



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

Institut für Reaktorentwicklung

**Numerische Berechnung des Tritium-
Verhaltens von Kugelhaufenreaktoren
am Beispiel des AVR-Reaktors**

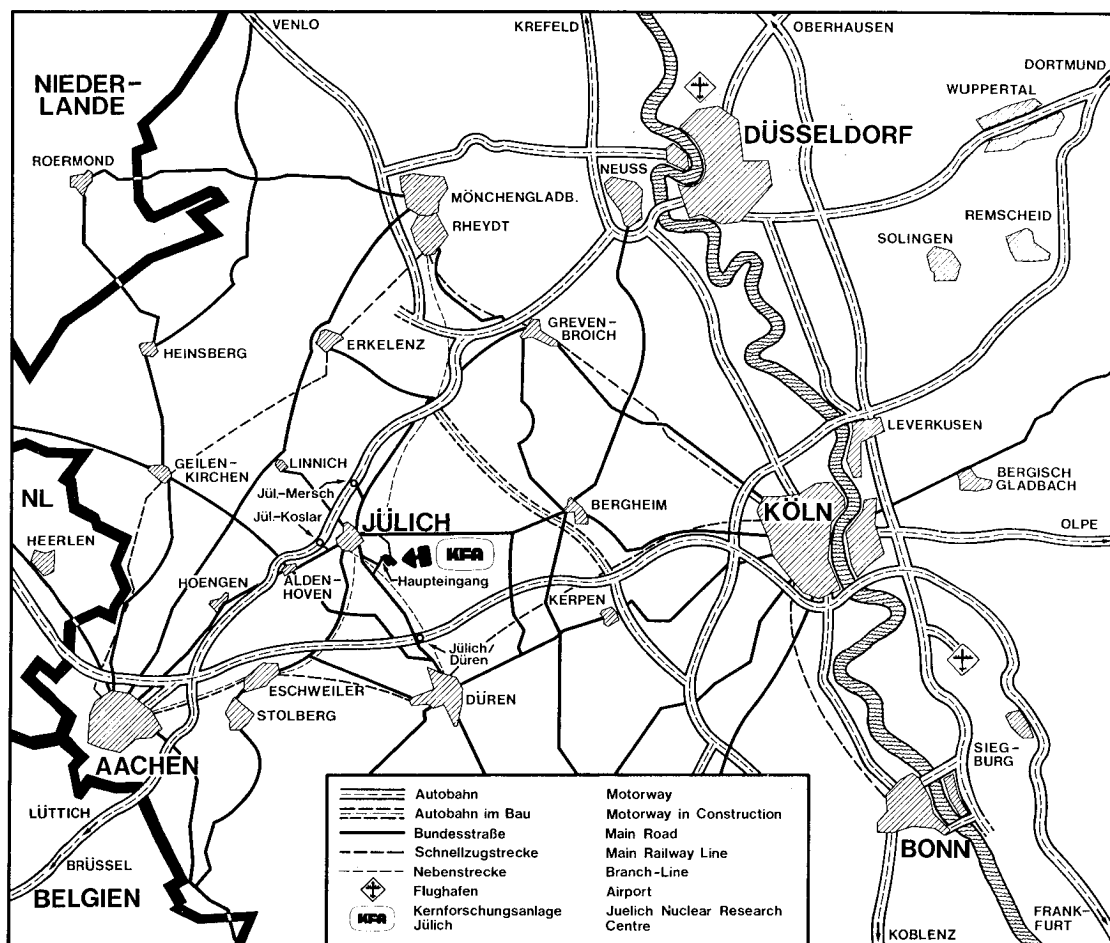
von

H. J. Cordewiner

Jül - 1607

Juli 1979

ISSN 0366-0885



Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1607

Institut für Reaktorentwicklung Jül - 1607

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland



Numerische Berechnung des Tritium- Verhaltens von Kugelhaufenreaktoren am Beispiel des AVR-Reaktors

von

H. J. Cordewiner

D 82 (Diss. T. H. Aachen)

Ref. 149911
Zugangs-Nr. _____

NUMERICAL CALCULATION OF THE TRITIUM-BEHAVIOUR OF PEBBLE-BED REACTORS DEMONSTRATED ON THE AVR-REACTOR

by

Hans Josef Cordewiner

ABSTRACT

For a predefined number of core regions the production and distribution of tritium, broken down according to the different tritium sources, is described using linear differential equations. The procedure is based on an ORNL programme written for high-temperature reactors with block-type fuel elements. The programme areas dealing with the bond of the tritium fraction passing from the gas phase into the graphite due to recoil were revised for the purposes of a pebble bed. More recent results concerning the adsorption of tritium in graphite have been incorporated in the computer algorithm. A special problem in connection with programme development arose from the complex time dependence of tritium sources in the different core regions due to the possible repeated circulation of spheres. This problem was solved by determining fictitious storage times for the various types of spheres on the basis of known neutron doses.

Calculations carried out on the AVR-reactor and compared with measured values showed a good agreement. Parameter studies with differing Li-contents of the spheres demonstrated a highly sensitive response of the system in this respect. Investigations relating to the inhibiting effect of hydrogen on tritium permeation revealed that the retention factors ascertained experimentally cannot be fully effective in practical reactor operation.

NUMERISCHE BERECHNUNG DES TRITIUM-VERHALTENS
VON KUGELHAUFENREAKTOREN
AM BEISPIEL DES AVR-REAKTORS

von

Hans Josef Cordewiner

KURZFASSUNG

Für eine vorzuziehende Anzahl von Core-Regionen erfolgt die Beschreibung der Produktion und Verteilung aufgeschlüsselt nach den verschiedenen Tritiumlieferanten durch lineare Differentialgleichungen. Ausgangsbasis hierbei ist ein ORNL-Programm, das für Hochtemperaturreaktoren mit blockförmigen Brennelementen geschrieben wurde. Die Programmbereiche, die sich mit der Bindung des aus der Gasphase durch Recoil in den Graphit gelangenden Tritiumanteils befassen, wurden für die Belange der Kugelschüttung neu bearbeitet; neuere Ergebnisse zur Adsorption von Tritium an Graphit sind in den Rechenalgorithmus übernommen worden. Eine besondere Problematik bei der Programmentwicklung stellte die wegen des möglichen Mehrfachkugelumlaufes komplexe Zeitabhängigkeit der Tritiumlieferanten in den verschiedenen Regionen dar. Dieses Problem wurde durch die Bestimmung fiktiver Einlagerungszeitpunkte für die verschiedenen Kugeltypen auf der Basis bekannter Neutronendosen gelöst.

Am AVR-Reaktor durchgeführte Rechnungen, die mit gemessenen Werten verglichen wurden, ergaben eine gute Übereinstimmung. Parameterstudien mit verschiedenen Li-Gehalten der Kugeln zeigten, daß das System hier sehr sensitiv reagiert. Untersuchungen zur inhibierenden Wirkung des Wasserstoffs auf die Tritium-Permeation ergaben, daß die in Versuchen ermittelten Rückhaltefaktoren für den praktischen Reaktor nicht voll zur Geltung kommen können.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1	1
2	3
3	5
3.1	7
3.1.1	7
3.1.2	7
3.2	10
3.2.1	10
3.2.2	12
3.2.3	14
3.2.4	14
3.3	16
3.3.1	16
3.3.2	17
4	23
4.1	23
4.2	25
4.3	25
4.3.1	25
4.3.2	26
4.3.3	27
5	31
5.1	31
5.1.1	36
5.2	39
5.2.1	39
5.2.2	41
6	49
6.1	50
6.2	56
6.3	61

		Seite
7	DISKUSSION DER RECHNUNGEN	71
8	ZUSAMMENSTELLUNG DER VERWENDETEN DATEN DES AVR	89
9	ZUSAMMENFASSUNG	92
10	LITERATUR	94
11	ANHANG	A 1

1 EINLEITUNG

Hochtemperaturreaktoren mit kugelförmigen Brennelementen ermöglichen sowohl die wirtschaftliche Nutzung der Kernenergie zur Stromerzeugung als auch ihre Verwendung für wärmetechnische Prozesse, die hohe Temperaturen erfordern. Berücksichtigt man, daß 75 % der eingesetzten Primärenergieträger Erdöl und Erdgas sind und daß neuere internationale Studien in den 90er Jahren mit dem Maximum der Erdölförderung rechnen /1/, so begründet dies die volkswirtschaftliche Bedeutung der Substitution von Erdöl und Erdgas durch Energieträger auf der Basis der heimischen Braun- und Steinkohle.

Die Realisierung hoher Kühlgastemperaturen führt zu hohen Wirkungsgraden und somit zu geringer Abwärmelast der Umwelt. Hieraus ergibt sich eine hohe Standortflexibilität und die Möglichkeit, eine Helium-Turbine hoher Leistung für die Stromerzeugung direkt im Primärkreislauf zu betreiben.

Mit dem Betrieb von Kernreaktoren ist jedoch auch die Produktion radioaktiver Abfallstoffe verbunden. Von besonderer Bedeutung sind hierbei langlebige Radionuklide, die nicht an der Produktionsstätte zerfallen und somit entweder kontrolliert an die Umwelt abgegeben oder gelagert werden müssen. Dabei handelt es sich bei der Lagerung des radioaktiven Abfalls nicht ausschließlich um ein technisches Problem, sondern auch um einen nicht zu unterschätzenden psychologischen und soziologischen Komplex, der, verbunden mit dem außergewöhnlichen Langzeiteffekt, die Fragen der Entsorgung so schwierig gestaltet.

Das Wasserstoffisotop Tritium nimmt unter den Radionukliden eine besondere Stellung ein. Zwar wird Tritium, das sich chemisch wie Wasserstoff verhält und meist in oxidischer Form als HTO auftritt, bei Inkorporation zum überwiegenden Anteil mit einer biologischen Halbwertszeit von nur etwa 12 Tagen /2/ wieder ausgeschieden, jedoch wird ein Rest im menschlichen Gewebe eingebaut. Die biologische Halbwertszeit dieser Tritiumkomponente beträgt etwa 300 Tage /3/. Eine weitere unangenehme Eigenschaft stellt die sehr große Beweglichkeit der Wasserstoffisotope in metallischen Werkstoffen bei hohen Temperaturen dar. Sie ermöglicht den Tritium-Übertritt in die wärmeauskoppelnden Kreisläufe. Für die nukleare Prozeßwärmanlage bedeutet dies letztlich eine zwar geringe, jedoch unerwünschte Kontamination des Produktgases. Bei

Anlagen zur Stromerzeugung gelangt das Tritium auf diesem Wege in das Schlammwasser.

Bisherige Rechnungen zum Tritium-Haushalt und Abschätzungen über die Belastung der Umwelt durch Tritium /2/, /4/ sind mit großen Unsicherheiten behaftet, da meist ein Gleichgewichtszustand zu einem bestimmten Zeitpunkt betrachtet wird, so daß keine Aussagen über die bis zu diesem Datum erfolgte Produktion, Speicherung und Freisetzung möglich sind. Neben der sich hieraus ergebenden Forderung, die Rechnungen über einen Zeitraum hinweg zu erstrecken, ergibt sich außerdem die Notwendigkeit, das System zur genauen Erfassung der ortsabhängigen Daten in verschiedene Bereiche aufzugliedern. Die Fülle der anfallenden Daten und die Struktur der durchzuführenden Rechnungen verlangen den Einsatz der Datenverarbeitungsanlage. Die folgende Aufstellung zeigt die wichtigsten Anwendungsbereiche derartiger Rechnungen:

Vorausrechnungen

- Berechnungen des Tritium-Inventars neu zu erstellender Anlagen
- Optimierung der Auslegung
- zu erwartende Tritium-Belastung beim Betrieb bestehender Anlagen
- Tritium-Freisetzung bei Störfällen

Rückrechnungen

- Nachrechnung von Experimenten und Interpretation der Ergebnisse
- Tritium-Freisetzung bei Störfällen

2 VERHALTEN VON TRITIUM IN HOCHTEMPERATURREAKTOREN

Tritium entsteht in Kernreaktoren aus der Spaltung und durch Neutronenreaktionen leichter Elemente (^6Li , ^7Li , ^{10}B , ^{12}C , ^9Be , ^3He), die entweder gewollt als abbrennbare Gifte oder ungewollt als Verunreinigungen im Core vorkommen. Eine Problematik zur Bestimmung belastbarer Werte für die Tritium-Quellraten besteht darin, daß der Anteil der Verunreinigungen im Graphit meist an bzw. bereits unterhalb der Grenze des überhaupt Nachweisbaren liegt. So ist beispielsweise die Li-Konzentration im Matrix-Graphit der AVR-Brennelemente kleiner als 1 ppm.

Die Verteilung des Tritiums im Core und die Permeation in die Sekundärkreisläufe des Reaktors wird im wesentlichen durch folgende parallel ablaufende Prozesse bestimmt:

- Freisetzung gebundenen Tritiums in den Gaskreislauf, aber auch Bindung von Tritium im Core-Graphit durch Recoil und Sorption
- Senkung des Tritiumpartialdruckes im Kühlgas durch Gasreinigungsanlage und Permeation in die Sekundärkreisläufe

Da das HTR-Core neben Stahleinbauten hauptsächlich aus Graphit besteht, ist zu erwarten, daß das Verhalten des Tritiums wesentlich durch die Wechselwirkung mit dem Graphit bestimmt wird. Wegen der hohen Aufnahmefähigkeit für alle Wasserstoffisotope wirkt der Core-Graphit wie ein Puffer /5/. Neuere Labormessungen mit Tritium und Graphit zeigten darüber hinaus, daß der durch Kernreaktionen im Graphit entstandene Tritium-Anteil an der Einstellung des Sorptionsgleichgewichtes nur über langsam ablaufende Diffusionsvorgänge teilnimmt. Die Wechselwirkung des Graphits mit Tritium wird außerdem durch die Anwesenheit von Wasserstoff im Primärkreislauf beeinflusst. Leckage-Wasser vom Dampferzeuger und Restfeuchtigkeit durch chemische Umsetzung am heißen Graphit sowie Permeation von Wasserstoff aus den Sekundärkreisläufen führen zu einem erheblichen Wasserstoffüberschuß gegenüber Tritium im Kühlgas. Dies unterstreicht die Bedeutung der Austauschreaktionen und zeigt außerdem, daß auch die Tritium-Permeation durch den gleichzeitigen Wasserstofftransport in Gegenrichtung beeinflusst wird. Das Problem der Bestimmung der in der Praxis zu erwartenden Tritium-Übertrittsraten liegt außerdem darin, daß die permeationshemmende Wirkung der auf den Wärmetauscher-

wänden aufwachsenden Oxidschichten nur mit einem großen Toleranzbereich angegeben werden kann. So wurden bei austenitischen Stählen Rückhaltefaktoren von 100 /6/ bis 1500 /7/ gemessen. Dies ist im wesentlichen darauf zurückzuführen, daß Wachstum und Verhalten der Deckschichten von sehr vielen Parametern abhängig sind. Werkstoff, Gaszusammensetzung, Druck und Temperatur bestimmen die Art der Oxidschicht, das Wachstum als Funktion der Zeit, die Schichtdicke und die Stabilität bei Wechselbelastung.

Manche Vorgänge, die Tritium-Problematik betreffend, sind noch unerforscht, andere Experimente noch nicht abgeschlossen. Der Grund dafür, daß trotzdem bereits zum jetzigen Zeitpunkt Rechenprogramme erstellt werden, die den gesamten Tritium-Haushalt beschreiben, liegt nicht zuletzt darin begründet, daß sie neben der Kontrolle experimenteller Werte auf Vollständigkeit und Anwendbarkeit für den realen Reaktorbetrieb die Möglichkeit bieten, Sensitivitätsstudien durchzuführen, die die Auswirkung der Variation bestimmter Daten und Fehlerbreiten auf das Ergebnis der Rechnungen zeigen und die Fortpflanzung des Fehlers beschreiben. Somit kann diese Rückkopplung als Entscheidungshilfe bei der Durchführung neuer Experimente und der Beurteilung der Effektivität von Maßnahmen zur Senkung der Tritium-Freisetzung dienen.

3 BESCHREIBUNG DES RECHENPROGRAMMS ZUR BESTIMMUNG DES TRITIUM-HAUSHALTES VON HOCHTEMPERATURREAKTOREN MIT MEHRFACHKUGELDURCHLAUF

Viele der für die Ermittlung der Tritium-Produktion und -Verteilung notwendigen physikalischen Daten des Reaktors sind ortsabhängig. Aus diesem Grunde erfolgt eine räumliche Aufgliederung des Reaktorsystems. Der Forderung nach möglichst genauer Erfassung dieser Daten durch eine große Anzahl von Regionen steht die Notwendigkeit gegenüber, den Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten, ohne die Güte der Rechnungen unzulässig herabzusetzen. Damit auch zeitabhängige Vorgänge in geeigneter Weise berücksichtigt werden können, ist es erforderlich, die Quelle-Senke-Bilanz jeweils über einen vorzugebenden Zeitraum hinweg zu erstellen. Gleichgewichtsbetrachtungen, die für einen bestimmten Zeitpunkt formuliert sind, lassen keine Aussage über die bis zu diesem Datum bereits erfolgte Produktion und Verteilung des Tritiums zu. So ist es beispielsweise nicht möglich, Angaben über die Tritium-Konzentration im Graphit zu machen.

Basierend auf diesen grundsätzlichen Überlegungen wurde 1974 von ORNL ein auf den Blockreaktor zugeschnittenes Programm entwickelt, in dem die Entstehung des Tritiums und der Weg von den Quellen zu den verschiedenen Senken durch lineare Differentialgleichungen beschrieben wird /8/. Diejenigen Programmteile, die sich mit Rechnungen an ortsfesten Core-Einbauten befassen, wurden neben verschiedenen Verarbeitungs-Algorithmen und Routinen in einer meist modifizierten Form übernommen. Der Programmbereich hingegen, der die spezifischen Eigenschaften des Kugelhaufenreaktors behandelt, wurde neu erstellt.

Für die mathematische Beschreibung der Vorgänge von der Produktion bis hin zur Freisetzung müssen diese zunächst in einem Modell abgebildet werden. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die dem Rechenmodell zugrunde liegenden Mechanismen und zeigt die Massenströme über eine um das Kühlgas gedachte Systemgrenze hinweg. Die aufgeführten Quellen, Senken und Transportmechanismen werden im folgenden beschrieben.

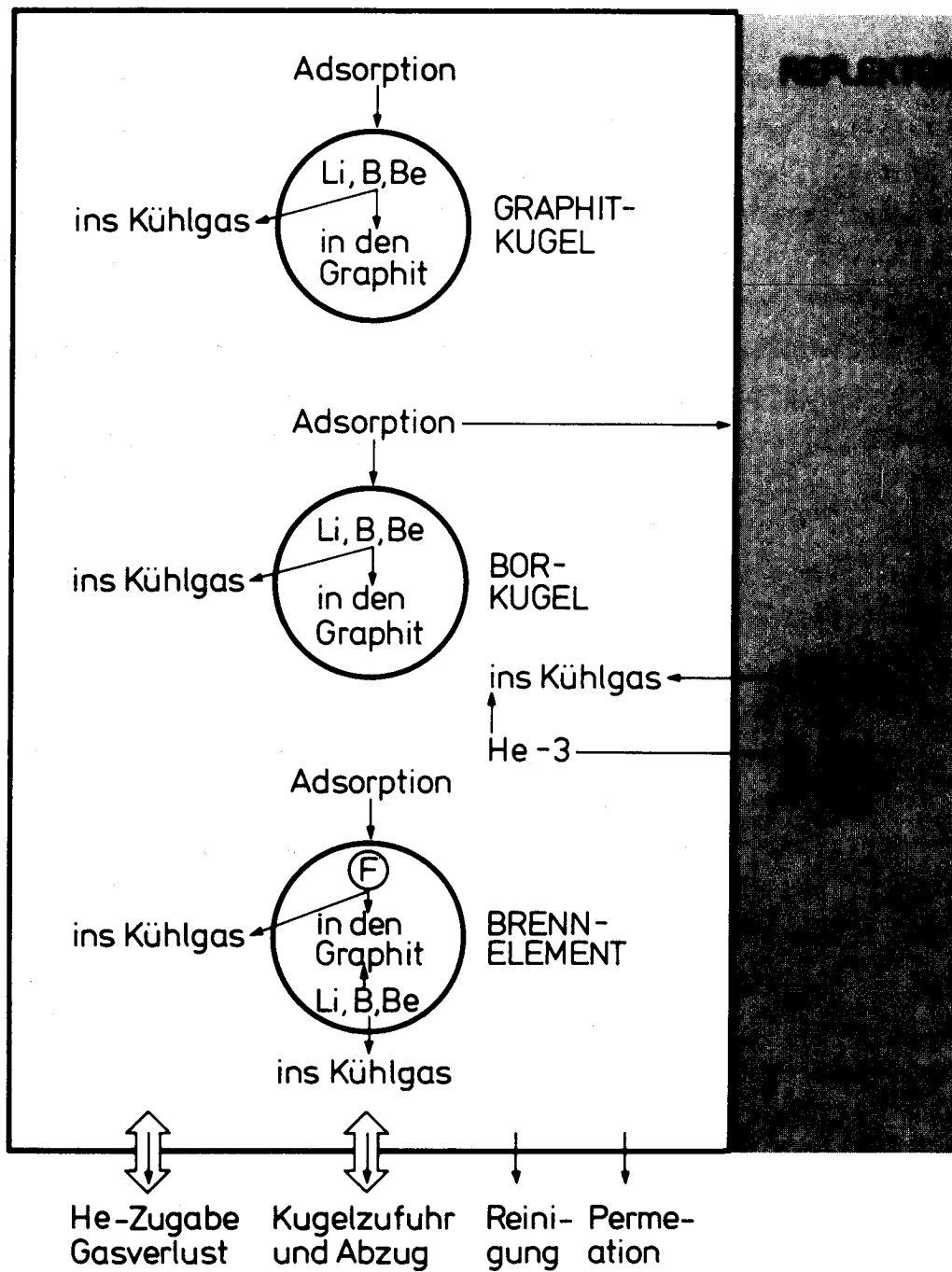


Abb.1: Mechanismen, die dem Rechenmodell zugrunde liegen

3.1 Quellen

3.1.1 Spaltung

Die Tritium-Produktion bei ternärer Spaltung ist abhängig von der Brennstoffzusammensetzung, dem Neutronenspektrum und der Spaltausbeute. Diese liegt im Bereich von $0.82 \cdot 10^{-4}$ für U-235 + n (3 MeV) bis $2.6 \cdot 10^{-4}$ bei U-238 + n(0 MeV) /9/. Unter Zugrundelegung eines bestimmten Energiespektrums und einer bekannten Brennstoffzusammensetzung kann somit die Produktionsrate aus der Spaltung als Funktion der Reaktorleistung beschrieben werden.

$$\frac{d(N_T)_r}{dt} = k P_r y - \lambda (N_T)_r$$

k	Spaltungsrate pro Energieeinheit
$(N_T)_r$	Anzahl Tritium-Atome, die in der Region r produziert werden
P_r	Energieproduktion der Region
t	Dauer der Periode
λ	Tritium-Zerfallskonstante
y	Anzahl der Tritium-Atome, die bei einer Spaltung entstehen

Mit Region bezeichnet man in diesem Zusammenhang einen Rechenraum, der sich durch Aufgliederung des Reaktorsystems in verschiedene Bereiche ergibt. Die Kriterien, nach denen eine sinnvolle Aufgliederung vorzunehmen ist, werden später am Beispiel des AVR gezeigt.

3.1.2 Neutronenreaktionen

Wegen des erheblichen Graphiteinsatzes im Core als Reflektor, Moderator und Brennelementmatrix - im AVR ca. 200 t - kommt den Tritium-liefernden Elementen ^6Li , ^7Li , ^{10}B , ^{12}C und ^9Be eine erhebliche Bedeutung zu. Aber auch die gewollte Vergiftung des Reaktors mit Bor, das in der Anfahrphase die fehlende Vergiftung durch Spaltprodukte ersetzt, liefert einen Beitrag zur Tritium-Produktion. Entsprechend den jeweiligen Reaktionsketten ergeben sich die folgenden Gleichungen für die Tritiumproduktion:

Reaktion $^{12}\text{C}(n,\alpha)^9\text{Be}(n,\alpha)^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$

$$\frac{dN_{12}}{dt} = -\pi \phi_f \sigma_{12} N_{12}$$

$$\frac{dN_9}{dt} = \pi \phi_f \sigma_{12} N_{12} - \pi \phi_f \sigma_9 N_9$$

$$\frac{dN_6}{dt} = \pi \phi_f \sigma_9 N_9 - \pi \phi_s \sigma_6 N_6$$

$$\frac{dN_T}{dt} = \pi \phi_s \sigma_6 N_6 - \lambda N_T$$

Reaktion $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}(n,n\alpha)\text{T}$ und $^{10}\text{B}(n,2\alpha)\text{T}$

$$\frac{dN_{10}}{dt} = -\pi (\phi_s \sigma_{10,s} + \phi_f \sigma_{10,f}) N_{10}$$

$$\frac{dN_7}{dt} = \pi \phi_s \sigma_{10,s} N_{10} - \pi \phi_f \sigma_7 N_7$$

$$\frac{dN_T}{dt} = \pi (\phi_f \sigma_{10,f} N_{10} + \phi_f \sigma_7 N_7) - \lambda N_T$$

- N Anzahl der Atome in einer bestimmten Region
- λ Tritium-Zerfallskonstante
- π Anteil der vollen Reaktorleistung
- σ Wirkungsquerschnitt der Nuklide für schnelle bzw. langsame Neutronen
- ϕ Regional schneller bzw. langsamer Neutronenfluß bei voller Reaktorleistung

Die bei der Berechnung verwendeten effektiven Wirkungsquerschnitte für Zweigruppen-Neutronenflüsse basieren auf ENDF/B-Daten unter Zugrundelegung der jeweiligen energieabhängigen Wirkungsquerschnitte in Verbindung mit dem Neutronenenergiespektrum eines homogenen Hochtemperaturreaktors. Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über die so erhaltenen Wirkungsquerschnitte für die verschiedenen Reaktionen /8/. Es zeigt sich, daß diese, nicht zuletzt infolge der gewählten mittleren Temperatur von 900 K, besonders im thermischen Bereich von den herkömmlich tabellierten Werten abweichen.

Reaktion	Energiegruppe (Schwelle 2,38 eV)	Effektiver Wirkungsquerschnitt (barn)
${}^6\text{Li}(n,\alpha) \text{ T}$	langsam	408
${}^7\text{Li}(n,n\alpha) \text{ T}$	schnell	0.0072
${}^{10}\text{B}(n,2\alpha) \text{ T}$	schnell	0.014
${}^{10}\text{B}(n,\alpha) {}^7\text{Li}$	langsam	1630
${}^{12}\text{C}(n,\alpha) {}^9\text{Be}$	schnell	0.00015
${}^9\text{Be}(n,\alpha) {}^6\text{Li}$	schnell	0.17
${}^3\text{He}(n,p) \text{ T}$	langsam	2280

Neben der Beschreibung der Tritium-Produktion durch Neutronenaktivierung unter Einbeziehung einer sich durch Abbrand stetig ändernden Quelle liefern die Reaktionsgleichungen auch quantitative Aussagen über den Abbrandzustand der Tritium-Lieferanten zu bestimmten Zeitpunkten. Für ortsfeste Core-Einbauten wird beispielsweise die ${}^6\text{Li}$ -Atomzahl zum Ende der Rechenperiode aus der Atomzahl zu Beginn dieses Zeitabschnittes ermittelt. Hierzu ist es erforderlich, den Zuwachs durch Neutronenreaktionen der Elemente ${}^9\text{Be}$ und ${}^{12}\text{C}$ und die Minderung der ${}^6\text{Li}$ -Atomzahl in dem betrachteten Zeitraum durch Abbrand in geeigneter Weise gegenüberzustellen. Weil das ${}^{12}\text{C}$ -Atom praktisch unerschöpflich ist, wird hier auf eine Abbrandrechnung verzichtet.

Da das Helium-Kühlgas durch alle Regionen des Reaktors zirkuliert, besteht eine rege Austauschbewegung über die Systemgrenzen der verschiedenen Core-Regionen hinweg. Dem Schema der linearen Überlagerung gehorchend muß jedoch die Produktionsrate für jede Region separat bestimmt werden. Geht man aufgrund der hohen Umwälzgeschwindigkeit des Kühlgases von einer homogenen Mischung von ${}^4\text{He}$ und ${}^3\text{He}$ für alle Reaktorbereiche aus, so kann die folgende Gleichung formuliert werden:

$$\frac{dN_T}{dt} = V_r C_r X_3 \sigma_s \pi \phi_{sr} - \lambda N_T$$

Hieraus folgt für den ${}^3\text{He}$ -Abbrand:

$$\frac{dN_3}{dt} = MN_4 X_3^0 - MN_4 X_3 - \sum_{r=1}^R (V_r C_r X_3 \sigma_s \pi \phi_{sr})$$

M	Zugeführte Frisch-Helium-Rate zur Deckung der Leckverluste
N_4	Anzahl der ^4He -Atome im gesamten Primärkühlsystem
N_3	Anzahl der ^3He -Atome im Primärkühlsystem
X_3	N_3/N_4 -Verhältnis im Primärkühlsystem
X_3^0	N_3/N_4 -Verhältnis im zugeführten Frisch-Helium
π	Anteil der vollen Reaktorleistung
σ_s	Wirkungsquerschnitt des ^3He
V_r	Regionales Volumen des Raumes
C_r	Anzahl ^4He -Atome pro Einheitsvolumen in der betreffenden Region
ϕ_{sr}	Der Region zugewiesene Neutronenfluß bei voller Reaktorleistung
λ	Tritium-Zerfallskonstante

Unter dem regionalen Volumen V_r versteht man in diesem Zusammenhang das vom Kühlgas ausgefüllte Volumen der Region. Es umfaßt also neben den durch Kugelschüttung zwangsläufig entstehenden Hohlräumen auch die Gaszuführungsschlitze, den Raum zwischen Schüttungsoberfläche und Top-Reflektor, eventuell vorhandene Kanäle und Schächte sowie das Porenvolumen des Graphits. Die Umrechnung dieses Helium-Volumens auf entsprechende Atomzahlen erfolgt mittels C_r als Funktion von Druck und Temperatur. Die Gleichungen zur Bestimmung des ^3He -Anteils im Kühlgas berücksichtigen nicht den Beitrag, den Tritium-Zerfall liefert. Denn geht man von einem normalen Durchsatz der Gasreinigungsanlage aus, so wird der größte Teil des Tritiums unmittelbar nach Entstehung abgeschieden. Dies führt in Verbindung mit den übrigen Senken zu einem niedrigen Tritium-Partialdruck im Kühlgas und entsprechend niedrigen Zerfallsraten. Dagegen würden die Gleichungen bei einer Berücksichtigung der Rückkopplung komplizierter, ohne die Qualität des Rechenmodells wesentlich zu verbessern.

3.2 Senken

3.2.1 Bindung in festen Stoffen

Ausheizversuche an bestrahlten, beschichteten Brennstoffpartikeln führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Zwar ergaben Messungen im IRE der KFA, die an Teilchen vom Typ W0 468 f durchgeführt wurden, bereits während fünfständiger Ausheizzeit bei 900 °C einen Freisetzungsanteil von 10 bis 15 % /10/. Jedoch stellte sich heraus, daß diese Werte wahrscheinlich auf einen durch schlechtes Vakuum bedingten korrosiven Abtrag der Pyrokohlenstoff-

schicht zurückzuführen waren /11/. Spätere Messungen von Tritium-Profilen an bestrahlten und zusätzlich geglühten Brennstoffteilchen zeigten, daß die Tritium-Verteilung praktisch unverändert blieb und bestätigten somit diese Vermutung /12/. Der letztere Befund steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Walter und Lange /13/. Sie fanden, daß praktisch das gesamte Tritium zurückgehalten wird. Geht man davon aus, daß herstellungsbedingt oder später durch den Einsatz im Reaktor 1 % der Partikel defekt sind /14/, während die übrigen das Spaltgas vollkommen zurückhalten, so ergibt sich insgesamt eine Freisetzungsrates von 1 %. Mit diesem Wert werden die Rechnungen unabhängig von der Verweilzeit im Reaktor und der jeweiligen Core-Region durchgeführt.

Das durch Neutronenaktivierung im Graphit gebildete Tritium diffundiert zu einem gewissen Teil ins Kühlgas. Messungen an bestrahlten und beladenen Proben /5,/, /7/ haben gezeigt, daß die Aktivierungsenergie für die Freisetzung bei den beladenen Proben erheblich unter der für bestrahlte liegt und von den bisher bekannten Werten abweicht. Möglicherweise sind aufgrund der verschiedenartigen Einbringungen unterschiedliche Platzbesetzungen und Diffusionsmechanismen die Ursache. Rechnungen zum Diffusionsverhalten werden außerdem dadurch erschwert, daß einige der zur Lösung der Gleichungen notwendigen Randbedingungen nicht exakt definiert werden können. So geht z.B. die Tritium-Konzentration des Kühlgases über das Sorptionsgleichgewicht mit der Oberfläche in Form einer erschwerten Abdampfung in diese Rechnungen ein. Die Kühlgaskonzentration ist aber nicht zuletzt wiederum eine Funktion des durch Diffusion aus dem Graphit freigesetzten Tritium-Anteils. Die Verarbeitung dieser Rückkopplung kann nur iterativ erfolgen. Sie wird deshalb - zumal die aufgeführten Mechanismen noch nicht hinreichend geklärt und quantifizierbar sind - in der hier vorgestellten Programmversion durch die Eingabe entsprechender Zurückbehaltungsanteile für das durch Neutronenreaktionen im Graphit gebildete Tritium überbrückt. Diese Werte können regional aufgliedert werden, müssen jedoch zeitlich konstant sein.

Die bei der $^3\text{He}(n,p)\text{T}$ -Reaktion freiwerdende Energie von 0.764 MeV verteilt sich gemäß Impuls- und Energiesatz auf die Reaktionsprodukte. Der auf das Triton entfallende Anteil beträgt 0.191 MeV; dies entspricht 25 % der Gesamtenergie. Hieraus errechnet sich eine Reichweite von 0.23 cm in Helium bei 10 bar und 600 °C /15/. Finden diese Reaktionen in graphitnahen Bereichen, engen Kanälen oder Poren statt, so kann das Triton in den Graphit hineingeschossen werden. Der durch Recoil auf diese Weise in den Graphit einge-

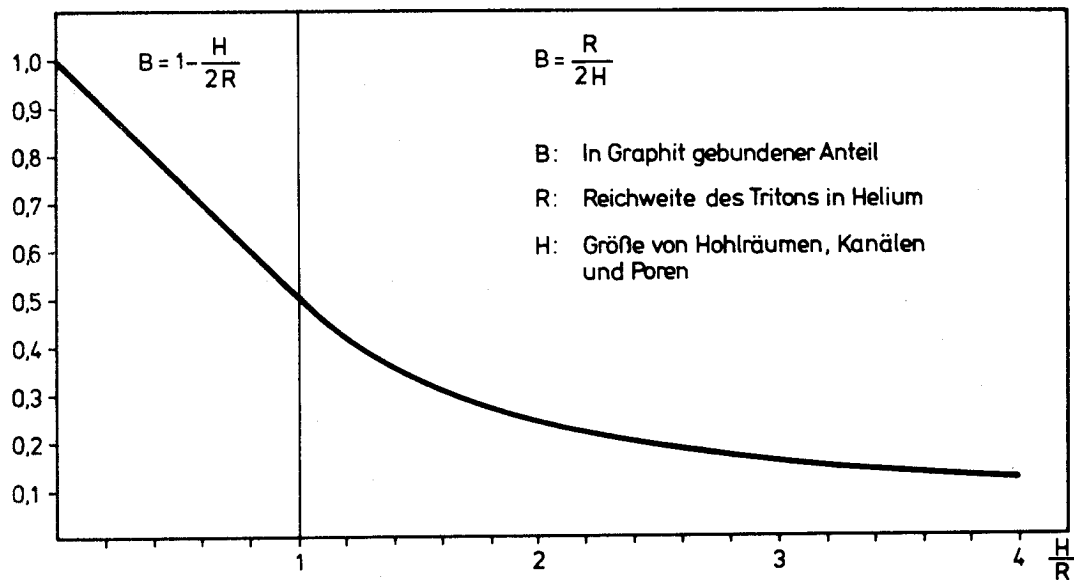


Abb. 2: Bindungsanteil für Tritium, das aus der Gasphase durch Recoil in den Graphit gelangt

brachte Anteil ist eine Funktion der Größe der mit Kühlgas gefüllten Hohlräume H und der Reichweite der Tritonen R . Abbildung 2 zeigt diesen Zusammenhang. Die Kurve gliedert sich in 2 Bereiche derart, daß die Abhängigkeit für $H/R \leq 1$ durch eine Gerade beschrieben wird, während für $H/R > 1$ die Approximation durch eine Hyperbel erfolgt. Geht man davon aus, daß bei sehr kleinen Hohlräumen alle Tritonen im Graphit gebunden werden, daß der Bindungsanteil an der Intervallgrenze ($H = R$) 50 % beträgt und daß der Kurvenverlauf stetig sein muß, so ergeben sich daraus die Konstanten der entsprechenden Funktionsgleichungen.

Da die Poren generell klein sind gegenüber der Reichweite der Tritonen, wird dieser Bindungsanteil mit 1.0 bewertet. Die übrigen charakteristischen Abmessungen der mit Helium ausgefüllten Kanäle, Durchführungen, Kugelschüttungshohlräume etc. können gemeinsam mit den entsprechenden Volumina über die Programmeingabe definiert werden. Aus diesen Einzelanteilen wird der für die gesamte Region repräsentative Bindungsanteil als volumenbezogener Mittelwert bestimmt.

3.2.2 Adsorption

Untersuchungen zum Adsorptionsverhalten von Wasserstoffisotopen an Graphit haben gezeigt, daß sich innerhalb weniger Stunden ein Gleichgewichtszustand

einstellt. Bis zum Erreichen dieses Sättigungswertes ist die adsorbierte Menge proportional zum Logarithmus der Zeit (Elovich-Gleichung). Unter Zugrundelegung dieser Gesetzmäßigkeit ergaben Messungen an oxidierten Proben bei 900 °C und $7 \cdot 10^{-2}$ Torr, die am HMI durchgeführt wurden /16/, daß nach etwa 4 Stunden 90 % des Gleichgewichtswertes erreicht waren. Bei Versuchen mit Tritium an unkorrodiertem Graphit im IRE der KFA /17/ wurde nach 4 Stunden eine adsorbierte Menge entsprechend ca. 70 % des Sättigungswertes gefunden.

Unter der Voraussetzung, daß der vom Programmanwender vorzugebende Zeitraum, über den sich die Tritium-Bilanz erstrecken soll, groß ist gegenüber der Zeitspanne, die für die Einstellung des Gleichgewichtes benötigt wird, kann die Adsorptionskinetik unberücksichtigt bleiben.

Bei den bereits erwähnten Untersuchungen im IRE der KFA /17/ konnte das Gleichgewichtsverhalten durch die Langmuir-Isotherme beschrieben werden:

$$a = a_m bp / (1 + bp)$$

a	Anzahl adsorbierter Tritium-Moleküle pro Gramm Graphit
a_m	Sättigungsbelegung der Graphitoberfläche ($2 \cdot 10^{18}$ T - Molek./g Graphit)
b	Adsorptionskoeffizient (7.53 mbar^{-1})
p	Tritium-Partialdruck in mbar

Die angegebenen Zahlenwerte gelten für eine Graphittemperatur von 1000 °C. Es ist jedoch zu erwarten - und von 600 bis 900 °C durch Experimente bestätigt /16/ -, daß diese Werte in einem angemessenen Temperaturbereich konstant bleiben und lediglich die Adsorptionskinetik beeinflußt wird.

Berücksichtigt man, daß ein erheblicher Überschuß von Wasserstoff gegenüber Tritium im Kühlgas besteht - für AVR $p(\text{H}_2)/p(\text{HT}) \approx 10^5$ - und setzt gleiches Verhalten der Wasserstoffisotope und damit gleiche Adsorptionswahrscheinlichkeiten der einzelnen Moleküle voraus, so kann die Rechnung, ausgehend vom Wasserstoffanteil im Kühlgas unter Vernachlässigung des Tritiums durchgeführt werden.

3.2.3 Gasreinigungsanlage, Leckage, radioaktiver Zerfall

Die Gasreinigungsanlage ist wegen der meist hohen Kühlgasdurchsätze in Verbindung mit großen Abscheideraten eine wesentliche Senke für Wasserstoffisotope. Aus Gasstrom und Wirkungsgrad der Anlage errechnet sich der Transportkoeffizient für die Entleerung des Rechenraumes, der durch eine um das Kühlgas gedachte Systemgrenze definiert ist. Der Wirkungsgrad kann über die Programmeingabe für jede Rechenperiode vorgegeben werden und ist somit quasi zeitvariabel.

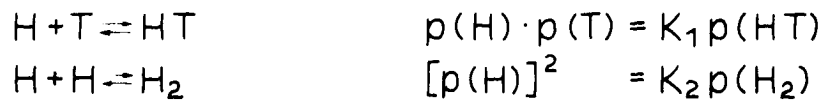
Für die Aufrechterhaltung eines stationären Druckzustandes im Primärsystem ist es erforderlich, die zwangsläufig vorhandenen Leckverluste durch die Zugabe von Frisch-Helium zu kompensieren. Hieraus ergibt sich für den jeweiligen Rechenraum neben der bereits beschriebenen Quelle durch den ^3He -Anteil im zugeführten Helium eine Senke für Tritium aufgrund der vorhandenen Leckrate.

Tritium zerfällt unter Aussendung von β -Strahlung der Energie 18 keV zu ^3He . Dieses wiederum kann in einem geeigneten Neutronenfluß zu Tritium rückverwandelt werden. Einer relativ langen Halbwertszeit von 12.3 Jahren steht der im thermischen Bereich sehr große effektive (n,p)-Wirkungsquerschnitt von 2280 barn gegenüber. Somit kann man davon ausgehen, daß ^3He je nach Größe des örtlichen thermischen Flusses und der Verweilzeit im Core in einer angemessenen Zeit wieder zu Tritium reagiert. Die resultierende Zerfallsrate für eine Rechenperiode und die entsprechende Zerfallskonstante, die sich durch die Überlagerung beider Vorgänge ergeben, werden also regional unterschiedlich sein. Die Zerfallskonstante wird dabei zwischen dem tabellierten Wert $1.792 \cdot 10^{-9}/\text{sec}$ und Null liegen. Die hier vorgestellte Programmversion berücksichtigt zwar den Tritiumzerfall im Gleichungsansatz, führt die Rechnungen jedoch dann ohne Zerfall aus.

3.2.4 Permeation

Für Wasserstoff und Tritium kann gleiches chemisches und physikalisches Verhalten vorausgesetzt werden, sofern die betreffenden Mechanismen nicht direkt von der Atommassenzahl abhängig sind. Somit ist für Wasserstoffisotope auch von gleichem Löslichkeits-, Diffusions- und damit auch Permeationsverhalten auszugehen, wenn man den Isotopeneffekt bei der Diffusion vernachlässigt.

sigt. Da im Kühlgas ein erheblicher Überschuß von Wasserstoff gegenüber Tritium besteht, ist eine Beeinflussung der Tritium-Permeation durch die Anwesenheit von Wasserstoff zu erwarten, und es wäre falsch, beide Vorgänge losgelöst voneinander zu betrachten. Durch die Formulierung des Massenwirkungsgesetzes in Verbindung mit der Sievertsschen Gleichung kann der funktionale Zusammenhang beschrieben werden. Es gilt:



$$C_T = L \sqrt{p(\text{T}_2)}$$

$$C_T = L \frac{K_1}{\sqrt{K_2}} \frac{p(\text{HT})}{\sqrt{p(\text{H}_2)}}$$

$$C_T = K^* \frac{p(\text{HT})}{p(\text{H}_2)} \sqrt{p(\text{H}_2)}$$

Für die Permeationsrate gilt:

$$\dot{V}_N = \frac{DL}{X} A C_T$$

$$\dot{V}_N = \frac{K}{X} A C_T$$

$$\dot{V}_N = \frac{K_0}{X} A K^* \frac{p(\text{HT})}{p(\text{H}_2)} \sqrt{p(\text{H}_2)} \exp[-Q/RT]$$

$\dot{V}_N$	Permeiertes Normvolumen Tritium pro Zeiteinheit
K_0	Permeationskonstante (temperaturunabhängig)
K	Permeationskonstante (temperaturabhängig)
X	Dicke der Permeationswand
p	Partialdruck der entsprechenden Komponente
Q	Aktivierungsenergie
R	Gaskonstante
T	Absolute Temperatur
D	Diffusionskoeffizient
L	Löslichkeit
$K_1; K_2$	Gleichgewichtskonstanten

Bei Überschuß von leichtem Wasserstoff ist die Gesamtpermeationsrate somit proportional zur Wurzel des Wasserstoffpartialdruckes. Der auf die Tritium-

Permeation entfallende Anteil entspricht dem Partialdruckverhältnis $p(\text{HT})/p(\text{H}_2)$. Dieser Quotient ist sehr klein und beträgt für den AVR beispielsweise 10^{-5} . Bezieht man nun die Tritium-Permeationsrate auf die angebotene Menge, so erhält man die Übertrittswahrscheinlichkeit eines Tritons für eine bestimmte Zeiteinheit. Da dieser Wert aber identisch ist mit der entsprechenden Permeationswahrscheinlichkeit für Wasserstoff, kann die bestehende Rückkopplung Tritium-Partialdruck-Permeationsrate durch Rechnungen auf der Basis von Wasserstoff überbrückt werden.

Die hemmende Wirkung einer Oxidbelegung der Wärmetauschermaterialien auf die Tritium-Permeation in die Sekundärkreisläufe wurde experimentell untersucht und dabei Rückhaltefaktoren von 100 /6/ bis 1500 /7/ für austenitische und 20 /6/ für ferritische Stähle gefunden. Bei den Versuchen wurde das Wasserstoffisotop auf einer Probenseite angeboten und die Übertrittsrate für den unoxidierten und oxidierten Zustand bestimmt. Im realen Reaktorbetrieb jedoch kommt es - wie die Permeationsgleichung zeigt - aufgrund des hohen Wasserstoffüberschusses zu einer inhibierenden Wirkung auf die Tritium-Permeation. Dies führt dazu, daß bereits bei unoxidierten Wärmetauschermaterialien eine wesentlich kleinere Übertrittsrate als die experimentell gefundene zu erwarten ist. Bei einer Oxidbelegung jedoch nimmt die Bedeutung der Inhibierung wegen der gleichfalls erschwerten Wasserstoffpermeation ab. Somit kann der tatsächliche Rückhaltefaktor wesentlich kleiner sein als der gemessene /18/.

3.3 Transport des Tritiums

3.3.1 Formulierung der Transportgleichungen

Die Verteilung des produzierten Tritiums erfolgt über die Gasräume von Primär- und Sekundärkreislauf. Betrachtet man den Tritiumtransport über eine um das Helium gedachte Systemgrenze hinweg, so ergibt sich für die Beladung des Raumes die aus dem Graphit freigesetzte Menge der Tritium-Produktion. Die Entleerung erfolgt über die Pfade: Adsorption, Primärkreislaufleckage, Gasreinigungsanlage und Permeation. Für den geschlossenen Dampfraum wiederum ist die Permeation der Beladungsterm, dem Leckage und Abschlammung gegenüberstehen. Abbildung 3 zeigt die Formulierung der Transportgleichungen für eine variable und eine konstante Input-Rate, wie es beispielsweise das Spalttritium für den Primärkreislauf darstellt.

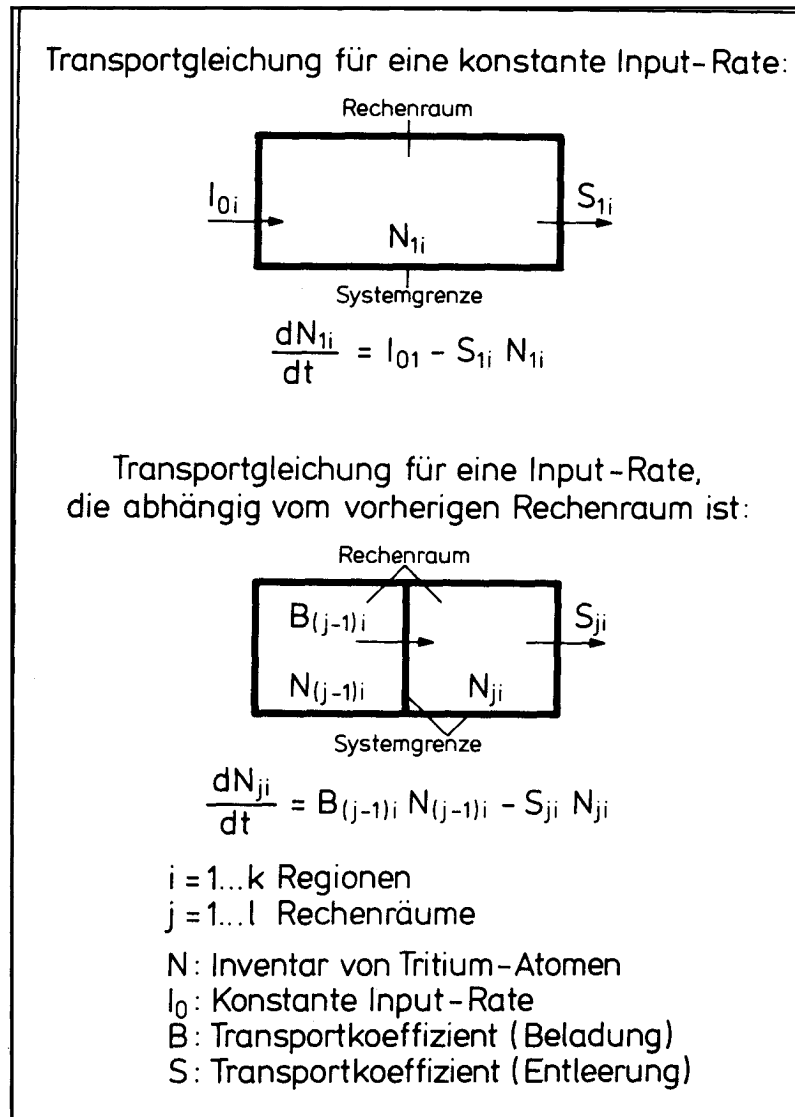


Abb. 3: Formulierung von Transportgleichungen für verschiedene Rechenräume

Innerhalb der Regionen erfolgt für jeden Tritium-Lieferanten neben der Produktionsrechnung eine Verteilungsrechnung, wodurch eine verursachergerechte Aufschlüsselung erzielt und bei geeigneter Überlagerung ein umfassender Überblick für die verschiedenen Regionen sowie für das gesamte Core vermittelt wird.

3.3.2 Lösung des Gleichungssystems

Verknüpft man Produktions- und Transportgleichungen miteinander, so ergibt sich für jeden Tritium-Lieferanten ein Satz gekoppelter linearer Differentialgleichungen erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Sieht man von

^3He ab, das - wie bereits erwähnt - zu Tritium aktiviert wird und dann rückwirkend nach dem Zerfall das ^3He -Angebot wieder erhöht, so beschreiben die Produktionsgleichungen einen Vorgang, der immer in derselben Richtung abläuft, wobei jede Gleichung nur mit der vorherigen verknüpft ist. Die Transportgleichungen haben ebenfalls diese Struktur, da Ströme nur von der Quelle zur Senke hin möglich sind und keine Verteilungsräume übersprungen werden können, so daß der Transportkoeffizient für die Beladung eines Raumes abhängig ist von dem entsprechenden Koeffizienten, der die Entleerung des vorherigen Rechenraumes beschreibt.

Für den Fall einer konstanten Tritium-Quelle ergibt sich folgender Gleichungssatz:

$$\frac{dN_{1i}}{dt} = I_{0i} - S_{1i} N_{1i}$$

$$\frac{dN_{2i}}{dt} = B_{1i} N_{1i} - S_{2i} N_{2i}$$

$$\frac{dN_{3i}}{dt} = B_{2i} N_{2i} - S_{3i} N_{3i}$$

$$\vdots$$

N	Inventar von Tritium-Lieferanten oder Tritium-Atomen
i	Index für die Aufgliederung des Reaktors in Regionen
0, 1, 2 ...	Index für Tritium-Lieferanten bzw. Verteilungsräume
I_0	Produkt $(\pi \cdot \phi \cdot \sigma \cdot N)$ bei konstanter Quelle bzw. konstante Input-Rate eines Rechenraumes
B	Produkt $(\pi \cdot \phi \cdot \sigma)$ für die Entstehung von Tritium oder entsprechender Lieferanten bzw. Transportkoeffizient für die Beladung des Raumes
S	Produkt $(\pi \cdot \phi \cdot \sigma)$ für den Abbrand des betreffenden Tritium-Lieferanten bzw. Transportkoeffizient für die Entleerung des Verteilungsraumes.

Die Lösung dieses Differentialgleichungssatzes kann exakt angeschrieben werden, wenn man, beginnend mit der ersten Gleichung, die gefundene Lösung jeweils in die folgende einsetzt:

Lösung der Gleichung $\dot{N}_{1i} = I_{0i} - S_{1i} N_{1i}$

mit $N_{1i}(t=0) = 0$

$$\dot{N}_{1i} + S_{1i} N_{1i} = 0$$

homogene

Differentialgleichung

$$\frac{dN_{1i}}{N_{1i}} = -S_{1i} dt$$

$$N_{1ih} = K e^{-S_{1i}t}$$

$$N_{1ip} = I_{0i} e^{-S_{1i}t} \int_{t_0}^t e^{S_{1i}x} dx \quad \text{partikuläre Lösung}$$

$$= \frac{I_{0i}}{S_{1i}}$$

$$N_{1i} = N_{1ih} + N_{1ip}$$

$$N_{1i}(t=0) = 0$$

Anfangsbedingung

$$N_{1i} = I_{0i} \frac{1 - e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}}$$

Lösung der Gleichung $\dot{N}_{2i} = B_{1i} N_{1i} - S_{2i} N_{2i}$

mit $N_{1i} = I_{0i} \frac{1 - e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}}$ und $N_{2i}(t=0) = 0$

$$\dot{N}_{2i} + S_{2i} N_{2i} = B_{1i} I_{0i} \frac{1 - e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}}$$

$$\dot{N}_{2i} + S_{2i} N_{2i} = 0$$

$$\frac{dN_{2i}}{N_{2i}} = -S_{2i} dt$$

$$N_{2ih} = K^* e^{-S_{2i}t}$$

$$N_{2ip} = e^{-S_{2i}t} \frac{B_{1i} I_{0i}}{S_{1i}} \int_{t_0}^t \frac{1 - e^{-S_{1i}x}}{e^{-S_{2i}x}} dx$$

$$= e^{-S_{2i}t} \frac{B_{1i} I_{0i}}{S_{1i}} \left[\frac{e^{S_{2i}t}}{S_{2i}} - \frac{e^{(S_{2i} - S_{1i})t}}{S_{2i} - S_{1i}} \right]$$

$$N_{2i} = N_{2ih} + N_{2ip}$$

$$N_{2i}(t=0) = 0$$

$$N_{2i} = I_{0i} B_{1i} \left[\frac{1-e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}} \cdot \frac{1}{S_{2i}-S_{1i}} + \frac{1-e^{-S_{2i}t}}{S_{2i}} \cdot \frac{1}{S_{1i}-S_{2i}} \right]$$

Lösung der Gleichung $\dot{N}_{3i} = B_{2i} N_{2i} - S_{3i} N_{3i}$

mit $N_{2i} = I_{0i} B_{1i} \left[\frac{1-e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}} \cdot \frac{1}{S_{2i}-S_{1i}} + \frac{1-e^{-S_{2i}t}}{S_{2i}} \cdot \frac{1}{S_{1i}-S_{2i}} \right]$

und $N_{3i}(t=0) = 0$

$$\dot{N}_{3i} + S_{3i} N_{3i} = I_{0i} B_{1i} B_{2i} \left[\frac{1-e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}(S_{2i}-S_{1i})} + \frac{1-e^{-S_{2i}t}}{S_{2i}(S_{1i}-S_{2i})} \right]$$

$$\dot{N}_{3i} + S_{3i} N_{3i} = 0$$

$$\frac{dN_{3i}}{N_{3i}} = -S_{3i} dt$$

$$N_{3ih} = K^{**} e^{-S_{3i}t}$$

$$N_{3ip} = e^{-S_{3i}t} I_{0i} B_{1i} B_{2i} \int_{t_0}^t \left[\frac{1-e^{-S_{1i}x}}{e^{-S_{3i}x} S_{1i} (S_{2i}-S_{1i})} + \frac{1-e^{-S_{2i}x}}{e^{-S_{3i}x} S_{2i} (S_{1i}-S_{2i})} \right] dx$$

$$= I_{0i} B_{1i} B_{2i} \left[\frac{\frac{1}{S_{3i}} - \frac{e^{-S_{1i}t}}{S_{3i}-S_{1i}}}{S_{1i}(S_{2i}-S_{1i})} + \frac{\frac{1}{S_{3i}} - \frac{e^{-S_{2i}t}}{S_{3i}-S_{2i}}}{S_{2i}(S_{1i}-S_{2i})} \right]$$

$$N_{3i} = N_{3ih} + N_{3ip}$$

$$N_{3i}(t=0) = 0$$

$$N_{3i} = I_{0i} B_{1i} B_{2i} \left[\frac{1-e^{-S_{1i}t}}{S_{1i}} \cdot \frac{1}{S_{2i}-S_{1i}} \cdot \frac{1}{S_{3i}-S_{1i}} + \right. \\ \left. + \frac{1-e^{-S_{2i}t}}{S_{2i}} \cdot \frac{1}{S_{1i}-S_{2i}} \cdot \frac{1}{S_{3i}-S_{2i}} + \right. \\ \left. + \frac{1-e^{-S_{3i}t}}{S_{3i}} \cdot \frac{1}{S_{1i}-S_{3i}} \cdot \frac{1}{S_{2i}-S_{3i}} \right]$$

Aus der angeschriebenen Lösung läßt sich folgender Bildungsmechanismus ableiten:

$$N_{qi} = I_0 B_{1i} \cdot \dots \cdot B_{(q-1)i} \sum_{k=1}^q \left[\frac{1 - e^{-s_{ki}t}}{s_{ki}} \cdot \prod_{\substack{L=1 \\ L \neq k}}^q \frac{1}{s_{Li} - s_{ki}} \right]$$

Da dieser Lösungsalgorithmus im Programm sehr häufig verwendet wird, definiert man die Funktion:

$$H(t, s, q) = \sum_{k=1}^q \left[\frac{1 - e^{-s_{ki}t}}{s_{ki}} \cdot \prod_{\substack{L=1 \\ L \neq k}}^q \frac{1}{s_{Li} - s_{ki}} \right]$$

- | | |
|---|--|
| t | Zeitdauer des Berechnungsintervalls |
| S | eindimensionales Feld, das die Werte s_{1i} bis s_{qi} enthält |
| q | Index für das Inventar, ausgedrückt durch die zuletzt angeschriebene Differentialgleichung; ist identisch mit der Anzahl der Gleichungen |

Für den Fall, daß die Quellrate mit fortschreitender Zeit wegen des Abbrandes der Tritium-Lieferanten abnimmt, kann der folgende Gleichungssatz formuliert werden:

$$\frac{dN_{1i}}{dt} = -s_{1i} N_{1i}$$

$$\frac{dN_{2i}}{dt} = B_{1i} N_{1i} - s_{2i} N_{2i}$$

$$\frac{dN_{3i}}{dt} = B_{2i} N_{2i} - s_{3i} N_{3i}$$

$$\vdots$$

Wendet man das gleiche Lösungsverfahren an, das eben für den Fall einer konstanten Tritium-Quelle gezeigt wurde, so ergibt sich bei Berücksichtigung der Anfangsbedingung $N(t=0) = N_0$ die folgende Lösung:

$$N_{qi} = N_0 B_{1i} \cdot \dots \cdot B_{(q-1)i} \sum_{k=1}^q \left[e^{-s_{ki}t} \prod_{\substack{L=1 \\ L \neq k}}^q \frac{1}{s_{Li} - s_{ki}} \right]$$

N_0 Inventar von Tritium-Atomen oder Tritium-Lieferanten zu Beginn
der Zeitperiode

Hier definiert man die Funktion:

$$G(t, s, q) = \sum_{k=1}^q \left[e^{-s_{ki}t} \prod_{\substack{L=1 \\ L \neq k}}^q \frac{1}{s_{Li} - s_{ki}} \right]$$

4 ÜBERSICHT ÜBER DIE AM AVR DURCHGEFÜHRTEN RECHNUNGEN ZUM BETRIEBSVERHALTEN DES REAKTORS

Während bei Hochtemperatur-Blockreaktoren der Brennstoff bis zum Neueinsatz ortsfest abgebrannt wird, bietet der Kugelhaufenreaktor die Möglichkeit der kontinuierlich regulierbaren Kugelzu- und abfuhr. Hieraus ergibt sich unter anderem der Vorteil, daß der Reaktor von Betriebsbeginn an ohne überschüssiges Spaltstoffinventar gefahren werden kann. Zur optimalen Ausnutzung dieses Vorteils sind betriebsbegleitende Rechnungen erforderlich, die es ermöglichen, das Fahrverhalten des Reaktors mit befriedigender Genauigkeit vorauszuberechnen und somit Angaben über die Dosierung der Kugelzugabe nach Art, Anzahl und Ort sowie die Kugelausschleusung und die Umwälzgeschwindigkeit machen zu können.

Von R. Wagemann wurden am Beispiel des AVR entsprechende Modelle entwickelt und Betriebsrechnungen durchgeführt /19/. Da der AVR bis heute die wohl wichtigste Versuchsstrecke für Rechenmodelle von Kugelhaufenreaktoren darstellt, werden auch die hier vorgestellten Rechnungen zum Tritium-Haushalt anhand konkreter Werte und Daten des AVR durchgeführt, um immer wieder den Bezug zur Realität zu erhalten und die Übereinstimmung zu gemessenen Tritium-Aktivitäten im Kühlgas /20/, im Dampfkreislauf /21/ und in Graphit- und Brennelementkugeln /22/ zu kontrollieren.

4.1 Beschreibung des AVR-Reaktors

Der AVR-Kugelhaufenreaktor ist heliumgekühlt und graphitmoderiert. Das Core besteht aus einer Kugelschüttung von Brennelementen, Absorberkugeln und Graphitkugeln.

Zur Steuerung des Betriebsablaufes können an der Schüttungsoberfläche auf 2 Radian Kugeln zugeführt werden. Durch eine Bodenöffnung gelangen die Kugeln in das Abzugsrohr und von dort in die Beschickungsanlage. Kugelbruch und Staub werden abgeschieden, die Kugelart identifiziert und der Abbrandzustand der Brennelemente bestimmt. Dadurch, daß die ungenügend abgebrannten Brennelemente dem Core wieder zugeführt werden, kommt eine Umwälzung und gute Durchmischung der mehr oder weniger abgebrannten Kugeln zustande.

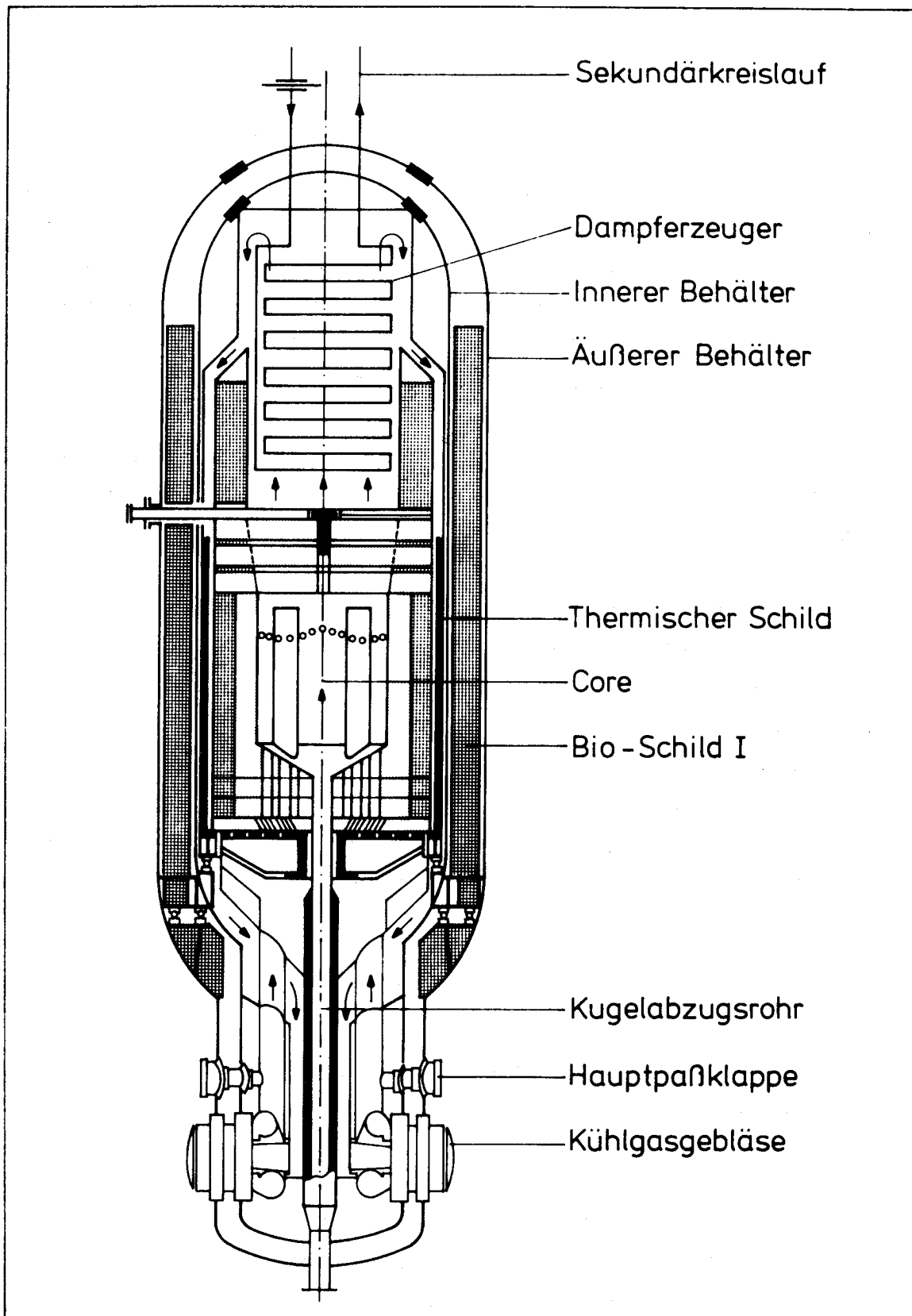


Abb. 4: Längsschnitt durch den Schutzbehälter des AVR-Reaktors

4.2 Anfahrphasen des Reaktors

Damit der Reaktor von Betriebsbeginn an mit Nennleistung gefahren werden kann, setzt sich das Erstcore aus Brennelementen, Graphitkugeln und Borkugeln zusammen (Borkugel-Phase). Ohne Zugabe von Borkugeln würden die Brennelementtemperaturen bei Nennleistung die Toleranzgrenze überschreiten. Der Einsatz dieser abbrennbaren Gifte in den Brennelementen selbst wäre ungünstig, weil dadurch ein Freiheitsgrad der Beschickung verschenkt würde, da dann der Ort durch die Anordnung der Brennelemente bestimmt wäre. Bis zum Erreichen der erforderlichen Vergiftung durch Spaltprodukte wird eine allmählich abklingende Zahl frischer Borkugeln ins Innencore gegeben, wogegen frische Brennelemente zur Abflachung des radialen Temperaturprofils auf dem Außencore zugeführt werden.

Mit fortschreitender Zeit kommt der Kugelhaufenreaktor aus dem Bereich kritischer Spitzentemperaturen heraus, die anfängliche Phase der räumlichen Entkopplung von Spaltstoff und abbrennbarem Gift geht in die Graphitkugel-Phase über, wo jedem Brennelement sein Giftanteil in Form von Spaltprodukten zukommt. Es entfällt ein Freiheitsgrad der Beschickung, jedoch wird die Brennelementzugabe flexibler.

Die Gleichgewichtsphase ist dann erreicht, wenn der Reaktor stationär mit frischen Brennelementen beschickt wird und mit der Kugelausschleusung und Wiederezufuhr aus dem Core abgezogener Kugeln konstant in gleicher Weise verfahren wird. In diesem Gleichgewichtszustand darf die mittlere räumliche Nuklidkonzentration in einem Volumen, das groß ist gegenüber dem Kugelvolumen, mit der Zeit nur rein statistisch um einen konstanten Mittelwert schwanken.

4.3 Beschickungsrechnungen am AVR

4.3.1 Realgeometrie und Modellgeometrie des Reaktorcores

Um Rechenzeit und Speicherplatzbelegung bei den Betriebsrechnungen in vertretbaren Grenzen zu halten, ist es erforderlich, die Realgeometrie des AVR-Cores in eine Modellgeometrie zu überführen. Abbildung 5 /29/ zeigt die Realgeometrie des AVR-Core-Reflektorbereiches und Abbildung 6 /29/ die daraus

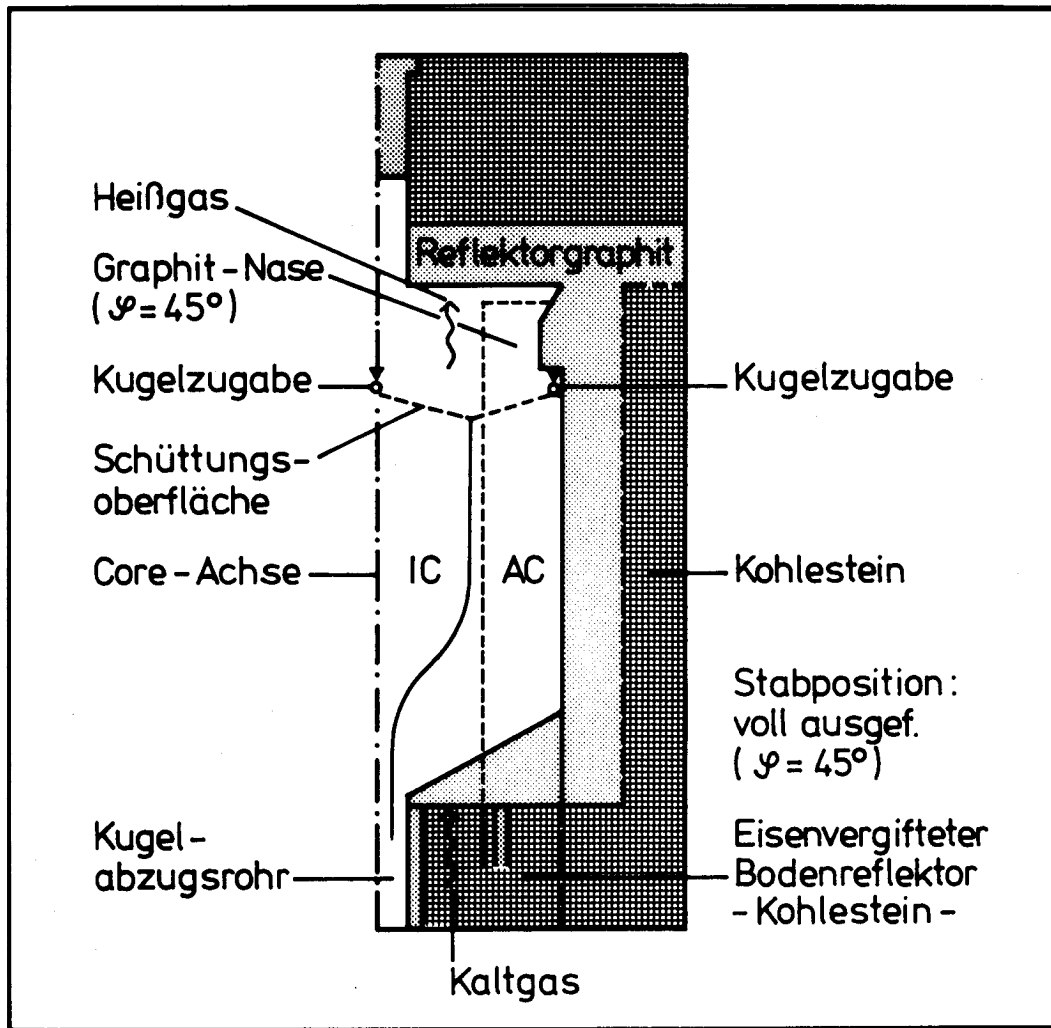


Abb. 5: Realgeometrie des AVR-Cores (Längsschnitt)

abgeleitete 2-dimensionale, rotationssymmetrische Struktur, die dadurch erreicht wurde, daß die Graphitnasen zur Absorberstabführung (Ebenen mit $\varphi = \text{const.}$) in "Graphitringe" der Ebenen $z = \text{const.}$ überführt wurden.

4.3.2 Ermittlung des Neutronenflusses

Die Berechnung des energie- und ortsabhängigen Neutronenflusses ist sehr kompliziert und in einem Rechengang nicht durchführbar, da hierzu die Kenntnis des Isotopenvektors in jedem Reaktorpunkt erforderlich ist, und das Brennstoff- und Moderatortemperaturfeld bekannt sein muß. Diese Temperaturfelder jedoch können nur über das Leistungsdichtefeld berechnet werden, das sich wieder aus der Spaltstoff-, Temperatur- und Flußverteilung im Reaktor ergibt. Dieser Zyklus wird nun iterativ durchlaufen, wobei man vom Auf-

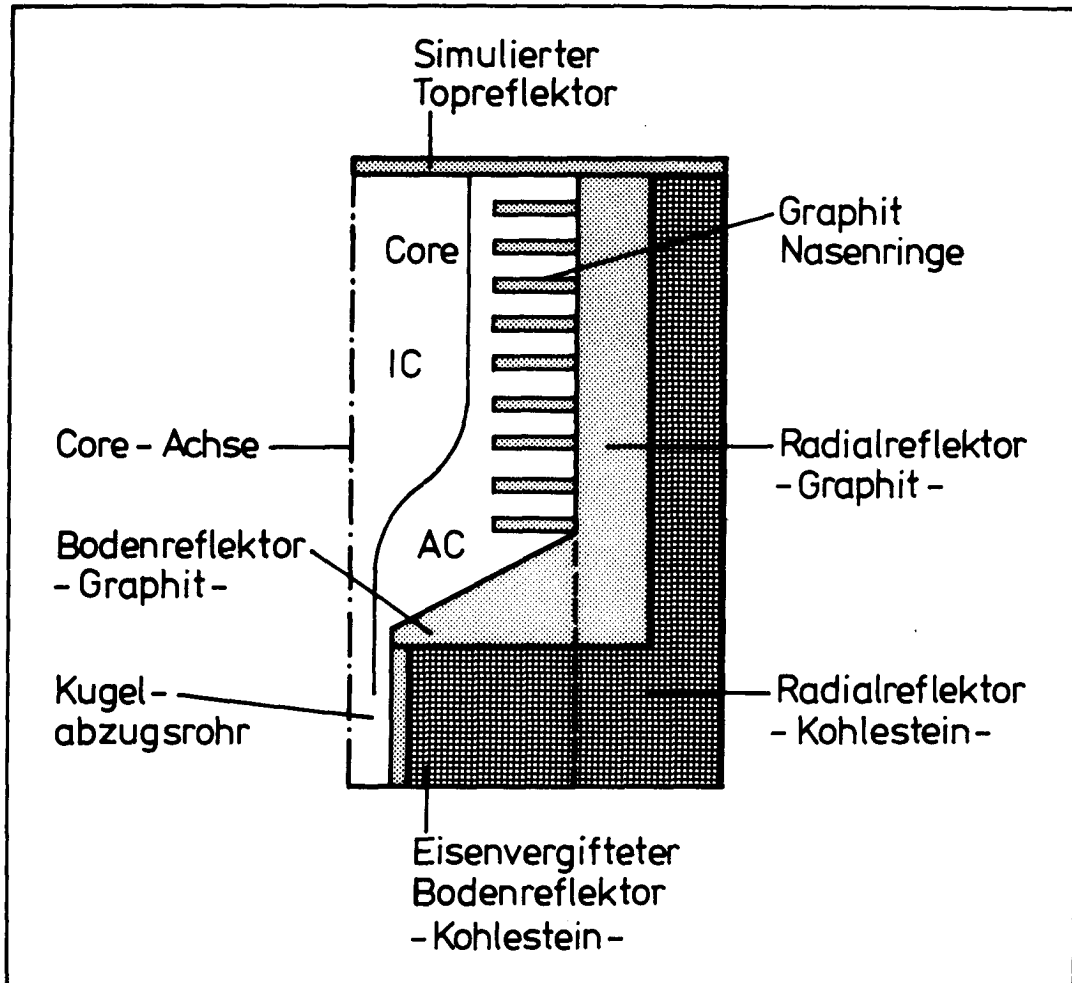


Abb. 6: Modellgeometrie des AVR-Cores (Längsschnitt)

bau des Erstcores ausgeht und den Verlauf des energieabhängigen Neutronenflusses sowie die Moderator- und Brennstofftemperaturen vorgibt bzw. abschätzt. So erhält man für maximal 15 Regionen das Neutronenenergiespektrum, aufgegliedert in 43 Energiebereiche von 0 bis 10 MeV.

An diese Spektralrechnung schließt sich eine Neutronendiffusionsrechnung zur Ermittlung des Neutronenflußfeldes im Reaktor an. Zur genaueren Erfassung der Ortsvariationen des Flußfeldes geht man auf ca. 4500 über den Axialquerschnitt des Cores verteilte Maschenpunkte über, muß dann aber wegen begrenzter Speicherkapazität der Rechenanlage von 43 Mikro-Energiegruppen auf 4 Makro-Energiegruppen übergehen.

4.3.3 Kugelumwälzung und Coreaufteilung

Für die rechnerische Erfassung des Reaktorbetriebes ist es notwendig, das

Kugelfließen anhand eines Modells möglichst genau zu beschreiben, weil dadurch die Qualität der gesamten Betriebsrechnungen und die daraus abgeleitete Beschickungsstrategie maßgeblich beeinflusst werden. Versuche haben gezeigt, daß das Kugelfließen weitgehend mit den Gesetzen, die für die laminare Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit gelten, zu beschreiben ist. Abbildung 7 /30/ zeigt in einem Längsschnitt durch ein rotationssymmetrisches Core Absinkprofile und Bahnkurven, die experimentell ermittelt wurden.

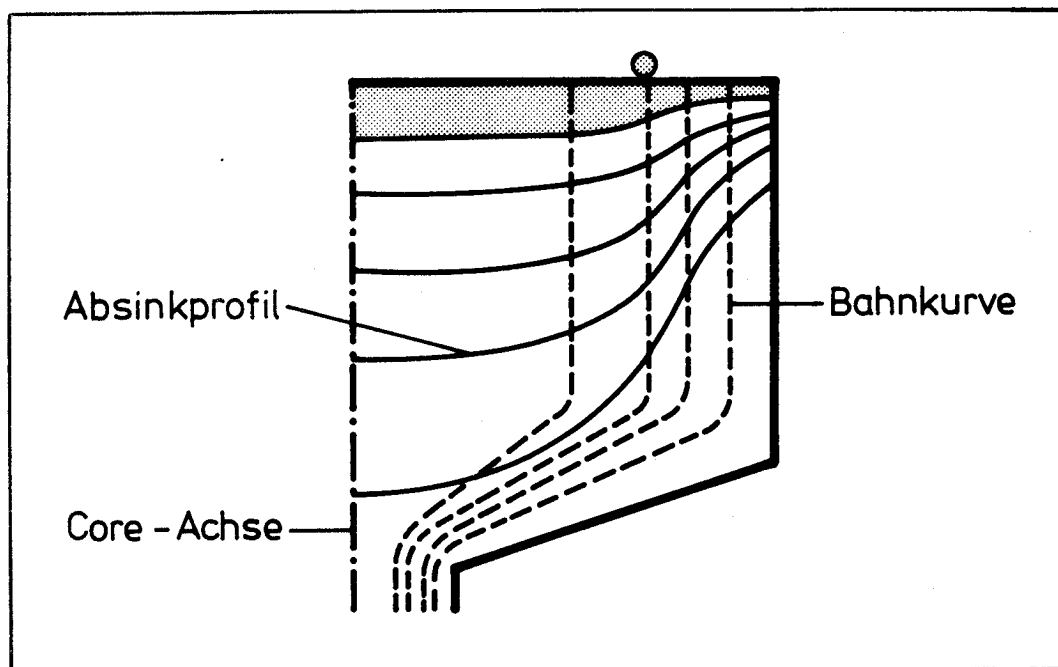


Abb.7: Gemessene Bahnkurven und Absinkprofile

Zur Diskretisierung des Modells wird das Kugelhauencore in 5 konzentrische Stromröhren aufgeteilt. Man setzt nun voraus, daß alle Kugeln, die bei der Zuführung in die gleiche Stromröhre gelangen, für den Durchlauf durch das Core die gleiche Zeit benötigen. Abbildung 8 /30/ zeigt die entsprechenden Durchlaufzeiten als Funktion der Radien bzw. als Mittel der betreffenden Stromröhre.

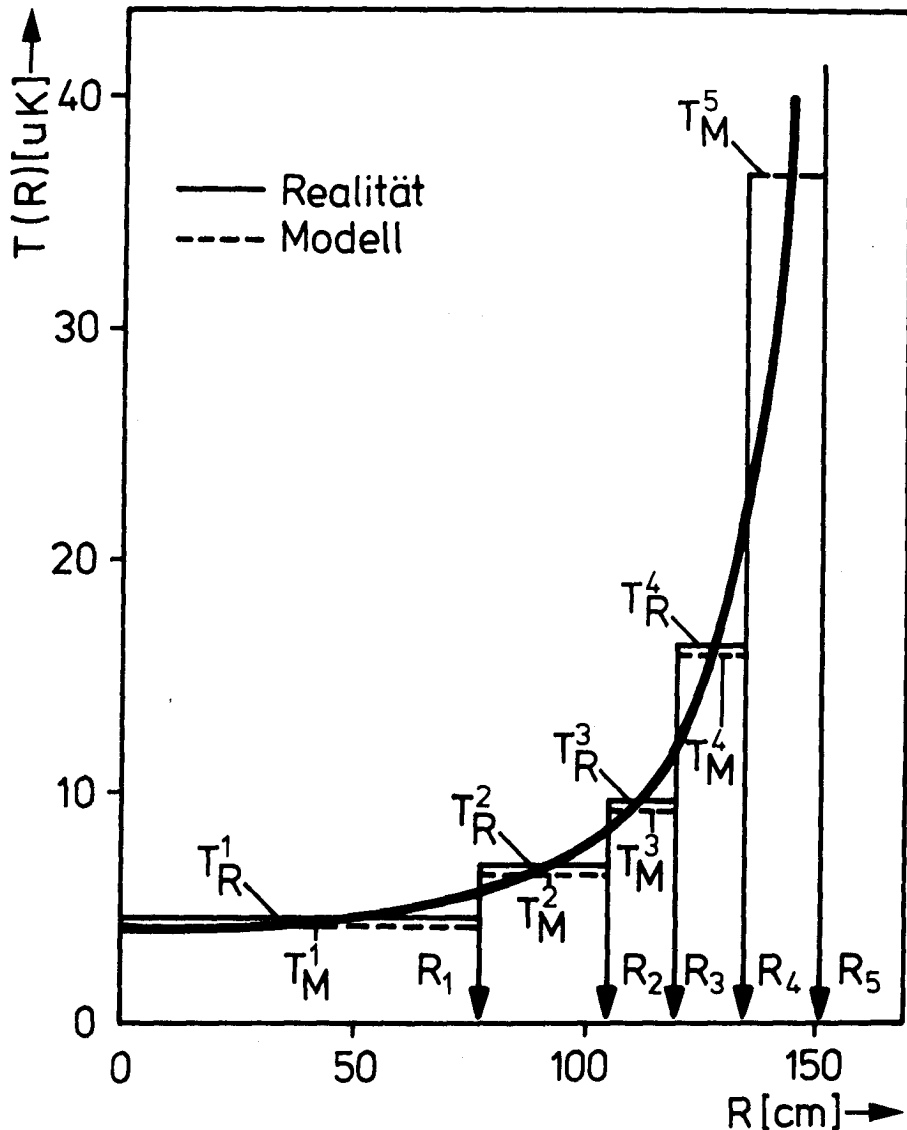


Abb.8: Kanaldurchlaufzeiten; Einheit [10^4 uK]

Anmerkung: uK (umgewälzte Kugelzahl) ist ein modifizierter Zeitmaßstab und gibt die Zahl der bis zur Zeit t umgewälzten Kugeln ab.

$$\text{uK} = \int_0^T w(t) dt$$

$w(t)$: Umwälzgeschwindigkeit der Kugeln zur Zeit t in [umgewälzte Kugeln/Zeiteinheit]

In Anlehnung an uK wird ein Zeitabschnitt für die Umwälzung von 7200 Kugeln definiert, und man bezeichnet diesen als 1 WB (Wiederbeladung).

Jede dieser 5 Stromröhren wird nun derart in Zonen aufgeteilt, daß sich die Anzahl der Zonen in den jeweiligen Stromröhren wie die Durchlaufzeiten der Kugeln verhalten. In diesem diskreten Modell gibt es kein Fließen der Ku-

geln, vielmehr werden die Kugelpakete einer Zone in die nächst tiefergelegene Zone der gleichen Stromröhre umgeladen. So wird der in Wirklichkeit gekoppelte Vorgang des nuklearen Abbrennens und der gleichzeitigen vertikalen Kugelbewegung zeitlich entkoppelt. Während eines bestimmten Zeitintervalls werden die Kugeln ortsfest in einem konstanten Neutronenfluß abgebrannt. Abbildung 9 /30/ zeigt das für die Betriebsrechnungen des AVR verwandte "5-Kanal-Modell", das aus 5 Stromröhren (Kanälen) und insgesamt 107 Core-zonen aufgebaut ist.

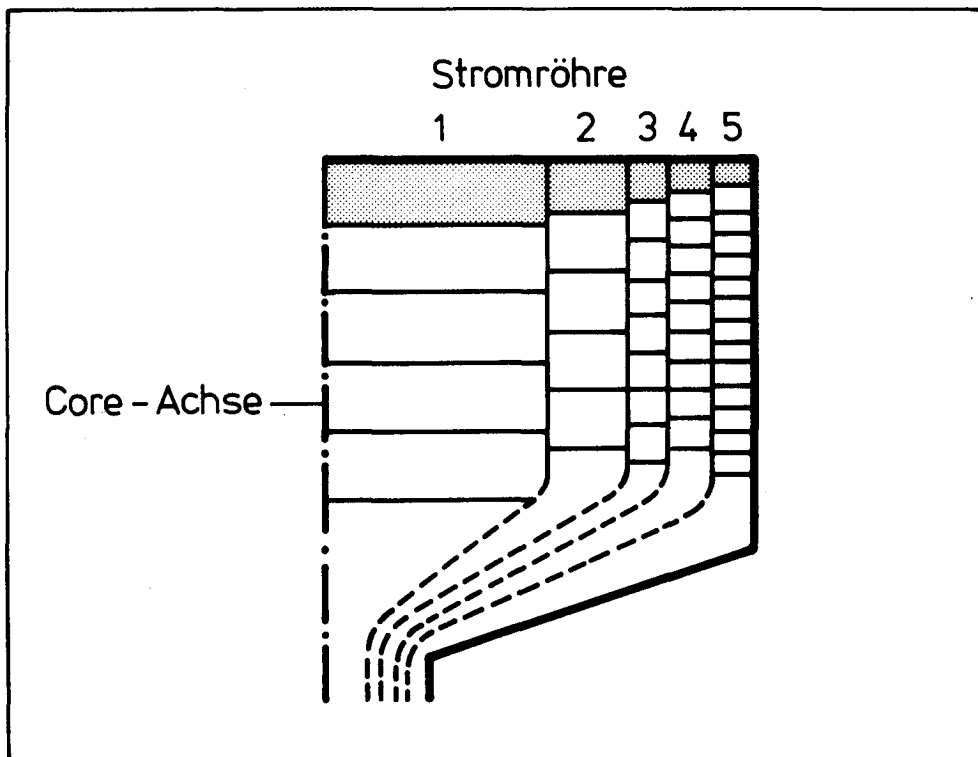


Abb. 9: Diskretes Kugelfließmodell

5 AUFBEREITUNG PHYSIKALISCHER DATEN DES AVR-VERSUCHSREAKTORS FÜR DIE PROGRAMMEINGABE

5.1 Neutronenfluß

Für die Berechnung der Tritium-Quellen und Senken im Corebereich ist eine Aufgliederung des Cores erforderlich. Damit nun möglichst viele Daten direkt aus den laufenden Betriebsrechnungen des AVR übernommen werden können ist es sinnvoll, die bei diesen Rechnungen verwandte Aufteilung des Cores in 8 Regionen ebenfalls vorzusehen. Entstanden sind diese Regionen durch die Zusammenfassung mehrerer Zonen mit ähnlichen $\phi(E)$ -Verläufen und - im Hinblick auf thermische Neutronen und deren Reaktionen - etwa gleichen Temperaturen. Abbildung 10 /30/ gibt einen Überblick über die Aufteilung des AVR-Cores.

Die folgende Tabelle zeigt die für die Erfassung des Kugelfließverhaltens notwendige Aufteilung des AVR-Cores in 107 Zonen und die Zusammenfassung zu 8 Regionen:

Regionen	zugehörige Zonen
1	1...4, 7...12
2	5, 6, 13...15
3	16...23, 29...40, 51...70, 106
4	24...28, 41...50, 71...100, 107
5	101
6	102, 104
7	103
8	105

Für jede dieser Regionen ist das Neutronenenergiespektrum, aufgegliedert in 43 Mikro-Energiegruppen von 0 bis 10 MeV, durch die Spektralrechnung ermittelt worden. Die Tabellen 1A und 1B zeigen die entsprechenden Flüsse für die Wiederbeladung 193 (Jahresmitte 1977). Die Werte sind auf eine Summe von 100 normiert und so angeordnet, daß die zugehörigen Energie zeilenweise von links nach rechts ansteigen. Im Rahmen der Betriebsrechnungen wurden außerdem für die 107 Core- und Reflektorzonen Eingruppenflüsse be-

stimmt. In Tabelle 2 sind diese Flüsse aufgeführt, wobei die Numerierung der Zonen steigend von links nach rechts erfolgt.

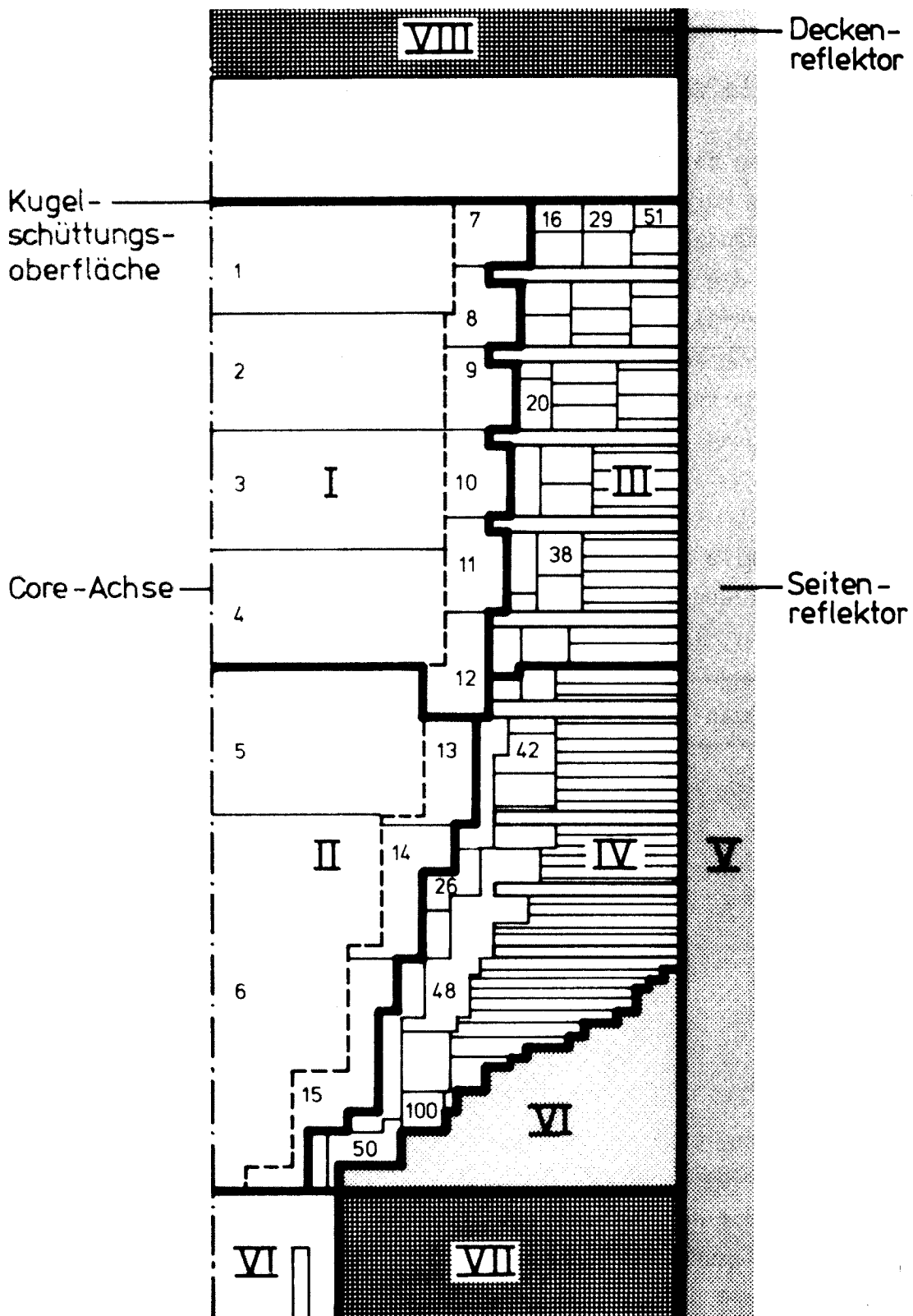


Abb. 10: Aufteilung des AVR-Cores in 107 Zonen und Zusammenfassung zu 8 Regionen

Tabelle 1A: Normierte 43-Gruppen - Flüsse, WB 193 /32/

Region I

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

2.06129E-01	5.80107E-01	8.91312E-01	1.14382F 00	1.34352E 00	1.497048 00	2.44945E 00	3.48262E 00
4.44274E 00	5.14845E 00	6.18870E 00	5.22446E 00	4.25689E 00	3.39342E 00	3.78459E 00	3.29167E 00
2.39366E 00	1.08855E 00	1.60770E 00	7.78232E-01	3.15195E-01	5.00720E-01	5.83672E-01	4.68524E-01
1.26712E 00	1.31024E 00	1.28947E 00	1.97048E 00	1.34596E 00	2.10527E 00	2.18451E 00	2.21389E 00
3.03000E 00	4.59959E 00	4.58944E 00	4.61617E 00	4.04712E 00	3.69717E 00	3.03545E 00	1.94628E 00
1.05429E 00	4.94367E-01	1.42401E-01					

Region II

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

3.43064E-01	9.45026E-01	1.41249E 00	1.75946F 00	2.00346E 00	2.16348E 00	3.39818E 00	4.66491E 00
5.41352E 00	5.75343E 00	6.19982E 00	4.63632E 00	3.36563E 00	2.14134E 00	2.40372E 00	1.86726E 00
1.28475E 00	6.09991E-01	1.05439E 00	6.27671E-01	2.80546E-01	4.74062E-01	5.74536E-01	4.69403E-01
1.28631E 00	1.33992E 00	1.32963E 00	2.03660E 00	1.38996E 00	2.16682E 00	2.25093E 00	2.28034E 00
3.12474E 00	4.75401E 00	4.71581E 00	4.71758E 00	4.11466E 00	3.74368E 00	3.06491E 00	1.96215E 00
1.06054E 00	4.99404E-01	1.45945E-01					

Region III

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

1.58014E-01	4.52757E-01	7.04680E-01	9.13257E-01	1.08203E 00	1.21514E 00	2.00546E 00	2.88336E 00
3.72659E 00	4.38377E 00	5.36330E 00	4.61676E 00	3.83379E 00	3.11423E 00	3.55559E 00	3.19163F 00
2.40604E 00	1.12782E 00	1.70957E 00	8.40297E-01	3.39560E-01	5.36061E-01	6.20019E-01	4.94503E-01
1.32594E 00	1.37031E 00	1.35155E 00	2.04766E 00	1.41067E 00	2.20839E 00	2.28535E 00	2.30578E 00
3.14433E 00	4.74602E 00	4.99159E 00	5.29186E 00	4.88581E 00	4.64982E 00	3.92757E 00	2.55750E 00
1.41925E 00	6.42754E-01	1.64094E-01					

Region IV

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

3.11673E-01	8.76052E-01	1.32228E 00	1.65376E 00	1.88552E 00	2.03544E 00	3.19072E 00	4.26515E 00
5.01829E 00	5.27501E 00	5.60417E 00	4.12109E 00	2.94947E 00	2.09072E 00	2.07420E 00	1.62236E 00
1.14817E 00	5.66606E-01	1.02023E 00	6.22261E-01	2.78604E-01	4.73827E-01	5.74805E-01	4.68766E-01
1.28153E 00	1.33504E 00	1.33012E 00	2.03816E 00	1.39838E 00	2.15263E 00	2.26874E 00	2.28983E 00
3.12076E 00	4.70623E 00	4.96838E 00	5.28539E 00	4.89555E 00	4.67051E 00	3.95162E 00	2575448E 00
1.43137E 00	6.47184E-01	1.64258E-01					

Tabelle 1B: Normierte 43-Gruppen-Flüsse, WB 193 /32/

Region V

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

9.21701E-01	2.40010E 00	3.42370E 00	4.09501E 00	4.48922E 00	4.67575E 00	7.03298E 00	8.90932E 00
9.84172E 00	9.60196E 00	9.34377E 00	6.19413F 00	3.99348E 00	2.53663E 00	2.19394E 00	1.42954E 00
8.32455E-01	3.64007E-01	6.20795E-01	3.76080E-01	1.69960E-01	2.89257E-01	3.51641E-01	2.88023E-01
7.92301E-01	8.11003E-01	7.99825E-01	1.17759E 00	7.83500E-01	1.15927E 00	1.18497E 00	1.16723E 00
1.57578E 00	2.36297E 00	1.53524E 00	1.01044E 00	5.77612E-01	3.64055E-01	2.06205E-01	8.63883E-02
2.36826E-02	6.10832E-03	1.57913E-03					

Region VI

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

1.34512E 00	3.35030E 00	4.56603E 00	5.21526E 00	5.45520E 00	5.41599E 00	7.67572E 00	8.97304E 00
8.96692E 00	7.76809E 00	6.56178E 00	3.76249E 00	2.14189E 00	1.251175 00	1.05699E 00	7.67157E-01
5.85212E-01	3.29986E-01	6.75312E-01	4.43910E-01	2.06283E-01	3.56012E-01	4.36696E-01	3.58953E-01
1.00300E-00	1.03217E 00	1.02851E 00	1.53065F 00	1.02989E 00	1.54573E 00	1.61410E 00	1.62464E 00
2.24047E 00	3.45687E 00	2.34668E 00	1.61388E 00	9.65687E-01	6.36231E-01	3.84959E-01	1.83729E-01
6.63732E-02	3.13971E-02	1.12113E-03					

Region VII

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

1.15118E 00	3.16553E 00	4.55645E 00	5.38499E 00	5.76785E 00	5.82817E 00	8.39977E 00	9.98209E 00
1.01186E 01	8.87422E 00	7.57172E 00	4.36641F 00	2.48616E 00	1.44383E 00	1.20084E 00	8.44557E-01
6.20146E-01	3.40994E-01	6.84551E-01	4.41577E-01	2.02538E-01	3.47221E-01	4.20977E-01	3.41924E-01
9.40244E-01	9.49306E-01	9.26554E-01	1.34949F 00	8.77930E-01	1.25471E 00	1.21587E 00	1-13399E 00
1.44997E 00	2.01880E 00	1.32693E 00	8.83041E-01	5.10439E-01	3.24970E-01	1.86331E-01	7.94680E-02
2.24596E-02	5.94751E-03	1.54319E-03					

Region VIII

The critical group fluxes (Sum is equal to 100)

1.76995E-01	4.89887E-01	7.45108E-01	9.51223E-01	1.11488E 00	1.24202E 00	2.03477E 00	2.70468E 00
3.73097E 00	4.37048E 00	5.33706E 00	4.59803E 00	3.82898E 00	3.12010E 00	3.56896E 00	3.21416E 00
2.43957E 00	1.15249E 00	1.75959E 00	8.73573E-01	3.69173E-01	5.95172E-01	6.98536E-01	5.63259E-01
1.52793E 00	1.36874E 00	1.17174E 00	1.52129E 00	8.38888E-01	1.65189E 00	2.52733E 00	3.73951E 00
7.54733E 00	1.88482E 01	6.34519E 00	2.16035E 00	6.17814E-01	2.08223E-01	4.61632E-02	4.23049E-05
1.24280E-05	3.40275E-06	8.87046E-07					

Eingruppenflüsse (Zone) $[1/\text{cm}^2\text{sec}]$

Stromröhre 1

0.42423E 14 0.90868E 14 0.92982E 15 0.15398E 15 0.16173E 15 0.13002E 15

Stromröhre 2

0.31317E 14 0.66278E 14 0.97521E 14 0.12430E 14 0.14502E 15 0.15755E 15
0.15725E 15 0.14372E 15 0.96441E 14

Stromröhre 3

0.22797E 14 0.36541E 14 0.60831E 14 0.77374E 14 0.99769E 14 0.12400E 15
0.14205E 15 0.15212E 15 0.15642E 15 0.15140E 15 0.14271E 15 0.12368E 15
0.81967E 14

Stromröhre 4

0.20968E 14 0.33846E 14 0.55024E 14 0.64678E 14 0.80652E 14 0.31667E 14
0.10111E 15 0.11627E 15 0.12327E 15 0.13517E 15 0.14016E 15 0.14768E 15
0.15112E 14 0.15091E 15 0.14806E 15 0.14211E 15 0.13841E 15 0.13224E 15
0.12474E 15 0.11056E 15 0.91935E 14 0.64800E 14

Stromröhre 5

0.17972E 14 0.27428E 14 0.40773E 14 0.53435E 14 0.44146E 14 0.76645E 14
0.82630E 14 0.81698E 14 0.09796E 14 0.10312E 14 0.10509E 15 0.11061E 15
0.11593E 15 0.11759E 15 0.11906E 15 0.12031E 15 0.12157E 15 0.12485E 15
0.12535E 15 0.12683E 15 0.12822E 15 0.12931E 15 0.12780E 15 0.12686E 15
0.12611E 15 0.12528E 15 0.12436E 15 0.12333E 15 0.12218E 15 0.12050E 15
0.11727E 15 0.11505E 15 0.11461E 15 0.11307E 15 0.11118E 15 0.10748E 15
0.10484E 15 0.10351E 15 0.10394E 15 0.10196E 15 0.98647E 14 0.95218E 15
0.93965E 14 0.95751E 14 0.94542E 14 0.91686E 14 0.91208E 14 0.31148E 14
0.88585E 14 0.78432E 14

FEFL.-Flüsse:

Zone: 101 0.28348E 14 1/(CM**2*S)
Zone: 102 0.47199E 14 1/(CM**2*S)
Zone: 103 0.87362E 13 1/(CM**2*S)
Zone: 104 0.11665E 14 1/(CM**2*S)
Zone: 105 0.10077E 14 1/(CM**2*S)
Zone: 106 0.94974E 14 1/(CM**2*S)
Zone: 107 0.11934E 15 1/(CM**2*S)

Tabelle 2: Eingruppenflüsse für insgesamt 107 Core- und Reflektorzonen des AVR-Versuchsreaktors, WB 193, /32/.

5.1.1 Modifizierung der Flußwerte

Da die im Rechenprogramm zum Tritium-Haushalt verwandten Wirkungsquerschnitte auf 2 Energiebereiche mit $E \leq 2.38$ eV und $E > 2.38$ eV bezogen sind, ist es erforderlich, die zur Verfügung stehenden Neutronenflußdaten, die in den Tabellen 1 A, 1 B und 2 aufgeführt sind, derart umzuwandeln, daß für jede Region ein mittlerer Zweigruppenfluß der oben genannten Energiebereiche entsteht. Für die Kugelcore-Bereiche wird hierzu zunächst aus den Eingruppenflüssen der verschiedenen Zonen (Tabelle 2), die zur jeweiligen Region gehören, der mittlere Eingruppenfluß für diese Region bestimmt:

$$\bar{\phi}_{\text{Eingr.}} = \frac{1}{V_R} \sum_i \phi_{\text{Eingr. } i} V_i$$

$\bar{\phi}_{\text{Eingr.}}$ mittlerer Eingruppenfluß der Region ($0 < E < \infty$)

$V_R; V_i$ Volumen der Region bzw. Zone

$\phi_{\text{Eingr. } i}$ Eingruppenfluß der Zone i

Die in dieser Rechnung benötigten Zonenvolumina sind - wie bereits beschrieben - innerhalb jeder Stromröhre gleich:

Stromröhre	zugehörige Zonen	Zonenvolumen V_i [cm ³]
1	1 ... 6	0.6843 E + 06
2	7 ... 15	0.3107 E + 06
3	16 ... 28	0.1132 E + 06
4	29 ... 50	0.1296 E + 06
5	51 ... 100	0.1309 E + 06

Für die Reflektorbereiche kann der entsprechende Eingruppenfluß direkt aus Tabelle 2 entnommen werden.

Der mittlere Zweigruppenfluß der Region ergibt sich nun dadurch, daß der mittlere Eingruppenfluß entsprechend den normierten Flußverteilungswerten aufgeteilt wird. Da die Energie 2.38 eV in den Bereich $1.9 \text{ eV} < E < 3.05 \text{ eV}$ fällt und damit in der 25. Gruppe liegt, wird der zugehörige normierte Flußwert entsprechend linear aufgeteilt:

$$\Phi_{\text{rel}_s} = \sum_{j=1}^{24} \Phi_{\text{rel}_j} + \Phi_{\text{rel}_{25}} \frac{2,38 - 1,9}{3,05 - 1,9} \text{ für } E \leq 2,38 \text{ eV}$$

$$\Phi_{\text{rel}_f} = \sum_{j=26}^{43} \Phi_{\text{rel}_j} + \Phi_{\text{rel}_{25}} \frac{3,05 - 2,38}{3,05 - 1,9} \text{ für } E > 2,38 \text{ eV}$$

Tabelle 3 zeigt die so ermittelten Flußwerte für die Wiederbeladung 193. Hierbei ist zu beachten, daß das den Betriebsrechnungen zugrunde liegende Volumen im Reflektorbereich nicht mit dem tatsächlichen Volumen der Graphit- und Kohlesteineinbauten übereinstimmt.

Für die Betriebsrechnungen sind Decken-, Boden- und Seitenreflektor nur in dem Maße von Bedeutung, wie sie Neutronen moderieren oder reflektieren. Losgelöst von der geometrischen Struktur kann somit basierend auf Rechnungen /19/ ein wirksamer Reflektorbereich abgegrenzt bzw. ein Reflektor simuliert werden. Zur Vermeidung von Rechnungen, die sich auf den Gasraum oberhalb der Kugelschüttung beziehen, wird beispielsweise ein aufliegender 7.5 cm dicker Deckenreflektor angepaßt, der den gleichen Reaktivitätsbeitrag liefert wie die Originalkonstruktion. Ab 1979 stehen für die Betriebsrechnungen Programme zur Verfügung, die direkt von der Realgeometrie ausgehen und somit zu einer noch höheren Rechengenauigkeit führen /33/.

Das den Reflektorregionen 5 ... 8 in Tabelle 3 zugewiesene Volumen entspricht somit nicht dem realen Wert. Für die Berechnungen der Tritiumquellen jedoch muß der gesamte Reflektorbereich ausgewertet werden, da die Quellstärke wesentlich durch den Abbrand der Tritium-Lieferanten bestimmt wird. Unter der Voraussetzung, daß der Neutronenfluß außerhalb des wirksamen Reflektorbereiches vernachlässigbar klein ist, ergibt sich der auf dem tatsächlichen Volumen der Region basierende Fluß zu:

$$\bar{\Phi}^* = \frac{\bar{\Phi} \cdot V_R}{V_R^*}$$

$\bar{\Phi}$	mittlerer Neutronenfluß der Region bei Volumen V_R
$\bar{\Phi}^*$	mittlerer Neutronenfluß der Region bei Volumen V_R^*
V_R	wirksames Reflektorvolumen der Region
V_R^*	reales Reflektorvolumen der Region

Region	V_R [cm ³]	$\sum_i \phi_{\text{Eingr.}i} V_i$ [cm/sec]	$\bar{\phi}_{\text{Eingr.}}$ [1/cm ² sec]	$\phi_{\text{rel} s}$	$\phi_{\text{rel} f}$	$\bar{\phi}_s$ [1/cm ² sec]	$\bar{\phi}_f$ [1/cm ² sec]
1	4.6014 E06	4.78699 E20	1.040335 E14	55.590056	44.410333	5.783228 E13	4.620162 E13
2	2.3007 E06	3.231947 E20	1.404747 E14	54.553354	45.447044	7.663475 E13	6.384251 E13
3	5.0788 E06	4.665176 E20	9.185587 E13	49.827664	50.172813	4.576963 E13	4.608667 E13
4	5.7890 E06	5.902444 E20	1.019597 E14	49.984128	50.015583	5.096367 E13	5.099574 E13
5	2.0479 E07		2.8348 E13	84.705815	15.294979	2.401240 E13	4.335821 E12
6	2.4897 E06		4.7129 E13	78.084155	21.916335	3.680028 E13	1.032895 E13
7	3.6768 E06		8.7362 E12	84.935045	15.065543	7.420095 E12	1.316156 E12
8	5.3014 E05		1.0077 E13	50.517411	49.482902	5.090064 E12	4.986392 E12

V_R : V_i
 $\bar{\phi}_{\text{Eingr.}}$
 $\phi_{\text{Eingr.}i}$
 $\phi_{\text{rel} s}$
 $\phi_{\text{rel} f}$
 $\bar{\phi}_s$
 $\bar{\phi}_f$

den Betriebsrechnungen zugrunde liegendes Volumen der Region bzw. der Zone
 mittlerer Eingruppenfluß der Region ($0 < E < \infty$); $\bar{\phi}_{\text{Eingr.}} = \frac{1}{V_R} \sum_i \phi_{\text{Eingr.}i} V_i$
 Eingruppenfluß der Zone i ($0 < E < \infty$)

relativer Fluß, normiert auf 100 im Energiebereich $E \leq 2.38$ eV
 relativer Fluß, normiert auf 100 im Energiebereich $E > 2.38$ eV
 mittlerer Neutronenfluß der Region im Energiebereich $E \leq 2.38$ eV, $\bar{\phi}_s = \phi_{\text{rel} s} \cdot \bar{\phi}_{\text{Eingr.}}$
 mittlerer Neutronenfluß der Region im Energiebereich $E > 2.38$ eV, $\bar{\phi}_f = \phi_{\text{rel} f} \cdot \bar{\phi}_{\text{Eingr.}}$

Tabelle 3: Ermittlung des mittleren Zweigruppen-Neutronenflusses
 der Regionen, WB 193

Bezogen auf das reale Reflektorvolumen ergibt sich somit:

Region	$\bar{\phi}_s$ [1/cm ² sec]	$\bar{\phi}_f$ [1/cm ² sec]	V_R [cm ³]	$\bar{\phi}_s$ [1/cm ² sec]	$\bar{\phi}_f$ [1/cm ² sec]
5	2.401240 E13	4.335821 E12	7.074 E07	6.952 E12	1.255 E12
6	3.680028 E13	1.032895 E13	4.282 E06	2.140 E13	6.008 E12
7	7.420095 E12	1.316156 E12	6.636 E06	4.111 E12	7.292 E11
8	5.090640 E12	4.986392 E12	4.569 E07	8.466 E11	8.293 E11

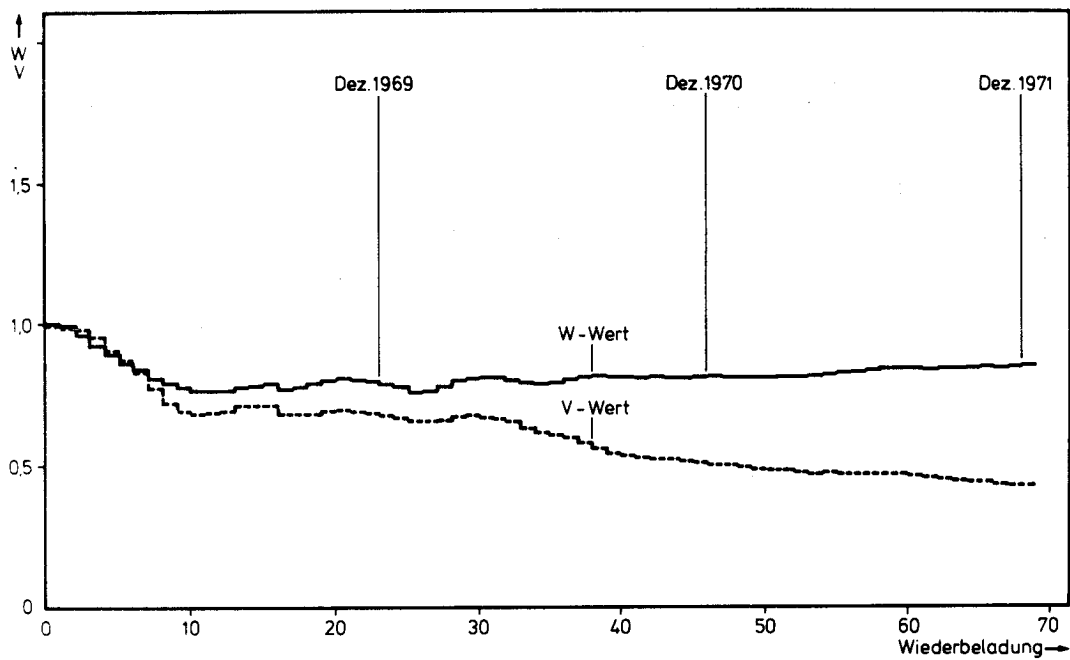
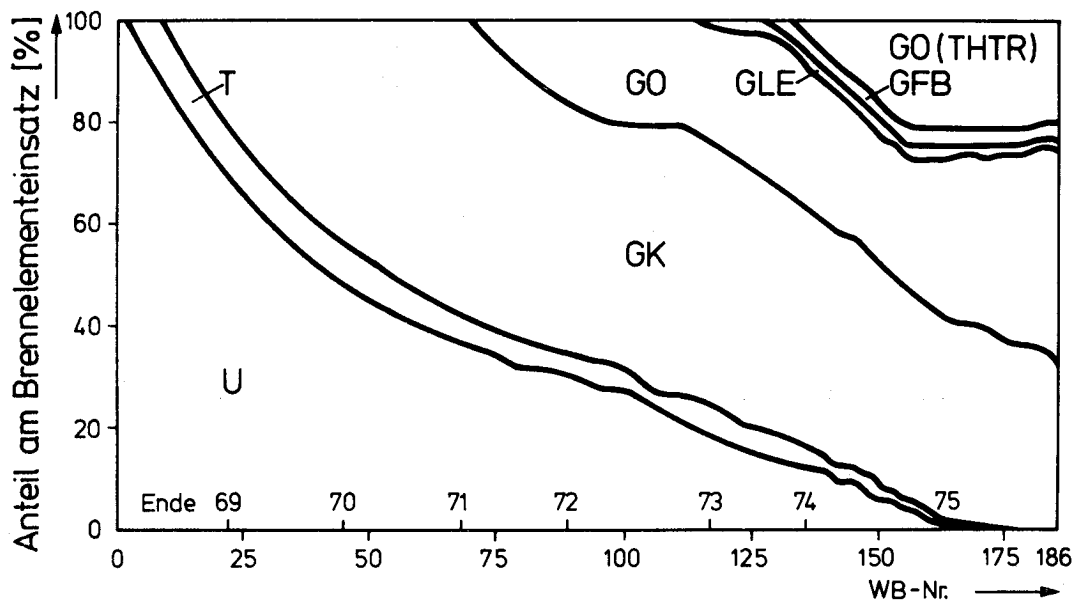
5.2 Brennelement, Bor- und Graphitkugelverteilung

Der Reaktor durchläuft von Betriebsbeginn an verschiedene Phasen, in denen das Erstcore in das Gleichgewichtscore überführt wird. Dies geschieht auf der Basis einer genauen Beschickungsstrategie, die wiederum aus den Betriebsrechnungen abgeleitet wird. Kugeln können durch eine Bodenöffnung abgezogen, ausgeschieden oder gemeinsam mit frischen Elementen auf 2 verschiedenen Radien - entsprechend Innencore und Außencore - wieder zugeführt werden (siehe Abbildung 5).

5.2.1 Ermittlung der Kugelverteilung auf Innen- und Außencore

Die Corezusammensetzung zum jeweiligen Jahresende geht in der Regel direkt aus den Jahresberichten des AVR /23-31/ hervor. Für den Zeitraum vom Erstcore bis zur Wiederbeladung 22 (Jahresende 1969) müssen die entsprechenden Werte unter Zugrundelegung der folgenden Voraussetzungen ermittelt werden:

- Die Anteile der verschiedenen Brennelemente ergeben sich aus der graphischen Darstellung Abb. 11 /30/ durch Umwandlung der relativen Zahlen in Absolutwerte.
- Für die Aufteilung der Kugeln auf das Innen- bzw. Außencore wird der in Abbildung 12 /25/ dargestellte Verlauf der Variablen W modifiziert, die das Verhältnis der mittleren Brennelementdichten der beiden Corebereiche im Sinne einer Verdünnung mit Graphit- und Borkugeln angibt.



$$W = \frac{n_{IC}}{n_{AC}} \cdot \frac{V_{AC}}{V_{IC}}$$

$$W = \frac{n_{IC}}{n_{AC}} \cdot \frac{(R_{AC}^2 - R_{IC}^2) \pi H}{R_{IC}^2 \pi H}$$

$$W = \frac{n_{IC}}{n_{AC}} \cdot \frac{R_{AC}^2 - R_{IC}^2}{R_{IC}^2}$$

n_{IC}	Brennelementanzahl Innencore
n_{AC}	Brennelementanzahl Außencore
V_{IC}	Volumen des Innencores
V_{AC}	Volumen des Außencores
R_{IC}	Begrenzungsradius des Innencores; $R_{IC} = 0.76 \text{ m}$
R_{AC}	Außenradius des Cores; $R_{AC} = 1.5 \text{ m}$
H	Höhe des Cores

Hieraus sind die Brennelementanzahlen für Innencore und Außencore bestimmbar.

Tabelle 4 zeigt die entsprechende Corezusammensetzung für die Jahre 1968 bis 1977; in der folgenden Abbildung 13 sind diese Werte graphisch dargestellt.

5.2.2 Kugelzusammensetzung der Regionen

Im September 1972 wurde das Zugabeverhältnis für Kugeln von Innencore (Rohr in Coremitte) zu Außencore (Rohre am Umfang) von 1:1 auf 2.66:1 im zeitlichen Mittel geändert, wodurch der Wirkungs- bzw. Einflußbereich des Zugaberohres in Coremitte erweitert wurde. Für das Verhalten des Reaktors entspricht dies einer Vergrößerung des Innencores vom Radius $r_{IC} = 0.76 \text{ m}$ auf ca. 1.00 m. Das radiale Temperaturprofil wird durch diese Maßnahme abgeflacht und die Spitzentemperaturen um ca. 100 °C gesenkt. Hierdurch wird es möglich, die thermische Leistung des Reaktors anzuheben, ohne die zulässigen Brennelementtemperaturen zu überschreiten, und die mittlere Gasaustrittstemperatur kann von 850 °C auf 950 °C gesteigert werden.

ERSTCORE		J A H R E S E N D E									
14.2.68		1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	
WB O		WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198	
Graphitkugeln	IC	14027	11189	9248	5572	1118	2803	853	1548	1892	60
	AC	53177	41010	29411	18475	9676	2057	1275	864	171	-
Borkugeln	IC	1100	1890	2370	2500	2500	2500	2500	2500	2500	75
	AC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UCC-BE; ATJ-Graphit	IC	6570	8618	8430	10530	10591	15030	11210	1040	-	-
der Union Carbide Corp.	AC	19020	18847	17403	14343	13335	1505	-	-	-	-
T-BE; Tapeten Brenn-	IC	-	-	2000	3095	1956	1738	2255	303	-	-
elemente	AC	-	3981	1733	408	1069	2881	1009	-	-	-
GK-BE; Gepreßte BE	IC	-	-	-	-	4562	10430	13704	21317	18363	24113
Karbidischer Brennstoff	AC	-	8359	23650	38971	35156	33763	28326	14562	11114	6700
GO-BE; Gepreßte BE	IC	-	-	-	-	970	3967	5952	9764	10788	11439
Oxidischer Brennstoff	AC	-	-	-	-	12961	15910	17706	17758	26109	30273
GO (THTR) -BE;	IC	-	-	-	-	-	-	-	-	2507	1043
THTR-Brennelemente	AC	-	-	-	-	-	-	3610	18855	15690	17508
GLE-BE; low enriched	IC	-	-	-	-	-	-	-	-	334	807
Brennelemente	AC	-	-	-	-	-	1310	2450	2325	1394	674
GFB-BE; Feed-Breed	IC	-	-	-	-	-	-	-	-	86	113
Brennelemente	AC	-	-	-	-	-	-	3050	3050	2935	2783
Innencore-Radius 0,76 m Innencore-Radius 1,0 m											
WB: Wiederbeladung											
IC: Innencore											
AC: Außencore											

Tabelle 4: Zusammensetzung des AVR-Cores für die Jahre 1968 bis 1977

Tabelle 4: Zusammensetzung des AVR-Cores für die Jahre 1968 bis 1977

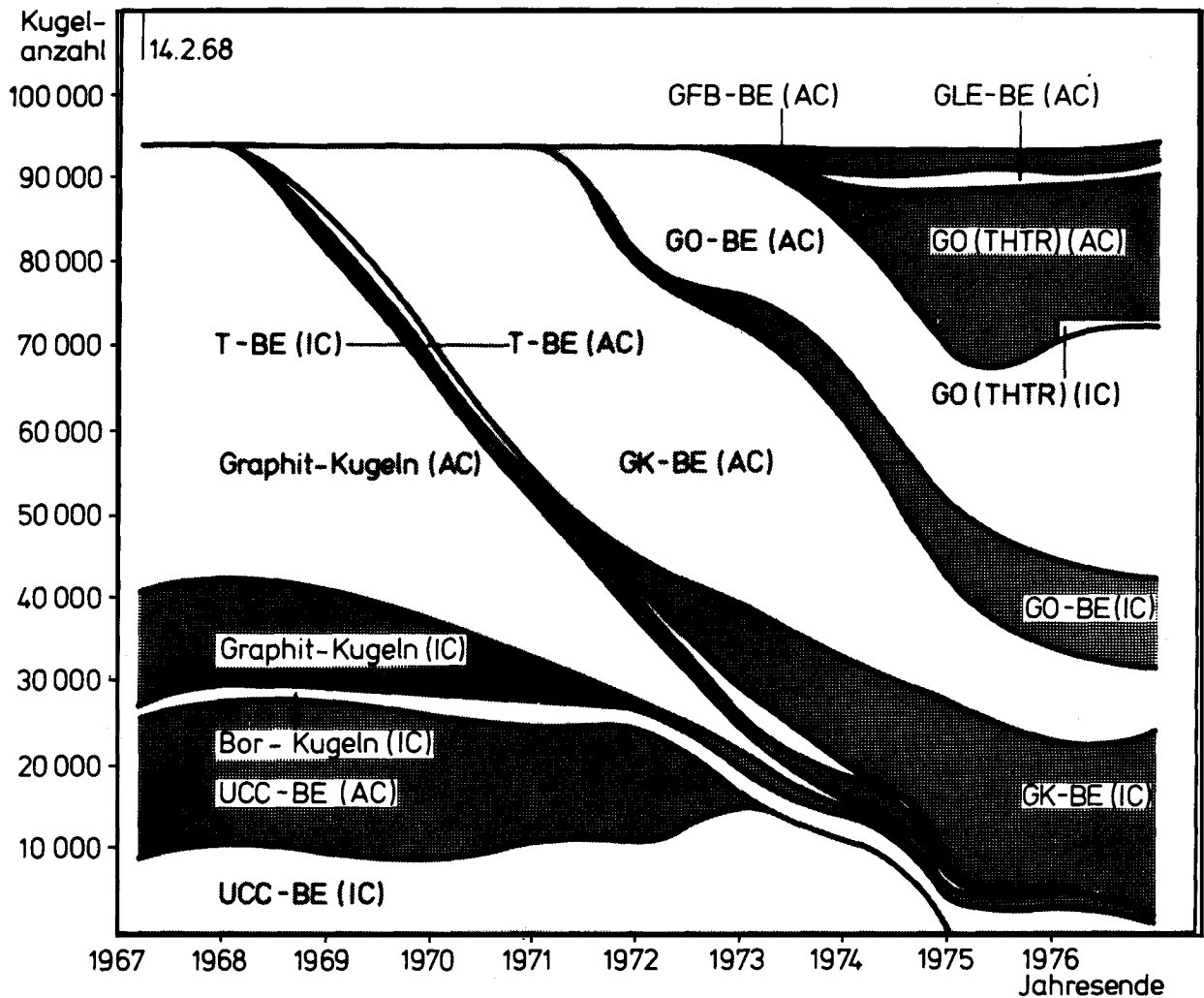


Abb.13: Graphit-, Bor- und Brennelementverteilung des AVR-Reaktors

Da die Coreregionen zur Schaffung einer einheitlichen Basis über den gesamten Berechnungszeitraum hinweg unverändert bleiben müssen, ist es notwendig, die in Tabelle 4 aufgeführten Kugelzusammensetzungen bis zum Jahresende 1972 zu modifizieren. Hierzu wird zunächst die Kugelmkonzentration des jeweiligen Kugeltyps (Kugeln pro Volumeneinheit) für das Außencore unter der Voraussetzung der homogenen Durchmischung bestimmt. Da sich das Volumen des Innencores von 3.99 m^3 auf 6.90 m^3 vergrößert, wird nun für das Innencore eine aus der Volumenvergrößerung und der zugehörigen Kugelmkonzentration zu errechnende Kugelzahl addiert und für das Außencore entsprechend subtrahiert. Tabelle 5 zeigt die so errechneten Werte.

Die Aufteilung der Kugeln des Innen- und Außencores auf die Regionen 1 und

2 bzw. 3 und 4 erfolgt über das jeweilige Volumen der Region. Voraussetzung ist somit auch hier eine homogene Durchmischung. Die Tabellen 6 bis 9 zeigen die so erhaltenen Kugelzahlen für die Coreregionen 1 bis 4.

ERSTCORE	J A H R E S E N D E									
	14.2.68	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977
	WB 0	WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198
Graphitkugeln	IC 25257	19849	15459	9473	3161					
	AC 41947	32350	23200	14574	7633					
Borkugeln	IC 1100	1890	2370	2500	2500					
	AC -	-	-	-	-					
UCC-BE; ATJ-Graphit der Union Carbide Corp.	IC 10587	12598	12105	13559	13407					
	AC 15003	14867	13728	11314	10519	W E R T E B L E I B E N				
T-BE; Tapeten Brenn- elemente	IC -	841	2366	3181	2182					
	AC -	3140	1367	322	843	U N V E R Ä N D E R T.				
CK-BE; Gepreßte BE Karbidscher Brennstoff	IC -	1765	4994	8230	11986					
	AC -	6594	18656	30741	27732	S I E H E T A B E L L E 4				
GO-BE; Gepreßte BE Oxidischer Brennstoff	IC -	-	-	-	3707					
	AC -	-	-	-	10224					
GO (THTR)-BE; THTR-Brennelemente	IC -	-	-	-	-					
	AC -	-	-	-	-					
GLE-BE; low enriched Brennelemente	IC -	-	-	-	-					
	AC -	-	-	-	-					
GFB-BE; Feed-Breed Brennelemente	IC -	-	-	-	-					
	AC -	-	-	-	-					

WB: Wiederbeladung

Tabelle 5: Zusammensetzung des AVR-Cores für die Jahre 1968 bis 1977 bezogen auf einen Innencore-Radius von 1,0 m

ERSTOORE	J A H R E S E N D E										
	14.2.68	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	
WB O	WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198		
Graphitkugeln	16838	13233	10306	6315	2107	1869	569	1032	1261	40	
Borkugeln	733	1260	1580	1667	1667	1667	1667	1667	1667	50	
UOC-BE; ATJ-Graphit der Union Carbide Com.	7058	8399	8070	9039	8938	10020	7473	693	-	-	
T-BE; Tapeten Brenn- elemente	-	561	1577	2121	1455	1159	1503	202	-	-	
GK-BE, Gepreßte BE Karbidscher Brennstoff	-	1177	3329	5487	7991	6953	9136	14211	12242	16075	
GO-BE, Gepreßte BE Oxidischer Brennstoff	-	-	-	-	2471	2645	3968	6509	7192	7626	
GO (THTR) -BE;											
THTR-Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	1671	695	
GLE-BE; low enriched Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	223	583	
GFB-BE; Feed-Breed Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	57	75	

Tabelle 6: Zusammensetzung der Core-Region I des AVR-Versuchsreaktors für die Jahre 1968 bis 1977 WB: Wiederbeladung

ERSTOORE	J A H R E S E N D E											
	14.2.68	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977		
	WB O	WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198		
Graphitkugeln	8419	6616	5153	3158	1054	934	284	516	631	20		
Borkugeln	367	630	790	833	833	833	833	833	833	25		
UCC-BE; ATJ-Graphit der Union Carbide Corp.	3529	4199	4035	4520	4469	5010	3737	347	-	-		
T-BE; Tapeten Brenn- elemente	-	280	789	1060	727	579	752	101	-	-		
GK-BE; Gepreßte BE Karbidscher Brennstoff	-	588	1665	2743	3995	3477	4568	7106	6121	8038		
GO-BE; Gepreßte BE Oxidischer Brennstoff	-	-	-	-	1236	1322	1984	3255	3596	3813		
GO (THTR)-BE; THTR-Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	836	348		
GLE-BE; low enriched Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	111	269		
GFB-BE; Feed-Breed Brennelemente	-	-	-	-	-	-	-	-	29	38		

Tabelle 7: Zusammensetzung der Core-Region II des AVR-Versuchsreaktors für die Jahre 1968 bis 1977 WB: Wiederbeladung

ERSTCORE	J A H R E S E N D E											
	14.2.68	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977		
WB O	WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198			
Graphitkugeln	19603	15118	10842	6811	3567	961	596	404	80	-		
Borkugeln	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
UCC-BE; ATJ-Graphit der Union Carbide Corp.	7011	6948	6415	5287	4916	703	-	-	-	-		
T-BE; Tapeten Brenn- elemente	-	1467	639	150	394	1346	472	-	-	-		
GK-BE; Gepreßte BE Karbidscher Brennstoff	-	3082	8718	14366	12960	15778	13237	6805	5194	3131		
GO-BE; Gepreßte BE Oxidischer Brennstoff	-	-	-	-	4778	7435	8274	8299	12201	14148		
GO (THTR) -BE; THTR-Brennelemente	-	-	-	-	-	-	1687	8811	7332	8182		
GLE-BE; low enriched Brennelemente	-	-	-	-	-	612	1145	1087	651	315		
GFB; Feed-Breed Brennelemente	-	-	-	-	-	-	1425	1425	1372	1301		

Tabelle 8: Zusammensetzung der Core-Region III des AVR-Versuchsreaktors für die Jahre 1968 bis 1977 WB: Wiederbeladung

ERSTOORE	J A H R E S E N D E											
	14.2.68	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977		
	WB O	WB 22	WB 45	WB 68	WB 89	WB 117	WB 136	WB 163	WB 186	WB 198		
Graphitkugeln	22344	17232	12358	7763	4066	1096	679	460	91	-		
Borkugeln	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
UOC-BE; ATJ-Graphit der Union Carbide Corp.	7992	7919	7313	6027	5603	802	-	-	-	-		
T-BE; Tapeten Brenn- elemente	-	1673	728	172	449	1535	537	-	-	-		
GK-BE; Gepreßte BE Karbidscher Brennstoff	-	3512	9938	16375	14772	17985	15089	7757	5920	3569		
GO-BE; Gepreßte BE Oxidischer Brennstoff	-	-	-	-	5446	8475	9432	9459	13908	16125		
GO (THTR) -BE; THTR-Brennelemente	-	-	-	-	-	-	1923	10044	8358	9326		
GLE-BE; low enriched Brennelemente	-	-	-	-	-	698	1305	1238	743	359		
GFB-BE; Feed-Breed Brennelemente	-	-	-	-	-	-	1625	1625	1563	1482		

Tabelle 9: Zusammensetzung der Core-Region IV des AVR-Versuchsreaktors für die Jahre 1968 bis 1977 WB: Wiederbeladung

6 BESTIMMUNG DES ABBRANDZUSTANDES DER TRITIUM-LIEFERANTEN

Das beim AVR angewendete Beschickungsprinzip des Mehrfach-Kugeldurchlaufes ist typisch für Thorium-Hochtemperaturreaktoren (THTR). Gegenüber Kugelhaufenreaktoren mit Einfach-Kugeldurchlauf (OTTO-Beschickung) ergibt sich zwangsläufig ein aufwendigeres Berechnungsverfahren, da der Abbrandzustand der in das Core zurückgeführten Kugeln in geeigneter Weise berücksichtigt werden muß. Für Rechnungen zum Tritium-Haushalt besteht die hiermit in Zusammenhang stehende Problematik darin, möglichst genaue Aussagen über Art und Menge der verschiedenen Tritium-Lieferanten in den einzelnen Kugel-coreregionen zu erhalten. Da sich während des Einsatzes im Reaktor die Anzahl der entsprechenden Tritium-Quellatome durch Neutronenreaktionen ständig verändert, müssen Art und Menge dieser Elemente zu bestimmten Stützzeiten bestimmt werden. Statistische Verfahren können hierzu nicht herangezogen werden, da der Beschickungsprozeß zu keiner Zeit sich selbst überlassen bleibt. Vielmehr wird in einem Regelkreis die Kugelzusammensetzung durch Eingriffe von außen fortlaufend überwacht und verändert. Die Meßdaten des Reaktors liefern in Verbindung mit den Betriebsrechnungen Aussagen über den Ist-Zustand, der dann Ausgangsbasis für eine entsprechende Beschickungsstrategie ist. Im Rahmen dieser Betriebsrechnungen werden auch für die verschiedenen Kugeltypen mittlere Neutronendosen berechnet, die wichtige Informationen über den bis zu dem entsprechenden Zeitpunkt erfolgten Einsatz im Reaktor beinhalten. Die Dosis ist abhängig von der Verweilzeit im Core und dem entsprechenden zeitlichen Flußverlauf, wobei dieser wiederum unter anderem eine Funktion der Absinkbahn der Kugel ist, da ein räumliches Flußprofil durchwandert wird.

Sollten Dosiswerte nicht zur Verfügung stehen, so wie dies bei Vorausrechnungen der Fall sein wird, so ist es für die Anwendung des hier vorgestellten Rechenprogramms zunächst erforderlich, diese Daten ausgehend vom Kugeldurchlaufverfahren auf der Basis des Beschickungsplanes und des räumlichen Flußverlaufes zu ermitteln. Es ist jedoch vorgesehen, daß diese Arbeit bereits in der nächsten Ausbaustufe durch das Programm selbst übernommen wird.

Grundkonzept der Rechnungen zur Tritium-Problematik im Kugelcorebereich ist somit die Ermittlung der Tritium-Produktion ausgehend von der Anzahl

der verschiedenen Tritium-liefernden Atome in der Region zu bestimmten Stützzeiten. Hierbei ergibt sich die Anzahl der Tritium-Quellatome aus der Kugelzusammensetzung und den jeweiligen Neutronendosen der verschiedenen Kugeltypen.

6.1 Dateneingabe

Das Programm verlangt eine sequentielle Eingabe der Daten, die dann ausgehend von der Struktur und weiteren Verwendung in Variablen doppelter Genauigkeit oder entsprechenden Feldern, die Teile eines Common-Bereiches sein können, abgespeichert werden. Das Einlesen erfolgt in der Regel an der Stelle, wo die Abarbeitung des Programms die Bereitstellung der Daten verlangt. Im folgenden wurden der Übersicht halber entgegen der sich hieraus ergebenden Eingabefolge die in den Tabellen 10 bis 16 gezeigten Daten gemäß der aufgeführten Einteilung zusammengestellt:

- kugelbezogene Daten
- Corezusammensetzung
- zeitbezogene Daten
- Neutronendosis, Neutronenfluß

Die Wiederbeladungszahl stellt hierbei - wie bereits beschrieben - einen modifizierten Zeitmaßstab dar. Es gibt:

Wiederbeladungszahl	Datum
0	14.02.68
22	31.12.69
45	31.12.70
68	31.12.71
89	31.12.72
117	31.12.73
136	31.12.74
163	31.12.75
186	31.12.76
198	31.12.77

1	2	3	4	5	6
1	GRAPHIT	193.600	0.500	0.408	0.000
2	BOR	193.600	0.500	0.000	0.000
3	ICC-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
4	I-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
5	GK-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
6	GO-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
7	GO(THTR)-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
8	GLF-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
9	GFB-BE	190.700	0.500	0.050	0.000
7	8	9	Spalte:		
0	3.530 01	0.00	1	Kugeltyp -Nr.	
22	7.390 00	0.00	2	Bezeichnung der Kugel	
45	4.370 00	0.00	3	Masse der Kugel [g]	
68	3.350-01	0.00	4	Anteil Lithium [ppm]	
89	2.630-02	0.00	5	Anteil Bor [ppm]	
117	6.830-04	0.00	6	Anteil Beryllium [ppm]	
136	1.890-04	0.00	7	Wiederbeladungszahl	
163	9.250-06	0.00	8	Boreinsatz Innencore [g]	
186	1.340-06	0.00	9	Boreinsatz Außencore [g]	
198	0.00	0.00			

Tabelle 10 : Zusammenstellung kugelbezogener Daten des AVR

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Region I	16838	733	7058	0	0	0	0	0	0	0
	13233	1260	8399	561	1177	0	0	0	0	0
	10306	1580	8070	1577	3329	0	0	0	0	22
	6345	1667	9039	2121	5487	0	0	0	0	45
	2107	1667	8938	1455	7991	2471	0	0	0	68
	1869	1667	10020	1159	6553	2645	0	0	0	89
	569	1667	7473	1503	9136	3968	0	0	0	117
	1032	1667	653	202	14211	4509	0	0	0	136
	1261	1667	0	0	12242	7192	1671	223	57	163
	40	50	0	0	16075	7626	695	538	75	186
Region II	8419	367	3525	0	0	0	0	0	0	0
	6616	630	4199	280	588	0	0	0	0	22
	5153	750	4035	789	1665	0	0	0	0	45
	3158	833	4520	1060	2743	0	0	0	0	68
	1054	833	4469	727	3995	1236	0	0	0	89
	934	835	5010	579	3477	1322	0	0	0	117
	284	833	3737	752	4568	1984	0	0	0	136
	516	833	347	101	7106	3255	0	0	0	163
	631	833	0	0	6121	3596	836	111	29	186
	20	25	0	0	8038	3813	348	269	38	198
Region III	19603	0	7011	0	0	0	0	0	0	0
	15118	0	6948	1467	3082	0	0	0	0	22
	10842	0	6415	539	8718	0	0	0	0	45
	6811	0	5287	150	14366	0	0	0	0	68
	3567	0	4516	394	12960	4778	0	0	0	89
	961	0	703	1346	15778	7435	0	612	0	117
	596	0	0	472	13237	8274	1687	1145	1425	136
	404	0	0	0	6805	8299	8811	1087	1425	163
	80	0	0	0	5194	12201	7332	651	1372	186
	0	0	0	0	3131	14148	8182	315	1301	198
Region IV	22344	0	7992	0	0	0	0	0	0	0
	17232	0	7919	1673	3512	0	0	0	0	22
	12358	0	7343	728	5938	0	0	0	0	45
	7763	0	6027	172	16375	0	0	0	0	68
	4066	0	5602	449	14772	5446	0	0	0	89
	1096	0	802	1535	17985	8475	0	698	0	117
	679	0	0	537	15089	9432	1923	1305	1625	136
	460	0	0	0	7757	9459	10044	1238	1625	163
	91	0	0	0	5920	13908	8358	743	1563	186
	0	0	0	0	3569	16125	5326	359	1482	198

Spalte 1...9 : Kugelhyp - Nr. 1...9 (Schlüssel siehe Tabelle 10)
 Spalte 10 : Wiederbeladungszahl

Tabelle 11: Zusammensetzung der Kugelcore - Regionen

Tabelle 12 : Auflistung der Stützzeiten

1	2	3	4	5
0	2	14	68	410.000
22	12	31	69	1096.000
45	12	31	70	1461.000
68	12	31	71	1826.000
89	12	31	72	2192.000
117	12	31	73	2557.000
136	12	31	74	2922.000
163	12	31	75	3287.000
186	12	31	76	3653.000
198	12	31	77	4018.000

Spalte:

1	Wiederbeladungszahl	
2	Monat	} Datum der Stützzeit
3	Tag	
4	Jahr	
5	Zeitdifferenz zwischen dem angegebenen Datum und dem 1.1.1967	

Tabelle 13 : Stillstandzeiten des Reaktors

1	2	Spalte:	
0	0.000	1	Wiederbeladungszahl
22	166.000	2	Anzahl der Stillstands -
45	61.000		tage des AVR jeweils
68	79.000		zwischen 2 Stützzeiten
89	88.000		
117	47.000		
136	105.000		
163	48.000		
186	32.000		
198	157.000		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
5.330 21	5.330 21	5.330 21	4.090 21	1.660 21	0.00	0.00	0.00	0.00	22
8.330 21	8.330 21	8.330 21	6.400 21	2.600 21	0.00	0.00	0.00	0.00	45
1.000 22	1.000 22	1.000 22	9.600 21	4.200 21	0.00	0.00	0.00	0.00	68
1.390 22	1.390 22	1.390 22	1.190 22	6.530 21	1.070 21	0.00	0.00	0.00	89
1.720 22	1.720 22	1.720 22	7.000 21	8.670 21	3.730 21	0.00	1.600 20	0.00	117
1.910 22	1.910 22	1.910 22	7.660 21	1.060 22	4.730 21	0.00	2.130 21	3.700 20	136
2.200 22	2.200 22	2.200 22	8.730 21	1.330 22	6.130 21	0.00	5.380 21	3.750 21	163
2.480 22	2.480 22	0.00	0.00	1.600 22	5.750 21	5.590 21	8.710 21	6.940 21	186
2.760 22	2.760 22	0.00	0.00	1.780 22	5.670 21	7.230 21	1.030 22	8.770 21	198

Spalte 1...9 : Mittlere Neutronendosen ($0 < E < \infty$) zu den Stützzeiten für die Kugeltypen 1...9 des AVR

Spalte 10 : Wiederbeladungszahl

Tabelle 14 : Auflistung der Neutronendosen der verschiedenen Kugeltypen
als Funktion der Wiederbeladungszahl

Tabelle 15 : Mittlere Flüsse im AVR - Core als Funktion der Wiederbeladungszahl

1	2	3
0	9.600 13	6.000 13
22	9.600 13	6.000 13
45	8.200 13	5.600 13
68	7.530 13	5.510 13
89	7.030 13	5.430 13
117	6.480 13	5.280 13
136	6.210 12	5.330 13
163	5.680 13	5.260 13
186	5.590 13	5.260 13
198	5.410 13	5.260 13

Spalte:

1 Wiederbeladungszahl

2 Mittlerer Fluß langsamer Neutronen bezogen auf das Gesamtcore ($E \leq 2,38 \text{ eV}$)

3 Mittlerer Fluß schneller Neutronen bezogen auf das Gesamtcore ($E > 2,38 \text{ eV}$)

Tabelle 16 : Mittlere Neutronenflüsse der Regionen auf der Basis Wiederbeladung 193

1	2	3
1	5.780 13	4.620 13
2	7.660 13	6.380 13
3	4.580 13	4.610 13
4	5.100 13	5.100 13
5	6.950 12	1.250 12
6	2.140 13	6.000 12
7	4.110 12	7.290 11
8	8.460 11	8.290 11

Spalte:

1 Nummer der Region

2 Mittlerer Fluß langsamer Neutronen bezogen auf die Region ($E \leq 2,38 \text{ eV}$)

3 Mittlerer Fluß schneller Neutronen bezogen auf die Region ($E > 2,38 \text{ eV}$)

6.2 Einlagerungszeitpunkt der verschiedenen Kugeltypen

Der Ablauf der Rechnungen zur Ermittlung der Anzahl vorhandener Tritium-Quellatome in den einzelnen Kugelcoreregionen läßt sich wie folgt aufteilen:

- Bestimmung eines fiktiven Einlagerungsdatums, das sich auf die jeweilige Stützzeit bezieht und für alle Kugeln des betreffenden Typs gilt.
- Berechnung der Quellatomzahlen zu den Stützzeiten aus der Kugelzusammensetzung der Region, wobei der Abbrand der Kugeln bezüglich Tritium-Lieferanten ausgehend vom Einlagerungsdatum in geeigneter Weise berücksichtigt wird.

Da es nicht möglich ist, Messungen an Kugeln unmittelbar im Core durchzuführen, müssen quantitative Aussagen über die empfangene Neutronenstrahlung der Kugeln auf theoretischer Basis gewonnen werden. Hierzu ist es wichtig, die Vorgeschichte jeder Kugel zu kennen, da bedingt durch den Mehrfach-Kugeldurchlauf die Möglichkeit besteht, daß das Core wiederholt auf verschiedenen Bahnkurven durchwandert wird, wodurch im Extremfall jede Kugel einen anderen Abbrandzustand aufweisen kann. Folgende Reaktordaten stehen für die rechnerische Erfassung des Abbrand-Umwälzprozesses zur Verfügung:

- Zusammensetzung des Erstcores
- Anzahl der von Betriebsbeginn an entnommenen Kugeln und Aufschlüsselung nach Kugeltyp und Abbrandzustand
- Anzahl der dem Core frisch zugeführten bzw. rückgeführten Kugeln als Funktion des Abbrandzustandes und der Zugaberadien
- Leistungszustand des Reaktors

Im Rahmen der Betriebsrechnungen wird aus diesen Daten für jeden Kugeltyp neben anderen Abbrandkennwerten die Neutronendosis für einen Eingruppenfluß als repräsentativer auf die Kugelanzahl des betreffenden Typs bezogener Mittelwert bestimmt. Zu jeder Stützzeit stehen somit für die verschiedenen Kugeltypen Dosiswerte zur Verfügung. Tabelle 14 zeigt die entsprechende Auflistung für den AVR.

Weil die Ermittlung der Anzahl vorhandener Tritium-Quellatome in den Kugelcoreregionen jeweils zu den Stützzeiten erfolgt und dadurch der Istzustand

des Reaktors bezüglich Tritium-Lieferanten festgestellt und in die Rechnungen einbezogen wird, sind diese Zeitpunkte sehr wichtig. Die Genauigkeit hängt demnach in starkem Maße davon ab, wie dicht das Netz der Stützzeiten gelegt werden kann.

Abbildung 14 zeigt den Programmablauf zur Ermittlung des Einlagerungsdatums, der im folgenden erläutert wird. Der Einfachheit und Übersichtlichkeit wegen wurde bei allen Ablaufplänen auf Feldindizierungen, genauen Angaben zu DO-Schleifen, Umspeicherungen etc. verzichtet, sofern diese nicht unbedingt zum Verständnis erforderlich sind.

Geht man von einem Kugeltyp und einer Stützzeit aus, so wird zunächst unter Berücksichtigung der Reaktorstillstandszeiten (Tabelle 13) die Bestrahlungsdauer der Kugeln zwischen der vorangegangenen und der jeweils betrachteten Stützzeit ermittelt (Variable TAG). Hieraus ergibt sich in Verbindung mit dem auf das Gesamtcare bezogenen Eingruppenfluß die empfangene Neutronendosis des Kugeltyps für den betrachteten Zeitraum (Variable Dosis). Subtrahiert man diesen Wert von der betreffenden, in Tabelle 14 aufgelisteten Neutronendosis (Variable DOS1), die den Bestrahlungszustand der Kugeln des betrachteten Types zum Stützzeitpunkt widerspiegelt, so zeigt sich, ob das Einlagerungsdatum in den Zeitraum zwischen den beiden betrachteten Zeitpunkten fällt. Ergibt sich eine Differenz kleiner Null, so ist dies der Fall, und es können Bestrahlungsdauer (Variable TAG1), der relative Einlagerungstag (Variable RETA1) sowie das entsprechende Datum (Variablen IMON1, ITAG1, IJAHR1) bestimmt werden. Ist die Differenz größer Null, so wird das beschriebene Verfahren in einer Schleife so oft ausgehend von dem sich jeweils neu ergebenden Dosiswert (Variable DOS2) wiederholt, bis die Differenz schließlich kleiner Null wird und damit das Zeitintervall der Stützzeiten gefunden ist, in die das Einlagerungsdatum fällt. Tabelle 17 zeigt im oberen Teil eine Auflistung der errechneten relativen Einlagerungstage; im unteren Teil ist das zugehörige Datum aufgeführt.

Weil die Errechnung des Einlagerungsdatums auf einen Mittelwert bezüglich der Kugelanzahl aufbaut, muß in weiteren Rechnungen so verfahren werden, als ob zu diesem Zeitpunkt alle Kugeln des betreffenden Typs eingebracht worden seien. In Wirklichkeit jedoch können neben Kugeln aus dem Erstcore auch frische Elemente vorhanden sein, so daß die einzelnen Einlagerungsdaten stark streuen. Das errechnete Datum, repräsentativ für alle Kugeln eines Typs, stellt somit einen Fiktiv-Wert dar.

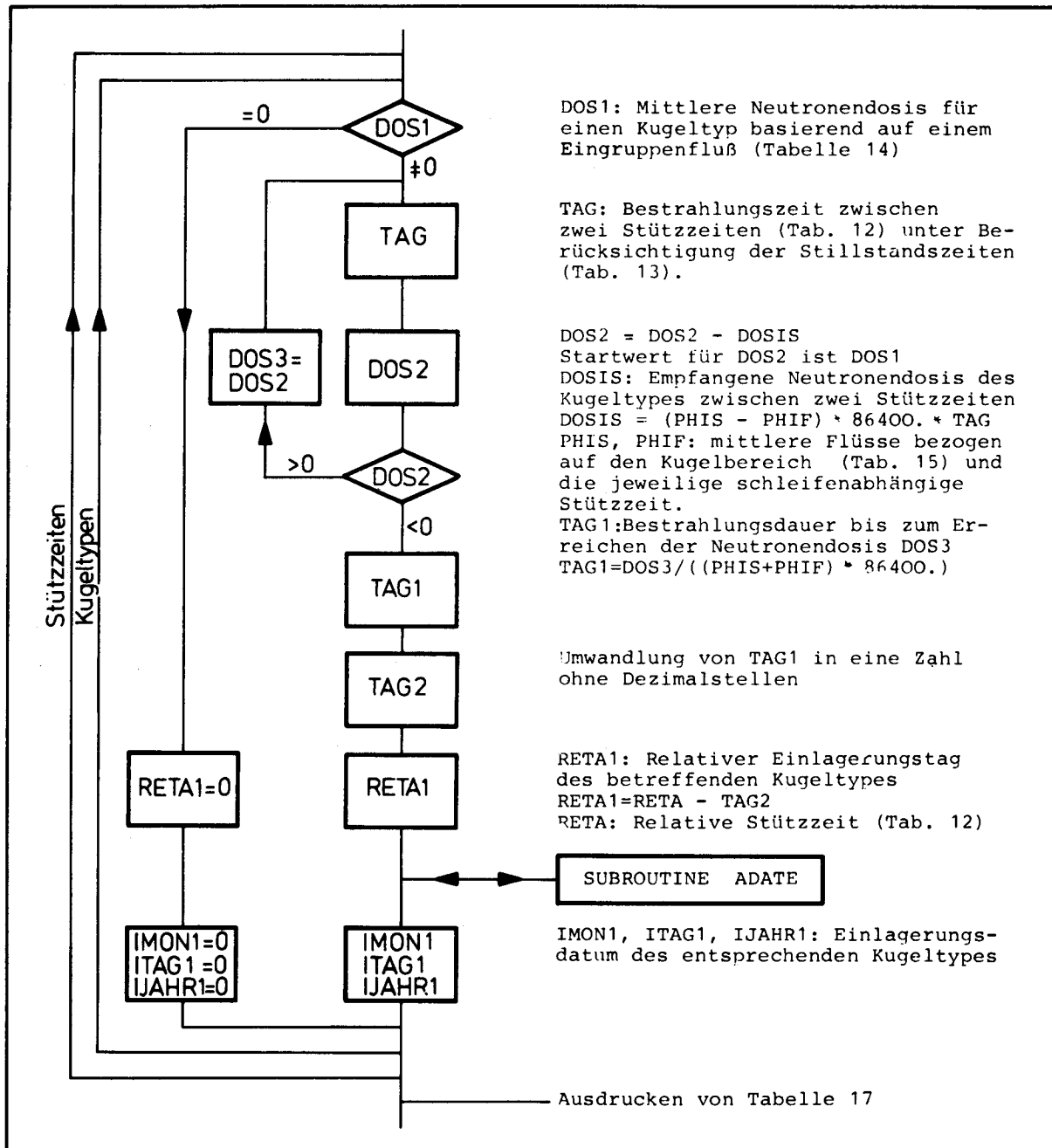


Abb. 14 : Ablaufdiagramm für den Programmbereich, in dem der Einlagerungszeitpunkt ermittelt wird

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
701.000	701.000	701.000	793.000	973.000	0.000	0.000	0.000	0.000	22
747.000	747.000	747.000	891.000	1243.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45
863.000	863.000	863.000	892.000	1379.000	0.000	0.000	0.000	0.000	68
793.000	793.000	793.000	941.000	1435.000	2093.000	0.000	0.000	0.000	89
790.000	790.000	790.000	1758.000	1609.000	2146.000	0.000	2542.000	0.000	117
844.000	844.000	844.000	2022.000	1668.000	2347.000	0.000	2709.000	2885.000	136
849.000	849.000	849.000	2248.000	1699.000	2504.000	0.000	2683.000	2847.000	163
875.000	875.000	0.000	0.000	1734.000	3010.000	3027.000	2663.000	2841.000	186
811.000	311.000	0.000	0.000	1745.000	3222.000	3057.000	2695.000	2850.000	198
12 1 68	12 1 68	12 1 68	3 3 69	8 30 69	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	22
1 16 69	1 16 69	1 16 69	6 9 69	5 27 70	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	45
5 12 69	5 12 69	5 12 69	6 10 69	10 10 70	0 0 0	0 0 0	0 0 0	0 0 0	68
3 3 69	3 3 69	3 3 69	7 29 69	12 5 70	9 23 72	0 0 0	0 0 0	0 0 0	89
2 28 69	2 28 69	2 28 69	10 24 71	5 28 71	11 15 72	0 0 0	12 16 73	0 0 0	117
4 23 69	4 23 69	4 23 69	7 14 72	7 26 71	6 4 73	0 0 0	6 1 74	11 24 74	136
4 28 69	4 28 69	4 28 69	2 25 73	8 26 71	11 8 73	0 0 0	5 6 74	10 17 74	163
5 24 69	5 24 69	0 0 0	0 0 0	9 30 71	3 29 75	4 15 75	4 16 74	10 11 74	186
3 21 69	3 21 69	0 0 0	0 0 0	10 11 71	13 27 75	5 15 75	5 18 74	10 20 74	198

Spalte 1...9 : Relativer Einlagerungstag der Kugeltypen 1...9 des AVR, bezogen auf den 1.1.1967, bzw. Einlagerungsdatum

Spalte 10 : Wiederbeladungszahl

Tabelle 17 : Liste des relativen Einlagerungstages und des entsprechenden Datums
als Funktion der Kugeltypen und der Wiederbeladungszahl

Leider stehen nur Dosiswerte für Brennelemente zur Verfügung. Aus diesem Grunde wurden für Bor- und Graphitkugeln (Kugeltyp 1 und 2) die Werte des UCC-Brennelementes (Kugeltyp 3) übernommen (Tabelle 14). Dies ist gewiß in erster Näherung für Graphitkugeln richtig, da diese in ähnlicher Weise wie die UCC-Brennelemente von Betriebsbeginn an im Reaktor waren, über alle Corebereiche verteilt sind und der Neueinsatz sich in beiden Fällen überwiegend auf Bruchkugeln beschränkt, was zu einem konstanten Einlagerungsdatum für die UCC-Brennelemente (Tabelle 17, Kugeltyp 3) führt. Für die Bor-Elemente (Kugeltyp 2) werden die in Tabelle 14 aufgeführten Neutronendosen allerdings zu niedrig sein, weil der Einsatz ausschließlich im Innen-core bei hohen Flußwerten erfolgt. Dies hat jedoch keine Auswirkungen auf die Genauigkeit der hier vorgestellten Rechnungen, da die Anzahl der ^{10}B -Atome direkt aus Massenangaben für Innencore und Außencore zu den jeweiligen Stützzeiten bestimmt wird (Tabelle 10).

Für die Beurteilung der Güte des Rechenverfahrens zur Ermittlung des fiktiven Einlagerungsdatums sei darauf hingewiesen, daß der Zeitraum, über den zurückgerechnet werden muß, in der Regel mit steigender Wiederbeladungszahl größer wird und bei WB 198 ca. 10 Jahre beträgt. Betrachtet man unter diesem Gesichtspunkt die berechneten Einlagerungsdaten beispielsweise der UCC-Brennelemente (Tabelle 17, Kugeltyp 3), so zeigt sich eine erstaunlich geringe Schwankungsbreite, die zudem meist noch auf die Bestrahlung sowie auf Kugelzugabe und Kugellentnahme zurückgeführt werden kann.

Eine Abnahme der Neutronendosis, wie dies zum Beispiel für das Tapeten-Brennelement von WB 89 nach WB 117 (Tabelle 14, Kugeltyp 4) zu beobachten ist, deutet darauf hin, daß in diesem Zeitraum eine große Anzahl frischer Kugeln dieses Typs zugegeben wurden. Tabelle 11 bestätigt die Vermutung. Zwar wurden Tapeten-Brennelemente dem Innencore (Regionen I und II) entnommen, jedoch ist die Anzahl der in die Regionen III und IV zugeführten Kugeln erheblich höher. Die auf die gesamte Kugelanzahl bezogene Neutronendosis nimmt ab, so daß auch die hieraus errechnete mittlere Verweilzeit der Kugeln im Core abnimmt. Man erkennt dies, wenn man das Einlagerungsdatum der Kugeln für die WB 89 bzw. 117 mit der zugehörigen in Tabelle 12 aufgelisteten relativen Stützzeit vergleicht. So ergibt sich für den hier betrachteten Kugeltyp 4 bei WB 89 eine Verweilzeit im Core von 1251 Tagen (2192 - 941) Tage) und bei WB 117 von 799 Tagen ((2557 - 1758) Tage); das Einlagerungsdatum der Kugeln rückt also weiter an die Stützzeit heran.

6.3 Quell-Atomzahl der Tritium-Lieferanten für den Kugelcorebereich

Auf der Basis des Einlagerungszeitpunktes in Abhängigkeit von Kugeltyp und Wiederbeladungszahl wird nun für jede Kugelcoreregion die Anzahl der verschiedenen Tritium-liefernden Atome bestimmt. Eine Ausnahme bilden hierbei die Borkugeln. Wegen der Bedeutung des Bors als Absorber wurde bereits im Rahmen der Betriebsrechnungen der Boreinsatz für das Innen- und Außencore ermittelt. Somit ergibt sich der ^{10}B -Gehalt einer Kugelcoreregion aus einem Anteil, der aus der volumenbezogenen Aufteilung der Werte für Innen- bzw. Außencore resultiert, und einem Anteil, der aus der Bor-Verunreinigung der übrigen in der Region vorhandenen Kugeltypen unter Berücksichtigung des Abbrandes berechnet wird.

Abbildung 15 zeigt den Programmablauf zur Ermittlung der Quell-Atomzahlen der verschiedenen Tritium-Lieferanten für den Kugelcorebereich. Zunächst werden aus den mittleren auf das Gesamtcare bezogenen Zweigruppenflüssen (Tabelle 15) unter Zugrundelegung des gleichen Flußverlaufes wie bei WB 193 (Tabelle 16) mittlere Zweigruppenflüsse für die Regionen zu den verschiedenen Stützzeiten bestimmt (Variablen PHIS2, PHIF2). Die SUBROUTINE WIRK ermittelt hieraus auf der Basis der in Kapitel 3.1.2 gemachten Voraussetzungen für die verschiedenen Tritium-Lieferanten Reaktionsraten (Variable SA1), die in den Tabellen 18a und 18b aufgelistet sind. Unter Berücksichtigung der Volumenanteile (Variable REL) der Regionen I und II sowie III und IV an Innen- bzw. Außencore ergeben sich aus entsprechenden Massenangaben ^{10}B -Atomzahlen der Kugelcoreregionen bezüglich der Borkugeln (Variablen ATSB10, ATFB10). Bereits an dieser Stelle des Programms ist es möglich, sämtliche ^{12}C -Atomzahlen der verschiedenen Kugelcoreregionen zu errechnen, da dieses Element in einer praktisch unerschöpfbaren Menge im Reaktor vorkommt, so daß auf Abbrandrechnungen verzichtet werden kann. Für eine bestimmte Region und Stützzeit ergeben sich die ^{12}C -Atomzahlen somit aus der Kugelzusammensetzung in Verbindung mit Massenangaben der verschiedenen Kugeltypen. Die Aufsummierung erfolgt in einer entsprechenden Schleife.

Der weitere Programmablauf wird am Beispiel des ^6Li erläutert, das damit
- nicht zuletzt wegen der großen Bedeutung als Tritium-Lieferant - stellvertretend für die übrigen Elemente steht. Aus diesem Grunde sind auch die angeschriebenen Programmauszüge auf ^6Li beschränkt und können in der

Regel nicht ohne weiteres auf die Allgemeinheit übertragen werden.

Zunächst erfolgt die Bestimmung der Atomzahlen der verschiedenen Tritium-Lieferanten für das Erstcore. Dabei wird berücksichtigt, daß bereits Werte für ^{10}B aus Borkugeln vorliegen. Für eine bestimmte Region gilt:

$$\text{ATOLI6} = \sum_I \text{AKUANZ}(I) * \text{WAS}(I) * \text{FALI6} * \text{PLI}(I) * 1.D-06$$

ATOLI6	Anzahl ^6Li -Atome der verschiedenen Kugelcoreregionen für das Erstcore
AKUANZ	Kugelanzahl als Funktion der Region und des Typs (Erstcore)
WAS(I)	Masse der einzelnen Kugel des jeweiligen Typs
FALI6	Umrechnungsfaktor Masse Li - ^6Li -Atomzahl
PLI	ppm-Anteil Li der verschiedenen Kugeltypen
I	Index für die verschiedenen Kugeltypen

Für die Ermittlung der Tritium-Quellatomzahlen zu den übrigen Stützzeiten ist es erforderlich, ausgehend vom Einlagerungsdatum der Kugeln, den Abbrand bis zur jeweiligen Stützzeit in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Wegen des geringen rechentechnischen Aufwandes wurden bei der Bestimmung der Bestrahlungszeiten für die verschiedenen Kugeltypen und Stützzeiten im Rahmen der Berechnung des Einlagerungszeitpunktes die Werte jeweils überschrieben, so daß diese für die Abbrandrechnungen neu bestimmt werden müssen. Da die einzelnen Bestrahlungszeiten im allgemeinen nicht relevant sind, erfolgt auch hier keine vollständige Abspeicherung; vielmehr besteht die Möglichkeit, durch Setzen einer entsprechenden Flagge diese Werte jeweils vor dem Überschreiben ausdrucken zu lassen (Tabelle 19, Spalte 5).

Zunächst wird die Stützzeit mit dem entsprechenden Einlagerungstag des Kugeltyps - also beide zur selben Wiederbeladungszahl gehörend - verglichen. Da das Einlagerungsdatum (Variable RETA1) jedoch im allgemeinen zu einem weit früheren Zeitpunkt liegt, wird in einer Schleife mit der nächst früheren Stützzeit (Variable RETA(I)) in gleicher Weise verfahren. Solange $\text{RETA}(I) > \text{RETA1}$, ist der Einlagerungstag noch nicht erreicht, und es wird unter Berücksichtigung der Reaktorstillstandszeit die Bestrahlungszeit (Variable TAGE) für dieses Zeitintervall errechnet und in einem Feld abgespeichert. Wird beim Durchlaufen der Schleife schließlich $\text{RETA}(I) < \text{RETA1}$, so ist das Zeitintervall der Stützzeiten gefunden, in dem der Einlagerungszeitpunkt

liegt. Die Bestrahlungszeit wird auch hier errechnet und als letzter Wert des Feldes abgespeichert. Da die Abbrandrechnung vom Einlagerungszeitpunkt ausgeht, ist es erforderlich, die Reihenfolge der Feldelemente umzukehren (Variable ATAGE).

Für jeden Kugeltyp wird nun zunächst die Anzahl der verschiedenen Tritium-Quellatome zum Einlagerungszeitpunkt errechnet. Hierbei verfährt man - wie bereits beschrieben - so, als ob alle Kugeln des betreffenden Typs zu diesem fiktiven Zeitpunkt eingebracht würden. Eine Aufsummierung von Atomzahlen gleicher Tritium-Lieferanten aus verschiedenen Kugeltypen innerhalb der Region, wie dies für das Erstcore möglich war, kann an dieser Stelle des Programms noch nicht erfolgen, weil in der Regel zu jedem Kugeltyp ein anderes Einlagerungsdatum gehört. Somit sind beide Rechenalgorithmen formal gleich, wenn man von der Summenbildung über die verschiedenen Kugeltypen bei der Berechnung der Atomzahlen für das Erstcore absieht. Für einen bestimmten Kugeltyp in einer Region gilt demnach zum Einlagerungszeitpunkt (unbestrahlter Zustand):

$$ALI6 = AKUANZ * WAS * FALI6 * PLI * 1.D-06$$

ALI6	Anzahl ${}^6\text{Li}$ -Atome eines bestimmten Kugeltyps in einer Region zum Einlagerungszeitpunkt
AKUANZ	Kugelanzahl als Funktion der Region, des Typs und der jeweiligen Stützzeit
WAS	Masse der einzelnen Kugel des betreffenden Typs
FALI6	Umrechnungsfaktor Masse Li - ${}^6\text{Li}$ -Atomzahl
PLI	ppm-Anteil Li des betrachteten Kugeltyps

In einer Schleife wird nun der Abbrand bis hin zur Stützzeit berechnet, so daß die Anzahl der Schleifen der Anzahl der Feldelemente für die Bestrahlungszeit entspricht.

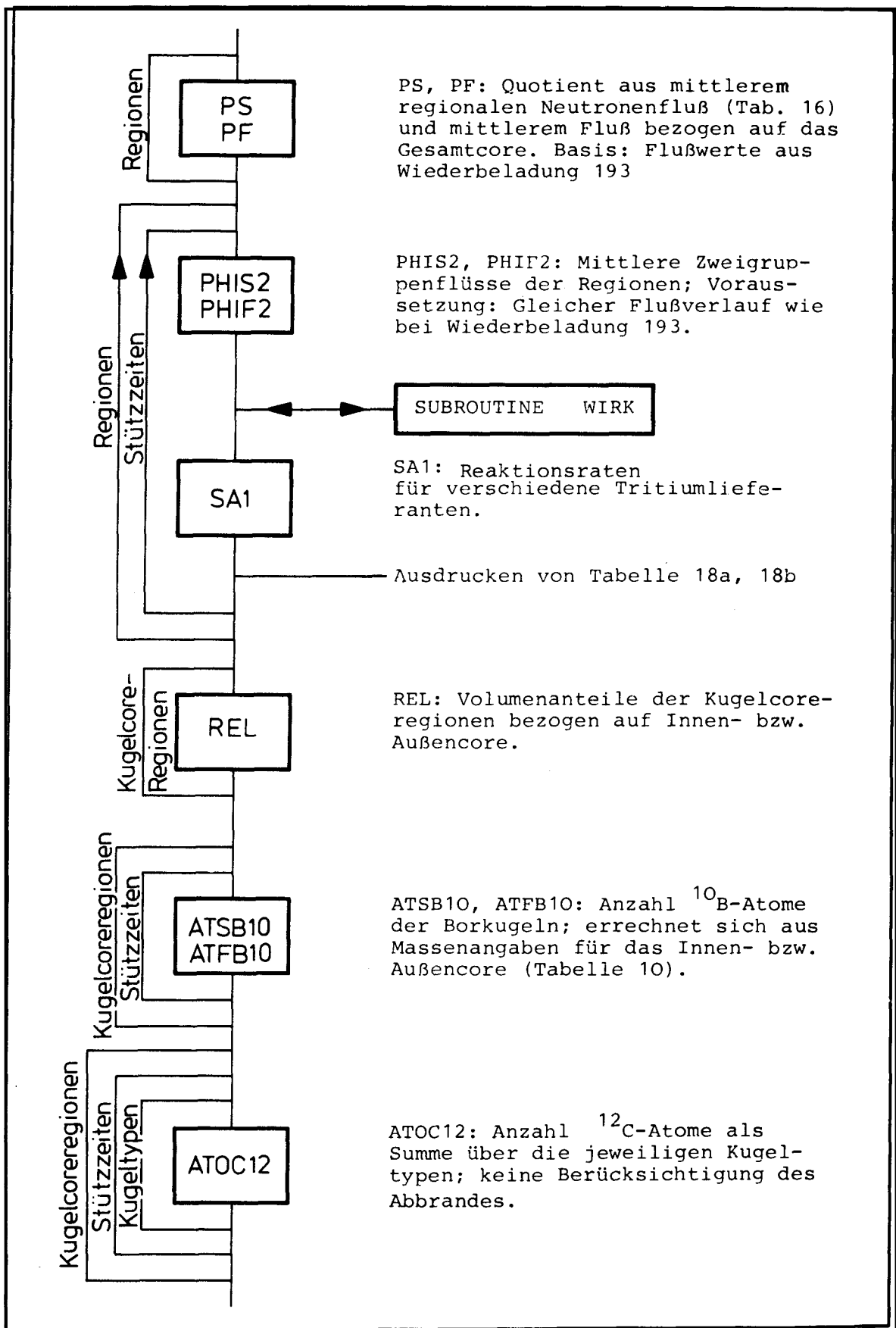
$$ALI6 = ALI6 * \text{DEXP}(-S(1)*T) + S(2)*ABE9*G(T,S,2) + S(2)*S(3)*AC12*H(T,S,2)$$

ALI6 * DEXP (-S(1) * T) : Abbrand des ${}^6\text{Li}$; ${}^6\text{Li}(n,\alpha)T$
 S(2) * ABE9 * G(T,S,2) : Anzahl ${}^6\text{Li}$ Atome aus der Reaktion ${}^9\text{Be}(n,\alpha){}^6\text{Li}$
 S(2) * S(3) * AC12 * H(T,S,2) : Anzahl ${}^6\text{Li}$ Atome aus der Reaktion ${}^{12}\text{C}(n,\alpha){}^9\text{Be}(n,\alpha){}^6\text{Li}$

ALI6	Anzahl ^6Li -Atome des bestimmten Kugeltyps in einer Region vor bzw. nach erfolgter Bestrahlung
S(1)	Reaktionsrate des Li in Abhängigkeit der Stützzeit und der Region (Tabelle 18 a)
S(2)	Reaktionsrate des Be, sonst wie S(1)
S(3)	Reaktionsrate des ^{12}C , sonst wie S(1)
T	Bestrahlungszeit ATAGE umgerechnet von Tagen in Sekunden
ABE9	Anzahl ^9Be -Atome des Kugeltyps in einer Region zum jeweiligen Zeitpunkt
AC12	Anzahl ^{12}C -Atome, sonst wie ABE9
G(T,S,2)	FUNCTION zur Lösung des Differentialgleichungssystems für den Fall, daß die Input-Rate nicht konstant ist; weitere Erläuterungen siehe Kapitel 3.3.2
H(T,S,2)	FUNCTION zur Lösung des Differentialgleichungssystems für den Fall, daß die Input-Rate konstant ist; weitere Erläuterungen siehe Kapitel 3.3.2

Tabelle 19 zeigt als Ausschnitt die so berechneten ^6Li -, ^7Li -, ^9Be -, ^{10}Be -Atomzahlen (Spalte 6 ... 9) für die in Region I (Spalte 4) vorkommenden Kugeltypen (Spalte 2). In den Spalten 10 ... 13 sind die entsprechenden ppm-Anteile aufgeführt. Somit kann ausgehend vom Einlagerungszeitpunkt des betreffenden Kugeltyps die Entwicklung der Atomzahlen der verschiedenen Tritium-Lieferanten bis hin zu der hier gültigen Stützzeit 31.12.77 (entsprechend WB 198, Spalte 3) beobachtet werden. Spalte 1 gibt den Index der Rechenschleife an, wobei die Schleifennummer Null den unbestrahlten Zustand zum Einlagerungszeitpunkt kennzeichnet. Spalte 5 zeigt die für die betreffende Rechenschleife gültige Bestrahlungszeit der Kugeln zwischen zwei Stützzeiten. Weil der vollständige Output, zu dem der hier vorgestellte Ausschnitt gehört, sehr umfangreich ist und im allgemeinen nicht bei jedem Programmlauf benötigt wird, besteht die Möglichkeit, durch Setzen einer Flagge das Ausdrucken zu unterdrücken.

Entsprechend der Kugelzusammensetzung der verschiedenen Regionen erfolgt im nächsten Programmschritt die Aufsummierung der Atomzahlen der Tritium-Lieferanten (Tabelle 20), so daß nunmehr der Ist-Zustand des Kugelcorebereiches zu den vorgegebenen Stützzeiten bekannt ist. Hieraus aufbauend kann nun unter Einbeziehung weiterer regionaler Stützzeit - abhängiger Daten nach den bereits beschriebenen Algorithmen die Tritium-Produktion und -Verteilung aufgeschlüsselt nach Zeit, Region und Verursacher bestimmt werden.



	1	2	3	4	5	6	7
Region I	0	4.140-08	3.980-13	7.500-13	1.660-07	8.140-15	9.160-13
	22	4.140-08	3.980-13	7.500-13	1.660-07	8.140-15	9.160-13
	45	3.540-08	3.720-13	7.600-13	1.420-07	7.600-15	8.550-13
	68	3.250-08	3.660-13	6.880-13	1.300-07	7.470-15	8.410-13
	89	3.030-08	3.600-13	6.780-13	1.210-07	7.370-15	8.290-13
	117	2.800-08	3.500-13	6.600-13	1.120-07	7.160-15	8.060-13
	136	2.680-08	3.540-13	6.660-13	1.070-07	7.230-15	8.140-13
	163	2.450-08	3.490-13	6.570-13	9.800-08	7.130-15	8.030-13
	186	2.410-08	3.490-13	6.570-13	9.650-08	7.130-15	8.030-13
	198	2.230-08	3.450-13	6.570-13	9.340-08	7.130-15	8.030-13
Region II	0	5.490-08	5.500-13	1.040-12	2.200-07	1.120-14	1.260-12
	22	5.490-08	5.500-13	1.040-12	2.200-07	1.120-14	1.260-12
	45	4.690-08	5.130-13	9.660-13	1.880-07	1.050-14	1.180-12
	68	4.310-08	5.050-13	9.510-13	1.720-07	1.030-14	1.160-12
	89	4.020-08	4.970-13	9.370-13	1.610-07	1.020-14	1.140-12
	117	3.710-08	4.840-13	9.110-13	1.480-07	9.890-15	1.110-12
	136	3.550-08	4.880-13	9.200-13	1.420-07	9.980-15	1.120-12
	163	3.250-08	4.820-13	9.070-13	1.300-07	9.850-15	1.110-12
	186	3.200-08	4.820-13	9.070-13	1.280-07	9.850-15	1.110-12
	198	3.090-08	4.820-13	9.070-13	1.240-07	9.850-15	1.110-12
Region III	0	3.280-08	3.970-13	7.480-13	1.310-07	8.120-15	9.140-13
	22	3.280-08	3.970-13	7.480-13	1.310-07	8.120-15	9.140-13
	45	2.800-08	3.710-13	6.980-13	1.120-07	7.580-15	8.530-13
	68	2.570-08	3.650-13	6.870-13	1.030-07	7.460-15	8.390-13
	89	2.400-08	3.590-13	6.770-13	9.620-08	7.350-15	8.270-13
	117	2.220-08	3.500-13	6.580-13	8.860-08	7.150-15	8.040-13
	136	2.120-08	3.530-13	6.640-13	8.490-08	7.210-15	8.120-13
	163	1.940-08	3.480-13	6.560-13	7.770-08	7.120-15	8.010-13
	186	1.910-08	3.480-13	6.560-13	7.650-08	7.120-15	8.010-13
	198	1.850-08	3.480-13	6.560-13	7.400-08	7.120-15	8.010-13
Region IV	0	3.660-08	4.390-13	8.270-13	1.460-07	8.980-15	1.010-12
	22	3.660-08	4.390-13	8.270-13	1.460-07	8.980-15	1.010-12
	45	3.120-08	4.100-13	7.720-13	1.250-07	8.390-15	9.440-13
	68	2.870-08	4.040-13	7.600-13	1.150-07	8.250-15	9.280-13
	89	2.680-08	3.980-13	7.490-13	1.070-07	8.130-15	9.150-13
	117	2.470-08	3.870-13	7.280-13	9.870-08	7.910-15	8.900-13
	136	2.360-08	3.900-13	7.350-13	9.460-08	7.980-15	8.980-13
	163	2.160-08	3.850-13	7.250-13	8.650-08	7.880-15	8.860-13
	186	2.130-08	3.850-13	7.250-13	8.510-08	7.880-15	8.860-13
	198	2.060-08	3.850-13	7.250-13	8.240-08	7.880-15	8.860-13

Spalte 1: Wiederbeladungszahl
 Spalte 2-7: Reaktionsraten für ^6Li , ^7Li , $^{10}\text{B(s)}$, $^{10}\text{B(l)}$, ^{12}C , ^9Be
 (s): Fluß schneller Neutronen; (l): Fluß langsamer Neutronen

Tabelle 18a : Reaktionsraten der verschiedenen Tritiumlieferanten
für die Regionen I...IV

	1	2	3	4	5	6	7
Region V	0	4.980-09	1.080-14	2.030-14	1.590-08	2.200-16	2.480-14
	22	4.980-09	1.080-14	2.030-14	1.590-08	2.200-16	2.480-14
	45	4.250-09	1.010-14	1.890-14	1.700-08	2.060-16	2.310-14
	68	3.910-09	9.890-15	1.860-14	1.560-08	2.020-16	2.280-14
	89	3.650-09	9.750-15	1.840-14	1.460-08	1.990-16	2.240-14
	117	3.360-09	9.480-15	1.780-14	1.340-08	1.940-16	2.180-14
	136	3.220-09	9.570-15	1.800-14	1.290-08	1.960-16	2.200-14
	163	2.950-09	9.440-15	1.780-14	1.180-08	1.930-16	2.170-14
	186	2.900-09	9.440-15	1.780-14	1.160-08	1.930-16	2.170-14
	198	2.810-09	9.440-15	1.780-14	1.120-08	1.930-16	2.170-14
Region VI	0	1.530-08	5.170-14	9.730-14	6.140-08	1.060-15	1.190-13
	22	1.530-08	5.170-14	9.730-14	6.140-08	1.060-15	1.190-13
	45	1.310-08	4.820-14	9.090-14	5.240-08	9.860-16	1.110-13
	68	1.200-08	4.750-14	8.940-14	4.810-08	9.710-16	1.090-13
	89	1.120-08	4.680-14	8.810-14	4.490-08	9.570-16	1.080-13
	117	1.040-08	4.550-14	8.570-14	4.140-08	9.300-16	1.050-13
	136	9.920-09	4.590-14	8.650-14	3.970-08	9.390-16	1.060-13
	163	9.080-09	4.530-14	8.530-14	3.630-08	9.270-16	1.040-13
	186	8.930-09	4.530-14	8.530-14	3.570-08	9.270-16	1.040-13
	198	8.640-09	4.530-14	8.530-14	3.460-08	9.270-16	1.040-13
Region VII	0	2.950-09	6.280-15	1.180-14	1.180-08	1.280-16	1.450-14
	22	2.950-09	6.280-15	1.180-14	1.180-08	1.280-16	1.450-14
	45	2.520-09	5.860-15	1.100-14	1.010-08	1.200-16	1.350-14
	68	2.310-09	5.770-15	1.090-14	9.240-09	1.180-16	1.330-14
	89	2.150-09	5.680-15	1.070-14	8.630-09	1.160-16	1.310-14
	117	1.990-09	5.530-15	1.040-14	7.950-09	1.130-16	1.270-14
	136	1.910-09	5.580-15	1.050-14	7.620-09	1.140-16	1.280-14
	163	1.740-09	5.510-15	1.040-14	6.970-09	1.130-16	1.270-14
	186	1.720-09	5.510-15	1.040-14	6.860-09	1.130-16	1.270-14
	198	1.660-09	5.510-15	1.040-14	6.640-09	1.130-16	1.270-14
Region VIII	0	6.060-10	7.140-15	1.340-14	2.430-09	1.460-16	1.640-14
	22	6.060-10	7.140-15	1.340-14	2.430-09	1.460-16	1.640-14
	45	5.180-10	6.670-15	1.260-14	2.070-09	1.360-16	1.530-14
	68	4.760-10	6.560-15	1.240-14	1.900-09	1.340-16	1.510-14
	89	4.440-10	6.460-15	1.220-14	1.780-09	1.320-16	1.490-14
	117	4.090-10	6.290-15	1.180-14	1.640-09	1.290-16	1.450-14
	136	3.920-10	6.350-15	1.190-14	1.570-09	1.300-16	1.460-14
	163	3.590-10	6.260-15	1.180-14	1.440-09	1.280-16	1.440-14
	186	3.530-10	6.260-15	1.180-14	1.410-09	1.280-16	1.440-14
	198	3.420-10	6.260-15	1.180-14	1.370-09	1.280-16	1.440-14

Spalte 1: Wiederbeladungszahl
 Spalte 2...7: Reaktionsraten für ^6Li , ^7Li , $^{10}\text{B(s)}$, $^{10}\text{B(l)}$, ^{12}C , ^9Be
 (s) : Fluß schneller Neutronen ; (l) : Fluß langsamer Neutronen

Tabelle 18 b : Reaktionsraten der verschiedenen Tritiumlieferanten
für die Regionen V...VIII

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	194	1	194	1	0.0	2.490 19	3.110 20	3.450 19	0.00	0.037	0.463	0.408	0.000
2	158	1	158	1	295.0	1.400 19	3.420 20	3.460 18	6.820 19	0.018	0.515	0.007	0.132
3	158	1	158	1	304.0	7.450 20	3.450 20	2.750 17	1.410 20	0.010	0.520	0.001	0.272
4	158	1	158	1	286.0	4.070 18	3.460 20	2.430 16	2.090 20	0.005	0.520	0.000	0.405
5	158	1	158	1	278.0	2.140 18	3.460 20	1.850 15	2.770 20	0.003	0.520	0.000	0.535
6	158	1	158	1	318.0	9.980 17	3.460 20	8.580 13	3.530 23	0.001	0.520	0.000	0.563
7	158	1	158	1	250.0	5.100 17	3.460 20	5.620 12	4.180 20	0.001	0.520	0.000	0.807
8	158	1	158	1	317.0	2.170 17	3.460 20	1.600 11	4.570 20	0.000	0.520	0.000	0.960
9	158	1	158	1	334.0	8.640 16	3.460 20	2.690 09	5.820 20	0.000	0.520	0.000	1.125
10	158	1	158	1	208.0	4.820 16	3.460 20	1.370 08	6.390 20	0.000	0.520	0.000	1.234
11	158	1	158	1	0.0	3.120 19	3.890 20	0.00	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
12	158	1	158	1	295.0	1.750 19	3.890 20	0.00	6.530 19	0.018	0.468	0.000	0.132
13	158	1	158	1	304.0	4.110 18	3.890 20	0.00	1.760 20	0.010	0.468	0.000	0.272
14	158	1	158	1	295.0	5.080 18	3.890 20	0.00	2.620 20	0.005	0.468	0.000	0.405
15	158	1	158	1	278.0	2.680 18	3.890 20	0.00	3.460 20	0.003	0.468	0.000	0.535
16	158	1	158	1	318.0	1.250 18	3.890 20	0.00	4.420 20	0.001	0.468	0.000	0.563
17	158	1	158	1	260.0	6.380 17	3.890 20	0.00	5.220 20	0.001	0.468	0.000	0.807
18	158	1	158	1	317.0	2.710 17	3.890 20	0.00	6.210 20	0.000	0.468	0.000	0.960
19	158	1	158	1	334.0	1.080 17	3.890 20	0.00	7.280 20	0.000	0.468	0.000	1.125
20	158	1	158	1	208.0	6.020 16	3.890 20	0.00	7.990 20	0.000	0.468	0.000	1.234
21	158	1	158	1	0.0	9.870 21	1.230 23	2.670 21	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
22	158	1	158	1	81.0	8.380 21	1.240 23	8.710 20	7.680 21	0.027	0.471	0.000	0.037
23	158	1	158	1	278.0	4.700 21	1.250 23	8.580 19	3.400 22	0.015	0.474	0.000	0.166
24	158	1	158	1	318.0	2.400 21	1.250 23	5.800 18	6.420 22	0.008	0.475	0.000	0.313
25	158	1	158	1	266.0	1.210 21	1.250 23	5.220 17	8.910 22	0.004	0.475	0.000	0.435
26	158	1	158	1	317.0	6.120 20	1.250 23	2.440 16	1.190 23	0.002	0.475	0.000	0.582
27	158	1	158	1	334.0	2.570 20	1.250 23	7.350 14	1.520 23	0.001	0.475	0.000	0.742
28	158	1	158	1	208.0	1.450 20	1.250 23	7.110 13	1.730 23	0.000	0.475	0.000	0.842
29	158	1	158	1	0.0	4.680 21	5.840 22	7.940 20	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
30	158	1	158	1	65.0	4.110 21	5.840 22	7.700 20	2.920 21	0.028	0.471	0.000	0.030
31	158	1	158	1	334.0	2.050 21	5.820 22	2.900 19	1.760 22	0.014	0.474	0.000	0.185
32	158	1	158	1	208.0	1.320 21	5.920 22	4.980 18	2.730 22	0.009	0.474	0.000	0.281
33	158	1	158	1	0.0	4.370 20	5.330 21	7.240 19	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
34	158	1	158	1	230.0	2.680 20	5.390 21	1.130 19	9.420 23	0.020	0.474	0.000	0.106
35	158	1	158	1	334.0	1.340 20	5.400 21	6.990 17	2.310 21	0.010	0.474	0.000	0.261
36	158	1	158	1	208.0	8.620 19	5.400 21	1.200 17	3.160 21	0.006	0.475	0.000	0.357
37	158	1	158	1	0.0	3.100 20	4.120 21	5.600 19	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
38	158	1	158	1	227.0	2.090 20	4.170 21	8.970 18	7.200 20	0.020	0.474	0.000	0.105
39	158	1	158	1	317.0	1.380 20	4.180 21	6.380 17	1.730 21	0.011	0.474	0.000	0.252
40	158	1	158	1	334.0	5.330 19	4.180 21	3.770 16	2.780 21	0.005	0.475	0.000	0.406
41	158	1	158	1	2.84.0	3.290 19	4.180 21	5.490 15	3.450 21	0.003	0.475	0.000	0.504
42	158	1	158	1	0.0	4.610 19	5.150 20	7.910 18	0.00	0.037	0.463	0.000	0.000
43	158	1	158	1	72.0	3.980 19	5.160 20	4.370 18	3.180 19	0.028	0.471	0.000	0.033
44	158	1	158	1	317.0	2.060 19	5.820 20	3.110 17	1.720 20	0.014	0.474	0.000	0.180
45	158	1	158	1	334.0	1.010 19	5.820 20	1.840 16	3.200 20	0.007	0.475	0.000	0.334
46	158	1	158	1	208.0	6.270 18	5.820 20	2.670 15	4.130 20	0.004	0.475	0.000	0.432

Spalte: Anzahl ^6Li , ^7Li , ^{10}B , ^9Be -Atome
 5...9 ppm - Anteile ^6Li , ^7Li , ^{10}B , ^9Be

Spalte: 5...9
 10...13

Laufindex einer Schleife (0 : frische Kugel)

Kugeltyp - Nr.

Wiederbeladungszahl

Region

Bestrahlungsdauer zwischen 2 Stützzeiten [Tage]

Tabelle 19 : Entwicklung der Atomzahlen der verschiedenen Tritiumlieferanten, ausgehend vom Einlagerungszeitpunkt (Ausschnitt); kann vom Programmmanwender durch Setzen einer entsprechenden Flagge angefordert werden

	1	2	3	4	5	6	7
Region I	0	1.530 22	1.910 23	1.430 24	1.430 24	2.380 29	0.00
	22	4.030 21	2.030 23	2.560 23	2.960 23	2.380 29	6.350 22
	45	2.660 21	2.020 23	1.750 23	1.750 23	2.390 29	9.510 22
	68	2.000 21	1.970 23	1.340 22	1.340 22	2.370 29	1.140 23
	89	2.320 21	1.930 23	1.140 21	1.140 21	2.360 29	1.350 23
	117	1.360 21	1.900 23	3.390 19	3.390 19	2.330 29	1.720 23
	136	1.420 21	1.890 23	1.250 19	1.250 19	2.330 29	1.760 23
	163	1.280 21	1.900 23	2.200 18	2.200 18	2.330 29	1.790 23
	186	1.700 21	1.900 23	5.640 18	5.640 18	2.330 29	1.930 23
	198	1.590 21	1.950 23	5.110 18	5.110 18	2.400 29	2.080 23
Region II	0	7.640 21	9.540 22	7.150 23	7.150 23	1.190 29	0.00
	22	1.230 21	1.010 23	1.480 23	1.480 23	1.190 29	4.380 22
	45	8.290 20	1.010 23	8.760 22	8.760 22	1.200 29	6.560 22
	68	5.860 20	9.840 22	6.710 21	6.710 21	1.180 29	7.850 22
	89	8.350 20	9.650 22	5.590 20	5.590 20	1.180 29	9.290 22
	117	4.060 20	9.520 22	1.460 19	1.460 19	1.160 29	1.190 23
	136	4.160 20	9.470 22	4.360 18	4.360 18	1.160 29	1.220 23
	163	3.470 20	9.490 22	3.180 17	3.180 17	1.160 29	1.240 23
	186	5.320 20	9.500 22	5.560 17	5.560 17	1.160 29	1.330 23
	198	4.920 20	9.750 22	4.870 17	4.870 17	1.200 29	1.440 23
Region III	0	1.650 22	2.060 23	1.760 22	1.760 22	2.570 29	0.00
	22	6.180 21	2.200 23	2.400 20	2.400 20	2.570 29	6.460 22
	45	5.200 21	2.160 23	1.210 20	1.210 20	2.560 29	8.760 22
	68	4.640 21	2.130 23	4.680 19	4.680 19	2.550 29	9.790 22
	89	4.770 21	2.100 23	2.240 20	2.240 20	2.550 29	1.160 23
	117	4.530 21	2.090 23	9.790 19	9.790 19	2.570 29	1.150 23
	136	4.510 21	1.960 23	1.640 20	1.640 20	2.570 29	1.140 23
Region IV	163	2.580 21	1.400 23	1.890 19	1.890 19	2.570 29	9.610 22
	0	1.880 21	2.350 23	2.010 22	2.010 22	2.930 29	0.00
	22	6.340 21	2.500 23	1.880 20	1.880 20	2.930 29	8.150 22
	45	5.310 21	2.460 23	1.040 20	1.040 20	2.920 29	1.110 23
	68	4.660 21	2.420 23	3.530 19	3.530 19	2.910 29	1.230 23
	89	4.940 21	2.390 23	2.300 20	2.300 20	2.910 29	1.460 23
	117	4.560 21	2.380 23	9.670 19	9.670 19	2.930 29	1.450 23
	136	4.620 21	2.230 23	1.680 20	1.680 20	2.930 29	1.440 23
	163	2.560 21	1.600 23	1.420 19	1.420 19	2.930 29	1.210 23
	186	4.880 21	2.380 23	2.680 19	2.680 19	2.920 29	1.640 23
	198	4.270 21	2.400 23	2.270 19	2.270 19	2.950 29	1.640 23

Spalte 1: Wiederbeladungszahl
 Spalte 2...7: Anzahl Atome ^6Li , ^7Li , $^{10}\text{B}(\text{s})$, $^{10}\text{B}(\text{l})$, ^{12}C , ^9Be
 (s): Fluß schneller Neutronen; (l): Fluß langsamer Neutronen

Tabelle 20 : Quell - Atomzahlen der verschiedenen Tritiumlieferanten für die Kugelcore - Regionen

7 DISKUSSION DER RECHNUNGEN

Der im Anhang vorgestellte Rechner-Output basiert auf den Daten des AVR-Reaktors, die in Kapitel 8 zusammengefaßt sind. Ein abwägender Vergleich der verschiedenen Produktionsraten zeigt, daß neben dem Spalt-Tritium vornehmlich die Neutronenreaktionen von ${}^6\text{Li}$ und ${}^3\text{He}$ dominant sind. Der Einfluß des ${}^{10}\text{B}$ ist relativ gering; dies kann darauf zurückgeführt werden, daß im Gegensatz zu anderen Reaktortypen beim Kugelhaufenreaktor aufgrund der Beschickungsart nur eine geringe Überschußreaktivität durch Absorber kompensiert werden muß.

In Tabelle 24 sind die im Anhang gezeigten Rechenergebnisse zusammengefaßt. Vergleicht man die sich ergebenden spezifischen Aktivitäten für Kühlgas und Frischdampf mit gemessenen Werten /20/, /21/, so kann insgesamt eine zufriedenstellende Übereinstimmung festgestellt werden. Allerdings ist zu beobachten, daß die errechneten Tritium-Konzentrationen in beiden Kreisläufen mit fortschreitender Betriebszeit als Folge abnehmender Produktionsraten ebenfalls abnehmen, während bei den gemessenen Werten ein Anstieg zu verzeichnen ist. Dies deutet darauf hin, daß der Freisetzungsmechanismus für Tritium aus Graphit durch das angewandte Modell noch nicht mit zufriedenstellender Genauigkeit beschrieben wird. So ist mit der Annahme einer 10 %-igen Freisetzung des jeweils neu gebildeten Tritiums eine Akkumulation im Graphit verbunden. Wenn aber Tritium über Diffusion nach außen gelangen kann, wie dies aus Messungen /17/ hervorgeht, so ist nach dem 1. Fickschen Gesetz die abfließende Tritium-Menge umso höher, je größer die Konzentration ist. Außerdem haben die zitierten Versuche, die allerdings noch nicht abgeschlossen sind, ergeben, daß die Tritium-Freisetzung aus dem Graphit einen komplexen Vorgang darstellt. So zeigte sich, daß die Aktivierungsenergie des ${}^6\text{Li}$ um den Faktor 7 über der von Proben liegt, die aus dem Gasraum mit Tritium beladen wurden. Eine mögliche Erklärung hierzu ist, daß bei der Tritium-Beladung vornehmlich Oberflächenplätze belegt werden. Das Sorptionsgleichgewicht des Tritiums aus dem Kühlgas mit der Graphitoberfläche (Austausch und Korrosion) wird durch die Anwesenheit von Wasserstoff, Sauerstoff und Wasserdampf merklich beeinflusst. So führen Wasserstoff und aufgrund der Wassergasreaktion auch Wasserdampf durch Verdrängungswirkung zu einem Anstieg des Tritium-Pegels im Gasraum; bei Anwesenheit von Sauer-

stoff werden Adsorptions- und Desorptionsvorgänge beschleunigt. Sobald gesicherte experimentelle Ergebnisse vorliegen, sollten diese in die Rechnungen übernommen werden.

Es ist auch denkbar, daß sich im Laufe der zehnjährigen Betriebszeit die Oxidhaut ständig verändert hat. Gründe hierfür sind neben unterschiedlichen Bedingungen im Gasraum aufgrund von Abschaltungen, Störfällen und Experimenten eine mögliche Verringerung der Barrierewirkung der Oxidhaut, bedingt durch mangelnde Stabilität gegenüber thermischen Wechselbelastungen oder eine abnehmende Ausheilfähigkeit von Oxidhäuten aufgrund von Verarmungseffekten in der Legierungsmatrix. Demgegenüber werden in den Rechnungen die permeationsbestimmenden Faktoren als zeitlich konstant vorausgesetzt. In diesem Zusammenhang wäre eine Studie interessant, die auf der Basis der gemessenen Tritium-Konzentrationen im Primär- und Sekundärsystem unter Einbeziehung exakter zeitabhängiger Wasserstoffpegel im Kühlgas die Entwicklung des Rückhaltefaktors untersucht.

Bereits erste Rechnungen haben gezeigt, daß das System sehr sensitiv auf Schwankungen der Lithium-Konzentrationen im Graphit reagiert. Hieraus ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit, diese Daten möglichst genau zu erfassen. Neben der Problematik, daß Graphitproben aus dem AVR-Erstcore meist nicht mehr zur Verfügung stehen und bei bereits bestrahlten Materialien der Ausgangswert rechnerisch ermittelt werden muß, besteht eine weitere Schwierigkeit darin, daß die Lithium-Verunreinigungen meist an bzw. bereits unterhalb der Grenze des überhaupt Nachweisbaren liegen, so daß die Meßwerte sehr stark streuen. Für A-3 Matrixgraphit der AVR-Brennelemente beispielsweise werden Lithium-Konzentrationen zwischen 0.033 ppm /34/ und 1 ppm /5/ in der Literatur angegeben.

Um den Einfluß dieser Unsicherheitsbandbreite auf das Ergebnis der Rechnungen zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Tabellen 21 ... 27 zeigen die Zusammenfassung jeweils eines Programmlaufes. Nur die in den einzelnen Tabellen gesondert aufgeführten Eingabedaten wurden gegenüber den in Kapitel 8 aufgelisteten Werten geändert.

Die in den Tabellen 21 ... 32 angegebenen spezifischen Aktivitäten der Graphitkugeln beziehen sich auf das Tritium-Inventar der Kugelgesamtheit, wobei das Spalttritium unberücksichtigt bleibt. Da die Tritium-Inventare, aus-

14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77	
31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77	
PRODUKTION									
KUGELCORE	510.6	754.4	970.7	1174.2	1405.7	1590.6	1813.9	2040.0	2186.6
REFLEKTOR	2035.5	3012.9	3707.9	4269.6	4815.9	5194.8	5605.4	5971.8	6182.6
GESAMT	2546.1	3767.3	4678.6	5443.8	6221.6	6785.4	7419.3	8011.8	8369.2
VERTEILUNG									
IN FESTEN STOFFEN	2273.7	3362.4	4176.2	4860.7	5557.0	6062.8	6632.1	7165.4	7487.6
ADSORBIERT	149.5	154.0	136.2	114.1	105.0	85.4	80.7	74.8	56.7
KÜHLGAS	0.265	0.273	0.241	0.202	0.186	0.151	0.143	0.132	0.101
LECKAGE PRIMÄRR.	1.4	2.8	4.1	5.3	6.3	7.2	8.0	8.7	9.3
REINIGUNGSANLAGE	77.7	158.8	231.8	297.1	354.4	403.7	447.6	488.7	522.6
DAMPFKREISLAUF	0.064	0.066	0.058	0.049	0.045	0.036	0.034	0.032	0.024
ABSCHLÄMMUNG	43.5	88.9	129.8	166.4	198.5	226.1	250.7	273.8	292.8
SPEZIFISCHE WERTE									
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$9.4 \cdot 10^{-5}$	$8.9 \cdot 10^{-5}$	$8.3 \cdot 10^{-5}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$9.6 \cdot 10^{-4}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	8.4	10.6	12.0	13.4	14.8	15.9	17.0	17.8	18.7
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	10.5	15.6	19.1	22.0	24.8	26.8	28.9	30.8	31.8

Tabelle 21: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]

Li-Konzentration für alle Kugeln: 0.033ppm ; Li-Konzentration Reflektor 0.28ppm

	14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
	31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>									
KUGELCORE	1284.2	1708.9	2047.6	2347.0	2687.6	2946.5	3253.6	3530.8	3738.7
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	8471.7	12339.1	15121.2	17382.2	19646.6	21230.8	22972.0	24524.9	25467.5
<u>VERTEILUNG</u>									
IN FESTEN STOFFEN	7606.8	11077.1	13574.7	15614.2	17639.5	19063.8	20629.6	22027.5	22876.0
ADSORBIERT	469.0	469.8	406.1	333.2	300.4	239.9	222.1	200.7	151.4
KÜHLGAS	0.831	0.832	0.720	0.590	0.532	0.425	0.394	0.356	0.268
LECKAGE PRIMÄRR.	4.5	8.9	12.9	16.3	19.2	21.7	23.9	25.9	27.5
REINIGUNGSANLAGE	250.4	501.6	722.2	915.2	1081.1	1221.0	1343.4	1455.2	1546.1
DAMPFKREISLAUF	0.200	0.200	0.173	0.142	0.128	0.102	0.095	0.085	0.064
ABSCHLÄMMUNG	140.1	280.8	404.4	512.6	605.5	683.9	752.5	815.2	866.1
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>									
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$5.2 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$3.3 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$8.0 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-3}$	$6.9 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$5.1 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	45.4	56.3	63.6	70.0	76.2	80.9	85.9	89.1	92.9
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0

Tabelle 22: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [μCi]

Li-Konzentration für alle Kugeln: 0.2ppm

	14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
	31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>									
KUGELCORE	2210.8	2852.0	3337.4	3751.4	4222.5	4570.3	4977.9	5316.1	5597.5
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	9398.3	13482.2	16411.0	18796.6	21181.5	22854.6	24696.3	26310.2	27326.3
<u>VERTEILUNG</u>									
IN FESTEN STOFFEN	8440.7	12105.9	14735.5	16878.2	19021.1	20525.3	22181.4	23634.3	24548.9
ADSORBIERT	511.8	502.0	430.0	351.0	316.6	252.8	234.2	209.9	160.3
KÜHLGAS	0.907	0.890	0.762	0.622	0.561	0.448	0.415	0.372	0.284
LECKAGE PRIMÄRKR.	5.0	9.9	14.0	17.7	20.8	23.4	25.7	27.8	29.5
REINIGUNGSANLAGE	282.0	553.6	788.8	992.9	1168.1	1315.7	1445.0	1562.5	1658.2
DAMPFKREISLAUF	0.218	0.214	0.183	0.149	0.135	0.108	0.100	0.089	0.068
ABSCHLÄMMUNG	157.8	309.9	441.7	556.1	654.3	737.0	809.4	875.3	928.9
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>									
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$5.6 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.3 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$8.7 \cdot 10^{-3}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$7.3 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$5.4 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$	$3.6 \cdot 10^{-3}$	$2.7 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	89.7	110.9	125.4	136.8	149.7	158.6	168.5	174.6	181.9
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0

Tabelle 23: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci] Li-Konzentration für alle Kugeln 0.4ppm

<u>PRODUKTION</u>		14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
		31.12.69	31.12.70	31.12.71	01.01.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
KUGELCORE	2674.1		3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6208.8	6526.7
REFLEKTOR	7187.5		10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	9861.6		14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9	28255.5
<u>VERTEILUNG</u>										
IN FESTEN STOFFEN	8857.6		12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7	25385.3
ADSORBIERT	523.2		518.1	442.0	359.9	324.8	259.2	240.3	214.5	164.7
KÜHLGAS	0.945		0.918	0.783	0.638	0.576	0.459	0.426	0.380	0.292
LECKAGE PRIMÄRR.	5.3		10.3	14.6	18.4	21.6	24.3	26.6	28.8	30.5
REINIGUNGSANLAGE	297.8		579.6	822.0	1031.8	1211.6	1363.1	1495.8	1616.2	1714.3
DAMPFKREISLAUF	0.227		0.221	0.188	0.153	0.138	0.110	0.102	0.091	0.070
ABSCHLÄMMUNG	166.6		324.5	460.3	577.9	678.6	763.5	837.9	905.3	960.3
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>										
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$5.9 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-4}$	$4.9 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$8.8 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$6.1 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4	226.4	
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0	

Tabelle 24: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]

Li-Konzentration für alle Kugeln: 0.5 ppm (entspricht dem Wert in Kapitel 8)

14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77	
31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.73	31.12.76	31.12.77	
PRODUKTION									
KUGELCORE	3137.4	3995.1	4627.2	5155.9	5757.7	6194.3	6702.2	7101.5	7456.0
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	10324.9	14625.3	17700.8	20201.1	22716.7	24478.6	26420.6	28095.6	29184.8
VERTEILUNG									
IN FESTEN STOFFEN									
ADSORBIERT	9274.6	13134.6	15896.3	18142.1	20402.7	21986.7	23733.2	25241.1	26221.8
KÜHLGAS	554.6	534.1	454.0	368.8	332.9	265.7	246.3	219.1	169.2
LECKAGE PRIMÄRR.	5.6	10.8	15.2	19.1	22.3	25.1	27.5	29.7	31.5
REINIGUNGSANLAGE	313.5	605.6	855.3	1070.6	1255.1	1410.4	1546.6	1669.8	1770.3
DAMPFKREISLAUF	0.236	0.227	0.193	0.157	0.142	0.113	0.105	0.093	0.072
ABSCHLÄMMUNG	175.4	339.0	479.0	599.6	703.0	790.1	866.3	935.4	991.7
SPEZIFISCHE WERTE									
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$6.1 \cdot 10^{-4}$	$5.9 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$	$4.1 \cdot 10^{-4}$	$3.7 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.7 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-4}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$9.4 \cdot 10^{-3}$	$9.1 \cdot 10^{-3}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	134.1	165.7	187.1	203.5	223.2	236.3	251.0	260.1	270.9
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0

Tabelle 25: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
 Li-Konzentration für alle Kugeln: 0.6ppm

14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
PRODUKTION								
KUGELCORE	4064.0	5138.2	5916.9	6560.2	7292.7	7818.1	8426.5	8886.7 9314.8
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1 21728.8
GESAMT	11251.5	15768.4	18990.5	21605.4	24251.7	26102.4	28144.9	29880.8 31043.6
VERTEILUNG								
IN FESTEN STOFFEN	10108.5	14163.4	17057.1	19406.1	21784.3	23448.2	25285.1	26847.9 27894.6
ADSORBIERT	597.4	566.3	477.9	386.6	349.1	278.6	258.4	288.3 179.1
KÜHLGAS	1.059	1.004	0.847	0.685	0.619	0.494	0.458	0.405 0.316
LECKAGE PRIMÄRR.	6.1	11.7	16.4	20.4	23.9	26.8	29.3	31.6 33.5
REINIGUNGSANLGE	345.1	657.6	921.8	1148.3	1342.1	1505.2	1648.2	1777.1 1882.4
DAMPFKREISLAUF	0.254	0.241	0.204	0.165	0.149	0.119	0.110	0.097 0.076
ABSCHLÄMMUNG	193.1	368.2	516.2	643.1	751.7	843.1	923.2	995.5 1054.5
SPEZIFISCHE WERTE								
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$5.3 \cdot 10^{-4}$	$4.3 \cdot 10^{-4}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	$3.1 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$ $2.0 \cdot 10^{-4}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$9.6 \cdot 10^{-3}$	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$	$4.8 \cdot 10^{-3}$	$4.4 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$ $3.0 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	181.6	220.4	248.9	271.3	296.7	313.9	333.5	345.6 359.8
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.2	109.2 113.0

Tabelle 26: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]

Li-Konzentration für alle Kugeln : 0.8ppm

14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
31.12.59	31.12.70	31.12.72	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>								
KUGELCORE	4990.5	6281.2	7206.8	7964.6	8827.9	9442.0	10150.7	11173.6
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	21728.8
GESAMT	12178.0	16911.4	20280.4	23009.8	25786.9	27726.3	29869.1	31666.2
<u>VERTEILUNG</u>								
IN FESTEN STOFFEN	10942.4	15192.2	18217.9	20670.1	23165.9	24909.7	26836.9	28454.7
ADSORBIERT	640.2	598.5	501.8	404.4	365.3	291.5	270.5	237.4
KÜHLGAS	1.135	1.061	0.889	0.717	0.647	0.517	0.479	0.421
LECKAGE PRIMÄRR.	6.7	12.6	17.6	21.8	25.4	28.5	31.1	33.5
REINIGUNGSANLAGE	376.6	709.6	988.4	1226.0	1429.0	1599.9	1749.8	1884.4
DAMPFKREISLAUF	0.273	0.255	0.214	0.172	0.156	0.124	0.115	0.101
ABSCHLÄMMUNG	210.7	397.3	553.5	686.7	800.4	896.2	980.1	1055.6
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>								
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$7.1 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$8.6 \cdot 10^{-3}$	$6.9 \cdot 10^{-3}$	$6.25 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	222.8	275.1	310.7	338.5	370.2	391.7	416.1	431.1
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	113.0

Tabelle 27: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]

Li-Konzentration für alle Kugeln: 1.0ppm

gehend vom Erstcore, den gesamten Beschickungsprozeß einschließlich der Zufuhr frischer Elemente bis hin zur jeweiligen Stützzeit erfassen, müssen sich die hieraus errechneten spezifischen Werte auf Kugeln beziehen, die von Betriebsbeginn an (Erstcore) im Reaktor sind. Somit wird ein Vergleich mit gemessenen Aktivitäten von Moderatorkugeln möglich. Allerdings dürften die errechneten Werte etwas höher liegen als die gemessenen, da gegenüber den Brennelementen bei den Moderatorkugeln nur ein begrenzter Neueinsatz erfolgt. Weil aber in keinem Fall die errechneten spezifischen Aktivitäten kleiner als die gemessenen sein können, ergibt sich somit eine gesicherte obere Schranke.

Gemessene Tritiumprofile an Graphitkugeln und Brennelementen /22/ haben gezeigt, daß die Konzentrationsabnahme von der Oberfläche zum Kugellinnern und somit auch die mittlere Tritium-Konzentration für beide Kugeltypen kaum unterschiedlich sind. Dies unterstreicht, daß eine Mittelwertbildung auf der Basis aller Kugeln ohne wesentliche Genauigkeitseinbuße möglich ist. Für Graphitkugeln, die am 25.5.75 dem Core entnommen wurden, ergaben sich bei geeigneter Mittelung des Profils Aktivitäten zwischen 180 und 200 $\mu\text{Ci/g}$. Vergleicht man diese Werte mit den in Abbildung 17 dargestellten Parameterkurven, so zeigt sich, daß unter der Voraussetzung einer Freisetzung von 10 % die Lithium-Konzentration der Kugeln 0.4 ... 0.5 ppm betragen dürfte. Die sich hierbei ergebenden spezifischen Aktivitäten für Kühlgas und Frischdampf zeigen ebenfalls eine akzeptable Übereinstimmung mit gemessenen Werten.

Legt man dagegen die in /34/ genannten Lithium-Konzentrationen von 0.033 ppm für Kugel- und 0.28 ppm für Reflektorgraphit zugrunde, so ergeben sich insgesamt zu geringe Aktivitätswerte. Die gesamte Tritiumproduktionsrate nach ca. 10-jähriger Betriebszeit des Reaktors würde dann nur 8369 Ci betragen, wodurch sowohl die spezifischen Aktivitäten für Primär- und Sekundärkreislauf als auch die Tritium-Konzentration in Reflektor- und Kugelgraphit zu niedrig sind. Die untere Kurve in Abb. 17 läßt außerdem erkennen, daß der größte Teil des Lithiums bereits Ende 1975 abgebrannt wäre und die mittlere Tritium-Konzentration der Graphitkugeln im Gegensatz zu den gemessenen Werten 20 $\mu\text{Ci/g}$ nicht überschreiten würde. Aus den genannten Erwägungen ergibt sich also mit hoher Wahrscheinlichkeit, daß die in /34/ aufgeführten Lithium-Konzentrationen zu niedrig sind.

In einer weiteren Parameterstudie wird die in Kapitel 3.2.4 beschriebene inhibierende Wirkung des Wasserstoffs auf die Tritium-Permeation numerisch

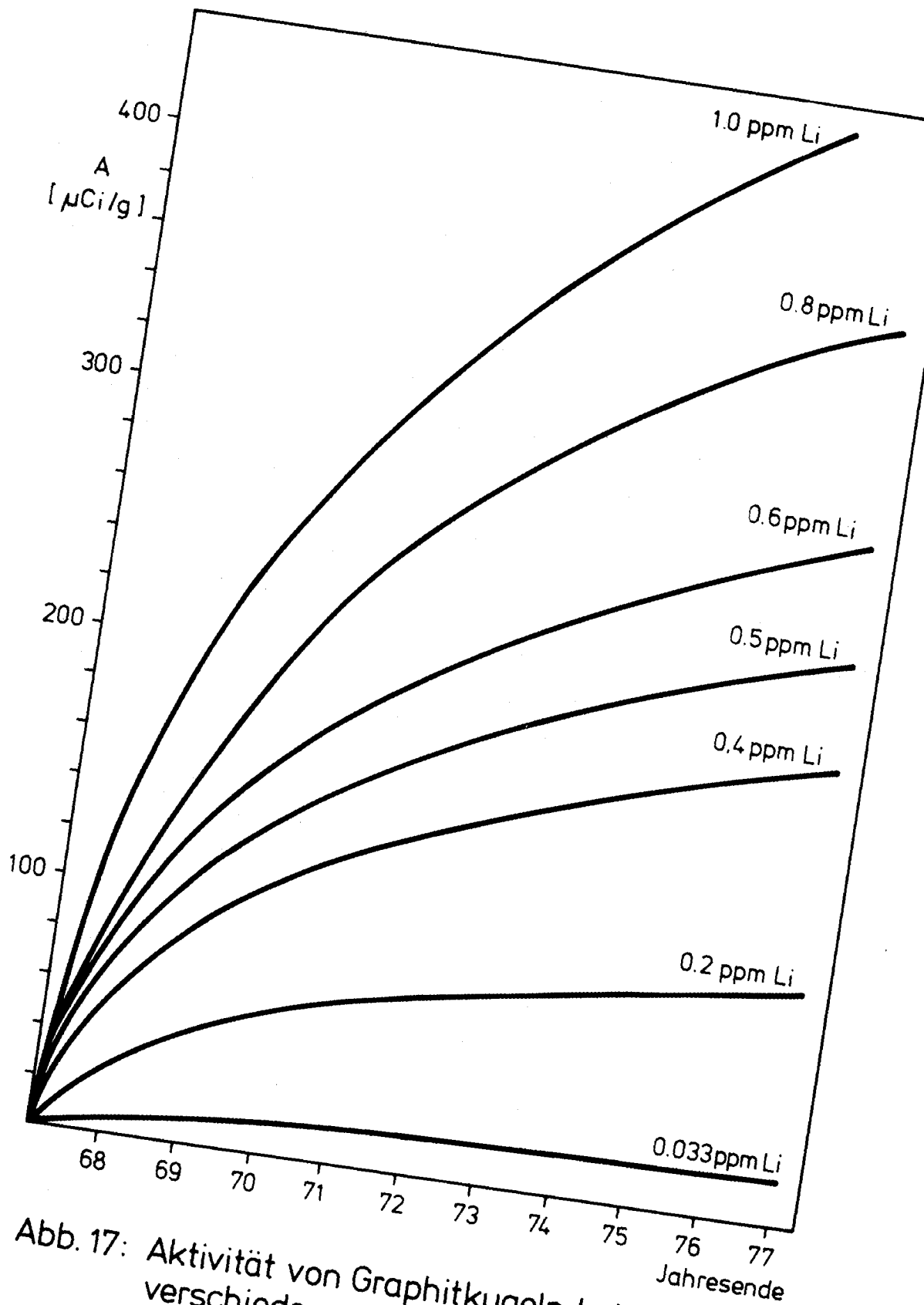


Abb. 17: Aktivität von Graphitkugeln bei verschiedenen Lithiumverunreinigungen (Einlagerungszeitpunkt: Erstcore)

untersucht. Die Rechnungen basieren dabei auf den in Kapitel 8 aufgeführten Eingabedaten. Lediglich der Rückhaltefaktor wurde zwischen 1 und 20 variiert. Dabei entspricht $R = 1$ dem unoxidierten und $R = 20$ der bereits in Tabelle 24 aufgeführten Rechnung für den oxidierten Zustand der Wärmetauscherwände. Die übrigen Parameterrechnungen sind in den Tabellen 28 ... 32 zusammengefaßt und zeigen jeweils einen Programmlauf. In Abbildung 16 ist die normierte Tritium-Übertrittsrate vom Primär- in den Sekundärkreislauf aufgetragen. Dabei wurde die Normierung so gewählt, daß die Übertrittsrate bei unoxidierten Wärmetauscherwänden jeweils 100 % beträgt. Berücksichtigt man, daß in allen hier aufgeführten Fällen bei gleichbleibendem Wasserstoffpartialdruck der Tritiumpegel im Kühlgas mit fortschreitender Zeit aufgrund sinkender Produktionsraten abnimmt, so wird der Tritiumanteil, gemessen an dem des Wasserstoffs, ebenfalls geringer; dies wiederum bedeutet eine Verstärkung des inhibierenden Einflusses. Entsprechend zeigt Abbildung 16, daß die normierte Übertrittsrate mit fortschreitender Zeit zwar ansteigt, jedoch wird hierdurch der effektive Rückhaltefaktor kleiner. So ergibt sich beispielsweise für einen in Versuchen ermittelten Rückhaltefaktor von 20 zum Jahresende 1969 ein effektiver Rückhaltefaktor von 5.6 (1/0,18), wobei dieser Wert zum Jahresende 1977 hin auf 2.7 abfällt. Im gleichen Zeitraum sinkt der Tritiumpegel im Kühlgas bei konstantem Wasserstoffanteil von 0.945 Ci auf 0.292 Ci.

Somit hat sich gezeigt, daß aufgrund des inhibierenden Einflusses der Anwesenheit von Wasserstoff auf die Tritium-Permeation die in Versuchen mit einer Komponente ermittelten Rückhaltefaktoren für den praktischen Reaktorbetrieb nicht voll zur Geltung kommen /18/. Hierbei ist der Tritium-Anteil gemessen an dem des Wasserstoffs maßgebend für die Größe des effektiven Wertes.

14.01.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
PRODUKTION								
KUGELCORF	2674.1	3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6526.7
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1
GESAMT	9861.6	14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9
VERTEILUNG								
IN FESTEN STOFFEN	8857.6	12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7
ADSORBIERT	86.9	70.6	56.3	44.4	40.8	32.9	29.9	26.2
KÜHLGAS	0.154	0.125	0.100	0.079	0.072	0.058	0.053	0.046
LECKAGE PRIMÄRR.	1.3	2.0	2.5	2.8	3.2	3.5	3.8	4.0
REINIGUNGSANLAGE	75.1	111.7	138.0	159.3	180.0	194.9	210.7	224.5
DAMPFKREISLAUF	0.739	0.600	0.479	0.377	0.347	0.280	0.254	0.223
ABSCHLÄMMUNG	839.7	1248.6	1542.6	1781.6	2012.8	2179.0	2356.4	2510.3
SPEZIFISCHE WERTE								
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$9.6 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$6.3 \cdot 10^{-5}$	$4.9 \cdot 10^{-5}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$3.3 \cdot 10^{-5}$	$2.9 \cdot 10^{-5}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$3.0 \cdot 10^{-2}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$8.9 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2
								113.0

Tabelle 28: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
Rückhaltefaktor 1 (keine Oxidbelegung)

<u>PRODUKTION</u>		14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
		31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
KUGELCORE	2674.1	3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6208.8	6526.7	
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8	
GESAMT	9861.6	14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9	28255.5	
<u>VERTEILUNG</u>										
IN FESTEN STOFFEN	8857.6	12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7	25385.3	
ADSORBIERT	107.2	85.2	68.6	53.2	49.6	39.0	36.2	31.9	21.2	
KÜHLGAS	0.190	0.151	0.122	0.094	0.088	0.069	0.064	0.057	0.038	
LECKAGE PRIMÄRR.	1.6	2.4	3.0	3.5	3.9	4.2	4.6	4.9	5.1	
REINIGUNGSANLAGE	89.8	135.0	167.4	193.8	219.1	237.5	256.8	273.7	285.3	
DAMPFKREISLAUF	0.731	0.581	0.468	0.362	0.338	0.266	0.247	0.218	0.144	
ABSCHLÄMMUNG	804.5	1210.2	1500.4	1737.8	1964.2	2129.6	2303.1	2454.5	2558.4	
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>										
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$9.4 \cdot 10^{-5}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$	$5.9 \cdot 10^{-5}$	$5.5 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$4.0 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-5}$	$2.4 \cdot 10^{-5}$	
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$2.3 \cdot 10^{-2}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$8.7 \cdot 10^{-3}$	$5.8 \cdot 10^{-3}$	
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4	226.4	
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0	

Tabelle 29: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
Rückhaltefaktor 1.25

14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>								
KUGELCORE	2674.1	3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6208.8
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1
GESAMT	9861.6	14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9
<u>VERTEILUNG</u>								
IN FESTEN STOFFEN	8857.6	12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7
ADSORBIERT	140.5	108.6	88.2	67.1	63.7	48.6	46.6	41.1
KÜHLGAS	0.249	0.192	0.156	0.119	0.113	0.086	0.083	0.073
LECKAGE PRIMÄRR.	2.0	3.1	3.8	4.4	5.0	5.4	5.9	6.3
REINIGUNGSANLAGE	111.9	171.7	214.0	249.0	281.6	306.1	331.0	353.0
DAMPFKREISLAUF	0.716	0.553	0.449	0.342	0.325	0.247	0.237	0.209
ABSCHLÄMMUNG	748.7	1149.5	1433.4	1667.7	1886.5	2050.2	2217.3	2364.6
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>								
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	$7.4 \cdot 10^{-5}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$5.4 \cdot 10^{-5}$	$5.2 \cdot 10^{-5}$	$4.6 \cdot 10^{-5}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$2.9 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$9.9 \cdot 10^{-3}$	$9.5 \cdot 10^{-3}$	$8.4 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2
								113.0

Tabelle 30: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
Rückhaltefaktor 1.6

	14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
	31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>									
KUGELCORE	2674.1	3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6208.8	6526.7
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	9861.6	14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9	28255.5
<u>VERTEILUNG</u>									
IN FESTEN STOFFEN	8857.6	12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7	25385.3
ADSORBIERT	199.0	151.4	122.3	92.3	88.5	66.1	65.2	57.5	38.4
KÜHLGAS	0.353	0.268	0.217	0.164	0.157	0.117	0.116	0.102	0.068
LECKAGE PRIMÄRR.	2.6	4.2	5.2	6.1	7.0	7.6	8.2	8.8	9.2
REINIGUNGSANLAGE	146.5	233.4	294.6	345.3	391.3	426.9	461.8	493.1	515.7
DAMPFKREISLAUF	0.677	0.515	0.416	0.314	0.301	0.225	0.222	0.195	0.130
ABSCHLÄMMUNG	654.8	1043.8	1317.2	1544.4	1750.0	1909.7	2065.6	2205.6	2306.8
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>									
KÜHLGAS $\left[\frac{\mu\text{Ci}}{\text{Ncm}^3} \right]$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$9.8 \cdot 10^{-5}$	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$6.4 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$
DAMPF $\left[\frac{\mu\text{Ci}}{\text{g}} \right]$	$2.7 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$9.0 \cdot 10^{-3}$	$8.9 \cdot 10^{-3}$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN $\left[\frac{\mu\text{Ci}}{\text{g}} \right]$	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4	113.0
REFLEKTOR $\left[\frac{\mu\text{Ci}}{\text{g}} \right]$	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0

Tabelle 31: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
Rückhaltefaktor 2.5

	14.02.68	01.01.70	01.01.71	01.01.72	01.01.73	01.01.74	01.01.75	01.01.76	01.01.77
	31.12.69	31.12.70	31.12.71	31.12.72	31.12.73	31.12.74	31.12.75	31.12.76	31.12.77
<u>PRODUKTION</u>									
KUGELCORE	2674.1	3423.6	3982.3	4453.6	4990.2	5382.3	5840.1	6208.8	6526.7
REFLEKTOR	7187.5	10630.2	13073.6	15045.2	16959.0	18284.3	19718.4	20994.1	21728.8
GESAMT	9861.6	14053.8	17055.9	19498.8	21949.2	23666.6	25558.5	27202.9	28255.5
<u>VERTEILUNG</u>									
IN FESTEN STOFFEN	8857.6	12620.3	15315.9	17510.2	19711.9	21256.0	22957.3	24437.7	25385.3
ADSORBIERT	322.9	260.1	206.7	158.0	148.5	112.3	110.0	97.8	68.6
KÜHLGAS	0.572	0.461	0.366	0.280	0.263	0.199	0.195	0.173	0.122
LECKAGE PRIMÄRR.	3.7	6.4	8.4	10.0	11.4	12.6	13.6	14.6	15.3
REINIGUNGSANLAGE	209.1	360.4	471.0	562.4	641.7	706.2	765.3	819.6	860.8
DAMPFKREISLAUF	0.549	0.442	0.351	0.269	0.252	0.191	0.187	0.166	0.116
ABSCHLÄMMUNG	467.2	805.7	1053.2	1257.7	1435.1	1579.3	1711.7	1832.9	1925.2
<u>SPEZIFISCHE WERTE</u>									
KÜHLGAS [$\mu\text{Ci}/\text{Ncm}^3$]	$3.6 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$1.6 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-5}$
DAMPF [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$	$1.4 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$4.6 \cdot 10^{-3}$
GR. KUGELN [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	111.9	138.4	156.3	170.4	186.4	197.4	209.8	217.4	226.4
REFLEKTOR [$\mu\text{Ci}/\text{g}$]	37.4	55.3	68.0	78.3	88.2	95.1	102.6	109.2	113.0

Tabelle 32: Tritiuminventar des AVR-Reaktors [Ci]
Rückhaltefaktor 5.0

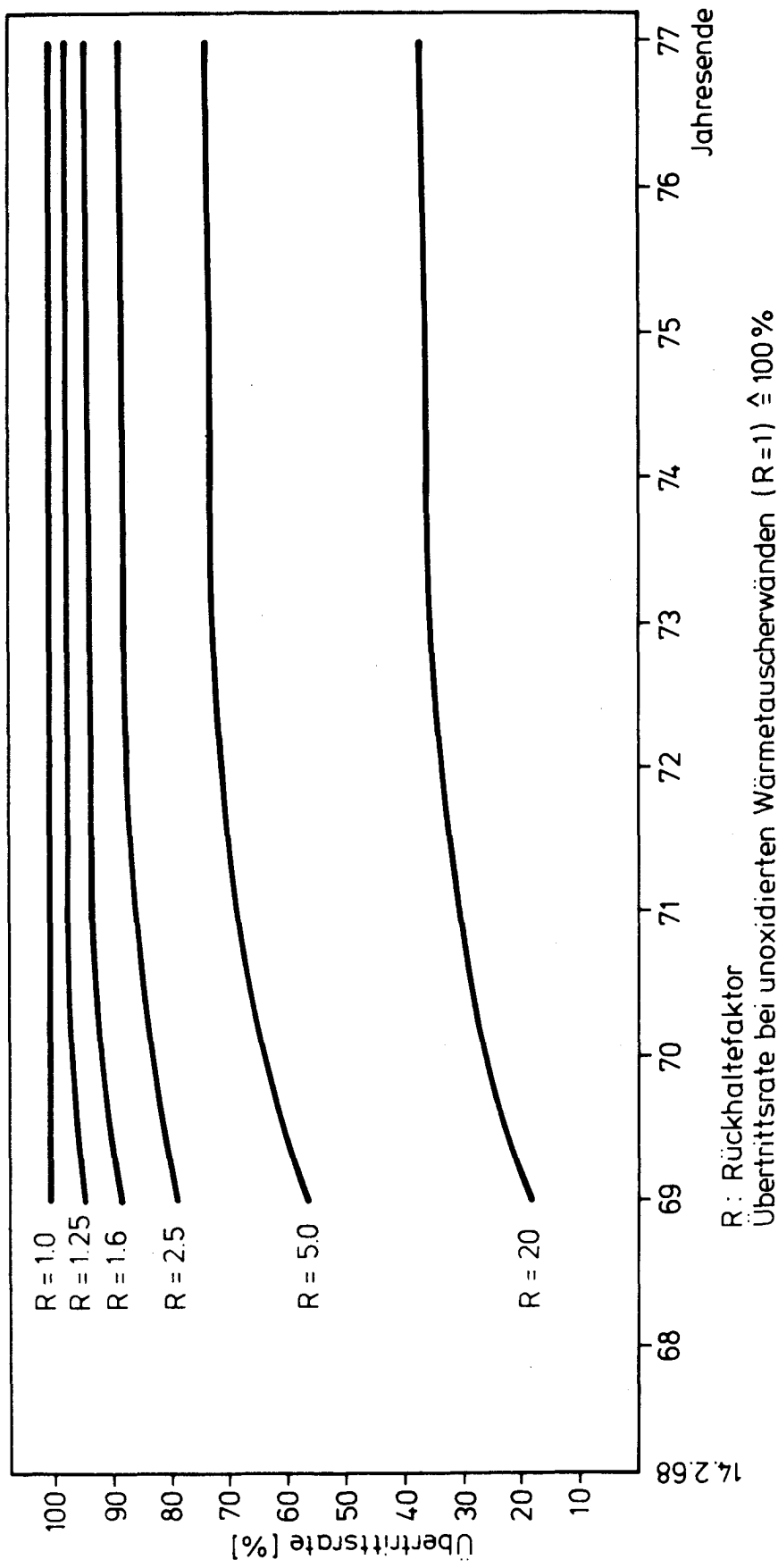


Abb. 16: Tritium - Übertrittsrate in den Sekundärkreislauf des AVR bei verschiedenen Rückhaltefaktoren

8 ZUSAMMENSTELLUNG DER VERWENDETEN DATEN DES AVR

Allgemeine Daten

Thermische Leistung	45.2	MW
He-Inhalt Primärkreislauf	1600	Nm ³
Druck im Primärkreislauf	10	bar
Mittlere He-Temperatur	600	°C
He-Verlustrate	1.25	Nm ³ /h
³ He-Anteil im Frisch-Helium	$1.37 \cdot 10^{-7}$	
He-Durchsatz Reinigungsanlage	55	Nm ³ /h
Wasserstoffanteil im Kühlgas	15	vpm
Wassermasse Sekundärkreislauf	25000	kg
Wassereinspeisung Sekundärkreislauf	2000	kg/h

Kugelbezogene Daten

Masse, sowie Li-, B- und Be-Anteile der verschiedenen Kugeltypen:	Tabelle 10
--	------------

Zeitbezogene Daten

Vorgegebene Stützzeiten:	Tabelle 12
Stillstandszeiten des Reaktors:	Tabelle 13

Neutronendosis, Neutronenfluß

Neutronendosen der verschiedenen Kugeltypen in Abhängigkeit der Wieder- beladungszahlen:	Tabelle 14
Mittlere Zweigruppenflüsse als Funk- tion der Wiederbeladungszahl:	Tabelle 15
Mittlere Zweigruppenflüsse der Re- gionen auf der Basis Wiederbeladung 193:	Tabelle 16

Wärmetauscherdaten

	A	s	T	K_0	Q
Economiser I	647	3.5	300	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Economiser II	239	3.5	325	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Vorverdampfer I	38.2	3.5	350	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Vorverdampfer II	229	3.5	375	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Nachverdampfer	286	3.5	400	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Vorüberhitzer	172	3.5	420	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Endüberhitzer I	42.5	4.0	485	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5
Endüberhitzer II	26.9	4.0	555	$2.95 \cdot 10^{-3}$	11.5

- A Wärmetauscherfläche $[\text{cm}^2]$
 s Wandstärke $[\text{mm}]$
 T Mittlere Rohrwandtemperatur $[\text{°C}]$
 K_0 Temperaturabhängige Permeationskonstante /35/ $\left[\frac{\text{cm}}{\text{sec bar}^{1/2}} \right]$
 Q Aktivierungsenergie /35/ $\left[\frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \right]$

Regionale Daten:

	R E G I O N							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Graphit- bzw. Kohlesteineinsatz [kg]	4930	2465	5237	6074	90322	5048	7990	50217
Graphit- bzw. Kohlesteindichte [g/cm ³]	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
Mittlere Graphit- bzw. Kohlestein-temp. [°C]	850	450	900	450	600	270	270	850
Anteil Lithium [ppm]					1.0	1.0	1.0	1.0
Anteil Bor [ppm]		Tabbele 10			0.9	0.9	0.9	0.9
Anteil Beryllium [ppm]					-	-	-	-
Freisetzungsanteil für Spalttritium	0.01	0.01	0.01	0.01	-	-	-	-
Freisetzungsanteil für Tritium, das durch Neutronenreaktionen im Graphit bzw. Kohlestein entsteht	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Angaben zur Berechnung des durch Recoil gebundenen Anteils:								
Zu $H/R \leq 1$ gehörendes Volumen [cm ³]	-	-	-	-	$1.62 \cdot 10^5$	$1.25 \cdot 10^4$	$6.64 \cdot 10^4$	$3.81 \cdot 10^5$
Mittlere Hohlraumgröße [cm]	-	-	-	-	0.05	0.05	0.05	0.05
Zu $H/R > 1$ gehörendes Volumen [cm ³]	$1.82 \cdot 10^6$	$9.10 \cdot 10^5$	$2.08 \cdot 10^6$	$2.37 \cdot 10^6$	$1.61 \cdot 10^7$	$1.24 \cdot 10^6$	$6.57 \cdot 10^6$	$3.77 \cdot 10^7$
Mittlere Hohlraumgröße [cm]	1.0	1.0	1.0	1.0	10.0	10.0	10.0	100.0

Zusammensetzung der Kugelcoreregionen: Tabelle 11

9 ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit befaßt sich mit der numerischen Berechnung des Tritium-Haushaltes von Hochtemperaturreaktoren und führt entsprechende Rechnungen am AVR-Reaktor durch. Da viele der benötigten physikalischen Daten ortsabhängig sind, wird das Core in Regionen aufgeteilt, wodurch eine genaue Erfassung der Werte ermöglicht und der Aufwand in vertretbaren Grenzen gehalten wird. In Anlehnung an ein ORNL-Programm, das für Hochtemperaturreaktoren mit blockförmigen Brennelementen geschrieben wurde, erfolgt separat für jede Region die Beschreibung der Produktion und Verteilung für die verschiedenen Tritium-Lieferanten durch lineare Differentialgleichungen. Die Programmbereiche, die sich mit der Bindung des aus der Gasphase durch Recoil in den Graphit gelangenden Tritium-Anteils befassen, wurden für die Belange der Kugelschüttung neu bearbeitet; neuere Ergebnisse zur Adsorption von Tritium an Graphit sind in den Rechenalgorithmus übernommen worden.

Eine besondere Problematik bei der Programmentwicklung stellte die wegen des Mehrfach-Kugeldurchlaufes komplexe Zeitabhängigkeit der Tritium-Lieferanten in den verschiedenen Regionen dar. Dieses Problem wurde dadurch gelöst, daß, ausgehend von bekannten Neutronendosen, fiktive Einlagerungszeitpunkte für die einzelnen Kugeltypen und hieraus in Verbindung mit der Kugelzusammensetzung der jeweiligen Region entsprechende Tritium-Vorläufer-Atomzahlen bestimmt wurden. Hieraus ergaben sich dann verursachergerecht aufgeschlüsselt die verschiedenen Tritium-Quellraten.

Parameterstudien mit verschiedenen Lithium-Gehalten der Kugeln haben gezeigt, daß das System hier sehr sensitiv reagiert. Es konnte abgeleitet werden, daß die Lithium-Verunreinigungen der Kugeln ca. 0,5 ppm betragen dürften. In der folgenden Tabelle sind die errechneten und gemessenen spezifischen Werte für diesen Fall gegenübergestellt.

Spezifische Werte		Jahresmitte 1975	
		errechnet	gemessen
Graphitkugeln	[μ Ci/g]	203	180...200
Kühlgas	[μ Ci/cm ³]	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$10^{-4} \dots 10^{-2}$
Dampf	[μ Ci/g]	$4.25 \cdot 10^{-3}$	$(4 \dots 7) \cdot 10^{-3}$

Bezieht man die gesamte Rechnung in die Betrachtungen mit ein, so zeigt sich, daß das Modell die Wirklichkeit gut beschreibt.

Am Beispiel des AVR-Reaktors wurde demonstriert, daß das entwickelte Programm ein leistungsfähiges Instrument zur quantitativen Beschreibung des Tritium-Haushaltes von Hochtemperaturreaktoren darstellt, das in weiterführenden Arbeiten Anwendung auf zukünftige Leistungssysteme finden sollte. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, daß man nicht mehr von der pessimistischen Annahme einer vollständigen Freisetzung des im Graphit gebildeten Tritiums ausgehen muß. Somit dürfte ein Beitrag zur Entschärfung des Tritium-Problems geleistet worden sein.

10 LITERATUR

- /1/ Bundesminister für Forschung und Technologie:
Über die Entwicklung des Hochtemperatur-Reaktors.
5. Juni 1978.
- /2/ BOEHNERT, R.; BONKA, H.:
Zu erwartende Tritium-Verunreinigung durch Kernreaktoren in der Luft
und im Wasser bei homogener Verteilung bis zum Jahr 2000.
JÜL-763, 1971.
- /3/ SANDERS, S.M.; REINIG, W.C.:
Assessment of Tritium in Man.
Proceedings of the Symposium on Diagnosis and Treatment of
Deposited Radionuclides, Richland, Washington, May 15-17, 1967.
- /4/ FISCHER, P.G.; STÖVER, D.:
Der Tritium-Kreislauf in Hochtemperaturreaktoren.
Interner Bericht IRE-27-73, 1973.
- /5/ FISCHER, P.G.:
Verhalten von Tritium in Reaktorgraphiten.
JÜL-1238, September 1975.
- /6/ THIELE, W.:
Tritium-Permeation bei einer HKV-Anlage.
Bericht HRB, Juni 1978.
- /7/ Beiträge des Instituts für Reaktorentwicklung zum II. Seminar über
Wasserstoff- und Tritium-Verhalten in Hochtemperaturreaktoren.
JÜL-1497, März 1978.
- /8/ COMPERE, E.L.; FREID, S.H.; NESTOR, C.W.:
Distribution and Release of Tritium in High Temperature Gas Cooled
Reactors as a Function of Design Operational and Material Parameters.
Oak Ridge National Laboratory, June 1974.
- /9/ RAY, J.W.:
Tritium in Power Reactors.
Reactor and Fuel; Reprocessing Technology, Vol. 12, No. 1, 1969.
- /10/ FISCHER, P.G.; STÖVER, D.; RÖHRIG, H.D.; HECKER, R.:
Untersuchungen zum Tritium-Transportverhalten in Hochtemperaturreaktoren.
Reaktortagung DATF/KTG, Tagungsband Seite 420-423.
Berlin 1974.
- /11/ RÖHRIG, H.D. et al.:
Persönliche Mitteilung.
KFA-IRE 1978.
- /12/ RÖHRIG, H.D.; FISCHER, P.G.; HECKER, R.:
Tritium Balance in High-Temperature Gas-Cooled Reactors.
The American Ceramic Society, Vol. 59, No. 7-8.
August 1976.

- /13/ WALTER, K.H.; KIENBERGER, K.H.; LANGE, G.:
Untersuchungen zur Rückhaltung von Tritium in HTR-Brennelementen.
J. Nucl. Mater. 48 (1973) 287-292.
 - /14/ AMIAN, W.; BIEDERMANN, P.; HECKER, R.; HERZING, R.; MAX, A.; OVERHOFF, Th.; RÜCKERT, M.; STÖVER, D.:
Neuere Arbeitsergebnisse aus dem Vorhaben "Diffusionsdaten und Spaltproduktfreisetzung".
JÜL-1421, Juni 1977.
 - /15/ ETHERINGTON, H.:
Nuclear Engineering Handbook, p. 2-34, 1958.
 - /16/ HOINKIS, E. et al.
Persönliche Mitteilung.
HMI, Berlin 1978.
 - /17/ MALKA, V.:
Persönliche Mitteilung.
KFA-IRE, 1978.
 - /18/ RÖHRIG, H.D.:
Zur Frage, wie sich eine Oxidschicht auf die Inhibierung der Tritium-Permeation auswirkt.
Technische Notiz HMT/25/1978.
 - /19/ WAGEMANN, R.:
Aufbau und Auslegung eines numerischen Simulationsverfahrens für Kugelhaufenreaktoren mit mehrfachem Kugeldurchlauf am Beispiel des AVR.
AVR, Hauptabteilung T1, März 1974.
 - /20/ MALY, V.; NIEDER, R.:
Langzeitverhalten des Tritiums (Primärkreislauf)
AVR, Arbeitsbericht T19.1, Dezember 1976.
 - /21/ MALY, V.; NIEDER, R.:
Langzeitverhalten des Tritiums (Sekundärkreislauf).
AVR, Arbeitsbericht T19.2, Januar 1977.
 - /22/ NIEDER, R.; NIEDERAU, A.:
Tritium-Messungen an Graphitkugeln und Brennelementen aus dem AVR-Core.
AVR, Arbeitsbericht T15, Mai 1976.
- WAGEMANN, R.; WIMMERS, M.; WAHL, D.; MALY, V.; WEBER, J.; SCHWARZ, U.:
Zusammenstellung der reaktorphysikalischen Daten des AVR-Atomversuchskraftwerkes (Jahresberichte)
- /23/ für das Jahr 1969
 - /24/ für das Jahr 1970
 - /25/ für das Jahr 1971
 - /26/ für das Jahr 1972
 - /27/ für das Jahr 1973
 - /28/ für das Jahr 1974
 - /29/ für das Jahr 1975
 - /30/ für das Jahr 1976
 - /31/ für das Jahr 1977

AVR, Hauptabteilung T1

- /32/ WAGEMANN, R.:
Normierte Neutronenflüsse des AVR, aufgegliedert in 43 Energiegruppen für 8 Core-Regionen; Eingruppenflüsse für 107 Core-Zonen.
Rechner-Output, August 1977.
- /33/ WAGEMANN, R.:
Persönliche Mitteilung.
KFA-IRE, 1978.
- /34/ NIEDER, R.:
Lithium-Bestimmung im Graphit.
AVR, Arbeitsbericht T.10 2. Teil, Januar 1974.
- /35/ THIELE, W.:
Tritium-Permeation bei einer HKV-Anlage.
HRB, Arbeitsbericht BF 0216, Juni 1978.

11. ANHANG

RECHNER - OUTPUT

DURING THE PERIOD FROM 11 1 68 TO 12 31 69 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2									
CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS									
SOURCE - ATOMS	TRITIUM PRODUCTION	SOLIDS	BOUND IN GR. SURFACE	CCCLANT	IN PRIMARY LEAKAGE FROM PURIF. PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR		
KUGELCOPE-REGION 1									
FUEL	83.196553	82.364583	0.471696	0.000836	0.004055	0.227777	0.000201	0.127406	
HE-3	10.435896	3.788101	3.756243	0.006657	0.032543	1.828167	0.001599	1.022587	
FR-10	0.313058	0.281752	0.009196	0.000016	0.000249	0.014001	0.000004	0.007840	
E-10	0.263773	0.237396	0.015192	0.000028	0.000119	0.006490	0.000007	0.003741	
LI-7	0.973565	0.876299	0.058902	0.000104	0.000433	0.024302	0.000025	0.013590	
C-12	0.020967	0.018870	0.001638	0.000003	0.000005	0.000289	0.000001	0.000161	
BE-9	0.012734	0.011434	0.000902	0.000002	0.000004	0.000232	0.000000	0.000130	
LI-6	624.929556	562.456583	28.566812	0.050630	0.382135	21.467010	0.012171	12.014195	
REGION TOTALS	720.146052	650.014927	32.881182	0.058276	0.419543	23.568468	0.014007	13.189649	
KUGELCOPE-REGION 2									
FUEL	55.128511	54.577224	0.312560	0.000554	0.002687	0.150932	0.000133	0.084423	
HE-3	12.743408	3.452092	4.118160	0.007299	0.035679	2.004312	0.001753	1.121114	
FR-10	0.163194	0.146874	0.004385	0.000008	0.000135	0.007558	0.000002	0.004232	
SR-10	0.138218	0.124396	0.007634	0.000014	0.000370	0.003913	0.000003	0.002189	
LI-7	0.744254	0.665837	0.044985	0.000080	0.000331	0.018607	0.000019	0.010405	
C-12	0.024088	0.021680	0.001874	0.000003	0.000006	0.003337	0.000001	0.000188	
EL-9	0.014216	0.012795	0.000999	0.000002	0.000005	0.000266	0.000000	0.000149	
LI-6	338.604166	304.743750	14.461710	0.025631	0.218539	12.276775	0.006163	6.871599	
REGION TOTALS	405.557066	363.746648	18.552306	0.033590	0.257451	14.462699	0.008074	8.094299	
KUGELCOPE-REGION 3									
FUEL	74.223893	73.481650	0.420824	0.000746	0.003617	0.203211	0.000179	0.113665	
HE-3	8.913567	3.207637	3.224055	0.005714	0.027933	1.569150	0.001372	0.877706	
FR-10	0.004850	0.004365	0.000155	0.000000	0.000004	0.000209	0.000000	0.000117	
LI-7	0.003865	0.003478	0.000242	0.000000	0.000002	0.000091	0.000000	0.000051	
LI-7	0.186997	0.168207	0.010638	0.000019	0.000091	0.005091	0.000005	0.002847	
C-12	0.019071	0.017164	0.001494	0.000003	0.000005	0.000260	0.000001	0.000145	
BE-9	0.011773	0.010596	0.000842	0.000001	0.000004	0.000212	0.000000	0.000118	
LI-6	616.867476	555.180728	29.489338	0.052265	0.362616	20.370472	0.012562	11.399495	
REGION TOTALS	700.231391	632.073826	33.147587	0.058748	0.394270	22.148696	0.014119	12.394145	
KUGELCOPE-REGION 4									
FUEL	94.208163	93.266076	0.534128	0.000947	0.004591	0.257924	0.000227	0.144268	
HE-3	18.354098	5.735908	7.129730	0.012636	0.036170	3.470045	0.003035	1.940973	
FR-10	0.005499	0.004549	0.000169	0.000000	0.000004	0.000241	0.000000	0.000135	
SR-10	0.004524	0.004072	0.000278	0.000000	0.000002	0.000110	0.000000	0.000062	
LI-7	0.236354	0.212719	0.013455	0.000004	0.000015	0.006436	0.000006	0.003600	
C-12	0.028799	0.025919	0.002253	0.000004	0.000007	0.000395	0.000001	0.000220	
BE-9	0.017632	0.015869	0.001257	0.000002	0.000006	0.000320	0.000001	0.000179	
LI-6	735.303667	661.773301	34.472642	0.061097	0.439904	24.712277	0.014686	13.829761	
REGION TOTALS	848.158738	761.038814	42.153911	0.074711	0.506400	28.447749	0.017955	15.919198	

REFLEKTOR-REGION 5									
HE-3	18.131815	7.508014	6.002829	0.010639	0.052007	2.921582	0.002555	1.634190	
FB-10	0.025850	0.023265	0.001323	0.000000	0.000014	0.000799	0.000001	0.000447	
SB-10	0.034338	0.003905	0.000308	0.000001	0.000001	0.000779	0.000000	0.000044	
LI-7	0.172607	0.155347	0.000000	0.000017	0.000084	0.000717	0.000004	0.002638	
C-12	0.000047	0.000042	0.000004	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000031	0.000028	0.000002	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
LI-6	5642.960668	5378.666601	312.003034	0.552972	2.839773	159.528408	0.132816	89.239064	
REGION TOTALS	5661.295356	5086.355201	318.017300	0.563631	2.851880	162.455586	0.135375	90.876383	
REFLEKTOR REGION 6									
HE-3	6.154950	2.079833	2.302587	0.004081	0.019949	1.123671	0.000980	0.626849	
FB-10	0.003566	0.003210	0.000148	0.000000	0.000002	0.000132	0.000000	0.000074	
SB-10	0.001765	0.001589	0.000120	0.000000	0.000001	0.000036	0.000000	0.000020	
LI-7	0.047498	0.042748	0.002702	0.000005	0.000023	0.001294	0.000001	0.000724	
C-12	0.000169	0.000152	0.000013	0.000000	0.000000	0.000002	0.000000	0.000001	
BE-9	0.000109	0.000098	0.000008	0.000000	0.000000	0.000002	0.000000	0.000001	
LI-6	783.281177	736.953060	41.652050	0.072758	3.419675	23.575846	0.017480	13.190309	
REGION TOTALS	789.489234	707.080688	43.357628	0.076844	6.439650	24.697584	0.018462	13.817978	
REFLEKTOR-REGION 7									
HE-3	4.832306	0.678816	2.346871	0.004159	0.020333	1.142224	0.000999	0.638904	
FB-10	0.001567	0.001410	0.000084	0.000000	0.000001	0.000046	0.000000	0.000026	
SB-10	0.000154	0.000139	0.000011	0.000000	0.000003	0.000003	0.000000	0.000002	
LI-7	0.008851	0.007965	0.000502	0.000001	0.000034	0.000242	0.000000	0.000135	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	308.596110	277.736499	17.239450	0.030000	0.153259	8.611773	0.007338	4.817197	
REGION TOTALS	313.438989	278.424831	19.586918	0.034714	0.173637	9.754288	0.008337	5.456264	
REFLEKTOR-REGION 8									
HE-3	2.794040	0.408958	1.347657	0.002388	0.011676	0.655906	0.000574	0.366881	
FB-10	0.013668	0.012301	0.000766	0.000001	0.000007	0.000380	0.000000	0.000213	
SB-10	0.002772	0.002445	0.000020	0.000003	0.000000	0.000005	0.000000	0.000003	
LI-7	0.062776	0.056498	0.003560	0.000006	0.000031	0.001718	0.000902	0.000961	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	420.477839	378.430055	23.767446	0.042124	0.205738	11.557613	0.010116	6.464751	
REGION TOTALS	423.348597	378.908060	25.119448	0.044520	0.217451	12.215618	0.010692	6.832809	
TOTAL CURIES									
	5861.665425	8857.644994	533.216279	0.945034	5.300281	297.751088	0.227022	166.580725	

DURING THE PERIOD FROM 7 20 70 TO 12 31 70 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00
THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.30 PPM H2

CUMULATIVE TRITIUM IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS									
TRITIUM PRODUCTION		BOUND IN SOLIDS		BOUND IN GR. SURFACE		IN PRIMARY COOLANT		H2O IN STEAM GENERATOR	
SOURCE - ATOM.		SOLIDS		GR. SURFACE		PRIMARY LEAKAGE FROM PLANT		STEAM GENERATOR	
KUGELCORE-REGION 1									
FUEL	131.834537	130.516185	0.535423	0.000949	0.008821	0.495543	0.000228	0.277388	
HE-3	16.512370	5.993785	4.263622	0.007557	0.070474	3.958999	0.001815	2.216117	
FB-10	0.377098	0.339388	0.007290	0.000013	0.003433	0.019269	0.000003	0.01792	
SB-10	0.309722	0.278750	0.009463	0.000017	0.003242	0.013620	0.000004	0.007626	
LI-7	1.146191	1.031572	0.038232	0.000088	0.000861	0.048364	0.000016	0.027079	
C-12	0.023358	0.021023	0.000890	0.000002	0.000016	0.000915	0.000000	0.000512	
BE-9	0.033268	0.029942	0.001945	0.000003	0.000016	0.000874	0.000001	0.000489	
LI-6	754.435509	678.991958	20.469431	0.036279	0.619730	34.814270	0.008722	19.495119	
REGION TOTALS	904.672055	817.202603	25.326295	0.044887	0.700504	39.351854	0.010790	22.035121	
KUGELCORE-REGION 2									
FUEL	87.357487	86.483908	0.354787	0.000629	0.005845	0.328362	0.000151	0.183805	
HE-3	16.994199	5.462130	4.674426	0.008285	0.077265	4.340452	0.001990	2.429642	
FB-10	0.196884	0.177195	0.003560	0.000006	0.003182	0.010217	0.000002	0.005722	
SB-10	0.171923	0.154731	0.005155	0.000009	0.000136	0.007622	0.000002	0.004268	
LI-7	0.867059	0.780353	0.028558	0.000051	0.000655	0.036816	0.000012	0.026613	
C-12	0.026989	0.024290	0.001031	0.000002	0.000019	0.001056	0.000000	0.000591	
BE-9	0.038830	0.034967	0.002288	0.000004	0.000018	0.001008	0.000001	0.000564	
LI-6	387.864036	349.776066	5.257874	0.016408	0.332914	18.701916	0.003946	10.473344	
REGION TOTALS	493.517368	442.195161	14.227680	0.025393	0.417033	23.427448	0.006104	13.118549	
KUGELCORE-REGION 3									
FUEL	117.616322	116.440153	0.477678	0.000867	0.007870	0.442093	0.000203	0.247472	
HE-3	14.103639	5.075337	3.655448	0.006486	0.063489	3.398085	0.001558	1.902136	
FB-10	0.004914	0.004423	0.000370	0.000007	0.000025	0.000267	0.000000	0.000149	
SB-10	0.003900	0.003510	0.001066	0.000000	0.000003	0.000180	0.000000	0.000101	
LI-7	0.297877	0.268089	0.012164	0.000022	0.000099	0.011155	0.000005	0.006244	
C-12	0.021164	0.019048	0.000836	0.000001	0.000015	0.000830	0.000000	0.000465	
BE-9	0.029092	0.026182	0.001677	0.000003	0.000014	0.000779	0.000001	0.000436	
LI-6	789.755340	710.816256	23.783627	0.042152	0.622167	34.951126	0.010133	19.570379	
REGION TOTAL	921.872748	832.652999	27.935677	0.049511	0.690761	38.804520	0.011900	21.727381	
KUGELCORE-REGION									
FUEL	144.283704	147.790860	0.662290	0.001075	0.009389	0.561131	0.000258	0.314102	
HE-3	29.041076	9.075736	8.092788	0.014343	0.133767	7.514582	0.003445	4.206415	
FB-10	0.005550	0.004995	0.000785	0.000000	0.000005	0.000304	0.000000	0.000170	
SB-10	0.004555	0.004100	0.001122	0.000000	0.000004	0.000211	0.000000	0.000118	
LI-7	0.376324	0.338692	0.015358	0.000027	0.000251	0.014098	0.000007	0.007892	
C-12	0.020014	0.020813	0.001219	0.000002	0.000022	0.001255	0.000001	0.000702	
BE-9	0.044122	0.039710	0.002551	0.000005	0.000021	0.001177	0.000001	0.000658	
LI-6	924.710884	832.239795	26.899178	0.047674	0.739151	41.522899	0.011461	23.250725	
REGION TOTALS	1103.498230	989.522701	35.617580	0.063126	0.883211	49.615657	0.015172	27.780783	

REFLEKTOR-REGION 5									
ME-3	28.589365	11.879680	6.813668	0.012076	0.112625	6.326852	0.002901	3.541563	
FR-10	0.033125	0.029813	0.001048	0.000002	0.000026	0.001434	0.000000	0.000803	
SB-10	0.004864	0.004377	0.000170	0.000000	0.000004	0.000200	0.000000	0.000112	
LI-7	0.274689	0.251720	0.011544	0.000020	0.000185	0.010396	0.000005	0.005819	
C-12	0.030051	0.030046	0.000002	0.000003	0.000000	0.000002	0.000000	0.000001	
BE-9	0.000083	0.000075	0.000005	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	
LI-6	8402.092730	7561.883457	321.069075	0.569040	5.849781	328.620051	0.136707	183.964619	
REGION TOTALS	8431.099978	7574.049169	327.895512	0.581139	5.962620	334.958937	0.139613	187.512918	
REFLEKTOR-REGION 6									
ME-3	9.738772	3.290850	2.613613	0.004632	0.043201	2.426878	0.001113	1.358486	
FR-10	0.003760	0.003384	0.000075	0.000000	0.000003	0.000190	0.000000	0.000107	
SB-10	0.001810	0.001629	0.000055	0.000000	0.000001	0.000080	0.000000	0.000045	
LI-7	0.077257	0.069531	0.003198	0.000006	0.000051	0.002866	0.000001	0.001604	
C-12	0.000186	0.000167	0.000007	0.000000	0.000000	0.000007	0.000000	0.000004	
BE-9	0.000336	0.000275	0.000018	0.000000	0.000000	0.000008	0.000000	0.000004	
LI-6	1045.125140	940.612626	35.048218	0.062117	0.782857	43.580363	0.014928	24.623992	
REGION TOTALS	1054.947230	943.978462	37.665183	0.066755	0.826154	46.410392	0.016042	25.984242	
REFLEKTOR-REGION 7									
ME-3	7.645955	1.074067	2.663877	0.004721	0.044032	2.473551	0.001134	1.384612	
FR-10	0.002165	0.001948	0.000076	0.000000	0.000002	0.000089	0.000000	0.000050	
SB-10	0.000179	0.000162	0.000007	0.000000	0.000000	0.000007	0.000000	0.000004	
LI-7	0.014259	0.012833	0.000586	0.000001	0.000009	0.000531	0.000000	0.000298	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	470.968334	423.871519	18.454627	0.032708	0.322732	18.129924	0.007857	10.148988	
REGION TOTAL	478.630955	424.860531	21.119173	0.037430	0.366775	20.604103	0.008992	11.533952	
REFLEKTOR-REGION 8									
ME-3	4.420916	0.647081	1.529693	0.002711	0.025285	1.420401	0.000651	0.795094	
FR-10	0.020995	0.018896	0.000828	0.000001	0.000014	0.000805	0.000000	0.000451	
SB-10	0.000335	0.000301	0.000013	0.000000	0.000000	0.000013	0.000000	0.000007	
LI-7	0.099924	0.089932	0.004072	0.000307	0.000067	0.003747	0.000002	0.002098	
C-12	0.000002	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000003	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	661.041780	544.937802	26.651234	0.047235	0.444519	24.971512	0.011346	13.978331	
REGION TOTAL	665.583954	545.693816	28.185841	0.049955	0.469885	26.396479	0.011999	14.775981	
TOTAL CURIE									
	14653.822449	12620.255440	518.072941	0.918195	10.316942	579.569389	0.220613	324.468927	

DURING THE PERIOD FROM 4 21 71 TO 12 31 71 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2									
CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS									
SOURCE - ATOMS	TRITIUM PRODUCTION	SOLIDS BOUND IN ADSORBED ON GR. SURFACE	COOLANT IN PRIMARY LEAKAGE FROM PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR				
KUGELCORE-REGION 1									
FUEL	177.592641	175.816706	0.560946	0.000994	0.013695	0.769312	0.000239	0.430749	
HE-3	21.422100	7.775956	4.053694	0.007255	0.107675	6.048818	0.001743	3.386959	
FB-10	0.417744	0.375969	0.005535	0.000310	0.004609	0.022959	0.000002	0.012860	
SB-10	0.343595	0.309239	0.006734	0.000012	0.000311	0.017499	0.000003	0.005800	
LI-7	1.258380	1.132542	0.024659	0.000044	0.001141	0.064089	0.000011	0.035894	
C-12	0.027273	0.024546	0.000722	0.000001	0.000023	0.001270	0.000000	0.000711	
BE-9	0.361469	0.055322	0.003131	0.000006	0.000034	0.001908	0.000001	0.001067	
LI-6	829.439338	746.495404	13.950910	0.024726	0.778002	43.705411	0.005945	24.478940	
REGION TOTALS	1030.562543	931.985684	18.646332	0.033047	0.901290	50.631266	0.007944	28.356981	
KUGELCORE-REGION 2									
FUEL	117.678169	116.521381	0.371700	0.000659	0.009074	0.509769	0.000158	0.285427	
HE-3	22.047182	7.086220	4.488125	0.007954	0.118050	6.631626	0.001911	3.713295	
FB-10	0.218508	0.196657	0.002747	0.000005	0.000215	0.012103	0.000001	0.006779	
SB-10	0.194873	0.175386	0.003997	0.000007	0.000175	0.009812	0.000002	0.005495	
LI-7	0.948388	0.853549	0.018251	0.000032	0.000864	0.048514	0.000008	0.027171	
C-12	0.031671	0.028504	0.000848	0.000002	0.000026	0.001469	0.000000	0.000822	
BE-9	0.072019	0.064817	0.003674	0.000007	0.000231	0.002231	0.000002	0.001249	
LI-6	415.404954	373.864459	5.840728	0.010352	0.122557	22.616487	0.002489	12.667843	
REGION TOTALS	556.595763	408.770973	10.730069	0.019017	0.531041	29.832011	0.004571	16.708082	
KUGELCORE-REGION 3									
FUEL	158.439464	156.855061	0.503449	0.000887	0.012218	0.686343	0.000213	0.384294	
HE-3	18.297166	6.584421	3.513696	0.006227	0.052420	5.191816	0.001496	2.907091	
FB-10	0.004928	0.004453	0.000032	0.000003	0.000005	0.000293	0.000000	0.000164	
SB-10	0.003923	0.003531	0.000048	0.000003	0.000004	0.000218	0.000000	0.000122	
LI-7	0.393682	0.354314	0.012156	0.000022	0.000307	0.017231	0.000005	0.009648	
C-12	0.024589	0.022130	0.002643	0.000001	0.000020	0.001150	0.000000	0.000644	
BE-9	0.053803	0.045722	0.002493	0.000004	0.000029	0.001637	0.000001	0.000916	
LI-6	915.573260	824.015934	18.545980	0.033578	0.818719	45.992743	0.008071	25.758235	
REGION TOTAL	1092.787834	987.885565	22.575496	0.040720	0.923722	51.891430	0.009787	29.061114	
KUGELCORE-REGION 4									
FUEL	201.098194	199.087202	0.435191	0.001126	0.015507	0.871136	0.000270	0.467762	
HE-3	37.676345	11.774284	7.770246	0.013771	0.020379	11.481269	0.003308	6.428791	
FB-10	0.005580	0.005022	0.000034	0.000000	0.000006	0.000332	0.000000	0.000186	
SB-10	0.004578	0.004120	0.000054	0.000000	0.000005	0.000256	0.000000	0.000143	
LI-7	0.497153	0.447437	0.015338	0.000027	0.000387	0.021768	0.000007	0.012188	
C-12	0.372500	0.335225	0.000978	0.000002	0.000031	0.001740	0.000000	0.000974	
BE-9	0.077163	0.069447	0.003790	0.000007	0.000044	0.002484	0.000002	0.001390	
LI-6	1062.926313	956.633681	21.101775	0.037399	0.963580	53.561993	0.008990	30.221894	
REGION TOTALS	1302.322279	1168.054718	29.527407	0.052332	1.180939	66.340977	0.012578	37.153328	

REFLEKTOR-REGION 5									
HE-3	37.219761	15.411943	6.542107	0.011595	0.172075	9.666578	0.002786	5.412678	
FB-10	0.037094	0.033385	0.000731	0.000001	0.000034	0.001887	0.000000	0.001037	
SB-10	0.005233	0.004709	0.000104	0.000000	0.000005	0.000266	0.000000	0.000149	
LI-7	0.375092	0.337583	0.11860	0.00021	0.000289	0.015241	0.000005	0.009093	
C-12	0.000059	0.000053	0.000001	0.000003	0.000000	0.000003	0.000000	0.000002	
BE-9	0.000145	0.000148	0.000009	0.000000	0.000000	0.000003	0.000000	0.000003	
LI-6	10372.047239	9334.842515	279.42321	0.495618	8.540149	478.755423	0.119088	268.652125	
REGION TOTALS	10409.684642	9350.630336	286.197133	0.507235	8.712552	489.440401	0.121878	274.075106	
REFLEKTOR REGION 6									
HE-3	12.634464	4.269339	2.509446	0.004448	0.066005	3.707942	0.031068	2.076215	
FB-10	0.003798	0.003418	0.000035	0.000000	0.000004	0.000218	0.000000	0.000122	
SB-10	0.001822	0.001640	0.000024	0.000000	0.000002	0.000100	0.000000	0.000056	
LI-7	0.103485	0.093136	0.003271	0.000006	0.000080	0.004481	0.000001	0.002509	
C-12	0.000215	0.000153	0.000006	0.000000	0.000000	0.000010	0.000000	0.000006	
BE-9	0.000612	0.000551	0.000033	0.000000	0.000000	0.000018	0.000000	0.000010	
LI-6	1191.054240	1071.984816	25.435852	0.045081	1.056183	59.332647	0.010836	33.228825	
REGION TOTALS	1203.838635	1076.353093	27.948667	0.049534	1.122274	63.045417	0.011906	35.307744	
REFLEKTOR-REGION 7									
HE-3	9.919429	1.393427	2.557707	0.004533	0.067275	3.779253	0.001089	2.116145	
FB-10	0.002561	0.002305	0.000061	0.000003	0.000002	0.000124	0.000000	0.000069	
SB-10	0.000201	0.000181	0.000005	0.000003	0.000000	0.000010	0.000000	0.000005	
LI-7	0.019076	0.017169	0.000600	0.000001	0.000015	0.000828	0.000000	0.000464	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000003	0.000003	0.000003	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	592.444616	533.380155	16.701765	0.029601	0.479798	26.953347	0.000000	15.052840	
REGION TOTALS	602.585888	534.793240	19.260138	0.034135	0.547090	30.733561	0.008201	17.209523	
REFLEKTOR-REGION 8									
HE-3	5.735415	0.839482	1.468727	0.002603	0.038632	2.170182	0.000625	1.215166	
FB-10	0.027070	0.024363	0.000794	0.000001	0.000022	0.001211	0.000000	0.000678	
SB-10	0.000401	0.000361	0.000011	0.000003	0.000000	0.000018	0.000000	0.000010	
LI-7	0.132723	0.119451	0.004122	0.000007	0.000103	0.005794	0.000002	0.003244	
C-12	0.000002	0.000002	0.000000	0.000003	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000005	0.000005	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	851.599483	766.439534	25.227539	0.044711	0.675568	37.951008	0.000000	21.250380	
REGION TOTALS	857.495098	767.423196	26.701193	0.047323	0.714324	40.128214	0.011369	22.469479	
TOTAL CURIE:									
	17055.472683	15315.896806	441.986435	0.783345	14.633231	822.043276	0.188234	460.341357	

During the period from 9 11 72 to 12 31 72 the power level was 1.00 and the purification plant efficiency was 1.00
the heat exchanger rate of 5.3502E-06 (SEC-1) and the adsorption ratio of 564.2295 were based on 15.00 PPM H₂

CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS											
SOURCE - ATOMS		BOUND IN ADSORBED ON GR. SURFACE		IN PRIMARY COOLANT		LEAKAGE FROM PLANT		H ₂ O IN STEAM GENERATOR		BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR	
TRITIUM PRODUCTION		SOLIDS						PURIF#N			
								PRIMARY			

REFLEKTOR-REGION 5									
HE-3	44.857352	18.574513	5.9C5237	3.010466	0.229753	12.906713	0.002514	7.228155	
FB-10	0.039640	0.035676	0.000485	0.000001	0.000339	0.002204	0.000000	0.001234	
SB-10	0.005320	0.004788	0.000051	0.000003	0.000005	0.000305	0.000000	0.000000	
LI-7	0.467265	0.420538	0.011467	0.000020	0.000358	0.022331	0.000005	0.000000	
C-12	0.000060	0.000054	0.000001	0.000000	0.000000	0.000003	0.000000	0.000002	
BE-9	0.000237	0.000186	0.000007	0.000000	0.000000	0.000009	0.000000	0.000000	
LI-6	11963.764254	10767.387829	229.418970	0.406606	10.923250	612.506084	0.000000	0.000005	
REGION TOTALS	12009.134097	10786.423584	235.336218	0.417093	11.133445	625.437649	0.100217	350.285891	
REFLEKTOR-REGION 6									
HE-3	15.227089	5.145419	2.265153	0.004015	0.088130	4.953805	0.000964	2.772603	
FB-10	0.003839	0.003428	0.000016	0.000000	0.000004	0.000231	0.000000	0.000130	
SB-10	0.001823	0.001641	0.000311	0.000000	0.000002	0.000109	0.000000	0.000061	
LI-7	0.128594	0.115734	0.003145	0.000006	0.000110	0.006156	0.000001	0.000447	
C-12	0.000219	0.000197	0.000003	0.000000	0.000000	0.000012	0.000000	0.000007	
BE-9	0.000775	0.000698	0.000026	0.000000	0.000001	0.000032	0.000000	0.000018	
LI-6	1286.922025	1158.229823	17.418012	0.030870	1.254889	70.495216	0.000000	0.000000	
REGION TOTALS	1302.284333	1163.496939	19.686360	0.034891	1.343135	75.452561	0.008386	42.262062	
REFLEKTOR-REGION 7									
HE-3	11.954921	1.679362	2.368716	0.004592	0.089824	5.046019	0.000983	2.825925	
FB-10	0.002861	0.002575	0.000347	0.000000	0.000003	0.000152	0.000000	0.000085	
SB-10	0.000207	0.000186	0.000002	0.000000	0.000000	0.000012	0.000000	0.000006	
LI-7	0.023741	0.003580	0.000301	0.000001	0.000020	0.000136	0.000000	0.000036	
C-12	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000004	0.000003	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	695.044343	625.539909	14.224738	0.025211	0.623302	35.014928	0.006057	19.610198	
REGION TOTALS	707.026078	627.243403	15.534084	0.029304	0.713150	40.062247	0.007040	22.436851	
REFLEKTOR-REGION 8									
HE-3	6.912337	1.011745	1.225747	0.002350	0.051580	2.897603	0.000564	1.622747	
FB-10	0.032604	0.029344	0.000372	0.000001	0.000029	0.001608	0.000000	0.000900	
SB-10	0.000424	0.000382	0.000006	0.000000	0.000000	0.000023	0.000000	0.000013	
LI-7	0.164278	0.147850	0.003952	0.000007	0.000141	0.007902	0.000002	0.004425	
C-12	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000006	0.000006	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	1019.644658	917.680192	22.4442915	0.039776	0.896600	50.367832	0.005556	28.207787	
REGION TOTALS	1026.754310	918.869521	23.773342	0.042134	0.948350	53.274968	0.010122	29.835872	
TOTAL COPIES	19498.811557	17510.151743	359.868478	0.637805	18.366509	1031.765627	0.153255	577.868141	

DURING THE PERIOD FROM 6 16 73 TO 12 31 73 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00
THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (5EC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 566.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2

CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS		IN PRIMARY COOLANT		LEAKAGE FROM PURIF-M PLANT		H2O IN STEAM GENERATOR		BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR	
TRITIUM PRODUCTION	BOUND IN SOLIDS	CR. SURFACE	IN PRIMARY COOLANT	LEAKAGE FROM PURIF-M PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR			
KUGELCCRE-REGION 1									
FUEL	272.548690	272.219189	0.587745	0.001042	0.024148	1.356576	0.000250	0.759738	
HE-3	30.512541	11.075673	3.658180	0.006483	0.177920	9.994892	0.001558	5.597835	
FB-10	0.421332	0.379199	0.001123	0.000002	0.000463	0.025987	0.000000	0.014558	
SB-10	0.344737	0.310243	0.000002	0.000000	0.000374	0.021031	0.000001	0.011782	
LI-7	1.437735	1.293934	0.001375	0.000024	0.001468	0.082490	0.000306	0.046207	
C-12	0.029526	0.026582	0.000298	0.000001	0.000300	0.001683	0.000000	0.000942	
BE-9	0.104210	0.093789	0.003273	0.000006	0.000081	0.004526	0.000001	0.002534	
LI-6	945.458662	850.912796	8.198509	0.014530	0.973884	54.709364	0.003493	30.646687	
REGION TOTAL	1251.257912	1134.311425	12.463986	0.022090	1.178368	66.196549	0.005309	37.079684	
KUGELCCRE-REGION 2									
FUEL	180.863924	179.055276	0.389458	0.006690	0.016002	0.898908	0.000166	0.503425	
HE-3	31.432875	10.093249	4.010649	0.007108	0.195062	10.557908	0.001708	6.137191	
FB-10	0.220427	0.198384	0.000558	0.000001	0.000242	0.013614	0.000000	0.007627	
SB-10	0.195705	0.176134	0.000764	0.000001	0.000212	0.011917	0.000000	0.006676	
LI-7	1.072453	0.965208	0.000017	0.000017	0.001101	0.061861	0.000004	0.034452	
C-12	0.034437	0.030994	0.000035	0.000001	0.000035	0.001956	0.000000	0.001095	
BE-9	0.123951	0.111556	0.003932	0.000007	0.000038	0.005358	0.000002	0.003000	
LI-6	460.568346	414.511511	3.309298	0.003865	0.482151	27.085522	0.001410	15.172590	
REGION TOTALS	674.482118	605.142311	7.724626	0.013691	0.694900	39.037043	0.003290	21.866256	
KUGELCCRE-REGION 3									
FUEL	243.511464	241.076337	0.524358	0.000929	0.021544	1.210271	0.000223	0.677801	
HE-3	26.061545	9.378511	3.135886	0.035565	0.152712	8.578806	0.001337	4.804729	
FB-10	0.005043	0.004530	0.000010	0.000003	0.000006	0.000312	0.000000	0.000175	
SB-10	0.003946	0.003552	0.000010	0.000000	0.000004	0.000243	0.000000	0.000136	
LI-7	0.584081	0.525673	0.001186	0.000021	0.000525	0.029484	0.000005	0.016513	
C-12	0.026559	0.023903	0.000263	0.000000	0.000027	0.001516	0.000000	0.000849	
BE-9	0.081452	0.073307	0.002404	0.000004	0.000065	0.003636	0.000001	0.002036	
LI-6	1130.763297	1017.686967	13.811110	0.024478	1.119493	62.889146	0.005883	35.226219	
REGION TOTALS	1431.037377	1268.772779	17.489901	0.030998	1.294375	72.713416	0.007450	40.728459	
KUGELCCRE-REGION 4									
FUEL	309.075242	305.984474	0.665537	0.001180	0.027345	1.536128	0.000283	0.460295	
HE-3	53.663831	16.770686	6.543597	0.012306	0.337709	18.971317	0.002957	10.625259	
FB-10	0.005664	0.005098	0.000011	0.000000	0.000006	0.000352	0.000000	0.000197	
SB-10	0.004603	0.004143	0.000012	0.000000	0.000005	0.000284	0.000000	0.000159	
LI-7	0.737261	0.663535	0.014558	0.000027	0.000663	0.037225	0.000006	0.020848	
C-12	0.040282	0.036254	0.000402	0.000001	0.000041	0.002298	0.000000	0.001287	
BE-9	0.124246	0.111821	0.003680	0.000007	0.000099	0.005537	0.000002	0.003101	
LI-6	1299.706899	1169.736209	15.243857	0.027017	1.293880	72.685606	0.006494	40.713835	
REGION TOTALS	1663.358028	1493.312219	22.872054	0.040537	1.655747	93.238748	0.009742	52.224981	

REFLECTOR-REGION 5									
HE-3	33.013919	21.951981	5.840115	0.010361	0.284332	15.972774	0.002489	8.945866	
FB-10	0.041588	0.037429	0.000340	0.000001	0.000000	0.002420	0.000000	0.001355	
SB-10	0.005455	0.004873	0.000029	0.000000	0.000000	0.000324	0.000000	0.000182	
LI-7	0.571662	0.514456	0.012154	0.000022	0.000508	0.028511	0.000005	0.015967	
C-12	0.000363	0.000056	0.000001	0.000000	0.000000	0.000004	0.000000	0.000002	
HE-9	0.000290	0.000261	0.000310	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000007	
LI-6	13506.490613	12155.841551	204.709578	0.362813	12.922764	725.955267	0.087181	406.611459	
REGION TOTALS	13560.123549	12178.350649	210.568227	0.373196	13.207653	741.959312	0.089675	415.574838	
REFLECTOR-REGION 6									
HE-2	17.595883	6.081028	2.242475	0.035974	0.109065	6.126897	0.003955	3.431489	
FB-10	0.003812	0.004431	0.000007	0.000000	0.000000	0.000237	0.000000	0.000133	
SB-10	0.001824	0.001641	0.000005	0.000000	0.000000	0.000113	0.000000	0.000083	
LI-7	0.156903	0.161213	0.003309	0.000006	0.00140	0.007842	0.000001	0.004392	
C-12	0.000231	0.000207	0.000002	0.000000	0.000000	0.000013	0.000000	0.000007	
HE-9	0.001092	0.000983	0.000337	0.000003	0.000001	0.000046	0.000000	0.000026	
LI-6	1362.865439	1226.578695	12.642636	0.022407	1.344522	78.339304	0.005386	43.882289	
REGION TOTALS	1391.025183	1232.807399	14.888471	0.026387	1.533734	84.474452	0.006342	47.318398	
REFLECTOR-REGION 7									
HE-3	14.128726	1.984726	2.255602	0.034051	0.111163	6.244729	0.000973	3.497483	
FB-10	0.003129	0.002816	0.000038	0.000000	0.000000	0.000174	0.000000	0.000097	
SB-10	0.000215	0.000193	0.000002	0.000000	0.000000	0.000013	0.000000	0.000007	
LI-7	0.029035	0.026131	0.000016	0.000001	0.000026	0.001449	0.000000	0.000811	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
HE-9	0.000005	0.000005	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	798.303335	718.473091	13.234434	0.023436	0.750975	42.187151	0.005636	23.628681	
REGION TOTALS	812.464446	720.486874	15.520691	0.027508	0.862167	48.433516	0.006609	27.127081	
REFLECTOR-REGION 8									
HE-3	8.169231	1.195714	1.312474	0.002325	0.263834	3.585945	0.000559	2.008379	
FB-10	0.038555	0.034700	0.000721	0.000001	0.000035	0.001986	0.000000	0.001112	
SB-10	0.000463	0.000414	0.000006	0.000000	0.000000	0.000026	0.000000	0.000014	
LI-7	0.199993	0.179094	0.004170	0.000007	0.000178	0.010026	0.000002	0.005615	
C-12	0.000032	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
HE-9	0.000039	0.000008	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	1190.957953	1077.298157	21.913430	0.038838	1.102648	61.942892	0.009331	34.692656	
REGION TOTAL	1205.406203	1078.708989	23.230801	0.041173	1.166696	65.540875	0.009892	36.707776	
TOTAL CURIE	21949.154316	19711.892645	324.758757	0.575579	21.567640	1211.593911	0.138309	678.627474	

DURING THE PERIOD FROM 8 28 75 TO 12 31 76 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2									
CUMULATIVE TRITIUM IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS									
SOURCE - ATOM.	TRITIUM PRODUCTION	BOUND IN SOLIDS	GR. SURFACE	IN ADSORBED ON CUOLANT	IN PRIMARY LEAKAGE FROM PRIMARY	PURIF. PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLD DOWN-LOSS STEAM GENERATOR	
KUGELCORE-REGION 1									
FUEL	314.546966	311.401481	0.541950	0.000961	0.029359	1.649259	0.000231	0.923726	
HE-3	34.065892	12.365495	3.148086	0.005579	0.209218	11.753118	0.001340	6.583056	
FB-10	0.421341	0.379237	0.000485	0.000001	0.000470	0.026393	0.000000	0.014786	
SB-10	0.344739	0.310265	0.000554	0.000001	0.000383	0.021495	0.000000	0.012042	
LI-7	1.510250	1.359225	0.010886	0.000019	0.001581	0.088794	0.000005	0.049740	
C-12	0.030170	0.027153	0.000178	0.000000	0.000032	0.001799	0.000000	0.001068	
BE-9	0.124084	0.111675	0.002913	0.000005	0.000107	0.006014	0.000001	0.003368	
LI-6	976.265348	878.638813	5.575699	0.009882	1.038275	58.326620	0.002375	32.673683	
REGION TOTALS	1327.308791	1204.593315	9.280751	0.016449	1.279423	71.873491	0.003953	40.261408	
KUGELCORE-REGION 2									
FUEL	208.428180	206.343888	0.359112	0.000636	0.019454	1.092848	0.000153	0.612089	
HE-3	35.059910	11.268662	3.451407	0.006117	0.229376	12.885540	0.001469	7.217338	
FB-10	0.220431	0.198368	0.000241	0.000000	0.000246	0.013816	0.000000	0.007740	
SB-10	0.195706	0.176136	0.000330	0.000001	0.000217	0.012193	0.000000	0.006830	
LI-7	1.122538	1.010284	0.007618	0.000014	0.001180	0.066299	0.000003	0.037139	
C-12	0.035221	0.031699	0.000215	0.000000	0.000037	0.002096	0.000000	0.001174	
BE-9	0.148371	0.133498	0.003536	0.000006	0.000127	0.007155	0.000002	0.004007	
LI-6	471.684429	424.515866	2.152523	0.003615	0.507762	28.524301	0.000917	15.979123	
REGION TOTALS	716.894747	643.678541	5.574983	0.016590	0.758400	42.604248	0.002545	23.865441	
KUGELCORE-REGION 3									
FUEL	280.523410	277.817162	0.483501	0.000857	0.026192	1.471388	0.000206	0.824103	
HE-3	29.046554	10.470690	2.702062	0.004789	0.179576	10.037925	0.001150	5.650362	
FB-10	0.005063	0.004557	0.000006	0.000000	0.000006	0.000317	0.000000	0.000178	
SB-10	0.003953	0.003558	0.000005	0.000000	0.000004	0.000247	0.000000	0.000139	
LI-7	0.683578	0.597220	0.010628	0.000019	0.000628	0.035304	0.000005	0.019774	
C-12	0.027118	0.024467	0.000157	0.000000	0.000029	0.001619	0.000000	0.000907	
BE-9	0.092645	0.083381	0.001888	0.000003	0.000083	0.004672	0.000001	0.002617	
LI-6	1216.162669	1055.068348	11.704834	0.020745	1.240307	69.676067	0.004985	39.025323	
REGION TOTALS	1527.274931	1364.087522	14.903082	0.026413	1.446825	81.277540	0.006347	45.527402	
KUGELCORE-REGION 4									
FUEL	356.179323	352.617512	0.613681	0.001088	0.033244	1.867549	0.000261	1.045988	
HE-3	59.913276	18.723724	5.975387	0.010590	0.397117	22.308608	0.002544	12.495307	
FB-10	0.005695	0.005125	0.000006	0.000000	0.000006	0.000357	0.000000	0.000200	
SB-10	0.004611	0.004150	0.000006	0.000000	0.000005	0.000289	0.000000	0.000162	
LI-7	0.837522	0.753770	0.013404	0.000024	0.000793	0.044565	0.000006	0.024961	
C-12	0.041146	0.037031	0.000240	0.000000	0.000044	0.002455	0.000000	0.001375	
BE-9	0.141492	0.127342	0.002898	0.000005	0.000127	0.007126	0.000001	0.003991	
LI-6	1393.699601	1254.329641	12.830801	0.022740	1.427178	86.173823	0.035465	44.909954	
REGION TOTALS	1810.822667	1626.598296	19.436423	0.034448	1.858514	104.404771	0.008277	58.481936	

REFLEKTOR-REGION 5									
HE-3	59.187678	24.508409	5.030937	0.008916	0.334350	18.782584	0.002142	10.520340	
FB-10	0.042675	0.038407	0.000220	0.000000	0.000000	0.002564	0.000000	0.001437	
SB-10	0.005453	0.004908	0.000016	0.000000	0.000000	0.000336	0.000000	0.000188	
LI-7	0.654944	0.589445	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
C-12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	14571.151966	13114.036769	161.712628	0.286608	14.655653	820.718750	0.068863	459.718695	
REGION TOTALS	14631.043125	13139.178311	166.754827	0.295544	14.944669	839.938764	0.071010	470.259999	
REFLEKTOR REGION 6									
HE-3	20.091601	6.789197	1.923786	0.003420	0.128251	7.204694	0.000822	4.035432	
FB-10	0.003813	0.003432	0.000003	0.000000	0.000000	0.000240	0.000000	0.000134	
SB-10	0.001824	0.001641	0.000002	0.000000	0.000000	0.000114	0.000000	0.000064	
LI-7	0.179411	0.161470	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
C-12	0.000235	0.000211	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.001307	0.001177	0.000032	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	1406.457446	1265.811701	8.424577	0.014931	1.491362	83.779477	0.003589	46.931809	
REGION TOTALS	1426.735657	1272.768830	10.357389	0.018357	1.619790	90.994074	0.004412	50.972787	
REFLEKTOR-REGION 7									
HE-3	15.774093	2.215858	1.566899	0.003486	0.133718	7.343254	0.000837	4.113041	
FB-10	0.003303	0.002972	0.000028	0.000000	0.000000	0.000191	0.000000	0.000107	
SB-10	0.000218	0.000157	0.000000	0.000000	0.000000	0.000013	0.000000	0.000007	
LI-7	0.333268	0.029941	0.000059	0.000001	0.000031	0.001753	0.000000	0.000982	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000006	0.000036	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	872.178233	784.560409	10.814105	0.019166	0.861662	48.405113	0.004605	27.113173	
REGION TOTALS	887.989121	787.209383	12.781593	0.022653	0.992414	55.750325	0.005442	31.227310	
REFLEKTOR-REGION 8									
HE-3	9.120583	1.334962	1.129463	0.002002	0.075063	4.216758	0.000481	2.361854	
FB-10	0.043088	0.038779	0.000624	0.000001	0.000042	0.002334	0.000000	0.001307	
SB-10	0.000479	0.000431	0.000000	0.000000	0.000000	0.000028	0.000000	0.000016	
LI-7	0.228501	0.203651	0.003776	0.000007	0.000215	0.012083	0.000002	0.006768	
C-12	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000011	0.000039	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
LI-6	1329.236585	1196.312926	18.615076	0.032992	1.289094	72.416774	0.007926	40.561796	
REGION TOTALS	1338.629248	1157.892761	19.748944	0.035002	1.364414	76.647977	0.008409	42.931742	
TOTAL CURIES	23666.658266	21256.006759	259.237991	0.459455	24.264451	1363.091191	0.110393	763.528026	

DURING THE PERIOD FROM 10 5 75 TO 12 31 75 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.4502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2									
CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION AND DISTRIBUTION SINKS									
SOURCE - ATOMS	TRITIUM PRODUCTION	SOLIDS BOUND IN GR. SURFACE	COOLANT IN PRIMARY	LEAKAGE FROM PURIFM PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR			
KUGELCORE-REGION 1									
FUEL	365.264864	361.612197	0.579381	0.001027	0.034657	1.946899	0.000247	1.090456	
HE-3	38.212102	13.870518	3.157806	0.005597	0.238902	13.420675	0.001345	7.517260	
FB-10	0.421344	0.379210	0.000209	0.000000	0.000473	0.026568	0.000000	0.014884	
SB-10	0.344741	0.310266	0.000239	0.000000	0.000386	0.021695	0.000000	0.012154	
LI-7	1.599012	1.439111	0.010744	0.000019	0.001682	0.094509	0.000000	0.052942	
C-12	0.031134	0.028020	0.000147	0.000000	0.000033	0.001880	0.000000	0.001053	
BE-9	0.150421	0.135379	0.003153	0.000006	0.001134	0.007531	0.000001	0.004218	
LI-6	1011.955558	910.760002	4.715734	0.008358	1.088254	61.134247	0.002009	34.246954	
REGION TOTALS	1417.979175	1288.534703	8.447414	0.015007	1.364522	76.654004	0.003606	42.939920	
KUGELCORE-REGION 2									
FUEL	242.035369	239.615003	0.383915	0.000680	0.022565	1.290073	0.000163	0.722569	
HE-3	39.527103	12.640188	3.452063	0.006136	0.261920	14.713788	0.001474	8.241554	
FB-10	0.220433	0.198389	0.000104	0.000000	0.000247	0.013903	0.000000	0.007789	
SB-10	0.195737	0.176136	0.000147	0.000000	0.000219	0.012312	0.000000	0.006897	
LI-7	1.183825	1.065443	0.000179	0.000013	0.001251	0.070282	0.000000	0.039371	
C-14	0.036407	0.032766	0.000166	0.000000	0.000039	0.002193	0.000000	0.001229	
BE-9	0.180551	0.162496	0.003844	0.000007	0.001160	0.009001	0.000002	0.005041	
LI-6	484.232764	435.809488	1.727941	0.003062	3.526716	25.589029	0.000736	16.575792	
REGION TOTALS	767.412158	689.699908	5.585651	0.009907	0.813518	45.700562	0.002379	25.600241	
KUGELCORE-REGION 3									
FUEL	325.671437	322.612707	0.516896	0.000916	0.030919	1.736928	0.000220	0.972851	
HE-3	32.637938	11.745093	2.710405	0.004804	0.205054	11.519221	0.001154	6.452207	
FB-10	0.005119	0.004607	0.000006	0.000000	0.000004	0.000321	0.000000	0.000180	
SB-10	0.003968	0.003571	0.000003	0.000000	0.000006	0.000249	0.000000	0.000140	
LI-7	0.755131	0.679617	0.010823	0.000019	0.000730	0.040982	0.000005	0.022954	
C-12	0.027971	0.025174	0.000130	0.000000	0.000030	0.001690	0.000000	0.000947	
BE-9	0.107100	0.096390	0.001862	0.000003	0.000100	0.005605	0.000001	0.003139	
LI-6	1312.950026	1181.691024	11.344591	0.020106	1.352928	76.002718	0.004832	42.573827	
REGION TOTALS	1672.398691	1516.858183	14.584716	0.025849	1.589771	89.307715	0.006212	50.026246	
KUGELCORE-REGION 4									
FUEL	413.610069	409.473947	0.656066	0.001163	0.039244	2.204584	0.000279	1.234785	
HE-3	57.205405	21.002615	5.993836	0.010623	0.453440	25.473801	0.002552	14.268521	
FB-10	0.005753	0.005178	0.000006	0.000000	0.000006	0.000361	0.000000	0.000202	
SB-10	0.004628	0.004165	0.000004	0.000000	0.000005	0.000291	0.000000	0.000163	
LI-7	0.952982	0.857684	0.013650	0.000024	0.000921	0.051725	0.000006	0.028972	
C-12	0.042461	0.038215	0.000199	0.000003	0.000046	0.002564	0.000000	0.001436	
BE-9	0.163743	0.147369	0.002862	0.000005	0.000152	0.008560	0.000001	0.004794	
LI-6	1500.285898	1350.257308	12.475888	0.022111	1.551424	87.153535	0.005314	48.820317	
REGION TOTALS	1982.270943	1781.786482	19.142511	0.033927	2.045259	114.895421	0.008153	64.359190	

REFLEKTOR-REGION 5

HE-3	56.391496	27.491363	5.046470	0.008944	0.381788	21.447497	0.002149	12.013286
FB-10	0.043640	0.039276	0.000159	0.000000	0.000347	0.002664	0.000000	0.001493
SB-10	0.305489	0.004940	0.000009	0.000000	0.000006	0.000342	0.000000	0.000192
LI-7	0.757653	0.861887	0.011752	0.000021	0.000722	0.040552	0.000005	0.022713
C-12	0.300066	0.000059	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000002
BE-9	0.000428	0.000385	0.000013	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
LI-6	15717.419243	14145.677319	147.386943	0.261218	16.064597	902.452359	0.000000	505.514042

REGION TOTALS

	15784.618014	14173.895229	152.445344	0.270183	16.447161	923.943439	0.064519	517.551740
--	--------------	--------------	------------	----------	-----------	------------	----------	------------

REFLEKTOR REGION 6

HE-3	22.536979	7.615520	1.935744	0.03431	0.146448	8.226911	0.000824	4.608101
FB-10	0.003814	0.003432	0.000001	0.000000	0.000004	0.000241	0.000000	0.000135
SB-10	0.001824	0.001641	0.000001	0.000000	0.000002	0.000115	0.000000	0.000064
LI-7	0.207114	0.186403	0.003177	0.000006	0.000198	0.011108	0.000001	0.006222
C-12	0.000242	0.000218	0.000001	0.000000	0.000000	0.000015	0.000000	0.000008
BE-9	0.001624	0.001462	0.000037	0.000000	0.000001	0.000080	0.000000	0.000045
LI-6	1446.073127	1301.465814	6.282754	0.011135	1.580255	87.649619	0.002676	49.100873

REGION TOTALS

	1468.824724	1305.274490	8.221715	0.014572	1.706908	95.888088	0.003502	53.715449
--	-------------	-------------	----------	----------	----------	-----------	----------	-----------

REFLEKTOR-REGION 7

HE-3	17.693981	2.485553	1.972972	0.03497	0.149264	8.385131	0.000840	4.696724
FB-10	0.003478	0.003130	0.000024	0.000000	0.000004	0.000205	0.000000	0.000115
SB-10	0.000222	0.000200	0.000001	0.000000	0.000000	0.000014	0.000000	0.000008
LI-7	0.038498	0.034648	0.000598	0.000001	0.000037	0.032660	0.000000	0.001154
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
BE-9	0.000008	0.000007	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
LI-6	954.417665	858.975898	10.248438	0.018164	0.960825	53.975749	0.000000	30.234226

REGION TOTALS

	972.153852	861.499437	12.222033	0.021661	1.110130	62.363160	0.005204	34.932227
--	------------	------------	-----------	----------	----------	-----------	----------	-----------

REFLEKTOR-REGION 8

HE-3	10.230662	1.497442	1.132951	0.002008	0.085713	4.815040	0.000482	2.697026
FB-10	0.048449	0.043604	0.000634	0.000001	0.000047	0.002668	0.000000	0.001494
SB-10	0.000503	0.000453	0.000003	0.000000	0.000001	0.000030	0.000000	0.000017
LI-7	0.263734	0.237334	0.004028	0.000007	0.30252	0.014154	0.000002	0.007928
C-12	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
BE-9	0.000013	0.000012	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000
LI-6	1482.215692	1333.994123	18.446374	0.032693	1.463570	82.218201	0.007854	46.052877

REGION TOTALS

	1492.759026	1335.772970	19.583990	0.034709	1.549583	87.050093	0.008339	48.759342
--	-------------	-------------	-----------	----------	----------	-----------	----------	-----------

TOTAL CURIE:

	25558.416583	22557.321402	240.253372	0.425808	26.426850	1495.802483	0.102314	837.884353
--	--------------	--------------	------------	----------	-----------	-------------	----------	------------

DURING THE PERIOD FROM 6 2 76 TO 12 31 76 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-06 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2															
CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION, AND DISTRIBUTION SINKS															
SOURCE - ATOMS		TRITIUM PRODUCTION		BOUND IN SOLIDS		GR. SURFACE		IN PRIMARY COOLANT		LEAKAGE FROM PLANT		H2O IN STEAM GENERATOR		BLOWDOWN+LOSS STEAM GENERATOR	
KUGELCORE-REGION 1															
FUEL	418.702650	414.515602	0.614047	0.001388	0.043293	2.263531	0.000261	1.267826							
HE-3	42.210572	15.321913	3.097431	0.003490	0.268317	15.073091	0.001319	8.443011							
FB-10	0.21345	0.000090	0.000000	0.000000	0.000474	0.026644	0.000000	0.014926							
SB-10	0.344741	0.000103	0.000000	0.000000	0.000388	0.021781	0.000000	0.012202							
LI-7	1.691494	1.522345	0.010936	0.000019	0.001785	0.100248	0.000005	0.056157							
C-12	0.032878	0.029590	0.000207	0.000000	0.000035	0.001952	0.000000	0.001093							
BE-9	0.186349	0.167714	0.004119	0.000007	0.000164	0.009194	0.000002	0.005149							
LI-6	1043.293558	938.564202	4.062576	0.007200	1.130986	63.534787	0.001731	35.592076							
REGION TOTALS	1506.883587	1371.210844	7.789508	0.013806	1.442441	81.031229	0.003318	45.392442							
KUGELCORE-REGION 2															
FUEL	277.444836	274.670373	0.406886	0.000721	0.026699	1.499883	0.000173	0.840100							
HE-3	43.442246	13.562842	3.395871	0.006019	0.294169	16.525396	0.001446	9.256502							
FB-10	0.220433	0.198389	0.000045	0.000000	0.000248	0.013940	0.000000	0.007810							
SB-10	0.195707	0.176136	0.000061	0.000000	0.000220	0.012363	0.000000	0.006926							
LI-7	1.247686	1.122918	0.000013	0.000000	0.001322	0.074261	0.000003	0.041599							
C-12	0.038543	0.034689	0.000253	0.000000	0.000341	0.002282	0.000000	0.001278							
BE-9	0.224164	0.201748	0.004997	0.000009	0.000196	0.011033	0.000002	0.006175							
LI-6	494.486753	445.038078	1.398251	0.002478	0.542008	30.448123	0.000596	17.057219							
REGION TOTALS	817.300368	735.405173	5.213934	0.009241	0.864904	48.587282	0.002221	27.217613							
KUGELCORE-REGION 3															
FUEL	373.546015	369.810535	0.547822	0.000971	0.035948	2.019412	0.000233	1.131093							
HE-3	36.053134	12.974085	2.658584	0.004712	0.233001	12.937522	0.001132	7.246797							
FB-10	0.005126	0.004614	0.000003	0.000000	0.000006	0.000323	0.000000	0.000181							
SB-10	0.003970	0.003573	0.000001	0.000000	0.000004	0.000251	0.000000	0.000140							
LI-7	0.823358	0.741022	0.009314	0.000017	0.003824	0.046263	0.000004	0.025914							
C-12	0.029519	0.026567	0.000184	0.000000	0.000031	0.001754	0.000000	0.000983							
BE-9	0.123853	0.111468	0.002100	0.000004	0.000116	0.006515	0.000001	0.003649							
LI-6	1366.605056	1229.944551	8.397284	0.014883	1.446715	81.271345	0.003578	45.526701							
REGION TOTALS	1777.190032	1613.616416	11.615294	0.020586	1.713945	96.283385	0.004948	53.935458							
KUGELCORE-REGION 4															
FUEL	474.120696	469.379466	0.655320	0.001232	0.045626	2.563125	0.000296	1.435632							
HE-3	74.237705	23.200305	5.879238	0.010420	0.509293	28.610255	0.002504	16.025690							
FB-10	0.005759	0.005183	0.000003	0.000000	0.000006	0.000363	0.000000	0.000203							
SB-10	0.004630	0.004167	0.000002	0.000000	0.000005	0.000292	0.000000	0.000164							
LI-7	1.039015	0.935113	0.011746	0.000021	0.001039	0.056386	0.000005	0.032704							
C-12	0.044844	0.040359	0.000283	0.000001	0.000047	0.002662	0.000000	0.001491							
BE-9	0.189468	0.170522	0.003225	0.000006	0.000177	0.008959	0.000001	0.005518							
LI-6	1557.759555	1401.983600	9.119939	0.016164	1.654182	92.926101	0.003886	52.055684							
REGION TOTALS	2107.401672	1895.718715	15.709756	0.027843	2.210376	124.171144	0.006692	69.557147							

REFLEKTUR-REGION 5									
HE-3	73.338626	3C.368027	4.545985	Q.008773	0.528795	24.088214	0.002108	13.492723	
FR-10	0.044349	0.039914	0.000116	0.000000	0.000049	0.002737	C.CC00CC	0.001533	
FR-10	0.005524	0.004972	0.000007	0.000000	0.003006	0.003346	3.CC0000	0.000194	
LI-7	0.864608	0.778147	0.012357	0.000022	0.003836	0.046946	0.000005	0.026295	
C-12	C.000069	C.000062	0.000000	0.000000	0.000000	0.000004	3.CC00CC	0.000000	
BE-9	0.000557	0.000501	0.000014	Q.CC0000	0.000000	0.000026	0.000000	0.000015	
LI-6	1673.367345	15057.330340	132.143968	0.234203	17.379515	976.319793	0.000000	0.000000	546.902948
REGION TOTALS	16804.620777	15088.521963	137.106448	0.242998	17.809201	1000.458065	0.058392	560.423710	
REFLEKTUR-REGION 6									
HE-3	24.995222	8.412359	1.898734	0.003365	0.164479	9.239847	0.008009	5.175589	
FR-10	0.003814	0.003433	0.000001	0.000000	0.000004	0.000241	C.CC00CC	0.000135	
FR-10	0.001824	0.001641	C.CC0000	Q.000000	0.000002	0.000115	0.000000	0.000065	
LI-7	0.235920	0.212328	0.003333	0.000006	0.000228	0.012834	0.000001	0.007189	
C-12	0.002234	C.000229	0.000001	0.000000	0.000000	0.003015	0.000000	0.000008	
BE-9	0.002119	0.001907	0.000034	0.000000	0.000002	C.000100	0.000000	0.000000	
LI-6	1475.305173	1327.774656	4.681903	0.008262	1.611547	90.531021	0.001986	50.715799	
REGION TOTALS	1500.444326	1236.406592	6.564026	0.011634	1.776263	99.784174	0.002796	55.898841	
REFLEKTUR-REGION 7									
HE-3	19.545459	2.745638	1.935250	0.003430	0.167642	9.417548	0.008024	5.275126	
FR-10	0.003627	0.003264	C.000020	0.000000	0.000004	0.000217	C.CC00CC	0.000122	
FR-10	0.000226	0.000204	C.CC0001	Q.000000	0.000000	0.000014	0.000000	0.000008	
LI-7	0.043953	0.039558	0.006630	0.000001	0.000042	0.002386	3.CC0000	0.001336	
C-12	C.CC0001	C.000001	C.CC0000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	C.CC00CC	
BE-9	0.000010	0.000009	3.CC0000	0.000000	3.CC0000	0.000000	0.000000	0.000000	
LI-6	1029.712593	926.741334	9.530907	0.016892	1.053970	59.202719	0.000000	33.162813	
REGION TOTALS	1049.305870	925.530009	11.466808	0.020323	1.221559	68.622883	0.004883	38.439405	
REFLEKTUR-REGION 8									
HE-3	11.301187	1.654133	1.111290	0.001970	0.054266	5.407891	0.000473	3.029165	
FR-10	0.053793	C.048414	0.000636	0.000001	0.000053	0.003005	0.000000	0.001483	
FR-10	0.000535	C.CC00481	C.CC0004	Q.000000	0.000001	0.000031	0.000000	0.000018	
LI-7	0.300424	0.270381	0.002440	0.000008	0.000291	0.016346	C.000002	0.000156	
C-12	0.000002	C.000002	C.CC0000	3.CC0000	0.000000	0.000000	3.CC0000	0.000000	
BE-9	0.000017	0.000015	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
LI-6	4628.095448	1465.285903	17.887282	0.031702	1.634449	91.817569	0.007617	51.430925	
REGION TOTALS	1639.751405	1467.259329	19.003452	0.033680	1.731060	97.244844	0.008092	54.470947	
TOTAL CUMULS	27202.898036	24437.669041	214.469226	Q.380110	28.769750	1616.183006	0.091341	905.335562	

DURING THE PERIOD FROM 11 19 77 TO 12 31 77 THE POWER LEVEL WAS 1.00 AND THE PURIFICATION PLANT EFFICIENCY WAS 1.00 THE HEAT EXCHANGER RATE OF 5.3502E-36 (SEC-1) AND THE ADSORPTION RATIO OF 564.2295 WERE BASED ON 15.00 PPM H2									
CUMULATIVE TRITIUM INVENTORY IN CURIES AS OF PERIOD END FOR PRODUCTION, AND DISTRIBUTION SINKS									
SOURCE - ATOMS	TRITIUM PRODUCTION	BOUND IN SOLIDS	GR-SURFACE	IN PRIMARY COOLANT	LEAKAGE FROM PRIMARY	RURIF+M PLANT	H2O IN STEAM GENERATOR	BLowDOWN+LOSS STEAM GENERATOR	
KUGELCORE-REGION 1									
FUEL	451.581271	447.461436	0.495302	0.000878	0.045389	2.549802	0.000211	1.428253	
HE-3	44.675613	16.216692	2.423654	0.004296	0.293644	16.495902	0.001032	9.240393	
FB-10	0.421346	0.379212	0.000039	0.000000	0.000475	0.026676	0.000000	0.014945	
SB-10	0.344741	0.310267	0.000044	0.000000	0.000388	0.021818	0.000000	0.012223	
LI-7	1.749146	1.574231	0.008709	0.001875	0.001875	0.105315	0.000004	0.058997	
C-12	0.033071	0.029764	0.000133	0.000000	0.000036	0.002030	0.000000	0.001137	
BE-9	0.196137	0.176523	0.002480	0.000004	0.000193	0.010855	0.000001	0.006080	
LI-6	1072.253620	965.028258	3.104747	0.006566	1.167698	65.597154	0.001577	36.747620	
REGION TOTALS	1571.654946	1431.176384	6.635075	0.011760	1.509699	84.809553	0.002825	47.505648	
KUGELCORE-REGION 2									
FUEL	299.496240	296.501263	0.328202	0.000582	0.030076	1.689575	0.000140	0.946403	
HE-3	45.579215	14.778254	2.657175	0.004709	0.321937	18.085296	0.001131	10.130713	
FB-10	0.220433	0.198390	0.000019	0.000000	0.000248	0.013957	0.000000	0.007819	
SB-10	0.195737	0.176136	0.000026	0.000000	0.000220	0.012385	0.000000	0.006939	
LI-7	1.287495	1.158746	0.006022	0.003011	0.001384	0.077766	0.000003	0.043564	
C-12	0.038784	0.034906	0.000127	0.000000	0.000042	0.002377	0.000000	0.001332	
BE-9	0.235314	0.212662	0.003029	0.000005	0.000232	0.013053	0.000001	0.007311	
LI-6	505.751436	455.176292	1.356148	0.002404	0.555191	31.188698	0.000577	17.472126	
REGION TOTALS	853.205623	768.236667	4.350748	0.007711	0.909333	51.083106	0.001852	28.616206	
KUGELCORE-REGION 3									
FUEL	403.235572	356.203196	0.441884	0.000783	0.040494	2.274809	0.000188	1.274218	
HE-3	38.158589	13.731755	2.080268	0.003687	0.252041	14.158747	0.000886	7.931205	
FB-10	0.025138	0.004624	0.000002	0.000000	0.000006	0.000324	0.000000	0.000182	
SB-10	0.003972	0.003575	0.000001	0.000000	0.000004	0.000251	0.000000	0.000141	
LI-7	0.886480	0.797832	0.008389	0.000015	0.000905	0.050851	0.000004	0.028485	
C-12	0.029689	0.026720	0.000092	0.000000	0.000032	0.001823	0.000000	0.001021	
BE-9	0.129279	0.116351	0.001297	0.000002	0.000131	0.007369	0.000001	0.004128	
LI-6	1434.783155	1291.304839	8.243701	0.014611	1.525359	85.689310	0.003509	48.001826	
REGION TOTALS	1877.231873	1705.188891	10.775633	0.019098	1.818973	102.183485	0.004587	57.241205	
KUGELCORE-REGION 4									
FUEL	511.803962	506.665896	0.560859	0.000994	0.051397	2.887285	0.000239	1.617292	
HE-3	78.573088	24.555172	4.600341	0.008153	0.557367	31.310894	0.001958	17.539203	
FB-10	0.005767	0.005191	0.000002	0.000000	0.000006	0.000364	0.000000	0.000204	
SB-10	0.004631	0.004168	0.000001	0.000000	0.000005	0.000293	0.000000	0.000164	
LI-7	1.118618	1.006756	0.010579	0.000019	0.001142	0.064172	0.000005	0.035946	
C-12	0.045106	0.040596	0.000141	0.000000	0.000049	0.002769	0.000000	0.001551	
BE-9	0.197855	0.178069	0.001996	0.000004	0.000201	0.011271	0.000001	0.006314	
LI-6	1632.893103	1469.603792	9.014664	0.015977	1.740127	97.754167	0.003837	54.760538	
REGION TOTALS	2224.642130	2002.079640	14.188582	0.025147	2.350294	132.031216	0.006039	73.961212	

REFLEKTOR-REGION 5									
HE-3	77.621504	32.141480	3.873226	0.006865	0.469271	26.361998	0.001649	14.767015	
FB-10	0.044684	0.040215	0.000073	0.000000	0.000050	0.002785	0.000000	0.001560	
SB-10	0.005530	0.004977	0.000003	0.000000	0.000006	0.000348	0.000000	0.000195	
LI-7	0.931286	0.838158	0.009948	0.000018	0.000538	0.052701	0.000004	0.029520	
C-12	0.000069	0.000062	0.000000	0.000000	0.000000	0.000004	0.000000	0.000002	
BE-9	0.000592	0.000533	0.000009	0.000000	0.000001	0.000032	0.000000	0.000018	
LI-6	17309.926573	15578.933913	97.001901	0.171919	18.430416	1035.355748	0.000000	578.991374	
REGION TOTALS	17388.530236	15611.959338	100.885160	0.178802	18.900682	1061.773617	0.042952	594.789685	
REFLEKTOR REGION 6									
HE-3	26.349373	8.903672	1.485707	0.002633	0.180005	10.112034	0.000632	5.664387	
FB-10	0.003814	0.003433	0.000000	0.000000	0.000000	0.000242	0.000000	0.000135	
SB-10	0.001824	0.001641	0.000000	0.000000	0.000002	0.000115	0.000000	0.000065	
LI-7	0.253858	0.228472	0.002680	0.000005	0.000256	6.014386	0.000001	0.008058	
C-12	0.000256	0.000230	0.000001	0.000000	0.000000	0.000016	0.000000	0.000009	
BE-9	0.002256	0.002031	0.000033	0.000000	0.000002	0.000122	0.000000	0.000068	
LI-6	1489.765427	1340.806884	3.003677	0.005324	1.646620	92.501324	0.001279	51.820319	
REGION TOTALS	1516.356505	1349.546364	4.492097	0.007961	1.826890	102.628238	0.001913	57.493042	
REFLEKTOR-REGION 7									
HE-3	20.686887	2.905980	1.514280	0.002684	0.183467	10.306508	0.000645	5.773324	
FB-10	0.003796	0.003335	0.000014	0.000000	0.000004	0.000226	0.000000	0.000127	
SB-10	0.000227	0.000205	0.000000	0.000000	0.000000	0.000014	0.000000	0.000008	
LI-7	0.047360	0.042624	0.000508	0.000001	0.000048	0.002679	0.000300	0.001501	
C-12	0.000001	0.000001	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000011	0.000010	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
LI-6	1074.022617	566.820355	7.173495	0.012714	1.130495	63.507204	0.000000	35.575300	
REGION TOTALS	1094.763810	965.572510	8.688297	0.015399	1.314013	73.816632	0.003699	41.350260	
REFLEKTOR-REGION 8									
HE-3	11.961161	1.750732	0.869553	0.001541	0.105353	5.918364	0.000370	3.315248	
FB-10	0.057012	0.051311	0.000497	0.000001	0.000039	0.003297	0.000000	0.001847	
SB-10	0.000542	0.000488	0.000002	0.000000	0.000001	0.000033	0.000000	0.000018	
LI-7	0.323361	0.291025	0.002417	0.000006	0.000326	0.018322	0.000001	0.010263	
C-12	0.000002	0.000002	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	
BE-9	0.000018	0.000016	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.000000	0.000000	
LI-6	1716.759633	1545.083669	13.852684	0.024552	1.780060	99.997512	0.000597	56.015258	
REGION TOTALS	1729.101729	1547.177243	14.726154	0.026100	1.885799	105.937529	0.006269	59.342635	
TOTAL COPIES	28255.523851	25385.337038	164.741750	0.291576	30.515683	1714.263377	0.070135	960.303892	

Die Arbeit wurde am Institut für Reaktorentwicklung der Kernforschungsanlage Jülich GmbH durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Hecker für die Themenstellung, das stets große Interesse am Verlauf der Arbeit und die wertvolle Betreuung.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. R. Schulten für die kritische Durchsicht der Arbeit.

Herrn Dr. H.D. Röhrig bin ich ebenfalls zu besonderem Dank verpflichtet für die wertvollen Anregungen aus zahlreichen Diskussionen und die kritische Begleitung der gesamten Arbeit.

Bei Herrn Dr. R. Wagemann bedanke ich mich für die Bereitstellung der reaktorphysikalischen Daten des AVR-Reaktors und die fachliche Beratung bei der Aufbereitung dieser Daten zur Programmeingabe.

Nicht zuletzt danke ich allen, die mir bei der Durchführung und Fertigstellung dieser Arbeit geholfen haben.

