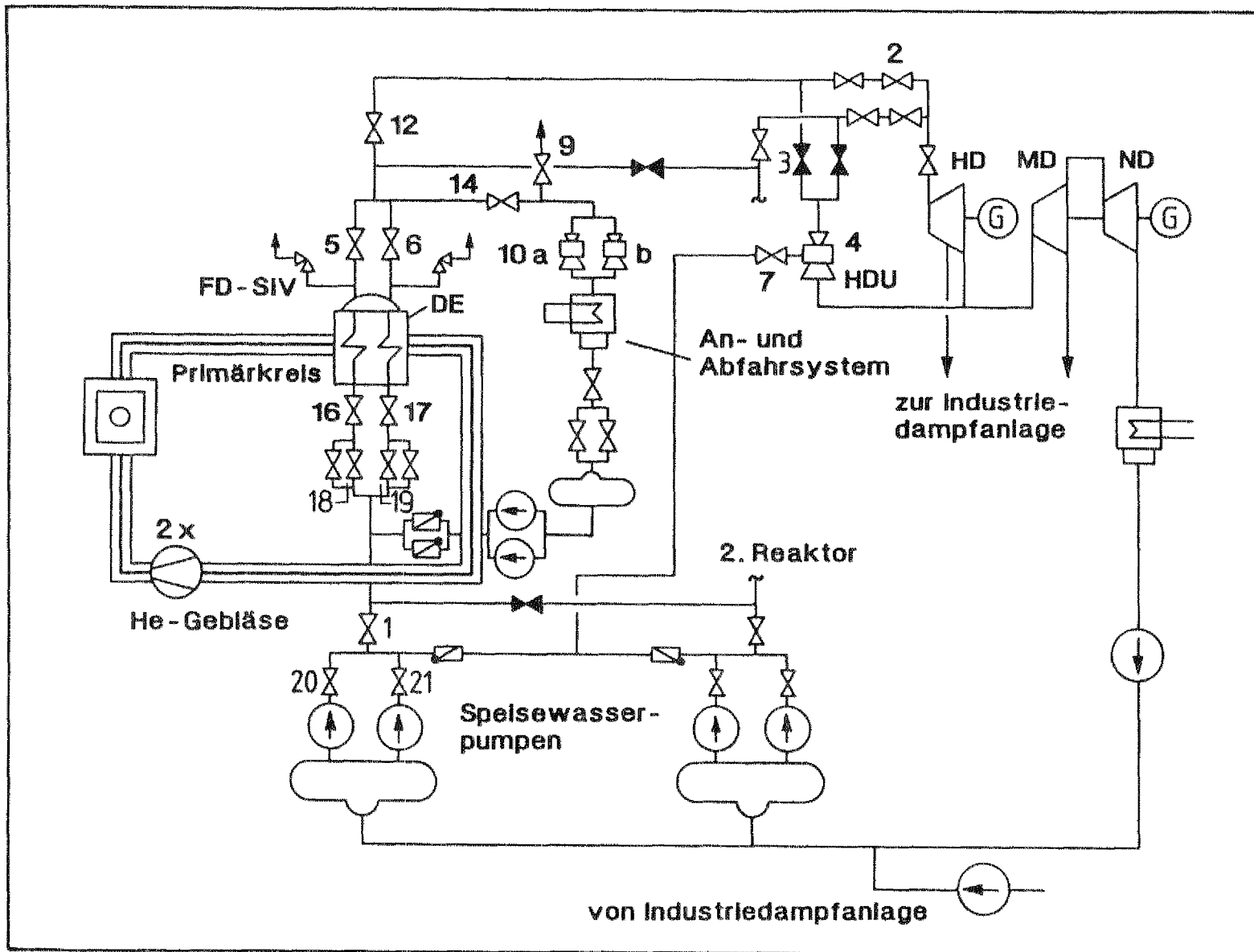
#### 3.3.2.5.2 Dampferzeugerentlastung über Entlastungsregelventil des An- und Abfahrsystems

Das Entlastungsregelventil (ERV) des An- und Abfahrsystems stellt u.a. bei Wassereinbruchstörfällen eine Redundanz zur HDU für die Dampferzeugerentlastung dar.

Das ERV (Abb. 3.3-5, Nr. 8) wird automatisch angefordert, falls der Frischdampfdruck innerhalb einer vorgegebenen Zeit  $t$  nach Störfalleintritt nicht auf das vorgegebene Druckniveau über die HDU abgebaut ist. Mit der Anforderung des ERV erhält die Absperrarmatur (10) in der FD-Leitung zur HDU den Schließbefehl und das ERV wie auch die vorgelagerte Absperrarmatur (14), die, abgesehen von Wiederholungsprüfungen oder Reparaturen, stets offen sein sollte, den Öffnungsbefehl.

Die Entlastung erfolgt geregelt innerhalb 2 min bis auf 120 bar. Im Gegensatz zur Entlastung über die HDU ist hier die Zugabe von Einspritzwasser zur Temperaturregelung des abströmenden Dampfes nicht vorgesehen, da dieser in die Umgebung abgeblasen wird. Die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall der DE-Entlastung über das ERV wird bestimmt durch das Ausfallverhalten des Ventils selbst. Berücksichtigt wurde sowohl das Nichtöffnen als auch das Nichtschließen nach Erreichen des vorgesehenen Druckniveaus. Im letzten Fall kommt es zwangsläufig zum Ausfall des AuAS durch den Wasserverlust über das offenbleibende Ventil. Somit ergibt die Auswertung des in Abb. 3.3-7 dargestellten Fehlerbaumes unter Berücksichtigung eines monatlichen Testintervalls eine Ausfallwahrscheinlichkeit für die Entlastung über das Entlastungsregelventil des AuAS von  $7,8 \text{ E-}3$ /Anforderung (EW,  $f=4,1$ ).

Die Wahrscheinlichkeit für das Öffnungsversagen wurde dabei zu  $5,3 \text{ E-}3$  (EW,  $f=4$ ) und für das Schließversagen zu  $2,9 \text{ E-}3$  (EW,  $f=3,6$ ) ermittelt.



3.3-19

Abb. 3.3-5: HTR-100 Kreislaufschema

| Komponenten-Kennzeichnung | Lambda   P    | MTTR<br>in h | Komp.art | Ti<br>in h | T10<br>in h | Gruppe | f95 der Log-<br>normalverteilung |
|---------------------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| DEIURN                    | 3.000E-06/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 55     | 4.00                             |
| ARF1                      | 7.000E-08/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 163    | 4.00                             |
| RF3                       | 7.000E-08/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 166    | 4.00                             |
| DEIV7RN                   | 7.500E-06/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 39     | 3.00                             |
| BDEIRIKB                  | 1.000E-02/Anf | 0.0          | Wahrsch. |            |             | 0      | 10.00                            |
| DEIV7ON                   | 1.300E-02/Anf | 0.0          | Wahrsch. |            |             | 47     | 4.00                             |
| ADEIV3ON                  | 1.300E-02/Anf | 0.0          | Wahrsch. |            |             | 47     | 4.00                             |
| DEIV2ON                   | 4.000E-03/Anf | 0.0          | Wahrsch. |            |             | 53     | 4.00                             |
| ADEIV22S                  | 8.000E-06/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 33     | 3.00                             |
| ADEIV21S                  | 8.000E-06/h   | 24.0         | getestet | 8736.      | 0.          | 33     | 3.00                             |

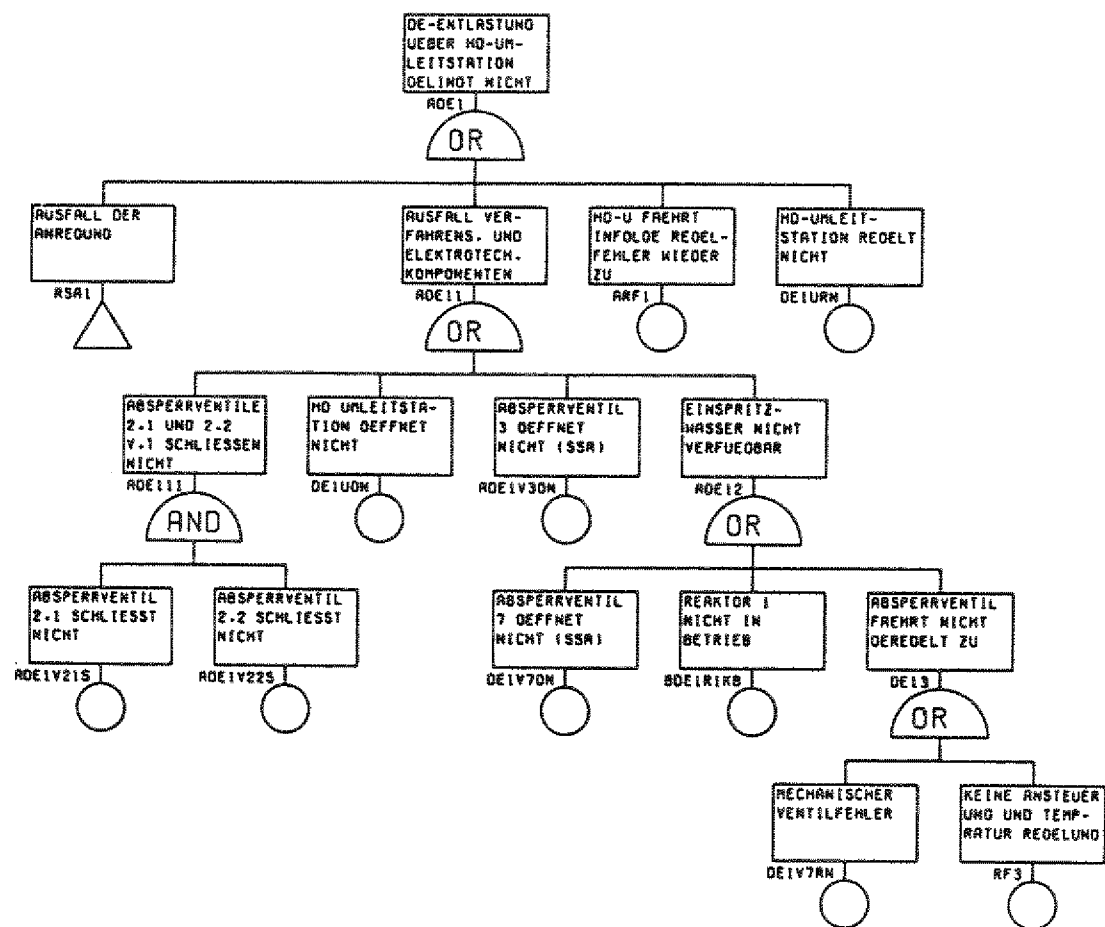


Abb. 3.3-6: Fehlerbaum 'DE-Entlastung über HD-Umleitstation'

| Komponenten-<br>Kennzeichnung | Lambda   P  | MTTR<br>in h | Komp. art | T <sub>I</sub><br>in h | T <sub>IO</sub><br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|-------------|--------------|-----------|------------------------|-------------------------|--------|----------------------------------|
| LCRF11                        | 7.000E-09/h | 24.0         | getestet  | 672.                   | 0.                      | 163    | 4.00                             |
| ADE20N                        | 1.000E-05/h | 24.0         | getestet  | 672.                   | 0.                      | 45     | 4.70                             |
| ADE25N                        | 5.000E-06/h | 24.0         | getestet  | 672.                   | 0.                      | 45     | 4.70                             |
| AFD2G                         | 5.000E-07/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 0      | 3.00                             |
| ACDM2                         | 7.000E-08/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 163    | 4.00                             |
| AFDGM3                        | 2.000E-08/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 168    | 3.00                             |
| AFDDM3                        | 3.000E-07/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 163    | 3.00                             |
| AFDGM2                        | 2.000E-08/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 168    | 3.00                             |
| AFDDM2                        | 3.000E-07/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 163    | 3.00                             |
| AFDGM1                        | 2.000E-08/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 168    | 3.00                             |
| AFDDM1                        | 3.000E-07/h | 24.0         | getestet  | 8736.                  | 0.                      | 163    | 3.00                             |
| LCDE220N                      | 2.000E-08/h | 24.0         | getestet  | 672.                   | 0.                      | 45     | 21.00                            |

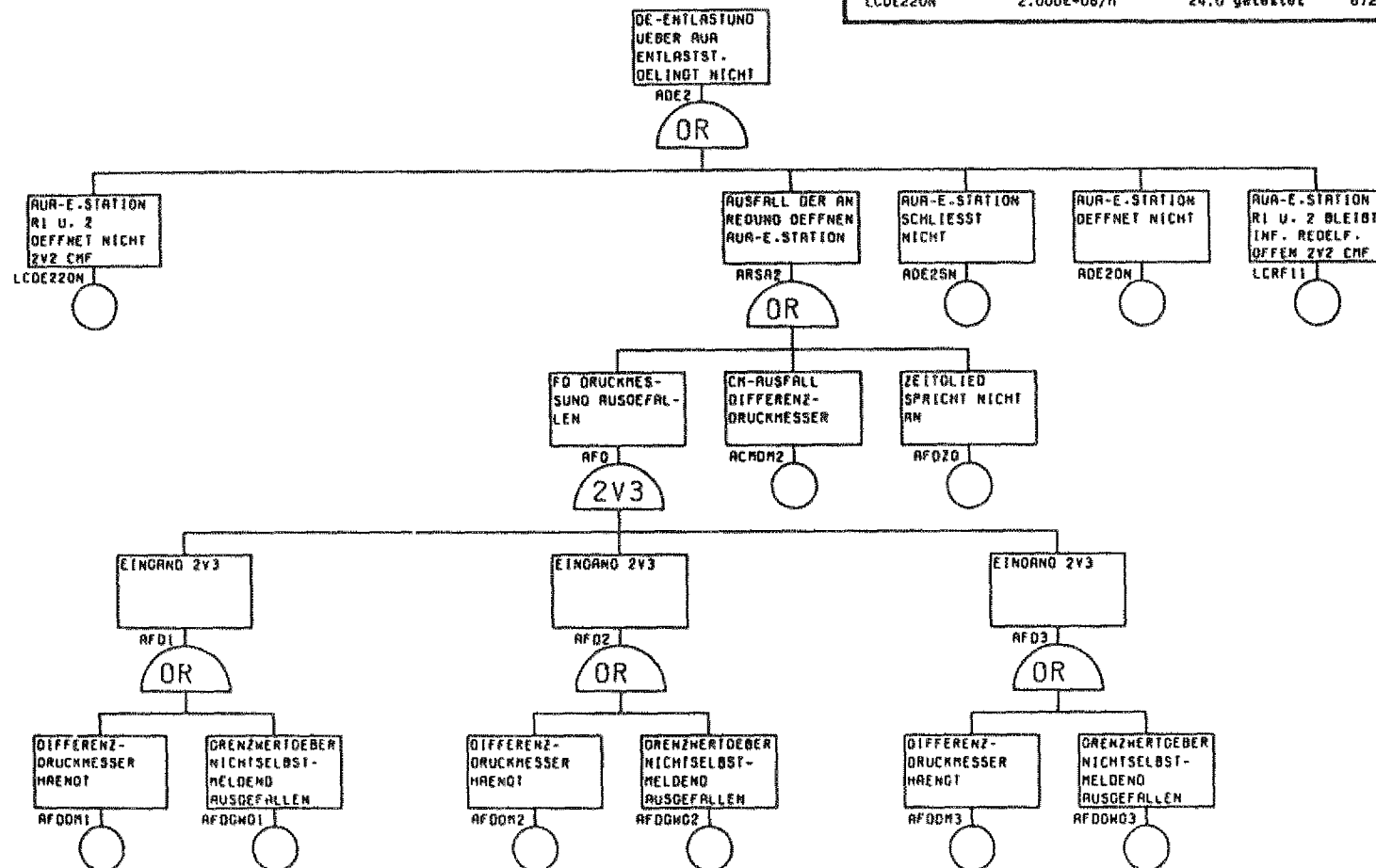


Abb. 3.3-7: Fehlerbaum 'DE-Entlastung über AuA-Entlastungsregelstation' (S.21b1)

### 3.3.2.6 Dampfseitige DE-Absperrung

Im Anschluß an die DE-Entlastung ist zur Identifizierung des defekten DE-Stranges die Absperrung der Austrittsseiten vorgesehen.

Die beiden DE-Stränge sind dampfseitig jeweils mit einem motorbetriebenen Absperrventil ausgestattet (Abb. 3.3-5; Ventil 5 und 6). Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sind diese zusätzlich mit Handantrieben versehen, mit deren Hilfe die Armaturen bei Ausfall des elektrischen Antriebes von Hand vor Ort notfalls noch verfahren werden können.

Diese Möglichkeit greift allerdings erst im Zeitbereich  $> 30$  min nach Störfallbeginn.

Ohne Berücksichtigung des Handantriebes ist das Nichtschließen der Motorarmatur bei jährlich angesetztem Funktionstest und einer Ausfallrate von  $8 \text{ E-}6/\text{h}$  (Median,  $f=3$ ) mit  $4,3 \text{ E-}2$  pro Anforderung zu erwarten.

Durch zusätzlichen Handantrieb läßt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit voraussichtlich nicht wesentlich reduzieren, wie eine Durchsicht von Ventilausfällen vermuten läßt /3.3-5/. Danach wären Ventilausfälle zweifelsfrei lediglich in 40 % der Fälle vermeidbar gewesen. Anhand dieser Abschätzung wurde das Nichtschließen der Armatur unter Einbeziehung des Handantriebes zu  $2,6 \text{ E-}2$  pro Anforderung (EW,  $f=3$ ) ermittelt.

### 3.3.2.7 Frischdampf-Überdrucksicherung

Jeder Strang des Doppel-Dampferzeugers verfügt austrittsseitig über ein FD-Sicherheitsventil (SiV), das vor der FD-Absperrarmatur an die Dampfleitung anbindet und über 'Dach' abbläst (Abb. 3.3-5).

Den Richtlinien des Dampfkesselbaus gemäß liegt der Ansprechdruck der SiV mit 220 bar unter dem Förderdruck der Speisewasserpumpen von 240 bar, so daß die maximale Fördermenge notfalls über die Sicherheitsventile abgeführt werden kann.

Bei ungehinderter Dampfabnahme liegt der Frischdampfdruck mit 190 bar dagegen deutlich unterhalb der Ansprechwerte der Sicherheitsventile.

In der hier vorliegenden Studie sind zwei Versagensarten der FD-Sicherheitsventile von Bedeutung:

- Zufallsbedingtes Schließversagen nach vorheriger Anforderung
- Kausales Versagen nach Beaufschlagung mit Wasser.

Für das zufällige Schließversagen eines gesteuerten FD-Sicherheitsventils mit mehr als einem Vorsteuerventil weist Kapitel 3.5 eine Wahrscheinlichkeit von  $2,3 \cdot 10^{-2}$ /Anf. (Median,  $f=4$ ) aus.

In den Konzeptunterlagen zum HTR-100 fehlen Angaben zur Ventilart; üblich ist der Einsatz von gesteuerten Vollhub-Sicherheitsventilen, auf die der zuvor genannte Wert zutrifft. Den Analysen liegt dieser Wert zugrunde.

Bei der hier interessierenden störfallbedingten Beaufschlagung solcher Ventile zunächst mit Dampf und bis zu 30 min. mit nur wenig erwärmtem Speisewasser (180°C) treten extreme Ventilbelastungen auf.

Im Jahre 1977 kam es im KKW Grundremmingen unter ähnlichen Belastungen zum Versagen mehrerer Sicherheitsventile. Betroffen waren dort federbelastete Ventile, die unter solchen Bedingungen zum 'Flattern' neigen. Gesteuerte Vollhub-Sicherheitsventile lassen ein günstigeres Verhalten vermuten, wie auch erste experimentelle Untersuchungen andeuten /3.3-10/. Allerdings ist im vorliegenden Fall eine extrem lange Beaufschlagung mit Wasser gegeben, so daß neben Wasserschlägen und möglichen Schwingungsbelastungen auch erhebliche Thermoschock-Belastungen zu erwarten sind, wobei in allen Fällen erhebliche Ventilschädigungen (Bruch, Abriß) auftreten können; auch ein Festfressen des Ventilkolbens oder aber größere Ventilleckagen sind denkbar.

Derartige Überspeisungsstörfälle sind selten, so daß Betriebserfahrungen keine belastbaren Aussagen zu Versagenshäufigkeiten von Ventilen unter diesen extremen Bedingungen liefern können. Es wird daher konservativ angenommen, daß bei extremen Bela-

stungen einer langandauernden Beaufschlagung mit Wasser ein kausaler Ventilschaden eintritt, der zum Verlust der Schließfunktion führt.

#### 3.3.2.8 Identifizierung des defekten Dampferzeugers

Die bei HTR-Konzepten bislang übliche Leckortung über Feuchtefühler ist hier wegen des räumlich gemeinsamen Aufbaus der beiden DE-Stränge nicht möglich. Statt dessen soll ein dampfseitiger Druckvergleich zur automatischen Ortung des defekten DE-Stranges herangezogen werden.

Da hinsichtlich der technischen Ausführung weitergehende Einzelheiten noch fehlen, wurden folgende für die Beurteilung erforderlichen Annahmen getroffen:

Jeder DE-Strang besitzt dampfseitig dreifach redundante Druckmeßkanäle, die nach einer 2-von-3-Auswahllogik verschaltet und deren Signale vom DE-Aggregateschutz verarbeitet werden.

Liegt nach Ablauf des Zeitgliedes ein Minstdifferenzdruck vor, bleibt derjenige DE-Strang, dessen Meßkanalgruppe den niedrigeren Druck diagnostizierte, weiter isoliert; der als intakt geltende Strang wird freigeschaltet (automatisch).

Bezüglich der leit- und verfahrenstechnischen Komponenten läßt sich die Zuverlässigkeit des Lokalisierungssystems unter den beschriebenen Randbedingungen hinreichend genau abschätzen. Die Auswertung des in Abb. 3.3-8 dargestellten Fehlerbaumes ergab eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $1,6 \cdot 10^{-3}/\text{Anf.}$  (EW,  $f=6,7$ ) für die Ortung des defekten DE-Stranges, bei Berücksichtigung monatlicher Funktionstests der Druckmeßgeräte.

#### 3.3.2.9 Freischalten des intakten Dampferzeugers für die NWA

Der vom DE-Aggregateschutz als intakt eingestufte DE-Strang wird zur NWA mit dem An- und Abfahrssystem herangezogen. Seine zuvor erfolgte Isolierung wird dazu automatisch wieder aufgehoben.



| Komponenten-<br>kennzeichnung | Lambda   P  | MTTR<br>in h  | Komp.art | T1<br>in h | T10<br>in h | Gruppe | F95 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|-------------|---------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| ALEKZ0                        | 5.000E-07/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 0      | 3.00                             |
| LAKDMK2                       | 7.000E-08/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 0      | 4.00                             |
| LAKDMK1                       | 7.000E-08/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.00                             |
| AKDMK23                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |
| AKDMK22                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |
| AKDMK21                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |
| AKDMK13                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |
| AKDMK12                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |
| AKDMK11                       | 1.600E-05/h | 24,0 getestet | 672.     | 0.         | 0.          | 161    | 4.70                             |

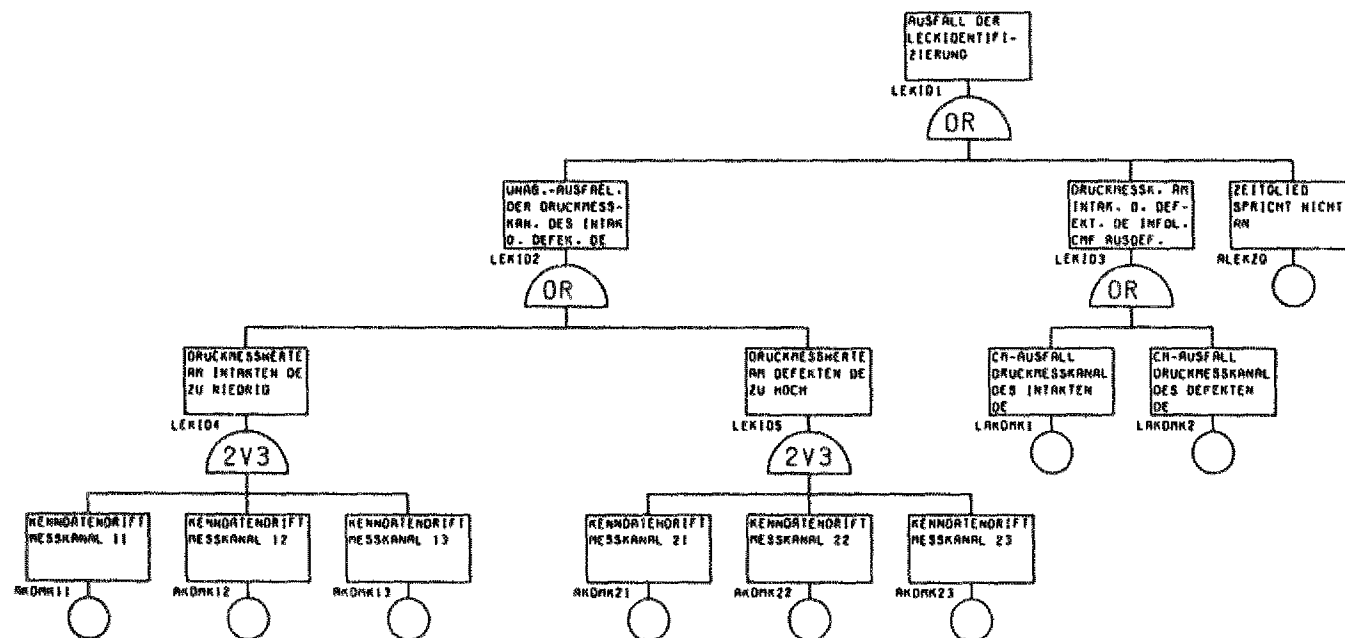


Abb. 3.3-8: Fehlerbaum 'Leckidentifizierung'

Gegenüber dem bisherigen Konzept ist neben dem dampfseitigen Absperrventil (5 oder 6, Abb. 3.3-5) nun auch das speisewasserseitige Regelventil 13 oder 14 - je nach betroffenem Strang - aufzufahren. Die Speisewasserseite kann dabei notfalls auch über das parallel angeordnete Schwachlast-Regelventil geöffnet werden.

Das dampfseitige Absperrventil verfügt, wie bereits in Kap. 3.3.2.5 geschildert, neben dem E-Antrieb über einen Handantrieb, mit dem vor Ort die Armatur alternativ verfahren werden kann. In Anbetracht der gleichen Ausfallrate für das Öffnungs- bzw. Schließversagen wird die in Kap. 3.3.2.5 unter Einbezug des Handantriebes ermittelte Ausfallwahrscheinlichkeit von  $2,6 \text{ E-2/Anf. (EW, } f=3)$  übernommen, obwohl hier günstigere Bedingungen aufgrund der vorherigen Ventilanforderung vorliegen und einige Ausfallursachen hierdurch bereits abgedeckt sind. Ein Teil dieser Ursachen ist allerdings mit der durch den Einbezug des Handantriebes vorgenommenen Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit berücksichtigt. Darüber hinausgehende Beiträge lassen sich nur schwer quantifizieren.

Für die Speisewasserseite sind, wie bereits erwähnt, jeweils beide Regelventile zu betrachten.

Ausgehend von der gleichen Ausfallrate wird die in Kap. 3.3.2.4 ermittelte Wahrscheinlichkeit für das Schließversagen von  $1,9 \text{ E-2/Anf. (EW, } f=2,7)$  auch für das Öffnungsversagen angesetzt. Bei der Ermittlung dieses Wertes wurden, ausgehend von der speziellen Betriebsweise der Regelventile, die Ausfallursachen unterschiedlich gewichtet, so daß Antriebs- und Ansteuerungsfehler kaum zur Ausfallwahrscheinlichkeit beitrugen. Daher kann aus der vorherigen Ventilanforderung kaum ein weiterer Beitrag zur Reduzierung dieses Wertes abgeleitet werden.

Für das Schwachlast-Regelventil läßt sich, von einer Ausfallrate  $\lambda = 1,5 \text{ E-5/h (} f=3)$  ausgehend, eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $7,8 \text{ E-2/Anf. (EW)}$ , bei jährlich angesetztem Testintervall, angeben. Allerdings ist noch das Ausbleiben der Ventilanforderung durch den Operateur einzurechnen.

Hinsichtlich dieser Personalhandlung wird unterstellt, daß für die zeitige Aufnahme des NWA-Betriebes die Armatur spätestens nach 40 min aufgefahren sein muß. Die Wahrscheinlichkeit für das Ausbleiben der Personalhandlung wurde zu  $1 \text{ E-2/Anf. (EW, f=10)}$  abgeschätzt. Daraus ergibt sich für das Nichtöffnen dieses Ventils eine Wahrscheinlichkeit von  $8,8 \text{ E-2/Anf. (EW, f=2,9)}$ .

Neben dem Ausfall der Regelventile verhindert auch ein Öffnungsversagen der SW-seitig vorhandenen Rückschlagklappe die Wiederbespeisung des intakten DE-Stranges. Für das Öffnungsversagen der Rückschlagklappe wurde ausgehend von einer Ausfallrate von  $1,7 \text{ E-7/h (Median, f=3)}$ , eine Wahrscheinlichkeit von  $9,3 \text{ E-4/Anf. (EW)}$  berücksichtigt. Somit ergibt sich insgesamt eine Wahrscheinlichkeit von  $3,7 \text{ E-3/Anf. (EW, f=4,1)}$ , mit der der intakte DE-Strang speisewasserseitig isoliert bleibt.

Die Wahrscheinlichkeit, daß der intakte Strang aufgrund der Ventilausfälle auf der Speisewasser- oder Dampfseite nicht für die NWA verfügbar ist, errechnet sich aus dem Fehlerbaum in Abb. 3.3-9 zu  $2,9 \text{ E-2/Anf. (EW, f=2,6)}$ .

#### 3.3.2.10 Isolieren des defekten Dampferzeugers

Nach dem früheren Störfallbeherrschungskonzept erfolgte neben dem Freischalten des intakten Dampferzeugers gleichzeitig die Absperrung der noch offenen Speisewasserseite am defekten DE-Strang. Vom Schutzsystem wurde hierzu das motorgetriebene Absperrventil 11 bzw. 12 (Abb. 3.3-5) angesteuert. Die darüber hinaus vorhandenen motorbetriebenen Speisewasserregelventile konnten durch den Operateur als redundante Absperrmöglichkeit herangezogen werden.

Nach dem jetzigen Stand der Konzeptauslegung werden die beiden DE-Stränge speisewasserseitig bereits nach Erreichen des Störfallgrenzwertes automatisch mittels der Regelventile isoliert. Die als Redundanz vorhandene Absperrarmatur wird erst nach der Identifizierung des defekten DE-Stranges und dann nur an diesem gleichfalls automatisch zugefahren.

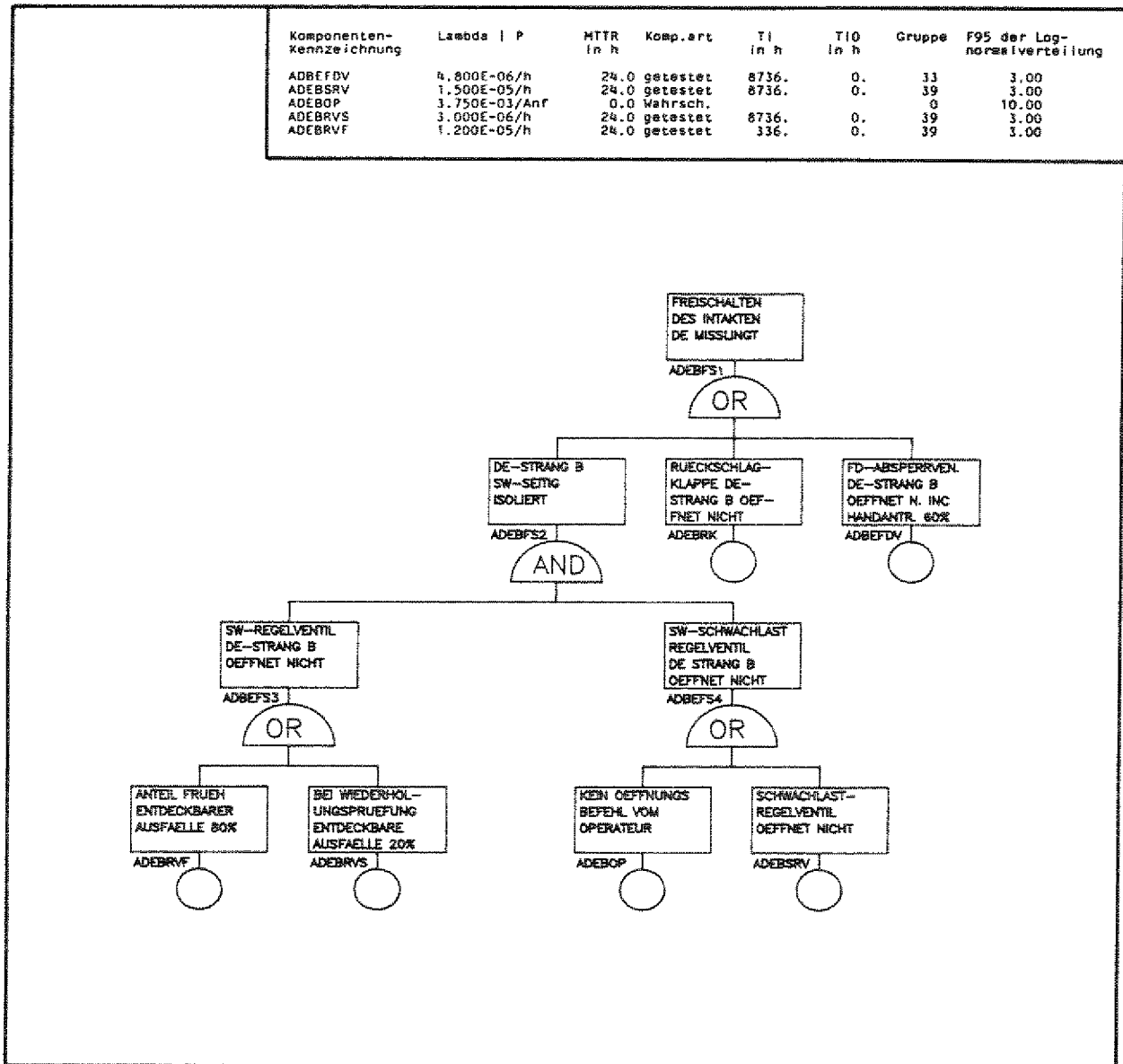


Abb. 3.3-9: Fehlerbaum 'Freischalten des intakten DE'

Die speisewasserseitige Isolierung des defekten Stranges ist somit erst dann ausgefallen, wenn sowohl die zu Beginn des Störfalles angeforderte Regelarmatur, als auch die nach der Leckdetektion angeforderte Absperrarmatur nicht schließen

Für die Armaturen der Speisewasserseite sind im Gegensatz zu denen der Dampfseite keine Handantriebe vorgesehen. Zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeiten wurden spezifische Ausfallraten für Speisewasserarmaturen verwendet, und zwar entsprechend der Datenliste (Kap. 3.5)  $1,4 \text{ E-5/h}$  (Median,  $f=3,2$ ) für Motor-Absperrventile und  $1,5 \text{ E-5/h}$  ( $f=3$ ) für Motor-Regelventile.

Die Ausfallwahrscheinlichkeit der Regelventile wurde in Kapitel 3.3.2.4 zu  $1,9 \text{ E-}2$  pro Anforderung (EW,  $f=2,7$ ) ermittelt. Dabei wurde die Ausfallrate lediglich zu 20 % mit dem jährlich angesetzten Testintervall korreliert; für die als Bereitschaftskomponenten einzustufenden Absperrventile dagegen zu 100 %. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ist hierfür mit  $7,5 \text{ E-}2/\text{Anf.}$  (EW,  $f=3,2$ ) entsprechend höher.

Die Verknüpfung beider Ventilausfälle ergibt somit eine Wahrscheinlichkeit von  $1,5 \text{ E-}3/\text{Anf.}$  (EW,  $f=4,6$ ) für das Ausbleiben der speisewasserseitigen Isolierung des defekten DE-Stranges.

#### 3.3.2.11 NWA mit dem An- und Abfahrssystem (AuAS)

Das Störfallbeherrschungskonzept sieht bei Wassereinbruchstorfällen die Abfuhr der Nachzerfallswärme über das An- und Abfahrssystem (Abb. 3.3-10) vor. Es wird nach Abschluß der DE-Entlastung über das Kriterium 'FD-Druck  $\leq 120 \text{ bar}$ ' automatisch vom DE-Aggregateschutz angefordert. Der entsprechende Schutzbefehl wird aber wegen der erforderlichen Maßnahmen zur Lokalisierung des defekten DE-Stranges über ein Zeitglied erst nach etwa 1 min wirksam.

Zunächst starten die beiden Speisewasserpumpen ( $2 \times 100 \%$ ), wobei der Durchsatz innerhalb von 10 s auf 10 % des Normalbetriebswertes hochgefahren und dann gehalten wird. Gleichzeitig werden auch die beiden Reduzierstationen ( $2 \times 100 \%$ ) zum AuAS-Kondensator geöffnet; hierüber erfolgt die weitere Druckentlastung des für die NWA ausgewählten DE-Stranges von 120 bar auf den Betriebsdruck des AuAS von 80 bar, die nach etwa 600 s abgeschlossen ist. Die hinter dem Kondensator in redundanten Leitungen zum AuA-Speisewasserbehälter befindlichen Niveauregelventile werden geöffnet und Absperrarmaturen einer internen Zirkulationsleitung geschlossen.

Die Primärgasgebläse werden erst 100 s nach Start der Speisewasserpumpen angefordert und in 10 s auf einen Durchsatz von 10 % des Normalbetriebswertes hochgefahren. Für die NWA ist der Betrieb der Gebläse allerdings nicht zwingend erforderlich, da sich primärseitig ein ausreichender Naturumlauf mit einem Durch-

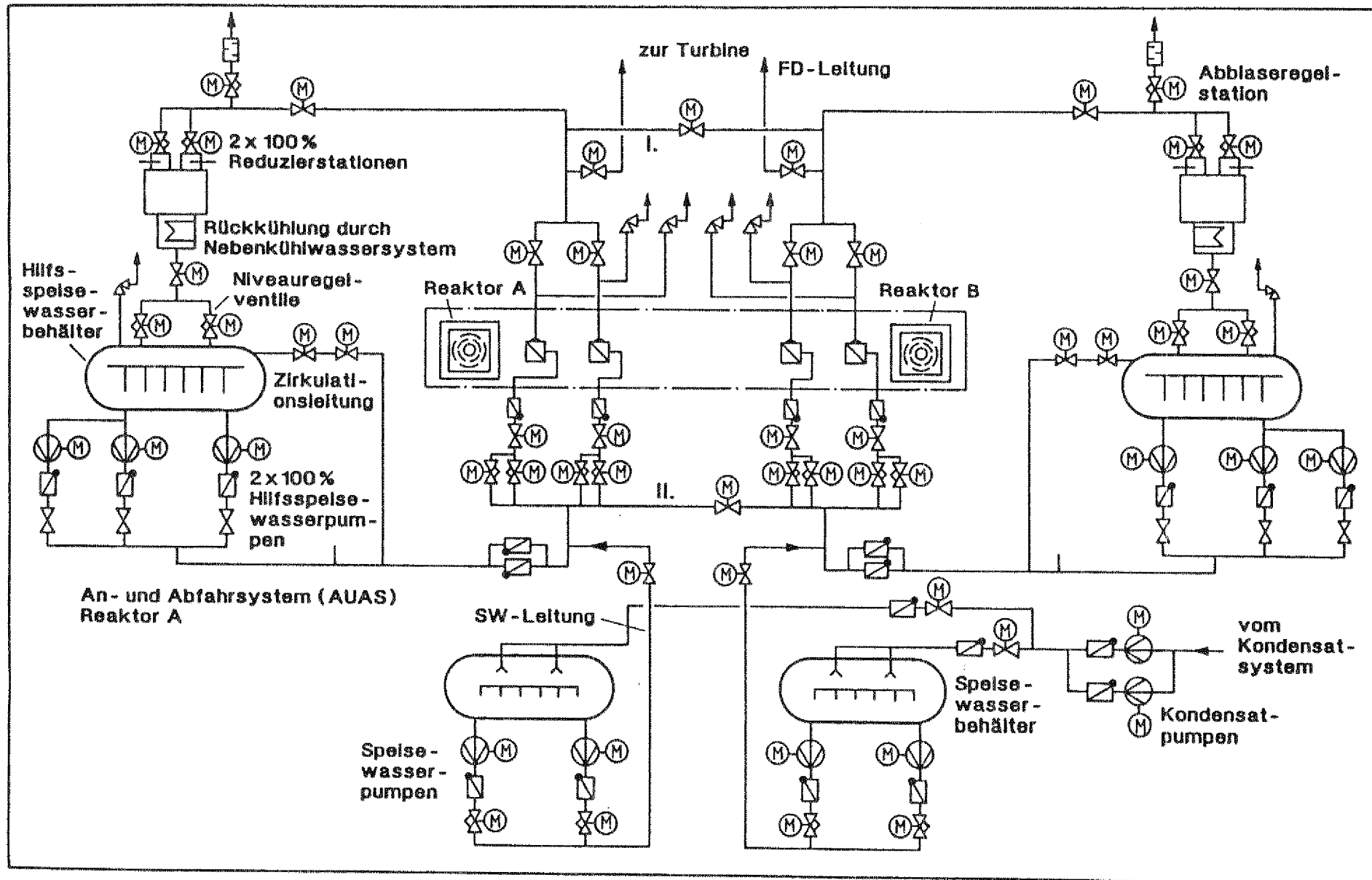


Abb. 3.3-10: An- und Abfahrssystem (AuAS) für die NWA

satz von 2-3 % des Normalbetriebswertes einstellt, wenn beide Gebläseklappen offen sind.

Mißlingt die Inbetriebnahme des AuAS, steht mit dem AuAS des zweiten Reaktors sekundärseitig eine Redundanz für die NWA zur Verfügung.

Hierzu müssen der zweite Reaktor abgefahren und jeweils eine Motorarmatur in den Verbindungsleitungen I. und II. der beiden An- und Abfahrssysteme geöffnet werden (Abb. 3.3-10). Danach kann die NWA für beide Reaktoren über ein AuAS erfolgen.

Die Auswertung des entsprechenden Fehlerbaums (Abb. 3.3-11) ergab eine Ausfallwahrscheinlichkeit für die NWA von  $3,1 \text{ E-4}$  pro Anforderung (EW,  $f=3,4$ ). Hierin nicht enthalten ist die sekundärseitige Entlastung des havarierten Reaktors; sie bedingt störfallspezifische Ereignisketten und macht daher eine getrennte Behandlung erforderlich. Aus dem gleichen Grund wurden auch die DE-Absperrarmaturen getrennt betrachtet.

Mit Berücksichtigung der DE-Entlastung erhöht sich der Wert um den Faktor 1,2 auf  $3,8 \text{ E-4/Anforderung}$ , wobei in 2 von 3 Fällen aufgrund gemeinsamer Ursachen auch die NWA im zweiten Reaktor nicht gelingt.

Die drei wahrscheinlichsten Ausfallursachen sind reaktorübergreifende 'common mode failure', und zwar der jeweils zweifach redundanten Speisewasserpumpen, Rückschlagklappen (der Einspeiseleitung) und Reduzierstationen in beiden An- und Abfahrssystemen. Sie tragen mit Anteilen von ca. 36 %, 23 % und 7 % zu 66 % zur Ausfallwahrscheinlichkeit bei.

Ausfallkombinationen beider AuAS-Speisewasserpumpen des defekten Reaktors liefern in Verbindung mit dem Mißlingen der Umschaltung auf das AuAS des anderen Reaktors insgesamt einen Beitrag von 3,9 %.

Der folgende Beitrag ist mit 2 % bereits um etwa die Hälfte geringer und beinhaltet den gemeinsamen Ausfall der beiden Nebenkühlwasser-Ventilatoren, gefolgt vom gemeinsamen Ausfall der AuAS-Niveauregelventile beider Reaktoren mit 1,3 %.

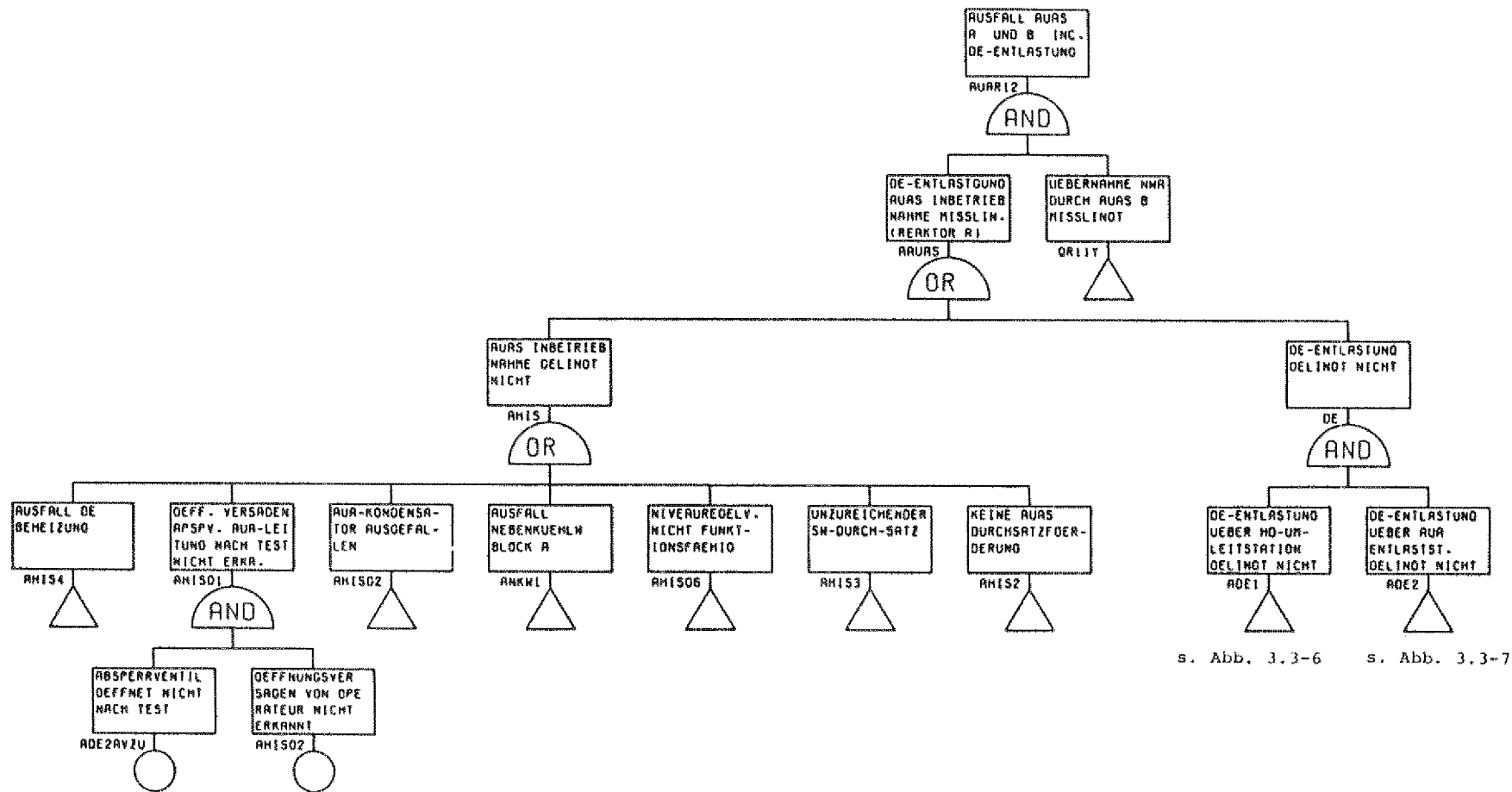
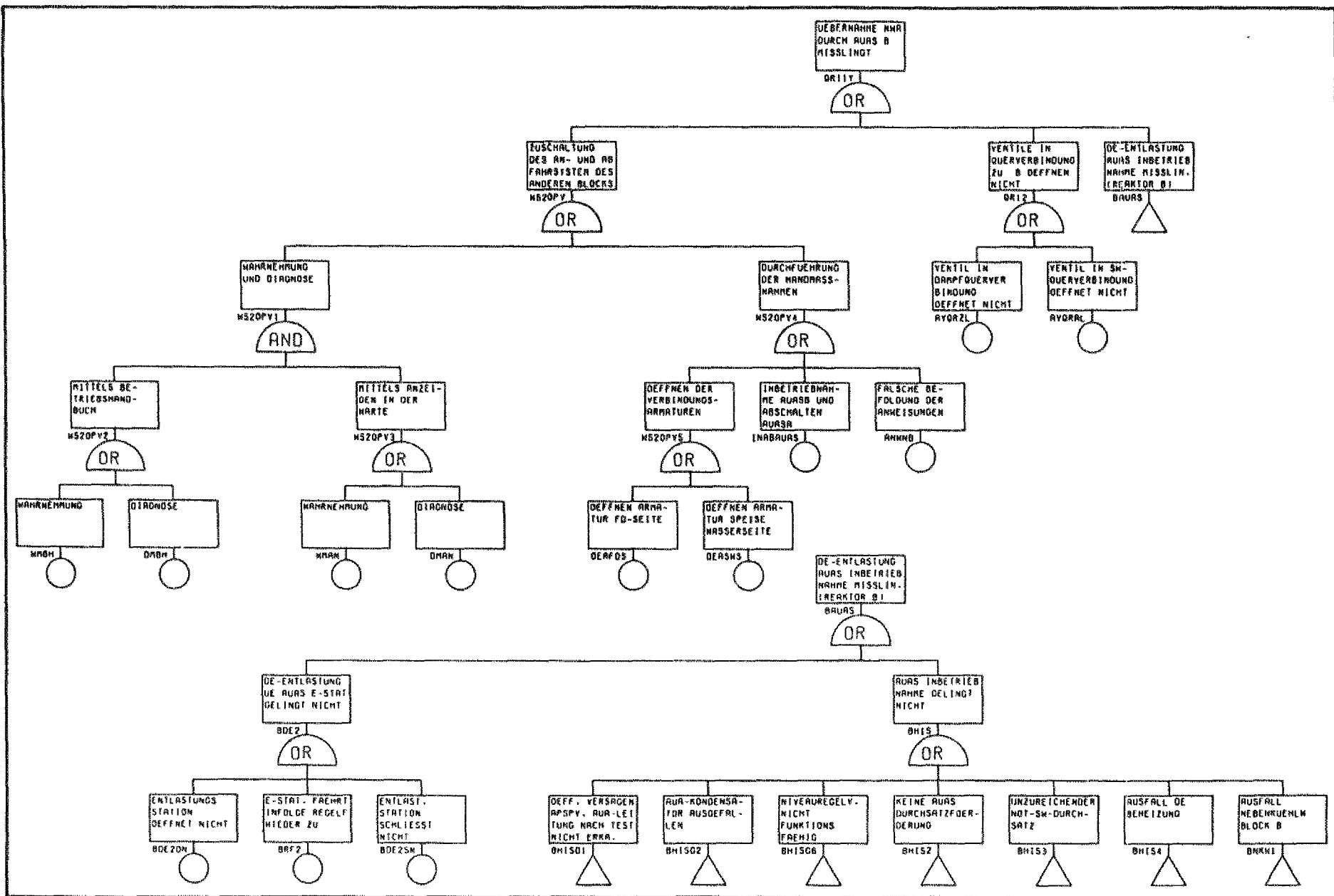


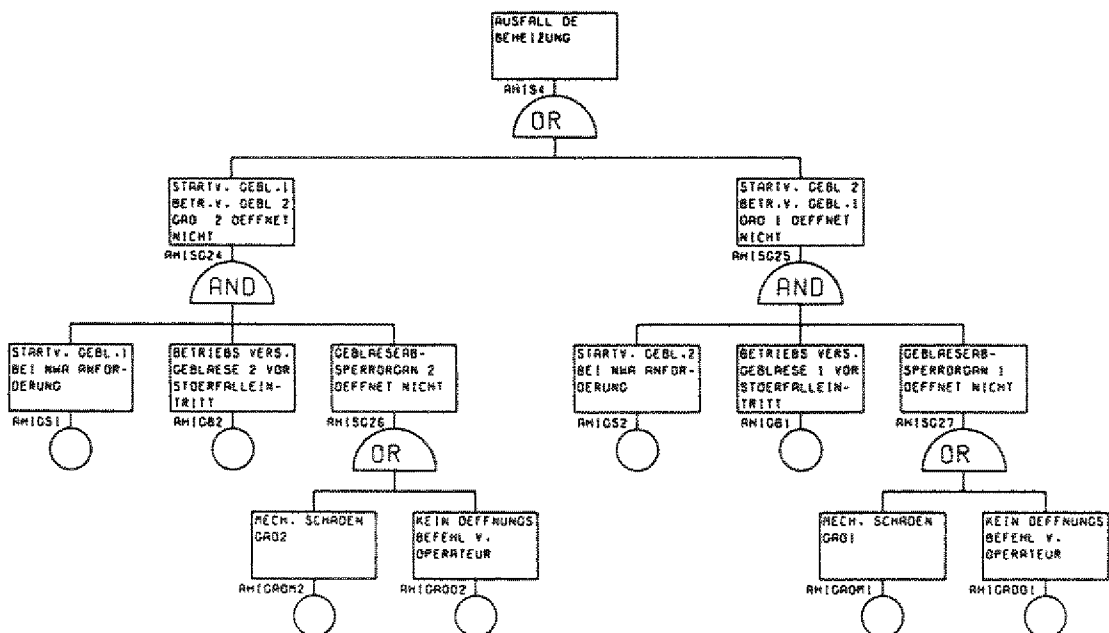
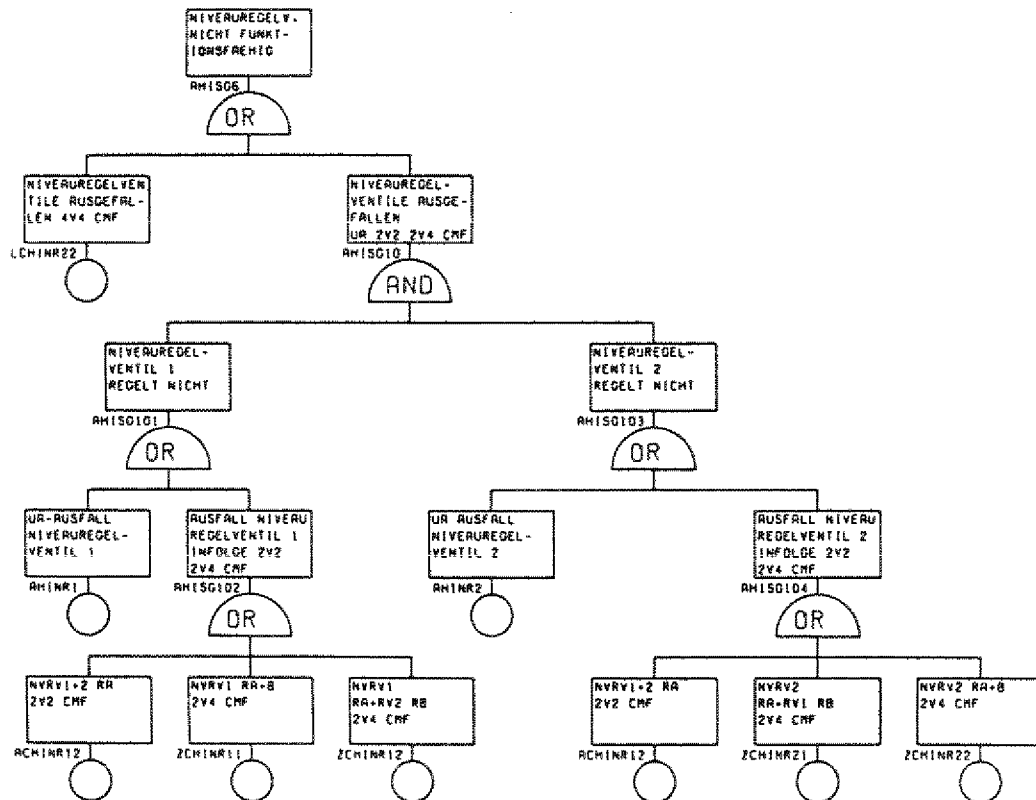
Abb. 3.3-11: Fehlerbaum 'NWA mit AuAS von Reaktor A oder B'



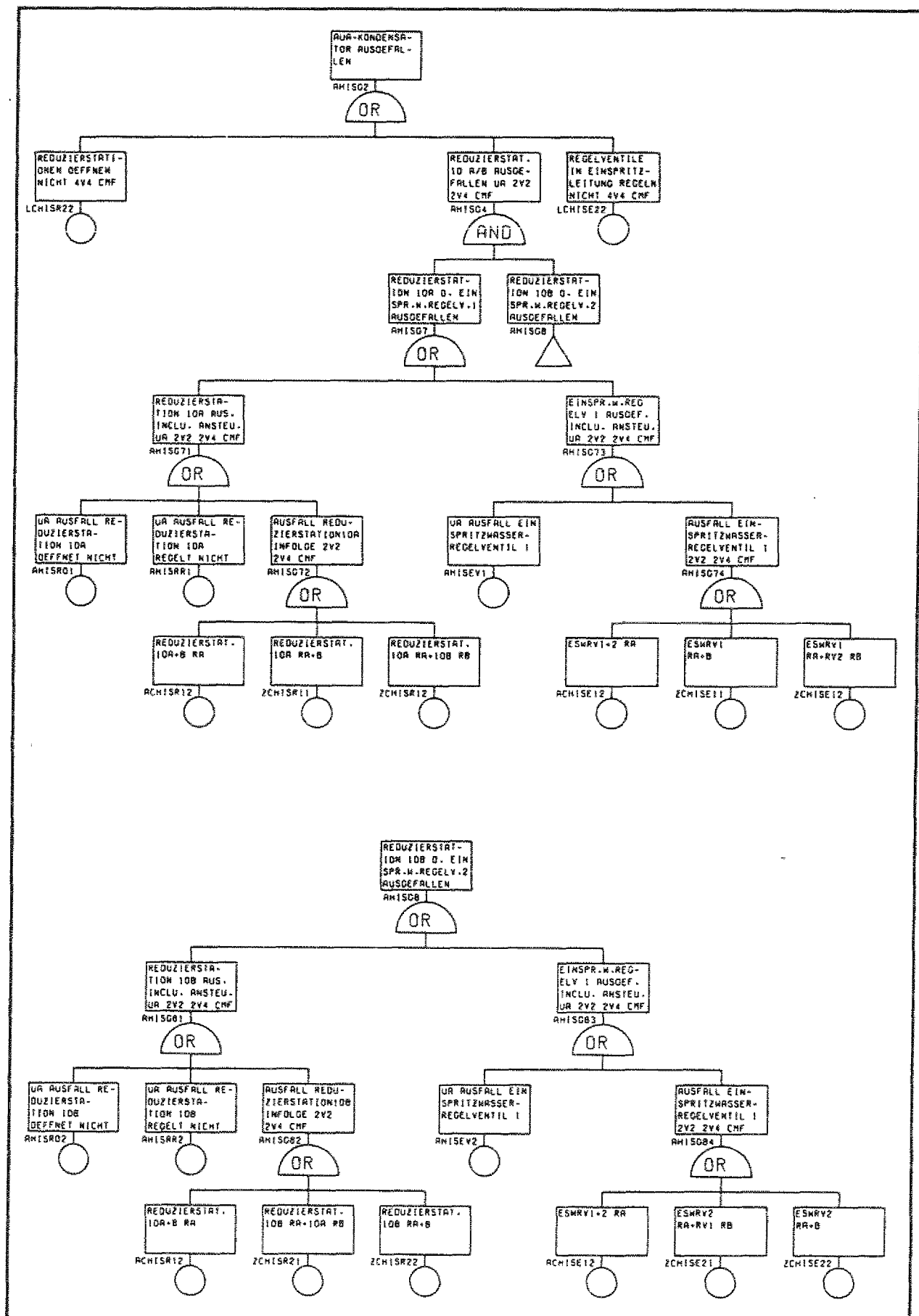


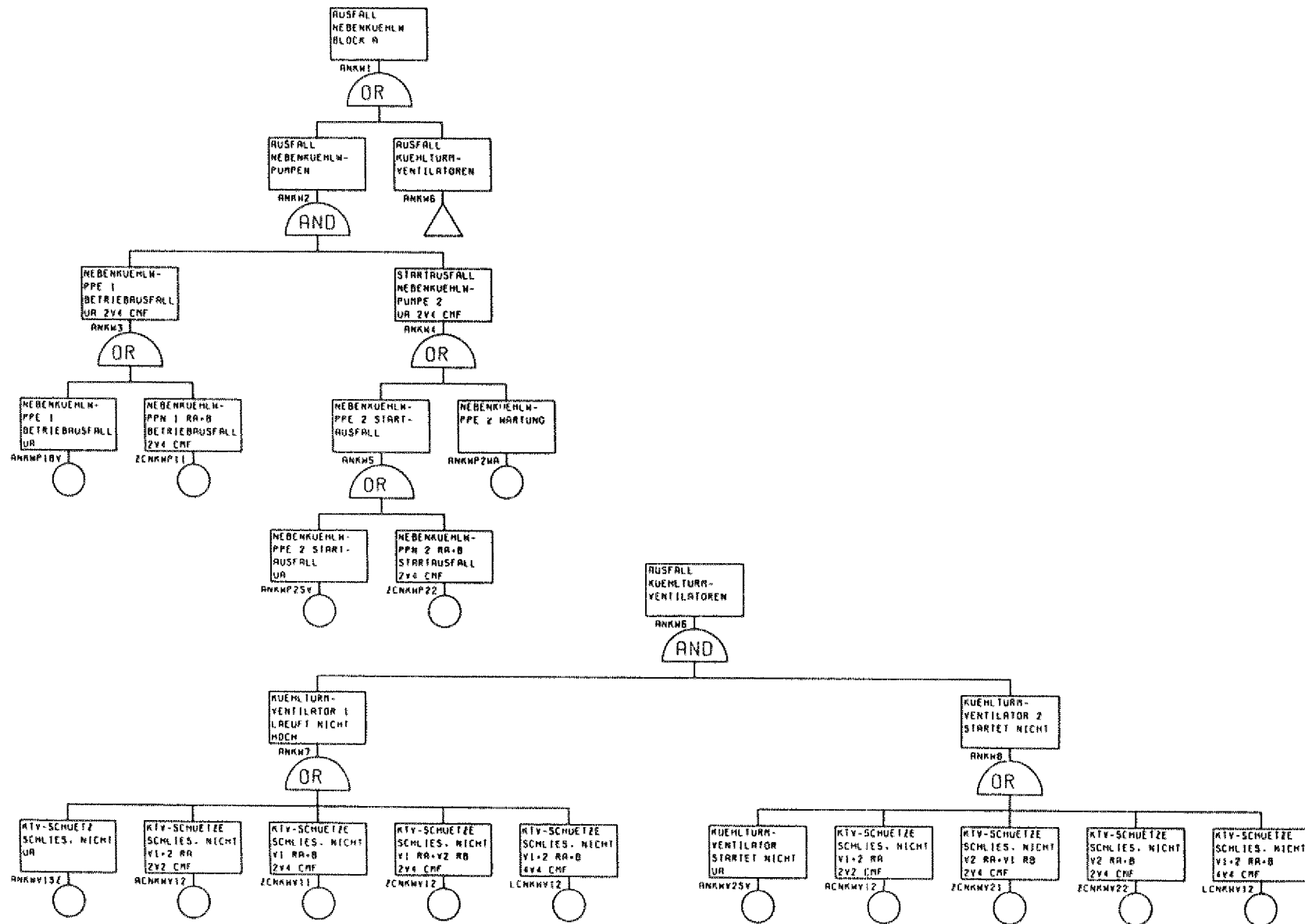
3.3-33

Fortsetzung Abb. 3.3-11 (a)

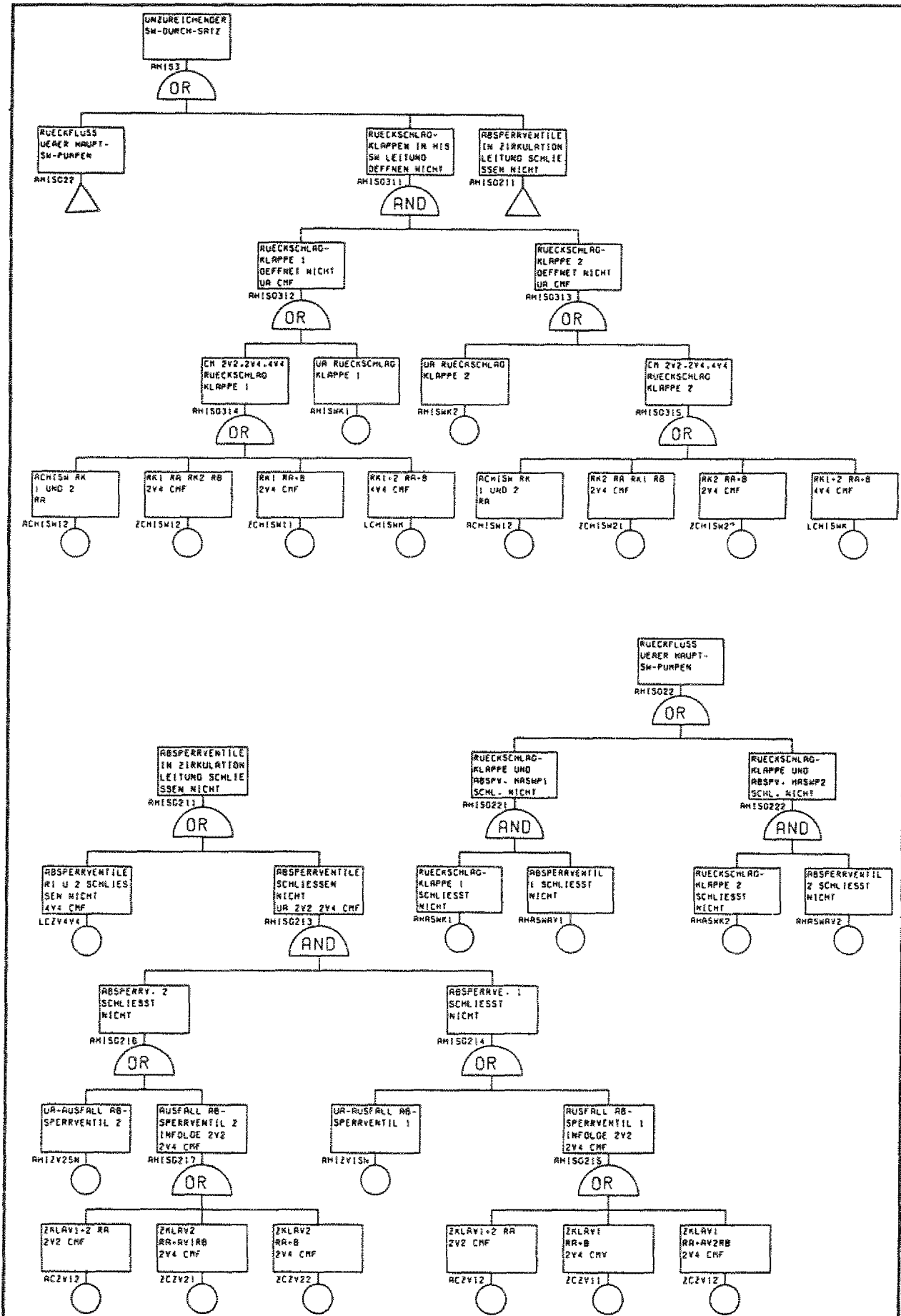


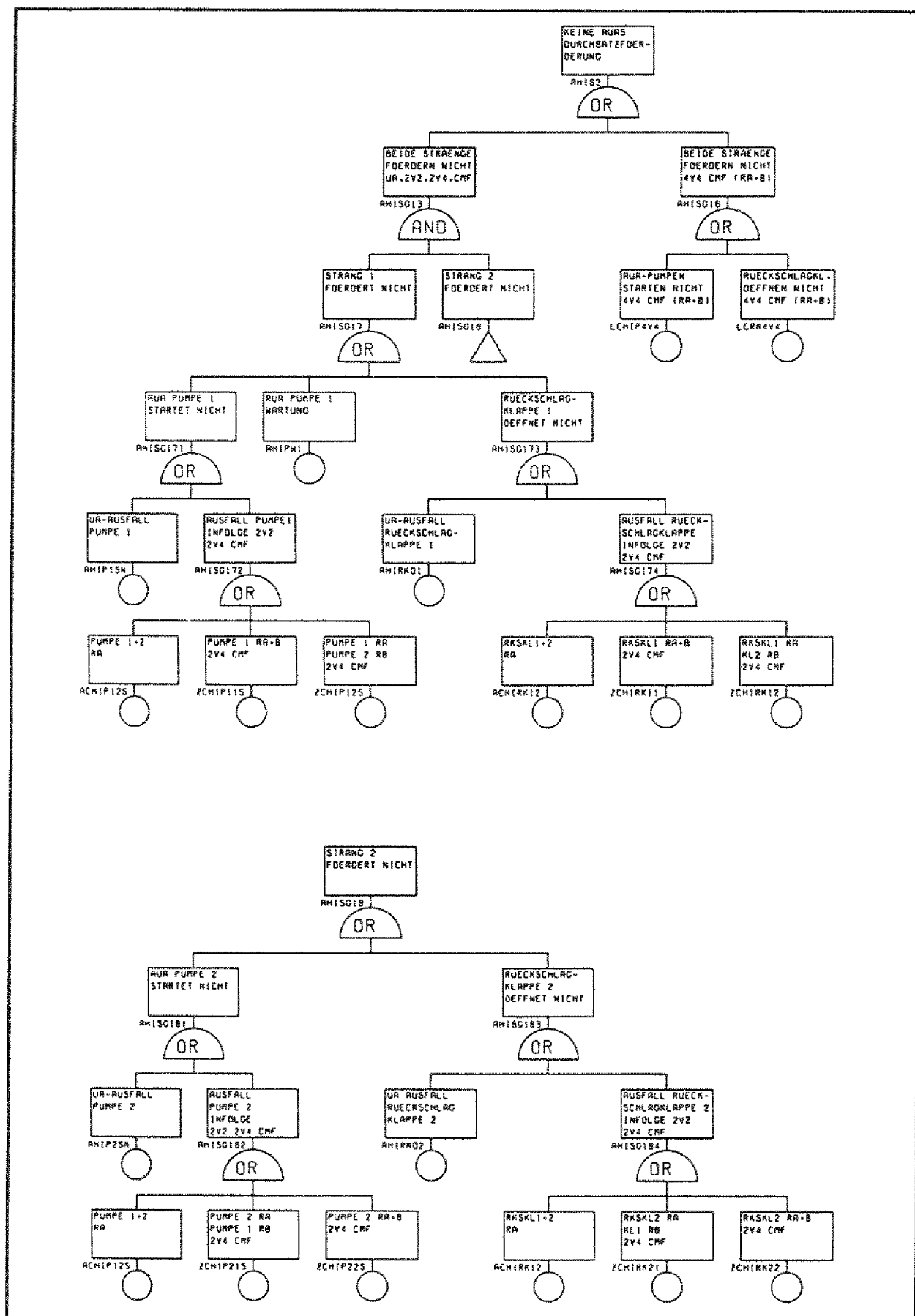
Fortsetzung Abb. 3.3-11 (b)





Fortsetzung Abb. 3.3-11 (d)





Fortsetzung Abb. 3.3-11 (f)

3.3-39

| Komponenten-<br>kennzeichnung | Lambda      | P    | MTR<br>in h | Komp.art | T1<br>in h | T10<br>in h | Gruppe | F05 der Log-<br>normalverteilung |
|-------------------------------|-------------|------|-------------|----------|------------|-------------|--------|----------------------------------|
| ACHIR12                       | 6.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR15                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 36.00  |                                  |
| ACHIR125                      | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 33          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 59          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.666E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 35          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 8.000E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 33          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 39          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 39          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.200E-07/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 26          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 10          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 101         | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 101         | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 5.700E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 30          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 30          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 29          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 29          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 0           | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.800E-02/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 0           | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 2.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.200E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.200E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 95          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 35          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 35          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 51          | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 53          | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 53          | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 55          | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 55          | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-07/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-07/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 2.800E-03/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 0           | 11.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 35          | 3.50   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-06/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 35          | 3.50   |                                  |
| ACHIR12                       | 9.500E-04/h | 8.0  | selbstm.    | 8.0      | 0.         | 10          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-02/h | 84.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 9           | 3.90   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-02/h | 84.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 129         | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 2.400E-05/h | 8.0  | gestestet   | 8736.    | 0.         | 21          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 8.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 33          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 8.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 33          | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 8.000E-03/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.800E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 336.       | 163         | 4.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 5.000E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 336.       | 0.          | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 5.000E-05/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 2.800E-01/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-03/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-03/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 2.100E-08/h | 24.0 | gestestet   | 336.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 2.100E-08/h | 24.0 | gestestet   | 336.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 7.900E-08/h | 24.0 | gestestet   | 336.     | 0.         | 39          | 4.60   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 23          | 3.60   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-07/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 127         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 35          | 5.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 3.000E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 35          | 5.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.00E-08/h  | 24.0 | gestestet   | 336.     | 0.         | 0           | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.200E-03/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 3.00   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.200E-03/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 4.000E-02/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.500E-03/h | 0.0  | Wahrch.     | 0.0      | 0.         | 0           | 10.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 6.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 6.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 6.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 6.200E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 45          | 12.70  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.090E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 36.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.090E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 36.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.090E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 36.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.090E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 11          | 36.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 63          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 39          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 39          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 39          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.700E-08/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 39          | 23.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 53          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 53          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 53          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 53          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 4.800E-07/h | 24.0 | gestestet   | 672.     | 0.         | 53          | 4.70   |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.300E-09/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 57          | 40.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 0           | 12.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 | gestestet   | 8736.    | 0.         | 128         | 26.00  |                                  |
| ACHIR12                       | 1.000E-08/h | 24.0 |             |          |            |             |        |                                  |

Tab. 3.3-1: Kenngrößen für Fehlerbaum Abb. 3.3-11

Die ersten 50 Ausfallkombinationen bestimmen die Wahrscheinlichkeit des Ausfalls der NWA zu etwa 93 %. Die Anteile der folgenden Ausfallkombinationen liegen bei 0,1 % und kleiner.

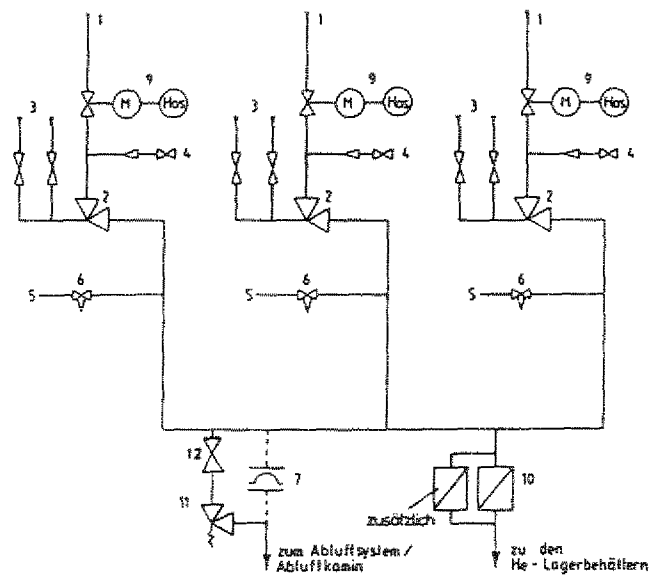
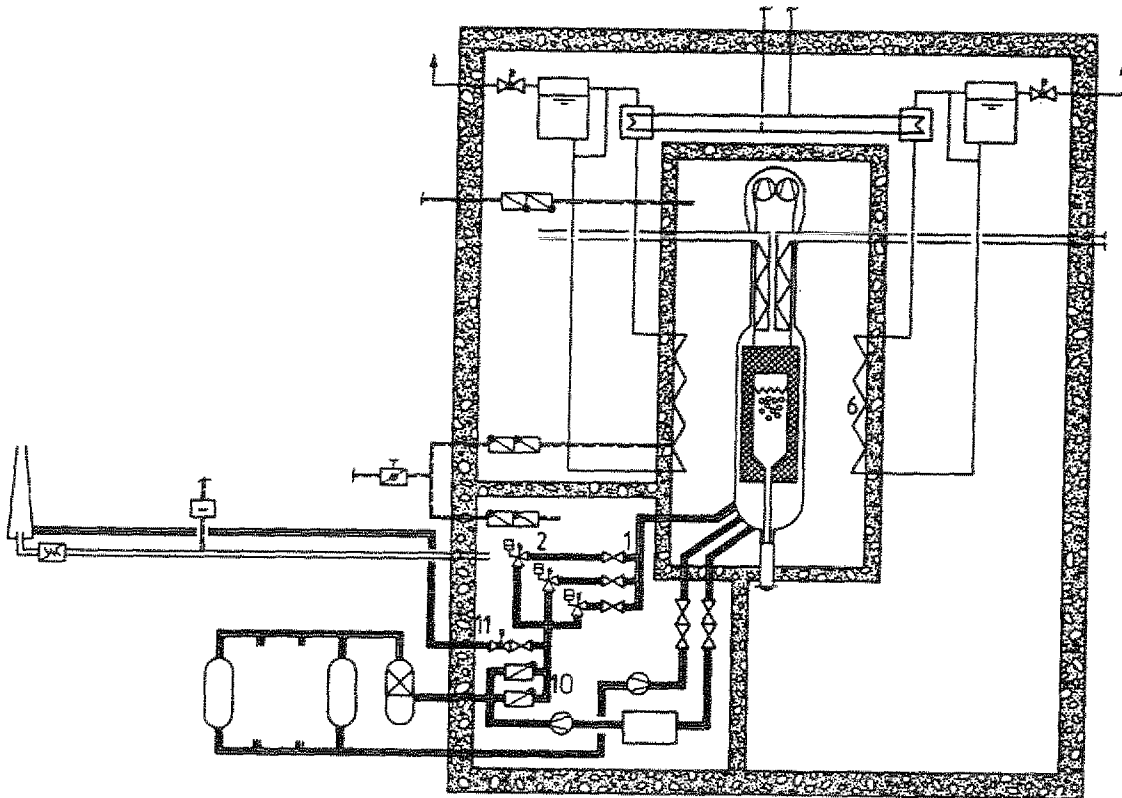
Ohne die Umschaltung auf den zweiten Reaktor beträgt die Ausfallwahrscheinlichkeit der NWA des defekten Reaktors  $2,7 \text{ E-}3/\text{Anforderung}$  ( $\text{EW}, f=2,8$ ). Die Möglichkeit, die Nachwärme notfalls über das AuAS des zweiten Reaktors abzuführen, führt zu einer Verbesserung um etwa den Faktor 9 auf den oben genannten Wert von  $3,1 \text{ E-}4/\text{Anforderung}$ .

#### 3.3.2.12 Primärkreis-Überdrucksicherung

Das in /3.3-3/ beschriebene Primärkreis-Überdrucksicherungskonzept ist inzwischen überarbeitet worden /3.3-6/. Neben der genauen Spezifizierung des Hauptventils ergaben sich gegenüber der früheren Auslegung Änderungen in der Ansteuerung mit nunmehr ausschließlich Magnetventilsteuerung.

Die Überdrucksicherung (Abb. 3.3-12) besteht aus drei federbelasteten Sicherheitsventilen mit Faltenbalgabdichtung des Ventilstößels. Jedem Hauptventil sind zwei zusätzliche elektromagnetische Steuerventile für die Öffnungs- bzw. Schließfunktion zugeordnet. Um Instandhaltungsarbeiten während des Betriebes zu ermöglichen, ist vor jedem Sicherheitsventil eine Absperrarmatur vorgesehen. Diese sind elektrisch so verriegelt, daß nur jeweils eine Armatur geschlossen und auch nur ein Entlastungsstrang abgesperrt werden kann. Die Sicherheitsventile sind im Reaktorschutzgebäude außerhalb des biologischen Schildes gemeinsam mit der Gasreinigungsanlage in einem Raum untergebracht. Sie sind kaltgasseitig an den Primärkreislauf im unteren Bereich des Reaktordruckbehälters über eine Sammelleitung angeschlossen. Ursprünglich war die gemeinsame Abströmleitung über nur eine Rückschlagklappe mit dem Reingaslager verbunden. Die Ereignisablauf- und Zuverlässigkeitsanalyse wies diese Auslegung als Schwachstelle aus. Zur Reduzierung der entsprechenden Störfallkette mit Spaltproduktfreisetzung in die Umgebung wurde die Auslegung mittlerweile um eine redundante Rückschlagklappe parallel zur





- |                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1 Vom Reaktordruckbehälter | 5 Leckageabsaugung            |
| 2 Sicherheitsventil        | 6 Stellventil gegen Überstrom |
| 3 Steuerventile            | 7 Bersfscheibe                |
| 4 Reingasspülung           | 8 Abblaseleitung              |
| 11 Entlastungsventil       | 9 Absperrramatur              |
| 12 Handventil              | 10 Rückschlagklappe           |

Abb. 3.3-12: Primärkreis-Überdrucksicherung

vorhandenen ertüchtigt. Vor den Rückschlagklappen zweigt eine Leitung mit einem Entlastungsventil - ursprünglich Berstscheibe - zum Lüftungssystem ab. Dem Ventil ist ein im Normalbetrieb in Offenstellung verriegeltes Handventil vorgeschaltet.

Das Reingaslager besteht aus einer Reihe hintereinander geschalteter Behälter. Der erste Behälter ist mit einer Kugelschüttung versehen, der zur Abkühlung des einströmenden Gases dient.

Insgesamt handelt es sich hierbei um ein neuartiges Konzept zur Überdrucksicherung bei kleinen HTR.

Bei der nachfolgenden Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Überdrucksicherung (Schließversagen) wurden die Absperrarmaturen vor den Sicherheitsventilen nicht berücksichtigt. Die gegenseitige Ventilverriegelung erlaubt nur das Schließen einer Armatur. Wegen eines unvorhersehbaren Personalengpasses konnte die dazu erforderliche Operateurmaßnahme nicht bewertet werden. Der Ausfall der Armatur selbst wurde zu  $4.4 \text{ E-2/Anf. (EW, f=3)}$  bewertet; bei monatlichem Ventilttest verbessert sich dieser Wert auf  $3,4 \text{ E-3}$ .

#### 3.3.2.12.1 Öffnen der Primärkreis-Sicherheitsventile

Nach thermodynamischen Berechnungen verursacht die bei der Störfallauslegung berücksichtigte Wassereinbruchmenge von 1,7 t (Auslegungsstörfall) das Ansprechen des ersten Primärkreis-Sicherheitsventils (77 bar). Bei größeren Wassereinbrüchen oder bei Ausfall der NWA erreicht - falls das erste Ventil versagt - der Primärkreisdruck den Ansprechdruck des zweiten (80,4), ggf. den des dritten Ventils (83,8).

Daher sind neben den unabhängigen Ventilausfällen auch abhängige Ausfälle aus gemeinsamer Ursache (common mode failure) von Bedeutung. Die statistische Basis solcher Ausfälle in kerntechnischen Anlagen ist derzeit noch unbefriedigend.

Es gibt allerdings inzwischen eine Auswertung deutscher Betriebserfahrungen mit Sicherheitsarmaturen in konventionellen

Kraftwerken (Zeitraum 1972-1983) unter besonderer Berücksichtigung von Common-Mode-Ausfällen /3.3-7/. Die Ergebnisse zeigen, daß Common-Mode-Ausfälle, besonders im Bereich der Steuerung, einen erheblichen Beitrag zur Nichtverfügbarkeit von gesteuerten Sicherheitsventilen liefern. Im Gegensatz zu den hier vorliegenden Ventilen sind dort ausschließlich Dampfventile behandelt, so daß für Helium beaufschlagte Ventile direkt keine Daten vorliegen.

Vorliegende amerikanische Angaben zu He-Sicherheitsventilen /3.3-8/ liegen weit zurück, basieren offensichtlich auf Erfahrungen unterschiedlicher technischer Einrichtungen, weisen kleinere Auffallwahrscheinlichkeiten aus und enthalten keine Aussagen zu Common-Mode-Ausfällen.

Im Rahmen dieser Analyse werden deshalb die Angaben zu Dampfventilen aus /3.3-7/ und Kap. 3.5 herangezogen. Sie gelten hauptsächlich für Abweichungen vom Ansprechdruck von bis zu ca. 10 %.

Für das Nichtöffnen eines Sicherheitsventils wird entsprechend /3.3-7/ eine Wahrscheinlichkeit von  $1,3 \cdot 10^{-2}$ /Anforderung angesetzt. Der Anteil abhängiger Ausfälle beträgt dabei bereits mehr als 60 %. Bei den unabhängigen Ausfällen dominiert das Hauptventil, bei den abhängigen Ausfällen die redundanten Steuerstränge.

Die Angaben wurden als Erwartungswerte interpretiert, Unsicherheitsbandbreiten sind nicht ausgewiesen.

Um die Unsicherheit von Ereignisketten bestimmen zu können, wird in Anlehnung an die Angaben in Kapitel 3.5 ein Unsicherheitsfaktor von 4 angesetzt.

Nachfolgend sind die in /3.3-7/ angegebenen Ausfallwahrscheinlichkeiten für eine Anzahl gleichzeitig ausgefallener Sicherheitsventile in Öffnungsrichtung angegeben:

| Anzahl gleichzeitig ausgefallener Sicherheitsventile | Ausfallwahrscheinlichkeit pro Anforderung in Öffnungsrichtung (UA + CMA) |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                    | 1,3 E-2                                                                  |
| 2                                                    | 8,3 E-4                                                                  |
| 3                                                    | 1,7 E-4                                                                  |
| 4                                                    | 6,9 E-5                                                                  |

#### 3.3.2.12.2 Schließen der Primärkreis-Sicherheitsventile

Zur auslegungsgemäßen Beherrschung der hier betrachteten Wassereinbruchstörfälle gehört das Wiederschließen der angesprochenen PK-Sicherheitsventile, anderenfalls erfolgt eine kontinuierliche Druckentlastung bis zum Druckausgleich mit dem Gaslager. Spaltprodukte werden allerdings erst dann in die Umgebung freigesetzt, wenn zusätzlich das Entlastungsventil in der Leitung zum Abluftkamin anspricht (Abb. 3.3-12).

Dem Verlust des PK-Einschlusses vorausgehen muß also das Offenbleiben eines der angesprochenen Ventile.

Entsprechend Kapitel 3.5 wird für das Offenbleiben eines Sicherheitsventils eine Wahrscheinlichkeit von  $2,3 \text{ E-}2$  pro Anforderung (EW,  $f=4$ ) zugrunde gelegt.

#### 3.3.2.12.3 Öffnen des Gaslagers

Die gemeinsame Abströmleitung der PK-Sicherheitsventile ist unmittelbar vor dem Gaslager mit zwei parallel angeordneten, hinsichtlich der Öffnungsfunktion zueinander redundanten Rückschlagarmaturen versehen.

Spricht eines der PK-Sicherheitsventile an, aber keine der beiden Rückschlagarmaturen öffnet, ist der Aktivitätseinschluß bei weiter ansteigendem Primärkreisdruck nur noch bis zum Ansprech-

druck des Entlastungsventils von 85 bar gegeben. Schließt das Sicherheitsventil wieder, wenn der Primärkreis bis auf dessen Schließdruck entlastet wurde, bleibt die Druckentlastung und damit die Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung unbedeutend. Versagt dagegen das Ventil in Offenstellung, kann es zu einer weitgehend vollständigen Druckentlastung des Primärkreises in die Umgebung kommen und damit zu einer Ereigniskette, die im Rahmen der HTR-100-Analysen detaillierter betrachtet wurde.

Anhand einer ersten probabilistischen Bewertung dieser Ereigniskette wurde die ursprüngliche Konzeption mit einer Rückschlagklappe entsprechend dem jetzt vorliegenden Konzept ertüchtigt. Dies führte zu einer Reduzierung der Eintrittshäufigkeit um etwa den Faktor 10.

Zur Bewertung der Ausfallwahrscheinlichkeit der Rückschlagklappen liegen derzeit noch keine nutzbaren Erfahrungen von mit Helium beaufschlagten Armaturen in HTRs vor. Eine Auswertung der Betriebserfahrungen mit Komponenten in He-Kreisläufen des AVR ist gerade erst angelaufen /3.3-9/.

Somit werden die auf Leichtwasserreaktoren basierenden Ausfallraten des Kapitels 3.5 von

$\lambda_{UA} = 1,7 \text{ E-7/h}$  bzw.  $4,2 \text{ E-7/h}$  (jeweils mit Unsicherheitsfaktor 3) für Öffnungs- bzw. Schließversagen einer Armatur und

$\lambda_{CM} = 1,3 \text{ E-9/h}$  bzw.  $3,4 \text{ E-9/h}$  (40 bzw. 30) für Öffnungs- bzw. Schließversagen beider Armaturen (aufgrund gemeinsamer Ursache in Ansatz gebracht).

Unter Zugrundelegung eines jährlichen Testintervalls ergibt sich somit für das Nichtöffnen beider Rückschlagarmaturen eine Ausfallwahrscheinlichkeit von  $7 \text{ E-5}$  pro Anforderung (Erwartungswert) und bei monatlichem Test von  $5,4 \text{ E-6/A}$ .

#### 3.3.2.12.4 Entlastungspfad in die Umgebung öffnet

In diesem Kapitel werden zwei Öffnungsvarianten des Entlastungspfad in die Umgebung, einmal mittels Berstscheibe wie zunächst in /3.3-3/ vorgesehen, und die letztlich verfolgte Variante mittels Entlastungsventil, vergleichend beurteilt.

Nach Erreichen des Ansprechdruckes der PK-Sicherheitsventile strömt das abgeblasene Primärhelium in Behälter des Reingaslagers. Reicht das Zusatzvolumen ( $\approx 35\%$ ) zur Druckbegrenzung nicht aus, und überschreitet der Primärkreisdruck 85 bar, gibt ein bei diesem Druck öffnendes Entlastungsventil (Berstscheibe) einen Entlastungspfad frei, der über die Abluftanlage und -kamin in die Umgebung führt. Diese Entlastungsleitung ist vor den Rückschlagklappen des Gaslagers an die Abströmleitung der PK-Sicherheitsventile angeschlossen (Abb. 3.3-12).

#### - Berstscheibe im Entlastungspfad

Von den beiden Ausfallursachen 'Berstscheibe reißt vorzeitig' bzw. 'reißt nicht bei Erreichen des Berstdruckes' ist die erstere von größerer Bedeutung, weil Ereignisse, bei denen der Berstdruck erreicht wird, sehr selten sind.

Eine realistische Bestimmung der Wahrscheinlichkeit für die vorzeitige Zerstörung der Berstscheibe ist schwierig. Im Normalbetrieb wird der Druck vor der Berstscheibe auf wenige bar gehalten, so daß ein deutlicher Abstand zum Berstdruck vorliegt.

Spricht ein PK-Sicherheitsventil an, ist die hiervon ausgehende Druckwelle für das Versagen der Berstscheibe gegenüber Konzepten mit wesentlich kleinerem Arbeits-/Berstdruckverhältnis von geringerer Bedeutung; Druckwellen werden als bestimmende Ursache für eine vorzeitige Zerstörung angesehen. Weitere Ursachen liegen in Vorschädigungen durch falsche Lagerung, oder unkorrekte Handhabung (z.B. Einbau) bzw. in Fertigungsfehlern. Bereits eine kleine Einbeulung der Kalotte von Umkehrberstscheiben kann zu einer deutlichen Reduzierung des Ansprechdruckes führen.

Dem Problem der Alterung kann man durch entsprechend kurze Standzeiten begegnen, falls dem Wechsel während des Normalbetriebs keine sicherheitstechnischen Bedenken entgegenstehen.

Unter diesem Gesichtspunkt ist auch die in der Diskussion befindliche Überlegung, die Berstscheibe nach ihrem Einbau auf hohem Druckniveau, z.B. 70-75 bar zu testen, einzuordnen. Die der Berstscheibe vorgelagerte, normalerweise in Offenstellung verriegelte Absperrarmatur müßte hierzu geschlossen werden und der Zwischenraum über einen Prüfanschluß verfügen.

Im vorliegenden, der Analyse zugrunde gelegten Anlagenkonzept sind diese Überlegungen noch nicht enthalten.

Für das vorzeitige Ansprechen von Berstscheiben weist Kapitel 3.5 eine Rate von  $1 \text{ E-6/h}$  (Unsicherheitsfaktor 4) aus. Sie gilt für die Standby-Phase mit geringer Druckbelastung. Es wird angenommen, daß der Druck in der Abströmleitung vor der Berstscheibe überwacht wird und ihr Ansprechen in der Standby-Phase selbstmeldend ist.

Für das hier interessierende Verhalten der Berstscheibe in der Phase nach Ansprechen der PK-Sicherheitsventile bei damit verbundenen Druckwellen und ansteigendem Gaslagerdruck, liegen keine Angaben vor.

Nach Einschätzung der GRS liegt die Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Berstscheibendefektes ca. 10 % unterhalb des nominalen Berstdruckes bei etwa  $1 \text{ E-2}$ . In diesem Fall ist allerdings ein beträchtlicher Teil des Heliums und damit des Aktivitätsinventars in den Behältern des Gaslagers und damit der Freisetzung in die Atmosphäre entzogen.

Bei den meisten hier interessierenden Ereignisketten baut sich ein derartiger Druck im Gaslager nicht auf, so z.B. im Fall des zunächst auslegungsgemäß beherrschten DE-Heizrohrbruchs, in dessen Verlauf eine relativ geringe Masse an Helium und Wasserdampf in das Reingaslager abgeblasen wird und einen entsprechend geringen Druckanstieg verursacht.

Das ungewollte Versagen der Berstscheibe bei Ereignisketten mit relativ geringem Störfalldruck wird allgemein als deutlich un-

wahrscheinlicher angesehen; quantitative Angaben liegen allerdings nicht vor. Dies bedingt eine nicht willkürfreie Festlegung auf eine Wahrscheinlichkeit von  $1 \text{ E-3}$  (EW,  $f=10$ ) mit der Erwartung, auf der sicheren Seite zu liegen.

Korreliert man dagegen die zuvor genannte Rate von  $1 \text{ E-6/h}$  mit einem monatlichen bzw. jährlichen Wechselintervall der Berstscheibe, liegt die Wahrscheinlichkeit für ein vorzeitiges Ansprechen im ersten Fall um etwa den Faktor 2 günstiger und im anderen Fall um etwa den Faktor 2 ungünstiger als der festgelegte Wert von  $1 \text{ E-3}$ . Dieser Wert kann somit für die Beurteilung dieser Variante als eine brauchbare Entscheidungshilfe angesehen werden.

Die der Berstscheibe vorgelagerte und in Offenstellung verriegelte Absperrarmatur wird hier bezüglich einer notfalls aktivierbaren Abschließfunktion nicht berücksichtigt. Derartige Notfallschutzmaßnahmen - falls überhaupt erforderlich - müßten erst noch diskutiert und spezifiziert werden.

#### - Entlastungsventil im Entlastungspfad

Die Randbedingungen für die Beurteilung des Entlastungsventils sind mit denen für die Berstscheibe vergleichbar und daher gleich schwierig. Hinzu kommt, daß diese Variante noch nicht in allen für die Beurteilung wichtigen Punkten spezifiziert ist. Da beispielsweise eine Angabe über die zum Einsatz kommende Ventilart noch aussteht, wird für die Analyse die Verwendung eines federbelasteten Sicherheitsventils angesetzt.

Eine weitgehend vollständige Druckentlastung in die Umgebung, d.h. unter weitgehender Ausschaltung des Gaslagers als Pufferbehälter müßte im fehlerhaften Öffnen des Ventils weit unterhalb seines nominalen Ansprechdruckes zur Voraussetzung haben. Ein derartiges Verhalten wäre beispielsweise bei einem Federbruch zu erwarten.

Die in Kapitel 3.5 angegebene Rate von  $4 \text{ E-7/h}$  (Median,  $f=3$ ) für vorzeitiges Öffnen eines federbelasteten Sicherheitsventils gilt lediglich bis zu einer Abweichung von 10 % vom Ansprechdruck,



die für die Abgabe relevanter Freisetzen noch nicht bedeutsam ist.

Für deutliche größere Abweichungen ( $> 50 \%$ ) liegen keine Angaben vor. Hierfür wird konservativ eine um den Faktor 2 reduzierte Ausfallrate von  $2 \text{ E-}7/\text{h}$  (Median,  $f=3$ ) angesetzt; korreliert man diese mit einem Testintervall von 672 h, ergibt sich für das fehlerhafte Öffnen des Sicherheitsventils zum Kamin weit unterhalb des Ansprechdrucks von 85 bar eine Wahrscheinlichkeit von  $8,4 \text{ E-}5$ .

Liste der Abbildungen

- Abb. 3.3-1: Fehlerbaum 'Primärkreis-Druckmessung'
- Abb. 3.3-2: Reaktordruckbehälter mit Einbauten
- Abb. 3.3-4: Fehlerbaum 'Unterbrechung der DE-Bespeisung'
- Abb. 3.3-5: HTR-100 Kreislaufschema
- Abb. 3.3-6: Fehlerbaum 'DE-Entlastung über HD-Umleitstation'
- Abb. 3.3-7: Fehlerbaum 'DE-Entlastung über AuA-Entlastungsregelstation'
- Abb. 3.3-8: Fehlerbaum 'Leckidentifizierung'
- Abb. 3.3-9: Fehlerbaum 'Freischalten des intakten DE'
- Abb. 3.3-10: An- und Abfahrssystem (AuAS) für die NWA
- Abb. 3.3-11: Fehlerbaum 'NWA mit AuAS von Reaktor A oder B'
- Abb. 3.3-12: Primärkreis-Überdrucksicherung

# Literatur

- /3.3-1/ Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen Standortbedingungen.  
Phase IB, Fachband III: Lecks im Primärkreislauf  
Jül-Spez-136, Band 4, Mai 1982
- /3.3-2/ Der Bundesminister für Forschung und Technologie (Hrsg.): Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 3: Zuverlässigkeitskenngrößen und Betriebserfahrungen, Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1980
- /3.3-3/ BBC/HRB  
HTR-100, Doppelblockanlage  
Beschreibung der Gesamtanlage für Strom- und Prozeßdampfherzeugung  
HTR-1100-BA-GHRA 001864, Dezember 1985
- /3.3-4/ Zuverlässigkeitskenngrößenermittlung im Kernkraftwerk Biblis B  
Datenband 5, GRS-A-1030/II, Dezember 1984
- /3.3-5/ R. Bongartz  
THTR-300: Ausfallrate für Armaturen im HD-Entlastungsstrang, Aktennotiz 18-II/1984
- /3.3-6/ J. Wolters  
Überdrucksicherung des Reaktordruckbehälters beim HTR-100, KFA-ISF-Notiz-4/II-1986
- /3.3-7/ Auswertung von Betriebserfahrungen mit Sicherheitsarmaturen, BMI-1985-080, Juni 1985
- /3.3-8/ G.W. Hannaman  
GCR Reliability Data Bank, GA-A 14 839, July 1978
- /3.3-9/ H.J. Hantke  
Ermittlung von Zuverlässigkeitskenngrößen an AVR-Komponenten  
Interner Abschlußbericht, Ingenieurbüro Hantke, Fürstenfeldbruck/KFA/ISF, August 1986
- /3.3-10/ Untersuchungen zur Funktionstüchtigkeit der Druckhalter-Sicherheitsventile bei Abblasen von heißem Druckwasser; Abschlußbericht des BMFT-Förderungsvorhabens RS-240, KWU Erlangen, RE 23/011/80, März 1980



### 3.4 Primärkreislauflecks

von  
J. Marx

#### Inhalt

|                                                                               | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 3.4.1 Einleitung                                                              | 3.4-1 |
| 3.4.2 Fehlerbaum 'Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R2-Räumen' | 3.4-3 |
| 3.4.3 Fehlerbaum 'Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R1-Räumen' | 3.4-3 |
| Literatur                                                                     | 3.4-9 |



### 3.4.1 Einleitung

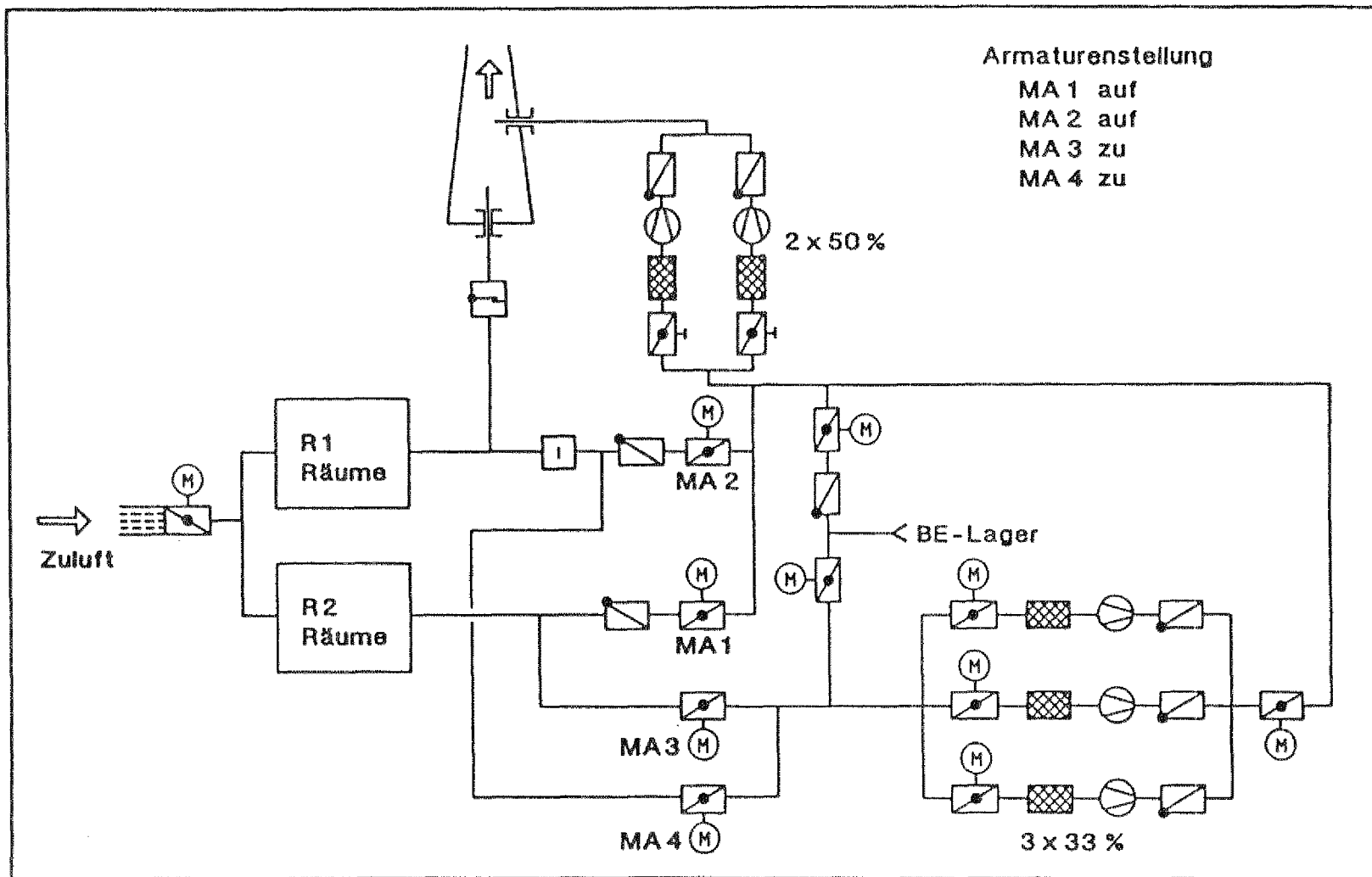
Störfallbedingte Leckagen des Primärkreislaufs sollen mit dem Zu- und Abluftsystem beherrscht werden. Dazu ist eine Einteilung der Lecks in zwei Gruppen vorgesehen.

Die erste Gruppe beinhaltet kleine Lecks, die einen Druckentlastungsquerschnitt von  $1 \text{ cm}^2$  nicht überschreiten. Der dadurch zusätzlich anfallende Massenstrom bis zu  $0,2 \text{ kg/s He}$  wird über das Abluftsystem abgeführt und zur Rückhaltung von radioaktivem Jod über eine Bedarfsfilteranlage geleitet (Abb. 3.4-1). Die Unterdruckhaltung wird in diesen Raumbereichen automatisch durch gesteuerte Zuluftdrosselung aufrechterhalten. Als Häufigkeit solcher kleinen Lecks wurde  $5 \cdot 10^{-4}/\text{a}$  angesetzt. Der Wert wurde auf der Basis von /4/ abgeschätzt und muß bei detaillierter Anlagenkenntnis überprüft werden.

Die zweite Gruppe umfaßt größere Lecks bis zu einem Querschnitt von maximal  $33 \text{ cm}^2$ , der sich aus der größten Anschlußleitung an den Reaktordruckbehälter (RDB) ableitet. Noch größere Lecks könnten nur am RDB selbst entstehen. Sie werden aber vom Hersteller mit dem Argument einer entsprechenden Auslegung deterministisch ausgeschlossen (vgl. Kapitel 2.2). Weiterhin werden vom Hersteller die Lecks bis zu  $33 \text{ cm}^2$  auf die Räume der Gasreinigungsanlage (R1-Räume) begrenzt. Bei diesen Lecks hat der Helium-Massenstrom zunächst eine Druckspitze zur Folge, die über eine Druckstoßklappe und den Kamin abgebaut wird. Anschließend wird der Massenstrom wie bei kleineren Leckagen über die Bedarfsfilteranlage geleitet /1/. Die Häufigkeit der größeren Lecks wurde mit  $10^{-5}/\text{a}$  angesetzt. Auch dieser Wert müßte bei detaillierter Anlagenkenntnis überprüft werden.

In den folgenden Ausführungen wird die Unverfügbarkeit der Bedarfsfilteranlage ermittelt. Dabei werden konservative Annahmen getroffen, indem bei Lecks in R2-Räumen nur die maximale Leckfläche von  $1 \text{ cm}^2$  unterstellt wird, die ein Funktionieren der gesamten Filterstrecke erfordert. Weiterhin wird angenommen, daß bei Ausfall eines Filterstranges eine unkontrollierte Gebäudeentlastung auftritt.

Abb. 3.4-1: Fortluftfilteranlage (vereinfachtes Schema)





### 3.4.2 Fehlerbaum 'Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R2-Räumen'

Zur gefilterten Abgabe des Heliumstromes nach Lecks in R2-Räumen wurde eine maximale Leckfläche von  $1 \text{ cm}^2$  zugrunde gelegt, wodurch ein zusätzlicher Massenstrom von  $8000 \text{ m}^3/\text{h}$  verursacht wird /2/. Entsprechend dem zusätzlichen Massenstrom wird die Zuluft über eine Drosselklappe reduziert. Die Abluft durchströmt dann nach automatisch erfolgter Umschaltung die Bedarfsfilteranlage, die auf  $3 \times 33 \%$  ausgelegt ist. Die Abluft wird anschließend über Kamin abgeblasen. Bei einem jährlichen Testintervall ergibt die Auswertung des Fehlerbaumes (Abb. 3.4-2) für dieses System eine Unverfügbarkeit von  $6,06 \cdot 10^{-1}$ . Der schlechte Wert läßt sich zum einen dadurch erklären, daß alle drei Stränge der Filterstrecke funktionieren müssen, und zum anderen sind für Umschaltmaßnahmen keine redundanten Armaturen vorgesehen.

So liefern das Startversagen der Gebläse in der Filterstrecke sowie der Ausfall der Motorarmaturen zum Umleiten der Umluft einen Beitrag von  $89 \%$  zur Gesamtunverfügbarkeit. Das Ergebnis wird ausschließlich durch den Ausfall einzelner Komponenten bestimmt.

### 3.4.3 Fehlerbaum 'Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R1-Räumen'

Lecks in R1-Räumen verursachen einen größeren Massenstrom bis zu  $10 \text{ kg/s}$ , so daß dieser zunächst über eine Druckstoßklappe durch den Kamin abgeführt wird. Zusätzlich muß zum Schutz der Filterstrecke das Druckstoßventil schließen. Nach erfolgter Druckabsenkung soll die Druckstoßklappe wieder schließen und das Druckstoßventil zur Weiterleitung der Abluft wieder öffnen. Die nachfolgende Prozedur verläuft dann wie bei kleinen Leckagen, so daß sich unter Einbeziehung der Druckstoßklappe und des Druckstoßventils eine mittlere Unverfügbarkeit von  $6,2 \cdot 10^{-1}$  ergibt. Hauptanteil an der Unverfügbarkeit haben auch hier die Gebläse der Filterstrecke und die Motorarmaturen zur Umschaltung mit  $85 \%$ .

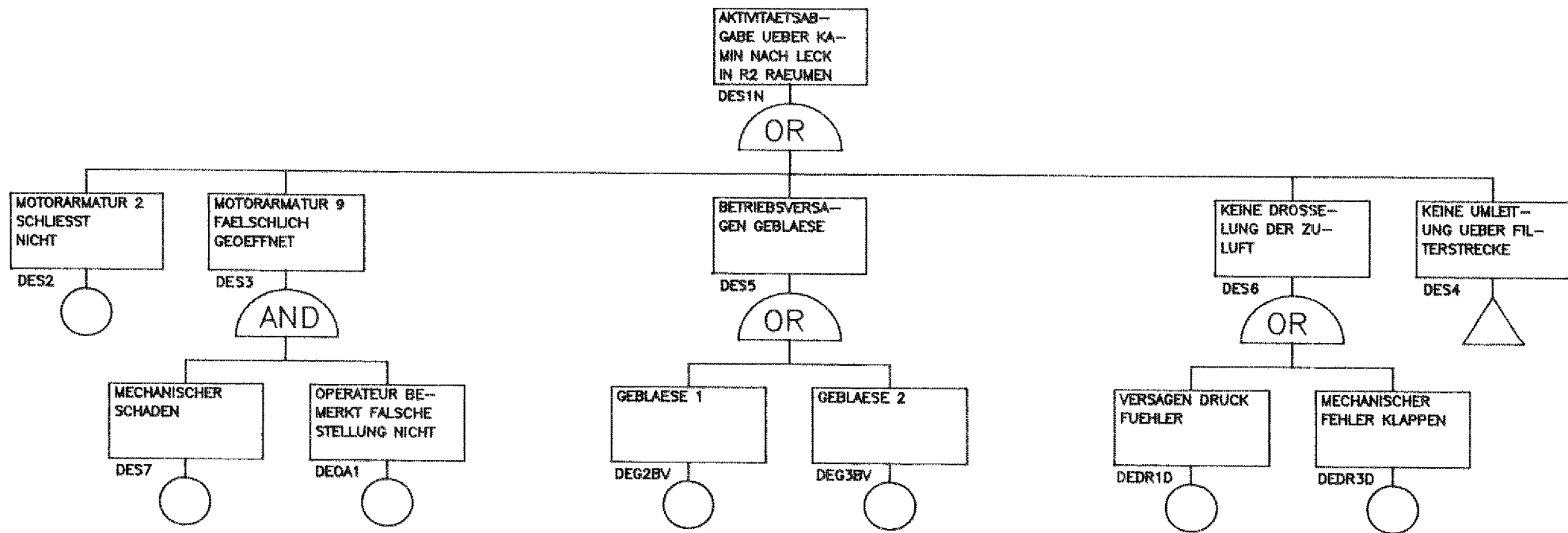


Abb. 3.4-2a: Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R2-Räumen

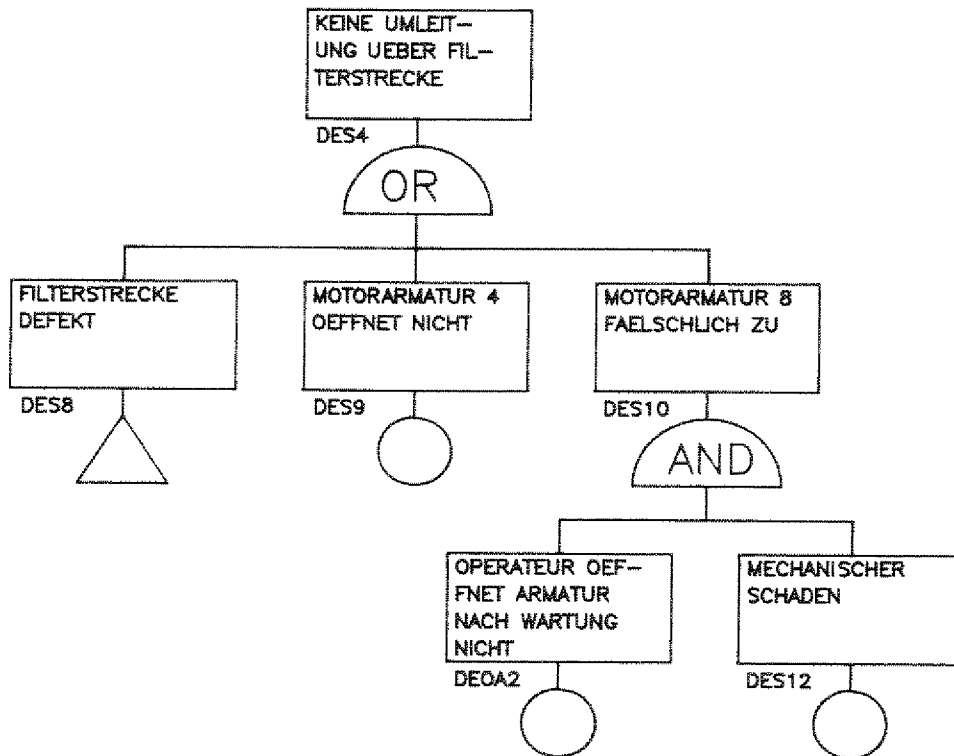


Abb. 3.4-2b: Keine gefilterte Abgabe über Kamin  
nach Lecks in R2-Räumen

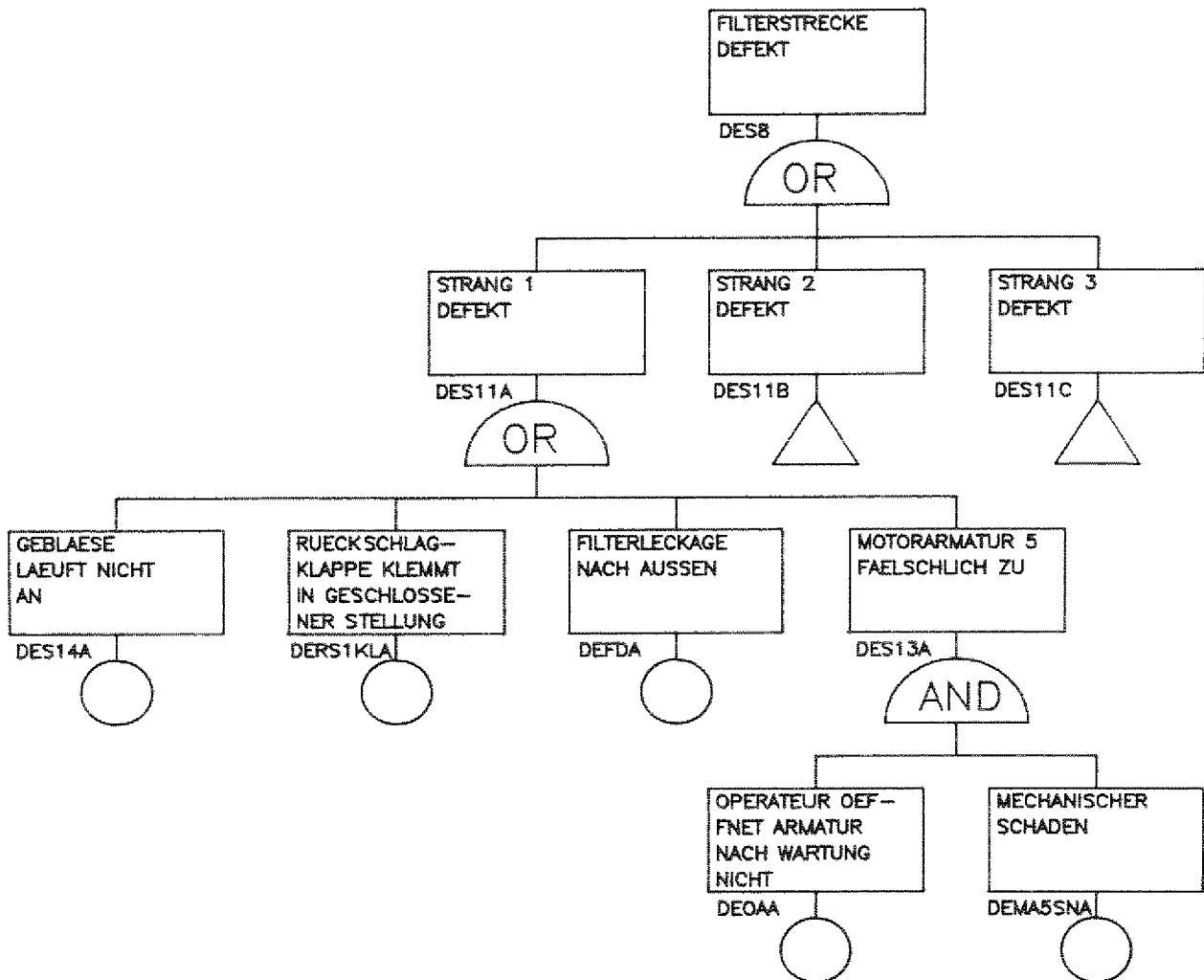


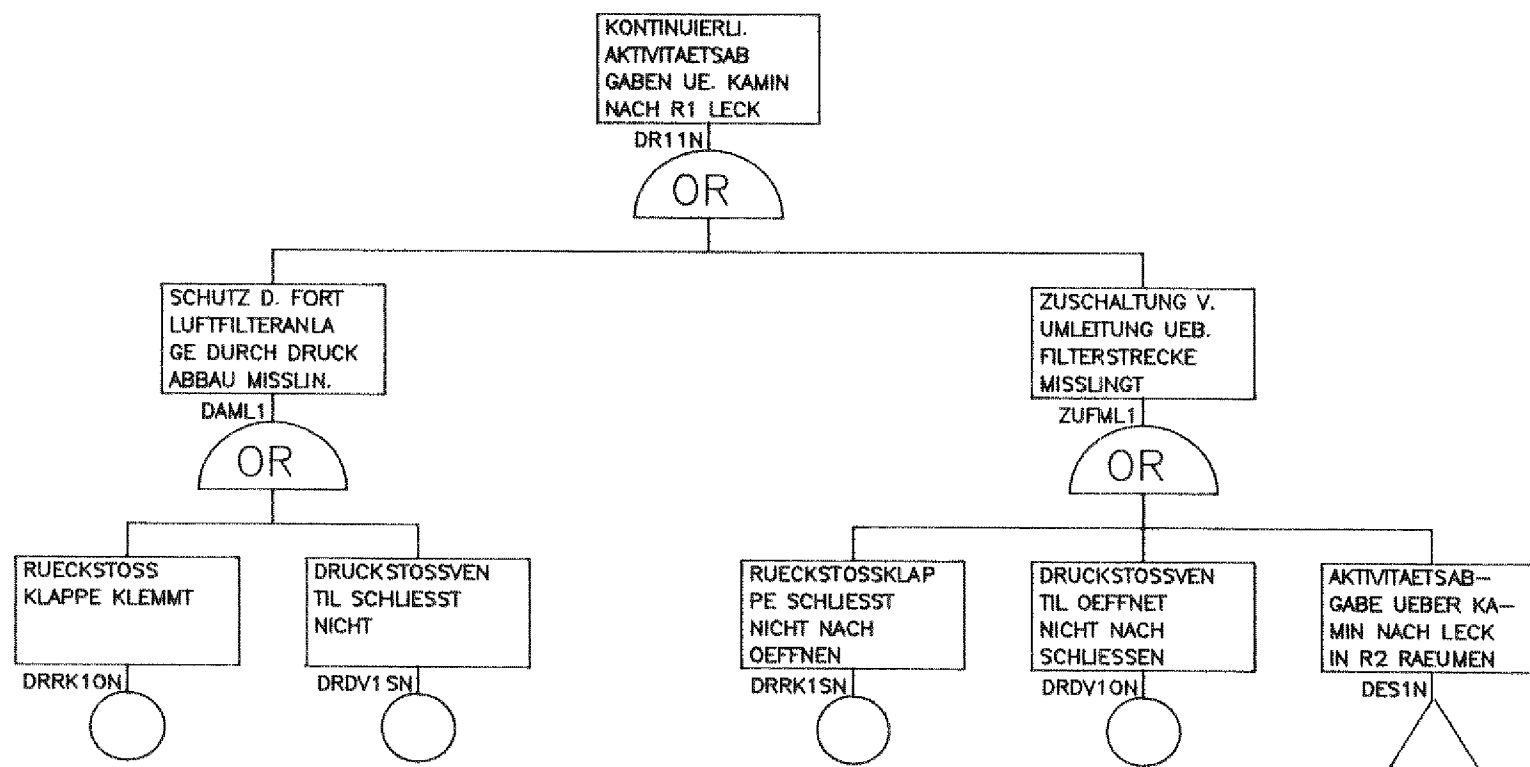
Abb. 3.4-2c: Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R2-Räumen

Eine Verbesserung des Systems für die Jodfilterung sowohl nach Lecks in R1- als auch in R2-Räumen läßt sich entweder durch die Verringerung des Testintervalls von jährlich auf monatlich, durch eine redundante Auslegung der Umleitarmaturen oder durch eine geänderte Auslegung der Filterstrecke erreichen.

Die Ausfallraten der in den Fehlerbäumen aufgeführten Komponenten stammen aus einer neueren Datenliste der GRS und sind der folgenden Tabelle zu entnehmen. Die Operateuraktion für das Nichtöffnen einer Motorarmatur nach Wartungsarbeiten wurde mit  $10^{-3}$ /pro Anforderung bewertet, und die Aktion für das Übersehen einer falschen Armaturenstellung mit  $5 \cdot 10^{-2}$ /pro Anforderung /3/.

|                                                      | Ausfallrate/h<br>(Median) | Irrtums-<br>faktor |
|------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Motorarmatur schließt bzw.<br>öffnet nicht           | $3,5 \cdot 10^{-5}$       | 3                  |
| Rückschlagklappe klemmt in<br>geschlossener Stellung | $1,7 \cdot 10^{-7}$       | 3                  |
| Startversagen Ventilator                             | $2,4 \cdot 10^{-5}$       | 6                  |
| Ventilator fördert nicht                             | $6,2 \cdot 10^{-5}$       | 3                  |
| Versagen Druckfühler                                 | $3,0 \cdot 10^{-7}$       | 3                  |
| Klappen (mechanischer Fehler)                        | $9,4 \cdot 10^{-5}$       | 3                  |
| Filter (Leckage)                                     | $3,2 \cdot 10^{-6}$       | 3                  |
| Druckstoßklappe (öffnet nicht)                       | $1,0 \cdot 10^{-6}$       | 4                  |
| Druckstoßklappe (schließt nicht)                     | $3,0 \cdot 10^{-6}$       | 4                  |

Tabelle 3.4-1: Daten



3.4-8

Abb. 3.4-3: Keine gefilterte Abgabe über Kamin nach Lecks in R1-Räumen

Literatur

- /1/ BBC/HRB: HTR-100 Doppelblockanlage 2 x 258 MW(th).  
Beschreibung der Gesamtanlage für Strom- und Prozeß-  
dampferzeugung.  
HTR-1100-BA-GHRA 001864, Dez. 1985
- /2/ 5. Fachgespräch LTA-Grundlagen der Lüftungsplanung  
HTR 2 x 100, Besprechungsbericht, 7.85
- /3/ A.D. Swain, H.E. Guttmann:  
'Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis  
on Nuclear Power Plant Applications'.  
NUREG/CR1278, Aug. 83
- /4/ Sicherheitsstudie für HTR-Konzepte unter deutschen  
Standortbedingungen. Phase IB, Fachband III,  
Jül--Spez-136/Bd. 4, Mai 1982





## 3.5 ZUVERLÄSSIGKEITSKENNGRÖßEN

Hinweis: Bezüglich Literaturangaben, auf die in dieser Tabelle Bezug genommen wird, und weiterer Einzelheiten sei auf folgenden Bericht verwiesen:

Hennings, W.: Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte. Ein Statusbericht. Band 1: Ereignisabläufe, Systemzuverlässigkeiten, Freisetzungshäufigkeiten. JÜL-SPEZ-388 Band 1, Mai 1987

## Erläuterung der Anmerkungen

- 1) mindestens  $1,0E-4$  / Anforderung
- 2) gilt für 10% Abweichung
- 4) Ausfallrate für Überschreitung des zulässigen Differenzdrucks
- 5) Ausfallart "verstopft" für Aktivkohlefilter nicht zutreffend, eher: "scheidet nicht ab". Ohne Kenntnis der Beladungsbedingungen keine Angabe möglich.
- 6) Die Ausfallraten bewegen sich je nach Einsatzart im Bereich  $80...25000E-6/h$ .
- 7) gilt nur für Öffnen und Schließen mit Antrieb, nicht für Eigenmediumbetätigung.
- 8) unter "Betriebsversagen" sind alle Ausfallarten mit Ausnahme von "startet nicht" zusammengefaßt, die zu einer Nichtverfügbarkeit der Komponente bei Reparatur führen.
- 9) Ausfallrate für die Ausfallart "fördert nicht" (Komponentenausfall unmittelbar)
- 10) keine Angabe möglich
- 11) "öffnet/schließt nicht" gleichbedeutend mit "scheidet nicht ab"
- 12) Aufteilung in 90% mit MTTR=1,6h und 10% mit MTTR=65h /13/
- 13) Aufteilung in 70% mit MTTR=4,5h und 30% mit MTTR=125h /13/
- 14) Aufteilung in 80% mit MTTR=0,3h (<1h) und 20% mit MTTR=17,4h (>1h) /AIPA/
- 15) Verteilung über verschiedene Motorarmaturen

## Erläuterung der in der Tabelle verwendeten Kürzel

|           |                                                                                                                                                                    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BBC       | Kraus: Ausfallraten der Geräte XS305, XS310 und XS 312. Arbeitsbericht BBC EN36/ZEK4305 vom 15.4.1981                                                              |
| CEGB      | Auswertung von Betriebserfahrungen mit AGR-Reaktoren des CEGB (Central Electricity Generating Board, Großbritannien). (Brief von Mr. Jenkins (CEGB) vom 23.1.1986) |
| GRS       | Durch die GRS im Auftrag des ISF ermittelte Zuverlässigkeitskenngrößen                                                                                             |
| GrKp      | Gruppen-Nummer für Ausfalldatenkopplung; GrKp = 0 bedeutet: Keine Kopplung mit anderen Daten.                                                                      |
| HRB       | Rutschmann: Ausfallrate XS313. Arbeitsbericht HRB TS2 vom 30.3.1984                                                                                                |
| LER-ISF   | /19/ sowie /22/ (siehe Literaturverzeichnis)                                                                                                                       |
| =MOV      | bewertet wie Motorarmatur                                                                                                                                          |
| MOV o. An | bewertet wie Motorarmatur ohne Ausfälle des Antriebs                                                                                                               |
| NWAZKW    | in Analogie zur Rate der entsprechenden Komponente im NWA-Zwischenkühlwasserkreis                                                                                  |
| =RSV      | analog Rückschlagarmatur                                                                                                                                           |
| =SPW-RSK  | analog Speisewasser-Rückschlagklappe                                                                                                                               |
| =SSA      | analog Speisewasser- oder Frischdampf-Schnellschlußarmatur                                                                                                         |
| VDEW      | VDEW Störungs- und Schadensstatistik 1968                                                                                                                          |

Tabelle der verwendeten Zuverlässigkeitskenngrößen -- Stand: 5. 5. 1987

| System                                              | Einflußgrößen                                 | unabhängige Ausfälle  | Gr  | Rate für abhängige Ausfälle | Reparaturzt.           |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|-----|-----------------------------|------------------------|
| Komponente                                          | Ausfallart                                    | Rate (Wahrsch) Quelle | Kp  | 2v4 4v4 Quelle              | MTTR Quelle            |
|                                                     |                                               | Median f95            |     | Median f95 Median f95       | (h)                    |
| Speisewasserkreis                                   | p>80bar T=90...200°C<br>d=100...250mm         |                       |     |                             |                        |
| Motor-Absperrventil                                 | öffnet/schließt nicht                         | 1,4-5/h 3,2 GRS       | 31  | 1,7-8/h 23                  | 1,1-8/h 5 LER/ISF 8    |
| Motor-Regelventil                                   | " / " /regelt nicht                           | 1,5-5/h 3 GRS         | 39  | " "                         | " " 8                  |
| Motor-Mehrwegeventil                                | " / "                                         | 5,3-5/h 4 GRS         | 37  | " "                         | " " 8                  |
| Schnellschlußarmatur                                | öffnet nicht                                  | 1,3-2/Anf 4 GRS       | 47  |                             |                        |
| (hydraulisch, 2VSV)                                 | schließt nicht                                | 5,0-3/Anf 4 GRS       | 48  |                             |                        |
| Magnetventil                                        | schaltet nicht                                | 1,8-6/h 4,6 /18/      |     | 1,8-7/h 17                  | 0,9-7/h 17 geschätzt 8 |
| Rückschlagklappe                                    | öffnet nicht                                  | 1,7-7/h 3 GRS         | 57  | 1,3-9/h 40                  | 1,2-8/h 5 LER/ISF 8    |
|                                                     | schließt nicht                                | 4,2-7/h 3 GRS         | 58  | 3,4-9/h 30                  | 1,2-8/h 5 LER/ISF 8    |
|                                                     | innere Leckage                                | 1,9-6/h 4,7 GRS       | 59  |                             |                        |
| Hand-Absperrventil                                  | öffnet/schließt nicht                         | 6,0-7/h 3 GRS         | 65  | 6,0-9/h 5                   | 1,0-8/h 5 LER/ISF 8    |
| Speisewasserpumpe (Dauerbetrieb) P>1000kW           | Betriebsversagen                              | 2,7-4/h 8) 3 GRS      | 2   | 3,6-7/h 1,6                 | 1,2-7/h 29 LER/ISF 8   |
| (Vor- und Hauptpumpe)                               | startet nicht nach kurzzeitiger Unterbrechung | 1,8-5/h 1) 4 GRS      | 1   |                             |                        |
| Frischdampfkreis                                    | p>80bar T>200°C<br>d=100...250mm              |                       |     |                             |                        |
| Motor-Absperrventil                                 | öffnet/schließt nicht                         | 8,0-6/h 3 GRS         | 33  | 1,7-8/h 23                  | 1,1-8/h 5 LER/ISF 8    |
| Motor-Regelventil                                   | " / " /regelt nicht                           | 1,6-4/h 3 GRS         | 41  | " "                         | " " 8                  |
| Schnellschlußarmatur                                | öffnet nicht                                  | 1,3-2/Anf 4 GRS       | 47  |                             |                        |
| (hydraulisch, 2VSV)                                 | schließt nicht                                | 5,0-3/Anf 4 GRS       | 48  |                             |                        |
| Turbinen-SSA                                        | schließt nicht                                | 1,0-6/h 4 GRS         | 50  | " "                         | " " analog 8           |
| Turbinen-Regelventil                                | schließt/regelt nicht                         | 3,0-6/h 4 GRS         | 52  | " "                         | " " Motorarm 8         |
| gesteuerte                                          | öffnet nicht, )                               | 3,2-5/h 7) 3 GRS      | 60  | 1,3-9/h 40                  | 1,2-8/h 5 analog 8     |
| Rückschlagklappe                                    | schließt nicht )                              |                       |     |                             | SPW-RSK                |
|                                                     | innere Leckage                                | 1,1-5/h 10 GRS        | 62  | 3,4-9/h 30                  | 1,2-8/h 5 " 8          |
| Hand-Absperrventil                                  | öffnet/schließt nicht                         | 6,0-7/h 3 GRS         | 65  | 6,0-9/h 5                   | 1,0-8/h 5 LER/ISF 8    |
| Reduzierstation                                     | öffnet nicht                                  | 4,0-3/Anf 4 GRS       | 53  | 1,7-8/h 23                  | 1,1-8/h 5 analog 8     |
| (schnellöffnend)                                    | schließt nicht                                | 4,0-3/Anf 4 GRS       | 54  |                             |                        |
|                                                     | regelt nicht                                  | 3,0-6/h 4 GRS         | 55  |                             |                        |
| Sicherheitsventil                                   | öffnet nicht                                  | 4,6-3/Anf 4 GRS       | 67  |                             |                        |
| mit >1 Vorsteuerventil                              | schließt nicht                                | 2,3-2/Anf 4 GRS       | 68  |                             |                        |
|                                                     | öffnet vorzeitig                              | 1,1-5/h 2) 3 GRS      | 69  |                             |                        |
| Druckmessung mit Differenzdruckgeber (Dauerbetrieb) |                                               |                       |     |                             |                        |
|                                                     | Kenndatendrift                                | 1,6-5/h 4,7 GRS       | 161 |                             |                        |
|                                                     | Totalausfall                                  | 1,5-5/h 3 GRS         | 162 |                             | /3/, F2, S.104         |
|                                                     | hängt                                         | 3,0-7/h 3 /3/         | 163 | 7,0-8/h 4                   |                        |

| System                                        | Einflußgrößen                                 | unabhängige Ausfälle |        | Gr  | Rate für abhängige Ausfälle |         |        |         | Quelle | Reparaturzt. |        |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|--------|-----|-----------------------------|---------|--------|---------|--------|--------------|--------|
|                                               |                                               | Rate (Wahrsch)       | Quelle |     | 2v4                         | 4v4     |        |         |        | MTTR         | Quelle |
| Komponente                                    | Ausfallart                                    | Median               | f95    |     | Median                      | f95     | Median | f95     |        | (h)          |        |
| Kondensatkreis                                | p= 10... 40bar T=21...90°C<br>d=100...250mm   |                      |        |     |                             |         |        |         |        |              |        |
| Kondensatpumpe (Dauerbetrieb), P≤1000kW       | Betriebsversagen                              | 1,0-4/h 8)           | 4      | GRS | 4                           | 3,6-7/h | 1,6    | 1,2-7/h | 29     | LER/ISF      | 8      |
|                                               | startet nicht nach kurzzeitiger Unterbrechung | 7,0-6/h 1)           | 4      | GRS | 3                           |         |        |         |        |              |        |
| Motor-Regelventil                             | regelt nicht                                  | 4,2-5/h              | 3      | GRS | 43                          | 1,7-8/h | 23     | 1,1-8/h | 5      | LER/ISF      | 8      |
| Hauptkühlwasserkreis                          | p= 10... 40bar T=21°C                         |                      |        |     |                             |         |        |         |        |              |        |
| Hauptkühlwasserpumpe (Dauerbetrieb) P≤1000kW  | Betriebsversagen                              | 5,6-5/h 8)           | 3      | GRS | 6                           | 3,6-7/h | 1,6    | 1,2-7/h | 29     | LER/ISF      | 8      |
|                                               | startet nicht nach kurzzeitiger Unterbrechung | 4,5-6/h 1)           | 3      | GRS | 5                           |         |        |         |        |              |        |
| Betriebs-Zwischenkühlwasserkreis              | T=90...200°C<br>d>250mm p=10... 40bar         |                      |        |     |                             |         |        |         |        |              |        |
| Umwälzpumpe (Dauerbetrieb) P=50...1000kW      | Betriebsversagen                              | 1,3-4/h 8)           | 3      | GRS | 8                           | 3,6-7/h | 1,6    | 1,2-7/h | 29     | LER/ISF      | 8      |
|                                               | startet nicht nach kurzzeitiger Unterbrechung | 6,0-6/h 1)           | 4      | GRS | 7                           |         |        |         |        |              |        |
| Motor-Mehrwegeventil                          | öffnet/schließt nicht                         | 5,3-5/h              | 4      | GRS | 37                          | 1,7-8/h | 23     | 1,1-8/h | 5      | LER/ISF      | 8      |
| Nebenkühlwasserkreis                          | p< 4bar T=21... 90°C<br>d>250mm               |                      |        |     |                             |         |        |         |        |              |        |
| Umwälzpumpe (Dauerbetrieb) P=50...1000kW      | Betriebsversagen                              | 1,6-4/h 8)           | 3      | GRS | 10                          | 3,6-7/h | 1,6    | 1,2-7/h | 29     | LER/ISF      | 8      |
|                                               | Startversagen                                 | 9,5-6/h              | 3,9    | GRS | 9                           |         |        |         |        |              |        |
| Ventilator Naßkühlturm (Dauerbetrieb) P<100kW | fördert nicht                                 | 4,8-5/h              | 3      | GRS | 22                          | 3,6-7/h | 1,6    | 1,2-7/h | 29     | LER/ISF      | 8      |
| (Standby)                                     | startet nicht                                 | 2,4-5/h              | 6      | GRS | 21                          | 7,0-9/h | 42     | 4,7-8/h | 30     | LER/ISF      | 8      |

| System                                                 | Einflußgrößen                                 | unabhängige Ausfälle |        |         | Gr<br>Kp | Rate für abhängige Ausfälle |     |         |     | Quelle    | Reparaturzt. |            |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------|--------|---------|----------|-----------------------------|-----|---------|-----|-----------|--------------|------------|
|                                                        |                                               | Rate (Wahrsch)       | Quelle |         |          | 2v4                         | 4v4 |         |     |           | MTTR         | Quelle     |
| Komponente                                             | Ausfallart                                    | Median               | f95    |         |          | Median                      | f95 | Median  | f95 |           | (h)          |            |
| DE-Notbespeisung<br>(Standby)                          | p≤80bar<br>d=50...100mm<br>T=90...200°C       |                      |        |         |          |                             |     |         |     |           |              |            |
| Notspeisepumpe<br>P≤1000kW                             | Startversagen                                 | 2,5-5/h              | 3      | GRS     | 11       | 7,0-9/h                     | 42  | 4,7-8/h | 30  | LER/ISF   | 8            | /3/,<br>F3 |
|                                                        | Betriebsversagen                              | 1,1-3/h              | 9)     | 3       | GRS      | 12                          |     |         |     |           | 8            |            |
| Freilauf-Rückschlag-<br>ventil                         | Hauptweg öffnet/schließt n.                   | 4,2-7/h              | 3      | GRS     | 63       | 1,3-9/h                     | 40  | 1,2-8/h | 5   | =RSV      | 8            |            |
|                                                        | Bypass öffnet nicht,<br>obwohl Hauptweg zu    | 1,7-7/h              | 3      | GRS     | 64       | 3,0-9/h                     | 36  | 1,1-8/h | 5   | MOV o. An | 8            |            |
| Motor-Absperrventil (Notspw.-<br>-Zirkulationsleitung) | öffnet/schließt nicht                         | 3,0-6/h              | 3,5    | NWAZKW  | 35       | 1,7-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| Motor-Absperrventil (Not-<br>Frischdampfleitung)       | öffnet/schließt nicht                         | 8,0-6/h              | 3      | HauptFD | 33       | 1,7-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| "                                                      | öffnet ni. nach Schließen                     | 30%                  |        | ISF     |          |                             |     |         |     |           |              |            |
| Motor-Absperrventil<br>(Kondensatkreis)                | öffnet/schließt nicht                         | 3,0-6/h              | 3,5    | NWAZKW  | 35       | 1,7-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| Motor-Regelventil                                      | öffnet/schließt/regelt nicht                  | 1,0-5/h              | 4,7    | GRS     | 45       | 1,7-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| Abblaseregelventil (Mot)                               | öffnet/schließt/regelt nicht                  | 1,0-5/h              | 4,7    | GRS     | 45       | 1,7-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| NWA-Zwischenkühlwasserkreis<br>(Standby)               | d=50...100mm<br>T=90...200°C<br>p=10... 40bar |                      |        |         |          |                             |     |         |     |           |              |            |
| Umwälzpumpe<br>P=50...1000kW                           | Startversagen                                 | 1,2-5/h              | 3      | GRS     | 13       | 7,0-9/h                     | 42  | 4,7-8/h | 30  | LER/ISF   | 8            |            |
|                                                        | Betriebsversagen                              | 1,3-4/h              | 8)     | 3       | GRS      | 14                          |     |         |     |           | 8            |            |
| Motor-Absperrventil                                    | öffnet/schließt nicht                         | 3,0-6/h              | 3,5    | GRS     | 35       | 1,6-8/h                     | 23  | 1,1-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
| Rückschlagklappe                                       | öffnet nicht                                  | 1,7-7/h              | 3      | GRS     | 57       | 1,3-9/h                     | 40  | 1,2-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
|                                                        | schließt nicht                                | 4,2-7/h              | 3      | GRS     | 58       | 3,4-9/h                     | 30  | 1,2-8/h | 5   | LER/ISF   | 8            |            |
|                                                        | innere Leckage                                | 1,9-6/h              | 3      | GRS     | 59       |                             |     |         |     |           | 8            |            |

3.5-5

| System                                                                                    | Einflußgrößen                | unabhängige Ausfälle |        |     | Gr<br>Kp | Rate für abhängige Ausfälle |     |               |     | Reparaturzt. |             |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|--------|-----|----------|-----------------------------|-----|---------------|-----|--------------|-------------|
|                                                                                           |                              | Rate (Wahrsch)       | Quelle |     |          | 2v4<br>Median               | f95 | 4v4<br>Median | f95 | Quelle       | MTTR<br>(h) |
| Komponente                                                                                | Ausfallart                   | Median               | f95    |     |          |                             |     |               |     |              |             |
| Lüftungsanlagen                                                                           |                              |                      |        |     |          |                             |     |               |     |              |             |
| Ventilator, Zu/Abluft, Volumenstrom > 50000 m³/h (Dauerbetrieb)                           | fördert nicht                | 6,2-5/h              | 3      | GRS | 24       |                             |     |               |     |              | 8           |
| Ventilator, Umluft, Volumenstrom < 50000 m³/h (Dauerbetrieb)                              | fördert nicht                | 3,5-5/h              | 3      | GRS | 26       |                             |     |               |     |              | 8           |
| Motor-Absperrklappe                                                                       | öffnet/schließt nicht        | 3,5-5/h              | 3      | GRS | 77       |                             |     |               |     |              |             |
| SS-Absperrklappe                                                                          | öffnet/schließt nicht        | 3,7-5/h              | 3      | GRS | 79       |                             |     |               |     |              |             |
| Motor-Regelklappe                                                                         | öffnet/schließt/regelt nicht | 9,4-5/h              | 3      | GRS | 81       |                             |     |               |     |              |             |
| Rückschlagklappe                                                                          | schließt nicht               | 3,0-7/h              | 4,7    | GRS | 84       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | innere Leckage               | 3,7-6/h              | 3      | GRS | 85       |                             |     |               |     |              |             |
| Druckstoßventil (schließt bei Druckwelle), NW > 250mm                                     | schließt nicht               | 3,0-6/h              | 4      | GRS | 88       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | öffnet nicht wieder          | 1,0-2/Anf            | 4      | GRS | 87       |                             |     |               |     |              |             |
| Druckstoßklappe (öffnet bei Druckwelle), NW 1000...2000mm                                 | öffnet nicht                 | 1,0-6/h              | 4      | GRS | 89       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | schließt nicht wieder        | 1,0-2/Anf            | 4      | GRS | 90       |                             |     |               |     |              |             |
| Feinfilter                                                                                | Verstopfung                  | 3,1-5/h 4)           | 3      | GRS | 95       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Leckage nach außen           | 3,2-6/h              | 3      | GRS | 96       |                             |     |               |     |              |             |
| Schwebstofffilter                                                                         | Verstopfung                  | 3,1-5/h 4)           | 3      | GRS | 95       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Leckage nach außen           | 3,2-6/h              | 3      | GRS | 96       |                             |     |               |     |              |             |
| Aktivkohlefilter                                                                          | Verstopfung                  | 5)                   |        | GRS |          |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Leckage nach außen           | 3,2-6/h              | 3      | GRS | 96       |                             |     |               |     |              |             |
| Abscheidearmatur                                                                          | öffnet/schließt nicht        | 11)                  |        | GRS |          |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | scheidet nicht ab            | 1,0-5/h              | 3      | GRS | 93       |                             |     |               |     |              |             |
| Sicherheitsklappe (Brandschutz)                                                           | öffnet/schließt nicht        | 3,7-5/h              | 3      | GRS | 91       |                             |     |               |     |              |             |
| Verschiedenes                                                                             |                              |                      |        |     |          |                             |     |               |     |              |             |
| Berstscheibe, Betriebsdruck << 70bar, T=260°C, d=50...100mm, Berstdruck > 70bar (Standby) | öffnet nicht                 | 1,0-6/h              | 4      | GRS | 73       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | öffnet vorzeitig             | 1,0-6/h              | 4      | GRS | 74       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Leckage nach außen           | 1,3-6/h              | 4      | GRS | 75       |                             |     |               |     |              |             |
| Oberflächenwärmetauscher (flüssig/flüssig)                                                | verstopft                    | 1,1-6/h              | 3      | GRS | 97       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Betriebsausfall              | 1,5-5/h              | 3      | GRS | 98       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | Leckage nach außen           | 4,8-6/h              | 3      | GRS | 99       |                             |     |               |     |              |             |
| Kolbenverdichter                                                                          | Startversagen                | 1,7-5/h              | 3      | GRS | 27       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | fördert nicht                | 3,6-4/h 6)           | 3      | GRS | 28       |                             |     |               |     |              |             |
| Sicherheitsventil, federbelastet                                                          | öffnet nicht                 | 1,0-7/h              | 4,7    | GRS | 71       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | schließt nicht               | 3,0-7/h              | 3      | GRS | 70       |                             |     |               |     |              |             |
|                                                                                           | öffnet ohne Anforderung      | 4,0-7/h              | 3      | GRS | 72       |                             |     |               |     |              |             |

| System                                                               | Einflußgrößen                |             | unabhängige Ausfälle |        | Gr   | Rate für abhängige Ausfälle |         |         |         | Reparaturzt. |           |          |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------|----------------------|--------|------|-----------------------------|---------|---------|---------|--------------|-----------|----------|
| Komponente                                                           | Ausfallart                   |             | Rate (Wahrsch)       | Quelle | Kp   | 2v4                         |         | 4v4     |         | Quelle       | MTTR      | Quelle   |
|                                                                      |                              |             | Median               | f95    |      | Median                      | f95     | Median  | f95     |              | (h)       |          |
| Elektrische Energieversorgung                                        |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| Generatorschalter                                                    |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 27kV 10kA                                                            | öffnet nicht                 |             | 2,0-6/h              | 4      | GRS  | 121                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 10kV 5kA                                                             | öffnet nicht                 |             | 2,0-6/h              | 4      | GRS  | 121                         |         |         |         |              | 8         |          |
| Leistungsschalter                                                    |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 10kV 500A (Schieneneinspeisg)                                        | ö.n./s.n./s.n.wieder         |             | 6,0-7/h              | 4      | GRS  | 123                         | 1,8-9/h | 44      | 1,3-8/h | 44           | LER/ISF   | 8        |
| 10kV 50A (Großverbr.-Abzwg.)                                         | ö.n./s.n./s.n.wieder         |             | 8,0-6/h              | 4      | GRS  | 125                         | "       | "       | "       | "            | "         | 8        |
| 0,4kV 3kA (Schieneneinspeisg)                                        | ö.n./s.n./s.n.wieder         |             | 6,0-7/h              | 4      | GRS  | 127                         | "       | "       | "       | "            | "         | 8        |
| 0,4kV 200A (Schieneneinspeisg)                                       | ö.n./s.n./s.n.wieder         |             | 6,0-7/h              | 4      | GRS  | 127                         | "       | "       | "       | "            | "         | 8        |
| Schütz                                                               |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 0,4kV 40- 60A                                                        | Verlust der Hauptfunktion    |             | 9,0-7/h              | 10     | GRS  | 129                         | 1,0-8/h | 26      | 5,0-9/h | 26           | geschätzt | 8        |
| 0,4kV 300-460A                                                       | Verlust der Hauptfunktion    |             | 1,0-6/h              | 10     | GRS  | 129                         | "       | "       | "       | "            | 1%/ 0,5%  | 8        |
| Strombegrenzungsdrössel                                              |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 10kV 1600A                                                           | Kurzschluß/Schutzabschaltung |             | <1,0-6/h             | 4      | GRS  | 131                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 3kV 1600A                                                            | Kurzschluß/Schutzabschaltung |             | <1,0-6/h             | 4      | GRS  | 133                         |         |         |         |              | 8         |          |
| Transformator                                                        |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 380/27kV                                                             | 660MVA(Block)                | KS/Schutzab | 2,5-5/h              | 4      | GRS  | 135                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 27/10/10kV                                                           | 50/30/30MVA(Eigenbedarf)     | KS/Schutzab | 1,1-5/h              | 4      | GRS  | 137                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 110/10/10kV                                                          | 50/30/30MVA(Anfahr)          | KS/Schutzab | 1,1-5/h              | 4      | GRS  | 137                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 10/0,4kV                                                             | 2MVA(Eigenbedarf)            | KS/Schutzab | 3,3-6/h              | 4      | GRS  | 139                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 10/0,7/0,4kV                                                         | 2/1,2/1,2MVA(Eigenbedarf)    | KS/Schutzab | 3,3-6/h              | 4      | GRS  | 139                         |         |         |         |              | 8         |          |
| Frequenzumformer                                                     |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 10kV / 2kV 10 MVA (He-Gebläse)                                       | Totalausfall                 |             | 1,0-4/h              | 4      | GRS  | 141                         |         |         |         |              | 8         |          |
| 220V /220V 0,1MVA (gesich. Schiene)                                  | Totalausfall                 |             | 7,2-5/h              | 4      | GRS  | 143                         |         |         |         |              | 8         |          |
| Notstromdiesel                                                       |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
| 10 kV 5 MVA                                                          | Startversagen                |             | 2,2-3/Anf            | 4,4    | GRS  | 145                         | W=1,6-4 | 24      | W=3,4-5 | 26           | LER-ISF   | 12) /13/ |
|                                                                      | Betriebsversagen             |             | 4,0-3/h              | 3      | GRS  | 146                         |         |         |         |              |           | 13) /13/ |
| 10 kV 1,5 MVA                                                        | Startversagen                |             | 2,2-3/Anf            | 4,4    | GRS  | 145                         | W=1,6-4 | 24      | W=3,4-5 | 26           | LER-ISF   | 12) /13/ |
|                                                                      | Betriebsversagen             |             | 4,0-3/h              | 3      | GRS  | 146                         |         |         |         |              |           | 13) /13/ |
| 0,7kV 0,27MVA                                                        |                              | 10)         |                      |        | GRS  | 147                         |         |         |         |              |           |          |
| Batterie, ungenügende Spannungs-<br>oder Stromabgabe bei Anforderung |                              |             |                      |        |      |                             |         |         |         |              |           |          |
|                                                                      |                              |             | 1,0-3/Anf            | 3      | /21/ | 149                         |         | W=4,4-4 | 10      | /21/         |           |          |

| System                                                     | Einflußgrößen                              | unabhängige Ausfälle |        | Gr   | Rate für abhängige Ausfälle |                         |        |         | Reparaturzt. |                |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------|--------|------|-----------------------------|-------------------------|--------|---------|--------------|----------------|
|                                                            |                                            | Rate (Wahrsch)       | Quelle | Kp   | eine Meßkanalgruppen        | mehrere Meßkanalgruppen | Quelle | MTTR    | Quelle       |                |
| Komponente                                                 | Ausfallart                                 | Median               | f95    |      | Median                      | f95                     | Median | f95     | (h)          |                |
| <b>Leittechnik</b>                                         |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
| <b>Druckmessung mit Differenzdruckgeber (Dauerbetrieb)</b> |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | Kennatendrift                              | 1,6-5/h              | 4,7    | GRS  | 161                         |                         |        |         |              |                |
|                                                            | Totalausfall                               | 1,5-5/h              | 3      | GRS  | 162                         |                         |        |         |              |                |
|                                                            | hängt                                      | 3,0-7/h              | 3      | /3/  | 163                         | 7,0-8/h                 | 4      | 7,0-9/h | 4            | /3/, F2, S.104 |
| <b>Temperaturmessung</b>                                   |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | Kennatendrift                              | 2,5-6/h              | 1,2    | /18/ | 165                         |                         |        |         |              |                |
|                                                            | Totalausfall                               | 4,8-6/h              | 1,2    | /18/ | 166                         | 7,0-8/h                 | 4      | 7,0-9/h | 4            | /3/            |
| <b>Grenzwertgeber XS312</b>                                |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | fälschl. Pulsausfall                       | 4,2-6/h              | 3      | BBC  | 167                         |                         |        |         |              |                |
|                                                            | gibt fälschl. Puls ab                      | 2,0-8/h              | 3      | /3/  | 168                         |                         |        |         |              |                |
|                                                            | Justierungsfehler (starke Kopplung)        | 0,8-2/Anf            | 3      | /3/  | 0                           | W=0,8-3                 | 3      | W=1,3-4 | 3            | /3/            |
|                                                            | Justierungsfehler (mittlere Kopplung)      | 0,8-2/Anf            | 3      | /3/  | 0                           |                         |        | W=2,3-5 | 3,5          | /3/            |
| <b>Inverter XS316+XS304</b>                                |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | fälschl. Pulsausfall (=keine Verriegelung) | 5,0-7/h              | 3      | BBC  | 169                         |                         |        |         |              |                |
| <b>Betätigungsbaustein XS313</b>                           |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | schaltet nicht                             | 8,0-7/h              | 3      | HRB  | 171                         |                         |        |         |              |                |
| <b>Relais allgemein</b>                                    |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | schaltet nicht                             | 5,0-7/h              | 2,4    | /3/  | 173                         |                         |        |         |              |                |
| <b>Abschlußrelais für Reaktorschneidabschaltung</b>        |                                            |                      |        |      |                             |                         |        |         |              |                |
|                                                            | hängen (CCF)                               |                      |        |      | 175                         |                         |        | W=1,2-6 | 4,5          | /3/            |



| System                                                                              | Einflußgrößen             | unabhängige Ausfälle |        |      | Gr<br>Kp | Rate für abhängige Ausfälle |     |               |     | Reparaturzt.<br>MTTR<br>(h) | Quelle |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------|--------|------|----------|-----------------------------|-----|---------------|-----|-----------------------------|--------|
|                                                                                     |                           | Rate (Wahrsch)       | Quelle |      |          | 2v4<br>Median               | f95 | 4v4<br>Median | f95 |                             |        |
| Komponente                                                                          | Ausfallart                | Median               | f95    |      |          | Median                      | f95 | Median        | f95 |                             |        |
| Primärkreislauf                                                                     |                           |                      |        |      |          |                             |     |               |     |                             |        |
| Helium-Hauptgebläse                                                                 | Betriebsversagen          | 1,3-5/h              | 10     | CEGB | 30       |                             |     |               |     | 280                         | CEGB   |
| Gebälse-Absperrorgan,<br>hydraulisch                                                | öffnet nicht              | 1,3-2/Anf            | 10     | =SSA | 101      |                             |     |               |     |                             |        |
| "                                                                                   | schließt nicht            | 5,0-3/Anf            | 10     | =SSA | 101      |                             |     |               |     |                             |        |
| motorbetätigt                                                                       | öffnet/schließt nicht     | 1,0-5/h              | 10     | 15)  | 102      |                             |     |               |     |                             |        |
| "                                                                                   | öffnet ni. nach Schließen | 30%                  |        | =MOV | 102      |                             |     |               |     |                             |        |
| Auslösende Ereignisse                                                               |                           |                      |        |      |          |                             |     |               |     |                             |        |
| Netzanschluß 110 kV                                                                 | Unterbrechung             |                      |        |      |          |                             |     |               |     |                             |        |
| (nach VDEW Störungs- und Schadensstatistik 1968:<br>1km Freileitung + 1 Schaltfeld) |                           | 1,4-6/h              | 10     | VDEW | 151      |                             |     |               |     |                             |        |
| Netzausfall am Kraftwerksstandort                                                   |                           | 1,0-5/h              | 3      | /3/  | 0        |                             |     |               |     | 14)                         | AIPA   |
| Turbinenschnellabschaltung (bei Jährl. Test des)                                    |                           | 1,1-4/h              | 3      |      | 0        |                             |     |               |     |                             |        |
| Reaktorschnellabschaltung (Hauptkühlsystems )                                       |                           | 1,1-4/h              | 3      |      | 0        |                             |     |               |     |                             |        |
| Abfangen auf elektrischen Eigenbedarf versagt                                       |                           | 0,1                  | 3      | /3/  | 153      |                             |     |               |     |                             |        |

Hinweis: Bezüglich Literaturangaben, auf die in dieser Tabelle Bezug genommen wird, und weiterer Einzelheiten sei auf folgenden Bericht verwiesen:

Hennings, W.: Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte. Ein Statusbericht.  
Band 1: Ereignisabläufe, Systemzuverlässigkeiten, Freisetzungshäufigkeiten.  
JÜL-SPEZ-388 Band 1, Mai 1987



## 3.6 Personalhandlungen

von  
J. Marx

### Inhalt

|                                                                       | Seite  |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|
| 3.6.1 Einleitung                                                      | 3.6-1  |
| 3.6.2 Schließen der Motorarmatur vor<br>AuA-Entlastungsregelstation   | 3.6-1  |
| 3.6.3 Nicht-Öffnen der Motorarmatur vor<br>AuA-Entlastungsregelventil | 3.6-5  |
| 3.6.4 NWA mit dem An- und Abfahrssystem des<br>anderen Reaktors       | 3.6-6  |
| 3.6.5 Umschaltung auf den Zwischenkühler                              | 3.6-9  |
| Literatur                                                             | 3.6-13 |



### 3.6.1 Einleitung

Die in diesem Kapitel bewerteten Personalhandlungen beschränken sich auf diejenigen, die in den Kapiteln Transienten (3.2) und Dampferzeugerlecks (3.3) angesprochen werden.

Die Bewertung der Personalhandlungen erfolgte bezüglich der Modellierung und der Basisdaten nach /1/. Da sich die Anlage noch im Planungsstadium befindet, standen keine detaillierten Unterlagen zur Bewertung der Personalhandlungen zur Verfügung, so daß die meisten Ergebnisse auf Annahmen basieren. Die Annahmen wurden insbesondere bezüglich der Wartengestaltung und der Aktionen in der Warte in Anlehnung an THTR-Verhältnisse getroffen. Hierbei wurde personelle Kopplung im Sinne von /1/ berücksichtigt. Basisfehlerwahrscheinlichkeiten für Handlungen, bei denen keine Daten nach /1/ zur Verfügung standen, wurden geschätzt.

### 3.6.2 Schließen der Motorarmatur vor AuA-Entlastungsregelstation

Die hier betrachtete Störfallkette beinhaltet den Ausfall der Druckabsenkung über die Hochdruck-Umleitstation (4) (Kap. 3.3.2.5.1). Die Druckabsenkung erfolgt daher über die Entlastungsregelstation des AuAS (9), die nach der Druckabsenkung fälschlich in Offenstellung bleibt (Abb. 3.5-1). Dieses Schließversagen führt zu einem permanenten Wasserverlust aus dem AuAS. Zusätzlich wird unterstellt, daß die Absperrarmatur auf der Dampfseite des defekten Stranges (5) auf Anforderung nicht schließt. Diese Ereigniskombination führt nach einiger Zeit zu einem Druckabfall auf der Sekundärseite unter den Primärkreisdruck, so daß Primärkreishelium über das DE-Leck in die Frischdampfleitung strömt und über die offene Entlastungsregelstation in die Umgebung gelangt. Um die Aktivitätsabgabe zu begrenzen, könnte die Motorarmatur (14) vor der Entlastungsregelstation geschlossen werden.

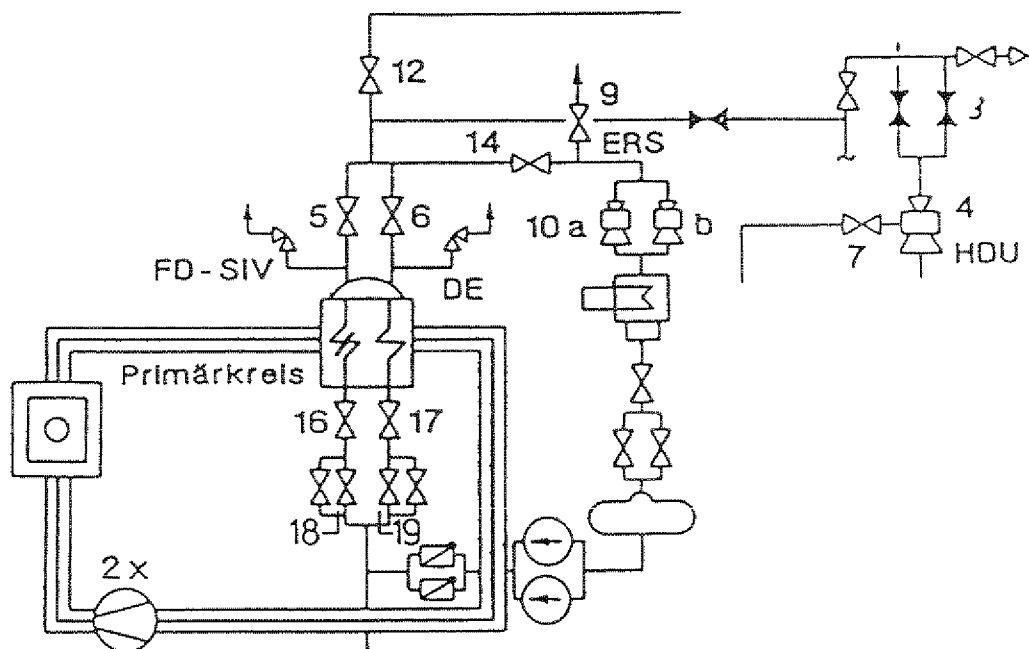


Abb. 3.6-1: Ausschnitt AuAS

In den folgenden Ausführungen werden die Möglichkeiten diskutiert, die Störfallsituation zu erkennen und Gegenmaßnahmen einzuleiten.

- Durch die offene Entlastungsregelstation wird kontinuierlich Wasser und Dampf nach außen strömen, so daß der Wasserspiegel im Vorratsbehälter des AuAS ständig sinkt. So wird angenommen, daß das Absinken des Wasserspiegels in der Warte signalisiert wird. Da ebenso gut ein Leck im Vorratsbehälter Ursache des Signals sein kann, kann man ein fälschliches Offenbleiben der Entlastungsregelstation nicht eindeutig erkennen.
- Das ständige Dampfabblassen über Dach ist mit einem hohen Lärmpegel verbunden. Falls das Abblasegeräusch wegen der räumlichen Distanz zur Warte dort überhört wird, wird von außen eine Meldung an die Warte erfolgen. Das Wartepersonal hat jetzt die Möglichkeit, eindeutig zu erkennen, daß der Kühlkreislauf an der offenen Entlastungsregelstation unterbrochen ist.

Bei offener Entlastungsregelstation kann die Zwangskühlung mit dem AuAS ca. 2,5 h aufrechterhalten werden. Danach besteht die Möglichkeit, mit dem AuAS des anderen Reaktors weiterzukühlen oder die Nachwärme nur über das Betonkühlsystem abzuführen. Es wird angenommen, daß die NWA zunächst mit dem defekten AuAS weitergeführt wird und keine Gegenmaßnahmen erfolgen.

Im weiteren Störfallablauf wird der Druck im Sekundärkreis unter den Primärkreisdruck fallen, so daß Primärkreishelium in die Frischdampfleitung gelangt und über das offene Entlastungsregelventil mit Wasser und Dampf nach außen strömt. Durch Aktivitätsmeßstellen könnte in der Warte die Aktivität signalisiert werden. Da aber Störfälle, bei denen eine Entlastung des Primärkreises in den Sekundärkreis erfolgt (Häufigkeit  $5 \cdot 10^{-7}$  pro Anlagenjahr), vermutlich nicht mehr zu den Auslegungsstörfällen gehören, wird angenommen, daß an der Entlastungsregelstation keine Aktivitätsmessung vorgesehen ist.

Die Aktivitätsfreisetzung kann jetzt nur über die Umgebungsüberwachung festgestellt werden, so daß die Aktivitätsmeldung erst verspätet in der Warte eintrifft. Dort wird nach der Ursache der Aktivitätsfreisetzung gesucht, so daß von Beginn der Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung bis zur Diagnose oder Störfallursache - fälschliches Offenbleiben der Absperrarmatur auf der Frischdampfseite des defekten Dampferzeugers - ein großes Zeitfenster angenommen werden muß.

Bei der Betrachtung des zeitlichen Ablaufs der vorgegebenen Störfallkette wird mit einer Entlastung des Primärkreises in den Sekundärkreis erst nach ca. 90 min. zu rechnen sein. Da der Wasservorrat des AuAS nur für ca. 2,5 h ausreicht, wird ca. 1 h lang Aktivität ausströmen, bis die NWA mit dem AuAS unterbrochen wird.

Hierbei sind zwei mögliche Fälle zu betrachten:

- 1) Die Motorarmatur (14) bleibt bei Ausfall AuAS geöffnet.

Die Aktivitätsfreisetzung dauert so lange, bis der Primärkreislauf vollständig entlastet ist. Im ungünstigsten Fall

kann die Druckentlastung bis zu 30 h dauern, so daß ein Schließen durch das Personal nötig wird.

- 2) Es wird nachträglich vorgesehen, daß bei Ausfall AuAS die vorgelagerte Motorarmatur (14) automatisch zu schließen ist. In diesem Fall dauert die Aktivitätsabgabe ca. 1 h, bis dann durch Schließen von (14) das Ausströmen unterbrochen wird. Innerhalb dieser Zeit ist eine störfalleindämmende Maßnahme des Wartenpersonals nicht zu erwarten.

#### Armaturenstellung

Automatische Aktionen zur Störfallbeherrschung sind im Betriebs- handbuch beschrieben. Das Personal hat die Möglichkeit, diese in der Warte mitzuverfolgen, so daß Störungen im Ablauf bemerkt werden können. Bei der hier zugrunde liegenden Störfallkette wird unterstellt, daß das Personal das Nichtschließen der Frischdampfarmatur zunächst nicht bemerkt hat. Hierfür werden zwei Möglichkeiten betrachtet.

- 1) Das Signal wurde übersehen.
- 2) Das Signal zeigte falsch an.

Bei 1) besteht die Möglichkeit eines zufälligen Erkennens während des weiteren Störfallablaufes.

Bei 2) steht in der Warte das Signal 'Armatur geschlossen' an, obwohl die Armatur in Offenstellung ist. Diese Fehlmeldung steht z.B. an, wenn der Grenzwertgeber defekt ist und deshalb die Armatur nicht vollständig schließt. In diesem Fall besteht für den Operateur keine Möglichkeit, das Offenbleiben der Armatur zu erkennen.

#### Durchführung der Handmaßnahmen

Wie die Ausführungen zeigen, wird das Erkennen des Störfalles der schwierigste Teil der Personalhandlung sein, so daß die Durchführung der relativ einfachen Handmaßnahme keinen wesentlichen Beitrag zur Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit liefern würde und deshalb vernachlässigt werden kann.



Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird die Personalhandlung nur argumentativ erfaßt.

Die Diskussion der verschiedenen Möglichkeiten zeigt, daß es zur Beherrschung der vorgegebenen Störfallkette sinnvoll wäre, bei Ausfall AuAS die vorgelagerte Motorarmatur (14) automatisch zu schließen. Dadurch würde innerhalb kurzer Zeit eine Aktivitätsabgabe unterbunden. Beim jetzigen Konzept ist kein Schließen vorgesehen, so daß die Aktivitätsabgabe länger andauern würde, weil eine störfalleindämmende Maßnahme durch das Personal, eingeleitet durch die Umgebungsüberwachung, mehr Zeit in Anspruch nehmen würde. Ein zufälliges Erkennen der Störfallkette aufgrund der Armaturenstellung, das eine frühzeitigere Einleitung der Maßnahmen zur Folge hätte, ist schätzungsweise höchstens mit  $2 \cdot 10^{-1}$  zu bewerten, so daß die Fehlerwahrscheinlichkeit der Personalhandlung mit Sicherheit höher anzusetzen ist als die Unverfügbarkeit des automatischen Schließens der Motorarmatur (14).

### 3.6.3 Nicht-Öffnen der Motorarmatur vor AuA-Entlastungsregulventil

Das Motorventil in der Dampfleitung zum AuAS ist im Normalbetrieb geöffnet. Zum Testen des AuAS wird es monatlich zugefahren und anschließend wieder geöffnet, wobei letzteres unbemerkt unterlassen werden kann. Die falsche Ventilstellung wird jedoch bei einer automatischen Anforderung des AuAS durch einen zusätzlichen Öffnungsbefehl automatisch korrigiert, es sei denn, das Ventil selbst ist defekt.

Als Operateuraktion ist zu bewerten, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Öffnungsversagen unmittelbar nach dem Test vom Operateur unentdeckt bleibt.

Für die Testprozedur werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Prozedur liegt schriftlich vor.
- Alle Aktionen können von der Warte aus durchgeführt werden.
- Für die Durchführung wird eine personelle Redundanz mit mittlerer Kopplung zwischen zwei Operateuren angenommen.

Für die Wahrscheinlichkeit, daß bei der Durchführung einer Testprozedur eine Anweisung übersehen oder nicht korrekt durchgeführt wird, wird nach Tabelle (20-6/6) /1/ ein Wert von  $5 \cdot 10^{-2}$  angesetzt. Aufgrund der obigen Randbedingungen und der daraus folgenden Beziehung

$$P = 0,05 \cdot \frac{1 + 6 \cdot 0,05}{7}$$

ergibt sich eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $9,3 \cdot 10^{-3}$  (EF=5).

Unter Einbeziehung des Ventil-Öffnungsversagens ergibt die Auswertung des in Kap. 3.3 Abb. 11 dargestellten Fehlerbaumeinganges AHIS01 eine Wahrscheinlichkeit für das Nichterkennen des Öffnungsversagens nach der Testprozedur von  $5 \cdot 10^{-5}$  (Erwartungswert, EF=7).

#### 3.6.4 NWA mit dem An- und Abfahrssystem des anderen Reaktors

Das An- und Abfahrssystem (AuAS) des vom Störfall betroffenen Block B geht nach automatisch erfolgter Anforderung aufgrund eines Defektes nicht in Betrieb. Um eine gesicherte NWA zu gewährleisten, hat der Operateur die Möglichkeit, auf das AuAS des anderen Reaktorblocks umzuschalten. Hierzu sind der Block A abzufahren, die Armaturen in den Querverbindungen zu öffnen und die Nachwärme mit einem AuAS für beide Reaktoren abzuführen. In den folgenden Ausführungen werden die einzelnen Aktionen beschrieben und quantifiziert.

##### Wahrnehmung der Störung und Diagnose 'Ausfall AuAS Block B'

Es wird vorausgesetzt, daß automatische Aktionen zur Störfallbeherrschung im Betriebshandbuch (BHB) beschrieben werden, so daß der Operateur die Möglichkeit hat, diese in der Warte mitzuverfolgen. Hierfür kann eine personelle Redundanz mittlerer Kopplung zum Schichtleiter angenommen werden.

Durch schrittweise Beobachtung kann der Operateur das Aufleuchten von Signalen, die nicht zum ordnungsgemäßen Störfallablauf

gehören, bemerken und anschließend mittels BHB die Störungssache diagnostizieren. Für beide Arbeitsschritte wird nach (20-6/4) /1/ je eine Basisfehlerwahrscheinlichkeit von  $5 \cdot 10^{-3}$  angesetzt, die wegen der erhöhten Streßsituation zu verdoppeln ist. Unter Berücksichtigung der personellen Redundanz ergibt sich ein Wert von

$$P_{50} = 1 \cdot 10^{-2} \left( \frac{1 + 6 \cdot 10^{-2}}{2} \right) = 1,5 \cdot 10^{-3}$$

Wird die Störung nicht bei der Verfolgung der automatischen Aktionen mittels BHB erkannt, besteht die Möglichkeit, anhand von anstehenden Signalen die Störung zufällig zu erkennen. Wegen des vorliegenden Wassereinbruchstörfalles werden in der Warte eine Vielzahl von Anzeigen gleichzeitig aufleuchten. Da die Anzahl nicht bekannt ist, wird angenommen, daß ca. 20-40 Signale gleichzeitig anstehen, so daß nach (20-23/13) /1/ eine Basisfehlerwahrscheinlichkeit von  $2 \cdot 10^{-1}$  angesetzt werden kann. Nimmt man an, daß zwei Operateure unabhängig voneinander das Signal bemerken können, verringert sich die Fehlerwahrscheinlichkeit auf  $4 \cdot 10^{-2}$ . Ein Signal, das auf einen Ausfall des AuAS hinweist, ist z.B. kein oder unzureichender Speisewasserdurchsatz.

Nachdem das Signal bemerkt worden ist, wird der Schichtleiter informiert. Da das Signal nicht eindeutig auf einen Ausfall des AuAS hinweist, wird für die Diagnose 'Ausfall des AuAS Block B' ein Wert von  $10^{-1}$  geschätzt. Unter Berücksichtigung der Randbedingungen (Streß, keine trainierte Handlung, personelle Redundanz mittlerer Kopplung) ergibt sich eine Fehlerwahrscheinlichkeit von  $2,8 \cdot 10^{-1}$ .

## 2) Durchführung der Handmaßnahmen

Für die Durchführung der Handmaßnahmen wird vorausgesetzt, daß das Wartenpersonal nach dem Erstellen der Diagnose die entsprechende Anleitung im Betriebshandbuch zur Inbetriebnahme des AuAS vorliegen hat.

Weiterhin wird für alle Handmaßnahmen eine erhöhte Streßsituation angenommen. Der Schichtleiter wird gemeinsam mit einem Operateur die Maßnahmen durchführen. Dabei wird eine personelle Redundanz mit mittlerer Kopplung angenommen.

- RESA des anderen Blockes.

Die Auflösung der RESA liefert, da eine Verwechslung des Schalters oder ein falsches Bedienen so gut wie auszuschließen ist, gegenüber den anderen Teilhandlungen keinen wesentlichen Beitrag zur Fehlerwahrscheinlichkeit und wird deshalb vernachlässigt.

- Öffnen der Verbindungsarmaturen

Für das Betätigen der richtigen Schalter in der Warte wird in Anlehnung an Tabelle (20-12/4) /1/ eine Basisfehlerwahrscheinlichkeit von  $1 \cdot 10^{-3}$  angesetzt. Für das Öffnen der Armaturen wird angenommen, daß der Schalter so lange betätigt werden muß, bis die Armatur vollständig geöffnet ist, so daß für das Öffnen der Armatur nach Tabelle (20-12/10) /1/ eine Fehlerwahrscheinlichkeit von  $3 \cdot 10^{-3}$  angesetzt wird. Unter den oben angenommenen Randbedingungen ergibt sich für die beiden Verbindungsarmaturen jeweils eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit der Handmaßnahmen von

$$P_{50} = 2 \cdot (10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3}) \frac{1+6 (10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3})}{7} = 1,2 \cdot 10^{-3}$$

- Inbetriebnahme AuAS Block A und Abschalten AuAS Block B

Es wird angenommen, daß die Inbetriebnahme AuAS Block A durch Knopfdruck erfolgt und für das Abschalten des AuAS Block B auf jeden Fall die Motorarmatur (Armatur 14 in Bild 3.3.3-1) vor dem Abblaseregelventil geschlossen wird. Zusätzliche Handmaßnahmen hängen von der jeweiligen Situation ab. Für das Betätigen des Knopfes wird nach (20-12/3) /1/ eine Basisfehlerwahrscheinlichkeit von  $1 \cdot 10^{-3}$  und für das Schließen der Motorarmatur ein Wert von  $4 \cdot 10^{-3}$  (siehe Öffnen der Verbindungsarmaturen) angesetzt.

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen ergibt sich insgesamt eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $1,5 \cdot 10^{-3}$ .

Für die Gesamthandlung ist zu berücksichtigen, daß eine schriftliche Anweisung aus dem Betriebshandbuch übersehen oder falsch verstanden werden kann, so daß die Maßnahmen nicht korrekt durchgeführt werden können. Dafür kann nach Tabelle (20-7/2) /1/ eine Basisfehlerwahrscheinlichkeit von  $3 \cdot 10^{-3}$  angesetzt werden, die sich wegen der Streßsituation auf  $6 \cdot 10^{-3}$  erhöht.

Insgesamt ergibt sich für die Operateuraktion 'Zuschaltung des An- und Abfahrsystems des anderen Blockes' eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $1,45 \cdot 10^{-2}$ . Die einzelnen Operateuraktionen und ihre logischen Verknüpfungen sind im Fehlerbaum Abb. 3.6-2 dargestellt.

#### 3.6.5 Umschaltung auf den Zwischenkühler

Beim Ausfall des Nebenkühlwassersystems des Reaktorblockes B können die Zwischenkühler des Betriebskühlwassersystems primär nicht rückgeholt werden. Daher können auch die beiden Zwischenkühler des Betonkühlsystems nicht mehr rückgeholt werden, und somit versagt die Rückkühlkette des Betonkühlsystems. Um den Reaktor nicht abfahren zu müssen, sind die Querverbindungen von Hand zwischen den beiden Betriebskühlwassersystemen vor Ort zu öffnen, so daß die Rückkühlung über den anderen Block erfolgt.

In den folgenden Ausführungen werden die notwendigen Einzelaktionen beschrieben und quantifiziert.

##### - Erkennen der Betriebsstörung

Der Ausfall des Nebenkühlwassersystems wird als Betriebsstörung auf dem Datensichtgerät angezeigt. Da während des normalen Reaktorbetriebes laufend Meldungen auf dem Datensichtgerät zu sehen sind, wird der Operateur nicht kontinuierlich das Gerät beobachten, so daß die Wahrscheinlichkeit für das Nichtbemerken einer Meldung auf  $10^{-1}$  geschätzt wird. Falls der Operateur die Meldung auf dem Datensichtgerät übersehen hat, besteht die Möglichkeit,

ein Signal, das auf die Störung hinweist, in der Warte wahrzunehmen und den Ausdruck des Störfallschreibers gezielt durchzusehen. Aufgrund dieser Annahme wird eine Verbesserung des Wertes um den Faktor 10 auf  $10^{-2}$  angenommen. Der bei der Berechnung angegebene Errorfaktor ist (20-20) /1/ entnommen.

#### - Durchführung der Handmaßnahmen

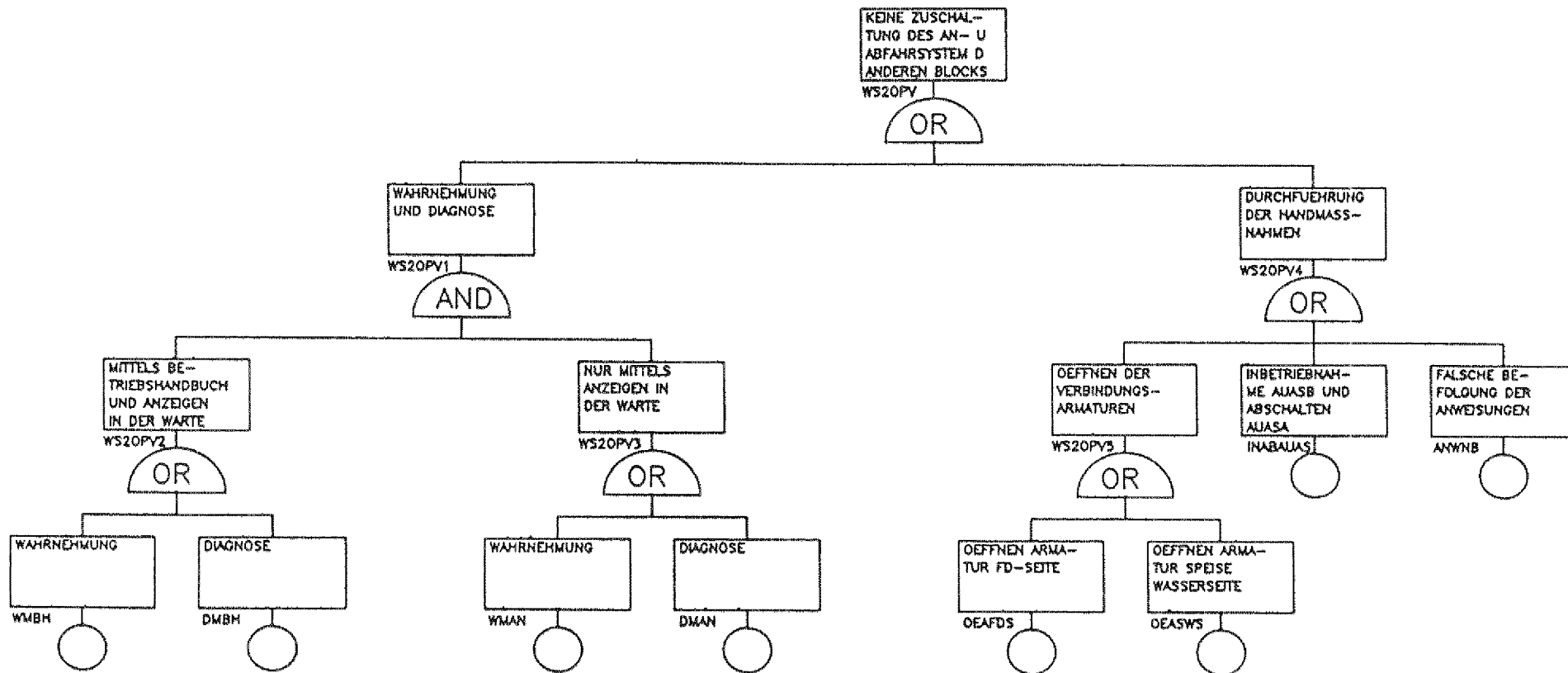
Für die Durchführung der Handmaßnahmen, die im BHB beschrieben sind, werden folgende Annahmen getroffen. Da es sich um Handarmaturen handelt, müssen sie vor Ort geöffnet werden, so daß eine direkte Kontrolle der Handmaßnahmen nicht möglich sein wird.

Es müssen jeweils zwei Ventile geöffnet und zwei geschlossen werden. Für das Öffnen bzw. Schließen wird je Ventil nach (20-13/2) /1/ eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $3 \cdot 10^{-3}$  angesetzt.

Dieser Wert resultiert aus der Annahme, daß beim Verändern einer Ventilstellung, bei der sich das Ventil in einer Gruppe von zwei oder mehr gleich anzusehenden Ventilen befindet, ein Fehler begangen wird. Da mehrere Handmaßnahmen durchgeführt werden müssen, ist zu unterstellen, daß die Anweisung zur Durchführung der Arbeiten unvollständig sein kann. Für das Übersehen eines Arbeitsschrittes wird nach (20-7/3) /1/ eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $1,5 \cdot 10^{-2}$  angesetzt.

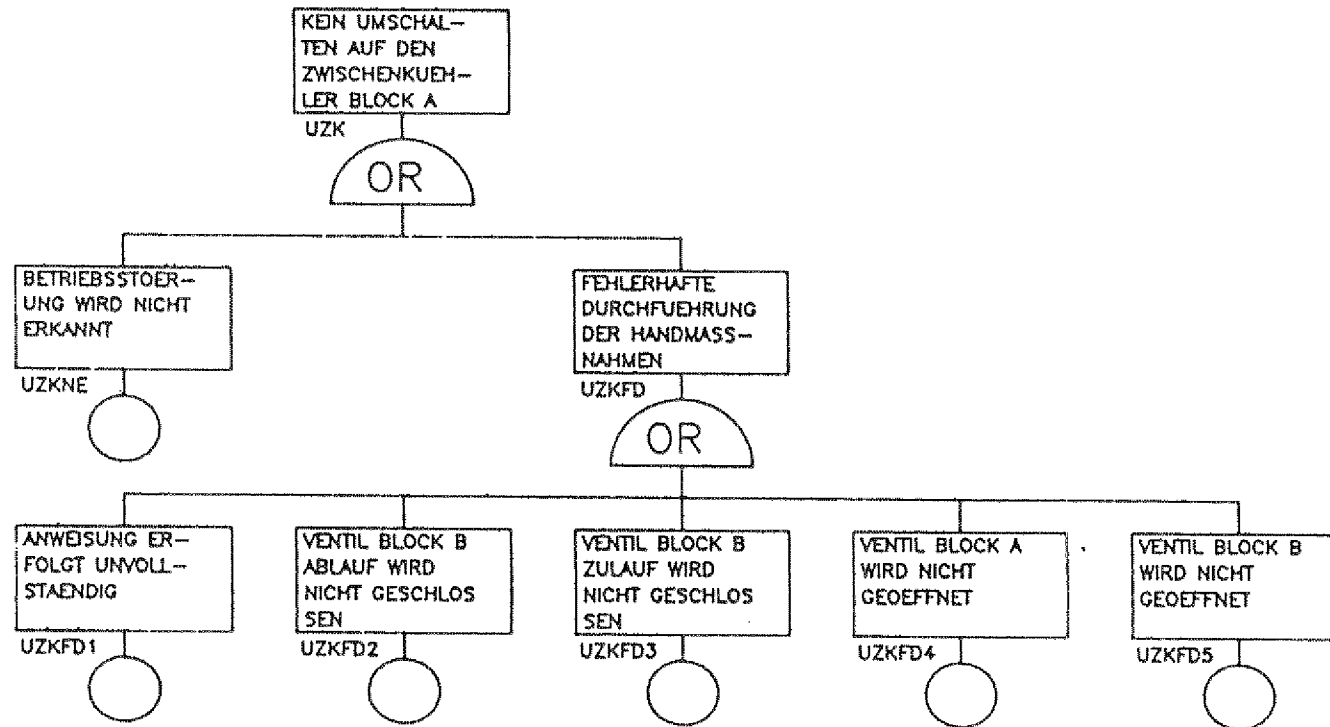
Es wird angenommen, daß die erfolgreiche Durchführung der Handmaßnahmen anhand von Prozeßvariablen (Durchsatz, Temperatur) festgestellt werden kann. Hierfür wird personelle Redundanz angesetzt und für die Korrektur der Maßnahme ein Recovery-Faktor von 0,5, so daß sich die mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit auf  $4,2 \cdot 10^{-3}$  verringert.

Somit ergibt sich für die Operateurmaßnahme 'Umschaltung auf den Zwischenkühler Block 1, um die Rückkühlung des Betonkühlsystems Block 2 zu gewährleisten' insgesamt eine mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit von  $1,4 \cdot 10^{-2}$ . Die einzelnen Operateuraktionen und ihre logischen Verknüpfungen sind im Fehlerbaum Abb. 3.6-3 dargestellt.



3.6-11

Abb. 3.6-2: Fehlerbaum: Keine Zuschaltung des An- und Abfahrssystems des anderen Blocks



3.6-12

Abb. 3.6-3: Fehlerbaum: Kein Umschalten auf den Zwischenkühler Block A



Literatur

- /1/ A.D. Swain, H.E. Guttman  
'Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on  
Nuclear Power Plant Applications'  
NUREG/CR-1278, Aug. 1983



## II. THERMODYNAMIK DES PRIMÄRKREISLAUFES UND KOMPONENTENBELASTUNG

von

W. Jahn, W. Rehm, G. Breitbach

### Inhalt

|                                                                                                                          | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. Thermodynamik des Primärkreises                                                                                       | 1     |
| 1.1 Gestörte Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion bei ausgefallener DE-Bespeisung mit intaktem Flächensystem         | 2     |
| 1.2 Auslegungsgemäße Nachwärmeabfuhr über Naturkonvektion bei Reaktor unter Druck mit dem Flächenkühlsystem              | 2     |
| 1.3 Gestörte Nachwärmeabfuhr ohne Zwangskonvektion bei Druckentlastung des Primärkreises mit bzw. ohne Flächenkühlsystem | 3     |
| 2. Komponentenbelastung                                                                                                  | 4     |
| 2.1 RDB-Verhalten bei Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion und intaktem Flächenkühlsystem                            | 4     |
| 2.2 Verhalten des RDB bei Nachwärmeabfuhr über Naturkonvektion bei Reaktor unter Druck mit dem Flächenkühlsystem         | 4     |
| 2.3 Verhalten des RDB bei Druckentlastung des Primärkreises und Ausfall des Flächenkühlsystems                           | 5     |



## 1. Thermodynamik des Primärkreises

Kühlungsausfälle führen zu einem Ungleichgewicht zwischen Wärme-  
produktion und Wärmeabfuhr und damit zu einem Anstieg der Core-  
temperaturen. Die Auswirkungen auf die Komponenten des Primär-  
kreislaufes, insbesondere auf den Reaktordruckbehälter, hängen  
davon ab, welche Ausfälle im Haupt- oder Flächenkühlsystem unter-  
stellt werden. Für den HTR-100 wurden folgende Kühlfälle  
untersucht:

- Gestörte Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion bei ausge-  
fallener DE-Bespeisung mit intaktem Flächenkühlsystem
- Auslegungsgemäße Nachwärmeabfuhr über Naturkonvektion bei  
Reaktor unter Druck mit dem Flächenkühlsystem
- Gestörte Nachwärmeabfuhr ohne Zwangskonvektion bei Druckent-  
lastung des Primärkreises mit bzw. ohne Flächenkühlsystem.

Die Analyse dieser Kühlfälle wurde auf der Basis des THERMIX-  
Rechenmodells durchgeführt, wobei die Simulationsrechnungen mit  
der THERMIX-CRAY-2D-Version auf dem Vektorrechner der KFA erfolg-  
ten /1/. Die Auswertung der umfangreichen Rechendaten wurde mit  
dem angeschlossenen Plotsystem vorgenommen. Die berechneten Tem-  
peratur- und Strömungstransienten bilden die Ausgangsdaten für  
die Bewertung der Komponentenbelastungen und zur Ermittlung der  
Spaltproduktfreisetzung aus dem Primärkreis (Abb. 1).

Für die Voranalyse wurde die schlanke Coregeometrie mit dem 2D-  
Core-Modul (THERMIX/KONVEK) und der Primärkreis mit dem über dem  
Core angeordneten Dampferzeuger anhand des 1D-Kreislaufmoduls  
(KISMET) simuliert. In Abb. 2 ist schematisch das Rechengitter  
mit den Strömungswegen dargestellt. Die Kugelschüttung wurde  
dabei in ein 2-Zonencore unterteilt, wobei im Außencore die  
4 Reflektornasen volumetrisch und kalorimetrisch homogenisiert  
wurden. Die rotationssymmetrische Modellierung des Cores führt  
im Rahmen der Voranalyse zu einer näherungsweisen Beschreibung  
der thermodynamischen Vorgänge. Der azimuthale Einfluß der Reflek-  
tornasen ist in weiterführenden instationären 3D-THERMIX-Analysen  
genauer zu untersuchen.

Ferner wurde das Übergangsverhalten des Dampferzeugers bei Störungen mit dem transienten Programm SIKAN-E (Version SIKARDE) analysiert, das für die anschließenden THERMIX-Kreislaufanalysen die dafür notwendigen Randbedingungen lieferte.

#### 1.1 Gestörte Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion bei ausgefallener DE-Bespeisung mit intaktem Flächenkühlsystem

Die Nachwärme wird normalerweise über das Hauptkühlsystem abgeführt. Hierzu wurden die Primärkreistransienten bei Reaktor unter Druck für den Fall untersucht, daß bei einem Ausfall der Dampferzeugerbespeisung eine weitere Beheizung des Dampferzeugers durch einen Gebläse-Weiterlauf erfolgt. Die Wärmesenke stellt dann der Flächenkühler dar (Fall 1).

Die Analysen ergaben, daß der Dampferzeuger in wenigen Minuten ausdampft. Der Druckverlauf, der sich aufgrund der rasch ansteigenden mittleren Gastemperatur im Primärkreis ergibt, ist aus Abb. 3 zu entnehmen. Die Wärmekapazitäten der Dampferzeuger-Gebläse-Einheit dämpfen die Temperaturtransienten im Primärkreis soweit, daß die Auslegungstemperaturen nur kurzzeitig überschritten werden. In der Abb. 4 sind die zeitlichen Temperaturverläufe im Dampferzeuger und Gebläse dargestellt. Daraus geht hervor, daß auf der Gebläseaustrittsseite maximale Temperaturen von 550°C (nach 6 min.) erreicht werden. Die Zwangskühlung bewirkt dabei, daß die maximalen Coretemperaturen nicht über 850°C steigen.

#### 1.2 Auslegungsgemäße Nachwärmeabfuhr über Naturkonvektion bei Reaktor unter Druck mit dem Flächenkühlsystem

Für die Nachwärmeabfuhr bei Reaktor unter Druck mittels Naturkonvektion über den Primärkreis sind die Temperaturbelastungen innerhalb des Reaktordruckbehälters sicherheitstechnisch von Bedeutung, wenn nur das Flächenkühlsystem als Wärmesenke wirkt und die Hauptwärmesenke des Dampferzeugers als ausgefallen angenommen wird (Fall 2).

In diesem Fall ist der Dampferzeuger nach 40 min. ausgedampft. Der resultierende Druckanstieg wird durch Öffnen des Sicherheits-

ventiles bei 77 bar begrenzt (Abb. 5). Durch den intensiven Naturumlauf im Primärkreis bleiben die maximalen Coretemperaturen auf 850°C begrenzt. Die in den oberen Einbauten des Druckbehälters berechneten Temperaturen sind aus Abb. 6 zu entnehmen. Demnach steigen im Gebläse-Dampferzeuger-Bereich die Temperaturen auf über 525°C (nach 2h) an, wobei Auslegungswerte längerfristiger überschritten werden.

### 1.3 Gestörte Nachwärmeabfuhr ohne Zwangskühlung bei Druckentlastung des Primärkreises mit bzw. ohne Flächenkühlsystem

Der Ausfall aller Kühlsysteme, d.h. einschließlich des Flächenkühlsystems, führt bei druckentlastetem Primärkreis zu den höchsten Coretemperaturen und stellt hinsichtlich der Spaltproduktfreisetzung und der Druckbehälterbelastungen einen sehr ungünstigen Ablauf einer Coreaufheizung dar (Fall 3).

Nach den Rechnungen ergeben sich maximale Coretemperaturen von 1620°C nach 35 h (Abb. 7). Aus Abb. 8 wird deutlich, daß dabei in 5 % des Cores Temperaturen über 1500°C erreicht werden. Der Einfluß des Flächenkühlsystems auf die radiale Temperaturverteilung ist in der Abb. 9 nach etwa 4 Tagen dargestellt.

Dabei ist festzustellen, daß sich der Einfluß des Flächenkühlsystems hauptsächlich auf die äußeren Corekomponenten auswirkt, vor allem auf die Temperaturverteilung im Reaktordruckbehälter. Bei einem Ausfall des Flächenkühlsystems steigen die Temperaturen im Reaktordruckbehälter nach 10 Tagen auf 750°C an. Für diesen Fall sind die Temperaturverläufe in den Druckbehältereinbauten in Abb. 10 dargestellt. Das Langzeitverhalten mit und ohne Flächenkühlsystem ist in Abb. 11 vergleichend gegenübergestellt.

Insgesamt geht aus den Analysen hervor, daß der HTR-100 bei einer Coreaufheizung das für kleine HTR typische gutmütige Temperaturverhalten aufweist. Nach den Rechnungen stabilisieren sich die maximalen Coretemperaturen um 1600°C und im Druckbehälter bei 750°C. Die Bewertung der Primärkreisbelastungen ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

## 2. Komponentenbelastung

Für die spezifizierten Fälle wurden Untersuchungen zur Integrität des Stahldruckbehälters (RDB) durchgeführt. Der RDB besteht aus dem beim LWR verwendeten ferritischen Stahl 20 MnMoNi-55, der in der Kerntechnik für Temperaturen bis etwa 400°C zugelassen ist.

### 2.1 RDB-Verhalten bei Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion und intaktem Flächenkühlsystem

Nach Ausfall der Dampferzeugerbespeisung und Gebläseweiterlauf kommt es kurzzeitig zu einer Temperaturspitze im oberen Behälterbereich. Die Temperaturen laufen auf ein Maximum, das etwas über 500°C liegt. Die Temperaturspitze ist in der Zeit sehr ausgeprägt, so daß der Behälter nur etwa 10 min. mit Temperaturen über 400°C beaufschlagt ist. Eine Bewertung der Integrität des unter Druck stehenden Behälters kann von daher mit Kurzzeitwerten erfolgen /2/. Beim angegebenen Temperaturwert liegt die Streckgrenze des 20 MnMoNi-55 noch deutlich über 300 N/mm<sup>2</sup>. Der Wert liegt damit um einiges über dem Spannungsniveau, das der Behälterauslegung zugrunde zu legen ist (Membran-Biegespannung: 270 N/mm<sup>2</sup>). Da der Primärkreislaufdruck bei diesem Störfall nur knapp über den Auslegungsdruck (81 bar statt 77 bar) steigt, ist ein Versagen des oberen Behälterbereichs nicht zu unterstellen. Es bliebe allerdings zu untersuchen, welche Sekundärspannungen sich durch die Transiente ausbilden.

### 2.2 Verhalten des RDB bei Nachwärmeabfuhr über Naturkonvektion bei Reaktor unter Druck mit dem Flächenkühlsystem

Die thermodynamischen Rechnungen zeigen, daß im oberen Bereich des Behälters, und zwar im Umfeld der Gebläse, Temperaturen zu erwarten sind, die 500°C übersteigen. Diese Temperaturen stehen bei Reaktor unter Druck - also bei hoher Beanspruchung der Behälterwandungen - einige Stunden an. Wie bereits erwähnt, ist der vorgesehene Behälterstahl bei druckführenden Komponenten von Leichtwasserreaktoren nur bis 400°C zugelassen. Da der Naturkonvektionsfall ein Auslegungsfall ist, erscheint es zweckmäßig,



die Heistelle genauer zu analysieren und unter Umständen konstruktive Änderungen derart vorzusehen, daß die Temperaturen stets im zulässigen Bereich bleiben.

### 2.3 Verhalten des RDB bei Druckentlastung des Primärkreises und Ausfall des Flächenkühlsystems

Nach einer Druckentlastung werden Primärspannungen im wesentlichen nur noch durch Eigengewicht verursacht. Im hängend angeordneten RDB sind demgemäß kleine Spannungen unter  $5 \text{ N/mm}^2$  zu erwarten.

Im Laufe des Störfalles schlagen auf Höhe der heißesten Reaktorcoreregion Temperaturen bis zu  $750^\circ\text{C}$  auf die Behälterwandung durch. Diese lokale Heistelle bleibt einige 100 h erhalten.

Die Versagensspannung ferritischer Baustähle bei  $750^\circ\text{C}$  wird mit  $\text{über } 20 \text{ N/mm}^2$  für "zügiges Versagen" angegeben. Somit ist ein schnelles Abreißen nicht zu erwarten. Zur Zeit ist es allerdings nicht möglich, eine Aussage darüber zu machen, ob wegen der langen Zeit der Temperaturbeaufschlagung sich nicht unzulässige Kriechverformungen bzw. -versprdungen aufgrund der zwar kleinen, aber dennoch vorhandenen Spannungen ausbilden.

Die Aufhängung des Behälters ist nicht gefährdet, da sie in einem Bereich des RDB anbindet, der temperaturmäßig nicht außergewöhnlich beansprucht ist.

### Literatur

- /1/ W. Rehm, H. Barthels, W. Jahn, G. Meister  
Simulationsmethoden zur Analyse des thermodynamischen Verhaltens von HTR  
KFA-ISF-IB-3/87, April 1987
- /2/ H. Reck  
Zusammenstellung von temperaturabhängigen Materialwerten für die Reaktordruckbehlterwerkstoffe 20 NiMoCr-37 und 20 MnMoNi-55 sowie den Schraubenwerkstoff 26 NiCrMo-14 G  
Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS)mbH, Auftrags-Nr. 70940 (April 84)

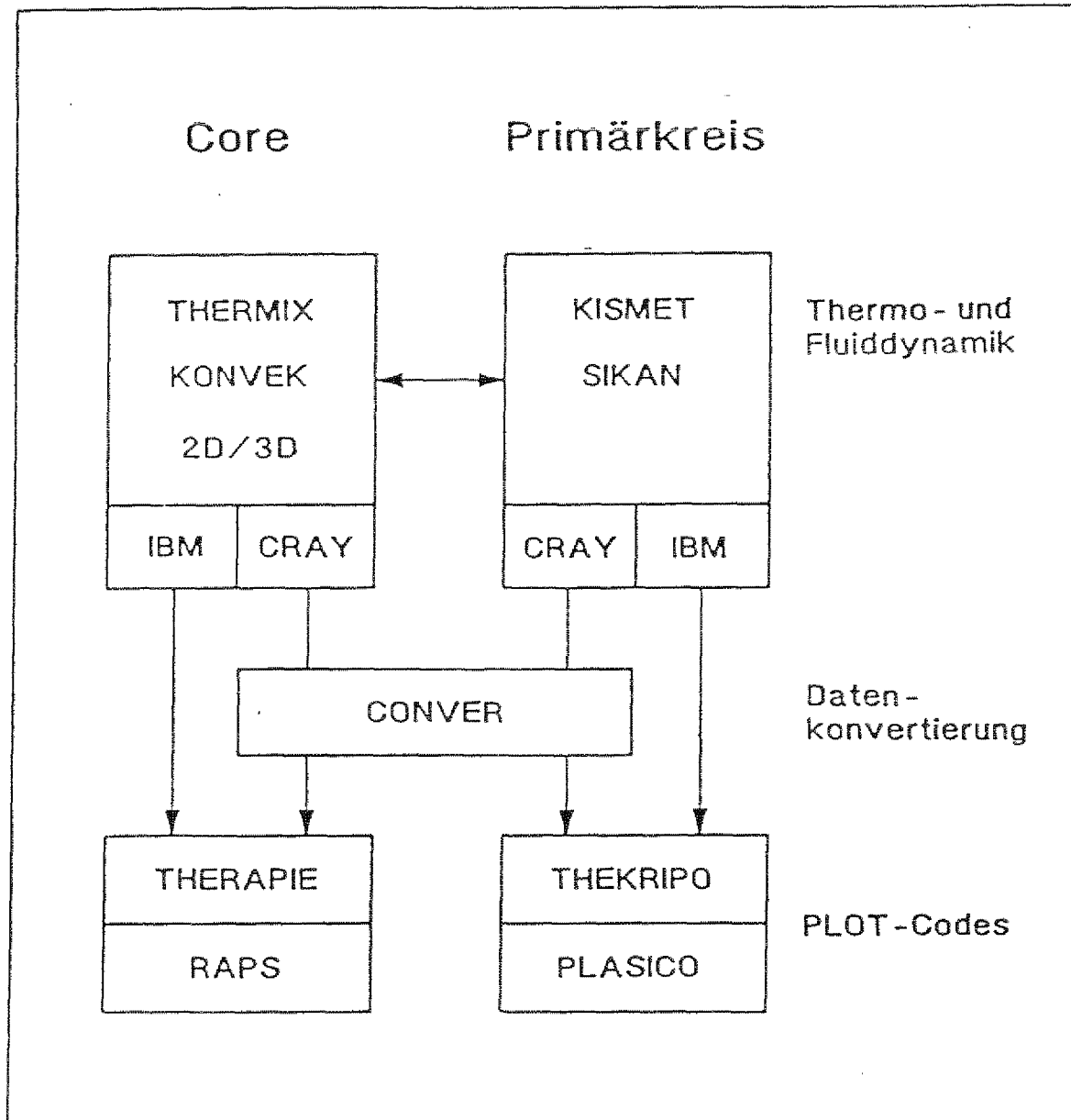
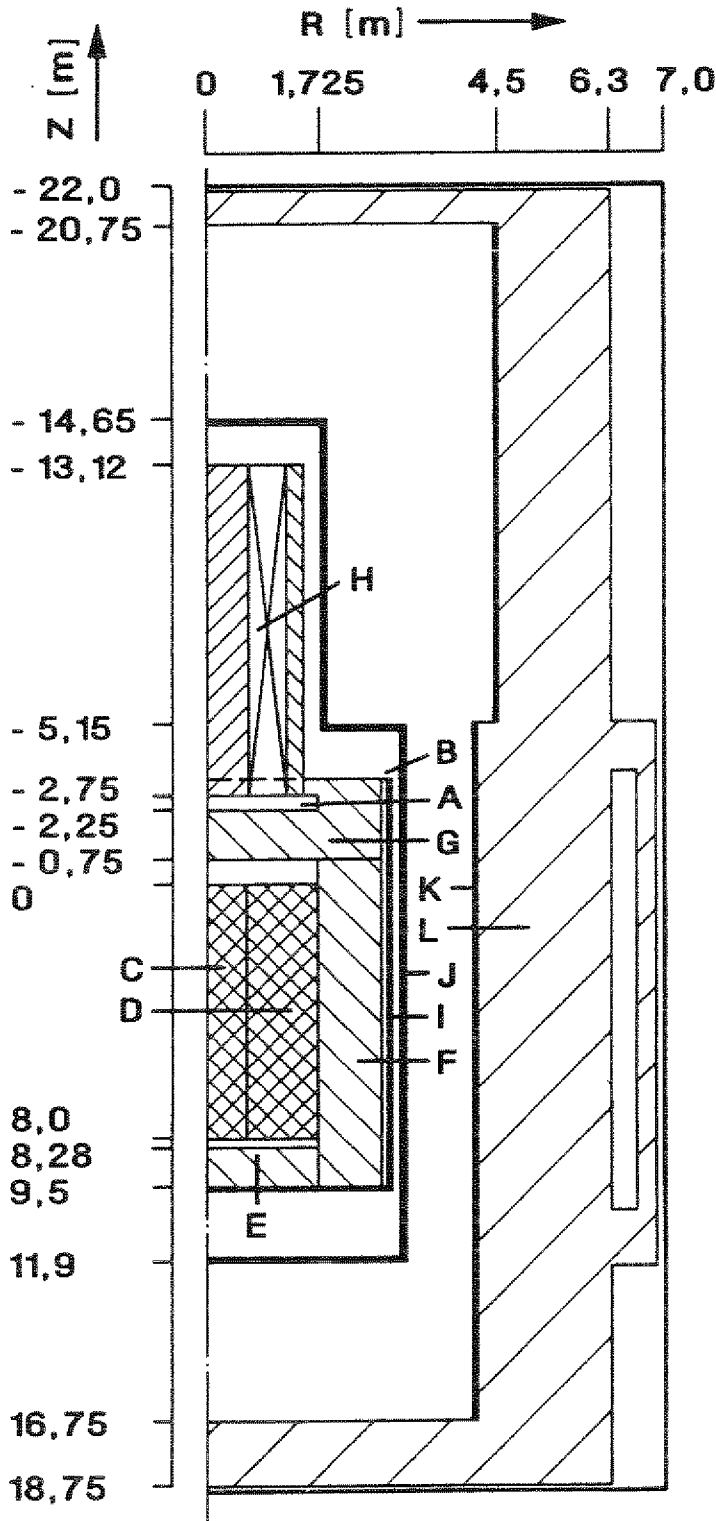
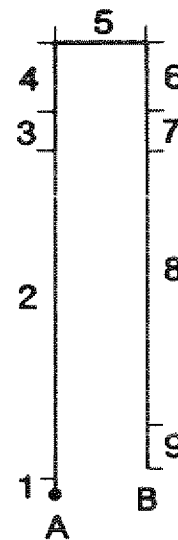


Abb. 1: Thermodynamik-Programmsystem  
(Kreislaufversion)  
THERMIX-CRAY-2D/3D des KFA  
Vektorrechners CRAY-XMP

## 2D - Rechengitter



## 1D - Kreislauf - Rechengitter



### 1D - Gitter

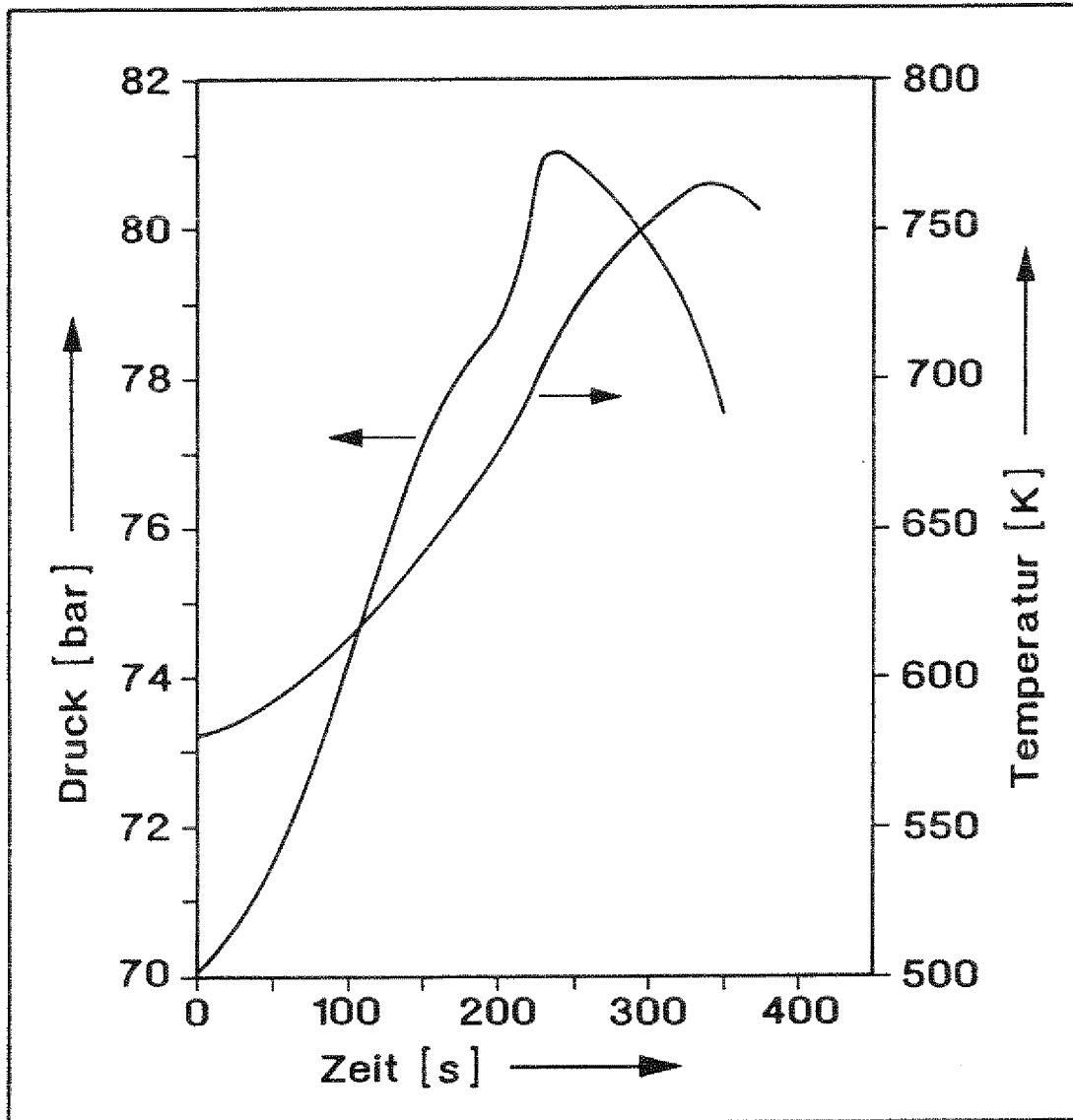
- 1 Heißgaskammer vor DE
- 2 Dampferzeuger - Rohrbündel
- 3 Dampferzeuger - Sammelraum
- 4 Saugleitung - Gebläse
- 5 Gebläse
- 6 Gebläse - Kaverne
- 7 Kaltgas - Sammelraum
- 8 Spalt - RDB - Dampferzeuger
- 9 Hohlraum

- A Anschlußpunkte
- B 1D-Kreislauf → 2D-Gitter

### 2D - Gitter

- C Core - Innen
- D Core - außen (mit Nasen)
- E Bodenreflektor
- F Seitenreflektor
- G Deckenreflektor
- H Dampferzeuger - Rohrbündel
- I Kernbehälter
- J Reaktordruckbehälter
- K Flächenkühler
- L Beton

Abb. 2: Darstellung der 2D-Coregeometrie und der 1D-Kreislaufabschnitte im Rechengitter



**Abb. 3:** Zeitlicher Verlauf der mittleren Gastemperatur und des Drucks im Primärkreislauf bei Ausfall der Dampferzeuger-Bespeisung und Weiterlauf eines Gebläses

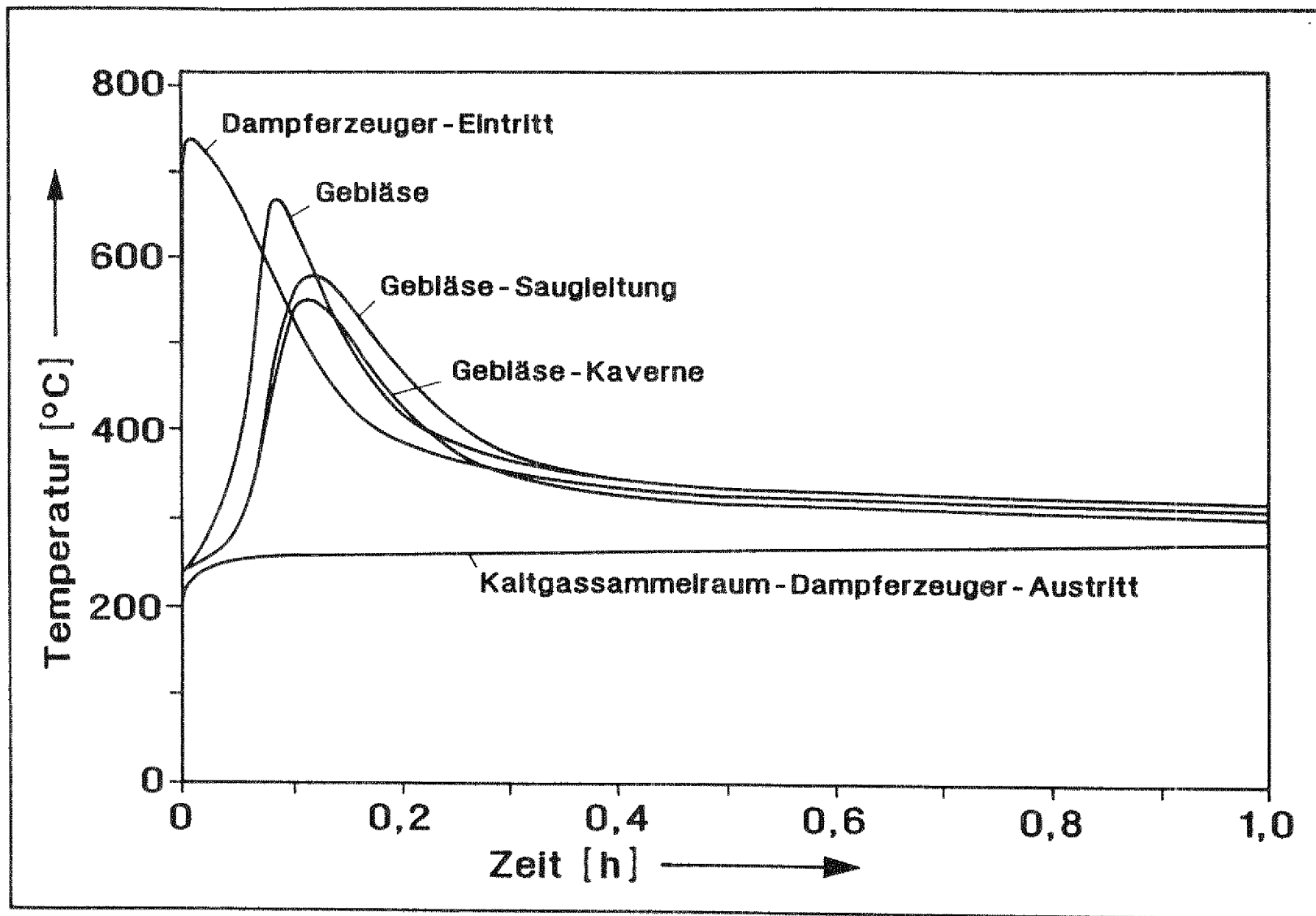


Abb. 4: DE-Transienten bei der NWA infolge Gebläseweiterlauf und ausgefallener DE-Bespeisung

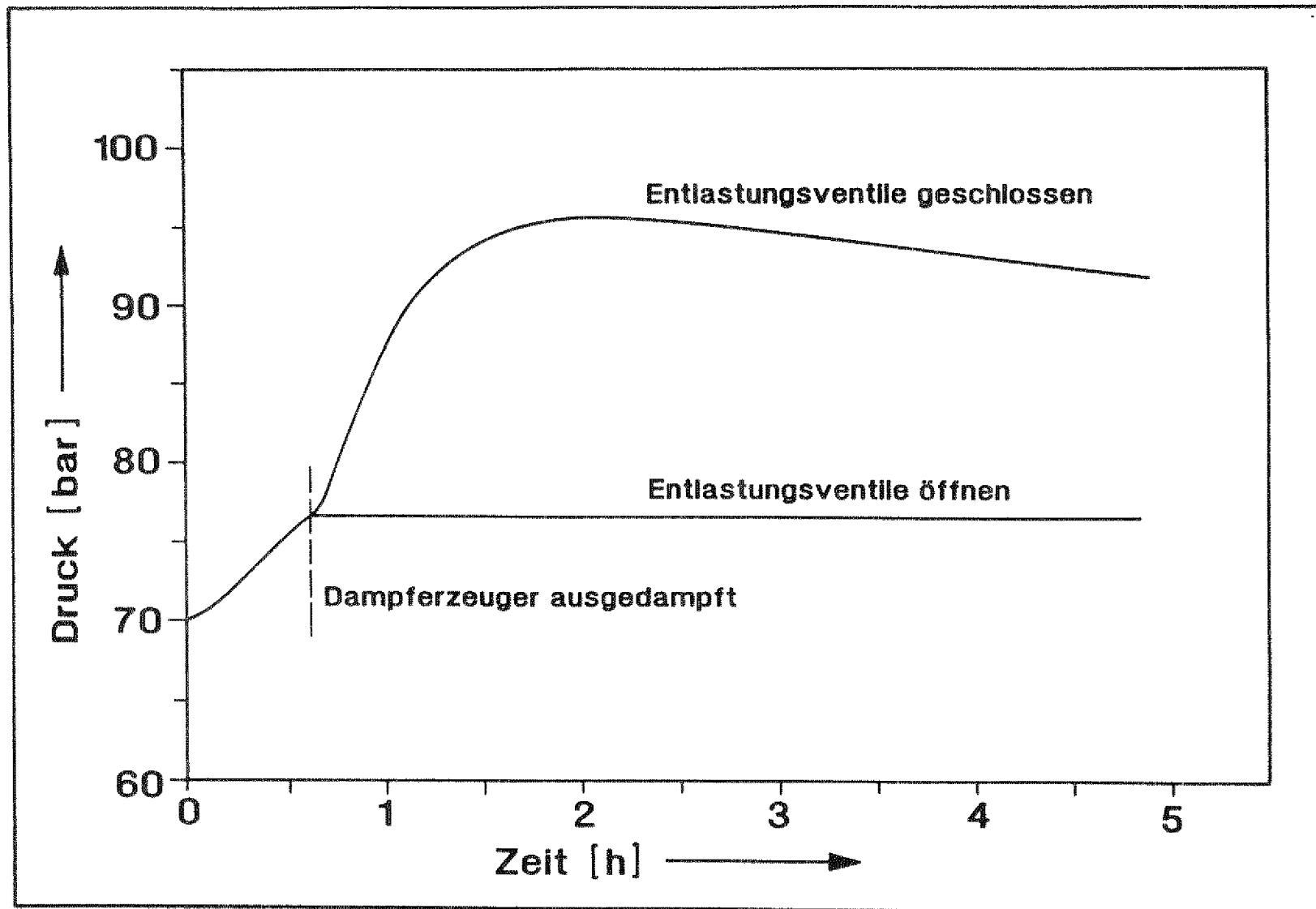


Abb. 5: Drucktransienten bei der NWA infolge DE-Ausfall

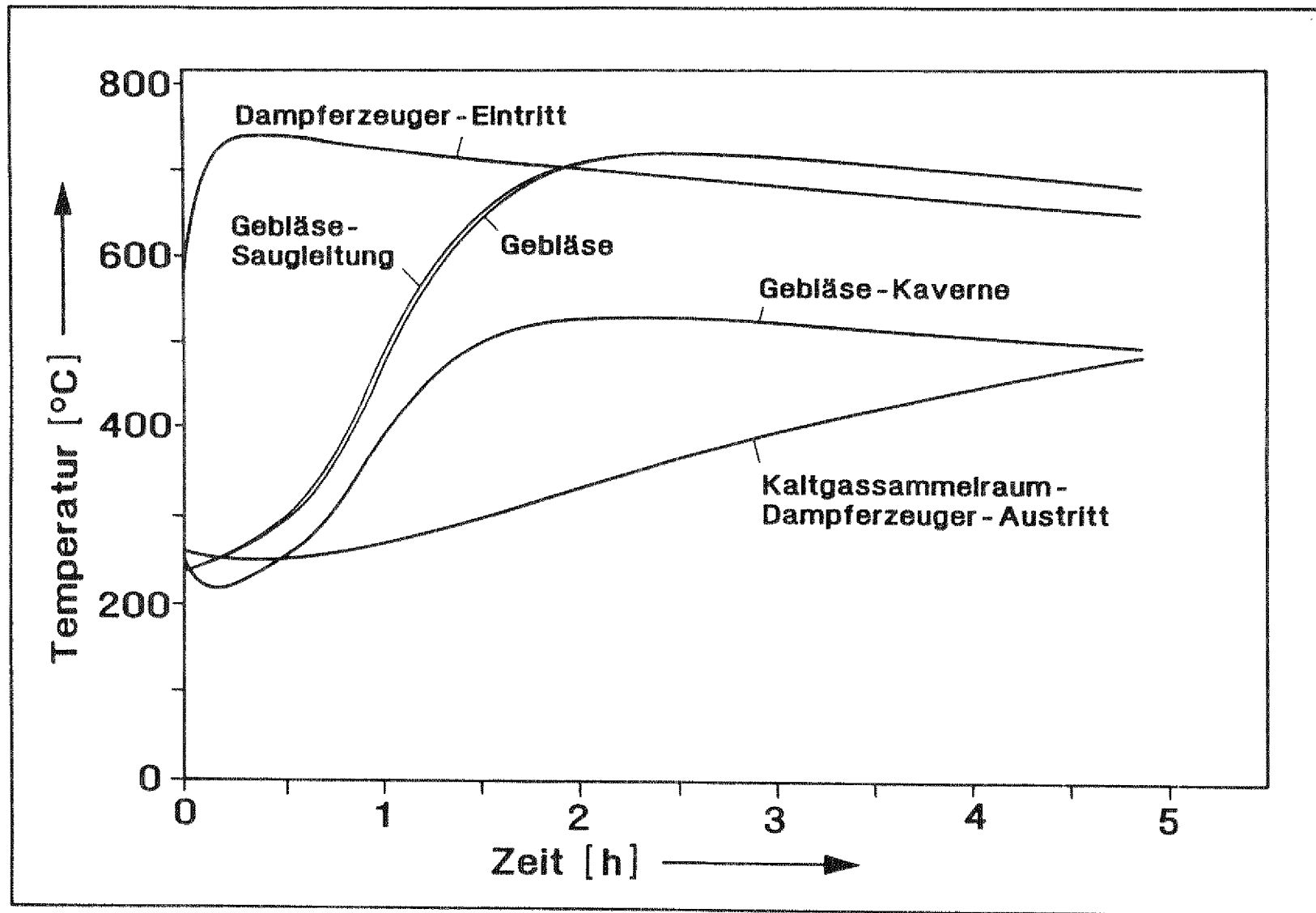


Abb. 6: DE-Transienten bei der NWA infolge DE-Ausfall

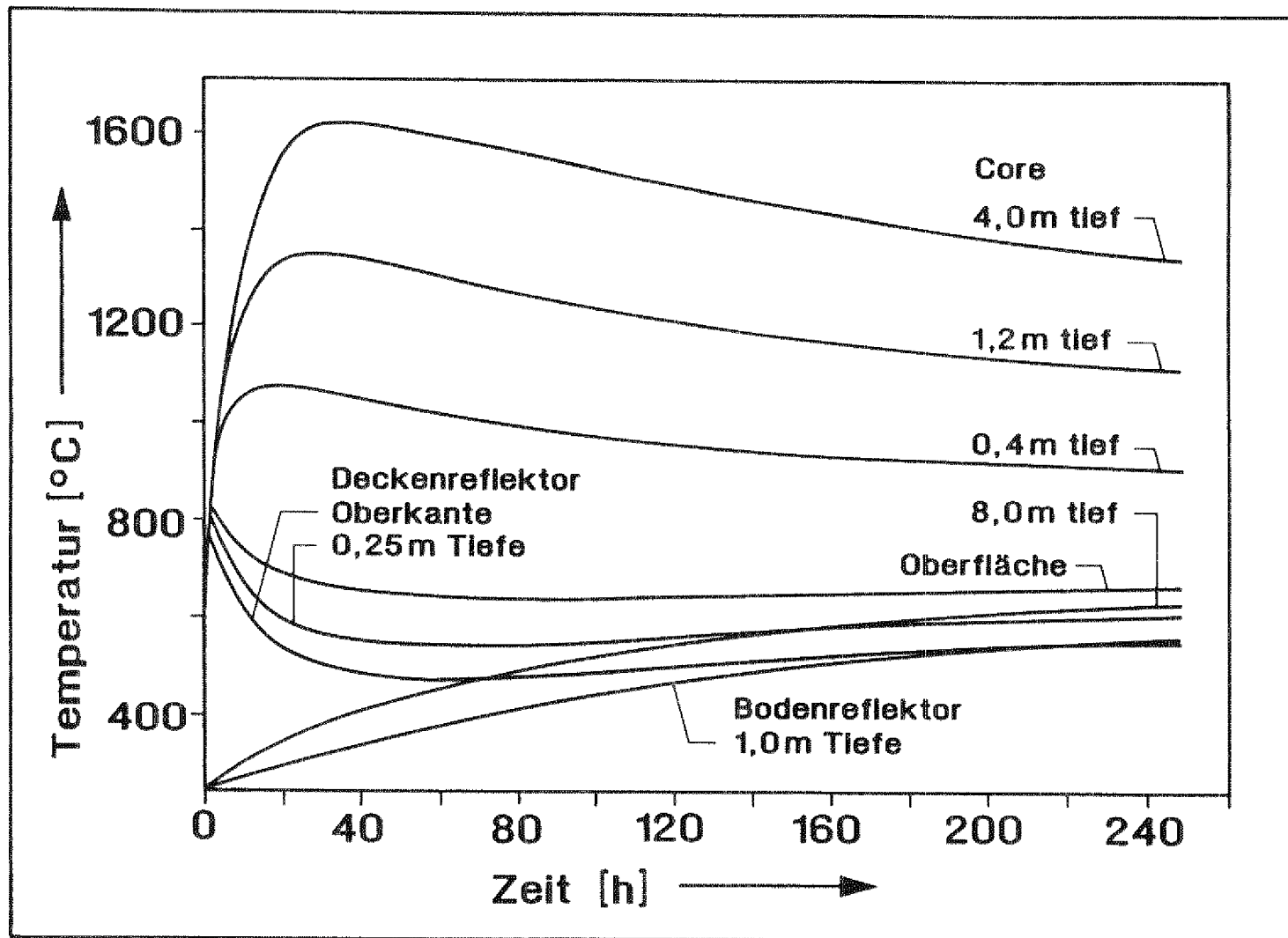


Abb. 7: Coretransienten bei der Coreaufheizung mit Druckentlastung und Ausfall des Flächenkühlsystems



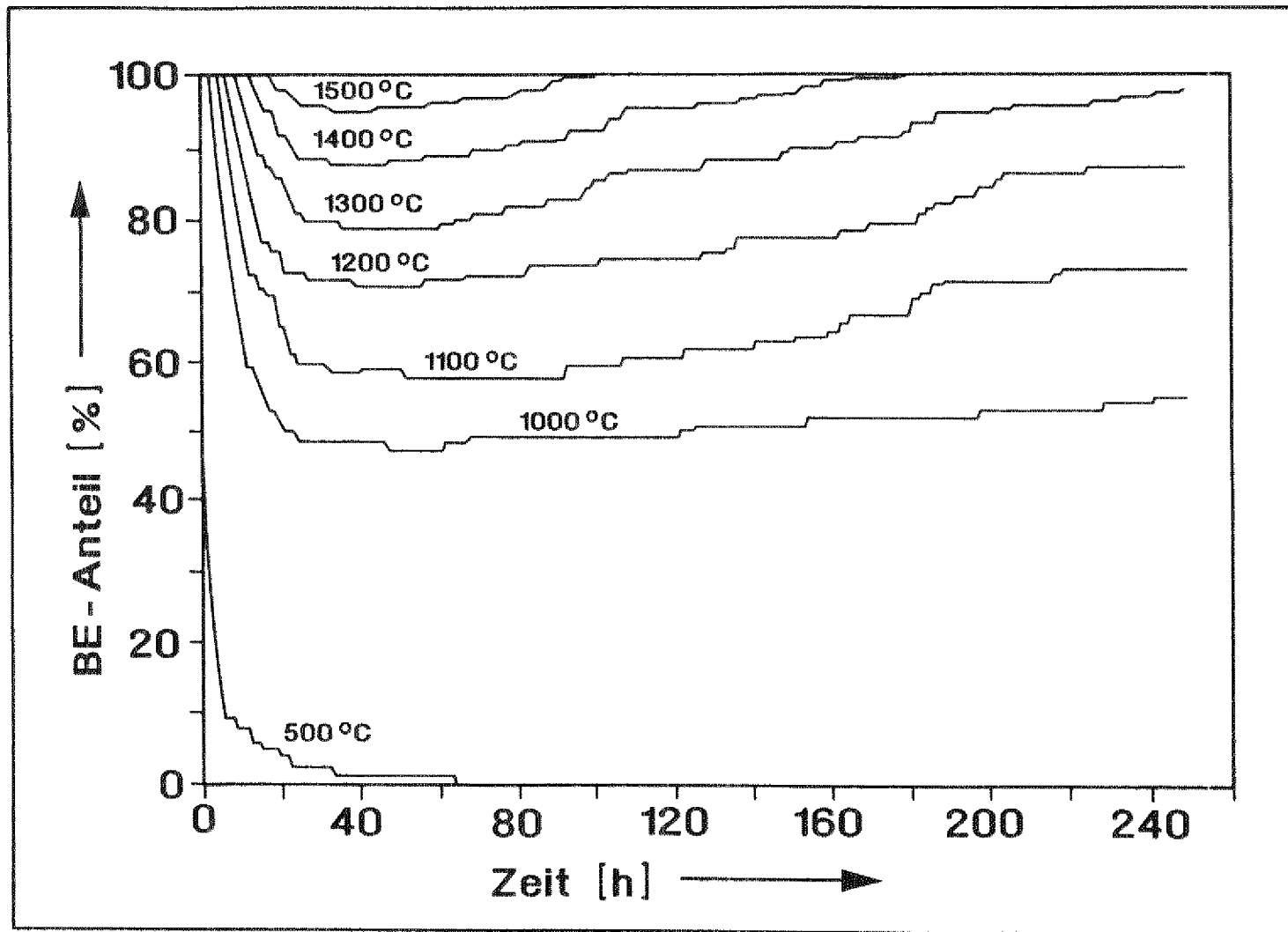


Abb. 8: Volumenanteil der Brennelemente in Abhängigkeit der Coretemperaturen bei der Coreaufheizung (Druckentlastung und ohne Flächenkühlsystem)

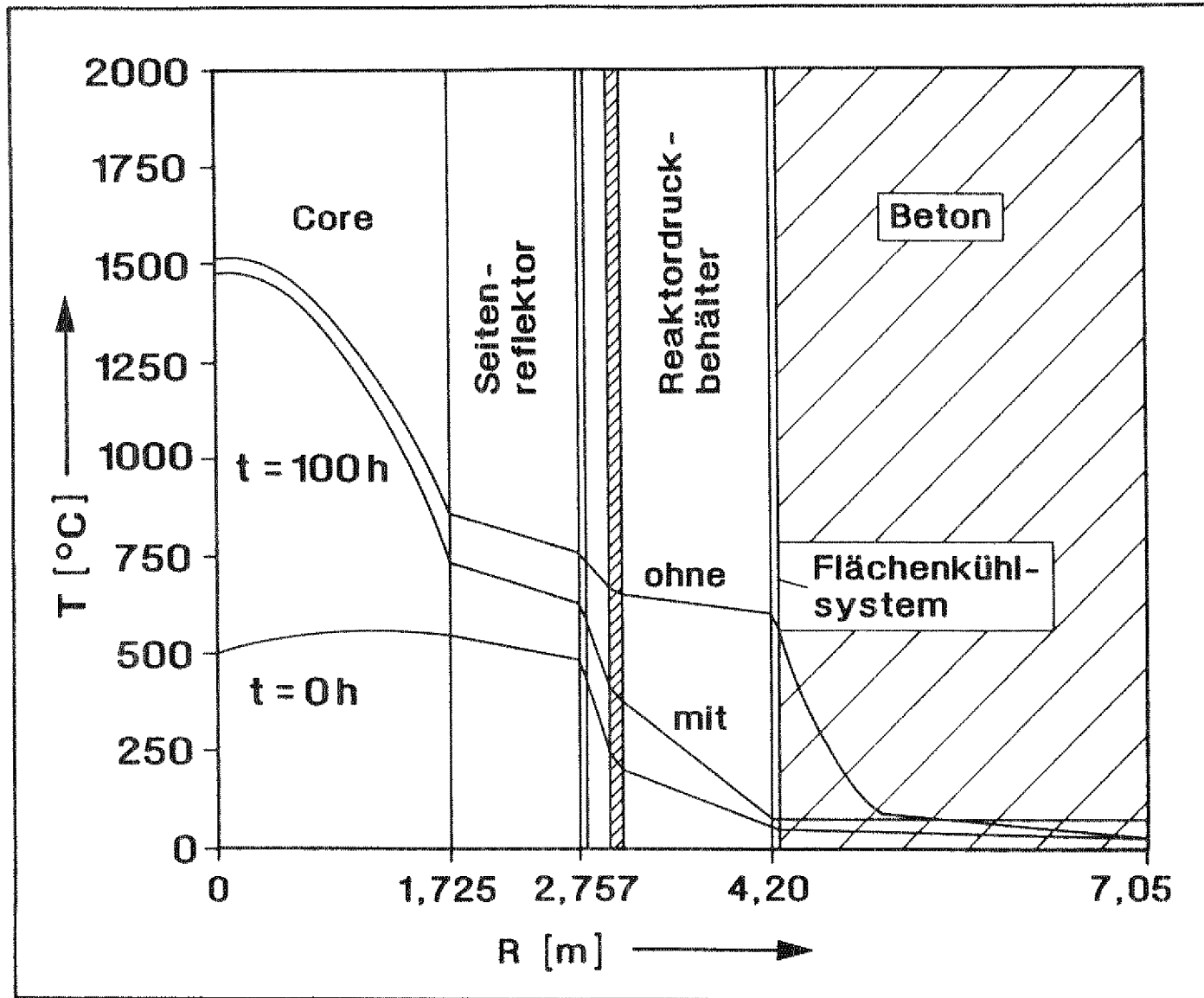


Abb. 9: Einfluß des Flächenkühlsystems auf die radiale Temperaturverteilung bei der Coreaufheizung mit Druckentlastung

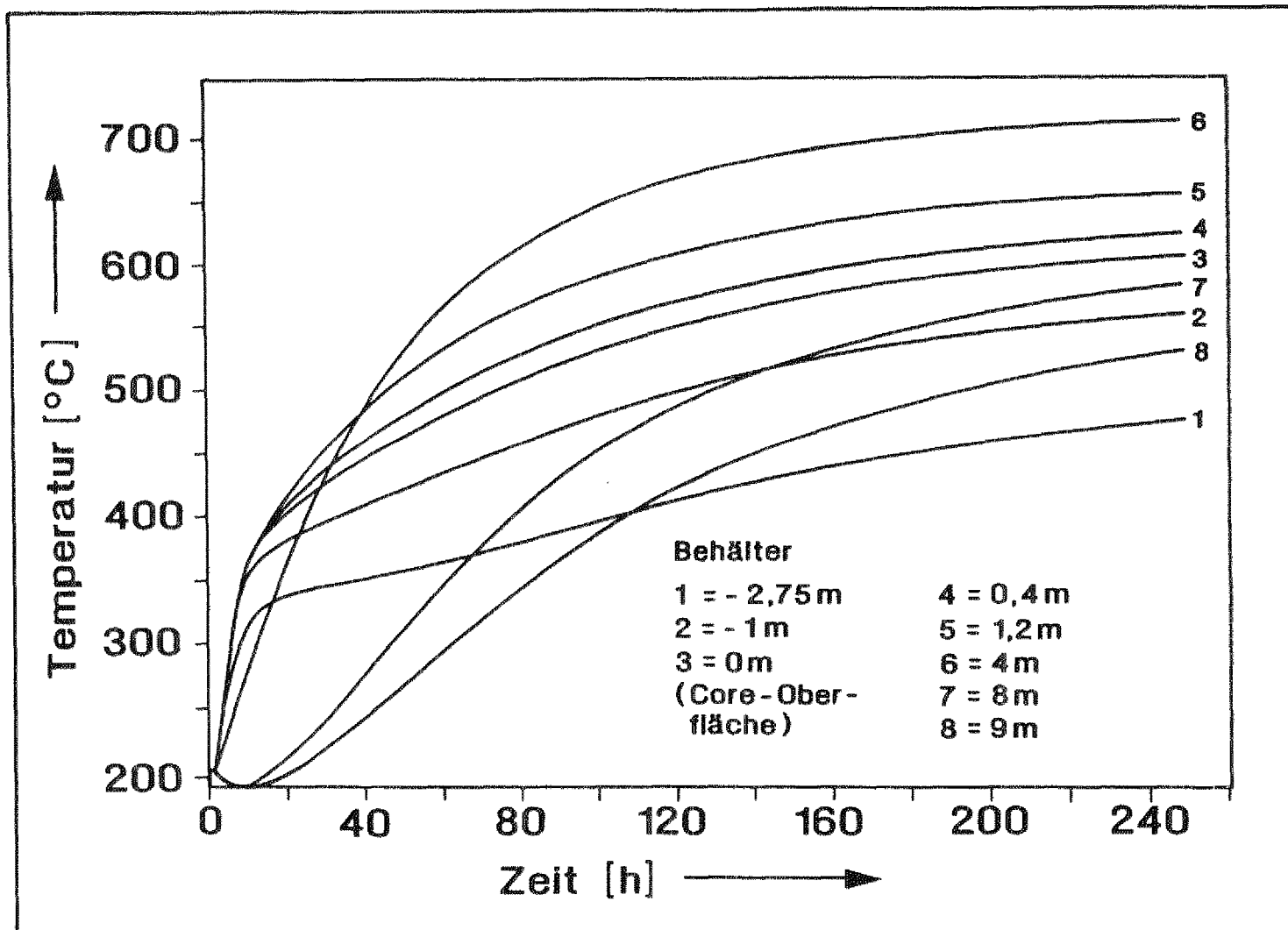


Abb. 10: Temperaturtransienten im druckentlasteten Druckbehälter bei der Coreaufheizung und ausgefallenem Flächenkühlsystem



### III. VORGÄNGE BEI DAMPFERZEUGERLECKAGEN

von

J. Wolters, W. Rehm, W. Jahn, P.H. David, G. Meister

#### Inhalt

|                                                                                    | Seite |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. ÜBERBLICK ÜBER UNTERSUCHTE FÄLLE                                                | 1     |
| 2. ABSICHERUNG DES STÖRFALLBEHERRSCHUNGSKONZEPTES                                  | 2     |
| 2.1 Leckspektrum                                                                   | 2     |
| 2.2 Entlastung des Dampferzeugers                                                  | 4     |
| 2.3 Überprüfung der Methode zur Identifizierung des defekten Dampferzeugerstranges | 5     |
| 2.4 Druckaufbau im defekten Dampferzeugerstrang bei Zwangskonvektion               | 6     |
| 2.5 Druckverlauf im Primärkreislauf                                                | 7     |
| 2.6 Graphitkorrosion                                                               | 11    |
| 3. VERSAGEN DER DRUCKREDUZIERSTATIONEN                                             | 12    |
| 3.1 Nichtöffnen von HD-Umleitstation und Entlastungsregelstation                   | 12    |
| 3.1.1 Klärung der radiologischen Relevanz                                          | 12    |
| 3.1.2 Dampfzustände im Primärkreislauf und Benetzung der Dampferzeugeroberfläche   | 14    |
| 3.2 Offenbleiben der Entlastungsregelstation des AuAS                              | 16    |
| 3.2.1 Radiologisch relevante Fälle                                                 | 16    |
| 3.2.2 Rückwirkungen auf den Primärkreislauf                                        | 17    |
| 4. NACHWÄRMEABFUHR MIT DEFEKTEM STRANG                                             | 20    |
| 4.1 Druckaufbau im Primärkreis und Reingaslager                                    | 20    |
| 4.2 Einfluß der Dampfeinströmrates auf den Druckverlauf                            | 21    |
| 4.3 Unterbrechung der Zwangskühlung                                                | 22    |

|     |                                                                                        |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.  | AUFDRÜCKEN DES FRISCHDAMPFSICHERHEITSVENTILS DURCH<br>WEITERLAUFENDE SPEISEWASSERPUMPE | 23 |
| 5.1 | Ausgangssituation                                                                      | 23 |
| 5.2 | Verhalten des Dampferzeugers                                                           | 23 |
| 5.3 | Zustände im Primärkreislauf                                                            | 25 |
| 5.4 | Benetzte Dampferzeugerfläche                                                           | 27 |
| 6.  | SCHÄDEN AM DAMPFSAMMLER                                                                | 28 |
| 6.1 | Auslösendes Ereignis                                                                   | 28 |
| 6.2 | Verhalten des Dampferzeugers                                                           | 28 |
| 6.3 | Zustände im Primärkreislauf                                                            | 29 |
| 6.4 | Beanspruchung des Reaktordruckbehälters                                                | 30 |
| 7.  | ZUSAMMENFASSUNG                                                                        | 30 |
| 8.  | LITERATUR                                                                              | 32 |

## 1. ÜBERBLICK ÜBER UNTERSUCHTE FÄLLE

Der Wassereinbruch in den Primärkreislauf löst eine Reihe von Vorgängen aus, deren sicherheitstechnische Bedeutung im einzelnen vom Sicherheitskonzept und dem tatsächlichen Anlageverhalten abhängt und die in ihrer Gesamtheit die Auswirkungen eines solchen Störfalls bestimmen. Dieses Kapitel behandelt alle Vorgänge, die den Druckverlauf im Primärkreislauf beeinflussen. Dazu gehören nicht nur Vorgänge im Primärkreislauf sondern auch im Sekundärkreislauf und im Gaslager, in das die Sicherheitsventile des Reaktordruckbehälters abblasen. Hintergrund der Untersuchung des Druckverlaufs im Primärkreislauf ist die Fragestellung, ob und unter welchen Umständen es zum Öffnen des Primärkreislaufs durch Ansprechen des nachgeschalteten Sicherheitsventils\* kommt, das den Primärkreislauf bei Ausschöpfung des Gaslagers vor zu hohem Druck schützt.

Zu den in diesem Kapitel behandelten Vorgängen auf der Sekundärseite gehört die Abschätzung des dortigen Druckverlaufs in den Fällen, in denen er nicht von einer Regelung aufgeprägt wird. Dabei galt es z.B. zu klären, ob es Störfälle gibt, bei denen das Frischdampf-Sicherheitsventil des defekten Stranges aufgedrückt wird, weil ein Nichtwiederschließen des Ventils eine Druckentlastung des Primärkreislaufs über das Dampferzeugerleck zur Folge haben würde. Diese Frage stellte sich auch deshalb, weil die gasseitige Beheizung des Dampferzeugers nicht vollständig unterbunden wird.

Ein letzter wichtiger Aspekt, der in diesem Kapitel behandelt wird, ist die Benetzung der Dampferzeugeroberfläche mit Wasser. Davon hängt der Anteil der abgelagerten Spaltprodukte ab, der im jeweiligen Fall abgewaschen wird. Es liegt auf der Hand, daß diese Untersuchung auf die Fälle beschränkt wurde, bei denen es zu einer Freisetzung in die Umgebung kommt.

Ein Überblick über die im einzelnen behandelten Störfälle und die dabei untersuchten Fragen gibt Tabelle 1. Die große Zahl der Fälle hängt damit zusammen, daß das Störfallbeherrschungskonzept in Verbindung mit der Primärkreislaufanordnung bei zu-

---

\*) in Kapitel I als Entlastungsventil bezeichnet

sätzlichen Versagensannahmen eine Reihe von Ereignisabläufen ermöglicht, von denen nicht von vornherein zu sagen war, ob sie radiologisch relevant sind oder nicht. Gerade dies herauszufinden, war ein Ziel der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen, sofern die Versagenskombination selbst nicht schon unmittelbar zum Öffnen des Primärkreislaufs führt. Vorweg sei gesagt, daß sich mit einer Ausnahme nur diese Fälle als radiologisch relevant erwiesen, wie die Frage nach der benetzten Dampferzeugerfläche in Tabelle 1 ausweist.

## 2. ABSICHERUNG DES STÖRFALLBEHERRSCHUNGSKONZEPTES

### 2.1 Leckspektrum

Das Schutzsystem spricht beim Wassereinbruchstörfall an, wenn der Primärkreislaufdruck 73 bar überschreitet. Das entspricht einer Dampfmenge im Primärkreislauf von ungefähr 300 kg. Wie schnell das Schutzsystem reagiert, hängt vom Leckort und von der Leckgröße ab. Unterhalb einer bestimmten Leckgröße läßt sich das Ansprechen des Schutzsystems durch Normalabfahren der Anlage vermeiden. Da bei erfolgreichem Normalabfahren der Anlage der Primärkreislauf geschlossen bleibt, wird von daher die untere Grenze des zu betrachtenden Leckspektrums gezogen.

Beim Wassereinbruchstörfall wird das Normalabfahren von Hand ausgelöst, wenn die Warnung 'Feuchte zu hoch' erscheint. Der Grenzwert soll bei 1000 - 2000 vpm ansprechen, was einem Dampfgehalt im Primärkreislauf von 7,8 bis 15,6 kg entspricht. Für die hier behandelte Fragestellung ist wichtig, daß während des Abfahrens die Kaltgastemperatur konstant bleibt und der Frischdampfdruck nach 35 min über den Sekundärkreislauf abgefahren wird, so daß nach weiteren 60 min 80 bar erreicht werden. Zu diesem Zeitpunkt wird dann auf das AuAS umgeschaltet. Sollte es danach noch zum Ansprechen des Schutzzgrenzwertes kommen, so dürfte auf jeden Fall eine Situation, die zum Öffnen des Primärkreislaufs führt, auszuschließen sein. Mithin wird die untere Grenze des Leckspektrums durch eine Leckgröße bestimmt, bei der kurz vor Umschalten auf das AuAS der Schutzzgrenzwert gerade noch erreicht wird. Für die Speisewasserseite ergibt das einen Leckquerschnitt von etwa  $0,5 \text{ mm}^2$  und für die Frischdampfseite von



etwa  $3 \text{ mm}^2$ .

Die obere Grenze des zu betrachtenden Leckspektrums wird durch den doppelendigen Bruch eines Heizrohres (2F-Leck) bestimmt. Darüber hinausgehende Leckquerschnitte sind zwar durchaus denkbar, sie spielen aber wegen ihrer geringen Häufigkeit als einleitendes Ereignis bei Risikobetrachtungen keine Rolle. Dies gilt z.B. auch für den Bruch eines Dampfsammlers (Fall 11 in Tab. 1), der nur im Sinne einer Grenzbetrachtung in die Untersuchung einbezogen wurde. Hiermit sollte sichergestellt werden, daß nicht bei großen Lecks völlig andere Störfallszenarien zu erwarten sind.

Das zu betrachtende Leckspektrum reicht also von ca.  $1 \text{ mm}^2$  bis  $3,5 \text{ cm}^2$  (2F-Leck). Daß die Konsequenzen eines Dampferzeugerlecks mit der Leckgröße ansteigen, steht außer Frage. Der wesentliche Grund ist die in den Primärkreislauf gelangende Wassermenge, die mit der Leckrate und damit mit der Leckgröße zunimmt (Abb. 1). Jedoch ergeben sich bei kleinen Lecks keine prinzipiell anderen Störfallabläufe als bei großen, vorausgesetzt, der defekte Strang wird auch bei kleinen Lecks zuverlässig identifiziert (siehe 2.3). Nur der zeitliche Verlauf wird gestreckt, und zwar in bezug auf die Störfallerkennung und auf die Dauer einer eventuellen Freisetzung. Damit bietet sich dem Operateur mehr Zeit für Eingriffe zur Unterbindung des Störfalls oder zur Verminderung der Auswirkungen. Die zeitliche Streckung hat aber auch gegenläufige Effekte wie die längere Einwirkung von Wasserdampf auf die Oberflächen des Primärkreislaufs, wodurch mehr abgelagerte Spaltprodukte abgelöst werden.

Kurzum, ohne genauere Analyse lassen sich keine quantitativen Angaben über den Einfluß der Leckgröße auf die radiologisch relevanten Wassereinbruchstörfälle machen. Die aber wären erforderlich gewesen, um den risikobestimmenden Leckquerschnitt zu ermitteln. Da eine solche Analyse den Gesamtrahmen gesprengt hätte, wurde als Basis für die nachfolgenden Untersuchungen ein Leck von der Größe des Heizrohrquerschnitts (1F-Leck) gewählt. Ein solches Leck liegt im oberen Bereich des zu betrachtenden Leckspektrums und hat eine entsprechend niedrige Eintrittshäufigkeit. Der Gefahr, daß dadurch das Risiko kleiner

Lecks möglicherweise unterschätzt wird, wurde dadurch begegnet, daß diesem Leck die Eintrittshäufigkeit eines Lecks in der Mitte des zu betrachtenden Leckspektrums zugewiesen wurde. Der Wert liegt um etwa das Zehnfache über der erwarteten Häufigkeit des gewählten Lecks.

## 2.2 Entlastung des Dampferzeugers

Die Entlastung des Dampferzeugers geschieht durch Absenken des Frischdampfdrucks mit 3 unterschiedlichen Druckänderungsrampen. Sie beginnt 25 s nach dem Ansprechen des Reaktorschutzsystems mit einer sehr steilen Rampe, die den Druck innerhalb von 10 s von 190 auf 150 bar reduziert. In weiteren 25 s wird der Druck auf 130 bar abgesenkt. Die dritte Rampe ist sehr flach und führt innerhalb von 60 s auf 120 bar.

Unter Vorgabe dieses Druckverlaufs wurde mit dem Programm SIKADE 2a der Entlastungsvorgang nachgerechnet. Dabei ging es in erster Linie um die Klärung der Frage, welche Wasser- und Dampfmen gen die beiden Dampferzeugerstränge zum Zeitpunkt der Absperrung noch enthalten. Der Einfluß der Abwärtsverdampfung konnte dabei jedoch nicht berücksichtigt werden. Mit anderen Worten, der Untersuchung wurde ein aufwärtsverdampfender Dampferzeuger zugrunde gelegt. Dadurch wird das Restinventar an Wasser gegenüber der Realität vermutlich überschätzt.

Die Untersuchung ergab, daß jeder Dampferzeugerstrang zum Zeitpunkt der Absperrung noch 1340 kg an Wasser und 125 kg an Dampf enthält. Das Wasser im defekten Strang kann nicht über das Leck in den Primärkreislauf auslaufen, da die Sammler, die die Verbindung der Heizrohre untereinander herstellen, über dem Bündel angeordnet sind. Jedoch kann die fortdauernde Beheizung des defekten Stranges zur Folge haben, daß das Wasser nach und nach durch Verdampfung in den Primärkreislauf ausgetrieben wird (s. 2.4 und 2.5). Der Wasserinhalt der Speisewasserleitung braucht dabei nicht berücksichtigt zu werden, da sie tiefer als der Sammler angeordnet ist und außerhalb der Reaktorzelle verläuft, so daß sie nicht beheizt wird.

Nach dem Ansprechen des Reaktorschutzsystems bis zum Absperren des defekten Stranges gelangen maximal 260 kg an Dampf in den Primärkreislauf. Das führt zu einem Druckanstieg auf knapp unter 76 bar. Der Ansprechdruck des ersten Sicherheitsventils von 77 bar wird in dieser Phase also voraussichtlich nicht erreicht.

### 2.3 Überprüfung der Methode zur Identifizierung des defekten Dampferzeugerstranges

Der defekte Dampferzeugerstrang soll durch einen Druckvergleich zwischen dem defekten und dem intakten Strang identifiziert werden. Dazu werden die beiden Stränge nach der Druckentlastung auf 120 bar auch auf der Frischdampfseite getrennt. Da sich der defekte Strang in den Primärkreislauf entleert, entwickelt sich der Druck in den beiden Strängen unterschiedlich. Der Strang, der nach Ablauf einer vorgegebenen Zeit den niedrigeren Druck zeigt, gilt als defekt und bleibt abgesperrt. Der andere wird zur Abkühlung des Reaktors wieder in Betrieb genommen.

Wegen der fortdauernden Beheizung des Dampferzeugers mit einer Leistung von ca. 3 % der Nennleistung wird eine möglichst kurze Identifizierungszeit angestrebt. Sie muß andererseits jedoch lang genug sein, damit sich unabhängig von der Leckgröße und dem Leckort ein eindeutiger Meßwert ergibt. Um eine Vorstellung über die Dauer der Identifizierungsphase zu erhalten und die Eignung der Methode zu überprüfen, wurde als Beispiel der Druckverlauf im defekten unbeheizten Strang berechnet, und zwar auf der Basis eines Dampferzeugers mit Aufwärtsverdampfung. Dabei vermeidet man die komplizierten Temperatúrausgleichsvorgänge, die sich bei einem abwärtsverdampfenden Dampferzeuger nach der Absperrung einstellen und die einer rechnerischen Behandlung noch nicht zugänglich sind /1/. Die durch diese Vorgänge verursachten Druckänderungen dürften jedoch für beide Stränge gleich sein, vorausgesetzt, es treten keine Druckpulsationen auf. Unter diesen Umständen tragen die Temperatúrausgleichsvorgänge auch nicht zur Druckdifferenz zwischen intaktem und defektem Strang bei. Da es aber auf die Druckdifferenz und nicht auf den Absolutdruck ankommt, ist es gerechtfertigt, die Untersuchung an einem abwärtsverdampfenden, unbeheizten Dampferzeuger durchzuführen.

Modellbedingt unterstellt wurde hier der doppelendige Bruch (2F-Leck) eines Heizrohres auf der Speisewasserseite, etwa 3 m in Strömungsrichtung hinter der Rohrplatte. Dies ist der für die Identifizierung ungünstigste Leckort, weil die Ausströmraten, insbesondere die des Dampfes hier am niedrigsten sind. Dem defekten Strang wird damit nur wenig Wärme entzogen. Zur Berechnung des Druckverlaufs wurde ein Modell verwendet, das bereits in /2/ für ähnliche Fragestellungen eingesetzt wurde und dort eingehend beschrieben ist. Das Temperaturprofil des defekten Stranges zum Zeitpunkt der Absperrung wurde aus den im vorherigen Kapitel beschriebenen Untersuchungen übernommen.

Den zeitlichen Druckverlauf im defekten Strang zeigt Abb. 2. Nach 100 s ist der Druck um etwa 12 bar abgefallen. Dies ist gleichzeitig der Differenzdruck, der zwischen dem defekten und dem intakten in dieser Zeit zu erwarten ist. Für ein eindeutiges Meßsignal benötigt man bei diesen Verhältnissen mindestens 30 s. Bei kleineren Lecks wird eine entsprechend längere Identifizierungszeit benötigt, wobei es jedoch fraglich ist, ob bei Lecks unter  $0,5 \text{ cm}^2$  noch eine eindeutige Identifizierung in einer vernünftigen Zeit möglich ist. In dieser Analyse sind wir von einer Dauer der Identifizierungsphase von 50 s ausgegangen. Bei Lecks oberhalb des einfachen Rohrquerschnitts eines Heizrohres ist innerhalb dieser Zeit eine eindeutige Identifizierung gegeben.

#### 2.4 Druckaufbau im defekten Dampferzeugerstrang bei Zwangskonvektion

Bei der Nachwärmeabfuhr mit dem intakten Dampferzeugerstrang wird der defekte zwangsläufig sehr stark mitbeheizt. Dies gab Anlaß zu der Vermutung, daß durch die schnelle Verdampfung des Restwassers im defekten Strang trotz des Lecks der Druck soweit ansteigen könnte, daß das Frischdampfsicherheitsventil aufgedrückt wird. Daraus hätte sich dann durch Versagen einer einzigen Komponente, nämlich Offenbleiben des Sicherheitsventils, ein Störfall mit Freisetzung von radioaktiven Stoffen in die Umgebung ergeben.

Zur Klärung der Frage wurde das Profil der Gastemperatur im Dampferzeuger bei der Nachwärmeabfuhr mit einem Strang berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 1 graphisch dargestellt. Dieses Temperaturprofil wird gewissermaßen dem defekten Strang aufgeprägt. Bei diesem Temperaturprofil müßte ein aufwärtsverdampfender Dampferzeuger zu etwa 90 % mit Wasser gefüllt sein, damit der Ansprechdruck des Sicherheitsventils erreicht wird. Tatsächlich ist der defekte Strang aber nur zu etwa 45 % mit Wasser gefüllt. Hierfür ergibt sich, wieder einen aufwärtsverdampfenden Dampferzeuger unterstellt, ein Druck von 64 bar. Der Wert gilt für den in Abb. 3 gezeigten Augenblickszustand und setzt ein geschlossenes System voraus. In Wirklichkeit haben wir es mit einem offenen System zu tun, das sich dem Druck im Primärkreislauf anpaßt. Mit anderen Worten, der defekte Strang saugt Gas aus dem Primärkreislauf an.

Der Einfluß der Abwärtsverdampfung auf den Druckaufbau hängt von der Effektivität der beiden konkurrierenden Vorgänge, nämlich Verdampfung von Wasser im unteren heißen Teil des Dampferzeugers und Kondensation von Dampf im oberen kalten Teil einschl. der dazugehörigen Wasser-Dampf-Gegenströmung ab. Vermutlich wird dies zu einem etwas höheren Druck als bei einem aufwärtsverdampfenden Dampferzeuger führen. Der Unterschied ist aber sicher nicht groß, so daß mit einem Ansprechen des Frischdampf-Sicherheitsventils im defekten Strang nicht zu rechnen ist.

Das Untersuchungsergebnis läßt außerdem den Schluß zu, daß bei Zwangskühlung des Reaktors mit dem intakten Dampferzeuger der defekte Strang nur teilweise in den Primärkreislauf ausdampfen kann. Der Wasserinhalt im defekten Strang wird sich nur soweit vermindern, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht ist. Dieser ist dadurch gekennzeichnet, daß sich Verdampfung und Kondensation im defekten Strang die Waage halten und an der Leckstelle Druckausgleich zwischen Primär- und Sekundärseite herrscht.

## 2.5 Druckverlauf im Primärkreislauf

Der Druckverlauf im Primärkreislauf wird nicht nur durch die einbrechende Wassermenge bestimmt, sondern in weit größerem Maße vom Temperaturverlauf im Kaltgasplenum. Die entscheidende

Einflußgröße ist daher die Bespeisung des intakten Dampferzeugerstranges. Wird der intakte Dampferzeugerstrang gekühlt, so sinken die Temperaturen im Kaltgasplenum, gleichgültig, ob das Primärkühlmittel von den Gebläsen umgewälzt wird oder durch Naturkonvektion zirkuliert. Im ersten Fall ist die Abkühlgeschwindigkeit größer, da der Gasdurchsatz 10 % des Nenndurchsatzes bei Normalbetrieb beträgt. Bei Naturkonvektion sinkt der Durchsatz auf 3 % des Nenndurchsatzes.

Für den Fall der Zwangskonvektion wurde der Temperaturverlauf im Primärkreislauf mit dem Programm COROX berechnet, wobei der Dampfgehalt vernachlässigt wurde. Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung sind in Abb. 4 als Funktion der Zeit dargestellt. Wie man sieht, sinken die Temperaturen im Kaltgasraum sehr schnell ab. Innerhalb von 80 s nach Wiedereinschalten der Gebläse ist bereits ein Wert von 200 °C erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist der Heliumdruck bereits von 70 auf 64 bar abgesunken. Die schnelle Verminderung des Heliumdrucks hat zur Folge, daß bei einem Wassereinbruchstörfall nach der Wiedereinbetriebnahme der Gebläse ein Ansprechen der Sicherheitsventile des Reaktordruckbehälters ausgeschlossen werden kann. Dies gilt selbst für den Fall, daß der gesamte Wassereinbruch des defekten Dampferzeugers in den Primärkreislauf ausdampft, was nach den Ausführungen des vorhergehenden Abschnitts aber nicht zu erwarten ist. Vor der Wiedereinbetriebnahme der Gebläse ist ein einmaliges Ansprechen des am niedrigsten eingestellten Sicherheitsventils nicht auszuschließen. Dies liegt daran, daß nach der Absperrung der Dampferzeugerstränge zwecks Identifizierung des defekten noch eine Zeitspanne von 150 s bis zum Gebläsestart vergeht. In dieser Zeit kann, je nach Leckort, bei der unterstellten Leckgröße noch soviel Dampf in den Kreislauf gelangen, daß der Ansprechdruck des ersten Sicherheitsventils erreicht wird.

Bei fehlender Dampferzeugerkühlung steigen die Gastemperaturen vorübergehend soweit an, daß sich ohne Sicherheitsventile ein Helium-Partialdruck von 95 bar einstellen würde (s. Kap. II). Das Gaslager wird in diesem Fall auch ohne Wassereinbruch bereits in Anspruch genommen. Im Zusammenhang mit dem Wassereinbruch stellt sich die Frage, ob die Speicherkapazität auch

ausreicht, um ein Ansprechen des Sicherheitsventils zum Kamin zu verhindern. Dabei ist zu berücksichtigen, daß durch die fort-dauernde Beheizung des Dampferzeugers infolge der nichtunter-drückten Naturkonvektion der defekte Strang über das Leck vollständig in den Primärkreislauf ausdampft. Bleiben beide Stränge auf der Dampfseite gekoppelt, so kommt auch der Wasser-inhalt des intakten Stranges hinzu. Im anderen Fall entleert sich der intakte Strang über Dach in die Umgebung, wobei der Druck auf den Ansprechdruck des Frischdampf-Sicherheitsventils ansteigt. Das Ausdampfen des Dampferzeugers dauert etwa 45 min.

Der Druckaufbau im Gaslager wurde mit einem Rechenprogramm er-mittelt, das für Containment-Rechnungen entwickelt wurde und das Lager als einen geschlossenen Raum behandelt. Das Programm berücksichtigt die Wärmeabgabe an die Behälterwand und die Ober-flächenkondensation, wobei die Kondensationswärme dem Gas zuge-führt wird. Die Behälterwand wird nach außen als isoliert be-trachtet. Der Wasserdampf wird als ideales Gas behandelt, wo-durch der Dampfpartialdruck etwas überschätzt wird. Das dem Volumen zuströmende Gas hat die momentane Temperatur der Kühl-falle, die sich entsprechend der zugeführten Wärme und der un-terstellten Wärmekapazität ändert.

Bei der Modellierung der Kühlfalle wird berücksichtigt, daß das durchströmende Gas, je nach Zustand der Kühlfalle und Zu-sammensetzung des ankommenden Gases, entweder Feuchtigkeit auf-nehmen oder verlieren kann. Die Wärmekapazität der Kugelschüt-tung in der Kühlfalle wurde mit  $1,5 \times 10^4$  kJ/K angenommen. Der Wert bedeutet, daß sich die Kugelschüttung von 30 auf 80 °C auf-heizt, wenn 930 kg Helium von 250 auf 100 °C abgekühlt werden. Die angegebene Heliummenge entspricht der Lagerkapazität bei einem Druck von 80 bar und einer Gastemperatur von 100 °C.

Das wesentliche Ergebnis der Druckaufbaurechnung für das Gasla-ger zeigt Abb. 5. Wenn nur der defekte Dampferzeugerstrang in den Primärkreislauf ausdampft, ergibt sich ein maximaler Druck im Gaslager von 45,5 bar (Kurve I). Nach dem letztmaligen An-sprechen eines Sicherheitsventils enthält der Primärkreislauf noch 1300 kg an Wasserdampf, der über die Gasreinigungsanlage entfernt werden muß. Der untere Teil des RDB hat sich zu diesem

Zeitpunkt bereits soweit abgekühlt, daß Oberflächenkondensation einsetzt (s. Abb. 7). Eine nennenswerte Umsetzung von Wasserdampf zu Wassergas ist nicht zu erwarten, da die Core-Temperaturen insgesamt zu niedrig sind (s. nächster Abschnitt). Die Wassergasproduktion wurde daher auch in den Druckaufbaurechnungen vernachlässigt.

Die Lagerkapazität reicht auch aus, wenn beide Dampferzeugerstränge in den Primärkreislauf ausdampfen. In diesem Fall steigt der Druck im Lager auf 59,3 bar an, wobei pessimistischer Weise noch nicht berücksichtigt wurde, daß bereits nach etwa 0,5 h die Oberflächentemperatur des RDB im Bereich des unteren Plenums unter die Sättigungstemperatur abgesunken ist (s. Abb. 7). Zu dem Zeitpunkt, wo die mittlere Gastemperatur im Primärkreislauf das Maximum durchläuft und damit ein erneutes Ansprechen des Sicherheitsventils auszuschließen ist, enthält der Primärkreislauf noch eine Dampfmenge von 1930 kg. Rund 1100 kg Wasserdampf haben den Primärkreislauf verlassen, wovon etwa 1000 kg in der Kühlfalle und im Gaslager auskondensiert sind.

Als Fazit dieser Untersuchung bleibt festzuhalten, daß die Kapazität des Gaslagers bei weitem ausreicht, um das bei Wassereinbruchstörfällen aus den Primärkreislauf abströmende überschüssige Gas aufzufangen. Selbst wenn man unterstellt, daß der im Primärkreislauf verbleibende Wasserdampf vollständig zu Wassergas umgesetzt wird, wird der Ansprechdruck des Sicherheitsventils zum Kamin nicht erreicht, wie sich leicht durch eine Überschlagsrechnung zeigen läßt. Damit lassen sich auch die Bedingungen formulieren, unter denen radioaktive Stoffe über die Druckbegrenzungseinrichtung des Reaktordruckbehälters in die Umgebung freigesetzt werden. Dies wäre der Fall, wenn bei Kühlung des intakten Dampferzeugerstranges beide Rückschlagklappen zum Gaslager fälschlicherweise nicht öffnen würden und zusätzlich der Ansprechdruck des Sicherheitsventils zum Kamin fälschlicherweise niedriger eingestellt ist als der Ansprechdruck des ersten Sicherheitsventils. Bleibt der intakte Dampferzeugerstrang ungekühlt, so reicht eine der vorgenannten Bedingungen, jedoch muß das Sicherheitsventil zum Kamin fälschlicherweise auf einen Ansprechdruck von  $\ll 46$  bar eingestellt sein. Der Wert läge um 46 % unter dem nominellen Ansprechwert dieses Sicherheitsventils.



## 2.6 Graphitkorrosion

Es wurden Handabschätzungen zum Wasserdampfumsatz für den Fall der Nichtbespeisung des intakten Dampferzeugers vorgenommen. Die maximalen Coretemperaturen bleiben in diesem Fall unter 800 °C, wie Kapitel II zu entnehmen ist.

Berechnet wurde der Wasserdampfumsatz für einen Wassereinbruch von mehr als 100 kg in ein Core mit 50.000 Brennelementen von 800 °C; durch dieses Core sollten die Korrosionseffekte aller Brennelemente des realen Cores simuliert werden. Wegen der exponentiellen Abhängigkeit der Korrosionsrate von der Temperatur ist die getroffene Annahme als konservativ anzusetzen. Der Wasserdampfumsatz liegt unter diesen Bedingungen bei ca. 2-3 %/h. Die Inhibierung durch den gebildeten Wasserstoff wurde dabei konservativ nicht berücksichtigt. Bei einem Dampfgehalt von 1300 kg ergäbe sich ein Druckanstieg aufgrund der chemischen Reaktion von 0,4 bar/h. Die tatsächlichen Werte dürften erheblich darunter liegen, da die Core-Temperaturen auch bei Nichtbespeisung des intakten Dampferzeugers nach kurzfristigem Anstieg sehr rasch wieder fallen. Aus diesem Grunde konnte auch auf Rechnungen mit dem Programm REACT/THERMIX verzichtet werden.

### 3. VERSAGEN DER DRUCKREDUZIERSTATIONEN

#### 3.1 Nichtöffnen von HD-Umleitstation und Entlastungsregelstation

##### 3.1.1 Klärung der radiologischen Relevanz

Wenn keine der beiden Reduzierstationen öffnet, kann sich der Druck auf der Sekundärseite des Dampferzeugers nur über das Leck abbauen. Gleichzeitig findet eine weitere Beheizung des Dampferzeugers infolge der Naturkonvektion im Primärkreislauf statt. Die Heizleistung liegt bei etwa 3 % der Nennleistung. Damit würden unter Vollastzuständen 3 kg/s Dampf produziert. Der Leckagestrom beträgt bei dem unterstellten Leck dagegen nur etwa die Hälfte dieses Wertes, so daß die Vermutung naheliegt, daß es unter diesen Umständen sogar zum Druckaufbau im Dampferzeuger und zum Ansprechen eines Frischdampf-Sicherheitsventils kommt.

Bei der Lösung dieser Frage erwies sich die Behandlung der Abwärtsverdampfung wiederum als besonderes Problem. Die Schwierigkeit liegt darin, das Vordringen der Wasserfront in die tiefliegenden heißen Teile des Bündels bei gleichzeitiger Beheizung vernünftig zu beschreiben. Als Lösungsansatz wurde die zeitliche Entkoppelung der beiden zeitgleich ablaufenden Vorgänge gewählt. In einem intakten Dampferzeuger mit Abwärtsverdampfung stellt sich, wenn er abgesperrt wird und sich dann selbst überlassen bleibt, nach einer gewissen Zeit ein Temperatúrausgleich ein. Der Dampferzeuger ist dann im unteren Teil mit Wasser gefüllt, das sich auf Siedetemperatur befindet. Der obere Teil ist mit Wasserdampf gefüllt. Der Druck entspricht dem Dampfdruck, der zur Ausgleichstemperatur gehört. Es wurde nun unterstellt, daß sich dieser Zustand zunächst einstellt, bevor der Dampferzeuger von unten her mit Heißgas beaufschlagt wird. Während der Ausgleichsphase wurde der Dampferzeuger als geschlossen betrachtet. Dabei ergibt sich eine Ausgleichstemperatur von 325 °C und ein zugehöriger Dampfdruck von 121 bar.

Zur Simulation der Beheizungsphase wurde jeder Dampferzeugerstrang als Kessel betrachtet, der mit Wasser und Dampf gefüllt ist und sich auf einheitlicher Temperatur befindet (s. Abb. 6). Die zu-

geführte Wärme dient dazu, Wasser und Struktur aufzuheizen und die Verdampfungswärme für den produzierten Dampf bereitzustellen. Es wurde unterstellt, daß der Dampf zum Dampfraum aufsteigt und dafür Wasser aus dem unteren Teil des Kessels herübergedrückt wird zum Frischdampfsammler und den angeschlossenen Dampfleitungen. Das Wasser trifft dort auf heiße Strukturen hoher Wärmekapazität und verdampft, solange die Strukturen heißer sind als die zum jeweiligen Dampfdruck gehörende Siedetemperatur. Der so gebildete Dampf strömt vom Frischdampfsammler über das defekte Rohr zur Leckstelle. Der aus dem Dampfraum des gedachten Kessels über den Speisewassersammler zur Leckstelle strömende Dampf ist wegen der in jedem Rohr sitzenden Blende praktisch vernachlässigbar.

Die Rechnungen mit diesem Modell zeigten, daß der Druck im Dampferzeuger innerhalb von 500 s von 120 bar auf 220 bar ansteigt. Die thermische Expansion des Wassers ist so groß, daß der gesamte zur Verfügung stehende Dampfraum schließlich mit Wasser gefüllt ist. Es steht also außer Zweifel, daß eines der Frischdampf-Sicherheitsventile aufgedrückt wird. Der weitere Störfallablauf bei Schließversagen des ansprechenden Sicherheitsventils hängt davon ab, ob das Ventil zum defekten oder zum intakten Dampferzeugerstrang gehört. Auf jeden Fall bewirkt das Versagen des Ventils die im Prozeßablauf vorgesehene Druckabsenkung, die für die dampfseitige Trennung der beiden Stränge erforderlich ist.

Bleibt das Sicherheitsventil des defekten Stranges offen, so wird dieser als defekt erkannt und bleibt abgesperrt. Die Nachwärmeabfuhr erfolgt auslegungsgemäß mit dem intakten Strang. Sie ist zeitlich in keiner Weise beschränkt. Jedoch kommt es während der Nachwärmeabfuhrphase zur Druckentlastung des Primärkreislaufs über das Leck und das offene Sicherheitsventil. Druckausgleich mit der Umgebung ist, je nach Leckort, nach 6 bis 30 h erreicht.

Spricht das Sicherheitsventil im intakten Dampferzeugerstrang an und bleibt offen, so wird dieser von der Automatik fälschlicherweise als defekt identifiziert. Der Defekte wird dann zur Nachwärmeabfuhr bespeist mit der Folge eines kontinuierli-

chen Wassereinbruchs. Die Nachwärmeabfuhr mit dem defekten Dampferzeugerstrang kann daher nur für eine begrenzte Zeit aufrechterhalten werden, wie im nächsten Kapitel gezeigt wird.

Zur langfristigen Nachwärmeabfuhr muß auf den intakten Strang umgeschaltet werden. Dies setzt eine Reparatur des defekten Sicherheitsventils oder die Bereitstellung großer Wassermengen voraus. Im Warmwasserbetrieb dürfte aber auch eine hinreichende Absenkung des Gegendrucks ausreichen, um Leckagen zu unterbinden, da das Sicherheitsventil über Dach abbläst und damit die Ausflußstelle höher liegt als der Dampfkondensator des AuAS. Es wurde daher unterstellt, daß die Nachwärme langfristig über den intakten Dampferzeugerstrang abgeführt wird. In diesem Fall bleibt der Primärkreislauf geschlossen.

Als radiologisch relevanter Fall verbleibt also das Versagen des Frischdampf-Sicherheitsventils im defekten Strang. Für diesen Fall müssen daher die Zustände im Primärkreislauf ermittelt werden, die einen Einfluß auf die Remobilisierung abgelagerter radioaktiver Stoffe haben.

### 3.1.2 Dampfzustände im Primärkreislauf und Benetzung der Dampferzeugeroberfläche

Die Dampfzustände im Primärkreislauf entscheiden darüber, ob es im Verlaufe des Störfalls zur Kondensation kommt oder nicht. Diese Frage ist deshalb von Bedeutung, weil die Kondensation im Dampferzeuger stattfindet und damit gleichbedeutend ist mit einer Benetzung von Dampferzeugeroberflächen.

Die Gefahr der Kondensation ist umso größer, je mehr Wasserdampf in den Primärkreislauf gelangt. Es wurde daher versucht, die einbrechende Gesamtmenge auf der Basis von Abschätzungen über den zeitlichen Ablauf und die zustandsabhängigen Einbruchsraten einzugrenzen. Für den Zeitbereich vom Abschalten des Reaktors bis zum Ansprechen des Frischdampf-Sicherheitsventils wurde auf das vorher beschriebene Modell zurückgegriffen. Die hierbei unterschätzte Einbruchsrate dürfte durch die überschätzte Dauer der Phase kompensiert werden. Für das Offenbleiben des Frischdampf-Sicherheitsventils wurde unterstellt, daß es in

der voll geöffneten Stellung versagt, nachdem sich gezeigt hatte, daß beide Ventile voll öffnen. Die sekundärseitige Druckentlastung der Dampferzeuger auf 120 bar ist hierbei in weniger als einer Minute abgeschlossen. Insgesamt vergehen nach dem Abschalten des Reaktors etwa 10 min bis zur Wiederbespeisung des intakten Dampferzeugers zwecks Nachwärmeabfuhr. In dieser Zeit gelangen etwa 1100 kg an Wasserdampf in den Primärkreislauf, wovon 5 % durch das einmalige Ansprechen des RDB-Sicherheitsventils ans Gaslager abgegeben werden. Die mittlere Dampfdichte im Primärkreislauf erreicht zu Beginn der Druckentlastung einen Wert von  $4,3 \text{ kg/m}^3$ . Die dazugehörige Sättigungstemperatur beträgt  $171,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Infolge der Druckentlastung sinkt die Dampfdichte im Primärkreislauf stetig ab und damit auch die Temperatur, bei der Kondensation auftreten kann. Bei einem Leck auf der Speisewasserseite ist die Druckentlastungsgeschwindigkeit jedoch zu klein, um zu verhindern, daß die Temperatur am Austritt des Dampferzeugers vorübergehend unter die Sättigungstemperatur abfällt. Es kommt daher in einem kleinen Teil des Dampferzeugers zur Volumen- und Oberflächenkondensation. Unterstellt man, daß die Volumenkondensation beide Stränge benetzt, die Oberflächenkondensation aber nur den gekühlten Strang, so ergibt sich eine benetzte Fläche von 13 % der Gesamtfläche. Die Dauer der Benetzung beträgt mehrere Stunden. Sie wird durch Verdunsten des auskondensierten Wassers beendet, wenn der Wasserdampf-Partialdruck weit genug abgesunken ist.

Hinzu kommt bei einem Leck auf der Speisewasserseite, daß in der Anfangsphase Wasser einbricht, das durch Auftreffen auf Flächen und durch Herabrieseln ebenfalls zu einer Benetzung von Oberflächen führt. Zur Ermittlung der maximal denkbaren benetzbaren Fläche wurde die Dampferzeugeroberfläche abgebildet auf eine senkrechte Wand mit der Höhe des Dampferzeugers. An der Wand fließt ein Rieselfilm abwärts, dessen Breite durch die Zuströmrate und die für die Erhaltung eines geschlossenen Rieselfilms erforderliche minimale Massenbelegungsdichte /3/ errechnet wird. Durch Verdunstung nimmt die Breite des Films mit der Lauflänge ab, wobei die lokale Verdunstungsrate mit der Wandtemperatur zunimmt. Bei Erreichen der Siedetemperatur verdampft der Film.

Die Anwendung dieses Modells ergab, daß bei der Einbruchsrates von 2,5 kg/s und dem axialen Temperaturprofil des Normalbetriebes etwa 92 m<sup>2</sup> benetzt werden. Das sind ca. 4 % der gesamten Dampferzeugeroberfläche. Die Dauer der Benetzung ist mit 2 bis 3 min zu veranschlagen.

### 3.2 Offenbleiben der Entlastungsregelstation des AuAS

#### 3.2.1 Radiologisch relevante Fälle

Die Entlastungsregelstation des AuAS wird angefordert, wenn die HD-Umleitstation nicht öffnet. Ein anschließendes Schließversagen der Regelstation würde zu einem permanenten Wasserverlust aus dem AuAS führen. Dies hat aber zunächst nur Auswirkungen auf die Dauer der Zwangskühlung mit dem blockzugehörigen AuAS. Ein Freisetzungspfad würde sich erst ergeben, wenn zusätzlich die Absperrarmatur auf der Dampfseite des defekten oder des intakten Stranges auf Anforderung nicht schließt. Bleibt die Armatur im defekten Strang offen, so wird dieser Strang zwar ordnungsgemäß als defekt identifiziert, die Verbindung zur offenen Entlastungsregelstation wird jedoch nicht unterbrochen. Schließt dagegen die Armatur im intakten Strang nicht, so kommt es während der Identifizierungsphase zu einem weiteren Druckabfall im intakten Dampferzeugerstrang mit der Folge, daß dieser fälschlicherweise als defekt identifiziert wird. Zur Nachwärmeabfuhr wird dann der defekte Strang herangezogen.

Beide Ereigniskombinationen führen, solange der Druck auf der Sekundärseite auf 80 bar gehalten werden kann, zu einem fort-dauernden Wassereinbruch in den Primärkreislauf, sei es durch direkte Bespeisung des defekten Stranges oder durch Rückwärtsbespeisung über die Dampfseite. Zur Freisetzung von Spaltprodukten aus dem Primärkreislauf kommt es erst, wenn der Druck auf der Sekundärseite unter den Primärkreislaufdruck abfällt. Abschätzungen haben ergeben, daß dies spätestens der Fall ist, wenn der bespeiste Dampferzeugerstrang in den Warmwasserbetrieb übergeht. Dabei wurde unterstellt, daß die Entlastungsregelstation in der Stellung versagt, die sie einnimmt, um den Dampferzeuger innerhalb von 120 s von 190 bar auf 120 bar zu entlasten. Das ergab, bezogen auf 80 bar, eine Dampfabströmrate von

ca. 5,5 kg/s. Bei Wasser erhöht sich der Wert um ein Vielfaches, so daß er dann deutlich über dem Speisewasserstrom von ca. 10 kg/s liegt. Das bedeutet, daß im Warmwasserbetrieb der Druck auf der Sekundärseite nicht auf 80 bar gehalten werden kann. Er fällt zwangsläufig auf einen Wert ab, bei dem die Speisewasserpumpen des AuAS in der Lage sind, soviel Wasser zu fördern wie über das offene Ventil abströmt. Ohne Kenntnis der Pumpenkennlinie läßt sich dieser Wert nicht genau angeben.

Für eine steile Kennlinie wurde unmittelbar nach Übertritt in den Warmwasserbetrieb ein Druck von 36 bar bei einem Förderstrom von 18 kg/s ermittelt. Man kann daher erwarten, daß der Druck deutlich unter den Primärkreislaufdruck abfällt. Der Wassereinbruch wäre damit beendet. Solange die Zwangskühlung mit dem AuAS aufrecht erhalten werden kann, strömt mit dem Helium Wasser und Dampf an der Regelstation aus. Das hat zwangsläufig Rückwirkungen auf die atmosphärische Ausbreitung der freigesetzten Spaltprodukte. Die Dauer der Zwangskühlung ist über den Wasservorrat des AuAS von 120 m<sup>3</sup> auf etwa 2,5 h begrenzt.

Die Druckentlastung des Primärkreislaufs kann durch Schließen der Absperrarmatur vor der Entlastungsregelstation unterbrochen werden. Es gibt gute Gründe anzunehmen, daß dies geschieht, so bald das AuAS wegen Wassermangel ausfällt. Die Spaltproduktfreisetzung wäre damit nach etwa 2,5 h beendet. Eine Wiederaufnahme der Zwangskühlung wäre nur dann möglich, wenn die Absperrarmatur auf der Frischdampfseite des intakten Stranges offengeblieben ist. Sie könnte dadurch bewerkstelligt werden, daß der Speisewasserbehälter des blockeigenen AuAS wiederaufgefüllt und die Entlastungsregelstation repariert wird oder daß das AuAS des anderen Blocks angefordert wird.

### 3 2.2 Rückwirkungen auf den Primärkreislauf

Die Rückwirkungen auf den Primärkreislauf hängen in erster Linie vom Leckort ab. Bei einem Leck der postulierten Größe auf der Frischdampfseite gelangt die größere Wassermenge in den Primärkreislauf. Außerdem sinkt der Druck im Primärkreislauf während der Druckentlastungsphase am schnellsten ab. Mithin ist die

Gasmenge, die während der Druckentlastungsphase aus dem Primärkreislauf entweicht, bei einem Leck auf der Frischdampfseite am größten. Der Fall kann daher als abdeckend für alle Leckorte betrachtet werden.

Geht man davon aus, daß der Wassereinbruch erst bei Übergang des bespeisten Dampferzeugers in den Warmwasserbetrieb endet, was nach den Untersuchungen im nächsten Kapitel nach etwa 5000 s der Fall ist, so gelangen etwa 3.100 kg Wasser bzw. Dampf in den Kreislauf. Der Wert basiert auf einer mittleren Einbruchsrate von 0,5 kg/s, die auf das geringe Druckgefälle zwischen Sekundär- und Primärkreislauf zurückzuführen ist (s. Abb. 10). Mit dem Ansprechen des RDB-Sicherheitsventils ist nur am Anfang ein- bis zweimal zu rechnen, weil die Temperaturen im Kaltgasraum schnell so weit absinken, daß Kondensation einsetzt (s. Abb. 4). Von der einbrechenden Menge werden daher nur etwa 120 kg an das Gaslager abgegeben.

Zu Beginn der Druckentlastung befinden sich also etwa 3.000 kg an Wasser im Primärkreislauf, 800 kg in Form von Sattedampf. Der Primärkreislaufdruck liegt zu diesem Zeitpunkt bei etwa 54 bar, wovon 47,5 bar auf den Helium-Partialdruck entfallen. Dieser sinkt im Laufe der Druckentlastung auf etwa 22 bar ab, während der Wasserdampf-Partialdruck von etwa 6,5 bar durch Rückverdampfung aus der Wasserlache erhalten bleibt. Insgesamt entweichen 600 kg Wasserdampf aus dem Primärkreislauf.

Der Dampfgehalt im Primärkreislauf erreicht schon sehr früh einen Wert, bei dem Kondensation im Dampferzeuger stattfindet. Im Laufe der Zeit fällt soviel Kondensat an, daß das Wasser gegen die Gasströmung im Dampferzeuger herabrieselt und auf das noch heiße Core fällt. Die Wiederverdampfung eines Teils des Wassers und der Rücktransport mit dem Gasstrom in den Dampferzeuger führt dazu, daß mit zunehmender Abkühlung des Cores schließlich die gesamte Dampferzeugeroberfläche benetzt wird. Die Benetzungszeit bis zum Abschluß der Freisetzung beträgt selbst bei den Partien, die als letztes benetzt werden, noch mindestens 1 h.



Zum Zeitpunkt des Ausfalls des blockeigenen AuAS ist der defekte Strang vollständig mit Wasser gefüllt. Gelingt die Wiedereinbetriebnahme der Zwangskühlung nicht, so steigen die Coretemperaturen wieder soweit an, daß mit dem Ausdampfen des Stranges zu rechnen ist. Das Eindringen der zusätzlichen 3000 kg Dampf in den Primärkreislauf und der vorübergehende Anstieg der mittleren Gastemperatur führt aber nicht zu einem Druckanstieg, der eines der RDB-Sicherheitsventile zum Ansprechen bringt. Verhindert wird dies durch Kondensation im unteren Teil des RDB. Bei Ausfall der Zwangskühlung herrscht dort, wie im übrigen RDB auch, eine Wandtemperatur von ca. 155 °C. In der Folgezeit sinken die Wandtemperaturen im Bereich des unteren Plenums durch das Übergewicht der Wärmeabgabe an das Betonkühlssystem weiter ab. Dies zeigen die Untersuchungen zur Nachwärmeabfuhr mit dem Betonkühlssystem bei unter Druck befindlichem Reaktor (Abb. 7). Die zusätzlich abzuführende Kondensationswärme wird die Tendenz nicht umkehren. Das bedeutet, daß das im Primärkreislauf zurückgehaltene Wasser in der flüssigen Phase verbleibt und daß von dem zusätzlich eindringenden Dampf ein Teil ständig durch Kondensation wieder abgezogen wird. Auch wenn die Einbruchsrates zeitweilig die Kondensationsrate übersteigt, kann sich kein hoher Wasserdampfpartialdruck im Primärkreislauf aufbauen.

#### 4. Nachwärmeabfuhr mit defektem Strang

Wird ein defekter Dampferzeuger während der Nachwärmeabfuhr mittels Zwangskonvektion nicht separiert und abgesperrt, kann es zu einem kontinuierlichen Wassereinbruch in den Primärkreis kommen. Ein derartiger langandauernder Ablauf wurde beim HTR-100 unter folgenden Gesichtspunkten untersucht:

- Druckaufbau im Primärkreis und Reingaslager
- Einfluß der Dampfeinströmung auf den Druckverlauf
- Unterbrechung der Zwangskonvektion durch das Kondensat

##### 4.1 Druckaufbau im Primärkreis und Reingaslager

Die Analyse des Wassereinbruchstörfalls wurde mit dem Rechenprogramm COROX durchgeführt /4/. Das Programm berechnet die Wärmeabfuhr im Primärkreis über die Dampferzeuger für Kühlgasgemische von Helium mit Wasserdampf. Dabei werden Kondensationseffekte im Kaltgasbereich und Verdampfungseffekte im Heißgasbereich miteinfaßt. Beim Öffnen der Sicherheitsventile strömt das Helium-Dampf-gemisch in das Reingaslager, wo der Dampf in Abhängigkeit von dem Partialdruck und der Sättigungstemperatur ebenfalls auskondensieren kann. Das Kondensat trägt dann nicht mehr zum Druckanstieg im Primärkreis oder Reingaslager bei, wodurch ein weiterer Druckaufbau wesentlich begrenzt wird (Abb. 8).

Bei der Nachwärmeabfuhr mit einem defekten Dampferzeugerstrang wurde ein Gasdurchsatz von 7 % und ein Speisewasserdurchsatz von 10 % des Normalbetriebswertes zugrunde gelegt. Ferner wurde davon ausgegangen, daß dabei über das Reaktorschutzsystem die Reaktorabschaltung nach 100 s ausgelöst wird. Die Rechnungen mit einer konstanten konservativ hohen Einströmrates von 1 kg/s Dampf haben ergeben, daß der Primärkreisdruck nicht über 77 bar ansteigt, dem Ansprechdruck des am niedrigsten eingestellten Sicherheitsventils. Dabei wird das Core so schnell abgekühlt, daß etwa nach 1800 s Kondensation im Primärkreis einsetzt.

Die Abb. 9 zeigt den Druckverlauf mit dem Öffnungs- und Schließvorgang des Sicherheitsventils, der innerhalb von 6000 s abge-

geschlossen ist. Danach nimmt langfristig der Primärkreisdruck kontinuierlich ab, aufgrund zunehmender Kondensation.

Im Reingaslager bleibt somit der Druck mit rund 55 bar zunächst weit unterhalb des Ansprechdruckes des Sicherheitsventils von 85 bar. Demnach führt ein kontinuierlicher Wassereinbruch nicht zu einem Freisetzungspfad, solange die Nachwärmeabfuhr langfristig aufrechterhalten werden kann.

#### 4.2 Einfluß der Dampfeinströmrates auf den Druckverlauf

Für die mit dem Programm COROX ermittelten thermodynamischen Zustände, die sich bei einem kontinuierlichen Wassereinbruch während der Nachwärmeabfuhr im Primärkreis einstellen, wurde die Dampfeinströmrates für einen 1F-Heizrohrbruch mit dem Programm SIKAN-E (Version SIKADE) iterativ berechnet /5/.

Das Programm beschreibt die Dynamik von Gas-Wasser-Wärmetausch. Ihm liegt ein neueres dynamisches Modell für die 2-Phasenströmung auf der Sekundärseite zugrunde. Ferner ist das Programm geeignet, das Dampferzeugerverhalten beim Auftreten von Lecks zwischen Primär- und Sekundärkreislauf zu beschreiben, wie dies in diesem Fall betrachtet wird.

Bei der Berechnung des 1F-Bruches eines Frischdampfrohres wurde auf der Sekundärseite der auf 80 bar geregelte Druck und auf der Primärkreisseite der berechnete zeitliche Druckverlauf zwischen 73 und 77 bar als Gegendruck zugrunde gelegt. Die damit ermittelten zeitlichen Verläufe der Dampfeinströmrates, Dampftemperatur und Dampfqualität sind in den Abb. 10, 11 und 12 dargestellt. Daraus geht hervor, daß das Naßdampfgebiet nach etwa 2000 s und der Warmwasserbereich um 5000 s erreicht werden.

Die berechnete Dampfeinströmrates, die zeitweise kleiner als 1 kg/s ist, führt zu einem noch langsameren Druckanstieg (Abb. 13), wobei allerdings im Warmwasserbereich die Wassereinströmrates bis auf über 4 kg/s ansteigt. Dabei können sich im unteren Teil des Reaktordruckbehälters so große Wassermengen ansammeln, die auch das effektive Kreislaufvolumen verkleinern, daß der Kühlgasstrom beim Eintritt in den Bodenreflektorbereich unterbunden werden kann. Der damit verbundene Druckanstieg kann zu einem

späteren Öffnen des Primärkreises führen.

#### 4.3 Unterbrechung der Zwangskühlung

Die SIKAN-E/COROX-Rechnungen ergaben, daß bei einer Wassermenge von 50 t im unteren Corebereich der Kühlgasstrom nach etwa 5 h unterbrochen werden kann.

Unter der Annahme eines Restmassenstroms von 1,5 % auf der Gas- und Wasserseite ist beispielsweise mit einem erneuten Öffnen des Primärkreises nach weiteren 5 h zu rechnen. Sensitiver Parameter ist hier der Speisewasserdurchsatz, der über die Kaltgas-temperatur den Primärkreisdruck bestimmt (Abb. 13). Die Änderung des Gasvolumens durch Wasser wurde dabei nur als entsprechende Volumenverkleinerung des Reingaslagers berücksichtigt.

Daraus geht hervor, daß ein Ansprechen des Sicherheitsventils bei 85 bar nach etwa 10 h nicht ausgeschlossen werden kann. Der Wassereinbruch ist zwar durch den Sekundärdruck bei 80 bar begrenzt und damit auch die Volumenreduktion im Primärkreis. Auf der anderen Seite verhindert aber der Restmassenstrom bei core-interner Naturkonvektion und geringem Speisewasserdurchsatz nicht eine weitere Aufheizung mit einem Druckanstieg um 5 bar. Die sich einstellende Drucktransiente hängt von dem prozedurbedingten Speisewasserdurchsatz und der Speisewassertemperatur ab.

## 5. AUFDRÜCKEN DES FRISCHDAMPFSICHERHEITSVENTILS DURCH WEITERLAUFENDE SPEISEWASSERPUMPE

### 5.1 Ausgangssituation

Die Ausgangssituation ist dadurch gekennzeichnet, daß eine der Hauptspeisewasserpumpen fälschlicherweise weiterbetrieben wird und diese durch Zusatzversagen einer Reihe von Ventilen auf der Speisewasserseite den defekten Dampferzeugerstrang bespeist. Dies ist der ungünstigste Fall. Der Speisewasserstrom ist dabei mit etwa 50 kg/s anzusetzen, sofern der Gegendruck auf der Frischdampfseite in Höhe des Betriebsdrucks liegt. Dies ist der Fall, wenn man von der Phase der Druckabsenkung einmal absieht. Durch Ausfall des Hochdruck-Vorwärmers geht die Speisewassertemperatur von 180 °C auf 160 °C zurück, also auf die Wassertemperatur im Speisewasserbehälter. Der Wasservorrat im Speisewasserbehälter beträgt 90 m<sup>3</sup>. Sobald dieser Vorrat aufgebraucht ist, fällt automatisch die Hauptspeisewasserpumpe aus.

Trotz Weiterlauf der Speisewasserpumpe wird unterstellt, daß der übliche Verfahrensablauf ordnungsgemäß funktioniert. Nach der Druckabsenkungs- und Identifizierungsphase wird das AuAS angefordert, die Pumpen sind aber nicht in der Lage, gegen den Druck der Hauptspeisewasserpumpe anzufördern. Sie übernehmen daher erst die Weiterbespeisung des Dampferzeugers, wenn die Hauptspeisewasserpumpe wegen Wassermangels ausfällt. Vorher darf auch die Reduzierstation des AuAS nicht öffnen, weil sonst das System überspeist würde. Das von der Hauptspeisewasserpumpe geförderte Wasser entweicht daher über das Frischdampf-Sicherheitsventil.

### 5.2 Verhalten des Dampferzeugers

Da die Beheizung durch Ausschalten der Gebläse auf 3 % zurückgeht, der volle Speisewasserstrom aber erhalten bleibt, kühlt der defekte Dampferzeuger sehr schnell aus, wie Abb. 14 zu entnehmen ist. Schon während der Phase der Druckreduzierung geht der bespeiste Strang in den Warmwasserbetrieb über. Sobald die Ventile auf der Frischdampfseite zwecks Identifizierung des defekten Stranges geschlossen werden, schnellt daher der Druck

im defekten Strang auf den Ansprechdruck des Frischdampf-Sicherheitsventils hoch. Die zwangsläufige Folge ist, daß der defekte Strang wegen des hohen Drucks von der Automatik als intakt identifiziert und zur Nachwärmeabfuhr eingesetzt wird. Der Intakte bleibt dagegen abgesperrt.

Der Warmwasserbetrieb hat zur Folge, daß die Einbruchsraten ansteigen. Ein Leck der unterstellten Größe auf der Speisewasserseite ergibt eine Einbruchsrates von ca. 3 kg/s und ein Leck auf der Frischdampfseite von ca. 7 kg/s. Dabei ist vorausgesetzt, daß das Frischdampf-Sicherheitsventil den Druck auf der Frischdampfseite bei 220 bar hält, was der ungünstigste Fall ist. Nach der Wiederbeheizung durch Start der Gebläse ist nicht auszuschließen, daß der bespeiste Strang vorübergehend vom Warmwasser- in den Naßdampfbetrieb übergeht. Die Folge wäre eine Reduzierung der Einbruchsrates beim Leck auf der Frischdampfseite. Ob dies tatsächlich der Fall ist, hängt von der Effektivität des zusätzlichen Wärmetransportmechanismus durch das einbrechende Wasser ab. Dieser zusätzliche Wärmetransport kommt dadurch zustande, daß das Wasser auf das heiße Core rieselt, dort zumindest teilweise verdampft und mit dem Gasstrom zurück in den Dampferzeuger gelangt, wo der Dampf teilweise kondensiert und das Kondensat wieder auf das Core zurückfällt. Die Folge ist eine schnelle Abkühlung des Cores. Das kann dazu führen, daß die angebotene Wärmeleistung vom Dampferzeuger nicht vollständig abgeführt wird und dadurch die Temperatur im Kaltgasraum nach anfänglicher Absenkung vorübergehend wieder ansteigt. Dies wäre jedoch nur dann von Bedeutung, wenn die Kaltgastemperatur einen Wert von 200 °C wesentlich übersteigt, was bei einer Speisewassertemperatur von 160 °C nicht zu erwarten ist, wie eine Abschätzung gezeigt hat.

Nach 28 min ist der Speisewasserbehälter leer und das AuAS übernimmt die Weiterbespeisung des defekten Dampferzeugers. Dabei sinkt die Speisewassertemperatur von 160 °C auf 140 °C ab. Unterstellt man, daß das Frischdampf-Sicherheitsventil nicht wieder schließt, weil es mit Wasser beaufschlagt worden ist, so muß man davon ausgehen, daß der Druck auf der Sekundärseite des bespeisten Stranges zusammenbricht. Damit wäre der Wassereinbruch in den Primärkreislauf beendet. Gleichzeitig setzt die Druck-

entlastung des Kreislaufs über das Sicherheitsventil ein. Druckausgleich mit der Umgebung wird, je nach Leckort, nach 6 bis 30 h erreicht. Solange die Zwangskühlung über den defekten Dampferzeuger aufrechterhalten wird, tritt ein Gemisch aus Helium, Wasserdampf und Wasser an dem Ventil aus. Dies hat Auswirkungen auf die Ausbreitung der freigesetzten radioaktiven Stoffe.

### 5.3 Zustände im Primärkreislauf

Der derzeitige Kenntnisstand über die Wechselwirkung des einbrechenden Wassers mit dem heißen Core reicht nicht aus, um die Zustände im Primärkreislauf exakt vorausszusagen. Sie lassen sich jedoch soweit eingrenzen, daß eine Aussage über Art und Umfang der Spaltproduktfreisetzung, die Freisetzungsbedingungen und die im schlimmsten Fall zu erwartende Druckbehälterbelastung zu ermöglichen.

Zu erwarten ist, daß nach einer gewissen Anlaufphase ein wesentlicher Teil des einbrechenden Wassers durch das Core hindurchrieselt und sich im unteren Teil des Reaktordruckbehälters sammelt. Das austretende Wasser wird die momentane Temperatur des Bodenreflektors haben. Am Anfang beträgt sie 250 °C. Mit sinkender Kaltgastemperatur fällt auch die Temperatur des Bodenreflektors. Dies und die unmittelbaren Wärme- und Stoffaustauschvorgänge zwischen der sich bildenden Wasserlache und dem darüberstreichenden Kaltgas führt ebenfalls zu einer Abkühlung der Lache. Dies ist deshalb von Bedeutung, weil die Verdunstungsrate aus der Lache vom Wasserdampf-Partialdruck über der Lache und damit von der Lachentemperatur direkt abhängt. Außerdem bestimmt die Lachentemperatur, wieviel Wasser bei der Druckentlastung in Dampf umgewandelt wird. Wichtig ist deshalb, daß die Kaltgastemperatur im Laufe der Druckentlastung auf unter 100 °C gesenkt wird. Würde die Temperatur auf 140 °C gehalten, so führt die Druckentlastung im Endeffekt zur vollständigen Verdampfung des Lachenwassers, was nur eine Frage der Zeit ist.

Bei der effektiven Kühlung des defekten Dampferzeugerstranges in der Phase der Bespeisung mit der Hauptspeisewasserpumpe ist davon auszugehen, daß die Gastemperaturen am Austritt des Dampf-

erzeugers nur um 10-20 °C über der Speisewassertemperatur liegen. Im Kaltgasraum wird sich demnach eine Temperatur von 170 °C bis 180 °C einstellen. Der Dampf-Partialdruck im Kaltgasraum bleibt damit auf 8 bar bis 10 bar beschränkt. Das ergibt einen Gesamtdruck im Primärkreislauf von 69 bar bis 72 bar. Der Primärkreislaufdruck bleibt also unter dem Ansprechdruck der RDB-Sicherheitsventile. Nur in der Anfangsphase spricht das am niedrigsten eingestellte Sicherheitsventil einmal an. Zum Zeitpunkt der Beendigung des Wassereinbruchs befinden sich, je nach Leckort, zwischen 5 t und 12 t Wasser im Primärkreislauf, der überwiegende Teil davon in der Wasserlache. Die Übernahme der Nachwärmeabfuhr durch das AuAS bringt eine nochmalige Reduzierung der Kaltgastemperatur um etwa 20 °C, so daß der Wasserdampf-Partialdruck auf 5 bar bis 6 bar zurückgeht. Während der Phase der Druckentlastung des Primärkreislaufs werden bei einem Leck auf der Speisewasserseite ca. 3200 kg und bei einem Leck auf der Frischdampfseite ca. 4100 kg an Dampf an die Umgebung abgegeben.

Um sicherzugehen, daß es bei einer anderen Temperaturentwicklung im Kaltgasraum nicht zu einem anderen Freisetzungspfad mit anderen Freisetzungsbedingungen oder zu einer Überbeanspruchung des Reaktordruckbehälters kommt, wurde der Druckaufbau im Druckbehälter unter der Bedingung ermittelt, daß das gesamte einbrechende Wasser verdampft, solange der Gasstrom am Austritt des Dampferzeugers noch nicht gesättigt ist. Die maximale Temperatur am Austritt des Dampferzeugers wurde zwischen 200 °C und 250 °C variiert. Insbesondere die oberen Werte sind unrealistisch hoch. Praktisch würden sie bedeuten, daß dem Dampferzeuger mit einem Gas-Volumenstrom von 10 % des Normalbetriebswertes eine Wärmeleistung von mehr als 50 % der Nennleistung aufgeprägt wird und das bei sehr rasch abnehmender Heißgastemperatur, was kaum vorstellbar ist. Der Temperaturverlauf im Kaltgasraum wurde so vorgegeben, daß dort in etwa Sättigungsbedingungen vorherrschen, Kondensation also nicht stattfindet.

Der sich unter diesen Voraussetzungen für ein Leck auf der Frischdampfseite ergebende maximale Druck im Primärkreislauf ist in Abb. 15 als Funktion der maximalen Dampferzeuger-Austrittstemperatur graphisch dargestellt. Der Primärkreislauf-



druck steigt selbst im ungünstigsten Fall nur knapp über den Ansprechdruck des dritten Sicherheitsventils. Der Auslegungsdruck des Reaktordruckbehälters wird dabei zwar um 10 % überschritten, als Kurzzeitbelastung ist dies jedoch zulässig, wie im Abschnitt 6.4 gezeigt wird. Eine Überschreitung des Maximums wird langfristig dadurch verhindert, daß der Sättigungsdruck im Kaltgasraum erreicht wird und damit die Nettodampfproduktion zum Stillstand kommt. Der Druck im Lager erreicht bei weitem nicht den Ansprechdruck des Sicherheitsventils zum Kamin. Dieser Freisetzungspfad ist damit auszuschließen.

Die Nachwärmeabfuhr mit dem blockeigenen AuAS ist wegen des ständigen Wasserverlustes über das offene Sicherheitsventil auf weniger als 2 h begrenzt. Zur Wiederaufnahme der Nachwärmeabfuhr muß auf den intakten Strang umgeschaltet werden. Außerdem muß die Ursache für den Ausfall des blockeigenen AuAS beseitigt oder das AuAS des anderen Blocks angefordert werden. Hierfür steht genügend Zeit zur Verfügung, so daß ein Mißlingen nicht betrachtet wurde. Die Konsequenzen würden sich erst dann wesentlich ändern, wenn die Wiederinbetriebnahme so spät erfolgt, daß nur wenig oder gar kein Wasser im Primärkreislauf zurückbleibt.

#### 5.4 Benetzte Dampferzeugerfläche

Die benetzte Dampferzeugerfläche wird im vorliegenden Fall im wesentlichen durch die Kondensation bestimmt. Bei konstantem Volumenstrom auf der Gasaustrittsseite des Dampferzeugers, der von den Gebläsen aufgeprägt wird, sind die Haupteinflußgrößen die Dampfkonzentration im Core, die Gaseintrittstemperatur und der Heliummassenstrom, der seinerseits von der Gasaustrittstemperatur abhängt. Selbst bei sehr hohen Eintrittstemperaturen kommt es schon im unteren Drittel des Dampferzeugers zur Oberflächenkondensation, wenn die Dampfkonzentration der Sättigungskonzentration bei 230 °C entspricht, wie Abb. 16 zu entnehmen ist. Volumen Kondensation setzt kurz nach der ersten Hälfte des Dampferzeugers ein. Es ist daher anzunehmen, daß im Laufe der Zeit die gesamte Dampferzeugerfläche mit Wasser benetzt wird. Die Dauer der Benetzung beträgt möglicherweise mehrere Stunden, da die Primärkreislaufatmosphäre über lange Zeit gesättigt bleibt.

## 6. SCHÄDEN AN EINEM DAMPFSAMMLER

### 6.1 Auslösendes Ereignis

Die beiden Dampfsammler sind kurze dickwandige Rohre mit einem Innendurchmesser von 390 mm, die etwa 1,8 m in den Primärkreislauf hineinragen und mit der Rohrplatte enden. In die Rohrplatte münden die einzelnen Heizrohre, insgesamt 161 pro Dampferzeugerstrang. Aufgrund der qualitätssichernden Maßnahmen und der Kürze der Leitungen sind Schäden an den Dampfsammlern um Größenordnungen seltener als Schäden an den Heizrohren. Erstere tragen deshalb nur dann zum Risiko bei, wenn sich daraus Störfallszenarien entwickeln, die in ihren Auswirkungen erheblich über die durch Heizrohrlecks ausgelösten Szenarien hinausgehen.

Um sicherzugehen, daß dies nicht der Fall ist, wurde für ein postuliertes Leck an einem Frischdampfsammler der Druckaufbau im Primärkreislauf untersucht. Ziel war es dabei festzustellen, ob der Druckbehälter den auftretenden Belastungen standhält. Lokale Effekte wie die Aufheizung der Behälterwand durch den auftreffenden heißen Dampfstrahl und die dadurch induzierten Sekundärspannungen wurden außer acht gelassen, weil nicht erwartet wird, daß sie zum großflächigen Versagen des Reaktor-druckbehälters führen können. Schäden an einem Speisewassersammler sind durch die Untersuchungen für den Frischdampfsammler abgedeckt. Dies liegt daran, daß der Rückstrom aus den Heizrohren durch die eingebauten Blenden behindert wird und daß einbrechendes Wasser bei gleicher Menge einen langsameren Druckanstieg als überhitzter Dampf zur Folge hat, weil das Wasser zunächst noch verdampft werden muß.

Als postulierter Schaden wurde ein unterkritischer Längsriß mit einem Öffnungsquerschnitt von 10 % des Rohrquerschnitts des Sammlerrohres angenommen. Der Wert entspricht 42 % des Querschnitts aller an den Sammler angeschlossenen Heizrohre.

### 6.2 Verhalten des Dampferzeugers

Haupteinflußgrößen für den Druckaufbau im Primärkreislauf sind Einbruchsrates und Dampftemperatur. Ihr zeitlicher Verlauf wurde

mit dem Programm SIKADE-2a berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 17 zusammen mit dem aufgeprägten Verlauf des Speisewasserstromes dargestellt. In den Werten ist berücksichtigt, daß beide Dampferzeugerstränge bis 120 s nach Ansprechen des Reaktschutzsystems dampfseitig gekoppelt bleiben. Das bedeutet, wie man aus dem zeitlichen Verlauf der Einbruchsrateschwer erkennen kann, daß sich beide Stränge vollständig in den Primärkreislauf entlasten. Nach 25 s, wenn die HD-Umleitstation angefordert wird, ist der Druck in den Dampferzeugern bereits soweit abgefallen, daß die Station nicht mehr öffnet. Die Einbruchsrateselbst ist zu diesem Zeitpunkt von anfänglich 220 kg/s auf unter 5 kg/s abgefallen. Sie stabilisiert sich schließlich nach 120 s auf einen Wert von ungefähr 0,2 kg/s, der bis zur Wiederinbetriebnahme der Zwangskühlung nach 280 s beibehalten wird.

### 6.3 Zustände im Primärkreislauf

Abb. 18 zeigt für diesen massiven Dampfeinbruch den zeitlichen Verlauf des Drucks im Primärkreislauf. Er steigt zunächst sehr steil an, durchläuft nach 25 s ein Maximum und fällt dann wieder ab. Die Druckspitze liegt bei etwa 108 bar. Dabei wurde unterstellt, daß alle 3 Sicherheitsventile des RDB ordnungsgemäß funktionieren. Aufgrund des kleinen Abströmquerschnitts wirkt sich ihr Öffnen jedoch erst aus, wenn die Einbruchsrateshinreichend weit abgefallen ist.

Etwa 17 bar des maximalen Druckanstiegs sind auf die globale Erhöhung der Primärkreislauftemperaturen zurückzuführen. Zur Druckbegrenzung und zum Druckabfall trägt daher auch der Wärmeaustausch zwischen dem Gas und den kälteren Primärkreislaufstrukturen bei. In Bereichen des Kaltgasraumes kommt es sogar zur Oberflächenkondensation. Dies gilt insbesondere für den Dampferzeugerraum, in den der Dampf einbricht. Aufgrund der Schnelligkeit des Vorganges erreicht hier die Dampfdichte Werte, die deutlich über der Sättigungsdichte bei der herrschenden Wandtemperatur liegen. Die Kondensationsrate als solche ist jedoch gering und wurde deshalb in den Druckaufbaurechnungen auch vernachlässigt.

#### 6.4 Beanspruchung des Reaktordruckbehälters

Der Maximaldruck liegt um 42 % über dem Auslegungsdruck des Reaktordruckbehälters. Entsprechend hoch ist die Beanspruchung der Druckbehälterwand. Für die maximale Membranspannung wurde ein Wert von  $280 \text{ N/mm}^2$  errechnet. Die Membran-Biegespannung beträgt maximal  $419 \text{ N/mm}^2$ . Es handelt sich jedoch um eine Kurzzeitbeanspruchung, die in wenigen Minuten wieder auf das Auslegungsniveau zurückgeht. Hierfür gelten nach /6/ als zulässig für Membranspannungen  $353 \text{ N/mm}^2$  und für die Summe aus Membran- und Biegespannungen  $505 \text{ N/mm}^2$ . Die tatsächlichen Werte bleiben also deutlich unter den zulässigen Werten, weshalb es gerechtfertigt ist, ein Versagen des Reaktordruckbehälters nicht zu unterstellen.

#### 7. Zusammenfassung

Tabelle 2 enthält eine Zusammenstellung der wichtigsten Daten für die Wassereinbruchstörfälle, die sich in den vorhergehenden Abschnitten als radiologisch relevant erwiesen haben. Radiologisch relevant heißt, daß es in diesen Fällen zur Abgabe von Radioaktivität an die Umgebung kommt. Die näheren Umstände der jeweiligen Freisetzung sind in Tab. 2 im einzelnen angegeben. Anhand dieser Daten lassen sich die Freisetzungsmengen und die daraus resultierenden Umgebungsbelastungen berechnen. Gemeinsam ist allen radiologisch relevanten Fällen, daß die Aktivitätsfreisetzung immer über den Sekundärkreislauf erfolgt. Der andere Weg über die Überdrucksicherung des Reaktordruckbehälters wird dadurch verhindert, daß die Sicherheitsventile in das Gaslager abblasen und dieses auch bei massiven Wassereinbruchstörfällen über eine ausreichende Kapazität verfügt.

Die Erschöpfung des Gaslagers ist nur bei einer langandauernden Nachwärmeabfuhr mit dem defekten Dampferzeugerstrang zu erwarten. In diesem Fall bleiben der Schichtmannschaft jedoch viele Stunden Zeit, einzugreifen und eine mögliche Freisetzung über die Überdrucksicherung des Primärkreislaufs zu verhindern. Wichtig ist, den Wassereinbruch zu beenden, auch wenn die Zwangskühlung dabei unterbrochen werden muß. Das in der Zwischenzeit im Primärkreislauf angefallene Wasser sammelt sich im unteren

Teil des Druckbehälters, der durch die Kühlung über das Betonkühlsystem auf niedriger Temperatur verbleibt. Der Wasserdampf-Partialdruck im Primärkreislauf ist von daher auf niedrige Werte begrenzt. Die Fälle 7 und 8 wurden deshalb auch als radiologisch nicht relevant eingestuft und fehlen demzufolge in Tab. 2. Unabhängig davon wird jedoch empfohlen, den Druckbehälter mit einer Drainage-Leitung zu versehen, um angefallenes Wasser aus dem Kreislauf abziehen zu können.

Lecks an einem Frischdampfsammler können zu einer enormen lokalen und globalen Belastung des Reaktordruckbehälters führen. Die für Kurzzeitbelastungen zulässigen Spannungen werden zwar global nicht überschritten, trotzdem wäre eine Konstruktion anzustreben, die die Leckgröße auf kleinere Werte, als in dieser Untersuchung unterstellt, begrenzt.

## 8. LITERATUR

- /1/ M.H. Weber  
Some operational aspects of the downhill boiling THTR  
steam generator  
Boiler dynamics and control in nuclear power stations  
BNES, London, 1985
- /2/ Sicherheitstechnische Untersuchungen zum Störfallverhalten  
des HTR-Modul  
Jül-Spez-335, November 1985
- /3/ J. Wolters  
Rieselfilm-Notkühlung für Forschungsreaktoren vom Typ  
des FRJ-2  
Jül-1602, Jülich 1979
- /4/ W. Rehm; H. Bartels; W. Jahn; G. Meister  
Simulationsmethoden zur Analyse des thermodynamischen  
Verhaltens von HTR  
KFA-ISF-IB-3/87, April 1987
- /5/ G. Meister  
Dynamic Simulation of Steam Generator Failures  
IAEA-Meeting, Schweiz, 3/1987
- /6/ KTA-3201.2  
Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren  
Teil 2: Auslegung, Konstruktion und Berechnung (3/84).

**Zusammenstellung der untersuchten Wassereinbruchstörfälle und der vorrangig zu klärenden Fragen**

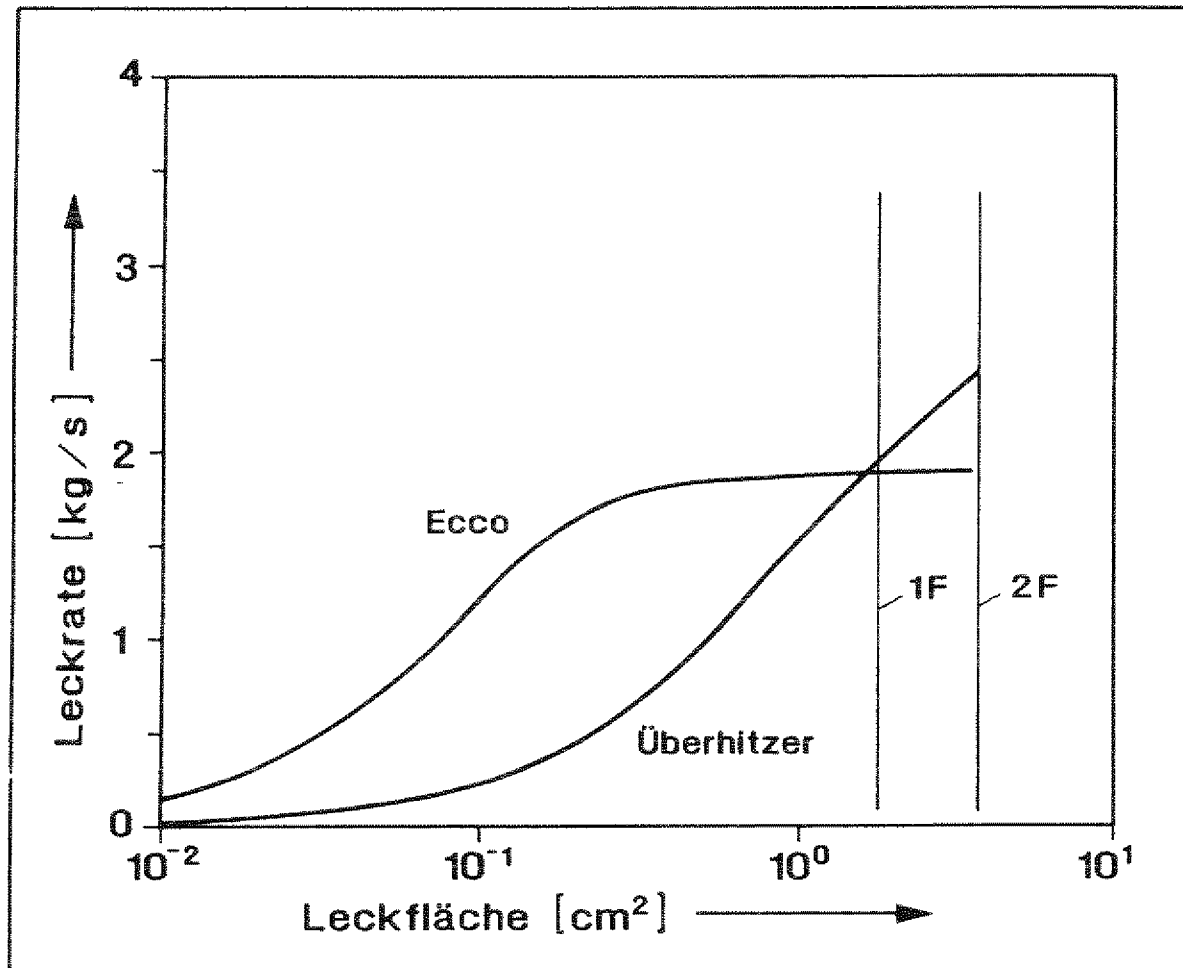
| lfd. Nr. | Kurzbeschreibung der Fälle und ggf. der unmittelbaren Folgen                                                                                                                                                                                                                                                                | Fragestellungen                                                                                                                                                              |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1        | Kleines Leck, Normalabfahren des Reaktors aufgrund zu hoher Feuchte                                                                                                                                                                                                                                                         | Leckgröße, ab der Schutzsystem anspricht ?                                                                                                                                   |
| 2        | Kleines Leck, korrekte Schutzaktionen, folglich Beheizung des defekten Strangs durch Zwangsumlauf                                                                                                                                                                                                                           | Ansprechen FD-Sicherheitsventil des abgesperrten defekten Stranges ?                                                                                                         |
| 3        | Mittleres Leck, Versagen der DE-Druckentlastung, folglich Beheizung des DE durch Naturumlauf ohne vorherige Entlastung                                                                                                                                                                                                      | Ansprechen FD-Sicherheitsventil des defekten Stranges ?<br>Benetzte DE-Fläche ?                                                                                              |
| 4        | Mittleres Leck, korrekte Schutzaktionen, aber Ausfall des AuAS, folglich NWA im Naturumlauf über Betonkühlsystem                                                                                                                                                                                                            | Ausreichende Kapazität des Gaslagers zur Aufnahme des überschüssigen Gases aus dem RDB ?                                                                                     |
| 5        | Wie 4, jedoch keine dampfseitige Strangtrennung                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                              |
| 6        | Mittleres Leck, korrekte Schutzaktionen, aber Blockage Gaslager bei Offenbleiben eines RDB-Sicherheitsventils, folglich keine Aufnahme von Gas im Gaslager                                                                                                                                                                  | Ansprechen Sicherheitsventil zum Kamin ?                                                                                                                                     |
| 7        | Mittleres Leck, korrekte Schutzaktionen, aber keine dampfseitige Strangtrennung, folglich kontinuierlicher Wassereinbruch in den Primärkreislauf                                                                                                                                                                            | Dauer der NWA mit Zwangsumlauf ?<br>Ausschöpfungsgrad Gaslager ?<br>Ansprechen Sicherheitsventil zum Kamin nach Unterbrechung des Gasumlaufts (einschließlich Naturumlauf) ? |
| 8        | Mittleres Leck, NWA per Zwangsumlauf ausschließlich mit defektem Strang, folglich kontinuierlicher Wassereinbruch in den Primärkreislauf                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                              |
| 9        | Mittleres Leck, korrekte Schutzaktionen, aber Offenbleiben der Entlastungsstation des AuAS und Nichtabspernung des defekten Stranges, folglich ständiger Wasserverlust des AuAS und Druckentlastung RDB                                                                                                                     | Dauer der NWA mit AuAS ?<br>Benetzte DE-Fläche ?                                                                                                                             |
| 10       | Mittleres Leck, korrekte Schutzaktionen, aber Weiterlauf einer Hauptspeisewasserpumpe und Offenbleiben der Hauptspeisewasserleitung und der Speisewasserregelventile<br><br>a) im defekten Strang<br><br>b) in beiden Strängen<br><br>mit Aufdrücken und Offenbleiben des Frischdampf-Sicherheitsventils im defekten Strang | Dauer der NWA mit weiterlaufen der Speisewasserpumpe bzw. mit AuAS ?<br>Benetzte DE-Fläche ?<br>Wahrung der RDB-Integrität ?                                                 |
| 11       | Bruch des Dampfsammlers, korrekte Schutzaktionen                                                                                                                                                                                                                                                                            | Wahrung der RDB-Integrität ?                                                                                                                                                 |

Tab. 1

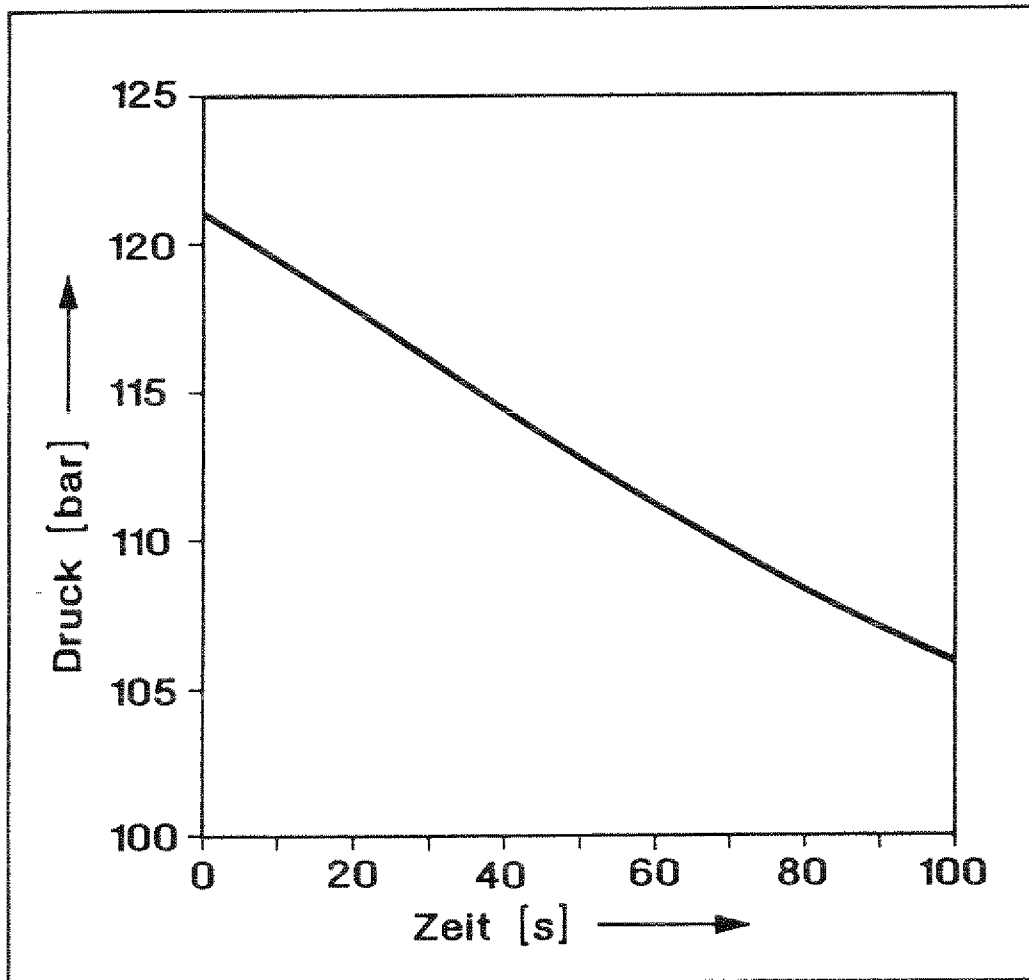
| Fall | Kurzbeschreibung                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | DE - Benetzung |                        | Dampfeinwirkung |                                     | Freisetzung                    |                 |                  | Rest-<br>wasser<br>im RDB<br>[kg]      |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------------|-----------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|----------------------------------------|
|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Dauer<br>[min] | Flächen-<br>anteil [%] | Dauer<br>[min]  | Druck<br>[bar]                      | Dauer<br>[h]                   | Dampf-<br>menge | Helium-<br>menge |                                        |
| 3    | Mittleres Leck auf Speise-<br>wasserseite, Versagen der<br>DE-Druckreduzierstationen,<br>Ansprechen und Offenbleiben<br>FD-Sicherheitsventil im def.<br>Strang, NWA mit intaktem<br>Strang, langsame Druckent-<br>lastung des RDB                                                                                                                                                                           | 5<br>~ 150     | 4<br>13                | 1800            | max. 8,5<br>mittl. 2,0<br>min. 0,12 | 30                             | ~ 100 %         | ~ 100 %          | —                                      |
| 9    | Mittleres Leck auf der FD-Seite,<br>Anforderung und Offenbleiben<br>der Entlastungsregelstation des<br>AuAS, Offenbleiben des dampf-<br>seitigen Absperrventils des def.<br>oder des intakten Stranges, zeit-<br>lich begrenzte NWA, Teildruck-<br>entlastung des RDB auf ca. 25 bar                                                                                                                        | ≥ 60           | 100                    | ~ 150           | max. ~ 20<br>min. ~ 5               | ~ 1h<br>(von 1,5h<br>bis 2,5h) | 600 kg          | ~ 40 %           | 2400<br>davon<br>~ 800 kg<br>als Dampf |
| 10   | Mittleres Leck auf der FD-Seite<br>bzw. der Speisewasserseite,<br>Weiterlauf einer Hauptspeise-<br>wasserpumpe und Nichtabsper-<br>rung der Speisewasserzufuhr<br>zum def. Strang, Aufdrücken<br>und Offenbleiben des FD-Sicher-<br>heitsventils im def. Strang, zeit-<br>lich begrenzte NWA mit def.<br>Strang, langfristige NWA mit<br>intaktem Strang, schnelle bzw.<br>langsame Druckentlastung des RDB | } ~ 120        | 100                    | 360<br>1800     | 30 / 1<br>20 / 1                    | 6<br>30<br>Beginn<br>nach 0,5  | 4100<br>3200    | } 100 %          | 7900<br>1800                           |

Physikalische Randbedingungen für die Berechnung der Spaltproduktablösung und -freisetzung  
bei den radiologisch relevanten Wassereintruchstörfällen

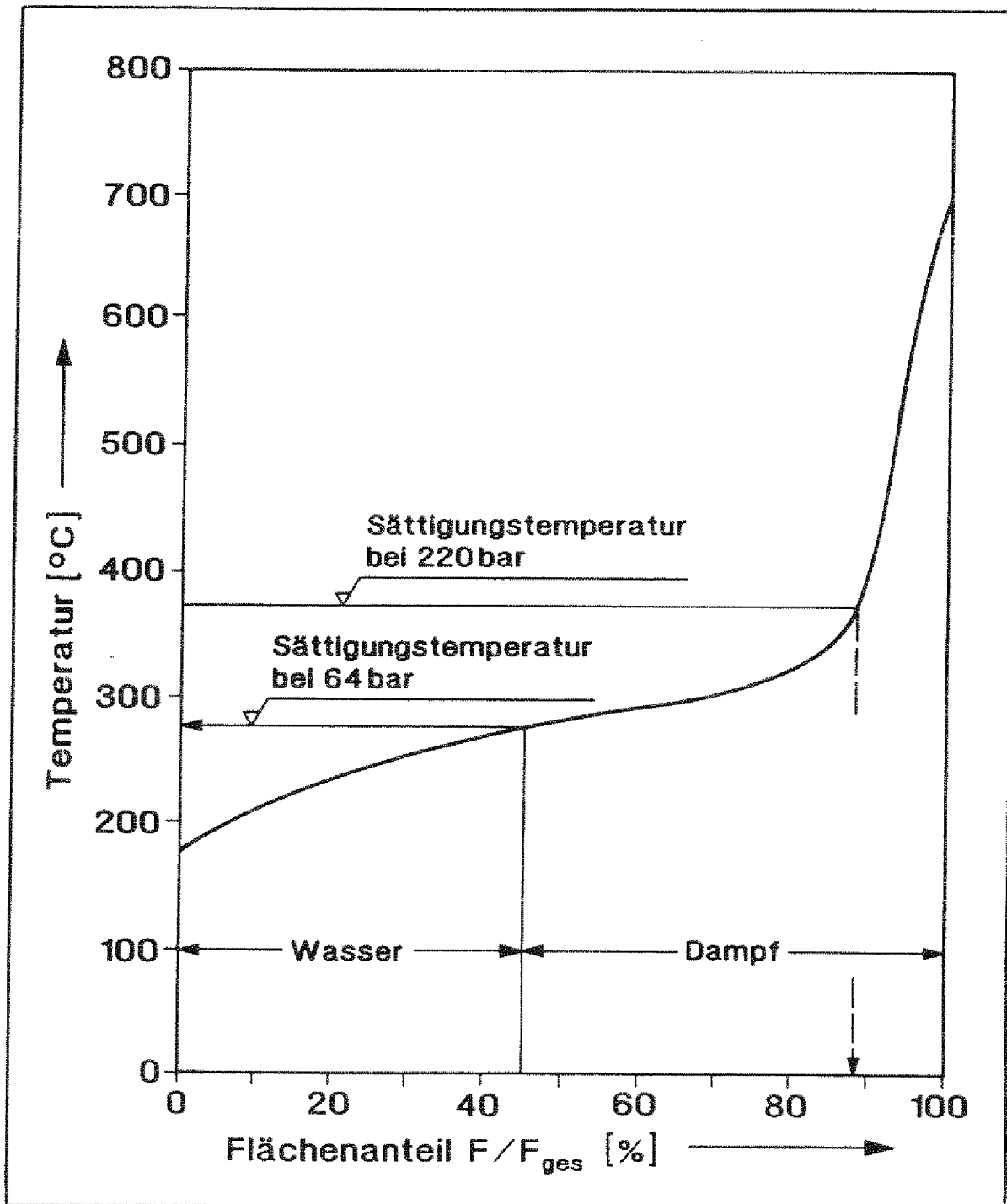




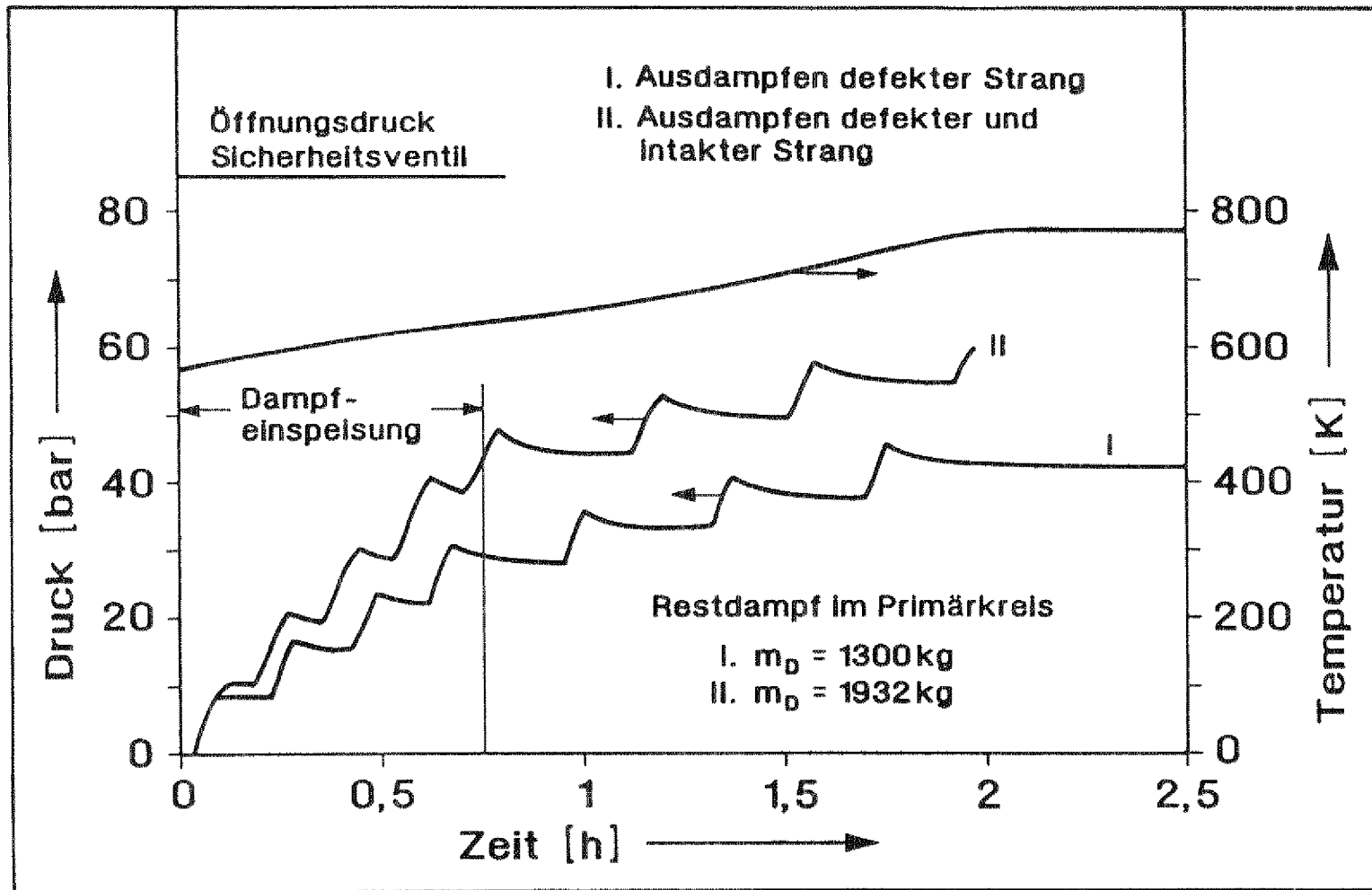
Leckrate als Funktion der Leckgröße für die beiden extremen Leckpositionen bei Vollast  
Leckort 3m nach Speisewassersammler bzw. 3m vor Frischdampfsammler



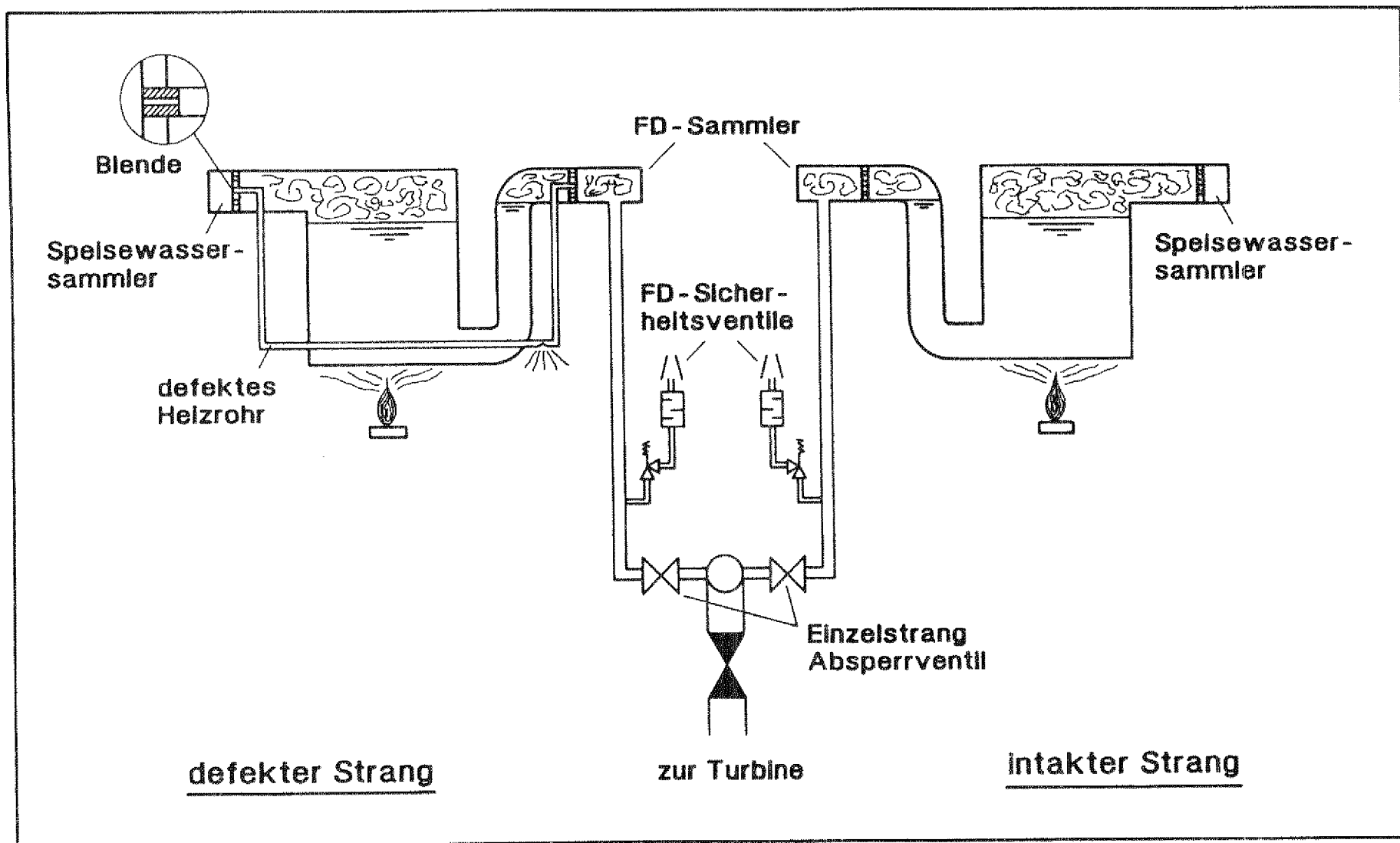
Zeitlicher Druckverlauf in einem abgesperrten, unbeheizten DE-Strang mit Aufwärtsverdampfung bei einem doppelendigen Bruch eines Heizrohres auf der Speisewasserseite

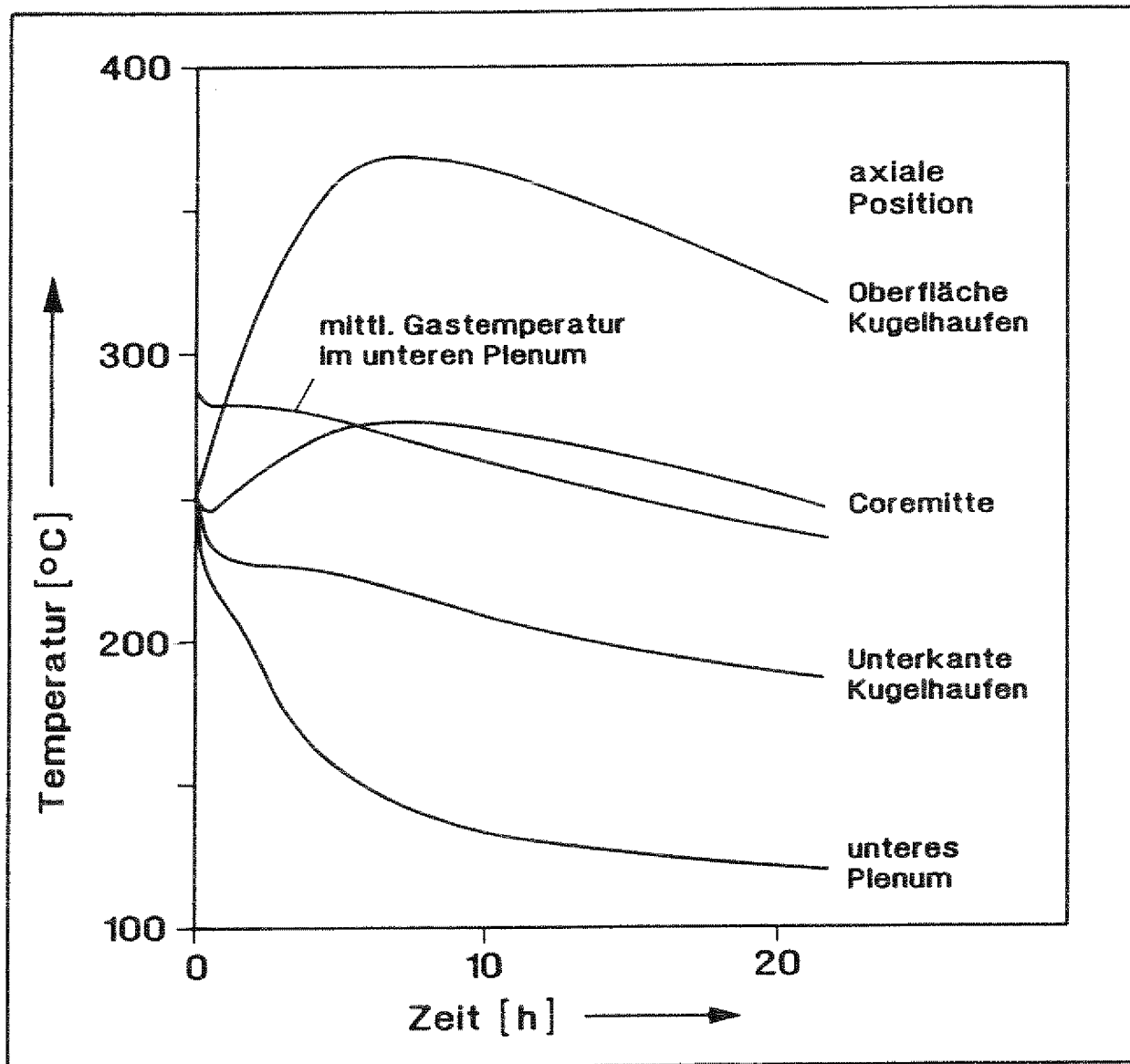


Gastemperaturprofil in der Anfangsphase der Nachwärmeabfuhr mit dem intakten Dampferzeugerstrang (Durchsätze 10% des Nennwertes).  $F_{ges}$  : Austauscherfläche

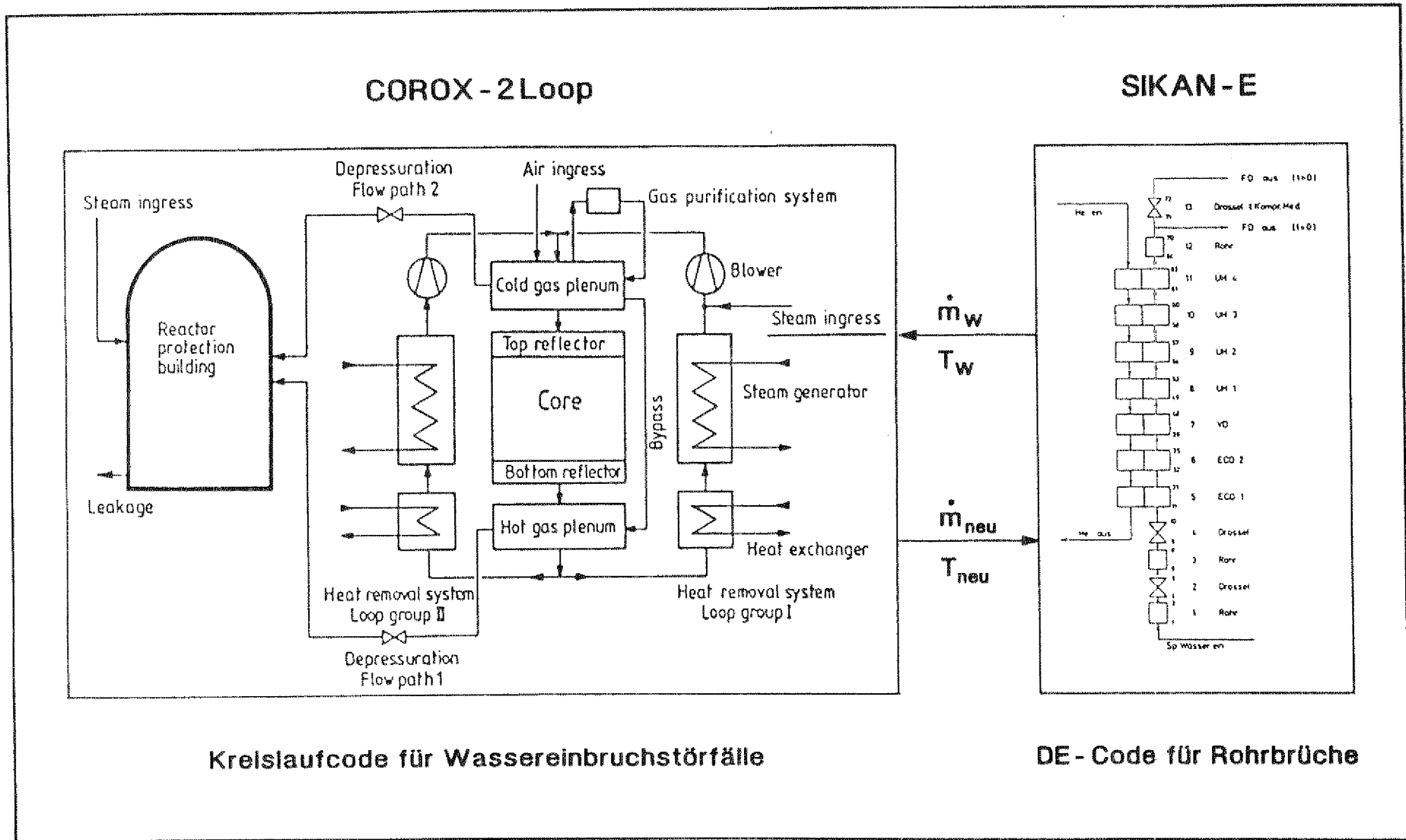


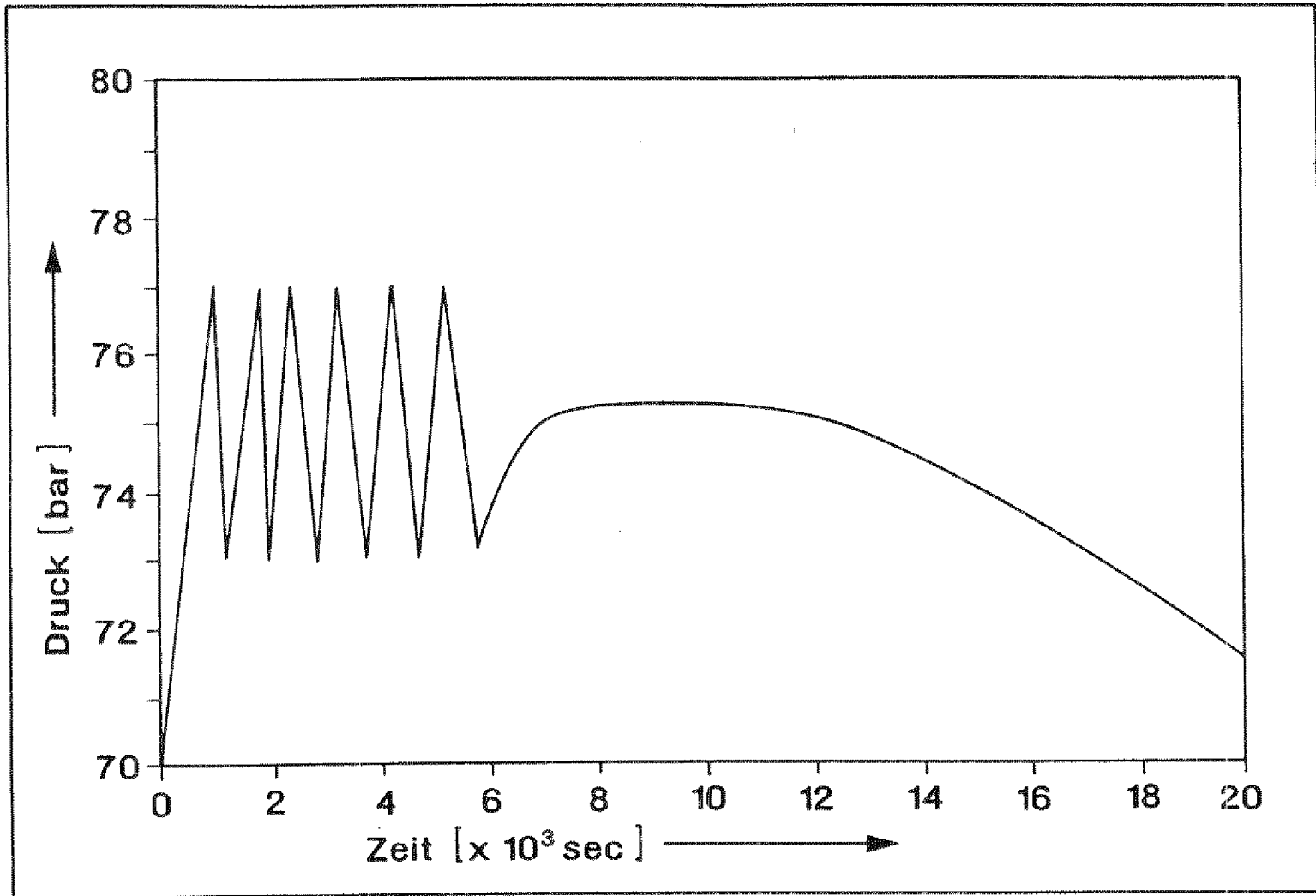
Zeitlicher Verlauf der mittleren Gastemperatur im Primärkreislauf und des Drucks im Gaslager bei der Nachwärmeabfuhr über das Betonkühlsystem und ausdampfen des def. bzw. beider Stränge in den Primärkreislauf





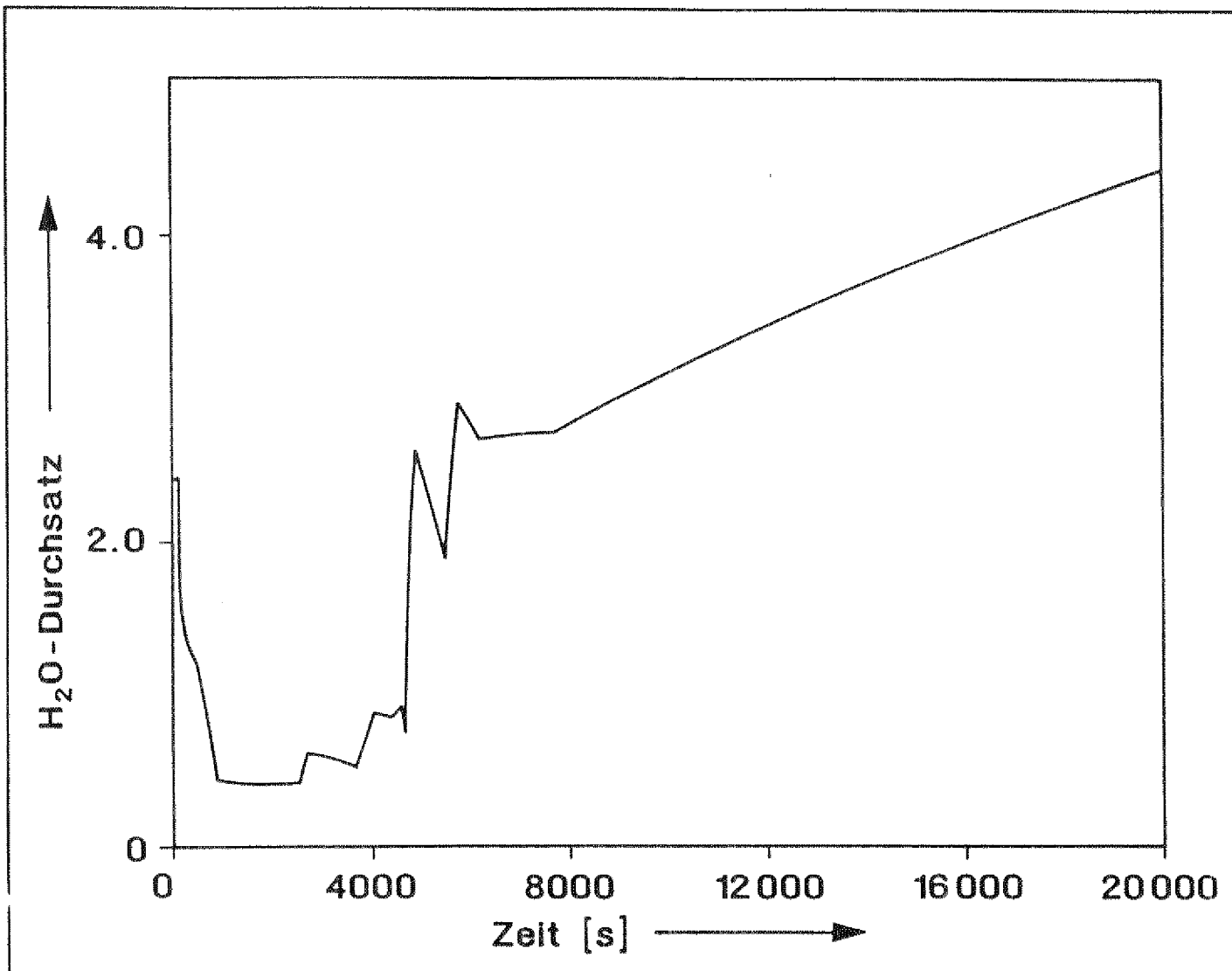
Zeitlicher Verlauf der Temperaturen in der Wand des RDB und der mittleren Gastemperatur im unteren Plenum bei der Nachwärmeabfuhr über das Betonkühlsystem mit unter Druck befindlichem Reaktor





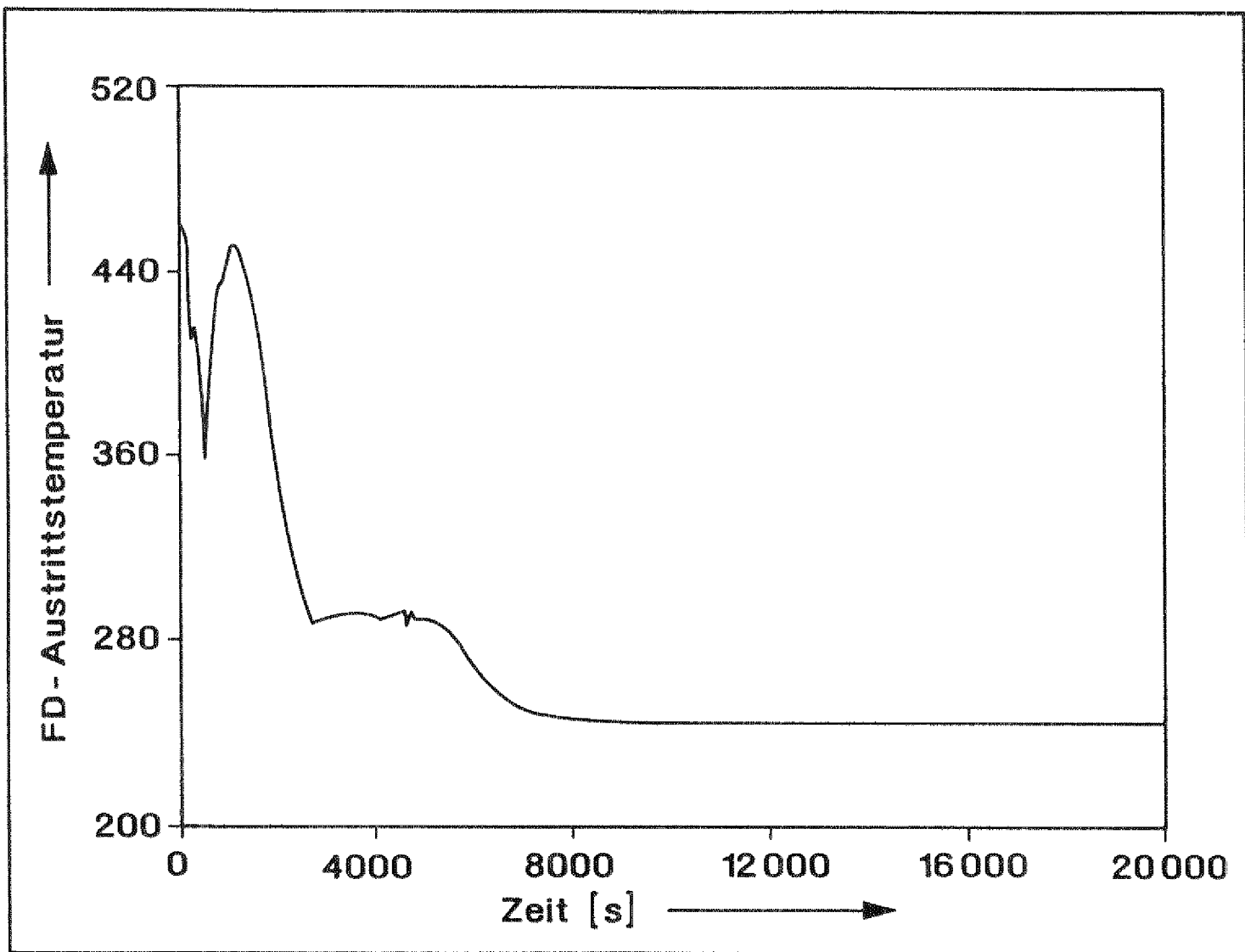
Druckverlauf im Primärkreis ( $\dot{m}_D = 1 \text{ kg/sec}$ )





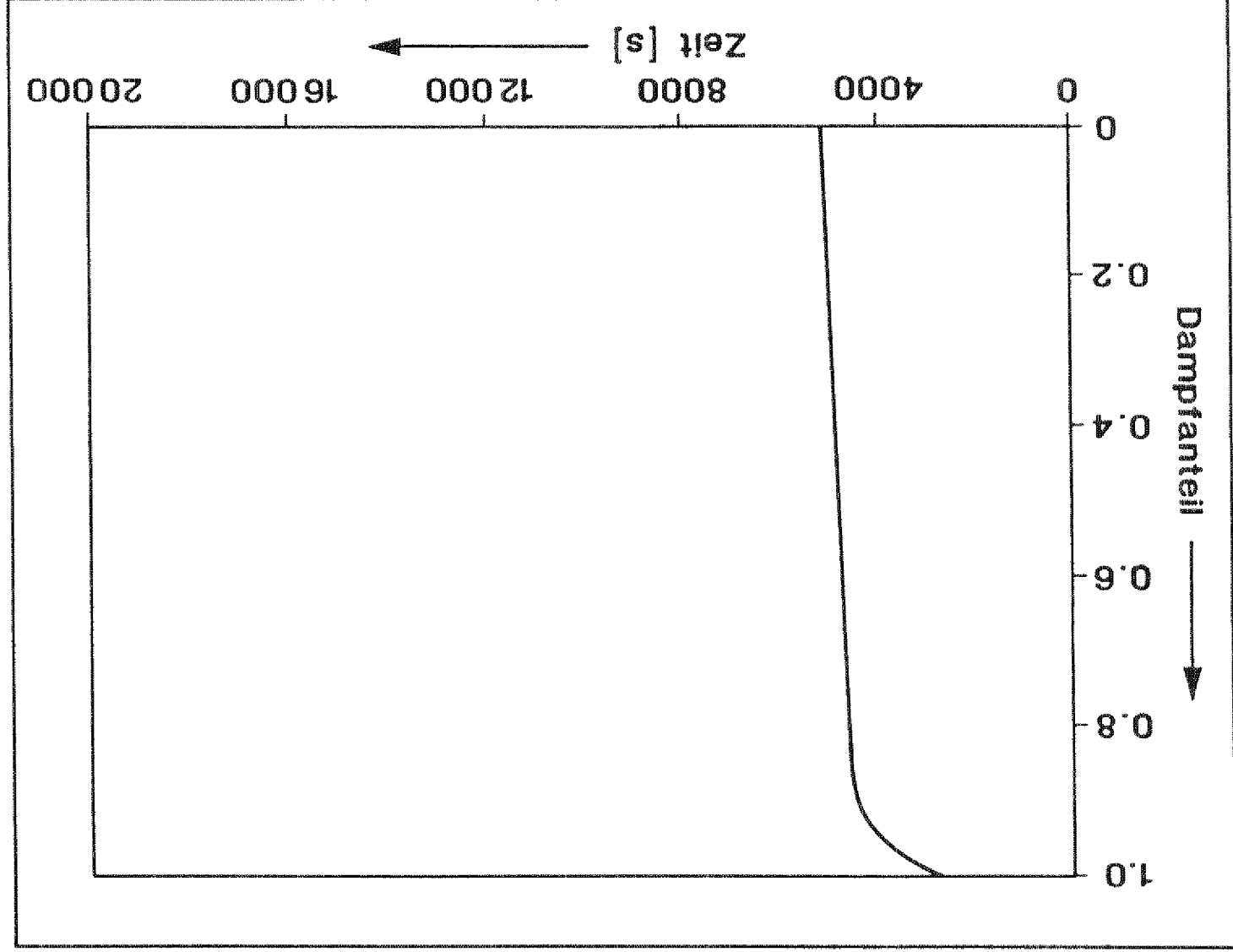
Verlauf der Dampf / Wassereinströmrates

Abb. 10

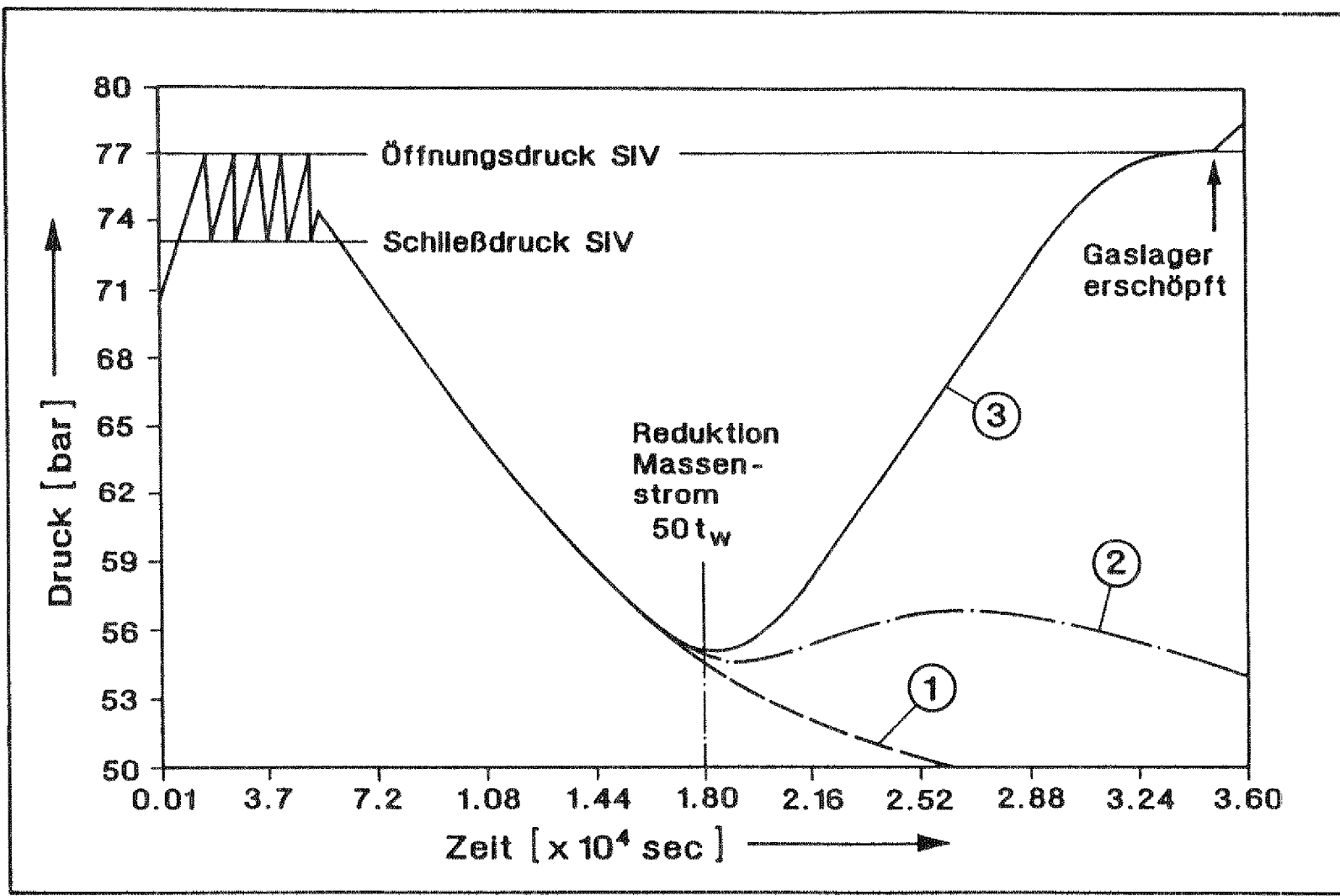


Verlauf der Dampftemperatur

Abb. 12

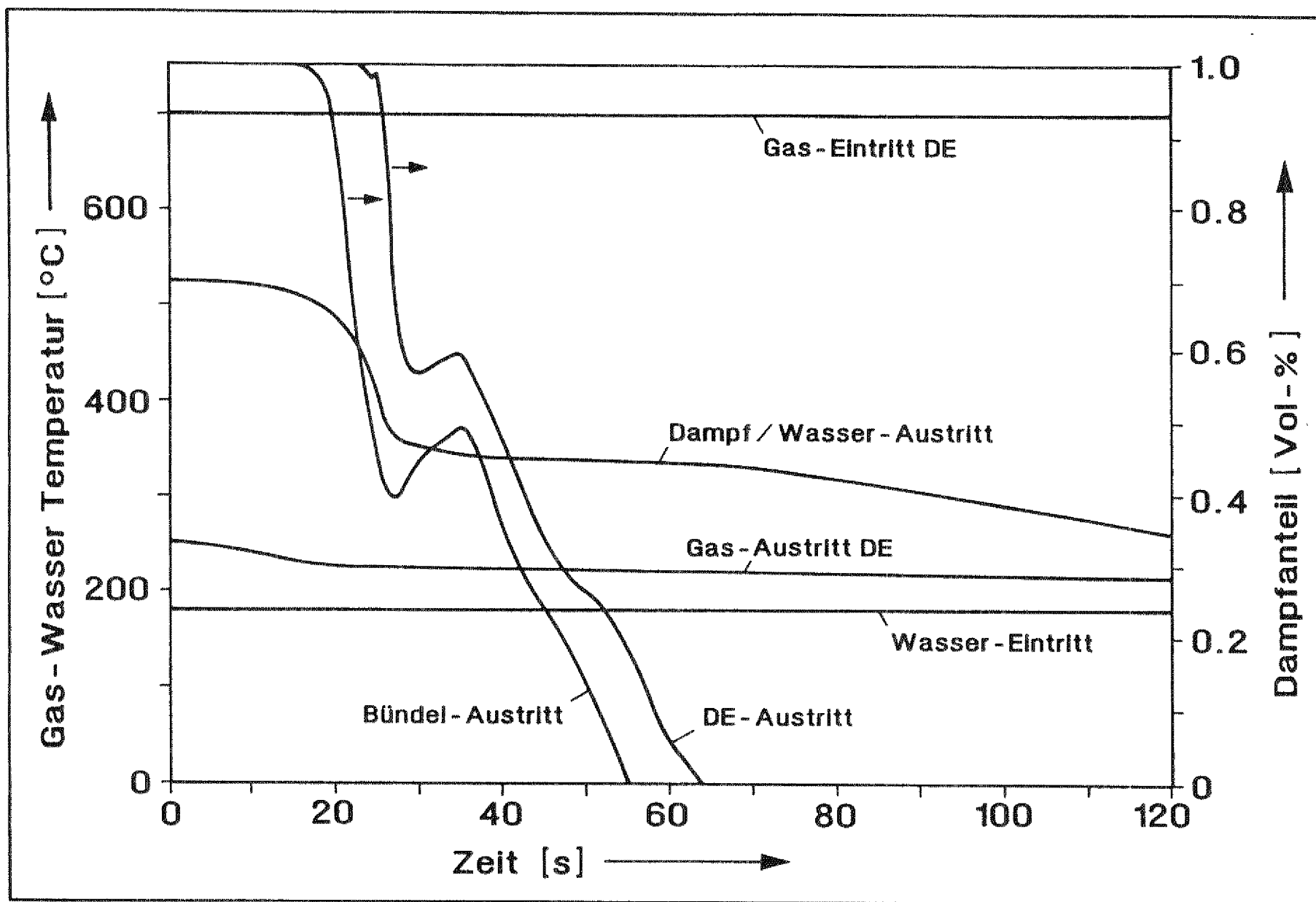


Verlauf der Dampfqualität

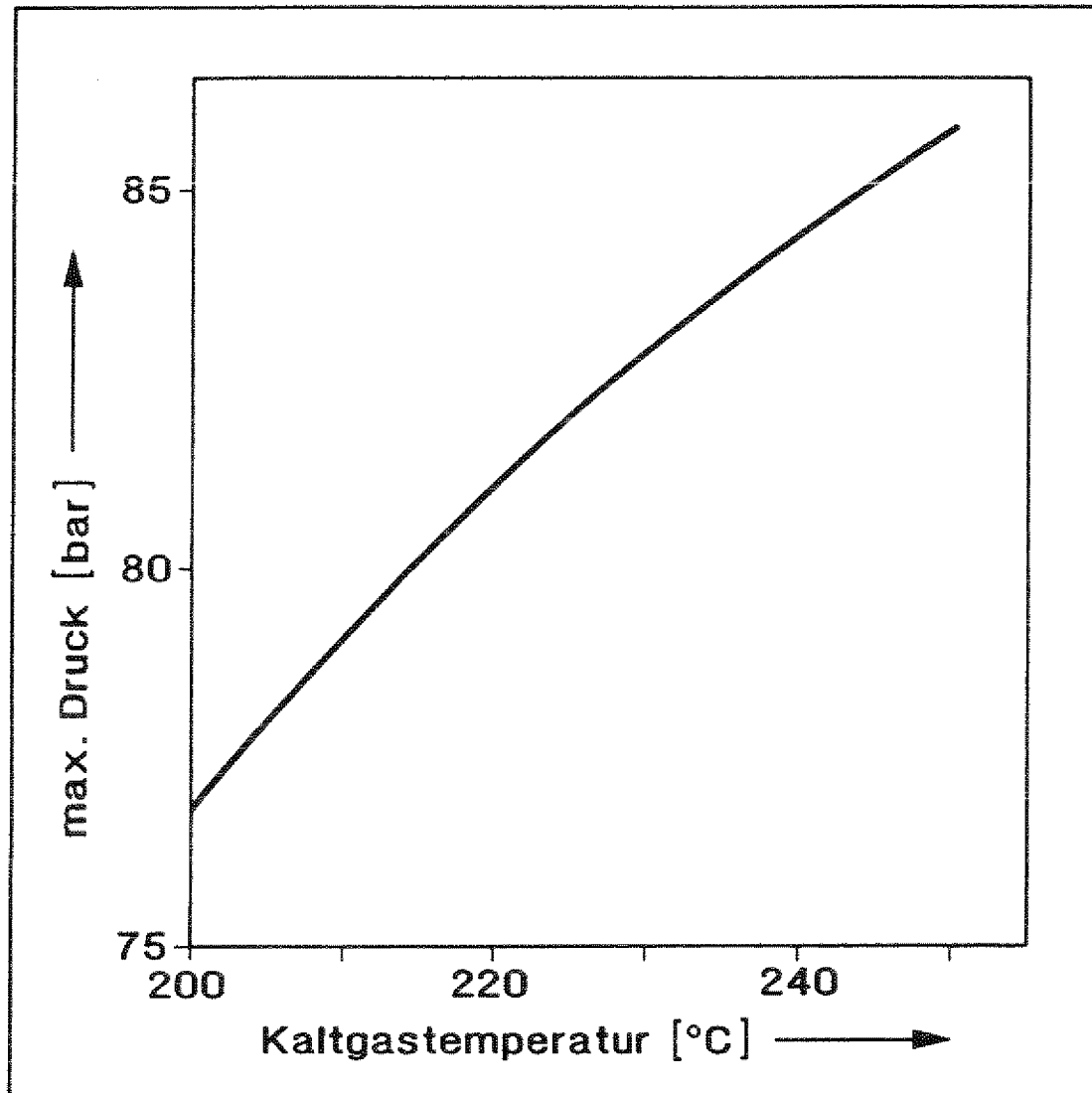


**Zeitlicher Druckverlauf im Primärkreislauf bei kontinuierlichem Wasser-einbruch. Speisewassertemperatur = 180 °C, Dampfdruck = 80 bar**

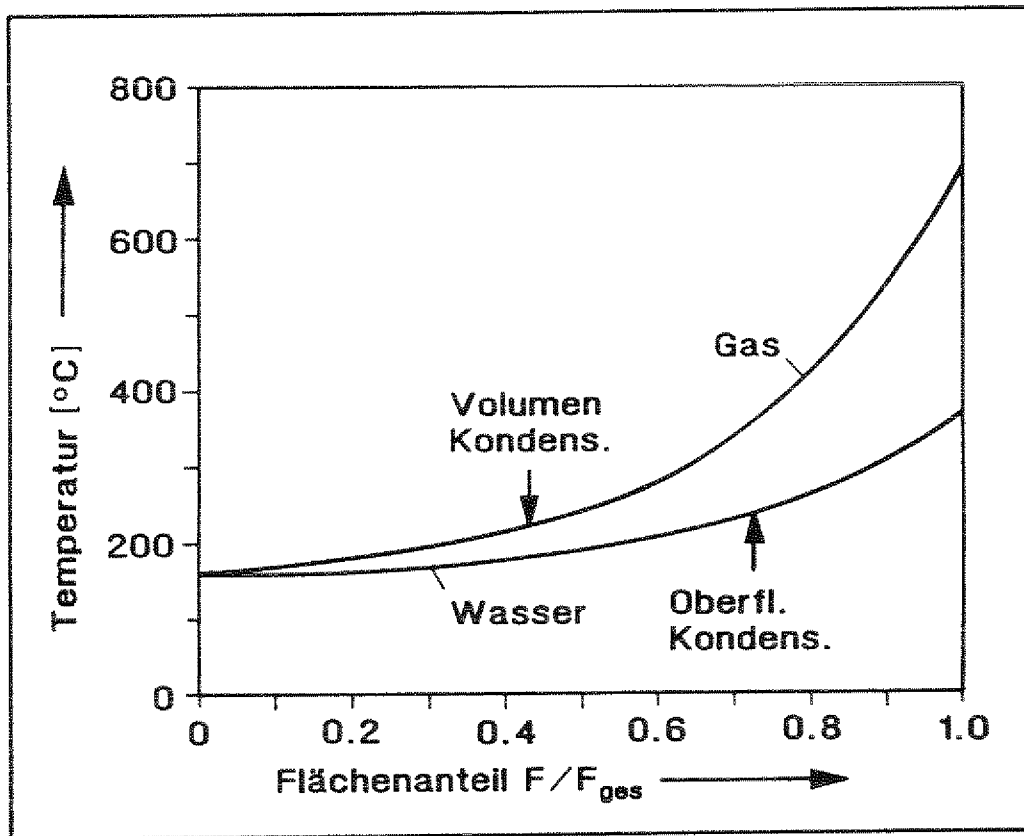
- ①  $\dot{m}_{Pr} / \dot{m}_{Sek}$  : 7 % / 10 % vom Nenndurchsatz bei Vollast
- ②  $\dot{m}_{Pr} / \dot{m}_{Sek}$  : 1,5 % / 5 % vom Nenndurchsatz bei Vollast
- ③  $\dot{m}_{Pr} / \dot{m}_{Sek}$  : 1,5 % / 1,5 % vom Nenndurchsatz bei Vollast und reduziertem Primärkreislaufvolumen



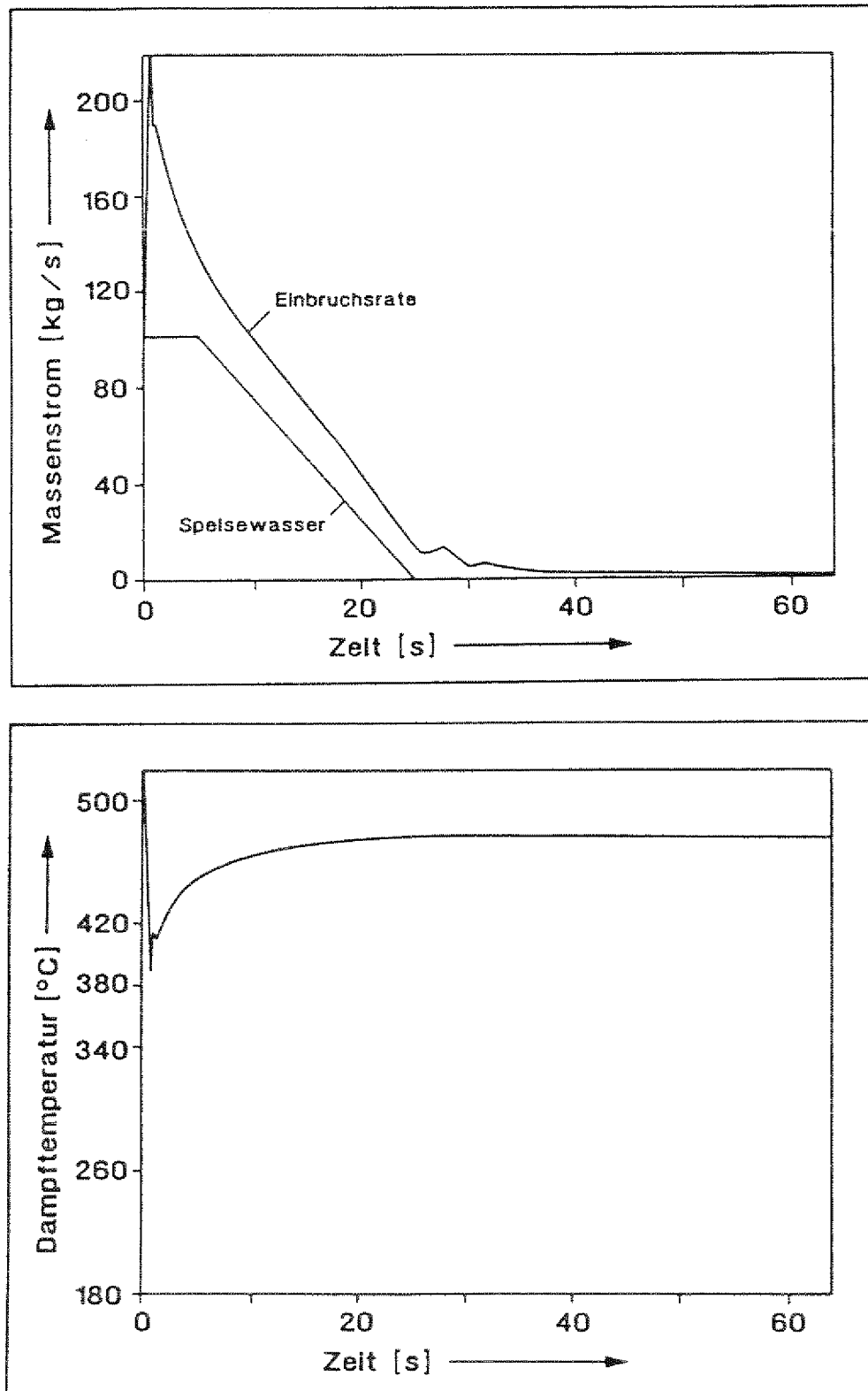
Zeitlicher Verlauf der Ein- und Austrittstemperaturen und der Dampfqualität eines Dampferzeugerstranges bei Rücknahme der Behelzung auf 3%, aber vollem Speisewasserstrom



Maximaler Primärkreislaufdruck als Funktion der maximalen Gasaustrittstemperatur am Dampferzeuger bei einer Einbruchsrage von 7 kg / s Wasser in den Primärkreislauf und ständigem Sattdampfzustand im Kaltgasraum

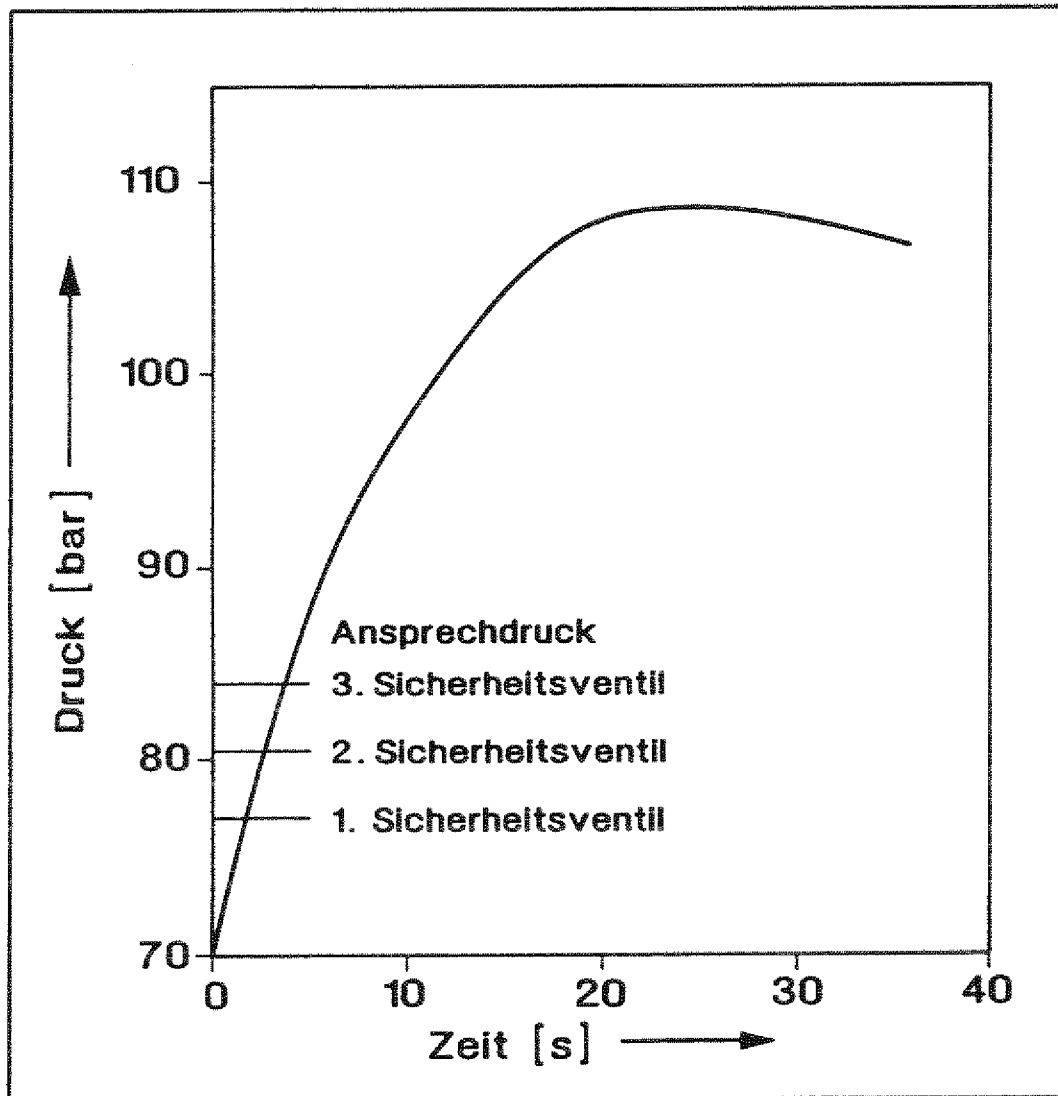


Temperaturprofil im DE in der Anfangsphase der NWA mit weiterlaufender Speisewasserpumpe bei einem Wasserdampf-Partialdruck im Gas von 30bar.  $F_{ges}$  : Austauscherfläche



Zeitlicher Verlauf der Einbruchrate, des vorgegebenen Spisewasserstroms und der Dampf-temperatur bei einem massiven Dampfeinbruch infolge eines 0,1F-Lecks an einem Dampfsammler





Druckverlauf im RDB bei einem massiven Dampfeinbruch infolge eines 0,1F-Lecks an einem Dampfsammler

# IV. ERMITTLUNG DES DURCH ERDBEBEN VERURSACHTEN RISIKOBEITRAGES

von

J. Altes, K.H. Escherich

## Inhalt

|                                         | Seite |
|-----------------------------------------|-------|
| 1. Verwendete Methodik                  | 1     |
| 2. Seismologische Kenndaten             | 2     |
| 3. Rechenmodell                         | 3     |
| 4. Berechnungsergebnisse                | 4     |
| 4.1 Eigenfrequenzen und Eigenformen     | 4     |
| 4.2 Beschleunigungen und Verschiebungen | 4     |
| 4.3 Beanspruchungen                     | 5     |
| 4.4 Versagenswahrscheinlichkeit         | 6     |
| 5. Literatur                            | 7     |



## 1. VERWENDETE METHODIK

Für die Ermittlung des Beitrages von Erdbeben zum Risiko der HTR-100 Anlage wurde dieselbe Methodik angewendet, wie sie auch den Untersuchungen der Deutschen Risikostudie, Phase B, zugrunde liegt.

Das bisher übliche Vorgehen bei der Festlegung von Erdbeben-Lastannahmen für deutsche Kernkraftwerksstandorte auf der Grundlage der Regel KTA 2201.1 (06/75) hat einige gravierende Schwächen /1/.

So basieren die danach verwendeten Lastannahmen praktisch ausschließlich auf herdentfernteren (20 km) Erdbebenregistrierungen in seismisch aktiven Zonen. Sie sind daher für deutsche Verhältnisse nur zum Zwecke einer konservativen oberen Abschätzung, nicht jedoch zur Definition realistischer Lastannahmen anwendbar. Die speziellen Eigenschaften herdnaher Erschütterungen, die an deutschen Standorten überwiegend das Erdbebenrisiko bestimmen, bleiben bei diesem Vorgehen außer acht, da entsprechende Registrierungen in der verwendeten Datenbasis nicht vertreten sind.

Die Festlegung von Erdbeben-Lastannahmen für deutsche Kernkraftwerksstandorte sollte daher die standortspezifischen Gegebenheiten berücksichtigen.

Die Maximalbeschleunigung  $a_0$  wird als Skalierungsparameter für die Erdbebenstärke fallengelassen, da sie besonders bei den für deutsche Standorte maßgebenden Erdbeben mittlerer Stärke in geringer Herdentfernung nur eine sehr schwache Korrelation mit der Bauwerksbeanspruchung aufweist. Statt dessen wird die nach ihrer Definition unmittelbar mit Bauwerksbeanspruchungen und -schäden verknüpfte makroseismische Intensität als Leitparameter für die Erdbebenstärke gewählt.

Das Antwortverhalten der Anlage wurde entsprechend KTA mit der Antwortspektren-Methode (linear-elastisches Materialverhalten) unter Verwendung des Finite-Element-Programmsystems PERMAS

berechnet.

Im Rahmen von probabilistischen Sicherheitsanalysen ist die deterministische Beurteilung eines ja/nein-Versagens nicht ausreichend. Die Wahrscheinlichkeit des Versagens kann nur mit einer probabilistischen Methode angegeben werden. Da sowohl die Abmessungen einer Struktur als auch die Belastungen und die Materialkennwerte streuende Größen sind, ist die probabilistische Behandlung zudem auch realitätsnäher (Abb. 11). Deterministisch ist kein Versagen gegeben, wenn die Beanspruchbarkeit (Tragfähigkeit)  $T$  größer als die Beanspruchung (Last)  $L$  ist. Unter der Annahme von Verteilungen für beide Größen ist durchaus Versagen möglich, selbst wenn der Erwartungswert für  $T$  größer als der für  $L$  ist. Für die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird das von der Uni München entwickelte Programm (FORM 4) eingesetzt.

## 2. SEISMOLOGISCHE KENNDATEN

Die Analysen wurden für einen angenommenen Standort 'Jülich', der innerhalb der Bundesrepublik neben der Schwäbischen Alb die höchste Erdbebengefährdung aufweist, durchgeführt. Die Ergebnisse gelten nur für diesen Standort. Die seismischen Lastannahmen - vor allem die Eintrittsraten für Erdbebenintensitäten, das Freifeld-Beschleunigungsspektrum sowie die bodendynamischen Kennwerte - wurden /2/ entnommen. Das Gutachten basiert auf dem vorher beschriebenen neuesten Stand von Wissenschaft und Technik, bei dem von realistischen standortbezogenen Kenngrößen ausgegangen wird. Die Anlage ist für ein Sicherheitserdbeben von  $2 \text{ m/s}^2$  horizontaler und  $1 \text{ m/s}^2$  vertikaler Bodenbeschleunigung ausgelegt. Nach /2/ beträgt für das Sicherheitserdbeben die makroseismische Intensität VIII (MSK-Skala) und die statistische Eintrittsrate pro Jahr  $1,6 \cdot 10^{-4}$  (Abb. 1) am Standort.

Die Berechnungen wurden im Rahmen der probabilistischen Analyse für drei Intensitätsbereiche VII, VIII und IX sowie zwei verschiedene Baugrundsteifigkeiten (Schubmodul 155 und  $300 \text{ MN/m}^2$ ) durchgeführt. Die Materialdämpfung des Bodens wurde aus Messungen zu rd. 15 % ermittelt. Die Eintrittshäufigkeit für die Intensität VII beträgt  $2,6 \cdot 10^{-3}/\text{a}$  und für die Intensität IX  $3 \cdot 10^{-7}/\text{a}$

(Abb. 2). Die zugehörigen horizontalen Bodenbeschleunigungen sind nach /2/ bei der Intensitätsstufe VII halb und bei der Intensitätsstufe IX doppelt so groß wie beim Sicherheitserdbeben (Stufe VIII).

### 3. RECHENMODELL

Zugrunde gelegt wurde ein Finite-Element-Modell aus Balkenelementen mit verteilter Massenbelegung, Bodenfedern und zusätzlichen Einzelmassen (Abb. 3). Die Anregung erfolgte in horizontaler und vertikaler Richtung. Die Steifigkeiten verschiedener Teilsysteme, vor allem der Auflager, wurden variiert, um die Sensitivität des Schwingungssystems kennenzulernen und die Unsicherheiten in den Ergebnissen abschätzen zu können.

Das Modell besteht aus den äußeren und inneren Reaktorgebäudestrukturen sowie den Komponenten Reaktordruckbehälter mit dem Reaktor, dem Dampferzeugerbehälter mit dem Dampferzeuger und den Gebläsen. Der Behälter ist auf den inneren Betonstrukturen aufgelagert und oben sowie unten horizontal abgestützt. Der Reaktor, bestehend aus dem eigentlichen Core und dem thermischen Seitenschild, stützt sich über einen Tragstern auf seinem Behälter ab. Hemd, Bündel und Zentralrohr des Dampferzeugers sind im oberen Teil am DE-Behälter gelagert.

Für die Gebäude aus Stahlbeton und Komponenten aus Stahl wurde ein Materialdämpfungswert von einheitlich 4 % angesetzt.

Die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung wurde durch Federn simuliert, deren Konstanten nach der Theorie des elastisch isotropen Halbraums berechnet wurden.

|                       | $G = 155 \text{ MN/m}^2$              | $300 \text{ MN/m}^2$            |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------|
| Horizontalsteifigkeit | $k_x = 9.3 \cdot 10^9 \text{ N/m}$    | $18.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}$   |
| Vertikalsteifigkeit   | $k_z = 12.3 \cdot 10^9 \text{ N/m}$   | $23.8 \cdot 10^9 \text{ N/m}$   |
| Kippsteifigkeit       | $k = 11.5 \cdot 10^{11} \text{ Nm}$   | $22.3 \cdot 10^{11} \text{ Nm}$ |
| Drehsteifigkeit       | $k_t = 13.8 \cdot 10^{11} \text{ Nm}$ | $26.7 \cdot 10^{11} \text{ Nm}$ |

Die Dämpfung des Bodens besteht aus der Materialdämpfung (hier: 15 %) und der Dämpfung aus der Energieabstrahlung, die sich zu

$$D_x = 55 \%, D_z = 93 \% \text{ und } D_\varphi = 5 \% \text{ ergibt.}$$

Gemäß KTA 2201.3 wird die modale Dämpfung für Horizontal- und Drehschwingungen auf 15 % und für die Vertikalschwingungen auf 30 % begrenzt.

An Einzelmassen wurden die Abschaltstäbe mit insgesamt 36.000 kg (Punkte 67 und 69), der KLAKE-Zugabebehälter mit 5.600 kg (Punkt 69), die Gebläse mit je 12.000 kg (Punkte 82 und 89), die Brennelementkugeln mit insgesamt 84.100 kg (Punkte 102 - 106), der Kran mit 50.000 kg (Punkt 16), Hochbehälter mit 290.000 kg (Punkt 40) und je Gebäudebühne 148.000 kg (Punkte 4, 5, 7, 31-33, 35-37) berücksichtigt.

#### 4. BERECHNUNGSERGEBNISSE

##### 4.1 Eigenfrequenzen und Eigenformen

Die von der Kippfeder des Bodens abhängende erste Eigenform (Abb. 4) ( $155 \text{ MN/m}^2$ : 0,83 Hz bzw.  $300 \text{ MN/m}^2$ : 1,1 Hz) bestimmt das Antwortverhalten in horizontaler Richtung (Verschiebungen und Momente) und die durch die vertikale Bodenfeder bestimmte zweite Eigenform (2,8 bzw. 3,8 Hz) dasjenige in vertikaler Richtung (Verschiebungen) zu nahezu 100 %. Dies ergibt sich aus den Partizipationsfaktoren. Die modalen Dämpfungen wurden zu 15 bzw. 30 % eingesetzt.

Die Eigenfrequenz des Dampferzeugers liegt bei 6.1 Hz (Abb. 5), die des Reaktors bei 7.3 Hz (Abb. 6) bei modalen Dämpfungen von 4 %.

##### 4.2 Beschleunigungen und Verschiebungen

Gemäß KTA 2201.4 wurden die Anteile aus den einzelnen Eigenformen nach der Methode der Wurzel aus der Summe der Quadrate überlagert.

$$S = \left[ \sum_{i=1}^m S_i^2 \right]^{1/2}$$

S = maximale resultierende Größe

$S_i$  = maximale Größe der i-ten Eigenform

m = Anzahl der berücksichtigten Frequenzen.

In der Responseanalyse wurden 50 Eigenformen berücksichtigt. Aufgrund der Partizipationsfaktoren wird damit das Antwortverhalten in ausreichender Weise erfaßt.

Für die Bodensteifigkeit von  $155 \text{ MN/m}^2$  und das Sicherheitserdbeben können die überlagerten Beschleunigungen Abb. 7 und die überlagerten relativen Verschiebungen Abb. 8 entnommen werden. Für den steiferen Untergrund ergeben sich prinzipiell die gleichen Bilder.

Die Maximalwerte liegen bei:

|                     |            | $155 \text{ MN/m}^2$ | $300 \text{ MN/m}^2$ |
|---------------------|------------|----------------------|----------------------|
| Beschleunigungen    | horizontal | $5.1 \text{ m/s}^2$  | $5.1 \text{ m/s}^2$  |
|                     | vertikal   | $1.3 \text{ m/s}^2$  | $1.5 \text{ m/s}^2$  |
| rel. Verschiebungen | horizontal | 9.4 cm               | 9.4 cm               |
|                     | vertikal   | 0.4 cm               | 0.2 cm               |

#### 4.3 Beanspruchungen

Die in den einzelnen Strukturen auftretenden Spannungen sind in Abb. 9 angegeben. Marginale Spannungsänderungen infolge der Varianten wurden nicht eingetragen. Als am höchsten beanspruchter Teil der Konstruktion hat sich die Abstützung des Dampfzeugers auf den Behälter herausgestellt. Die Beanspruchung und damit auch die Versagenswahrscheinlichkeiten der anderen Komponenten liegen wesentlich niedriger.

Den Varianten I und VII liegt die von HRB angegebene Auslegung zugrunde. Variante II untersucht den Fall, daß die obere horizontale Abstützung des Behälters (zwischen den Punkten 38 und 76) entfällt. Dadurch ergeben sich im DE-Behälter wesentlich höhere Spannungen. Eine Änderung der Steifigkeit des RDB Auflagers (Variante III) beeinflußt die Spannungen im Behälter und DE nur unwesentlich. Eine weichere Auflagerung des Reaktors (Variante IV) erhöht die Beanspruchungen im Reaktor merklich. Durch eine steifere Auflagerung des DE am Behälter (Variante V) lassen sich die Spannungen im DE wesentlich absenken. Dies läßt



sich auch durch eine zusätzliche Abstützung des DE am DE-Behälter (Variante VI) erreichen.

Aus den Etagenantwortspektren für das Sicherheitserdbeben mit maximal rd.  $4,8 \text{ m/s}^2$  horizontal und  $2,5 \text{ m/s}^2$  vertikal bei 4 % Dämpfung kann ebenfalls auf kein dominierendes Komponentenversagen geschlossen werden (Abb. 10).

#### 4.4 Versagenswahrscheinlichkeit

Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit wird im sogenannten 'mechanischen Modell' (Abb. 12) ein funktionaler Zusammenhang zwischen den streuenden Parametern von Beanspruchung und Beanspruchbarkeit als Grenzbedingung (Versagenskriterium) hergeleitet, deren Überschreitung zum Ausfall einer Komponente führt.

Das Versagen der Dampferzeugerabstützung wurde auf die Zugfestigkeit  $R_{mT}$  des Materials bezogen, da nach den KTA-Regeln beim Lastfall-Sicherheitserdbeben für die 0,2 % Dehngrenze  $R_{p0,2T}$  ausgelegt werden kann.

Die statistischen Kenngrößen der streuenden Parameter werden im 'stochastischen Modell' zusammengefaßt. Für alle statistischen Variablen - Belastungen, Querschnittswerte und Festigkeiten - wurden logarithmische Normalverteilungen mit Variationskoeffizienten, wie sie sich aus der Literatur ergeben angenommen (Abb. 12).

Der maßgebende Parameter auf der Beanspruchungsseite ist die Belastung der Komponente infolge Erdbebens. Sie ist mit den Lasten aus Vollastbetrieb zu überlagern.

Die bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_f$  können in Abhängigkeit von der Intensität des Erdbebens der Abb. 12 entnommen werden.

Mit  $7,7 \cdot 10^{-9}/a$  ergibt sich beim Auftreten des Sicherheitserdbebens auf dem weicheren Untergrund der größte Werte für die Häufigkeit dieses Ereignisses. Beim Versagen der Dampferzeugerabstützung senkt sich der Dampferzeuger soweit ab, bis das Dampferzeugerhemd den Deckenreflektor erreicht. Der Deckenreflektor

kann den Dampferzeuger tragen. Ob Rohre bzw. Anschlußleitungen im Dampferzeuger versagen oder intakt bleiben, hängt von der Grösse der Absenktiefe ab.

## 5. LITERATUR

- /1/ KTA-Unterausschuß 'Anlagen- und Bautechnik'  
KTA-Dok.-Nr. UA-AB /83/ 1.
- /2/ L. Ahörner  
Seismologisches Gutachten für den Standort der geplanten  
Spallations-Neutronenquelle SNQ auf dem Gelände der KFA Jü-  
lich, Oktober 1984

L. Ahorner 1984

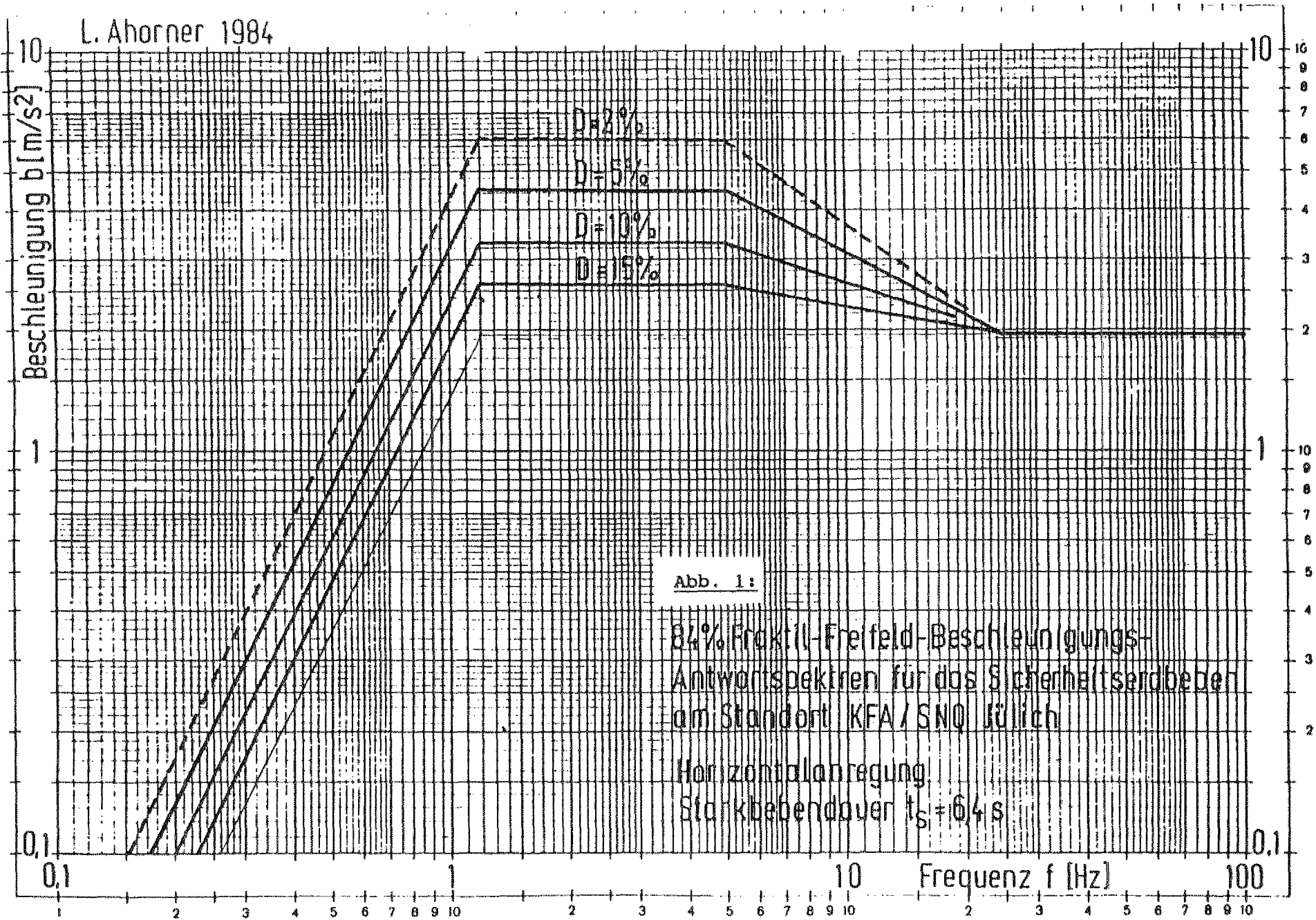
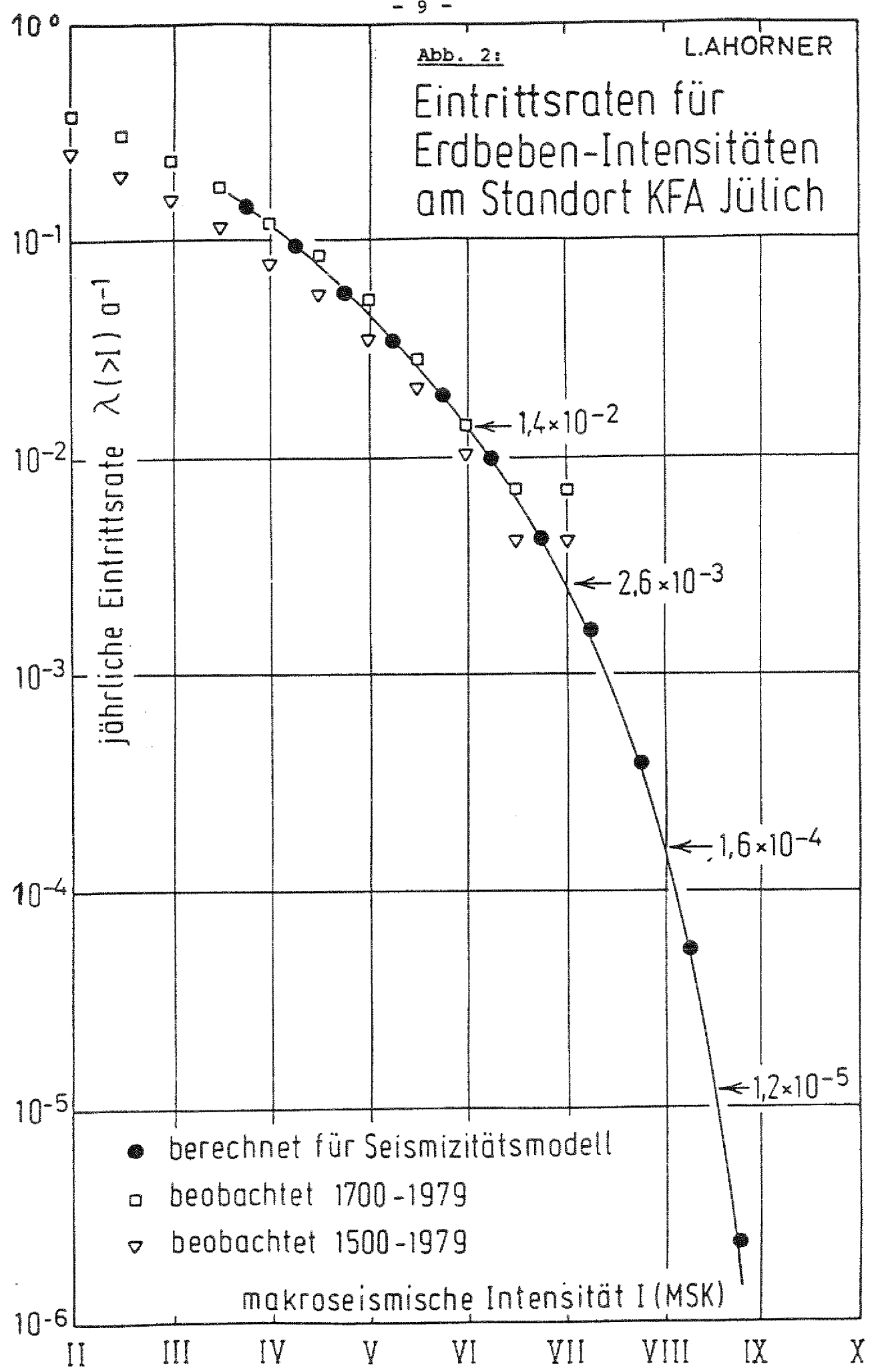


Abb. 2:

L.AHORNER

Eintrittsraten für  
Erdbeben-Intensitäten  
am Standort KFA Jülich



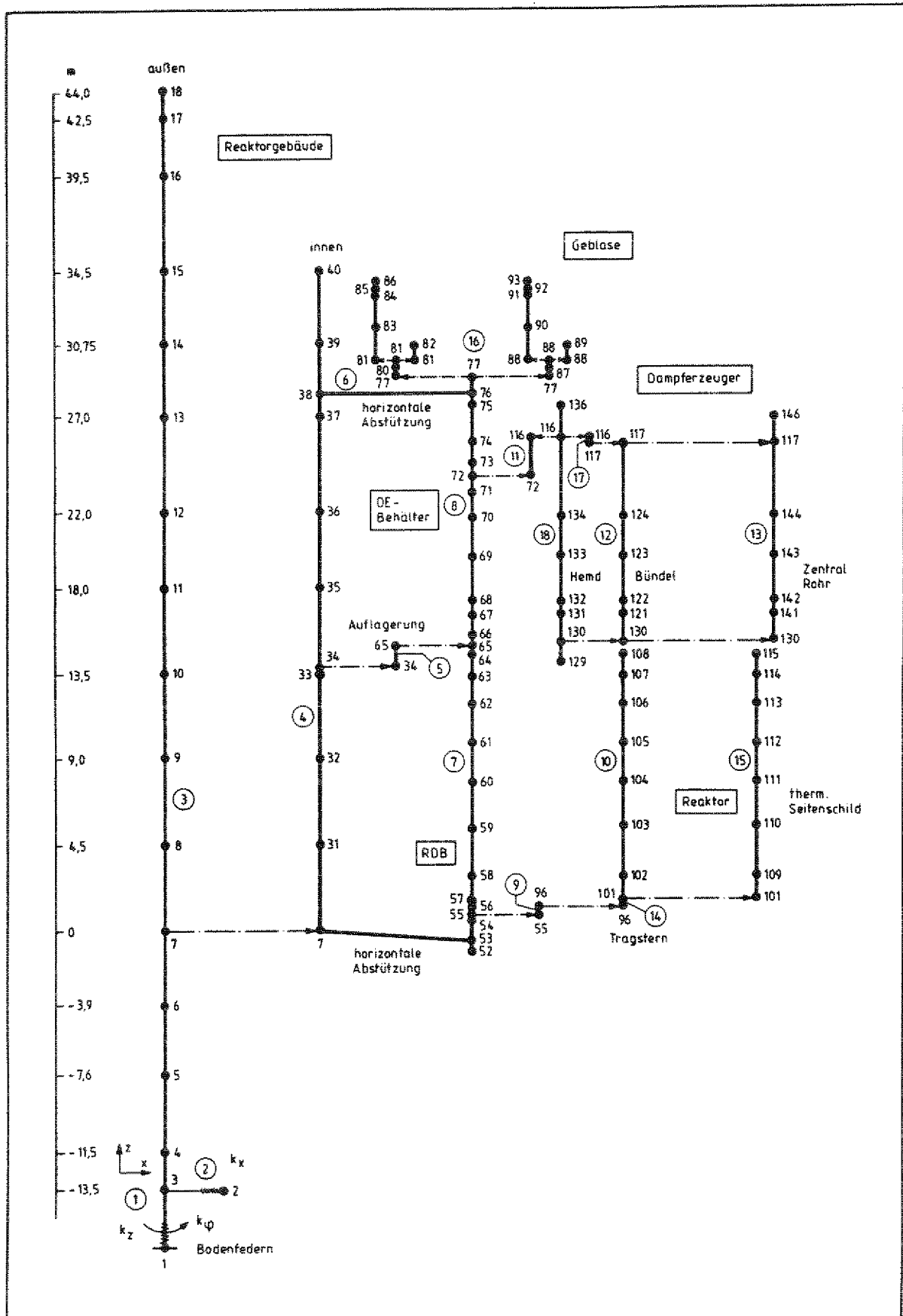


Abb. 3: Finite-Element-Modell für das Reaktorgebäude mit dem Primärkreis

# ERDBEBENBERECHNUNGEN HTR-100

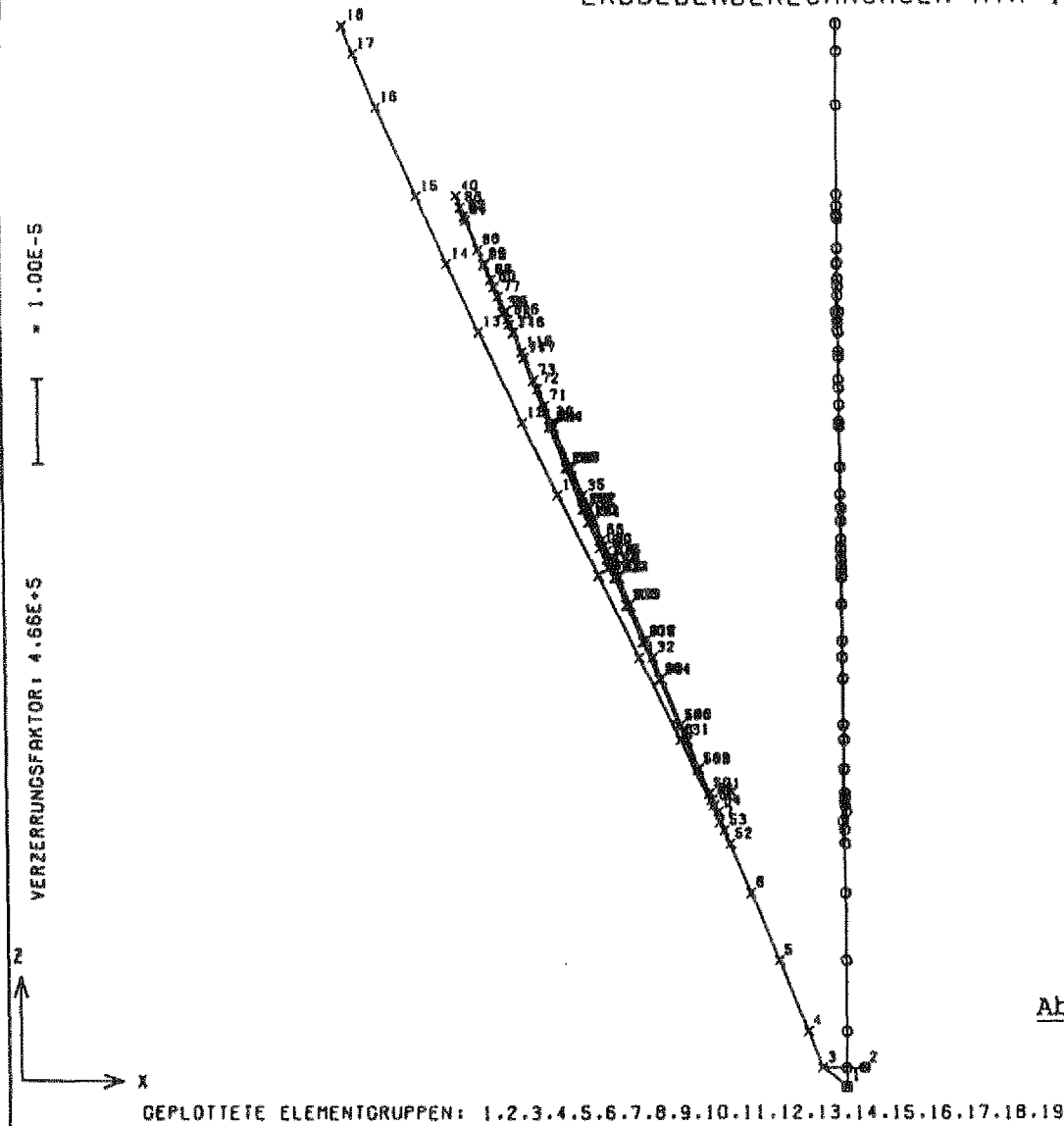


Abb. 4: 1. Eigenform bei 0,83 Hz

ISF-KFA JUELICH

EIGENFORM 1  
DREHW. = 0° KIPPH. = 0° PRAEZH. = 0°

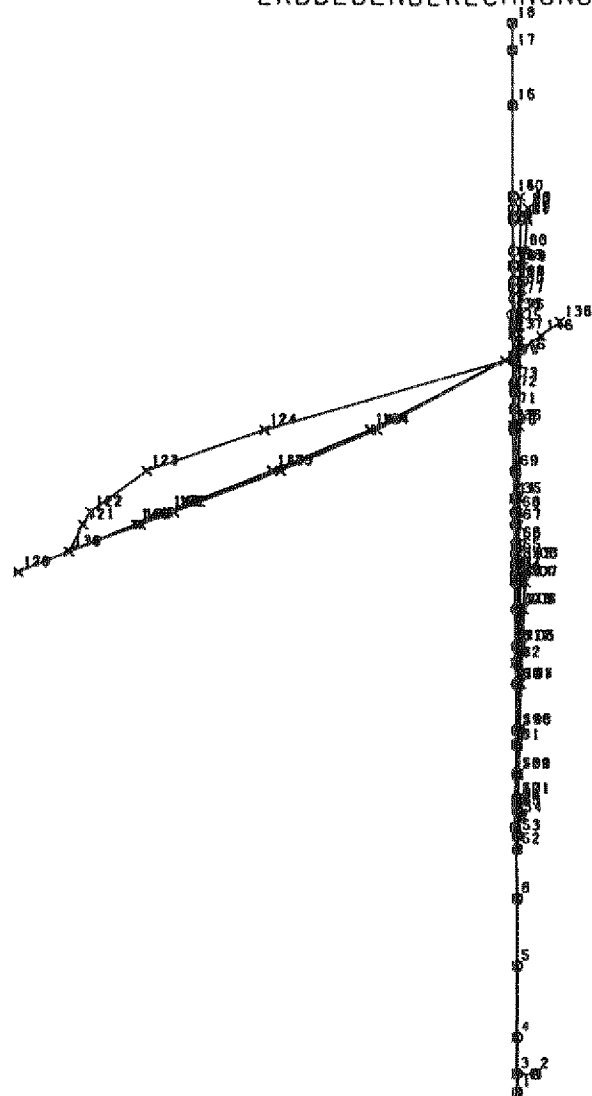
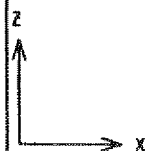
R A P S

# ERDBEBENBERECHNUNGEN HTR-100

4.00E-5



VERZERRUNGSFAKTOR: 1.81E+5



GEPLOTTETE ELEMENTGRUPPEN: 1.2.3.4.5.6.7.8.9.10.11.12.13.14.15.16.17.18.19

Abb. 5: 5. Eigenform bei 6,1 Hz

ISF-KFA JUELICH

EIGENFORM 5

DREHW. = 0° KIPPW. = 0° PRAEZW. = 0°

R A P S

# ERDBEBENBERECHNUNGEN HTR-100

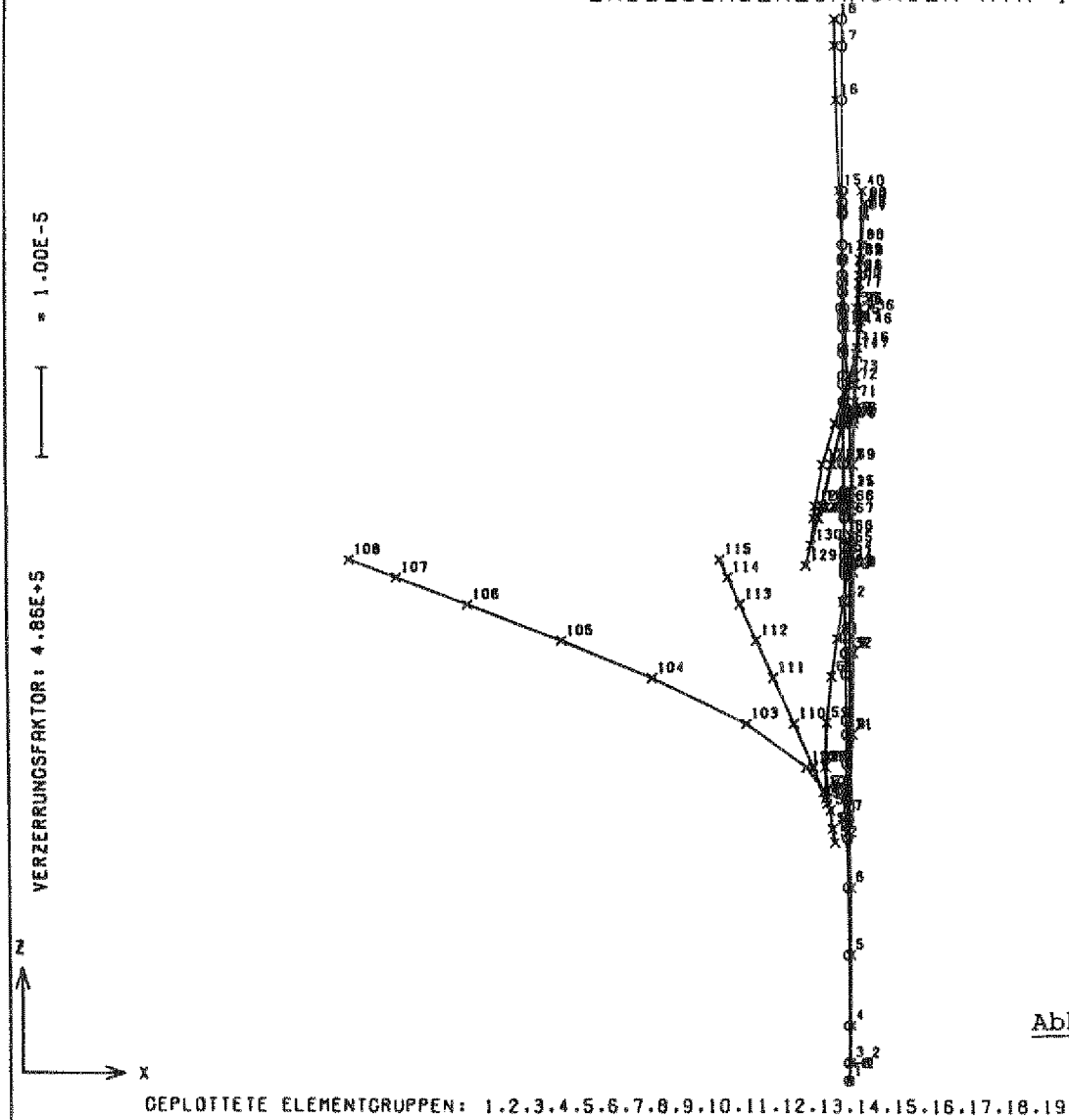


Abb. 6: 6. Eigenform bei 7,3 Hz

ISF-KFA JUELICH

EIGENFORM 6

DREHW. = 0° KIPPH. = 0° PRAEZH. = 0°

R A P S

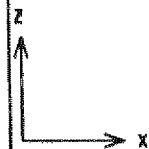


# ERDBEBENBERECHNUNGEN HTR-100

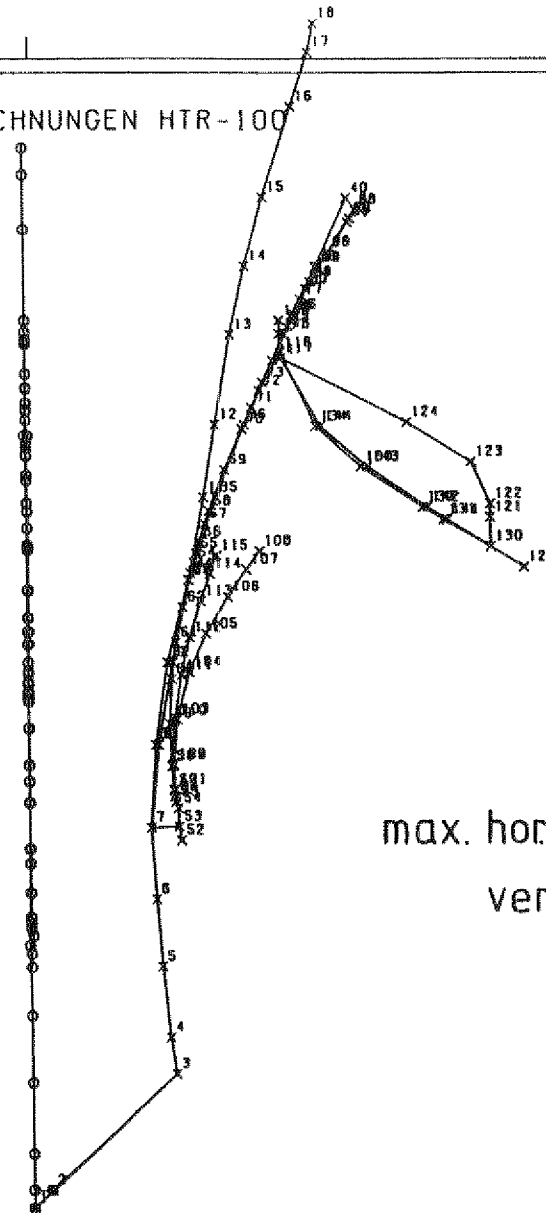
Abb. 7: Nach der Antwortspektren-Methode berechnete max. Beschleunigungen

\* 1.00E 0 M/S\*\*2

VERZERRUNGSFAKTOR: 5.38E 0



GEPLOTTETE ELEMENTGRUPPEN: 1.2.3.4.5.6.7.8.9.10.11.12.13.14.15.16.17.18.19



max. hor.  $5,1 \text{ m/s}^2$   
ver.  $1,3 \text{ m/s}^2$

ISF-KFA JUELICH

BESCHLEUNIGUNGEN. LASTFALL I  
DREHW. =  $0^\circ$  KIPPW. =  $0^\circ$  PREZHW. =  $0^\circ$

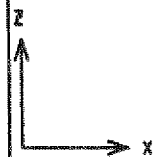
R A P S

# ERDBEBENBERECHNUNGEN HTR-100

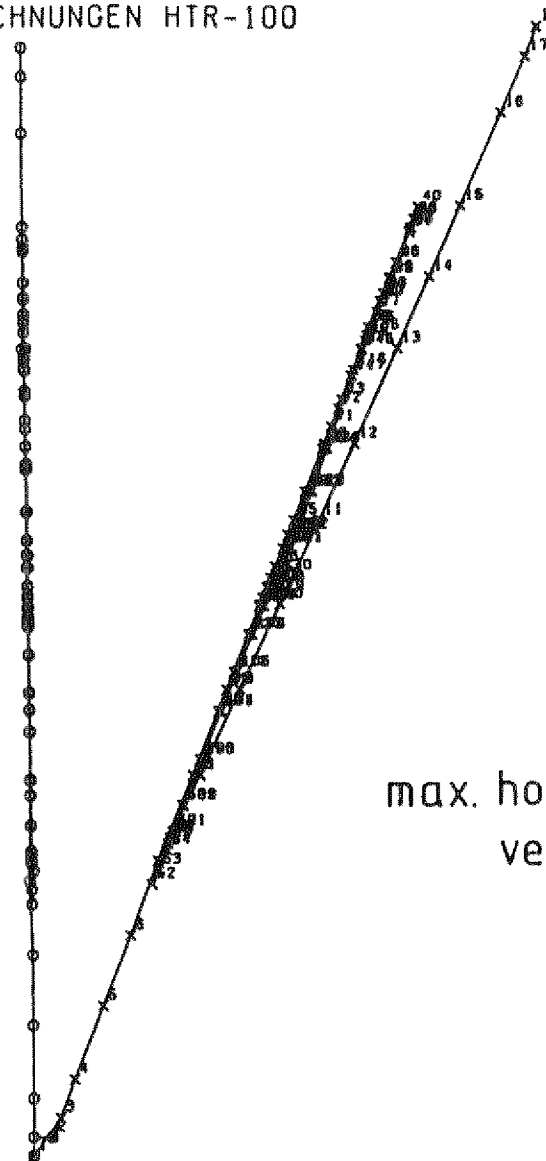
Abb. 8: Nach der Antwortspektren-Methode berechnete max. Verschiebungen

VERZERRUNGSFAKTOR:  $2.93E+2$

$= 2.00E-2$  m



DEPLOTTETE ELEMENTGRUPPEN: 1.2.3.4.5.6.7.8.9.10.11.12.13.14.15.16.17.18.19



max. hor. 9,4 cm  
ver. 0,4 cm

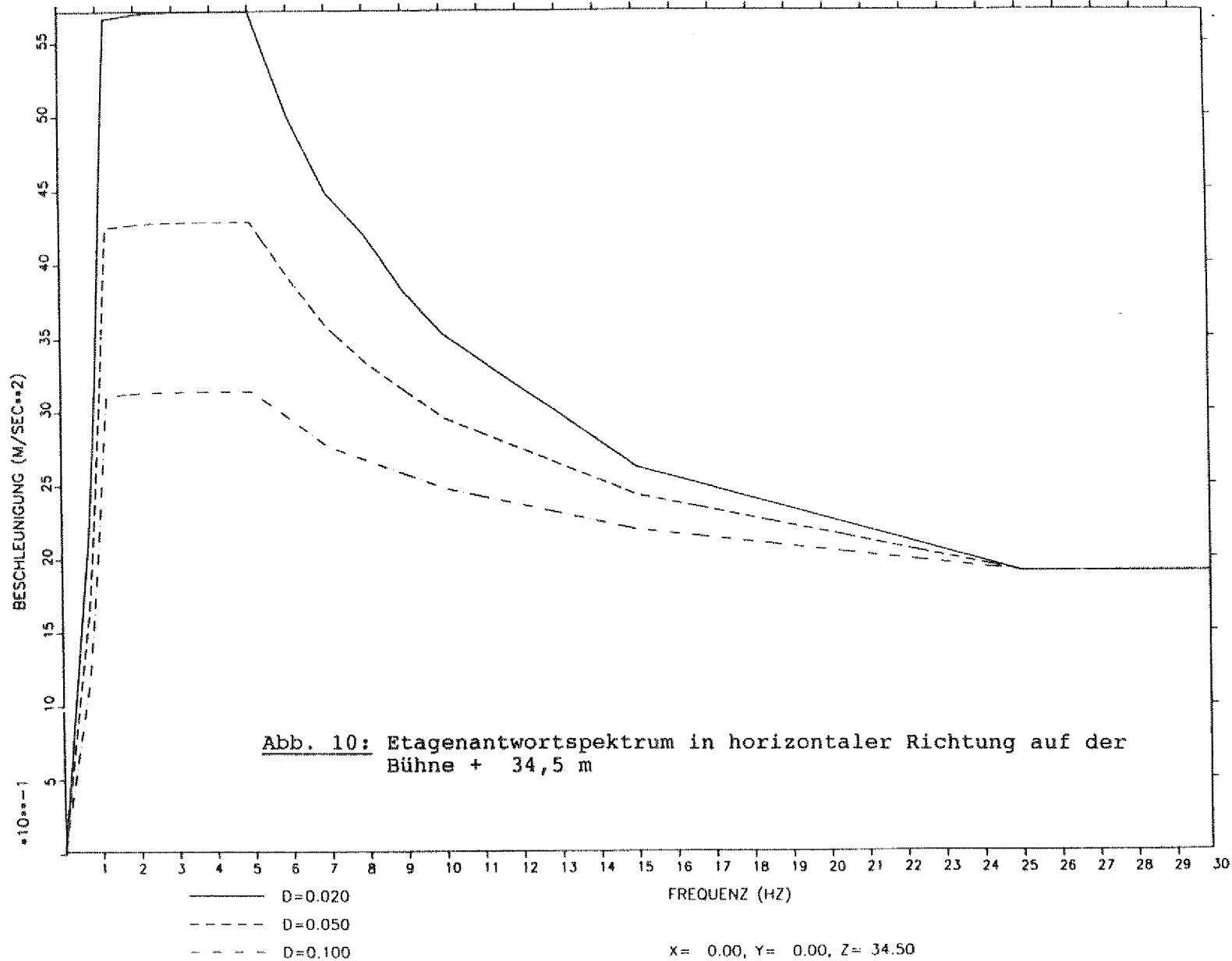
ISF-KFA JUELICH

VERSCHIEBUNGEN, LASTFALL I  
DREHW. = 0° KIPPW. = 0° PRAEZW. = 0°

R A P S

|                     |                             |   | Boden $G = 155 \text{ MN/m}^2$ |                                    |                                                  |                                            |                                                |                                         | $G = 300 \text{ MN/m}^2$ |
|---------------------|-----------------------------|---|--------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|
|                     |                             |   | I<br>'Auslegung'               | II<br>ohne Ab-<br>stützung<br>oben | III Gr. 5<br>Auflagerung<br>RDB<br>(J x 10) J/10 | IV Gr. 9<br>Auflagerung<br>Reaktor<br>J/10 | V Gr. 11<br>Auflagerung<br>DE<br>(J x 10) J/10 | VI<br>DE an<br>DE-Behälter<br>gekoppelt | VII<br>'Auslegung'       |
| Reaktor-<br>gebäude | aussen                      | ③ | 0.15 + 1.19<br>1.34            |                                    |                                                  |                                            |                                                |                                         | 0.18 + 2.04<br>2.20      |
|                     | Innen                       | ④ | 0.12 + 0.98<br>1.08            |                                    |                                                  |                                            |                                                |                                         | 0.13 + 1.36<br>1.48      |
| Behälter            | RDB                         | ⑦ | 0.68 + 2.13<br>2.79            |                                    |                                                  | 9.1                                        |                                                |                                         | 0.97 + 2.77<br>3.74      |
|                     | DE                          | ⑧ | 0.47 + 3.13<br>3.60            | 19.3                               | (3.5) 4.2                                        |                                            | (3.5) 3.2                                      | 3.4                                     | 0.52 + 3.99<br>4.51      |
|                     | Gebälse                     | ⑩ | 0.16 + 4.68<br>4.74            | 9.2                                |                                                  |                                            | 4.8                                            | 1.0                                     | 0.17 + 6.32<br>6.50      |
| Reaktor             | Tragstern                   | ⑭ | 0.17 + 3.26<br>3.44            |                                    |                                                  | 13.9                                       |                                                |                                         | 0.19 + 4.61<br>4.80      |
|                     | Reaktor                     | ⑩ | 0.03 + 0.39<br>0.42            |                                    |                                                  | 1.8                                        |                                                |                                         | 0.03 + 0.68<br>0.60      |
|                     | therm. Schild               | ⑮ | 0.11 + 0.62<br>0.73            |                                    |                                                  | 2.2                                        |                                                |                                         | 0.11 + 0.88<br>0.97      |
| Dampf-<br>erzeuger  | Auflagerung                 | ⑪ | 2.11 + 48.17<br>48.28          | 39.2                               | 50.7                                             |                                            | (4.9) 35.5                                     | 1.9                                     | 2.38 + 9.94<br>12.31     |
|                     | Hemd                        | ⑬ | 0.22 + 8.07<br>8.29            | 6.2                                | 8.8                                              |                                            | (4.7) 6.9                                      | 3.4                                     | 0.25 + 7.03<br>7.28      |
|                     | Halierung<br>Bündel/Z. Rohr | ⑰ | 0.38 + 6.31<br>6.67            | 6.0                                | 7.0                                              |                                            | (4.4) 4.6                                      | 1.0                                     | 0.41 + 6.08<br>6.50      |
|                     | Zentr. Rohr                 | ⑬ | 0.20 + 5.69<br>5.79            | 4.6                                | 6.1                                              |                                            | (3.5) 4.6                                      | 2.2                                     | 0.22 + 5.07<br>5.30      |
|                     | Bündel                      | ⑫ | 0.32 + 7.58<br>7.90            | 7.2                                | 8.2                                              |                                            | (5.3) 5.1                                      | 3.0                                     | 0.37 + 7.69<br>7.96      |

Abb. 9: Für die verschiedenen Varianten berechnete Spannungen in den einzelnen Bauteilen



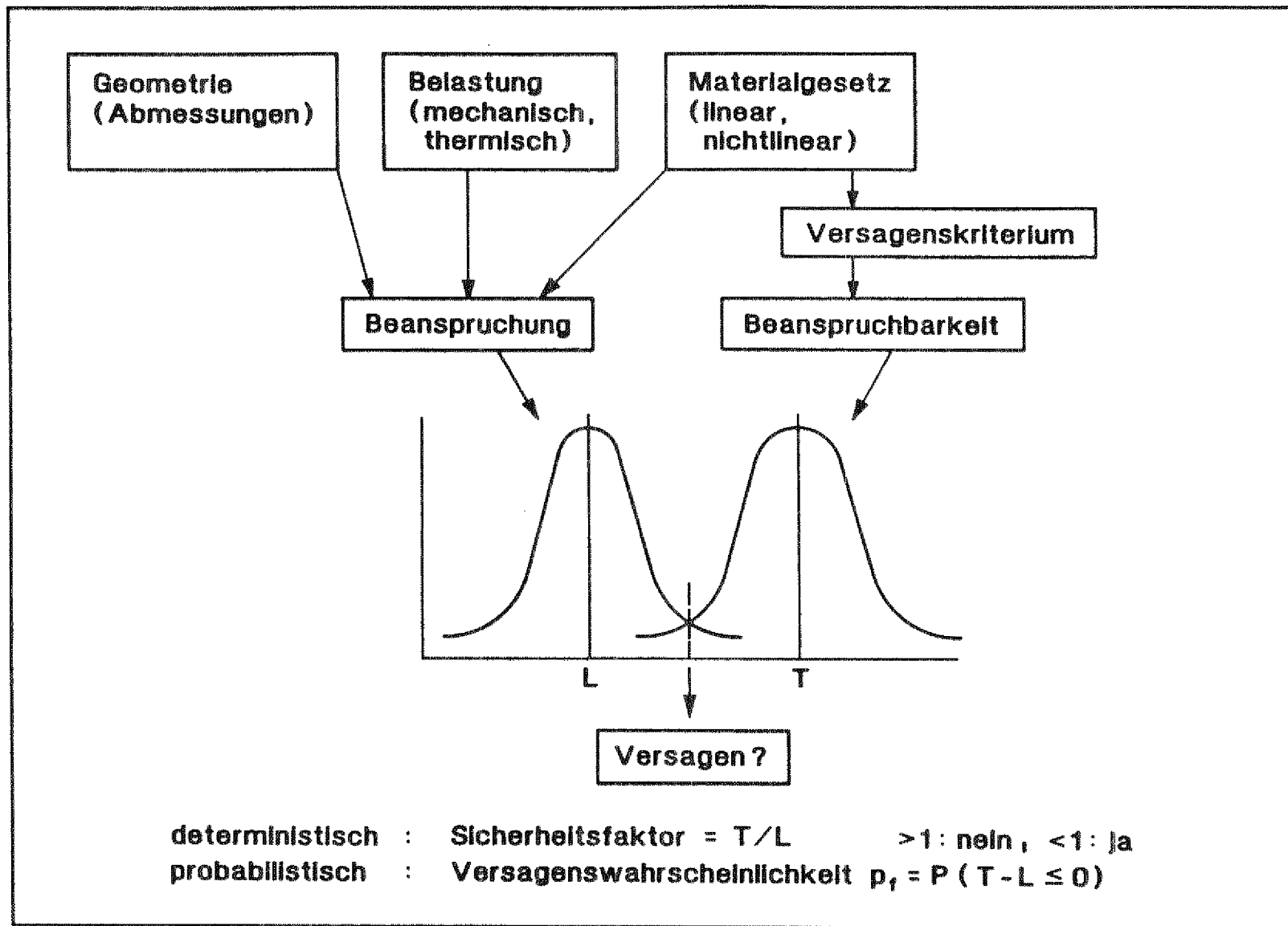


Abb. 11: Erläuterung des Unterschiedes bei deterministischer und probabilistischer Betrachtungsweise

## Mechanisches Modell

Versagensfunktion :

$$\sigma_{\text{Versagen}} - \left( 0.9 \sigma_{\text{Vollast}} + \sqrt{\left( \frac{N}{F} + \frac{M}{W} \right)^2 + 3 \cdot \left( \frac{S}{A} \right)^2} \right) \leq 0$$

## Stochastisches Modell

Verteilungen : log. Normal

Variationskoeffizienten :

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| $\sigma_{\text{Versagen}}$   | 6 %   |
| $\sigma_{\text{Vollast}}$    | 0.5 % |
| Erdbebenlasten<br>N, M, S    | 50 %  |
| Querschnittswerte<br>F, W, A | 2 %   |

## Versagenswahrscheinlichkeit

| Intensität des Erdbebens I       | VII (0.5 SE)                                             | VIII (SE)           | IX (2 SE)           |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|
| Jährliche Eintrittsrare          | $2.6 \cdot 10^{-3}$                                      | $1.6 \cdot 10^{-4}$ | $3 \cdot 10^{-7}$   |
|                                  | Versagenswahrscheinlichkeit $p_f$<br>der DE - Abstützung |                     |                     |
| Boden : $G = 155 \text{ MN/m}^2$ | $4.4 \cdot 10^{-8}$                                      | $4.8 \cdot 10^{-5}$ | $7.6 \cdot 10^{-3}$ |
| $G = 300 \text{ MN/m}^2$         | $1.3 \cdot 10^{-8}$                                      | $2 \cdot 10^{-5}$   | $4.2 \cdot 10^{-3}$ |

Maximalwert :  $\bullet 7.7 \cdot 10^{-9} / a$

Abb. 12: Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit der DE-Abstützung



# V. SPALTPRODUKTFREISETZUNG AUS DEM CORE DES HTR-100 UNTER NORMALBETRIEBS- UND STÖRFALLBEDINGUNGEN

von

Karl Verfondern, KFA-ISF

## Inhalt

|                                                                                     | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. Einleitung                                                                       | 1     |
| 2. Grundlagen der Modellrechnungen zur Spaltprodukt-<br>freisetzung aus dem HTR-100 | 2     |
| 2.1 Diffusionsmodell FRESCO                                                         | 3     |
| 2.2 Integriertes Schadens- und Freisetzungsmodell<br>PANAMA-II                      | 9     |
| 3. Aktivitätsfreisetzung beim HTR-100 unter Normal-<br>betriebsbedingungen          | 10    |
| 4. Aktivitätsfreisetzung beim HTR-100 im Kernaufheiz-<br>störfall                   | 15    |
| 5. Literatur                                                                        | 25    |





## 1. EINLEITUNG

Hochtemperaturreaktoren kleiner Leistung wie der hier untersuchte HTR-100 bieten aufgrund ihrer passiven Sicherheitseinrichtungen die Gewähr, daß selbst in hypothetischen Kernaufheizstörfällen die Freisetzung von Spaltprodukten keine unzulässige Belastung für die Umgebung darstellt. Erreicht wird dies durch eine Begrenzung der maximal möglichen Brennelementtemperatur auf einem so niedrigen Niveau, daß das kugelförmige Brennelement selbst als wirksamste Spaltproduktbarriere erhalten bleibt. Dieses prinzipiell gutmütige Verhalten des modernen HTR-Brennstoffs konnte in ausgedehnten, speziell auf HTR kleiner und mittlerer Leistung ausgerichteten Störfallsimulationsexperimenten erfolgreich demonstriert werden und muß lediglich aufgrund der noch schlechten Statistik und relativ großen Bandbreiten behandelt werden.

Im vorliegenden Bericht wird das Spaltproduktverhalten auf demjenigen Teil des Freisetzungspfades beschrieben, der durch den Kernaufheizstörfall betroffen ist. In einem weiteren Kapitel wird die Spaltproduktfreisetzung aus dem aktiven Core unter Normalbetriebsbedingungen ermittelt, die den Quellterm für die bei kleinen HTR risikodominanten Störfälle "Wassereinbruch" und "Druckentlastung" bildet und im Kapitel VI "Freisetzung von Spaltprodukten in die Umgebung" weiter verfolgt wird.

## 2. GRUNDLAGEN DER MODELLRECHNUNGEN ZUR SPALTPRODUKTFREISETZUNG AUS DEM HTR-100

Als methodische Basis für die rechnerische Vorhersage des Spaltproduktverhaltens im Rahmen der Voranalyse des HTR-100 dient der Statusbericht zur Spaltproduktfreisetzung in HTR /1/. In ihm ist die Vorgehensweise festgelegt, mit der nach jetzigem (1986) Kenntnisstand eine realistische, im Zweifelsfall konservative Beschreibung des Spaltproduktverhaltens unter Normalbetriebs- und Störfallbedingungen erreicht werden soll. Die auf diese Art definierten Referenzrechnungen zum HTR-100 werden ergänzt durch zusätzliche Rechnungen, welche die Sensitivität einzelner wichtiger Input-Parameter auf die Ergebnisse zeigen.

Die Analysen zur Freisetzung radiologisch relevanter Spaltprodukt nuklide Cäsium-137, Strontium-90, Silber-110m und Jod-131 aus der Kugelschüttung wurden mit dem Diffusionsrechenmodell FRESCO durchgeführt.

Mit der "Brennelement"-Version von FRESCO kann die Normalbetriebsfreisetzung der metallischen Spaltprodukte aus dem aktiven Core simuliert werden. Speziellen Bestrahlungseffekte wie Recoil und Inventaraufbau werden in diesem Rechenprogramm mitberücksichtigt. Bei geeigneter Wahl der Transportdaten (siehe /1/) kann damit eine konservative Abschätzung der Normalbetriebsfreisetzung erzielt werden. Durch Betrachtung eines repräsentativen Kugelbrennelements werden die Ergebnisse auf die gesamte Kugelschüttung übertragen, da die sog. MEDUL-Beschickungsweise des HTR-100 eine Vermischung von Kugelbrennelementen unterschiedlicher Altersstufen und damit unterschiedlichen Spaltproduktinventars zur Folge hat.

Das Diffusionsprogramm STADIF, das die Berechnung der stationären Jod- bzw. Edelgas-Freisetzung erlaubt, ist im Rahmen dieser Analyse noch nicht benutzt worden. Die Jod-Freisetzung unter Normalbetriebsbedingungen wird im Rahmen dieser Studie mit Hilfe des von Booth entwickelten Modells abgeschätzt (siehe Kapitel VI:

'Freisetzung von Spaltprodukten in die Umgebung') und in der weiteren Analyse der Quellterm-Bestimmung zugrunde gelegt.

Die "Core"-Version von FRESCO ist bei Übernahme der dazu notwendigen thermodynamischen Daten in der Lage, das Spaltproduktverhalten unter den Bedingungen eines Kernaufheizstörfalles zu beschreiben. Zusätzlich ist FRESCO mit dem Versagensmodell für TRISO-Partikel PANAMA verbunden, welches den zeitlichen Verlauf des Anteils der störfallbedingt defekten Brennstoffpartikel zur Verfügung stellt. Zum Vergleich werden ergänzende Rechnungen zur Cäsium- und Edelgas (Jod)-Freisetzung mit dem "Integrierten Schadens- und Freisetzungsmodell", implementiert im Rechencode PANAMA-II, vorgestellt.

## 2.1 Diffusionsmodell FRESCO

Die wichtigsten Inputgrößen für das Rechenmodell FRESCO betreffen die Geometrie von Brennstoff und Core, die Anfangsbedingungen für Spaltproduktinventare und deren Verteilung, Partikelbruchanteile, Transport- und Sorptionsdaten sowie die thermodynamischen Randbedingungen für den Normalbetrieb und im Falle des Kernaufheizstörfalles.

### *a) Brennstoff- und Coregeometrie*

Das Kugelbrennelement entspricht dem im Rahmen des HBK-Projekts entwickelten und getesteten Referenzbrennelement mit TRISO beschichteten Brennstoffpartikeln, welches für künftige deutsche HTR-Anlagen vorgesehen ist. Es ist gekennzeichnet durch einen  $\text{UO}_2$ -Partikelkern von 500  $\mu\text{m}$  Durchmesser und die Beschichtungsfolge: Puffer (90  $\mu\text{m}$ ), iLTI-Schicht (40  $\mu\text{m}$ ), SiC-Schicht (35  $\mu\text{m}$ ), oLTI-Schicht (35  $\mu\text{m}$ ). Ein defektes Partikel besteht in der Simulation nur noch aus einem Partikelkern; in der Beschichtung befindliches Spaltproduktinventar wird zum Versagenszeit-

punkt spontan in den Matrixgraphit freigesetzt. Die in der numerischen Diffusionsrechnung verwendeten Stützstellen in Partikelkern, -beschichtung und Brennelement werden entsprechend den möglichen Spezifikationen des Codes in geeigneter Weise vorgegeben.

Die Corekaverne des HTR-100, d.h. der Bereich zwischen Oberkante Deckenreflektor und Unterkante Bodenreflektor in axialer Richtung (Gesamthöhe: 11.75 m) sowie bis zum Außenrand Kugelschüttung in radialer Richtung (Durchmesser: 3.5 m), wird in einem orthogonalen Rechengitter in Zylindergeometrie der Dimension 6 (r) mal 22 (z) dargestellt. Der überwiegende Teil der Gittermaschen entfällt auf die Kugelschüttung (66) und den Deckenreflektor (42). Kugelschüttungsoberfläche und Bodenreflektor werden als eben angenommen. Die 4 in die Corekaverne hineinragenden Graphitnasen brauchen nicht berücksichtigt zu werden; eine Ablagerung an ihren Oberflächen wird in konservativer Näherung vernachlässigt.

#### *b) Spaltproduktinventare und -anfangsverteilung*

Die Freisetzungsberechnungen werden "relativ" durchgeführt, d.h. es genügt, ein Inventar von 100 % vorzugeben und dessen Aufteilung in der Folge als Funktion der Zeit zu berechnen. Absolutwerte für das Cs- und Sr-Inventar sind dann gefordert, wenn die Sorption metallischer Spaltprodukte an Graphitoberflächen durch den konzentrationsabhängigen Bereich der Sorptionsisothermen beschrieben werden muß. Ihr Einfluß auf die Ergebnisse ist, insbesondere im Hinblick auf die kleinen erwarteten Freisetzungsmengen beim HTR-100, vergleichsweise gering, so daß eine grobe Angabe von Inventar-Richtwerten genügt:

Cäsium:  $1.0 \cdot 10^{26}$  Atome  
Strontium:  $0.7 \cdot 10^{26}$  Atome

Es wird eine über das Core gemittelte Kugelleistung angenommen. Auch die Verteilung der Spaltprodukte im aktiven Core wirkt sich

wegen der MEDUL-Beschickungsweise im HTR-100 und dem praktisch homogen verteilten Partikelbruchanteil (infolge des unbedeutenden störfallbedingten Beitrags) nicht wesentlich auf die Ergebnisse aus.

Ausgehend von 100 % Gesamtinventar eines Spaltprodukt nuklids befindet sich der überwiegende Teil in den Brennstoffteilchen innerhalb einer intakten SiC-Schicht. Lediglich ein kleiner Anteil entsprechend dem Anteil an freiem, d.h. außerhalb einer intakten SiC-Schicht befindlichen Uran, unterschieden nach Erwartungs- und Auslegungswert, wird als Schwermetall-Kontamination des Brennelementgraphits oder als herstellungsbedingt defekte Partikel vorgegeben.

Der radioaktive Zerfall im Untersuchungszeitraum des Kernaufheizstörfalls von 200 h ist in den Rechenergebnissen (und den Abbildungen 5 - 9) nicht berücksichtigt.

### *c) Transport- und Sorptionsdaten*

Das Diffusionsmodell FRESCO verwendet "effektive" Diffusionskoeffizienten für die einzelnen Spaltprodukte in den verschiedenen Materialien. In ihnen sind Erkenntnisse aus neueren Störfallsimulationsexperimenten z.T. bereits verarbeitet. Allerdings konnte das sich ebenfalls abzeichnende Potential für eine Reduzierung des Diffusionskoeffizienten von Cäsium und Strontium in Siliziumcarbid noch nicht genutzt werden. Die in den Rechnungen verwendeten Transportdaten sind in /1/ zusammengestellt.

Abweichend von dem in der Regel als 1-Phasen-Diffusion beschriebenen Transportprozeß mit effektiven Diffusionskoeffizienten wird bzgl. des Jodtransports in Graphit zwischen "schneller" und "langsamer" Diffusion unterschieden: In einer ersten FRESCO-Rechnung wird die Schwermetall-Kontamination nicht berücksichtigt; das aus den Defektpartikeln freigesetzte Jod wird an-

schließlich durch den schnellen Diffusionsprozeß auf den Korngrenzen des Graphits nach außen getragen. Mit Hilfe einer separaten FRESCO-Rechnung wird die durch "langsame" Diffusion bedingte Freisetzung des als Schwermetall-Kontamination vorhandenen Jods aus den Graphitkörnern ermittelt und mit den Ergebnissen aus der ersten Rechnung zu einer Gesamt-Jodfreisetzung zusammengefügt. Die Gültigkeit des Koeffizienten für die "langsame" Diffusion (siehe /1/) wird bis zu einer Temperatur von 1250 °C angenommen, bei höheren Temperaturen wird "schnelle" Diffusion unterstellt.

Die Ablösung und Wiedieranlagerung der metallischen Spaltprodukte Cs und Sr von bzw. an Graphitoberflächen kann nach dem vorliegenden Kenntnisstand durch Sorptionsisothermen beschrieben werden. Sie sind zusammen mit den entsprechenden Eingangsdaten in /1/ ausführlich erläutert. Aufgrund der bei einem Kernaufheißstörfall in HTR-100 zu erwartenden geringen Mengen an Cs und Sr außerhalb der Brennelemente und den vergleichsweise niedrigen Störfalltemperaturen weiter Bereiche der Kugelschüttung spielt der Sorptionseffekt eine dominierende Rolle. In diesem Fall hat die sensitive Input-Größe "Sorptionsisothermen" keinen merklichen Einfluß auf die absolute Cäsium- und Strontium-Freisetzung gegenüber einer Variation der Daten. Dies wird in einer Parameterrechnung deutlich, in der der Sicherheitszuschlag auf den Partialdruck über der Kugeloberfläche so gewählt wurde, daß er noch über das in /1/ festgelegte Maß hinausgeht.

Dagegen werden für Silber aufgrund experimenteller Erkenntnisse sowie für Jod aufgrund zu hoher Graphittemperaturen keinerlei Rückhaltung an Graphitoberflächen durch Sorptionseffekte angenommen.

Die Wiedieranlagerung bereits freigesetzter metallischer Spaltprodukte an kälteren Brennelementoberflächen während des Normalbetriebs wird mit der "Brennelement"-Version von FRESCO nicht erfaßt sondern stattdessen ein ungehinderter Übergang der Spaltprodukte von der Brennelementoberfläche in das Kühlgas angenommen. Eine Abschätzung für das Rückhaltepotential der

Brennelemente bzgl. Cäsium und Strontium kann jedoch näherungsweise mit der "Core"-Version erfolgen.

#### *d) Partikelbruch*

Da sich im Core des HTR-100 Brennelemente unterschiedlicher Altersstufen (von frischen bis zu maximal abgebrannten) befinden, wird in den Freisetzungsrechnungen bei Normalbetrieb am Beispiel der repräsentativen Kugel für den Anteil der bestrahlungsbedingt defekten Partikel ein Mittelwert angesetzt. Er entspricht nach 1000 d, der (mittleren) Lebensdauer eines Brennelementes, der Hälfte des in /1/ spezifizierten end-of-life-Wertes im Erwartungs- bzw. Auslegungsfall und wird in 5 linearen Stufen - jeweils 1/5 zu Beginn eines jeden Zyklus - erreicht.

Der Rechencode PANAMA bestimmt den Defektanteil von TRISO-Partikeln unter Störfallbedingungen als Funktion der Zeit und der Temperatur. Von den dort modellierten Versagensmechanismen ist jedoch nur das "klassische" Druckkesselmodell, dominierend im unteren Temperaturbereich, von Bedeutung; die thermische Zersetzung der SiC-Schicht kann dagegen vernachlässigt werden. Die für die Rechnungen notwendigen Eingabedaten sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Die Neutronenbestrahlung im Normalbetrieb führt in Abhängigkeit von ihrer Stärke und Temperatur zu einer Schwächung der SiC-Schicht im Partikel gegenüber dem unbestrahlten Zustand, d.h. zu einer höheren Versagenswahrscheinlichkeit des "Druckkessels". Für die in der Tabelle 1 genannten SiC-Daten ergibt sich dadurch folgende Reduzierung:

|                    |         |   |         |
|--------------------|---------|---|---------|
| Zugfestigkeit:     | 834 MPa | → | 754 MPa |
| Weibull-Parameter: | 8.02    | → | 6.90    |

Eine PANAMA-Rechnung wird getrennt für jedes Volumenelement der Kugelschüttung im Rechengitter als Funktion des zugehörigen



Tabelle 1: Randbedingungen in den PANAMA-Rechnungen zur Bestimmung des störfallbedingten Partikelbruchs im HTR-100

---

|                                  |                     |                    |                           |
|----------------------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|
| LEU $\text{UO}_2$ TRISO-Partikel |                     |                    |                           |
| Mittlere Bestrahlungstemperatur  | 800                 | $^{\circ}\text{C}$ |                           |
| Bestrahlungszeit                 | 1000                | Vollasttage        |                           |
| Neutronenfluenz                  | $2.6 \cdot 10^{25}$ | $\text{m}^{-2}$    | ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) |
| Schwermetallabbrand              | 0.08                | FIMA               |                           |
| SiC-Zugfestigkeit (wie EO 1607)  | 834                 | MPa                |                           |
| Weibull-Parameter (wie EO 1607)  | 8.02                |                    |                           |

---

zeitlichen Temperaturverlaufes durchgeführt. Da die FRESCO-Programmtechnik eine 5-stufige Partikelbruchfunktion vorschreibt, wird in Abhängigkeit von dem jeweils nach 200 h erreichten Wert eine Aufteilung in 5 Zeitintervalle für die einzelnen Volumenelemente vorgenommen, in denen der Defektanteil jeweils um 1/5 des Endwertes ansteigt.

Als Sicherheitszuschlag für den mit PANAMA errechneten Defektanteil ist bei dem im HTR-100 zu erwartenden Störfalltemperaturbereich ein Faktor 5 vorgesehen (siehe /1/). Damit dürfte die Vorhersage des Partikelbruchs als sehr konservativ gelten.

Ergänzend werden Rechenergebnisse erläutert, die mit einem Ansatz entsprechend der HBK-Vorstellung (Stand 1986) /2/ erzielt worden sind.

#### d) Thermodynamische Daten

Ein Kugelbrennelement hat am Ende seiner nominalen Lebensdauer im HTR-100 bei einer Gesamtbestrahlungszeit von 1000 Vollasttagen

5 mal den aktiven Corebereich durchwandert. Dabei ist es jedesmal von einer Bestrahlungstemperatur zwischen 1000 °C (als Erwartungswert) oben und 400 °C unten (lineare Abnahme) beaufschlagt worden. In den Rechnungen für den Auslegungsfall wird als obere Temperaturgrenze 1250 °C angenommen. Die Temperaturangaben beziehen sich auf das ganze Brennelement einschließlich der Brennstoffpartikel; es wird kein Profil innerhalb der Kugel errechnet.

Die thermodynamischen Daten unter Störfallbedingungen - Druck, Feststoff- und Kühlgastemperaturen sowie die axialen und radialen Geschwindigkeitskomponenten in Abhängigkeit von der Zeit - werden aus Rechnungen mit dem Programm THERMIX übernommen und auf die in FRESCO diskretisierte Zeit- und Ortsstruktur übertragen.

## 2.2 Integriertes Schadens- und Freisetzungsmodell PANAMA-II

Das im Rechencode PANAMA-II modellierte "Integrierte Schadens- und Freisetzungsmodell" wird bei dieser Analyse als ergänzende Methode benutzt um aufzuzeigen, wie ein an neueste - allerdings bisher nur wenige - Ausheizexperimente angepaßtes, empirisches Rechenmodell die Cäsium- bzw. Krypton-Freisetzung aus dem HTR-100 bei einer Kernaufheizung vorhersagt. Aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes könnte sich jedoch noch die Notwendigkeit ergeben, verschiedene, z.T. vereinfachende Annahmen wie die totale Rückhaltefähigkeit einer intakten SiC-Schicht für Cäsium, dasselbe Freisetzungsverhalten aller Partikel (dies gilt auch für das Diffusionsmodell) oder die Vernachlässigung von Transportprozessen im Brennelementgraphit zu revidieren. Die Versagensmechanismen für die SiC-Schicht "Korrosion" sowie "thermische Zersetzung" sind als statistische Verteilungsfunktionen erfaßt; ihre empirisch ermittelten Parameter sind in /1/ angegeben.

### 3. Aktivitätsfreisetzung beim HTR-100 unter Normalbetriebsbedingungen

Die rechnerische Vorhersage zur Normalbetriebsfreisetzung im HTR-100 wurde für die metallischen Spaltprodukt nuklide Cs-137, Sr-90 sowie Ag-110m mit der "Brennelement"-Version FRESCO durchgeführt. Die vorgenommene Wahl der Eingabeparameter erlaubt in guter Näherung eine Übertragung der Rechenergebnisse für die Einzelkugel auf die gesamte Kugelschüttung. Die Rechnungen mit den Erwartungswerten, die als die Referenzrechnungen gelten, werden zum Vergleich den Rechenergebnissen für den Auslegungsfall gegenübergestellt.

Die Freisetzungssanteile am Ende der nominalen Lebensdauer eines mittleren, für die Kugelschüttung repräsentativen Brennelements sind für die genannten Spaltprodukt nuklide in der folgenden Tabelle 2 zusammengefaßt. In den Abbn. 1 und 2 sind die Freisetzungssanteile als Funktion der Bestrahlungszeit dargestellt.

In allen Freisetzungskurven können die 5 Zyklen, entsprechend den Durchläufen des Brennelements durch das Core, deren Beginn durch den Temperatursprung von 400 auf 1000 °C sowie durch einen Anstieg des Partikelbruchanteils (kurz gestrichelte Kurven) charakterisiert ist, deutlich ausgemacht werden. Der errechnete Kurvenverlauf für die Freisetzung aus dem Brennelement in jedem der einzelnen Zyklen ist charakterisiert durch den radioaktiven Zerfall, durch den Inventaraufbau und durch den Diffusionsprozeß. Der diffusionsbedingte Verlust wird für alle Nuklide infolge der abnehmenden Temperaturen im Verlaufe eines Zyklus immer geringer. Entstehung und Zerfall kurzlebiger Nuklide befinden sich rasch im Gleichgewichtszustand. Bei den langlebigen Spaltprodukten ist dagegen der Zerfall nur von untergeordneter Bedeutung und damit gleichzeitig der Inventaraufbau im Brennelement über die Lebensdauer gesehen annähernd linear. Die Abnahme des Wertes für die kumulierte Freisetzung in den Abbildungen, die durch den stetig ansteigenden Bezugswert für das aktuellen Gesamtinventar möglich wird, verringert sich mit jedem Folgezyklus.

Tabelle 2: Freisetzung von Cs-137, Sr-90 und Ag-110m  
aus einem repräsentativen Kugelbrennelement  
nach 1000 d (end-of-life) unter Normalbetriebs-  
bedingungen

| Nuklid       | Freisetzungsanteil im |                 |
|--------------|-----------------------|-----------------|
|              | Erwartungsfall        | Auslegungsfall  |
| Cäsium-137   | $8.0 * 10^{-6}$       | $1.5 * 10^{-4}$ |
| Strontium-90 | $1.4 * 10^{-7}$       | $3.0 * 10^{-6}$ |
| Silber-110m  | $3.2 * 10^{-5}$       | $3.5 * 10^{-2}$ |

Die Reihenfolge der metallischen Spaltprodukte in der Brennelementfreisetzung (Abbn. 1 und 2) entspricht auch der in der Regel in den Bestrahlungsexperimenten beobachteten. Danach wird Ag-110m relativ am stärksten freigesetzt, im Erwartungsfall ein Anteil von  $3.2 \cdot 10^{-5}$ , unter Auslegungsbedingungen sogar  $3.5 \cdot 10^{-2}$  des Gesamtinventars in der Kugel am Ende seiner Lebensdauer. Cäsium und Strontium werden dagegen wesentlich besser durch die SiC-Schicht zurückgehalten, Strontium noch verstärkt durch den Brennelementgraphit. Die Freisetzungswerte nach 1000 d betragen  $8.0 \cdot 10^{-6}$  bzw.  $1.4 \cdot 10^{-7}$  (Erwartung) des Kugelinventars.

Der bestrahlungsbedingte Partikelbruch spielt nur eine untergeordnete Rolle. Für den Fall, daß kein Partikel während des Normalbetriebs defekt wird - eine Annahme, die mit allen bisherigen Bestrahlungsexperimenten an Referenzbrennstoff konsistent ist und damit einem "Erwartungswert" nahe kommt -, reduziert sich die Freisetzung von Cäsium um rund 10 %, die von Silber um rund 3 %; der freigesetzte Strontium-Anteil bleibt sogar unverändert.

Die in Experimenten punktuell beobachtete kleinere Diffusionsgeschwindigkeit metallischer Spaltprodukte in A3-27-Matrixgraphit im Vergleich zu A3-3, dessen Transportdaten, da besser untermauert, verwendet worden sind, könnte - bei einer Reduktion des

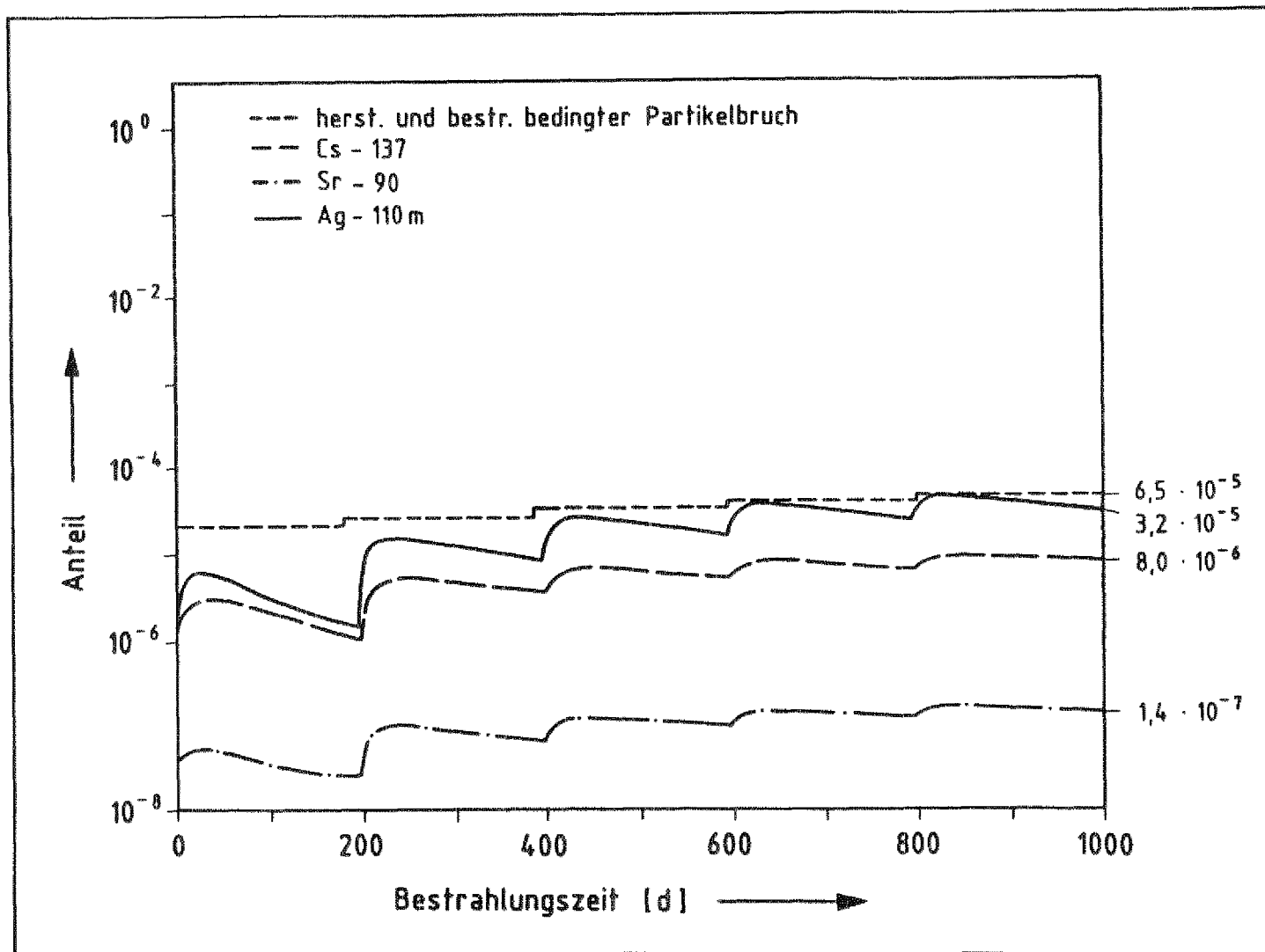


Abb. 1: Freigesetzter Anteil des Inventars von Cäsium-137, Strontium-90 und Silber-110m sowie die Partikelbruchfunktion beim HTR-100 im Normalbetrieb (Erwartung)

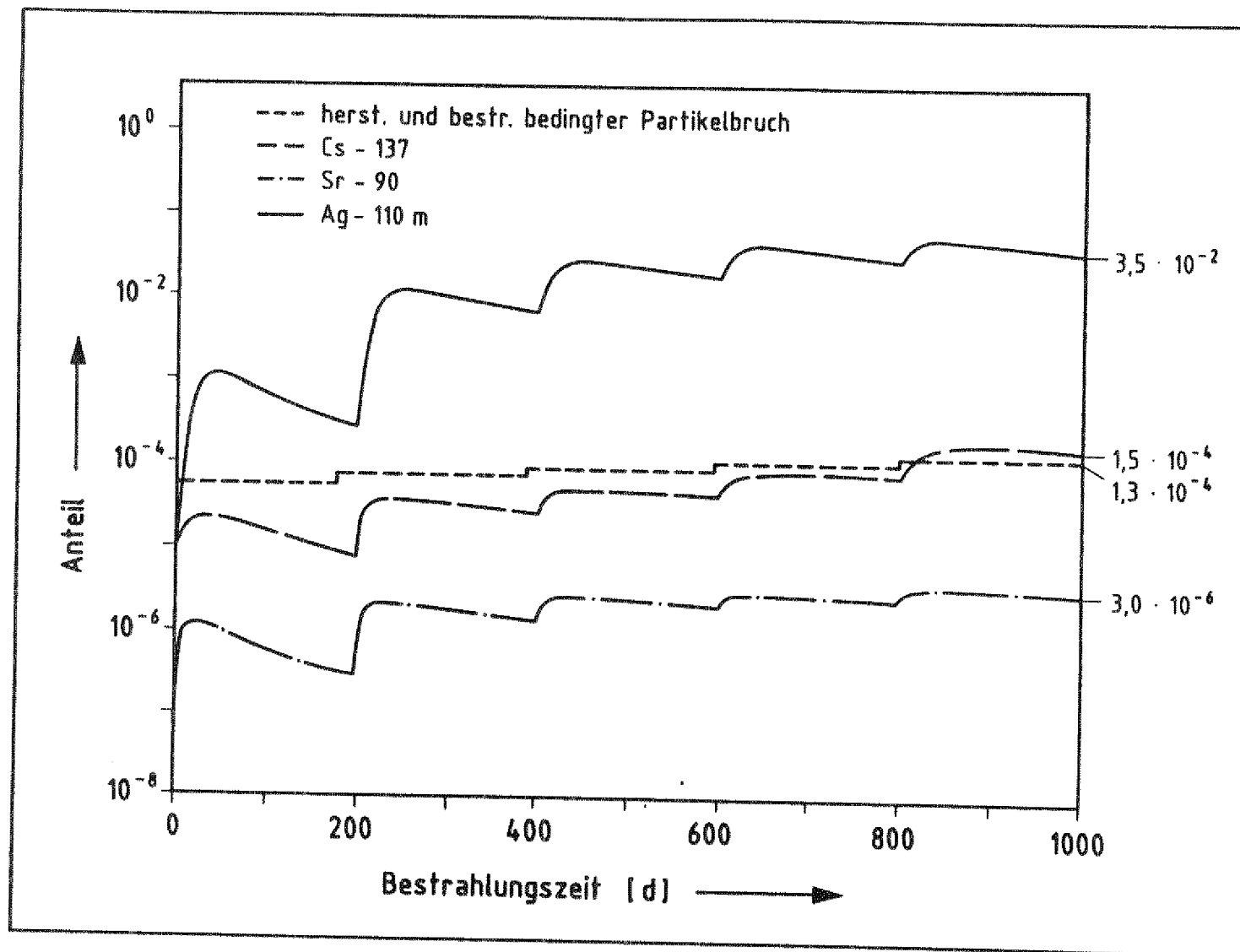


Abb. 2: Freigesetzter Anteil des Inventars von Cäsium-137, Strontium-90 und Silber-110m sowie die Partikelbruchfunktion beim HTR-100 im Normalbetrieb (Auslegung)

Diffusionskoeffizienten um den Faktor 10 - bei Cäsium und Strontium zu einer Verringerung in der Normalbetriebsfreisetzung um jeweils etwa den Faktor 3 führen. Bei Silber ist dieser Effekt nur von geringer Bedeutung aufgrund der an sich schon hohen Diffusionsgeschwindigkeit durch den Graphit.

#### *Rückhaltung an Graphitoberflächen*

Eine Abschätzung mit der "Core"-Version von FRESCO zeigt, daß unter Normalbetriebsbedingungen von dem o.a. Cäsium- und Strontium-Freisetzungsanteil aus einem Brennelement ein Anteil zwischen 10 und 20 % in den Bohrungen des Deckenreflektors durch Sorption gebunden werden kann. Der entscheidende Einflußfaktor hierbei ist nicht so sehr die Deckenreflektortemperatur sondern die hohe Kühlgasgeschwindigkeit. Erst bei den kleinen Strömungsgeschwindigkeiten, die im druckentlasteten Zustand in der Core-kaverne zu erwarten sind, stellt sich ein dominierender Sorptionseffekt heraus. Die Berücksichtigung der Kugelschüttung mit ihrer weitaus größeren Graphitoberfläche sowie der besseren Sorptionsfähigkeit der Matrix gegenüber Reflektorgraphit führt sogar zu einer praktisch vollständigen Bindung der geringen, im Normalbetrieb freigesetzten Cäsium- und Strontiumanteile an Graphit.

Im weiteren Verlauf der Quellterm-Berechnung wird angenommen, daß 80 % der im Normalbetrieb freigesetzten Aktivität metallischer Spaltprodukte (100 % bei Jod) auf den Dampferzeugeroberflächen abgelagert wird.

#### 4. Aktivitätsfreisetzung beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall

Für die Berechnung der Aktivitätsanteile der betrachteten Spaltprodukte, die bei einem Kernaufheizstörfall zusätzlich zur Normalbetriebsfreisetzung aus der Kugelschüttung in den Primärkreis freigesetzt werden, wurde die "Core"-Version von FRESCO benutzt.

Die im Falle einer Kernaufheizung im druckentlasteten Reaktor zu erwartende Temperaturverteilung in der Corekaverne führt zu dem in den Abbildungen 3 - 7 dargestellten zeitlichen Freisetzungsverhalten von Spaltprodukten in Primärkreislauf und Reaktorschutzgebäude. Die Tabelle 3 enthält für den Zeitpunkt 200 h nach Beginn des Kernaufheizstörfalls die Anteile der defekten Partikel sowie der Spaltproduktfreisetzung aus den Brennstoffpartikeln, aus dem Core und aus dem Primärkreis.

##### *Partikelbruch*

Die mit den oben angeführten Randbedingungen durchgeführten Rechnungen mit dem TRISO Partikelbruchmodell PANAMA führen zu dem Resultat, daß nur an der maximal belasteten Stelle in der Kugelschüttung ein zusätzlicher störfallbedingter Partikelbruchanteil auftritt, der dem Erwartungswert bei Eintritt des Störfalls vergleichbar ist. Insgesamt wird in nur 3 der 66 Teilvolumina der Kugelschüttung nach 200 h Störfallzeit der Anteil defekter Brennstoffpartikel von  $1 \cdot 10^{-4}$  geringfügig überschritten. Dies entspricht etwa 1 - 2 zusätzlichen, störfallbedingt defekten Partikeln in jedem Kugelelement aus einem Bereich des aktiven Cores, der weniger als 1 % des Gesamtvolumens ausmacht. Es zeigt sich, daß im weitaus größten Teil der Kugelschüttung keine zusätzlichen Partikeldefekte im Untersuchungszeitraum zu erwarten sind. Dies drückt sich auch in der Kurve für den zeitlichen Verlauf des über die Kugelschüttung integrierten Partikelbruchanteils aus (siehe Abb. 4), dessen Wert bei Beginn des Störfalls



$(6.5 \cdot 10^{-5})$  bis zum Ende des Untersuchungszeitraums lediglich um 2 % angestiegen ist.

Veränderungen einzelner Parameter gegenüber dem näherungsweise "mittleren" Zustand (siehe Tabelle 1) zur ungünstigen Seite hin haben eine mehr oder weniger starke Erhöhung des Partikeldefektanteils zur Folge. So würde bei einer Anhebung der mittleren Brennstofftemperatur im Normalbetrieb von  $800^{\circ}\text{C}$  auf  $1000^{\circ}\text{C}$  der Partikelbruchanteil nach 200 h um rund 1 Größenordnung auf  $7.3 \cdot 10^{-4}$  ansteigen.

Ein anderer sensibler Parameter im PANAMA-Modell sind die SiC-Materialdaten. Werte für die Zugfestigkeit von 660 (anstatt 834) MPa und für den Weibull-Parameter von 6 (anstatt 8) entsprechend der TRISO-Partikelsorte HT 150-167 erhöhten den Partikelbruch nach 200 h Störfallzeit um etwa 2 Größenordnungen.

Im Unterschied zu dem hier für die Referenzrechnung gewählten Partikelbruchmodell gibt die HBK-Empfehlung /2/ einen örtlich und zeitlich konstanten Anteil von  $5 \cdot 10^{-5}$  störfallbedingt defekten Partikeln an, anwendbar auf den Temperaturbereich  $\leq 1600^{\circ}\text{C}$ ; allerdings liegen die Werte der anderen Formen für freies Uran, nämlich bestrahlungsbedingter Partikelbruch und Schwermetallkontamination des Graphits, etwas niedriger. Insgesamt erscheint jedoch der lt. HBK für das gesamte aktive Core zu erwartende einheitliche Wert von  $9 \cdot 10^{-5}$  - zum Vergleich:  $6.6 \cdot 10^{-5}$  integral als hier benutzter Referenzwert - für weite Bereiche der Kugelschüttung, die nur eine relativ kleine Störfalltemperatur haben, ein äußerst konservativer Wert zu sein.

#### *Freisetzung aus den Brennstoffpartikeln*

Der zeitliche Verlauf der relativen Freisetzung aus den Brennstoffpartikeln (Abb. 3) startet für alle Nuklide mit dem Anteil, der der Graphitkontamination entspricht und steigt im Zeitbereich zwischen 20 und 40 h nach Störfallbeginn, in dem auch die maxi-

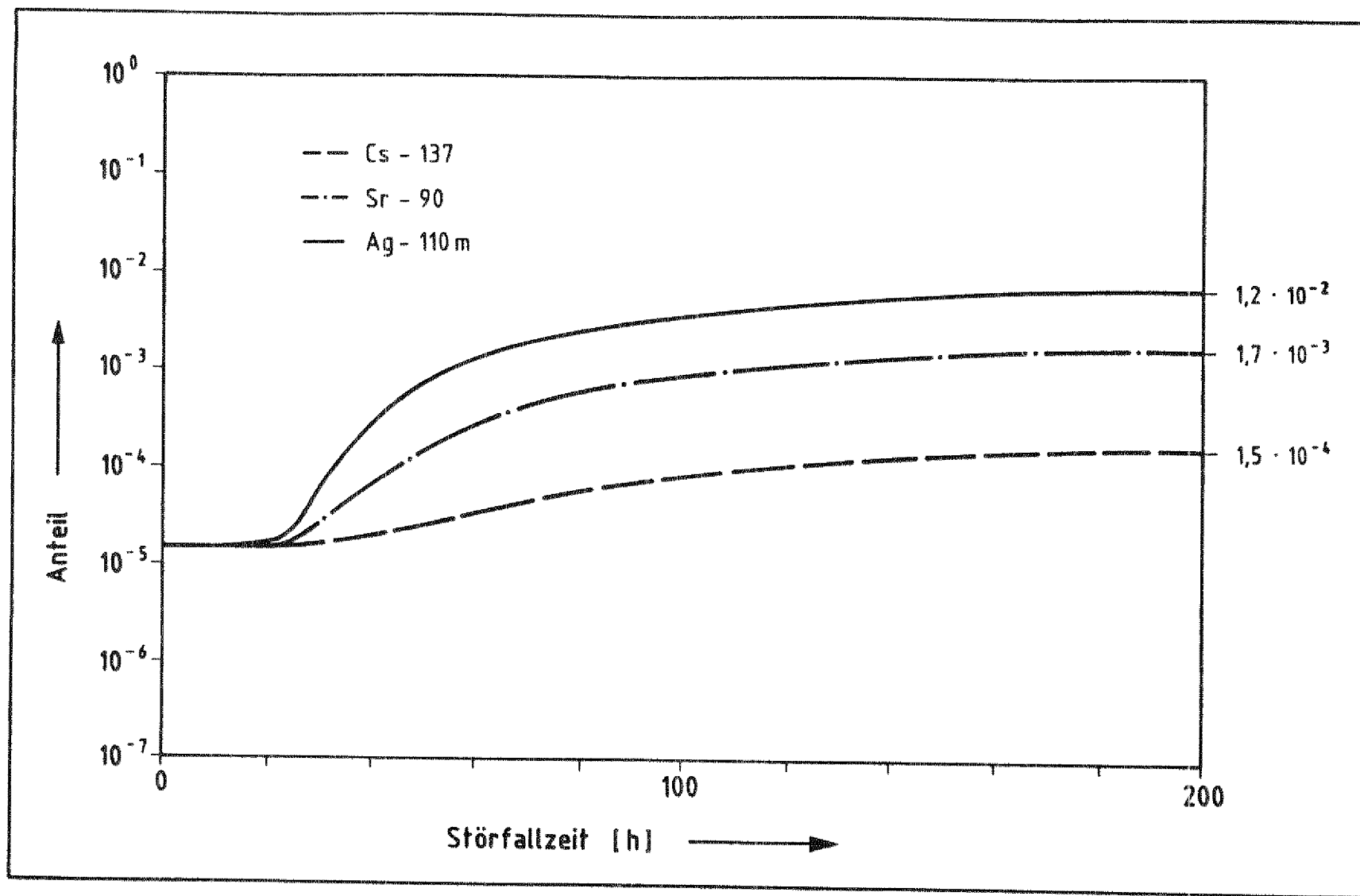


Abb. 3: Freigesetzter Anteil des jeweiligen Gesamtinventars von Cäsium, Strontium und Silber aus den Partikeln beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall

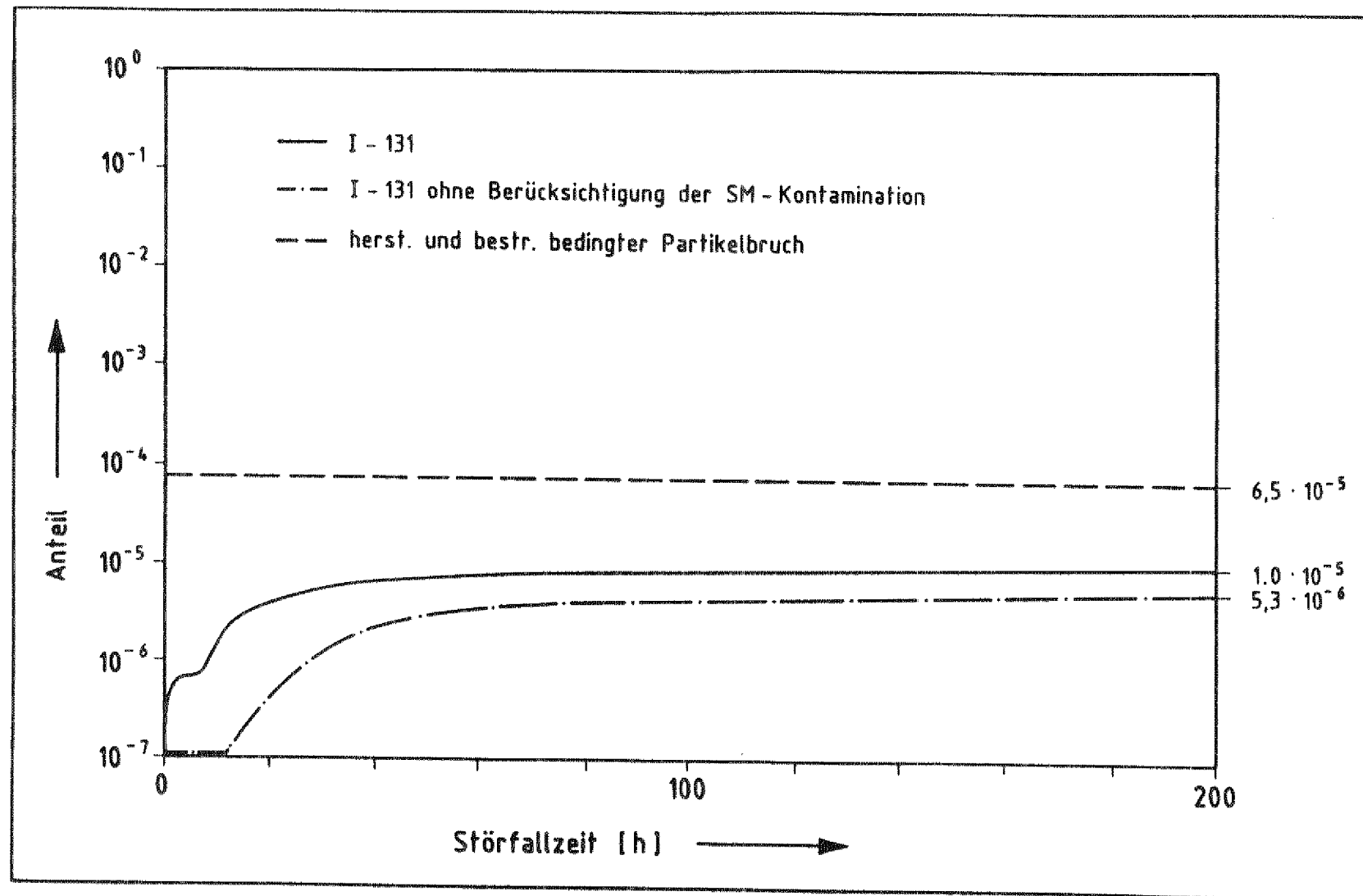


Abb. 4: Freigesetzter Anteil des Gesamtinventars von Jod aus dem Core und Partikelbruchanteil beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall

malen Brennelementtemperaturen erreicht werden, verstärkt an. Erwartungsgemäß wird Silber anteilmäßig am stärksten freigesetzt; 1.2 % des Gesamtinventars befinden sich 200 h nach Störfallbeginn außerhalb der Partikel. Es folgen die Spaltproduktelemente Strontium mit  $1.7 \cdot 10^{-3}$  und Cäsium mit  $1.5 \cdot 10^{-4}$  Freisetzungsanteil nach 200 h. Die im Vergleich zum Cäsium höhere Strontium-Freisetzung ist bedingt durch den ungünstigeren Diffusionskoeffizienten in SiC im Temperaturbereich 1000 - 1700 °C (siehe /1/).

Der freigesetzte Jod-Anteil, der direkt mit dem Partikelbruch korreliert ist, steigt auf  $1.0 \cdot 10^{-5}$  des Gesamtinventars nach 200 h an. Etwa die Hälfte davon stammt aus der Schwermetall-Kontamination im Matrixgraphit. Sieht man von diesem Anteil einmal ab, so findet man den in der unteren Kurve der Abb. 4 dargestellten zeitlichen Verlauf für die diffusionsbedingte Freisetzung aus den Brennstoffpartikeln (bzw. aus dem Core). Der integrale Anteil von  $5.3 \cdot 10^{-6}$  nach 200 h entspricht rund 10 % des Jodinventars der defekten Partikeln.

#### *Freisetzung aus der Kugelschüttung*

Die zeitliche Abfolge der bei einer Kernaufheizung aus der Kugelschüttung des HTR-100 freigesetzten metallischen Spaltprodukte entspricht ebenfalls der in den Störfallsimulationstests beobachteten. Am stärksten wird Silber ausgetragen. Da für dieses Element keine Sorption an den Graphitoberflächen angenommen wird und auch die Rückhaltung in der Matrix sehr gering ist (siehe Abb. 6), stimmt der Freisetzungsanteil von 1.2 % des Gesamtinventars nach 200 h aus der Kugelschüttung mit dem aus den Partikeln überein (Abb. 5). Dasselbe gilt für die Jodfreisetzung.

Für die Elemente Cäsium und Strontium dagegen wird in den Referenzrechnungen eine Sorption an Brennelementoberflächen vorausgesetzt. Danach reicht das Adsorptionspotential des Matrixgraphits unter den gegebenen thermodynamischen Randbedingungen aus, die aus der Kugelschüttung freigesetzten Cs- und Sr-

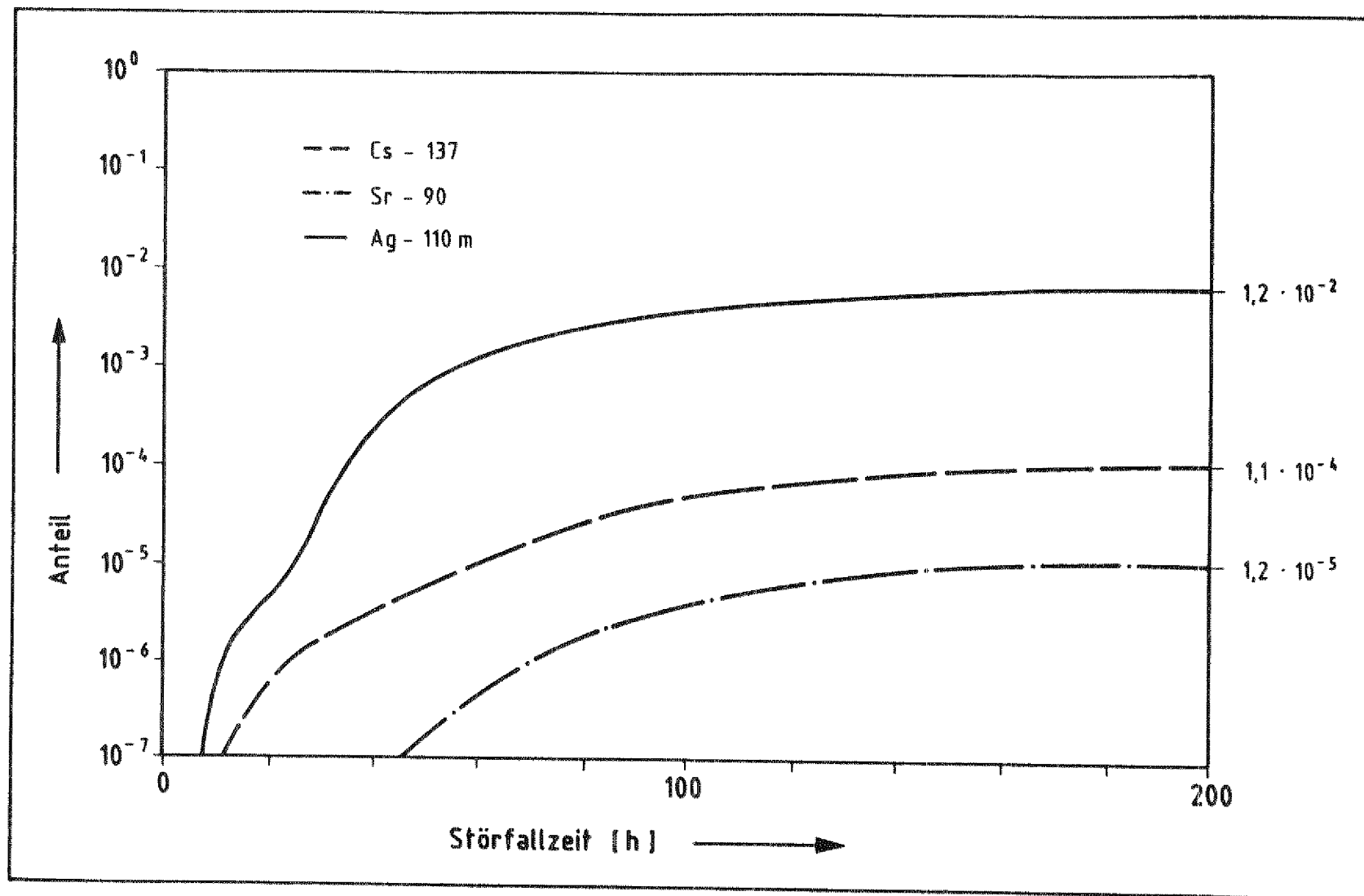


Abb. 5: Freigesetzter Anteil des jeweiligen Gesamtinventars von Cäsium, Strontium und Silber (ohne Berücksichtigung der Sorption) aus dem Core beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall

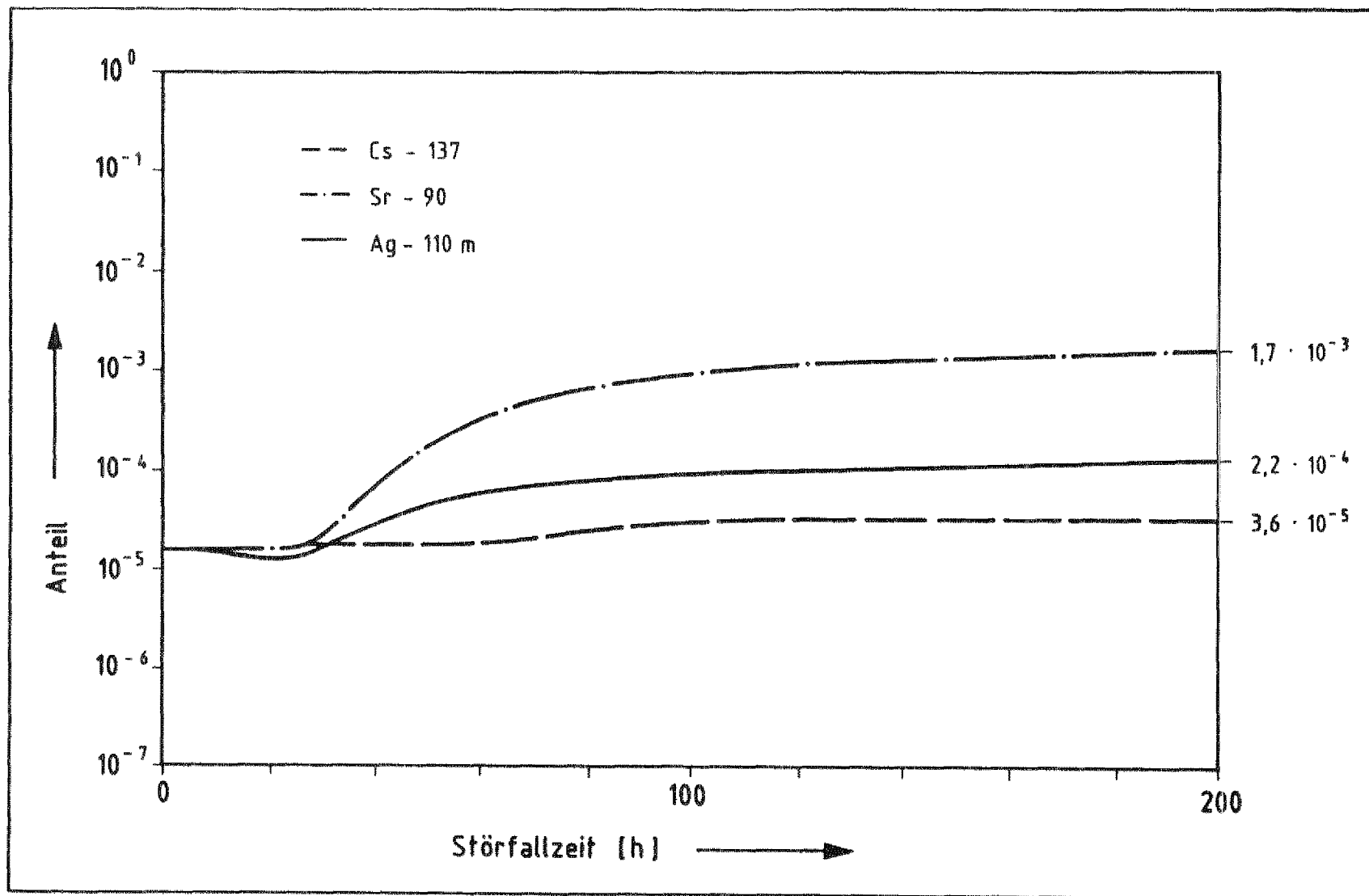


Abb. 6: Anteil des Inventars von Cäsium, Strontium und Silber im Brennelementgraphit vom jeweiligen Gesamtinventar (ohne Berücksichtigung der Sorption) beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall

Anteile kleiner als die entsprechenden zu erwartenden Kühlgasaktivitäten zu halten. Die Rechenwerte zur Freisetzung aus der Corekaverne liegen bei  $< 10^{-8}$ . Selbst für den Fall, daß eine Cäsium-Sorption nur unterhalb von  $1350^{\circ}\text{C}$  berücksichtigt wird und Partialdruck über der Graphitoberfläche um den Faktor 20 erhöht wird (ein Rechenbeispiel zur Überprüfung der Sensitivität der Sorptionsisothermen), bliebe die Cäsium-Freisetzung aus der Kugelschüttung ähnlich unbedeutend.

Anstelle dieser im gewählten Abbildungsmaßstab nicht mehr darstellbaren Zeitverläufe werden in den Abbildungen 5 (Corefreisetzung) und 6 (Inventar im Brennelementgraphit) die Fälle gezeigt, in denen die Wiedieranlagerung von Cäsium und Strontium an kälteren Brennelementoberflächen unberücksichtigt geblieben ist. Selbst unter dieser unrealistischen Annahme bliebe die integrale Freisetzung aus der Kugelschüttung in den Primärkreislauf äußerst gering. Die Rechnung beschreibt, nach Separation des Sorptionseffektes, allein die Diffusion durch das Brennelement. Hierbei zeigt sich, insbesondere bei Strontium, der starke Retardierungseffekt in der Brennelementfreisetzung durch den langsamen diffusiven Transport im Matrixgraphit.

Die Vorhersage der Freisetzung von Cäsium mit dem Rechenmodell PANAMA-II bestätigt eindeutig die in den Störfallsimulationsexperimenten an modernem HTR-Brennstoff beobachtete Tendenz, daß gemessen an den zu erwartenden Temperaturverhältnissen bei einer Kernaufheizung im HTR-100 eine störfallbedingte Freisetzung aus den Brennelementen praktisch vernachlässigt werden kann. Der Freisetzungsanteil nach 200 h beträgt  $3.03 \cdot 10^{-5}$  und setzt sich zusammen aus der freigesetzten Schwermetall-Kontamination der Matrix und dem herstellungsbedingten Partikelbruch (je  $1.5 \cdot 10^{-5}$ ), der entsprechend der derzeitigen Modellvorstellung mit einer Cäsium-Freisetzung gleichgesetzt wird. Ein Transport mit dem Kühlgas sowie eine Wiedieranlagerung an anderen Brennelementen ist hierbei nicht berücksichtigt. Die Freisetzung von Krypton ist - unter der Annahme, daß die äußere Pyrokohlenstoffschicht bei den Partikeln mit defekter SiC-Schicht noch intakt bleibt - nicht zu erwarten.

Tabelle 3: Freisetzungsanteil der Spaltprodukt nuklide Cs, Sr Ag und I im HTR-100 im Kernaufheizstörfall

| Freisetzungsanteil 200 h nach Störfallbeginn aus |                     |                     |                           |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|
|                                                  | Partikel            | Core                | Primärkreis <sup>*)</sup> |
| Cäsium                                           | $1.5 \cdot 10^{-4}$ | $< 10^{-8}$         | -                         |
| Strontium                                        | $1.7 \cdot 10^{-3}$ | $< 10^{-8}$         | -                         |
| Silber                                           | $1.2 \cdot 10^{-2}$ | $1.2 \cdot 10^{-2}$ | $7.9 \cdot 10^{-4}$       |
| Jod                                              | $2.0 \cdot 10^{-5}$ | $1.0 \cdot 10^{-5}$ | $1.1 \cdot 10^{-6}$       |
| -----                                            |                     |                     |                           |
| Partikelbruch                                    |                     | $6.5 \cdot 10^{-5}$ |                           |
| -----                                            |                     |                     |                           |
| *) bei Ausfall des Flächenkühlsystems            |                     |                     |                           |
| -----                                            |                     |                     |                           |

#### Spaltproduktfreisetzung in das Reaktorschutzgebäude

Beim Druckentlastungsstörfall können Spaltprodukte aus dem Primärkreis in das Reaktorschutzgebäude übertreten. Da im Falle eines großen Lecks der Primärkreis in sehr kurzer Zeit druckentlastet ist, kommt als Austragungsmechanismus nur die thermische Ausdehnung des Kühlgases bei ansteigender Primärkreistemperatur sowie u.U. atmosphärische Druckschwankungen in Betracht. Beim Ausfall des Flächenkühlsystems im HTR-100 ist mit einem Anstieg der Primärkreistemperaturen im Mittel von  $308^{\circ}\text{C}$  auf  $393^{\circ}\text{C}$  nach 200 h zu rechnen. Die dadurch bedingte Aktivitätsfreisetzung ist in der Abb. 7 für die Elemente Silber und Jod im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die nach 200 h im Reaktorschutzgebäude befindlichen Anteile (siehe auch Tabelle 3) betragen  $7.9 \cdot 10^{-4}$  für Silber bzw.  $2.5 \cdot 10^{-6}$  für Jod und liegen somit um rund 1 Größenordnung niedriger als die entsprechenden Anteile der Corefreisetzung. Bei intaktem Flächenkühler kommt es dagegen aufgrund der zu erwartenden Temperaturentwicklung im Primärkreislauf zu keiner nennenswerten Spaltproduktfreisetzung in das Reaktorschutzgebäude.



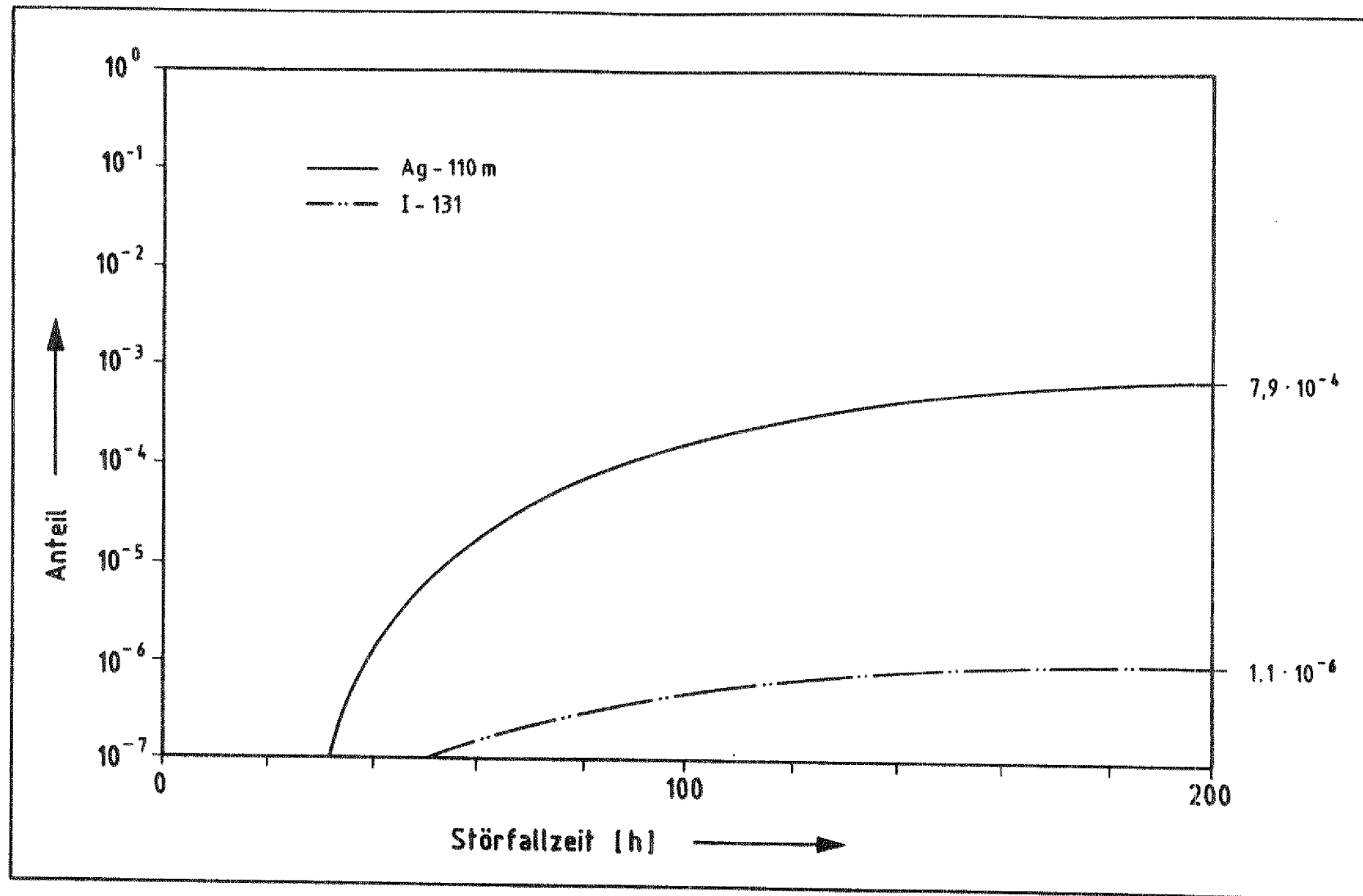


Abb. 7: Freigesetzter Anteil des Gesamtinventars von Jod bzw. Silber aus dem Primärkreis in das Reaktorschutzgebäude beim HTR-100 im Kernaufheizstörfall bei Ausfall des Flächenkühlsystems

## 5. Literatur

/1/ R. Moormann, K. Verfonderen

Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen  
für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte - Ein Statusbericht  
(Stand 1986), Band 3: Spaltproduktfreisetzung  
Jül-Spez-388, Mai 1987

/2/ KFA/HBK

Projektbericht 1985, HBK-IB-1/1986



VI. QUELLTERME UND AUSWIRKUNGEN FÜR DRUCKENTLASTUNGS-,  
WASSEREINBRUCH- SOWIE TRANSIENTENSTÖRFÄLLE/UNFÄLLE

R. Moormann<sup>1 2</sup>, G. Degen<sup>2</sup>, E. Frank<sup>1</sup>, H.G. Ehrlich<sup>1</sup>, R. Koschmieder<sup>1</sup>, G. Meister<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Quellterme

<sup>2</sup>Auswirkungen

INHALTSVERZEICHNIS

|                                                                                | <u>Seite:</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 1. VORBEMERKUNG                                                                | 2             |
| 2. SPALTPRODUKTINVENTARE IM PRIMÄRKREISLAUF UNTER<br>NORMALBETRIEBSBEDINGUNGEN | 2             |
| 2.1 Corefreisetzungsraten                                                      | 2             |
| 2.2 Stationäre Kühlgasaktivität                                                | 3             |
| 2.3 Abgelagerte Aktivität                                                      | 4             |
| 2.3.1 Staubgebundene abgelagerte Aktivität                                     | 4             |
| 2.3.2 Plate-out-Aktivität                                                      | 5             |
| 2.3.3 Ablagerung in der Gasreinigungsanlage                                    | 8             |
| 3. FREISETZUNG BEI PRIMÄRKREISDRUCKENTLASTUNGEN                                | 10            |
| 4. FREISETZUNG DURCH WASSEREINBRUCH                                            | 12            |
| 4.1 Vorbemerkung                                                               | 12            |
| 4.2 Spaltproduktfreisetzung/Mobilisierung im Primärkreis                       | 12            |
| 4.3 Freisetzungen in die Umgebung                                              | 14            |
| 5. FREISETZUNG BEI TRANSIENTENUNFÄLLEN                                         | 15            |
| 6. DOSISWERTE UND UNFALLFOLGEN                                                 | 18            |
| 6.1 Vorbemerkung                                                               | 18            |
| 6.2 Maximale Individualdosiswerte nach den Störfallberechnungs-<br>grundlagen  | 19            |
| 6.3 Umgebungsbelastung und Unfalldosen aus Unfallfolgen<br>(UFOMOD)-Rechnungen | 20            |
| 7. ZUSAMMENFASSUNG                                                             | 24            |
| 8. LITERATUR                                                                   | 26            |

## 1. VORBEMERKUNG

Die über einen langjährigen Normalbetrieb im Primärkreislauf akkumulierte Aktivität kann im Verlauf von Wassereinbrüchen, Druckentlastungen oder Ereignissen mit Ausfall der Dampferzeugerbespeisung mobilisiert und in die Umgebung freigesetzt werden. Die Ermittlung der daraus resultierenden Quellterme, ergänzt um die für Wassereinbrüche charakteristischen Corefreisetzungen (bewirkt durch Graphitkorrosion, Brennstoff-"hydrolyse" etc.) ist Gegenstand dieses Kapitels. Weiterhin werden zugehörige Dosisabschätzungen und Unfallfolgenrechnungen dargelegt.

Auf Einzelheiten der Berechnungsverfahren wird hier nicht eingegangen, da diese in einem separaten Bericht (/1/, im folgenden "Methodenpapier" genannt) festgeschrieben sind.

Hingewiesen sei darauf, daß sich die nachfolgend angegebenen Inventar/Freisetzungswerte jeweils auf 1 Reaktor der Doppelblockanlage beziehen; das gilt nicht für die Gasreinigungsanlage, da diese in der Gesamtanlage nur einmal vorhanden ist. Die in Abschnitt 6 aufgeführten Kollektivrisiken gelten für die Doppelblockanlage.

## 2. SPALTPRODUKTINVENTARE IM PRIMÄRKREISLAUF UNTER NORMALBETRIEBSBEDINGUNGEN

### 2.1 Corefreisetzungsraten

Die durch Diffusion im Normalbetrieb erfolgende Corefreisetzung ist für die Cäsium-, Strontium- und Silbernuklide bereits in Beitrag V angegeben worden. Zusätzlich ist die Abschätzung der Corefreisetzung von Cs-137, Sr-89 und Sr-90 durch gasförmige Vorläufernuklide sowie des Jod- und Edelgasinventars im Primärkreislauf erforderlich. Die Rechnungen erfolgen über den Booth-Ansatz, wobei in üblicher Weise zwischen Diffusion aus der Schwermetallkontamination und aus defekten Partikeln unterschieden wird.

Die unter Berücksichtigung dieser Effekte berechneten Corefreisetzungsraten im Normalbetrieb enthält Tabelle 1.

|          | Diffusionsbedingt<br>$s^{-1}$ | über Vorläufernuklide<br>$s^{-1}$ |
|----------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Cs-134   | $2 \cdot 10^{11}$             | -                                 |
| Cs-137   | $2,8 \cdot 10^{12}$           | $3 \cdot 10^{10}$                 |
| Sr-89    | $6,9 \cdot 10^9$              | $1,2 \cdot 10^{10}$               |
| Sr-90    | $3,5 \cdot 10^{10}$           | $5,6 \cdot 10^9$                  |
| Ag-110 m | $9,6 \cdot 10^9$              | -                                 |
| I-131    | $5,5 \cdot 10^{10*}$          | -                                 |
| I-133    | $1,3 \cdot 10^{10*}$          | -                                 |
| Kr-85    | $1,8 \cdot 10^{11}$           | -                                 |
| Kr-85 m  | $5,5 \cdot 10^{10}$           | -                                 |
| Kr-88    | $1,1 \cdot 10^{11}$           | -                                 |
| Xe-133   | $4,0 \cdot 10^{11}$           | (z.T. über I-133)                 |
| Xe-135   | $1,5 \cdot 10^{11} **$        | -                                 |

Tab. 1: Freisetzungsraten Atome  $\cdot s^{-1}$  aus dem Gleichgewichtscore des HTR-100 unter Normalbetriebsbedingungen

\* aufgrund von R/B-Werten des AVR: Reduktion um den Faktor 3 im Vergleich zur Berechnung nach /1/

\*\* mit natürlicher Halbwertszeit berechnet, hoher Neutroneneinfangquerschnitt wurde konservativ nicht berücksichtigt

## 2.2 Stationäre Kühlgasaktivität

Die stationäre Kühlgasaktivität, die sich unter Berücksichtigung von Zerfall, Ablagerung (es wurden konservative Werte für die Ablagerung/Kühlgasumlauf verwendet, s. Methodenpapier) und - im Falle der Edelgase - von Primärkreisleckagen ( $0,01 \% d^{-1}$ ) ergeben, sind in Tabelle 2 enthalten.

Diese Tabelle enthält auch die stationäre staubgetragene Aktivität, die sich bei Annahme eines Ablagerungsfaktors von 5 %/Umlauf für den Staub ergibt.

|          | atomar und molekular [ GBq ] | staubgetragen         |
|----------|------------------------------|-----------------------|
| Cs-134   | $4,5 \cdot 10^{-5}$          | $1,2 \cdot 10^{-5}$   |
| Cs-137   | $4,5 \cdot 10^{-5} *$        | $1,2 \cdot 10^{-5} *$ |
| Sr-89    | $1,5 \cdot 10^{-4} *$        | $2,3 \cdot 10^{-5} *$ |
| Sr-90    | $1,4 \cdot 10^{-6} *$        | $3,6 \cdot 10^{-7} *$ |
| Ag-110 m | $6,7 \cdot 10^{-6}$          | $1,6 \cdot 10^{-7}$   |
| I-131    | $4,0 \cdot 10^{-3}$          | -                     |
| I-133    | $8,6 \cdot 10^{-3}$          | -                     |
| Edelgase | 1200 **                      | -                     |
| H-3      | 2                            | $2,5 \cdot 10^{-5}$   |

Tab. 2: Stationäre Kühlgasaktivität im HTR-100

\* einschließlich Vorläufernuklide; bei staubgebundener Aktivität nur Anteil der Schwermetallkontamination am Vorläufer-Beitrag berücksichtigt

\*\* in Tabelle 1 nicht enthaltene kurzlebige Edelgasnuklide wurden durch einen Sicherheitsfaktor von 1,5 berücksichtigt

In der Tabelle enthalten sind auch Anhaltswerte für die Tritiumaktivität, die über die in /1/ genannten Beziehungen abgeschätzt wurden; die wesentlichen Tritiumquellen liegen außerhalb des Brennstoffs.

Abgesehen von Edelgasen, Tritium und Jod bleiben die Kühlgasaktivitäten somit erwartungsgemäß extrem gering.

## 2.3 Abgelagerte Aktivität

### 2.3.1 Staubgebundene abgelagerte Aktivität

Die im Methodenpapier angegebenen Anteile der staubgebundenen Aktivität an der insgesamt molekular freigesetzten Aktivität führen zu den folgenden staubgebundenen Inventaren nach 30 Vollastjahren:

|          | [GBq] |
|----------|-------|
| Cs-137   | 27    |
| Cs-134   | 3,2   |
| Sr-89    | 0,4 * |
| Sr-90    | 0,8 * |
| Ag-110 m | 0,15  |
| H-3      | 22 ** |

Tab. 3: Staubgebundene Aktivität im HTR-100 nach 30 Jahren

\* bei Vorläufernukliden ist nur der durch die Schwermetallkontamination verursachte Anteil berücksichtigt

\*\*berechnet aus dem H-3-Gehalt des Matrixgraphits und einer Erosionsrate von  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$

Jodisotope im Staub wurden - in Einklang mit AVR-Erfahrungen - nicht angesetzt.

### 2.3.2 Plate-out-Aktivität

Für die metallischen Spaltprodukte wird angenommen, daß 20 % der aus den Brennelementen freigesetzten Menge an graphitischen Komponenten sorbiert wird, der überwiegende Teil aber im Dampferzeugerbereich abgelagert ist. Für Jod wird nur Ablagerung am Dampferzeuger angesetzt. Nennenswerte Tritium-sorption findet nur an graphitischen Komponenten statt; der überwiegende Teil des in die Gasphase gelangenden Tritiums wird über die Gasreinigungsanlage beseitigt. Die in der folgenden Tabelle 4 aufgeführten Aktivitäten sind nach 30 Jahren abgelagert:

|          | Dampferzeuger | [ GBq ] graphit. Komponenten |
|----------|---------------|------------------------------|
| Cs-137   | 1070          | 275                          |
| Cs-134   | 125           | 32                           |
| Sr-89    | 14,8          | 4,2                          |
| Sr-90    | 16,8          | 4,4                          |
| Ag-110 m | 5,5           | 1,5                          |
| I-131    | 55            | -                            |
| I-133    | 13            | -                            |
| H-3      | -             | 50                           |

Tab. 4: Plate-out-Aktivität im HTR-100 nach 30 Jahren

Bezüglich der an Graphit gebundenen Aktivitäten ist zu beachten, daß die aus Brennstoff- (bzw. im Falle des H-3 aus Li-) Kontamination entstehenden und dort sorbiert verbleibenden Aktivitäten nicht berücksichtigt sind. Mit Hilfe des ISF-Ablagerungscodes SPATRA wurde die Verteilung der abgelagerten Nuklide über die Dampferzeugeroberfläche sowie der in das Material diffundierende Anteil ermittelt. Dazu wurde das Penetrationsmodell, welches in SPATRA neben einem Diffusionsmodell programmiert ist, herangezogen. Die folgenden Abbildungen 1 und 2 zeigen für Cs-137 und I-131 die Beladung des Dampferzeugers (ad- und absorbierte Anteil) in Abhängigkeit von der Dampferzeugerlänge ( $t = 30$  a). Zur Erleichterung der Interpretation der Ablagerungsvorgänge ist auch das zugehörige Wandtemperaturprofil wiedergegeben. Die Ab-



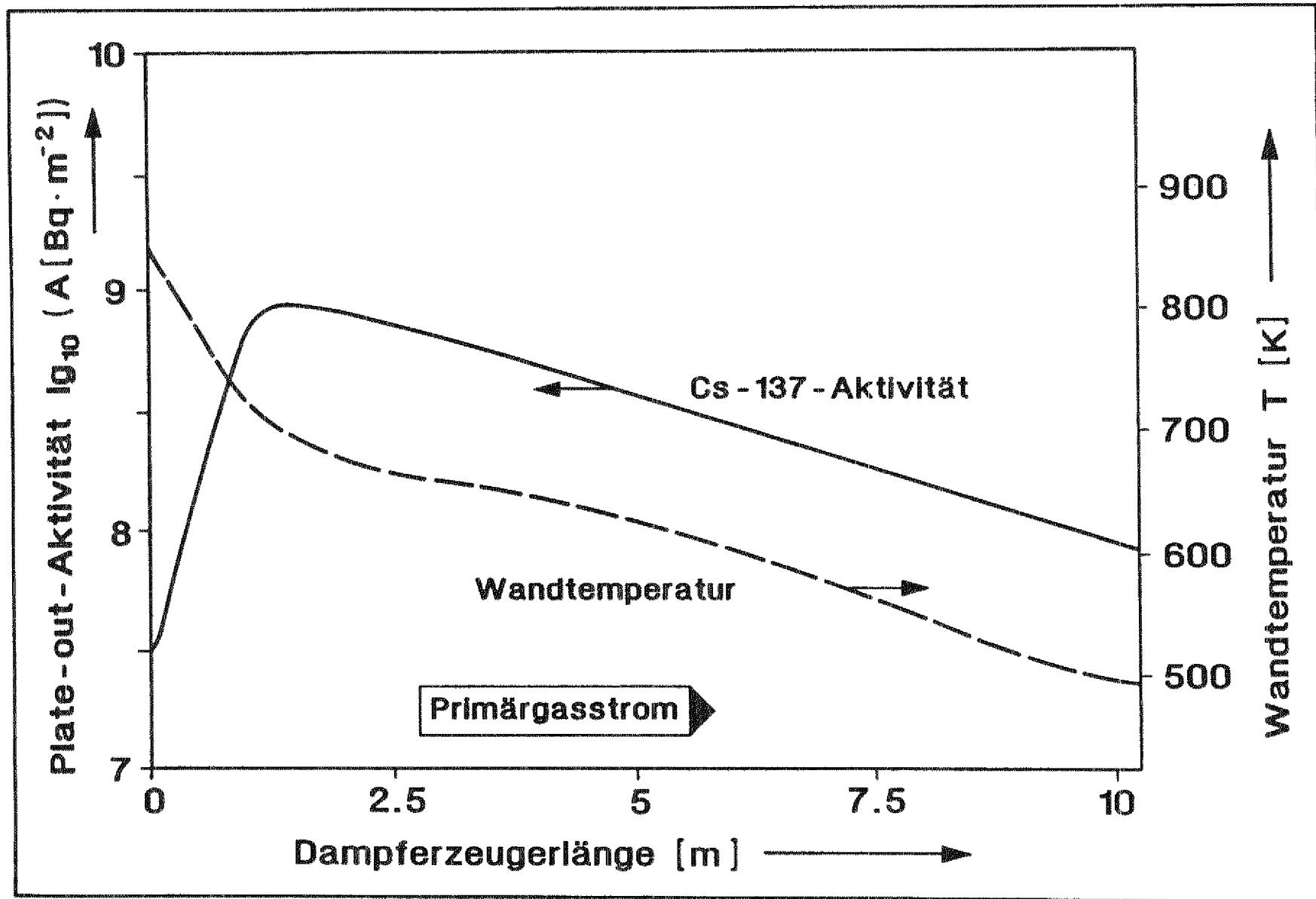


Abb. 1: Cs - 137 - Verteilung im Dampferzeuger des HTR - 100 nach 30 Jahren Normalbetrieb : Rechnung mit dem ISF - Code SPATRA

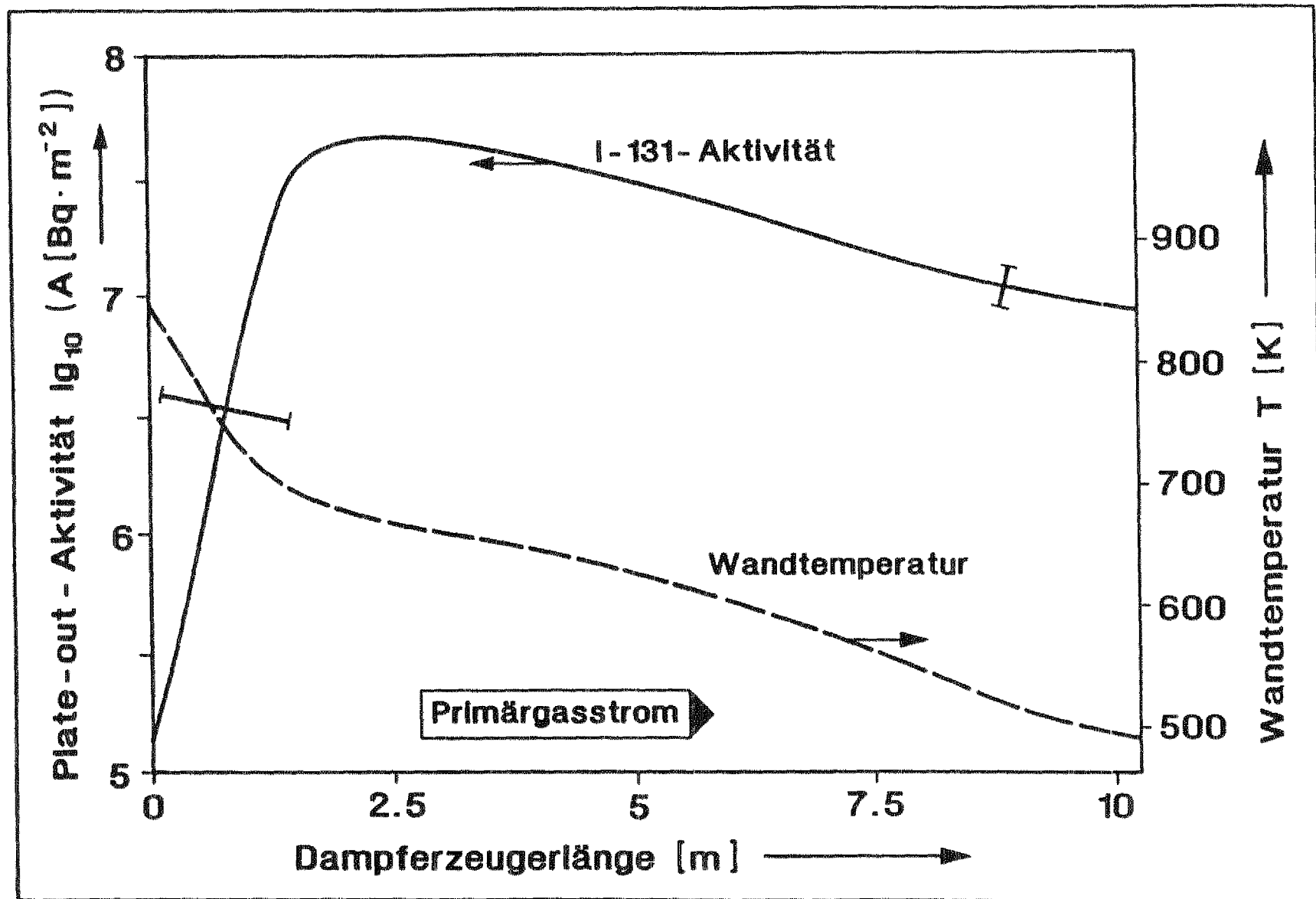


Abb. 2: I-131-Verteilung im Dampferzeuger des HTR-100 nach 30 Jahren Normalbetrieb : Rechnung mit dem ISF-Code SPATRA. Die Unsicherheitsbandbreiten geben allein den Effekt einer Variation der Desorptionskonstanten um den Faktor 10 wieder (s. Anhang B In /1/)

lagerungsvorgänge von Cs-137 sowie der anderen Spaltmetalle werden im wesentlichen durch den Stoffübergang kontrolliert (schwarze Wand); Desorptionsvorgänge bestimmen nur für Temperaturen  $> 700$  K das Ablagerungsverhalten mit. Beim Jod sind Desorptionsvorgänge von größerer Bedeutung. Der Einfluß einer Variation der Desorptionskonstanten um den Faktor 0,1 bzw. 10 auf das Ablagerungsprofil von Jod ist in Abb. 2 durch Balken angedeutet. Bei allen Nukliden spielt der volumendiffundierte Anteil an der Ablagerung eine untergeordnete Rolle. Nur in den heißesten Dampferzeugerbereichen mit  $T > 750$  K (d.h. Bereichen mit geringer Beladung) erreicht er bei den Spaltmetallen die gleiche Größenordnung wie die Oberflächenbelegung (maximal im Prozentbereich der Gesamtbeladung). Die Annahme zur Mikrorauigkeit der Oberflächen (Rauigkeitskoeffizienten zwischen 1 und 100, Standardwert 10) verändern die Ablagerungsprofile nur geringsfügig; eine Verringerung der Mikrorauigkeit läßt die absorbierte Spaltproduktmenge zwar auf Kosten der adsorbierten Menge ansteigen, jedoch bleibt der Penetrationseffekt nach wie vor von geringer Bedeutung. Soweit daher der heiße Bereich des Dampferzeugers nicht selektiv zu betrachten ist, ist eine Unterscheidung zwischen adsorptiver und absorptiver Belegung nicht erforderlich, zumal die ausschließliche Berücksichtigung der adsorptiven Belegung zu konservativen Ergebnissen führt.

Die SPATRA-Rechnungen deuten auch an, daß die zur Ermittlung der molekularen Kühlgasaktivität herangezogenen Werte für die Ablagerung/Umlauf als sehr konservativ (d.h. zu niedrig) einzustufen sind, die molekulare Kühlgasaktivität also überschätzt wird.

### 2.3.3 Ablagerung in der Gasreinigungsanlage

Da Druckentlastungsvorgänge mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit den Bereich der Gasreinigungsanlage direkt berühren, sind Abschätzungen zum Anteil der dort abgelagerten Aktivität erforderlich.

Mit der Abscheiderate der Gasreinigungsanlage von  $2,5 \cdot 10^{-4} [s^{-1}]$  und einer Staubablagerung im Primärkreis von 5 %/Umlauf ergibt sich, daß 7 % der staubgetragenen Aktivität in der Gasreinigungsanlage abgeschieden wird. Da die Gasreinigungsanlage für 2 Reaktoren arbeitet, ist das insgesamt in der Gasreinigungsanlage vorhandene staubgebundene Inventar zu verdoppeln. Weiterhin kann ein Teil der molekularen gasgetragenen Aktivität in der Gasreinigungsanlage - u.a. auf dem dort bereits abgeschiedenen Staub - abgelagert

werden. Unterstellt man die für die Berechnung der Kühlgasaktivität herangezogenen Werte für die Ablagerung/Umlauf, ergeben sich Anteile der molekular freigesetzten Aktivität, die in der Gasreinigungsanlage verbleiben, von 0,55 % für Cs und Ag, 1,1 % für Sr und 1,7 % für I; dabei wurde - außer für die in der Gasreinigungsanlage nicht rückhaltbaren Edelgase - vollständige Abscheidung der eintretenden Aktivität unterstellt. Bei Berücksichtigung der über SPATRA berechneten höheren Ablagerung im Dampferzeuger würden sich diese Anteile auf 0,2 % vermindern. In den folgenden Rechnungen werden in konservativer Weise die höheren Werte benutzt; weiter wird - wegen des guten Kontakts zwischen den in den Filtern haftenden kalten Stäuben und der molekularen Aktivität - unterstellt, daß 20 % der molekularen Aktivität der Spaltmetalle in der Gasreinigungsanlage an den Stäuben haftet und somit bei Druckentlastung durch lift-off remobilisierbar ist. Bei Berücksichtigung von 2 Reaktoren sind somit nach 30 a in der Gasreinigungsanlage an Aktivität vorhanden:

|          | staubgebunden [ GBq ] | plate-out |
|----------|-----------------------|-----------|
| Cs-134   | 0,80                  | 1,4       |
| Cs-137   | 6,8                   | 12,0      |
| Sr-89    | 0,14                  | 0,33      |
| Sr-90    | 0,20                  | 0,36      |
| I-131    | -                     | 1,9       |
| I-133    | -                     | 0,42      |
| Ag-110 m | 0,05                  | 0,08      |
| H-3      | 4,0                   | -         |

Tab. 5: abgelagerte Aktivität in der Gasreinigungsanlage nach 30 a

Bei Benutzung der SPATRA-Ergebnisse zum plate-out am Dampferzeuger würden sich die o.g. Werte der staubgebundenen Aktivität in der Gasreinigungsanlage um etwa den Faktor 2, die Werte der plate-out-Aktivität um den Faktor 3 bis 10 reduzieren.

Insgesamt betrachtet ist der Kenntnisstand zur Aktivitätsablagerung in der Gasreinigungsanlage relativ schlecht, so daß die genannten Werte große Unsicherheiten beinhalten.

### 3. FREISETZUNG BEI PRIMÄRKREISDRUCKENTLASTUNGEN

Bei reinen Druckentlastungen werden freigesetzt:

- Kühlgasaktivität
- von Oberflächen desorbierende Aktivität
- staubgebundene Aktivität durch lift-off (Scherkräfte)

Die im Kühlgas enthaltene Aktivität wird proportional dem emittierten Kühlgas freigesetzt. Im Freisetzungsfall D (s. Beitrag III) bedeutet das eine fast vollständige, im Fall DS eine Freisetzung von 16 % der gasgetragenen Aktivität. Durch Desorption unter isothermen Bedingungen ist mit einer Erhöhung der austretenden Kühlgasaktivität um maximal den Faktor 1,2 für DS und 4,3 für D zu rechnen.

Nennenswerte Scherkräfte treten - auch in unmittelbarer Umgebung des Lecks - bei Druckentlastungen, die sich über mehrere Stunden hinziehen, nicht auf, d.h. lift-off ist dabei auszuschließen. Das gilt auch für die unmittelbare Umgebung des Primärkreislecks. Bei der Druckentlastungssequenz D ist zudem ein Aerosolfilter wirksam. Lediglich für die (schnelle) Teildruckentlastung DS über die Gasreinigungsanlage ist daher signifikanter Staubaustrag zu unterstellen. Hier wird der gesamte in der Reinigungsanlage vorhandene Staub wegen der dort herrschenden hohen Strömungsgeschwindigkeiten als freigesetzt angenommen. Im Primärkreis insgesamt bleiben die Scherkräfte niedriger als unter Normalbetriebsbedingungen; um aber eine Staubaufwirbelung in unmittelbarer Leckumgebung sowie die bei AVR-Gebläsetransienten gefundenen Remobilisierungseffekte abzudecken, wird zusätzlich eine Emission von 1 % der im Primärkreis vorhandenen staubgetragenen Aktivität unterstellt. Die freigesetzten Aktivitäten, aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Beiträgen, sind in Tabelle 7 enthalten. Für Fall D ist die Freisetzung bis auf den zusätzlichen, absolut gesehen aber geringen Desorptionsbeitrag für die Jodisotope mit der stationären Kühlgasaktivität identisch und damit radiologisch unbedeutend. Die merkliche Freisetzung des radiologisch relevanten Cs-137 in Fall DS ist im wesentlichen auf Staubaustrag aus der Gasreinigungsanlage zurückzuführen; dieser Beitrag ist - wie vorher erwähnt - mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

| FREISETZUNGSFÄLLE |                                                                                     | HÄUFIGKEIT<br>pro<br>Anlagenjahr<br>[a <sup>-1</sup> ] | ZEIT<br>Stunden<br>[h] | IN DIE UMGEBUNG FREISETZTE MENGEN RADIOAKTIVER STOFFE [GBq] |                                                   |                                                       |        |        |        |        |         |                          |      |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------------------------|------|
| Nr.               |                                                                                     |                                                        |                        | Kr/Xe                                                       | I-131                                             | I-133                                                 | Cs-134 | Cs-137 | Sr-89  | Sr-90  | Ag-110m | H-3                      | C-14 |
| DS                | TEILDRUCK-<br>ENTLASTUNG<br>über großes<br>Leck in GRA,<br>Leckabspernung,<br>Kamin | 10 <sup>-6</sup>                                       | 0-0,02<br>(~1 min)     | 190                                                         | 8 · 10 <sup>-4</sup>                              | 1,8 · 10 <sup>-3</sup>                                | 0,9    | 7,1    | 0,14   | 0,21   | 0,05    | 6,0                      | ε    |
|                   |                                                                                     |                                                        |                        | 190 G                                                       | 7 · 10 <sup>-4</sup> G<br>1 · 10 <sup>-4</sup> Ds | 1,5 · 10 <sup>-3</sup> G<br>0,3 · 10 <sup>-3</sup> Ds | 0,9 S  | 7,1 S  | 0,14 S | 0,21 S | 0,05 S  | 1,5 G<br>0,3 Ds<br>4,2 S |      |
| D                 | DRUCKENT-<br>LASTUNG<br>über Leck im PK<br>Kamin                                    | 5 · 10 <sup>-4</sup>                                   | 0-100                  | 1200 /<br>500*1                                             | 0,02                                              | 3,7 · 10 <sup>-2</sup> /<br>< 10 <sup>-7</sup> *1     | ε      | ε      | ε      | ε      | ε       | 45                       | ε    |
|                   |                                                                                     |                                                        |                        | 1200 G                                                      | 0,004 G<br>0,013 Ds                               | 9 · 10 <sup>-3</sup> G<br>2,8 · 10 <sup>-2</sup> Ds   |        |        |        |        |         | 10 G<br>35 Ds            |      |

G = aus stationärer Kühlgasaktivität

Ds = Desorption

S = staubgetragen / lift-off

ε = vernachlässigbar kleine Mengen ( < 10<sup>-3</sup> GBq )

\*1 zerfallskorrigiertes Inventar in der Umgebung  
bei Druckentlastungsende

Tab. 7: Quellterme bei Druckentlastungsstörfällen des HTR - 100

#### 4. FREISETZUNG DURCH WASSEREINBRUCH

##### 4.1 Vorbemerkung

Folgende Effekte sind bei der Quelltermmittlung für Wassereinbruchstörfälle zu berücksichtigen:

- Remobilisierung abgelagerter Aktivität aufgrund von wash-off (flüssiges Wasser oder Wasserdampf) vom Dampferzeuger
- mechanische Spaltproduktablösung vom Dampferzeuger durch einen Wasserstrahl
- Freisetzung im Graphit enthaltener Spaltprodukte durch Graphitkorrosion
- Spaltgasfreisetzung aus dem Brennstoff durch Wasserdampfeinwirkung auf defekte Partikel ("Hydrolyse")
- Tritiumfreisetzung aus dem Graphit durch Austauschreaktionen
- Rückhaltung in kondensiertem Wasser, Tröpfenmitriß aus der kondensierten Phase
- spezifische Effekte der reinen Druckentlastung (s. auch Abschnitt 3)

Zuerst werden die verschiedenen Mechanismen der Freisetzung/Mobilisierung im Primärkreis beschrieben; danach wird die Freisetzung in die Umgebung (Quellterm) unter Berücksichtigung von unvollständiger Druckentlastung, Rückhaltung durch Kondensationsvorgänge etc. behandelt. Der Störfallablauf der nachfolgend bezüglich Quellterm untersuchten Wassereinbruchsequenzen W1-W5 ist detailliert in Beitrag III aufgeführt.

##### 4.2 Spaltproduktfreisetzung/Mobilisierung im Primärkreis

Die verwendeten Ansätze bezüglich der Kinetik der wash-off-Vorgänge sind im Methodenpapier beschrieben. Angaben zur Einwirkzeit von Wasserdampf und flüssigem Wasser, zur durch flüssiges Wasser benetzten Fläche, zum mittleren Wasserdampfpartialdruck sowie zu den mittleren Wandtemperaturen im Dampferzeuger für die hier betrachteten Wassereinbruchsequenzen finden sich in Beitrag III. Unter Berücksichtigung der letztgenannten Daten, sowie der Lage des Lecks im kalten Teil des Dampferzeugers mit der dort relativ niedrigen Beladung (s. Abb. 1,2) ergeben sich die folgenden wash-off-Anteile:

| Sequenz:          |       |                    |               |   |       |                    |
|-------------------|-------|--------------------|---------------|---|-------|--------------------|
| Spaltprodukte     | W1    |                    | W2, W3a/b, W5 |   | W4    |                    |
|                   | F     | D                  | F             | D | F     | D                  |
| Cäsium, Strontium | 6,8 % | 0,4 % <sup>1</sup> | 100 %         |   | 6,8 % | 0,1 % <sup>1</sup> |
| Silber            | -     | -                  | -             |   | -     | -                  |
| Jod               | 100 % |                    | 100 %         |   | 100 % |                    |
| -----             |       |                    |               |   |       |                    |

F = flüssiges Wasser

D = Dampf

Tab. 8: wash-off von plate-out-Aktivität bei Wassereinbrüchen

Die wash-off-Kinetik bei flüssigem Wasser spielt - wegen der relativ langen Einwirkzeiten sowie der verhältnismäßig hohen Temperaturen keine Rolle, die benetzten Flächen werden jeweils vollständig abgewaschen. Für W5 wird - wegen der dort auftretenden Dampferzeugeraufheizung auf 700°C - vollständige Ablösung aller Spaltprodukte durch Wasserdampf angenommen.

Mit der (über die Ansätze in /1/ in konservativer Weise hinausgehenden) Annahme, daß 50 % des aus der Li-Kontamination des Graphits entstehenden H-3 dort unmittelbar in einer der H-1/H-3 Austauschreaktion zugänglichen Weise sorbiert werden, errechnet sich eine freisetzbare Aktivität von 10000 GBq. Wegen der verhältnismäßig hohen Wasserdampfkonzentrationen sowie der langen Einwirkzeiten in den wesentlichen Wassereinbruchsequenzen ist von vollständiger Freisetzung dieses Tritiuminventars in das Primärgas auszugehen.

Durch mechanische Effekte (Wasserstrahl) wird das Inventar von 0,2 % (5 m<sup>2</sup>) der Dampferzeugeroberfläche als vollständig abgelöst angenommen. Die im kalten Teil des Dampferzeugers gegenüber dem Mittelwert um etwa den Faktor 3 (Cs, Sr) erniedrigte Beladung (s. Abb. 1) wurde berücksichtigt.

Die Freisetzung durch Graphitkorrosion erstreckt sich nur über ca. 0,5 h, da danach die Temperaturen auf 1073 K = 800°C abgesunken sind und die Umsetzung nur noch sehr langsam abläuft. Die anzusetzenden Graphitkorrosions-

<sup>1</sup> Die Freisetzungssanteile basieren auf den in /1/ diskutierten KFA-IRB-Messungen. Es sei aber darauf verwiesen, daß ORNL-Messungen für Cs auf stainless steel um 2-3 Größenordnungen höhere Abwaschraten in Wasserdampf ergaben als in KFA-IRB für Incoloy 800 und Inconel 617 ermittelt wurden.



raten sind in Beitrag III angegeben. Es wird von bevorzugter Korrosion des Bindermaterials der Brennelemente ausgegangen und angenommen, daß die Spaltproduktkonzentration im Binder um einen Faktor 5 höher als im Füllermaterial ist. Die korrosionsbedingten Beiträge zum nuklidspezifischen Quellterm bleiben - abgesehen vom radiologisch relativ unbedeutenden C-14 - vergleichsweise gering.

Da in den Wassereinbruchstörfällen W1 - W5 die Coretemperaturen über einen langen Zeitraum niedrig sind ( $1073 \text{ K} = 800^\circ\text{C}$ ), dringt der Wasserdampf tief in die Brennelemente ein und erhöht bei defekten Partikeln die Freisetzungsraten der Spaltgase. Mit den im Methodenpapier aufgeführten vermutlich konservativen Annahmen<sup>2</sup> ergeben sich für die auf "Hydrolyse" beruhende Spaltproduktfreisetzung für die Sequenzen W1 und W3b 830 GBq I-131 und 1700 GBq Xe-133. Die gesamte Edelgasfreisetzung liegt bei 4000 GBq. Für W2 sind diese Beiträge zum Quellterm mit 30 %, für Fall W3a mit 37 %, Fall W4 mit 3 % und Fall W5 mit 25 % der vorgenannten Werte zu veranschlagen. Die H-3-Freisetzung durch "Hydrolyse" bleibt in allen Fällen mit 0,1 GBq sehr gering. Hingewiesen sei darauf, daß der Kenntnisstand zur Spaltgasfreisetzung durch Wasserdampf aus defekten oxidischen Partikeln relativ schlecht ist.

#### 4.3 Freisetzungen in die Umgebung

Die für Druckentlastungen spezifischen Freisetzungsvorgänge (s. 3.) sind auch bei Wassereinbrüchen zu betrachten, spielen aber (abgesehen von der stationären Kühlgasaktivität der Edelgase) nur eine völlig untergeordnete Rolle.

Bei Wassereinbruchsequenz W1 tritt fast das gesamte im Primärkreis freigesetzte/mobilisierte Spaltproduktinventar in die Umgebung über; eine Rückhaltung von Spaltprodukt (-Verbindungen) im Verdunstungs-/Verdampfungsrückstand beim Sieden von Wasser auf Dampferzeugerflächen wurde konservativ nicht unterstellt. In den Fällen W4 bzw. W5 beschränkt sich die Primärgasabgabe (und damit auch die Emission der mobilisierten Aktivität) auf 6 % bzw. 38 % des Gasinventars. In Fall W2 traten 40 %, in den Fällen W 3a/b 99 % der in den Primärkreislauf freigesetzten Spaltedelgase in die Umgebung aus; für Cs und Sr wird für die Fälle W2 und W3a/b ein Verteilungskoeffizient (= Molenbruch des Spaltprodukts in der flüssigen Phase/Molenbruch des Spaltprodukts im Wasserdampf der Gasphase) zwischen im Primärkreislauf verbleibendem flüssigen

<sup>2</sup>Eine aktualisierte Beschreibung zum Kenntnisstand bezüglich "Hydrolyse" findet sich in /4/.

Wasser und Gasphase von 100, für Ag von 10 angenommen. Diese Verteilungskoeffizienten (die im Methodenpapier noch nicht enthalten sind) berücksichtigen nicht nur die normale Flüchtigkeit der Spaltprodukte, sondern beinhalten auch Effekte wie schwer abscheidbare Wasseraerosole bzw. Wasserdampflöslichkeit von Spaltprodukten /2/. Für Jod ist nur dann eine signifikante Rückhaltung im Kondensat zu erwarten, wenn dort chemische Reaktionen (Jodatbildung etc.) ablaufen; letztere werden hier konservativ vernachlässigt, d.h. es wurde keine Jodrückhaltung im Kondensat angesetzt.<sup>3</sup> Beim H-3 wird der o.g. Verteilungskoeffizient zu 1 (Austauschreaktion) angesetzt. Weiterhin wird ein Tröpfchenmiß von 0,4 % bzw. 1 % der flüssigen Phase während der Druckentlastung für die Fälle W2 bzw. W3a/b angenommen.

Die Quelltermbeiträge der verschiedenen Freisetzungsmechanismen sind Tabelle 9 zu entnehmen. Allgemein gilt, daß wash-off-Vorgänge bei den radiologisch dominanten Spaltmetallen Cs und Sr den Hauptbeitrag zum Quellterm liefern, während "Hydrolyseeffekte" bei den Spaltgasen im Vordergrund stehen. Bei H-3 ist die Austauschreaktion der wichtigste Freisetzungsmechanismus. In diesen Bereichen (insbesondere bei der "Hydrolyse") sind noch signifikante Kenntnislücken vorhanden, die zu einer konservativen Behandlungsweise zwingen.

## 5. FREISETZUNG BEI TRANSIENTENUNFÄLLEN

Transientenunfälle sind durch einen Ausfall der Dampferzeugerbespeisung gekennzeichnet. Die dabei erfolgende Aufheizung des Dampferzeugers auf ca. 973 K = 700°C führt zu beschleunigter Desorption der abgelagerten Spaltprodukte. Eine Berechnung des Gleichgewichts zwischen Beladung  $\sigma$  der Dampferzeugeroberfläche und der Spaltproduktkonzentration in der Gasphase  $c$  für den heißen Dampferzeuger ergibt folgende Werte:

| Nuklid  | $\frac{\sigma}{c}$ [m]                                           |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| Cs (Sr) | 4000                                                             |
| I       | 5 ( $s^* = 10^{13}$ ) bis 500 ( $s^* = 10^{11} \text{ s}^{-1}$ ) |

Tabelle 10 (\*um Faktor 10 im Vgl. zu /1/ erhöht wegen T-Extrapolation)

<sup>3</sup>Der für LWR erreichte Kenntnisstand deutet darauf hin, daß auch unter HTR-Bedingungen eine erhebliche I-Rückhaltung im Kondensat auftreten könnte. Ein belastbarer Nachweis dieses Effekts für HTR-Bedingungen konnte im Rahmen dieser Sicherheitsanalyse noch nicht geführt werden.

| Fall  |                                                                                                                                | Kr/Xe                     | I-131                       | I-133                        | Cs-134                      | Cs-137                     | Sr-89                      | Sr-90                       | Ag-110m              | H-3     | C-14  |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|---------|-------|
| W 1   | Integrale Primärgas-aktivitäten bei Druckentlastungsende aufgeschlüsselt nach dem Freisetzungsmechanismus * <sub>1</sub> (GBq) | 1200 G<br>4000 H<br>< 2 K | 55 WD/L<br>830 H<br>< 0,4 K | 13 WD/F<br>1750 H<br>< 0,2 K | 8,5 WF<br>0,5 WD<br>< 0,5 K | 73 WF<br>4,3 WD<br>< 1,0 K | 1,0 WF<br>0,06 WD<br>0,4 K | 1,1 WF<br>0,07 WD<br>0,03 K | 0,005 M<br>0,01 K    | 10000 A | 0,8 K |
|       | Freisetzungssanteil in die Umgebung                                                                                            | 0,99                      | 0,99                        | 0,99                         | 0,99                        | 0,99                       | 0,99                       | 0,99                        | 0,99                 | 0,99    | 0,99  |
|       | Quellterm (GBq)                                                                                                                | 5150/2800 * <sub>2</sub>  | 880                         | 1750/650 * <sub>2</sub>      | 9,5                         | 78                         | 1,5                        | 1,2                         | 0,015                | 9900    | 0,8   |
| W 2   | ??                                                                                                                             | 1200 G<br>1150 H<br>< 4 K | 55 WD/F<br>240 H<br>< 0,8 K | 13 WD/F<br>505 H<br>< 0,4 K  | 125 WD/F<br>1,0 K           | 1070 WD/F<br>2,0 K         | 14,8 WD/F<br>0,8 K         | 16,8 WD/F<br>0,06 K         | 0,005 M<br>0,02 K    | 10000 A | 1,2 K |
|       |                                                                                                                                | 0,40                      | 0,40                        | 0,40                         | 0,008                       | 0,008                      | 0,008                      | 0,008                       | 0,045                | 0,20    | 0,40  |
|       |                                                                                                                                | 950/840 * <sub>2</sub>    | 120                         | 210/195 * <sub>2</sub>       | 1,0                         | 8,8                        | 0,13                       | 0,14                        | 1 · 10 <sup>-3</sup> | 2000    | 0,5   |
| W 3 a | ??                                                                                                                             | 1200 G<br>1800 H<br>< 6 K | 55 WD/F<br>375 H<br>< 1,2 K | 13 WD/F<br>790 H<br>< 0,6 K  | 125 WD/F<br>1,5 K           | 1070 WD/F<br>3,0 K         | 14,8 WD/F<br>1,2 K         | 16,8 WD/F<br>0,09 K         | 0,005 M<br>0,03 K    | 10000 A | 1,8 K |
|       |                                                                                                                                | 0,99                      | 0,99                        | 0,99                         | 0,015                       | 0,015                      | 0,015                      | 0,015                       | 0,066                | 0,35    | 0,99  |
|       |                                                                                                                                | 2960/2400 * <sub>2</sub>  | 425                         | 795/650 * <sub>2</sub>       | 1,9                         | 16                         | 0,24                       | 0,25                        | 2 · 10 <sup>-3</sup> | 3500    | 1,8   |
| W 3 b | ??                                                                                                                             | 1200 G<br>4000 H<br>< 4 K | 55 WD/F<br>830 H<br>< 0,8 K | 13 WD/F<br>1750 H<br>< 0,4 K | 125 WD/F<br>1,0 K           | 1070 WD/F<br>2,0 K         | 14,8 WD/F<br>0,8 K         | 16,8 WD/F<br>0,06 K         | 0,005 M<br>0,02 K    | 10000 A | 1,2 K |
|       |                                                                                                                                | 0,99                      | 0,99                        | 0,99                         | 0,03                        | 0,03                       | 0,03                       | 0,03                        | 0,19                 | 0,65    | 0,99  |
|       |                                                                                                                                | 5150/2800 * <sub>2</sub>  | 880                         | 1750/650 * <sub>2</sub>      | 3,8                         | 33                         | 0,47                       | 0,51                        | 5 · 10 <sup>-3</sup> | 6500    | 1,2   |

G = gasgetragene Aktivität im Reaktornormalbetrieb  
 WD = 'wash-off' durch Wasserdampf  
 WF = 'wash-off' durch flüssiges Wasser  
 K = Freisetzung durch Graphitkorrosion  
 A = Freisetzung durch H/T - Austauschreaktion  
 M = mechanische erosionsbedingte Freisetzung  
 H = 'Hydrolyse' von defekten Partikeln

\*<sub>1</sub> einschließlich Inventar im Kondensat

\*<sub>2</sub> zerfallskorrigiertes Inventar in der Umgebung bei Druckentlastungsende

Tab. 9: Quellterme bei Wassereinbruchstörfällen des HTR - 100

(Fortsetzung folgende Seite)

| Fall |    | Kr / Xe                   | I-131                       | I-133                       | Cs-134              | Cs-137               | Sr-89                | Sr-90               | Ag-110m             | H-3     | C-14  |
|------|----|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------|-------|
| W 4  | ?? | 1200 G<br>325 H<br>< 1 K  | 55 WD/F<br>70 H<br>< 0,2 K  | 13 WD/F<br>140 H<br>< 0,1 K | 8,5 WF<br>< 0,3 K   | 73 WF<br>< 0,5 K     | 1,0 WF<br>< 0,2 K    | 1,1 WF<br>< 0,02 K  | 0,005 M<br>0,005 K  | 10000 A | 0,3 K |
|      |    | 0,06                      | 0,06                        | 0,06                        | 0,06                | 0,06                 | 0,06                 | 0,06                | 0,06                | 0,06    | 0,06  |
|      |    | 90                        | 7,5                         | 9,5                         | 0,5                 | 4,5                  | 0,06                 | 0,07                | $< 1 \cdot 10^{-3}$ | 600     | 0,02  |
| W 5  | ?? | 1200 G<br>1050 H<br>< 2 K | 55 WD/F<br>215 H<br>< 0,4 K | 13 WD/F<br>450 H<br>< 0,2 K | 125 WD/F<br>< 0,5 K | 1070 WD/F<br>< 1,0 K | 14,8 WD/F<br>< 0,4 K | 16,8 WD/F<br>0,03 K | 0,005 M<br>0,01 K   | 10000 A | 0,6 K |
|      |    | 0,38                      | 0,38                        | 0,38                        | 0,38                | 0,38                 | 0,38                 | 0,38                | 0,38                | 0,38    | 0,38  |
|      |    | 860/750 *2                | 105                         | 175/165 *2                  | 48                  | 410                  | 5,5                  | 6,5                 | $6 \cdot 10^{-3}$   | 3800    | 0,25  |

(Fortsetzung Tab. 9)

Das Verhältnis von freiem Gasvolumen zur Dampferzeugeroberfläche beträgt beim HTR-100 ca. 0,1 m; damit liegt die Gesamtmenge der adsorbierten Aktivität in Relation zur gasgetragenen molekularen Aktivität um ca. 1 Größenordnung höher als die  $\sigma/c$ -Werte der obigen Tabelle. Mit diesen Werten, sowie der in die Umgebung ausströmenden Gasmenge von 20 % des Primärgasinventars für den Fall T ergibt sich eine Freisetzung durch thermische Desorption von  $6 \cdot 10^{-3}$  GBq Cs-137 und 2,5 GBq I-131. Da die Druckentlastungsgeschwindigkeit für Fall T deutlich höher als im Fall D ist, wird zusätzlich zu dieser Aktivität sowie zur stationären Kühlgasaktivität ein Mitriß von 0,1 % des im Primärkreis (ohne GRA) abgelagerten Staubes unterstellt. Die insgesamt in die Umgebung abgegebenen, vergleichsweise geringen Aktivitäten sind für die Leitnuklide in der zusammenfassenden Tabelle 13 enthalten.

## 6. DOSISWERTE UND UNFALLFOLGEN

### 6.1 Vorbemerkung

In /1/ wird vorgeschlagen, im Störfallbereich (Häufigkeit ca.  $\leq 10^{-4} \text{ a}^{-1}$ ) über die konservativen Störfallberechnungsgrundlagen zum § 28.3 StrSchV berechnete maximale Individualdosen, im Unfallbereich (Häufigkeiten ca.  $\geq 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ ) über das realistischere Unfallfolgenmodell UFOMOD ermittelte Kollektivrisiken, und im Übergangsbereich beide Ansätze zur Bewertung der Konsequenzen zu verwenden. Auf die vorliegenden Störfall/Unfallabläufe bezogen bedeutet das, daß für die Transiente T und die Wassereinbruchsequenzen außer W4 das UFOMOD-Modell, für den Druckentlastungsfall D die Störfallberechnungsgrundlagen und für die Druckentlastung DS sowie den Wassereinbruch W4 beide Methoden angesetzt werden müssen. Unabhängig von dieser individuellen Bewertung der Störfälle/Unfälle ist zur Ermittlung des integralen Kollektivrisikos der Anlage für jeden zum Risiko beitragenden Freisetzungsfall eine UFOMOD-Rechnung auszuführen.

Von der skizzierten Verfahrensweise wurde insoweit abgewichen, als für alle Fälle auch maximale Individualdosen über die Störfallberechnungsgrundlagen ermittelt wurden; dieses geschah, da die geringen Quellterme bei Anwendung von UFOMOD Konsequenzen (= Kollektivrisiken) auf so niedrigem Niveau ergeben, daß deren Aussagekraft beeinträchtigt erscheint.

In allen Rechnungen zur Umgebungsbelastung wurde C-14 wegen seiner geringen

radiologischen Bedeutung nicht berücksichtigt. H-3 ist in den anzuwendenden Modellen bisher nicht enthalten. Seine Dosisfaktoren für Ingestion und Inhalation (ICRP-Werte) liegen aber um ca. 3 Größenordnungen unter den entsprechenden Werten für Cs-137, Sr-90 und I-131; trotz der bei den Wassereinbruchsequenzen hohen H-3-Freisetzung läßt deren Erfassung daher nur geringfügige Änderungen bei den Konsequenzen erwarten /3/.

## 6.2 Maximale Individualdosiswerte nach den Störfallberechnungsgrundlagen

Tabelle 11 enthält die über die BMI-Störfallberechnungsgrundlagen für eine Aufpunktentfernung von 250 m ermittelten Ganzkörperdosen hervorgerufen durch Cs-137 (Ingestion und Bodenstrahlung) sowie der Schilddrüsendosis für Kleinkinder (nur Ingestion) durch I-131 in Relation zu den entsprechenden Störfallplanungswerten. Die Beschränkung auf die genannten Nuklide erfolgte, weil diese Dosen in allen Fällen überwiegend durch Cs-137 bzw. I-131 bestimmt werden. Zur Einordnung dieser Zahlen sei nochmals darauf hingewiesen, daß die Häufigkeiten der Wassereinbruchfälle (außer W4) und der Transiente T so niedrig liegen (s. z.B. Tabelle 13), daß die (wie auch der Vergleich mit den unten dargestellten UFOMOD-Ergebnissen zeigt) sehr konservativen Methoden der Störfallberechnungsgrundlagen in Verbindung mit den Störfallplanungswerten (Ganzkörperdosis: 0,05 Sv, Schilddrüsendosis: 0,15 Sv) nur als relatives Vergleichskriterium, nicht aber zur absoluten Sicherheitsbeurteilung herangezogen werden dürfen. Für die vergleichsweise häufigen Druckentlastungsstörfälle bleiben die Störfalldosen weit unter den Störfallplanungswerten.

| Fall              | Freiset-<br>zungszeit-<br>raum (h) | Freiset-<br>zungshöhe<br>(m) | Relation der                                                        |                         |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                   |                                    |                              | Cs-137-Ganzkörperdosis<br>zum Störfallplanungswert (§ 28.3 StrSchV) | I-131-Schilddrüsendosis |
| W1* <sup>1</sup>  | 0-30                               | 24                           | 1.5                                                                 | 140                     |
| W2* <sup>1</sup>  | 1.5-2.5                            | 24                           | 0.2                                                                 | 20                      |
| W3a* <sup>1</sup> | 0-6                                | 24                           | 0.3                                                                 | 70                      |
| W3b* <sup>1</sup> | 0-30                               | 24                           | 0.6                                                                 | 140                     |
| W4                | 0-0.2                              | 100                          | 0.02                                                                | 0.025                   |
| W5* <sup>1</sup>  | 0-2                                | 100                          | 1.8                                                                 | 0.030                   |
| DS                | 0-0.02                             | 100                          | 0.03                                                                | $2 \cdot 10^{-6}$       |
| D                 | 0-100                              | 100                          | -                                                                   | $5 \cdot 10^{-5}$       |
| T* <sup>1</sup>   | 0-1                                | 100                          | $2 \cdot 10^{-4}$                                                   | $7 \cdot 10^{-3}$       |

\*<sup>1</sup> Häufigkeit  $< 10^{-6} \text{ a}^{-1}$ , daher weit außerhalb des Anwendungsbereichs der Störfallplanungswerte

Tabelle 11: Relation der maximalen Störfalldosen nach den BMI-Störfallberechnungsgrundlagen zu den Störfallplanungswerten (ermittelt für die jeweils ungünstigste Bevölkerungsgruppe, Reaktorgebäudebreite = 30 m, ungünstigster Aufpunkt außerhalb des Reaktorgeländes, 1 Ausbreitungsintervall mit ungünstigsten Bedingungen)

Die Berechnung der in Tabelle 11 aufgeführten Werte erfolgte unter der Annahme einer Freisetzung unter ungünstigsten Wetterbedingungen. Für die langandauernden Freisetzungen der Fälle W1, W3b und insbesondere D würde die in den Störfallberechnungsgrundlagen vorgesehene Berücksichtigung günstigerer Wetterbedingungen für Zeiträume  $> 8 \text{ h}$  nach Freisetzungsbeginn eine Absenkung der maximalen Dosen im Vergleich zu den Werten der Tabelle 11 ergeben.

### 6.3 Umgebungsbelastung und Unfalldosen aus Unfallfolgen (UFOMOD)-Rechnungen

Die Randbedingungen bei der UFOMOD-Anwendung entsprechen der Beschreibung in Jül-Spez-335 (1985). Die folgende Abbildung zeigt die mit UFOMOD berechneten über alle ausgewählten Wetterabläufe gemittelten entfernungsabhängigen Erwartungsdosen für Schilddrüse und Ganzkörper (30 a) unter Berücksichtigung der in diesem Code enthaltenen Gegenmaßnahmen für den Wassereinbruchfall W1. Die Schilddrüsendosis bleibt  $< 10^{-2} \text{ Sv}$ , die Ganzkörperdosis  $< 2 \cdot 10^{-4} \text{ Sv}$ . Die maximalen Erwartungsdosen nach UFOMOD liegen hier um ca. 2-3 Größenordnungen niedriger als die entsprechenden, über die Störfallberechnungsgrundlagen ermittelten maximalen Individualdosen; eine ähnliche Relation ergibt sich für die anderen untersuchten Störfall/Unfallabläufe. Aus den Erwartungsdosen

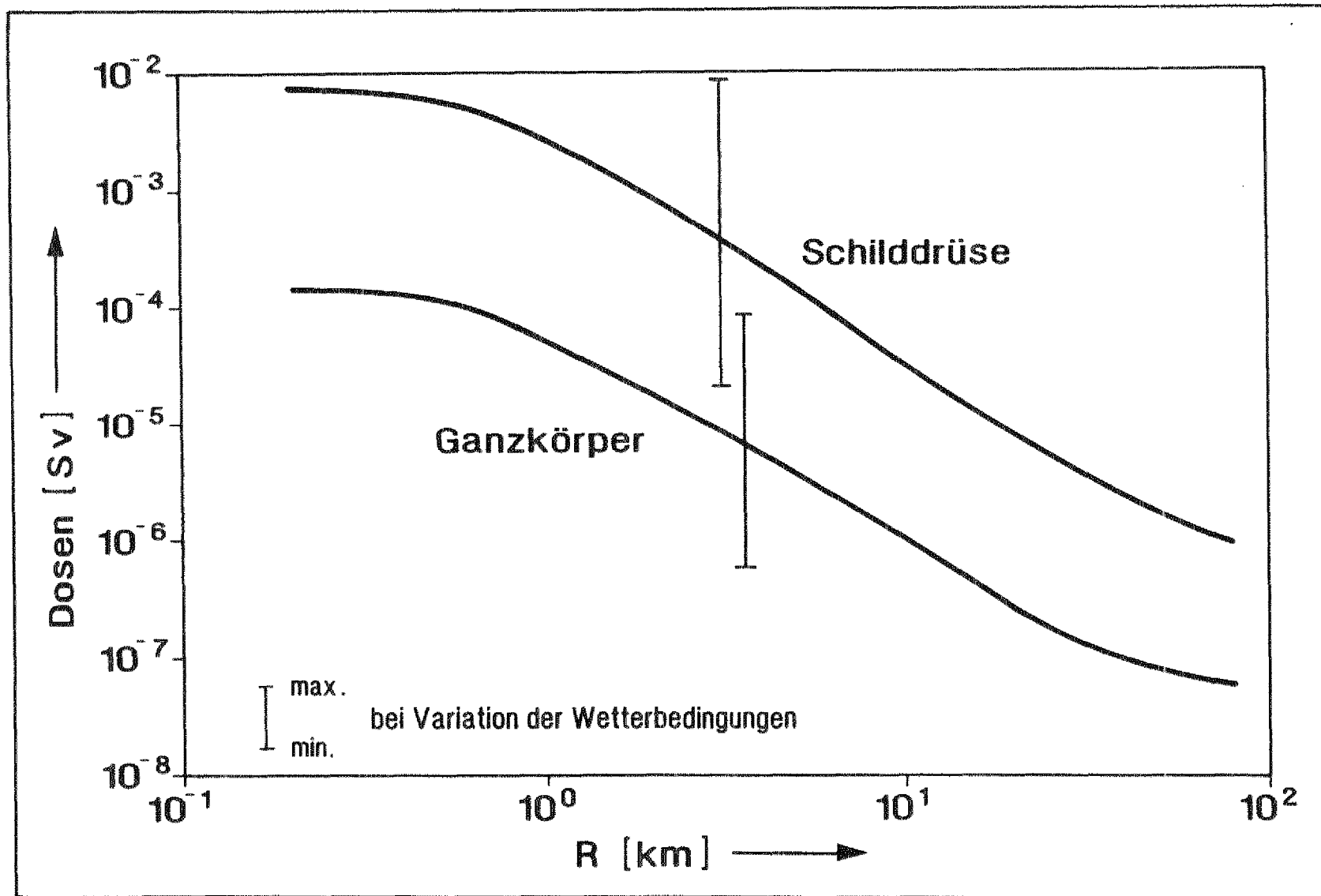


Abb. 3: Erwartungswerte für die (entfernungsabhängigen) Ganzkörper- und Schilddrüsendosen (30 a) beim Wassereintrichfall W1 des HTR-100



sen ermittelt UFOMOD die Unfallfolgen: Die Zahl der zu erwartenden Spätschäden in allen Generationen liegt, wie Tabelle 12 ausweist, bei Mittelung über alle ausgewählten Wetterabläufe in allen Fällen deutlich unter 1; auch für den ungünstigsten betrachteten Wetterablauf werden nur im Fall W5 mit 3,4 Spätschäden Werte  $>1$  ermittelt. Zu den Dosisverläufen bei Emissionshöhen von 100 m ist anzumerken, daß die überwiegende Zahl der Wetterabläufe für Entfernungen  $<500$  m sehr niedrige Dosen ergibt; die vergleichsweise hohen Mittelwerte liegen für diesen Entfernungsbereich von der Emissionsstelle über den 95 %-Fraktilwerten der Dosen. Frühschäden treten nicht auf. Die Kollektivrisiken für Spätschäden sind für alle wesentlichen Freisetzungsfälle der nachfolgenden Tabelle 12 zu entnehmen.

Im einzelnen aufgeschlüsselt zeigt sich, daß das Risiko zu etwa 67 % von Wassereinbrüchen und zu etwa 33 % von Druckentlastungen bestimmt wird. Dominant sind die Fälle W5 (40 %) und DS (33 %), der Rest verteilt sich auf die Wassereinbruchfälle W1 bis W4. Die Transiente T sowie die Druckentlastung D sind unter Risikogesichtspunkten bedeutungslos. Das integrale Kollektivrisiko für Spätschäden wird überwiegend durch Cs-137 (Ingestion, Bodenstrahlung) verursacht; Sensitivitätsstudien für W1 zeigen, daß I-131 (aktivitätsbezogen) um etwa 1 Größenordnung geringere Spätschadenszahlen in der lebenden Generation verursacht als Cs-137 und daß sein Einfluß in der Folgegeneration vernachlässigt werden kann. Kleine Dosen in großen Entfernungen von der Emissionsstelle tragen - wie auch in den früheren Sicherheitsstudien für HTR - stärker zu den Spätschäden bei als große Dosen in kleinen Entfernungen; damit sind die Aussagen zum Anlagenrisiko unmittelbar gekoppelt an die Problematik der Dosis/Wirkungsbeziehung bei kleinen Dosen.

Zur Abschätzung einer oberen Grenze des Risikos wurden zusätzlich UFOMOD-Rechnungen mit erhöhten Quelltermen ausgeführt und zwar:

- Wassereinbruchfall W1 mit vollständiger "Hydrolyse" der defekten coated particles" und damit vollständiger Jod- und Edelgasfreisetzung aus diesen Partikeln ( $6,5 \cdot 10^{-5}$  des Gesamtinventars) sowie Mobilisierung des gesamten auf dem Dampferzeuger abgelagerten Spaltproduktinventars
- Druckentlastungsfall DS mit Freisetzung des gesamten, in der Gasreinigungsanlage angesammelten Inventars (Staub + plate-out)

| Freisetzungsfall | Häufigkeit<br>[a <sup>-1</sup> ] | Spätschäden<br>( alle Generationen )<br>Maximum / Mittelwert | Kollektivrisiko für<br>Spätschäden<br>( alle Generationen )<br>[a <sup>-1</sup> ] |
|------------------|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| W 1              | $1,6 \cdot 10^{-7}$              | 0,47 / 0,058                                                 | $9,4 \cdot 10^{-9}$                                                               |
| W 2              | $5,4 \cdot 10^{-7}$              | 0,10 / 0,008                                                 | $4,0 \cdot 10^{-9}$                                                               |
| W 3 a            | $1,5 \cdot 10^{-7}$              | 0,18 / 0,02                                                  | $3,2 \cdot 10^{-9}$                                                               |
| W 3 b            | $1,5 \cdot 10^{-7}$              | 0,30 / 0,04                                                  | $6,2 \cdot 10^{-9}$                                                               |
| W 4              | $1,7 \cdot 10^{-6}$              | 0,05 / 0,003                                                 | $5,0 \cdot 10^{-9}$                                                               |
| W 5              | $2,0 \cdot 10^{-7}$              | 3,34 / 0,21                                                  | $4,2 \cdot 10^{-8}$                                                               |
| DS               | $1,0 \cdot 10^{-5}$              | 0,06 / 0,004                                                 | $3,5 \cdot 10^{-8}$                                                               |
| D                | $5,0 \cdot 10^{-4}$              | $1 \cdot 10^{-4}$ / $1,6 \cdot 10^{-6}$                      | $8,0 \cdot 10^{-10}$                                                              |
| T                | $1,5 \cdot 10^{-7}$              | $3,3 \cdot 10^{-3}$ / $2,3 \cdot 10^{-4}$                    | $3,5 \cdot 10^{-11}$                                                              |
|                  |                                  |                                                              | $\Sigma 1,1 \cdot 10^{-7}$                                                        |

Tab. 12: Spätschadenszahlen und Kollektivrisiken für Spätschäden  
beim HTR - 100 ( bezogen auf eine Doppelblockanlage )

Die Spätschadenszahlen für W1 erhöhen sich mit diesen Annahmen um etwa den Faktor 15, für DS um den Faktor 3.

Berechnet man sämtliche Wassereinbruchsequenzen mit den oben für W1 aufgeführten Randbedingungen und vernachlässigt zusätzlich eine Spaltproduktrückhaltung im Kondensat, ergibt sich ein Kollektivrisiko für Spätschäden durch Wassereinbrüche von  $8 \cdot 10^{-7}$ ; mit dem (wie oben beschrieben) erhöhten Wert für die Druckentlastung DS sowie unveränderten Annahmen für D und T errechnet sich ein theoretischer oberer Grenzwert für das integrale Kollektivrisiko für Spätschäden von  $10^{-6} \text{ a}^{-1}$ .

Der Erwartungswert für das integrale Kollektivrisiko für Spätschäden bleibt beim HTR-100 mit ca.  $10^{-7} \text{ a}^{-1}$  bemerkenswert niedrig. Vergleiche mit früheren Sicherheitsanalysen für HTR sind nur sehr eingeschränkt möglich, da in der vorliegenden Studie eine wesentlich verbesserte Modellierung des Quellterms vorgenommen werden konnte.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Quellterme und Auswirkungen wurden für die beim HTR-100 risikobestimmenden Störfälle/Unfallsequenzen "Druckentlastungen", "Wassereinbrüche" und "Transiente" ermittelt. Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 13 enthalten.

Als wichtigste Freisetzungsmechanismen für Spaltmetalle wurden Ablösung vom Dampferzeuger durch Wasserdampf sowie Austrag von staubgebundener Aktivität identifiziert; die höchsten Quellterme gasförmiger Spaltprodukte resultieren aus Wasserdampfeinwirkung auf defekte coated particles ("Hydrolyse"). Diese Freisetzungsmechanismen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, werden also weitgehend konservativ behandelt.

Den Hauptbeitrag zum insgesamt sehr geringen integralen Kollektivrisiko für Spätschäden von ca.  $10^{-7} \text{ a}^{-1}$  liefern Wassereinbrüche (67 %), gefolgt von Druckentlastungen (33 %).

| Fall                                                                                                                                         | Häufigkeit<br>[a <sup>-1</sup> ] | Freisetungszeitraum/<br>Freisetzungshöhe | Freisetzungsanteil des Reaktorinventars in die Umgebung |                      |                     |                      |                     | Kollektivrisiko<br>für Spätschäden<br>(alle Generationen,<br>ohne H-3) [a <sup>-1</sup> ] |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                              |                                  |                                          | Xe-133                                                  | I-131                | Cs-137              | Sr-90                | H-3                 |                                                                                           |
| W 1 DE - Heizrohrleck<br>Ausfall der DE - Druckentlastung<br>Versagen des FD - SIV in Offenstellung<br>NWA über DE                           | $1.6 \cdot 10^{-7}$              | 0-30 h / 24 m                            | $4.0 \cdot 10^{-6}$                                     | $3.5 \cdot 10^{-6}$  | $4.0 \cdot 10^{-6}$ | $7.0 \cdot 10^{-8}$  | 0.04                | $9.4 \cdot 10^{-9}$                                                                       |
| W 2 DE - Heizrohrleck<br>Offenbleiben des Entlastungsregelventils<br>Nichtschließen einer FD - Armatur<br>NWA über DE, zeitlich begrenzt     | $5.4 \cdot 10^{-7}$              | 1.5-2.5 h / 24 m                         | $8.0 \cdot 10^{-7}$                                     | $5.0 \cdot 10^{-7}$  | $5.0 \cdot 10^{-7}$ | $8.0 \cdot 10^{-9}$  | $9.0 \cdot 10^{-3}$ | $4.0 \cdot 10^{-9}$                                                                       |
| W 3 a DE - Heizrohrleck auf FD - Seite<br>Weiterbespeisung des defekten Stranges<br>Folgeversagen (Offenbleiben) des FD - SIV<br>NWA über DE | $1.5 \cdot 10^{-7}$              | 0.5-6.5 h / 24 m                         | $2.5 \cdot 10^{-6}$                                     | $2.0 \cdot 10^{-6}$  | $8.0 \cdot 10^{-7}$ | $1.5 \cdot 10^{-8}$  | $1.5 \cdot 10^{-2}$ | $3.2 \cdot 10^{-9}$                                                                       |
| W 3 b DE - Heizrohrleck auf SpW - Seite<br>sonst wie W 3 a                                                                                   | $1.5 \cdot 10^{-7}$              | 0.5-30 h / 24 m                          | $4.0 \cdot 10^{-6}$                                     | $3.5 \cdot 10^{-6}$  | $2.0 \cdot 10^{-6}$ | $3.0 \cdot 10^{-8}$  | 0.03                | $6.3 \cdot 10^{-9}$                                                                       |
| W 4 DE - Heizrohrleck<br>konzeptgemäße DE - Entlastung und -Isolierung<br>NWA über DE<br>EV zum Kamin öffnet vorzeitig                       | $1.7 \cdot 10^{-6}$              | 0-0.2 h / 100 m                          | $8.0 \cdot 10^{-8}$                                     | $3.0 \cdot 10^{-8}$  | $3.0 \cdot 10^{-7}$ | $4.5 \cdot 10^{-9}$  | $2.5 \cdot 10^{-3}$ | $5.0 \cdot 10^{-9}$                                                                       |
| W 5 DE - Heizrohrleck<br>konzeptgemäße DE - Entlastung und -Isolierung<br>Ausfall der DE - Bespeisung<br>EV zum Kamin öffnet vorzeitig       | $2.0 \cdot 10^{-7}$              | 0-2 h / 100 m                            | $8.0 \cdot 10^{-7}$                                     | $4.0 \cdot 10^{-7}$  | $2.5 \cdot 10^{-5}$ | $4.0 \cdot 10^{-7}$  | $1.5 \cdot 10^{-2}$ | $4.2 \cdot 10^{-8}$                                                                       |
| DS Leck am Primärkreislauf ( 33 cm <sup>2</sup> )<br>direkte Gebäudeentlastung über Kamin<br>Leckabspernung<br>NWA über DE                   | $1.0 \cdot 10^{-5}$              | 0-0.02 h / 100 m                         | $1.5 \cdot 10^{-7}$                                     | $3.0 \cdot 10^{-12}$ | $4.0 \cdot 10^{-7}$ | $1.5 \cdot 10^{-8}$  | $3.0 \cdot 10^{-5}$ | $3.5 \cdot 10^{-8}$                                                                       |
| D Leck am Primärkreislauf ( 1 cm <sup>2</sup> )<br>Gebäudeentlastung über Aerosolfilter<br>NWA über DE                                       | $5.0 \cdot 10^{-4}$              | 0-100 h / 100 m                          | $1.0 \cdot 10^{-8}$                                     | $8.0 \cdot 10^{-11}$ | —                   | —                    | $2.0 \cdot 10^{-4}$ | $8.0 \cdot 10^{-10}$                                                                      |
| T Transiente ( Ausfall der DE - Bespeisung )<br>EV zum Kamin öffnet vorzeitig<br>NWA über Betonkühlsystem                                    | $1.5 \cdot 10^{-7}$              | 0-1 h / 100 m                            | $2.5 \cdot 10^{-8}$                                     | $1.0 \cdot 10^{-8}$  | $1.8 \cdot 10^{-9}$ | $6.0 \cdot 10^{-11}$ | $6.0 \cdot 10^{-5}$ | $3.5 \cdot 10^{-11}$                                                                      |
| Inventar in Core und Primärkreislauf [GBq] ( 1Reaktor plus Gasreinigungsanlage )                                                             |                                  |                                          | $6.0 \cdot 10^{-8}$                                     | $2.6 \cdot 10^{-8}$  | $2.0 \cdot 10^{-7}$ | $1.7 \cdot 10^{-7}$  | $2.3 \cdot 10^{-5}$ | $\Sigma 1.1 \cdot 10^{-7}$                                                                |

Tab. 13: Umgebungsfreisetzung wesentlicher Nuklide bei Wassereinbruch (W)- und Druckentlastungssequenzen (D) sowie Transientenunfällen (T) des HTR-100 und resultierende Kollektivrisiken für Spätschäden (Doppelblock-anlage)

## 8. LITERATUR

- /1/ R. Moormann, K. Verfondern  
Methodik umfassender probabilistischer Sicherheitsanalysen für zukünftige HTR-Anlagenkonzepte - Ein Statusbericht (Stand 1986), Band 3: Spaltproduktfreisetzung  
Jü1-Spez-388, Mai 1987
  
- /2/ R. Moormann  
Verteilung von CsOH auf Gasphase ( $H_2O/He$ ) und flüssige Phase ( $H_2O$ ) bei einem schweren Wassereinbruch in den HTR-100  
KFA-ISF-AN 18/87-II vom 24.7.87
  
- /3/ R. Moormann  
Radiologische Auswirkungen der Tritiumfreisetzung bei Wassereinbruchstörfällen/Unfällen des HTR-100  
KFA-ISF-AN 36/88-II vom 12.9.88
  
- /4/ R. Moormann  
Jod- und Edelgasfreisetzung durch störfallbedingte Wasserdampfeinwirkung auf defekte cp: Überblick zum Stand der Kenntnis  
KFA-ISF-AN 7/89 II vom 29.3.89









**Jüli-2539**

**Oktober 1991**

ISSN 0366-0885