

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

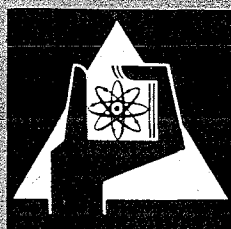
Oktober 1972

KFK 1648

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Die axiale Verteilung einiger Spaltnuklide in Brennstäben des Be-
strahlungsexperimentes DFR-350**

E. Smailos
D. Geithoff



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

**GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE**

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1648

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Die axiale Verteilung einiger Spaltnuklide in Brennstäben des Bestrahlungs-
experimentes DFR-350

von

E. Smailos, D. Geithoff

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

KURZFASSUNG

An 15 Mischoxid-Brennstäben aus dem Bestrahlungsexperiment DFR-350 wurde die axiale Verteilung mehrerer Spaltnuklide γ -spektrometrisch bestimmt. Dabei zeigte sich, daß besonders für das Cs-137 große Schwankungen in der örtlichen Konzentration auftraten. Es konnte zwischen zwei verschiedenen Cs-Verteilungstypen unterschieden werden, bei denen die höchsten Cs-Konzentrationen jeweils am oberen oder am unteren Ende der Brennstoffsäule auftraten. Die unterschiedlichen Cs-Anreicherungen gehen parallel mit unterschiedlichen Kühlmittelaustrittstemperaturen während der Bestrahlung, wobei Stäbe mit hohen Aufheizspannen Anreicherungen am oberen Säulenende, Stäbe mit niedrigen Aufheizspannen dagegen Anreicherungen am unteren Ende ausgebildet haben. Es wird versucht, diese Beobachtungen reaktionskinetisch zu deuten.

Bei den übrigen gemessenen Spaltnukliden wurden keine Besonderheiten festgestellt.

In einem Versuch wurde der Frage nachgegangen, ob das Cäsium innerhalb des Stabes auch nach der Bestrahlung noch leicht beweglich bleibt. Trotz mehrfachen Glühens in einem Temperaturgradienten mit einer Maximaltemperatur von 640°C konnte das Cäsium nicht zur Wanderung gebracht werden. Damit ist sichergestellt, daß sich die gemessenen Cäsiumverteilungen nicht durch kleinere Temperaturschwankungen während der Nachuntersuchung verändern.

ABSTRACT

The axial distribution of several fission products was determined by γ -spectrometry in 15 mixed oxide fuel pins from the irradiation experiment DFR-350. Large variations in the local concentrations were found for the nuclide Cs-137. Two different distribution patterns were discernable one having the maximum concentration at the upper end, the other with the maximum at the lower end of the fuel column. Coolant outlet temperatures during irradiation have been found to be low for Cs-enrichments at the bottom end of the pins while high temperatures correspond to enrichments at the top end. An explanation for this effect based on the reaction kinetics of Cesium is offered.

The distribution of the other nuclides measured has shown no peculiarities.

The question whether Cesium is movable within the pin even after the end of irradiation was tested in an experiment. A pin was heated in a temperature gradient ranging from 300° to 640°C for several hours. With this procedure the Cesium could not be induced to move. By this way it is clearly established that slight temperature changes during postirradiation examination are not capable of moving the fission product Cesium.

I n h a l t

Seite

| | |
|--|----|
| 1. Einführung und Aufgabenstellung | 1 |
| 2. Brennstabdaten | 2 |
| 3. Bestrahlungsdaten | 2 |
| 4. Meßtechnik und Auswertung | 6 |
| 4.1 Meßapparatur | 6 |
| 4.2 Meßtechnik | 6 |
| 4.3 Auswertung | 9 |
| 5. γ -Spektrum | 10 |
| 6. Axiale Verteilung von Zr/Nb-95 | 14 |
| 7. Axiale Verteilung von Ce/Pr-144 | 14 |
| 8. Axiale Verteilung von Ru/Rh-106 | 17 |
| 9. Axiale Verteilung von Cs/Ba-137 und Cs/Ba-134 | 21 |
| 10. Experiment zur Wanderung des Spaltcäsiums | 26 |
| 11. Schlußfolgerungen | 27 |
| Literatur | 31 |
| Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen | 32 |
| Anhang I | |
| Anhang II | |

1. Einführung und Aufgabenstellung

In der Entwicklung eines geeigneten Brennstabes für den Schnellen Natriumgekühlten Reaktor (SNR) fällt dem Bestrahlungsexperiment DFR-350 eine wichtige Aufgabe zu. Durch dieses Experiment sollte nachgewiesen werden, daß das erarbeitete Brennstabkonzept es erlaubt, 30 Prototyp-Brennstäbe im schnellen Neutronenfluß und mit Natrium als Kühlmittel bis zu einem Abbrand von 50.000 MWd/t M zu führen. Zusammen mit dem Commissariat al'Energie Atomique (C.E.A.) wurde in den Jahren 1969 und 1970 im Dounreay Fast Reactor unter der Bezeichnung DFR-350 ein gemeinsamer Bestrahlungsversuch mit einem 77-Stab-Bündel durchgeführt. Hierbei wurden 38 Stäbe vom C.E.A. und 39 Stäbe von der GfK mit seinen Benelux- und Industrie-Partnern gestellt. Am 20. April 1970 wurde der Bestrahlungsversuch erfolgreich abgeschlossen. Die Ergebnisse aus einer ersten zerstörungsfreien Nachuntersuchung ließen es geraten erscheinen, die Bestrahlung in kleinem Maßstab fortzusetzen. So wurden 12 von den 39 Benelux-Stäben für eine Weiterbestrahlung ausgewählt, die restlichen unmittelbar einer intensiven Nachuntersuchung zugeführt. Aus dieser Gruppe wurden die von der Fa. ALKEM gefertigten Stäbe (15) von der GfK in den Heißen Zellen des Kernforschungszentrums Karlsruhe untersucht.

Im Hinblick auf die Überlegungen, daß ein Stabversagen bei sehr hohen Abbränden durch Innenkorrosion gefördert oder sogar hervorgerufen werden kann, wurde die Nachuntersuchung unter starker Betonung dieser möglichen Defektursache durchgeführt. Dabei kommt dem Verhalten der Spaltprodukte, die bei der Innenkorrosion nach jetziger Vorstellung entscheidend mitwirken, eine wesentliche Rolle zu. Hier ist es insbesondere die axiale Verteilung gewisser als korrosiv angesehener Spaltprodukte wie Cäsium, die zu einer Erklärung eines Korrosionsmechanismus beitragen kann.

An den 15 Stäben wurde deshalb eine umfangreiche γ -spektrometrische Untersuchung vorgenommen, in der von jedem Stab vier axiale γ -Profile sowie durchschnittlich sechs γ -Spektren gemessen wurden. Die Tatsache, daß zwischen dem Bestrahlungsende im April 1970 und der γ -spektrometrischen Nachuntersuchung im Juni und Juli 1971 mehr als ein Jahr vergangen war, verhinderte auf der einen Seite zwar das Aufspüren kurzlebiger Spaltprodukte, trug aber auf der anderen Seite wesentlich dazu bei, die Verteilung des Spaltcäsiums ohne allzu starke Beeinträchtigung durch eine hohe Untergrund-Aktivität zu verfolgen.

In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, in welcher Weise eine Reihe von Spaltnukliden entlang der Stabachse verteilt sind. Außerdem wird der Versuch unternommen, anhand der gefundenen Cäsiumverteilung eine Erklärung für die Bildung recht unterschiedlicher Cäsiumansammlungen zu finden.

2. Brennstab-Daten

Genauere Daten für Brennstoff, Brutstoff und der fertigen Brennstäbe sind im Bericht KFK-1377 für alle für das Experiment DFR-350 gefertigten Stäbe enthalten [1]. Die hier γ -spektrometrisch untersuchten 15 Stäbe sind in diesem Bericht unter folgender Bezeichnung zu finden:

G 2, G 4, G 6, G 14, G 21, G 36, G 39, G 40,
G 41, G 43, G 49, G 50, G 56, G 57, G 61

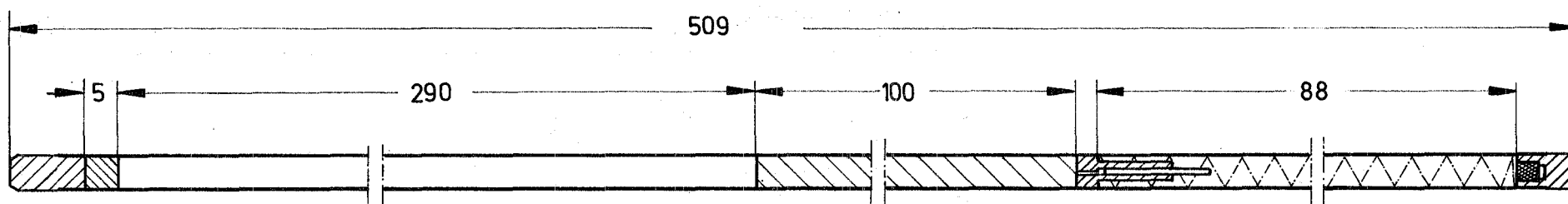
Bei den Stäben G 2, G 4, G 6, G 14 und G 21 wurde als Hüllmaterial Edelstahl mit der Werkstoff-Nr. 1.4988, bei den restlichen 1.4961 verwendet.

Abb. 1 gibt den Aufbau des Brennstabes zusammen mit den wichtigsten Spezifikationsdaten für Brennstoff, Brutstoff und Hülle wieder. Bei der angegebenen Brennstoffsäulenlänge von 290 mm kamen dabei auf jeden Stab zwischen 57 und 59 Brennstofftabletten.

3. Bestrahlungsdaten

Die 77 Stäbe wurden zu einem rhombischen Bündel zusammengesetzt, in dem die Stäbe der einzelnen Hersteller gleichwertig verteilt waren. Dabei ging man davon aus, daß die an der Außenseite sitzenden Stäbe ungleichmäßig gekühlt wurden und somit einen geringeren Wert hatten als die Stäbe in zentralen Positionen. Abb. 2 zeigt die Aufteilung in die einzelnen Bündelpositionen. Die Innenzone ist hier durch eine Umrahmung angedeutet. Sie umfaßt 47 Stäbe.

Das Bündel wurde in der Zeit vom 26.1.1969 bis zum 20.4.1970 in vier Reaktorzyklen (Run 62 bis Run 65) im Dounreay Fast Reactor bestrahlt. Es erreichte dabei einen Abbrand von maximal 5,65 % FIMA. Die Leistungsverteilung entlang der Stabachse ist für die wichtigsten Zeitpunkte in Abb. 3 wiedergegeben. Der Kühlmittelstrom fließt von oben nach unten.



Isolier-
tabl.

Brennstoff

Brutstoff

Spaltgasraum

Brennstoff

Tabletten, maßgesintert
mit 3% Stirnmulde

20% PuO₂ 80% UO₂

Stöchiometrie O/M = 2.00

Tablettendurchmesser : 5.1mm

Tablettendichte : 89 % th.D.

Nomin. Schmierdichte : 80 % th.D.

Brutstoff

UO₂-Tabletten, geschliffen

Tablettendichte : 95 % th.D

Tablettendurchmesser : 5.1 mm

Hülle

Material : Edelstahl 1.4988

und 1.4961

Außendurchmesser : 6.00 mm

Innendurchmesser : 5.24 mm

Min. Wandstärke : 0.34 mm

GfK Karlsruhe

IMF

DFR-350

Spezifikationen der Brennstäbe

Abb. 1



GfK - Stäbe mit Hüll-
material- Nr. 1.4988



CEA - 38 Stäbe



GfK - 23 "

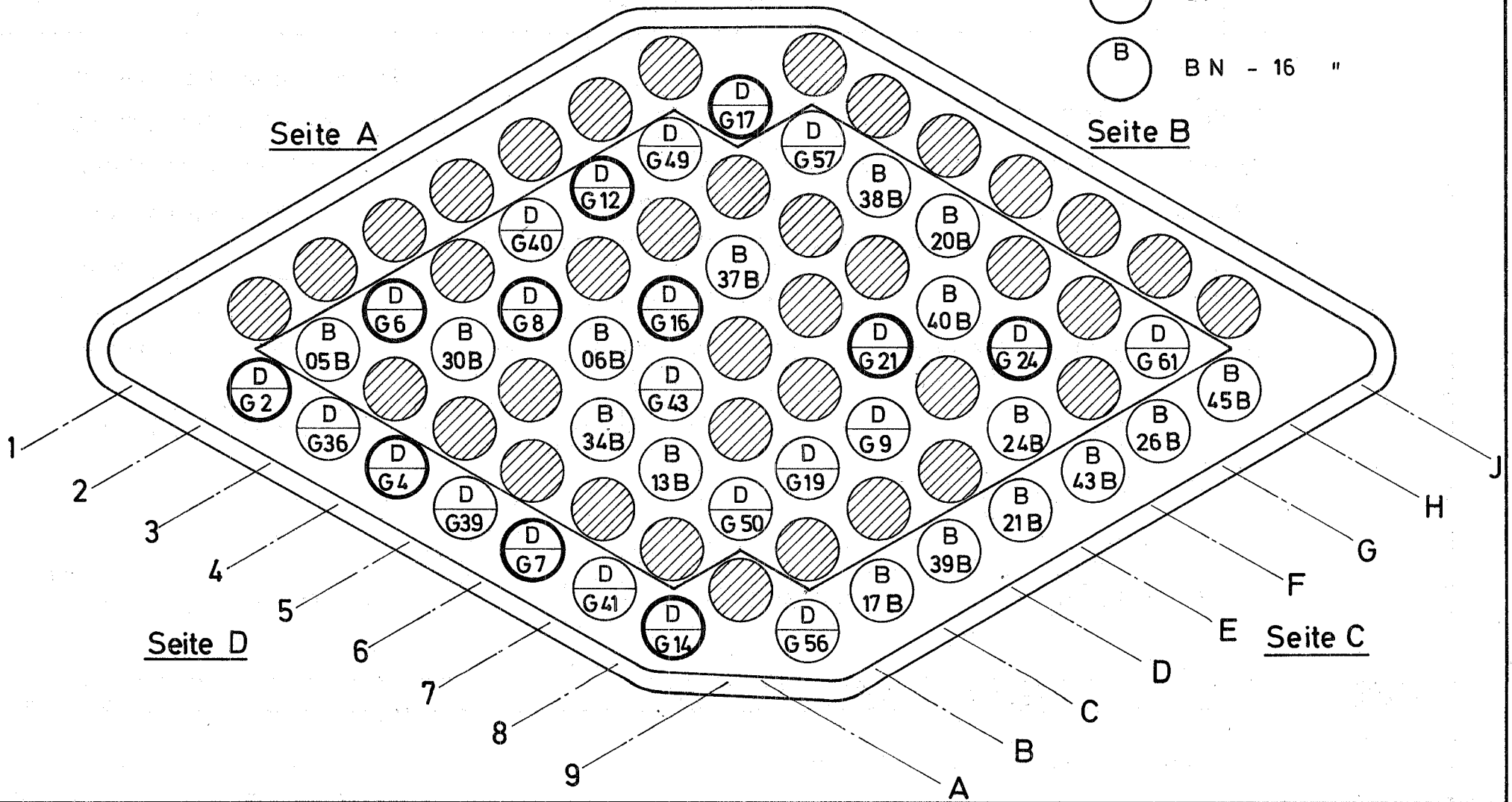


BN - 16 "

Reaktormitte

Seite A

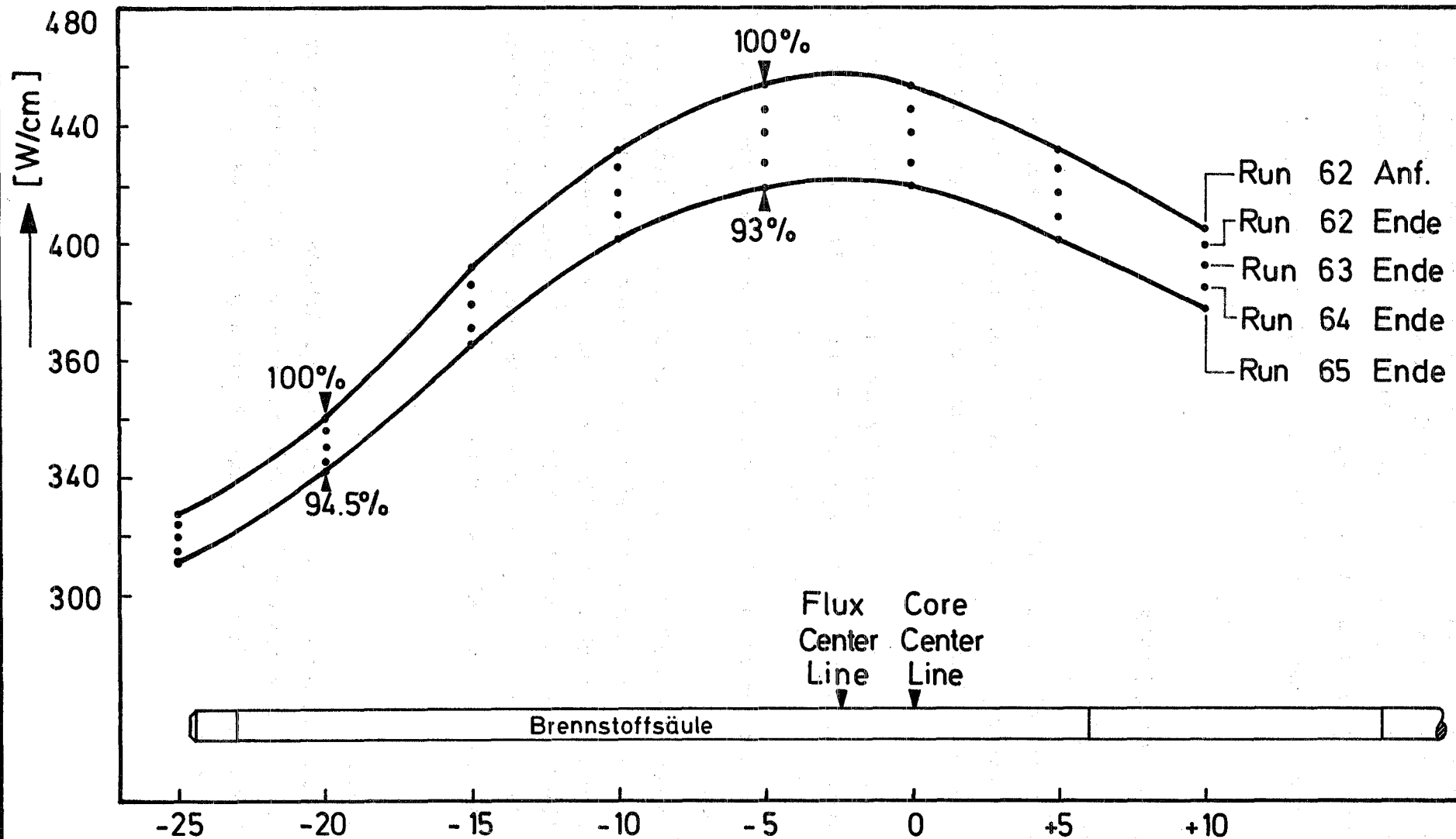
Seite B



GfK Karlsruhe
IMF

DFR - 350
77 - Stab - Bündel

Abb. 2



GfK Karlsruhe
IMF

DFR - 350
Axiale Leistungsverteilung

Abb. 3

Die Kühlmitteltemperaturen wurden vom gesamten Bündel am Eintritt (oben) und Austritt (unten) durch Thermolemente kontrolliert. Darüberhinaus wurde aufgrund der unterschiedlichen Stababstände die Austrittstemperatur für jeden Kühlkanal gesondert berechnet. Abb. 4 zeigt diese errechneten Temperaturen. Die Stäbe befinden sich jeweils auf den Schnittpunkten der Linien. Das Kühlmittel tritt mit 230°C in das Bündel ein.

Weitere Bestrahlungsdaten sind im Bericht KFK-1377 enthalten [1].

4. Meßtechnik und Auswertung

4.1 Meßapparatur

Abb. 5 zeigt die Meßanordnung. Die zu untersuchenden Brennelemente wurden in waagerechter Lage in möglichst kleinem Abstand an einem 700 mm langen Stahlkollimator mit einer 0,5 mm x 20 mm Spaltblende vorbeigeführt.

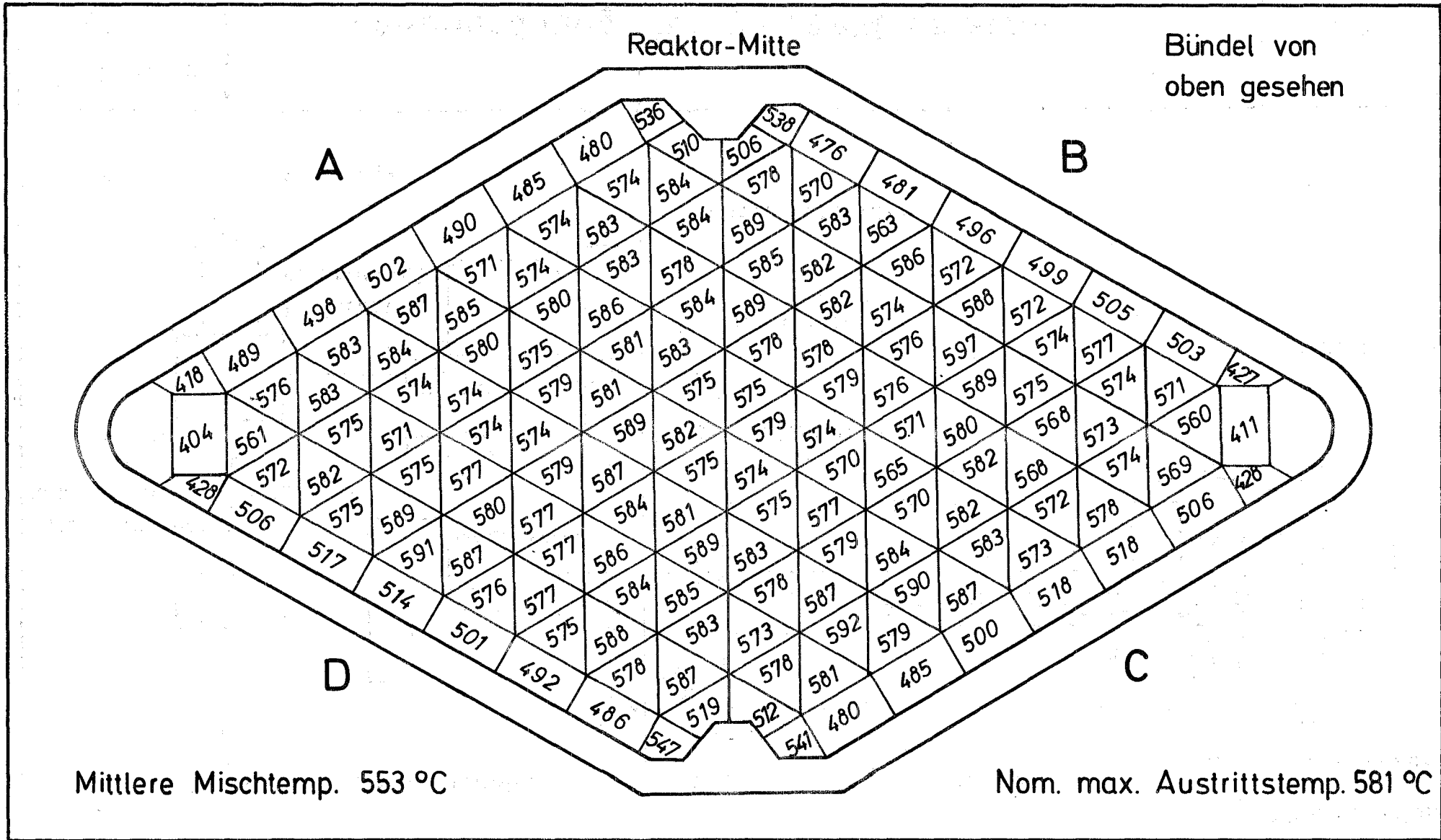
Die Brennstäbe wurden während der Messung um ihre Achse gedreht, um eine mögliche Unsymmetrie der radialen γ -Abstrahlung - durch Eigenabsorption des Brennstoffes - auszugleichen.

Der Vorschub der Brennstäbe erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 2,5 mm/min.

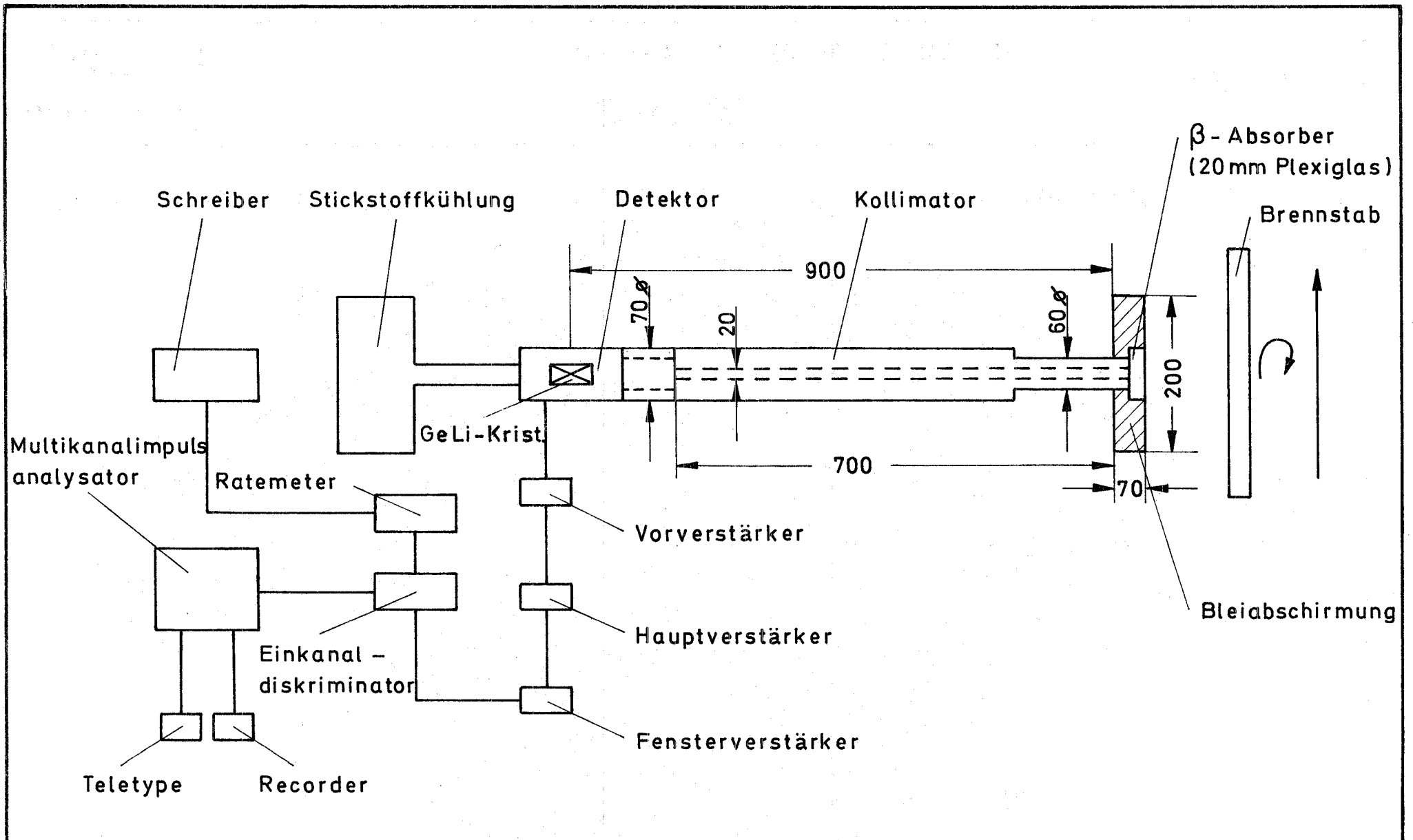
Zur Messung der durch den Kollimator ausgeblendeten γ -Strahlung wurde ein γ -Detektor mit einem Halbleiterkristall (GeLi) von 27 cm^3 Inhalt verwendet. Dem Detektor wurde für die Aufnahme der γ -Spektren ein Multi-kanalimpulsanalysator mit 400 Kanälen der Fa. Friesseke und Hoepfner vom Typ 402 A/B nachgeschaltet. Für die Aufnahme der γ -Profile diente ein Einkanal diskriminator mit Ratemeter.

4.2 Meßtechnik

Die Messung an den Prüflingen begann mit der Aufnahme eines γ -Spektrums im Bereich der Brennstoffsäule. Unmittelbar danach erfolgte die Eichung der Energieskala mit den langlebigen Nukliden Co-60 und Cs-137 als Eichpräparate.



| | | |
|---------------|--|--------|
| GfK Karlsruhe | DFR - 350 | |
| IMF | Kühlmittel - Austrittstemperaturen in °C | Abb. 4 |



| | | |
|-----------------------------|---|---------------|
| GfK Karlsruhe IMF | Meßanordnung für γ-Spektrometrie | Abb. 5 |
|-----------------------------|---|---------------|

Nach einer kurzen Betrachtung des Spektrums wurde entschieden, welche Energiebereiche abgetastet werden sollten. Danach wurden entsprechend den im γ -Spektrum sichtbaren Radionukliden spezielle γ -Profile für einzelne Spaltnuklide gemessen. In den hier vorliegenden Untersuchungen wurde dies für die γ -Linien von Zr/Nb-95, Ru/Rh-106 und Cs/Ba-137 durchgeführt. Unabhängig davon wurde ein integrales γ -Profil im Bereich von 400 bis 1700 keV aufgenommen. Unregelmäßigkeiten im integralen γ -Profil (Aktivitätsspitzen, starke Einbrüche u.ä.) wurden durch Aufnahme von speziellen γ -Spektren analysiert.

4.3 Auswertung

In den aufgenommenen γ -Spektren wurde mit Hilfe von Eichpräparaten eine Energie-Eichkurve festgelegt. Davon ausgehend wurde die γ -Energie aller stark hervortretenden Aktivitätsspitzen über 400 keV bestimmt. Eine Zuordnung zu den emittierenden Nukliden war bis auf wenige Ausnahmen ohne Schwierigkeiten möglich.

Zur quantitativen Bestimmung der einzelnen Nuklide wurden die jeweils größten Aktivitätsspitzen herangezogen. Es waren dies folgende γ -Linien:

| | |
|-----------|-------------|
| Zr/Nb-95 | 756/765 keV |
| Ru/Rh-106 | 513 keV |
| Cs/Ba-134 | 605 keV |
| Cs/Ba-137 | 662 keV |
| Ce/Pr-144 | 1487 keV |

Die Flächen der Aktivitätsspitzen wurden integriert und der Untergrund, hervorgerufen vor allem durch die Compton-Strahlung höherenergetischer γ -Strahlen, subtrahiert. Auf diese Art wurde eine relative Aktivität bestimmt, die innerhalb eines Stabes und darüber hinaus in der ganzen Stabgruppe vergleichend verwendet werden konnte. Bei Nukliden mit starker Wanderung konnte entlang der Stablänge keine Position als ungestört und damit als Bezugsgröße angesehen werden, so daß die Frage, ob eine An- oder Abreicherung im γ -Spektrum ersichtlich sei, nur bei starken Aktivitätsunterschieden beantwortet werden konnte. Allerdings waren die hier betrachteten Aktivitätsunterschiede meist so erheblich, daß sie mühelos als wanderungsbedingt erkennbar waren.

5. γ -Spektren

Die γ -Spektren wurden in der Zeit zwischen dem 24.5.1971 und 15.7.1971 aufgenommen. Damit liegen mehr als 13 Monate zwischen Bestrahlungsende und Meßzeit. Radionuklide mit kurzen Halbwertszeiten konnten daher nicht mehr beobachtet werden. Ein typisches γ -Spektrum aus dem Bereich der Brennstoffsäule zeigt Abb. 6. In ihm sind folgende Spaltnuklide gut identifizierbar:⁺⁾

| | |
|-----------|---|
| Zr/Nb-95 | mit den γ -Energien 722 keV und 765 keV. Die 754 keV-Linie wird nicht mehr aufgelöst. |
| Ru/Rh-106 | mit den γ -Energien 513 keV, 624 keV, 1050 keV und 1130 keV. |
| Cs/Ba-137 | mit der γ -Energie 662 keV. |
| Ce/Pr-144 | mit den γ -Energien 134 keV, 697 keV und 1487 keV. Die 2186 keV-Linie liegt außerhalb des Meßbereiches. |

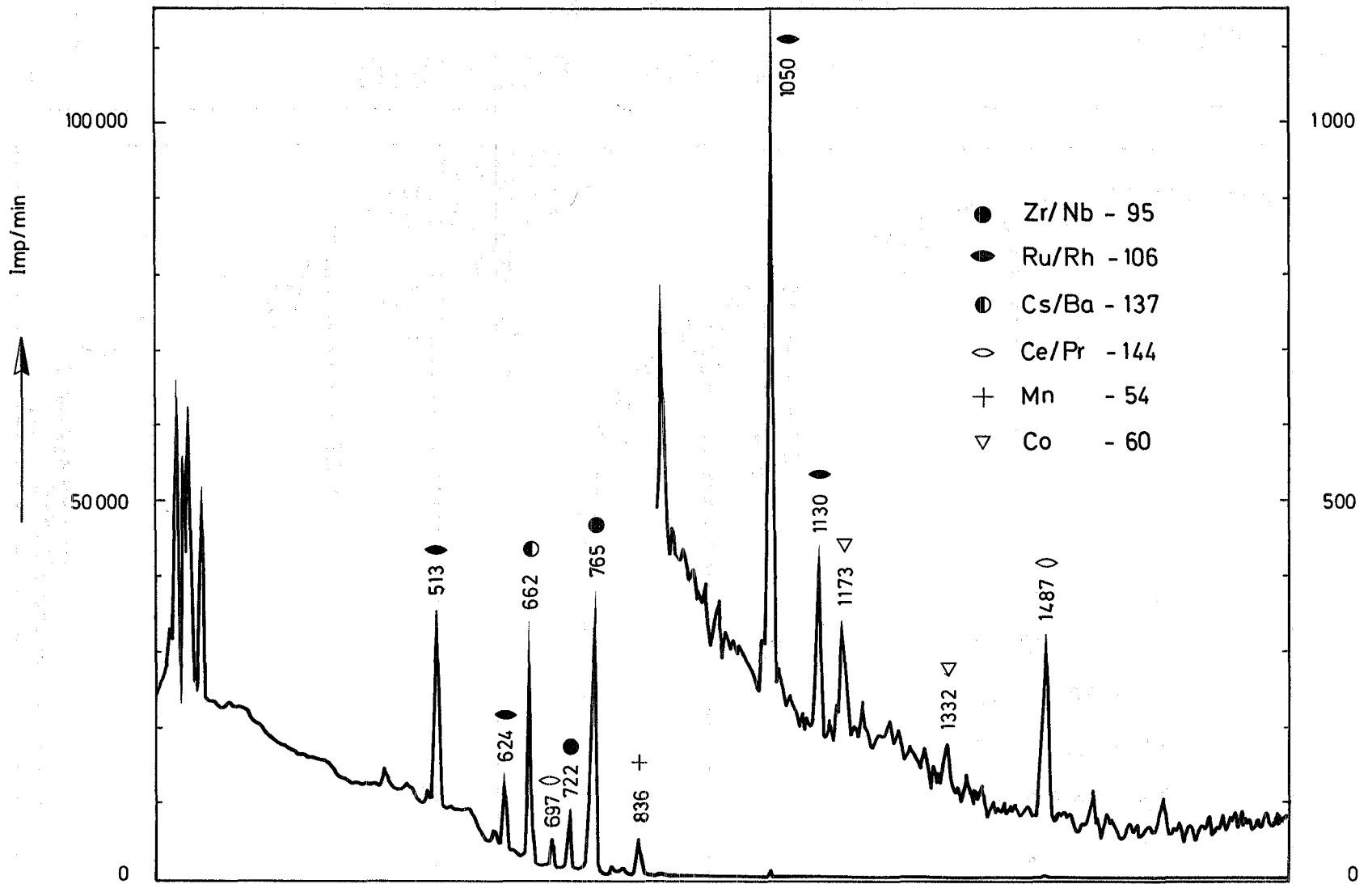
Schwach erkennbar ist das Nuklid Cs-134 mit den γ -Energien von 605 keV und 796/802 keV.

Daneben sind die γ -Linien von Co-60 und Mn-54 zu sehen, die vom Hüllmaterial herkommen.

Das Höhenverhältnis der Aktivitätsspitzen gibt ungefähr das Aktivitätsverhältnis wieder, wie es ohne wesentliche Wanderung einiger Radionuklide im Bereich der Brennstoffsäule vorliegt.

Bei Spaltcäsium-Anreicherungen im Bereich der Brennstoffsäule ist die γ -Linie des Cs/Ba-137 in ihrer Intensität erheblich verstärkt (Abb. 7). Die Cs/Ba-134-Aktivität zeigt hingegen nur eine kleine Erhöhung. Jedoch findet sich dieses Nuklidpaar besonders stark in den am oberen Ende der Brennstoffsäule eingesetzten Radon-Monitoren, die als Filter für das in den Spaltgasraum eingetretene Gas wirken (Abb. 8). Das aus dem Brennstoff freigesetzte Spaltgas Xe-133 zerfällt auf seinem Weg zum Spaltgasraum in Cäsium und wird als Cs-133 von den Asbeststopfen des Radon-Monitor-Röhrchens aufgehalten. Anschließend Neutronenaktivierung führt zum Cs/Ba-134.

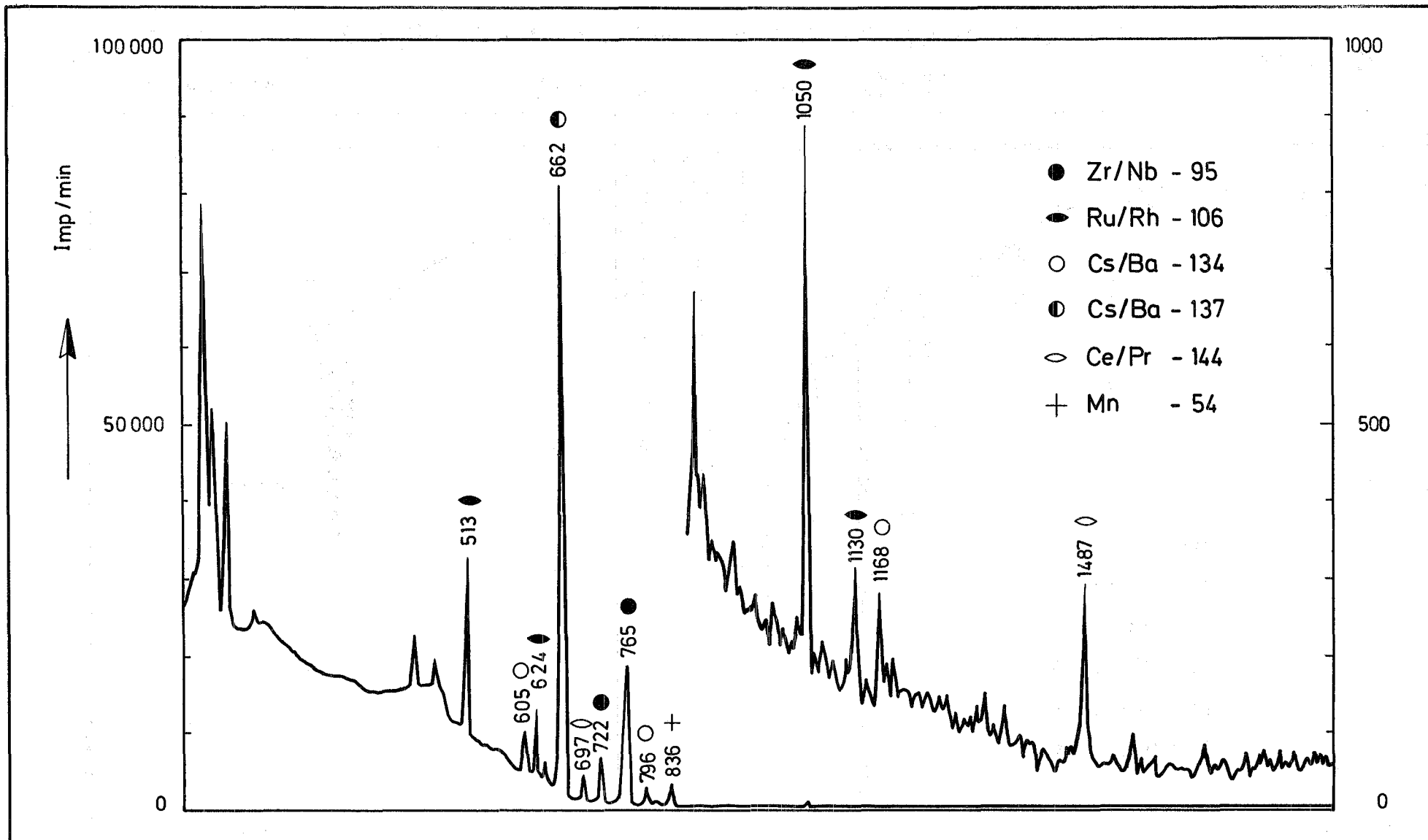
⁺⁾ Die genauen Werte für die Energien der emittierten γ -Quanten sind der "Table of Isotopes" entnommen [2]. Geringe Abweichungen von diesen Werten, wie sie in einigen Tabellen dieser Arbeit vorkommen, sind darauf zurückzuführen, daß am Anfang der Analyse die γ -Energien aus anderen Radionuklid-Tabellen [3] entnommen wurden. Die Unterschiede sind für unsere Betrachtungen ohne Bedeutung.



GfK Karlsruhe
IMF

DFR - 350 Stab G - 43
 γ - Spektrum aus dem Bereich der Brennstoffsäule

Abb. 6



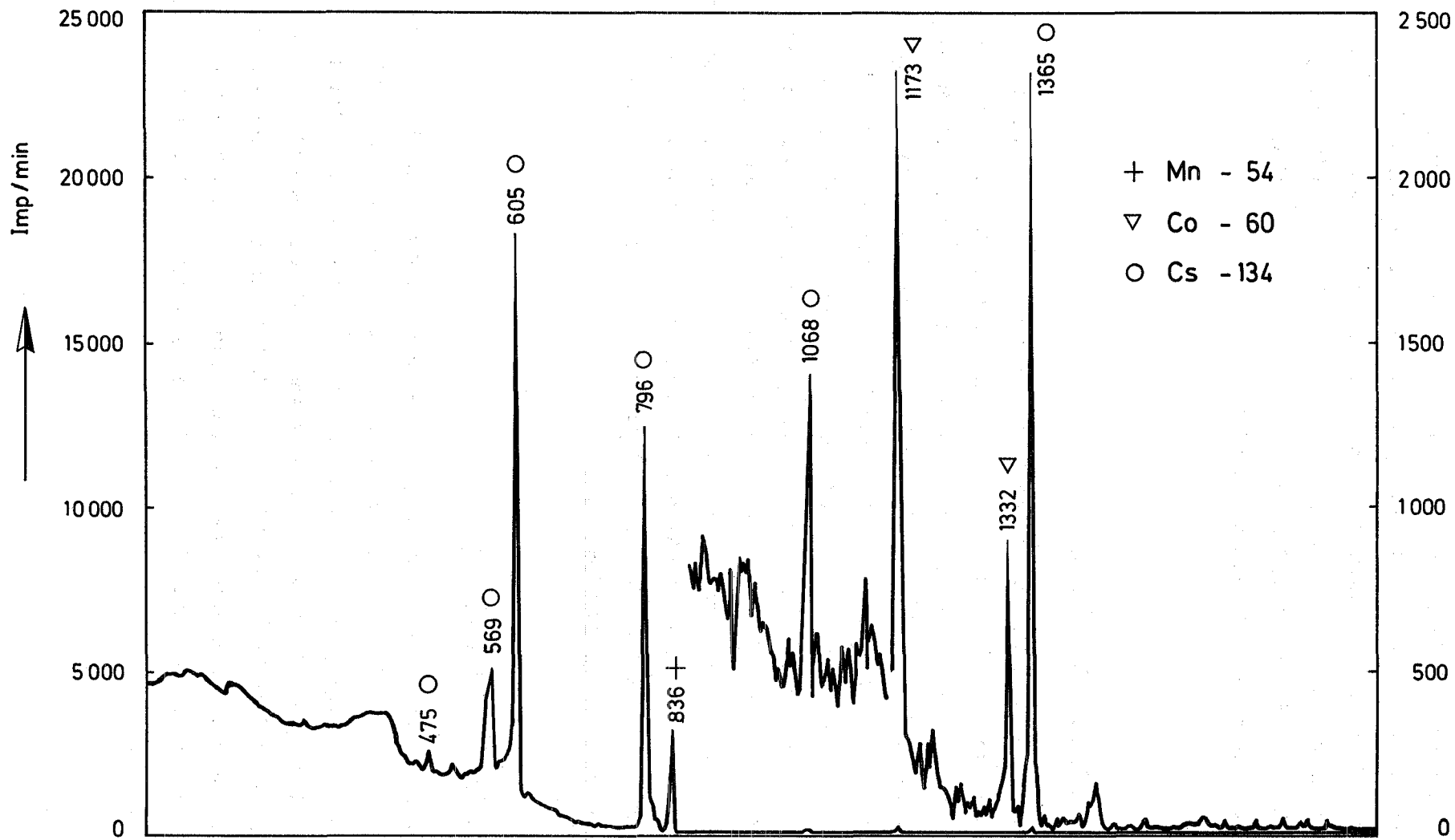
GfK Karlsruhe

IMF

DFR - 350 Stab G - 4

γ -Spektrum mit Cäsium - Anreicherung

Abb. 7



GfK Karlsruhe

IMF

DFR-350 Stab G-61
Cs/Ba-134 im Radon-Monitor

Abb. 8

Dem γ -Spektrum der Spaltnuklide bzw. ihrer Folgeprodukte überlagert ist jeweils das Spektrum der im Hüllmaterial durch die Neutronenbestrahlung gebildeten Radionuklide. Abb. 9 zeigt ein reines Hüllmaterialspektrum, das vom Stab-Endstopfen aufgenommen wurde. Hier sind nur noch drei Radionuklide sichtbar und zwar die durch n,p-Prozesse aus Eisen und Nickel gebildeten Nuklide Mn-54, Co-58 und Co-60. Alle anderen Radionuklide einschließlich des Cr-51 sind inzwischen zerfallen.

6. Axiale Verteilung von Zr/Nb-95

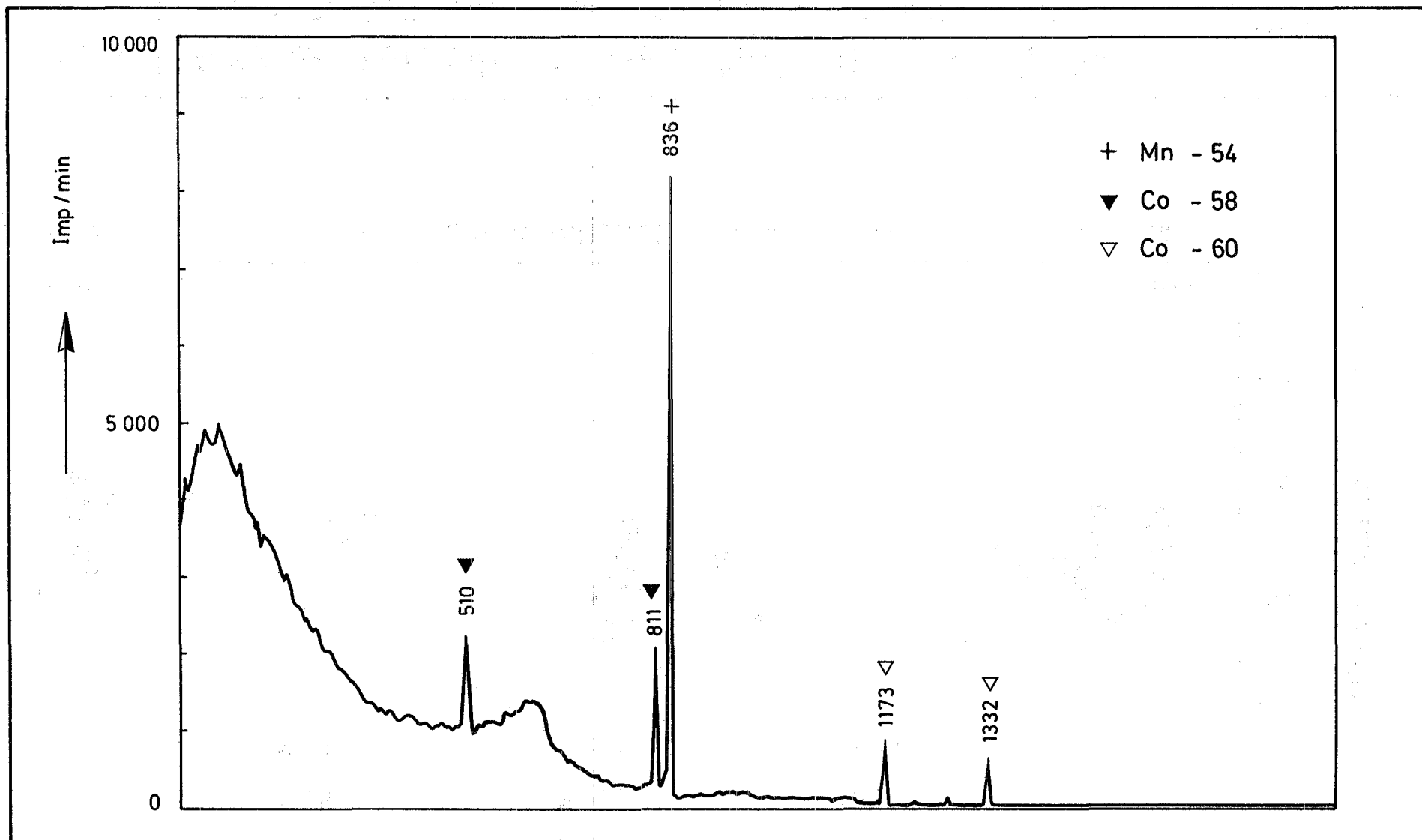
An den spektralanalytischen Positionen aller Brennstäbe wurde die Aktivität des Zr/Nb-95 an den Doppellinien 754/765 keV quantitativ bestimmt. Die entsprechenden Analysenwerte sind in den Tabellen 1 bis 15⁺) sowie als Balken in den Abbildungen 21 bis 35⁺⁺) wiedergegeben. Ein Vergleich mit der Stableistungskurve ergab, daß nach Korrektur der Meßzeit innerhalb der Meßgenauigkeit keine Wanderung von Zr-95 oder Nb-95 beobachtet werden konnte. Dieser Befund stimmt überein mit der derzeitigen Vorstellung, daß das Zr-95 im Brennstoff gelöst bleibt und damit nicht wandert. Die hin und wieder gemachten Beobachtungen, daß das Nb-95 eine Tendenz zur Wanderung hat, konnten hier nicht bestätigt werden, da das beim Stabbetrieb vorhandene Nb-95 inzwischen längst zerfallen war und nur noch das nach der Bestrahlung aus dem Zr-95 nachgebildete Nb-95 gemessen wurde.

7. Axiale Verteilung von Ce/Pr-144

Wie beim Zr/Nb-95 wurde die Verteilung des Ce/Pr-144 für alle Stäbe quantitativ bestimmt. Die Analysenwerte finden sich in den Tabellen 1 bis 15⁺) sowie als Balkendiagramme in den Abb. 21 bis 35⁺⁺). Zusätzlich wurden die Aktivitäten aller Stäbe in einem Diagramm gegen die Stabachse aufgetragen (Abb. 10). Bereits ohne Korrektur für eine einheitliche Meßzeit ist erkennbar, daß Cer-Verlagerungen nicht stattgefunden haben. Diese Aussage steht im Einklang mit dem derzeitigen Bild vom Wanderungsverhalten des Spalt-Cers.

+) Anhang I

++) Anhang II

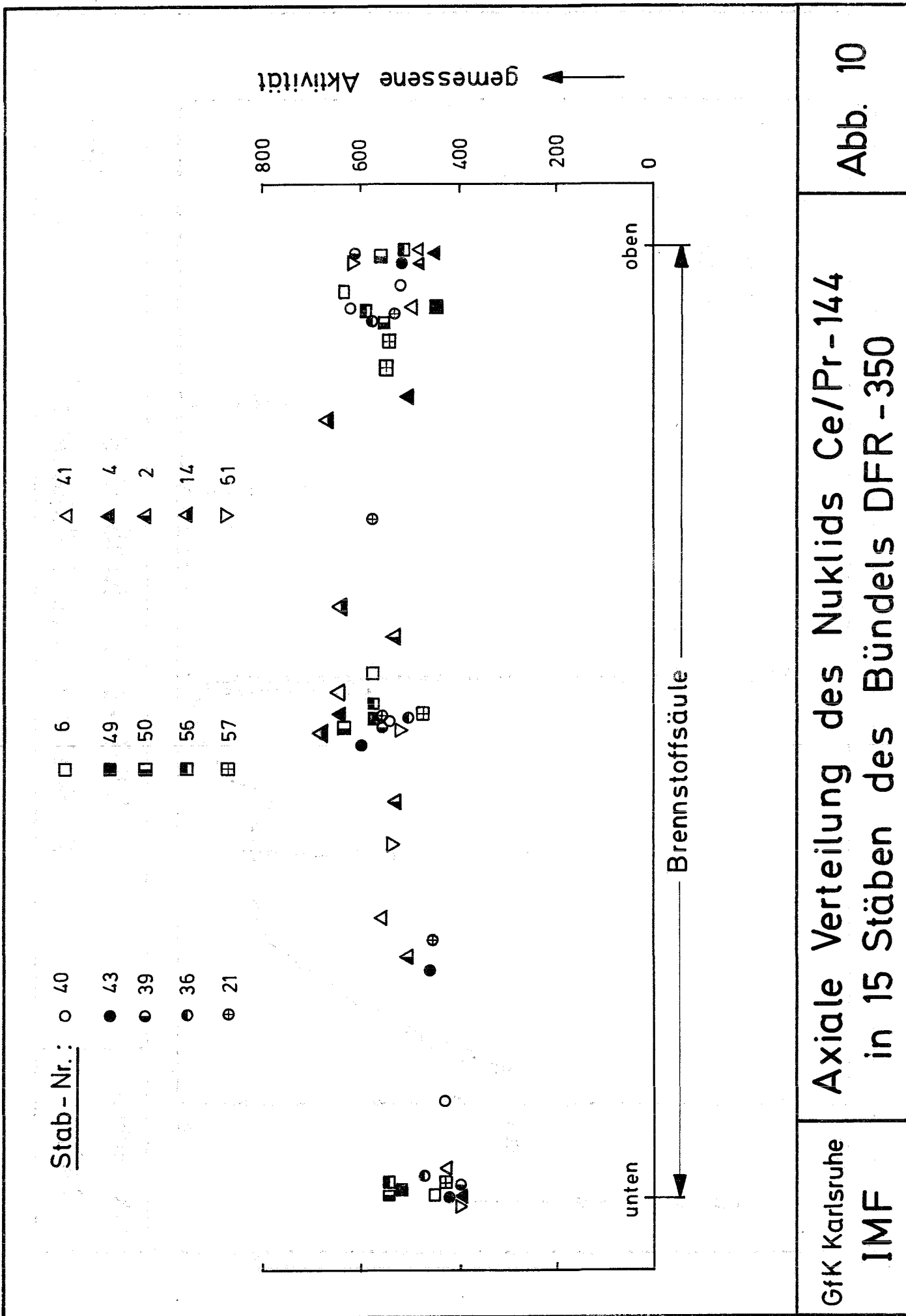


GfK Karlsruhe

IMF

DFR - 350 Stab G-6
 γ - Spektrum des Endstopfens

Abb. 9



Axiale Verteilung des Nuklids Ce/Pr-144
in 15 Stäben des Bündels DFR - 350

Abb. 10

GfK Karlsruhe
IMF

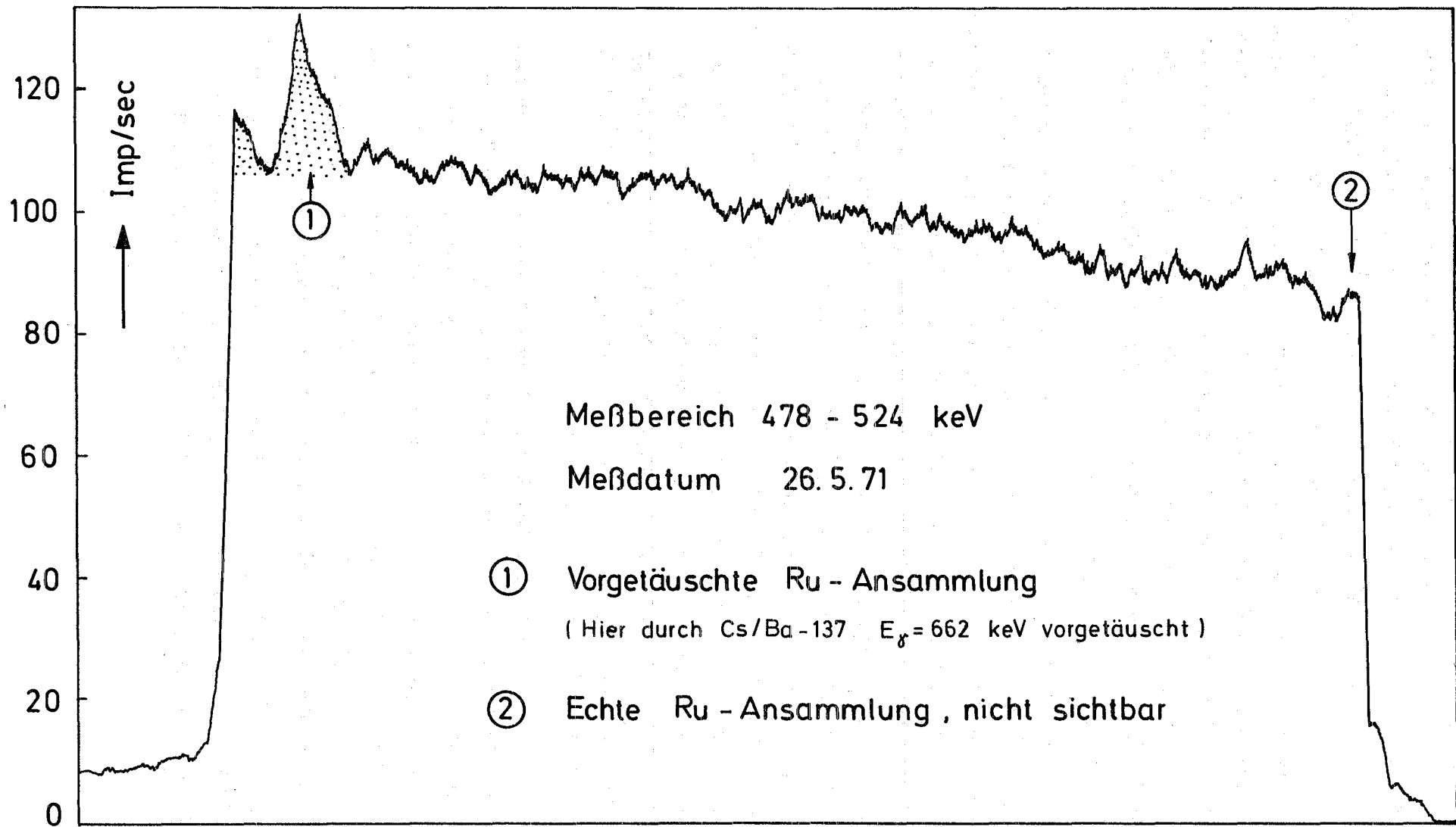
8. Axiale Verteilung von Ru/Rh-106

Spalt-Ruthenium findet sich in oxidischen Brennstoffen bei höherem Abbrand gewöhnlich in Form von kleinen kugeligen Einschlüssen in der Oxidmatrix und zwar zusammen mit anderen Spalt-Elementen wie Mo, Tc, Pd und Rh. Häufig werden auch große Metallreguli im Zentralkanal beobachtet. Insbesondere bei Hüllrohrschäden wurden große Reguli gefunden, die mitunter den gesamten Zentralkanal über mehrere Zentimeter Länge ausfüllten. Die Ansammlung von Ru innerhalb der Brennstoffsäule gilt allgemein als Hinweis auf ein anomales Verhalten des Brennstabes. Mitunter wird als Ursache für die Ru-Ansammlung einfach eine erhöhte Brennstofftemperatur angenommen, wobei allerdings nicht genau definiert ist was erhöht hier bedeutet.

Aus diesem Grunde und weil außerdem das Spalt-Ruthenium auch nach längeren Abklingzeiten noch gut meßbar war, wurde an den Stäben die Ru-Verteilung bestimmt. Die Aufnahme eines Ru-106-Profiles über die γ -Linie mit der höchsten Intensität (513 keV) reagiert jedoch empfindlich auf ebenfalls vorhandene Cs-137-Anreicherungen, die Ru-106 im Profil vortäuschen. Abb. 11 zeigt ein Ru-Profil in dem die punktierten Aktivitätsspitzen am oberen Brennstoffsäulenende aufgrund einer γ -spektrometrischen Punktanalyse eindeutig als Cs-Anreicherung entlarvt werden konnte. Andererseits blieb eine echte Ru-106-Anreicherung am unteren Säulenende unentdeckt. Zuweilen ist es möglich, schon aus der Form einer Aktivitätsspitze auf eine echte Ru-Anreicherung oder eine vorgetäuschte zu schließen, da echte Ru-Anreicherungen meist sehr steile Spitzen bilden (Abb. 12). Bei starken allgemeinen Spaltproduktverlagerungen ist es in jedem Fall sinnvoll, die Ru-Ansammlungen durch γ -spektrometrische Punktanalysen zu ermitteln bzw. nachzuweisen.

In Abb. 13 sind die auf diese Art bestimmten Ru/Rh-106-Aktivitäten für alle 15 Stäbe gegen die Stabachse aufgetragen. Im Bereich der Brennstoffsäulenmitte ragen deutlich zwei Stäbe (G 2 und G 14) mit je einer Spitze über das allgemeine Niveau hinaus. Beide Stäbe haben im Brennstoffbündel an der Außenseite in einer Eckposition gestanden. Sie sind von diesem Gesichtspunkt her als anomal für das Bündel anzusehen. Für eine erhöhte Brennstofftemperatur liegen aus anderen Untersuchungen allerdings keine Hinweise vor.

In zwei weiteren Stäben (G 40 und G 49) finden sich Ru-Ansammlungen am unteren Säulenende. Da die Stäbe der Bündel-Mittelzone entstammen und somit hinsichtlich der Kühlbedingungen dem Gros der restlichen Stäbe gleichzu-



Meßbereich 478 - 524 keV

Meßdatum 26.5.71

- ① Vorgetäuschte Ru - Ansammlung
(Hier durch Cs/Ba-137 $E_{\gamma}=662$ keV vorgetäuscht)
- ② Echte Ru - Ansammlung , nicht sichtbar

oben

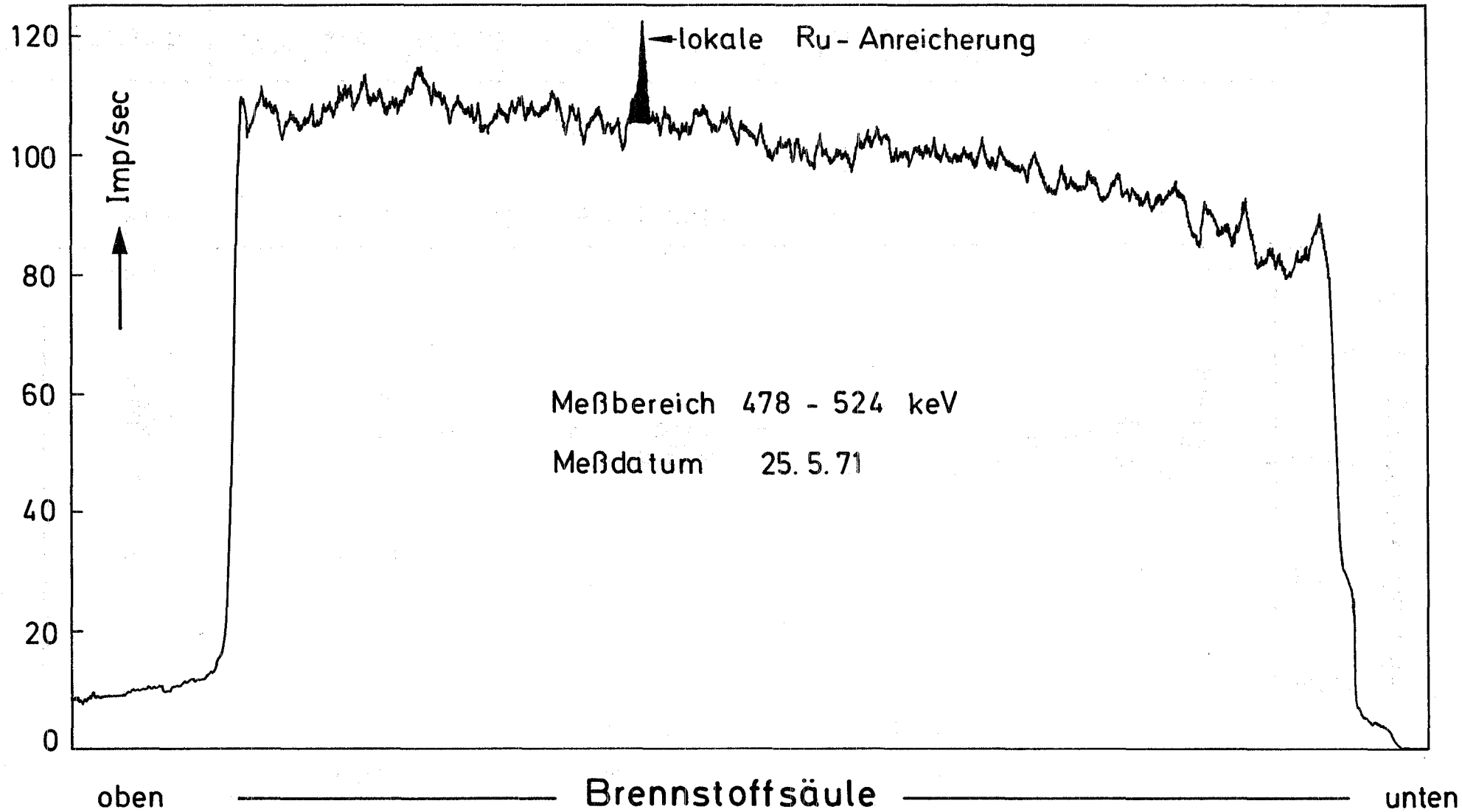
Brennstoffsäule

unten

GfK Karlsruhe
IMF

DFR-350 Stab G 40
Ru-106 - Profil

Abb. 11

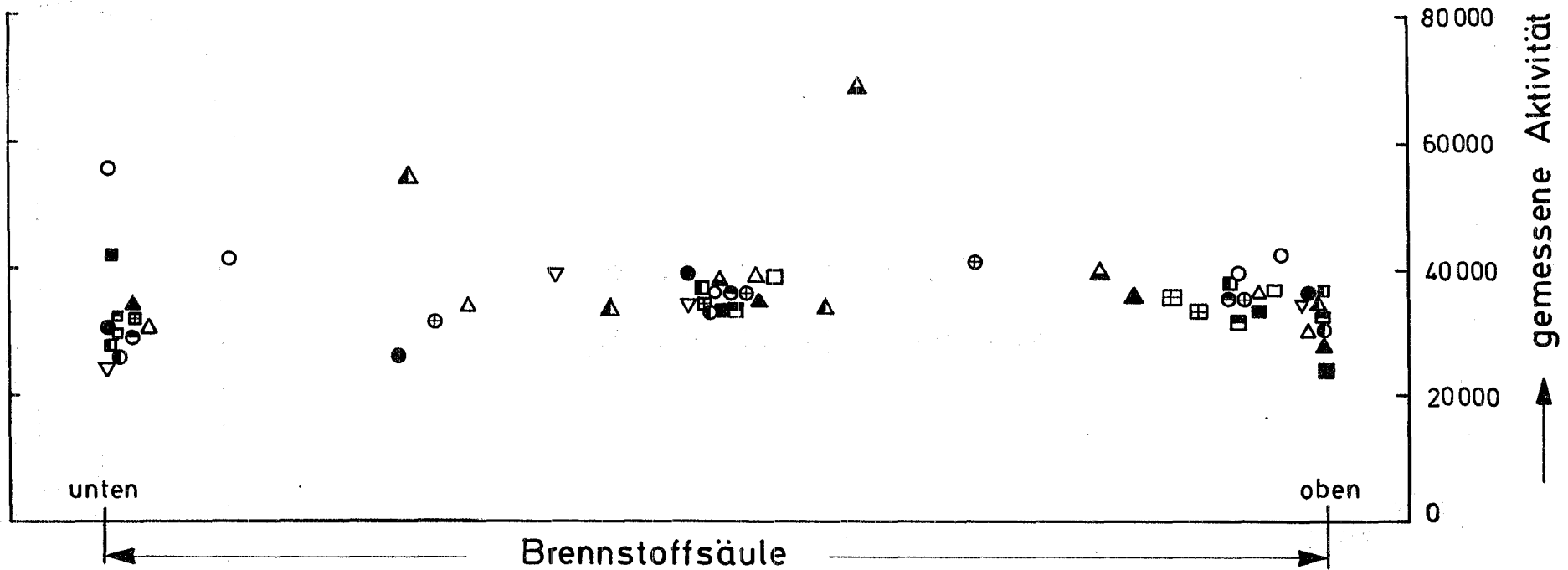


GfK Karlsruhe
IMF

DFR-350 Stab G 14
Ru-106 - Profil

Abb. 12

Stab - Nr.: ○ 40 □ 6 △ 41
 ● 43 ■ 49 ▲ 4
 ⊙ 39 ◻ 50 ▲ 2
 ⊕ 36 ⊞ 56 ▲ 14
 ⊕ 21 ⊞ 57 ▽ 61



GfK Karlsruhe
IMF

Axiale Verteilung des Nuklids Ru-106
in 15 Stäben des Bündels DFR-350

Abb. 13

setzen sind, ist eine Ursache für die Ru-Ansammlungen nicht ohne weiteres erkennbar. Immerhin besitzen aber beide Stäbe überdurchschnittlich große Zentralkanäle, was noch als erhöhte Brennstofftemperatur gedeutet werden könnte.

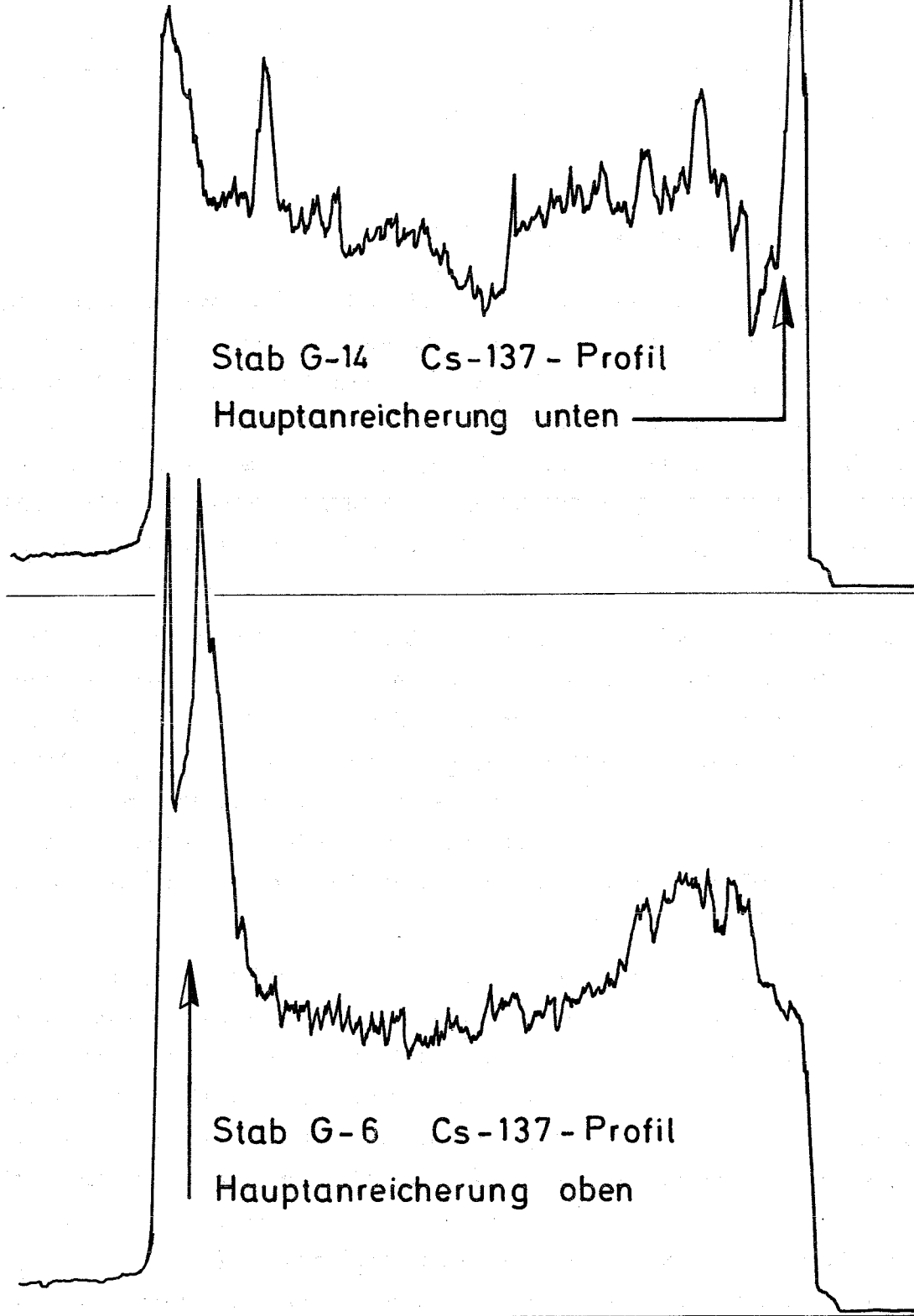
Die hier beobachteten Ru-Ansammlungen sind sowohl hinsichtlich ihrer Anzahl als auch der Größe der Ansammlungen nicht so herausragend, daß sie ein bevorstehendes Stabversagen signalisieren könnten.

9. Axiale Verteilung von Cs/Ba-137 und Cs/Ba-134

Aus der γ -spektrometrischen Analyse ergibt sich, daß starke Anreicherungen von Cs-134 und Cs-137 sowohl innerhalb als auch außerhalb der Brennstoffsäule aufgetreten sind (Abb. 21 bis 35). Innerhalb der Brennstoffsäule war bei einigen Brennstäben eine Anreicherung von Cs-134 und Cs-137 im oberen Bereich der Brennstoffsäule (kaltes Ende) festzustellen, während bei den anderen Brennstäben starke Anreicherungen im unteren Bereich (heißes Ende) der Brennstoffsäule zu finden waren. Diese zwei typischen Formen der Cs-Anreicherung sind in Abb. 14 zu sehen.

Außerhalb der Brennstoffsäule waren Cs-134 und Cs-137 zwischen der Isolier-
tablette und dem unteren Endstopfen stark angereichert. Weitere Cs-Anreicherungen fanden sich am Radon-Monitor. Allerdings handelt es sich hier um reines Cs-134, das vermutlich als Xe-133 gewandert und später durch β -Zerfall in Cäsium übergegangen ist [4]. Da das Cs-134 nicht direkt bei der Spaltung entsteht, sondern längerlebige, gasförmige Vorläufer hat, wurde bei dem Versuch, die Cs-Wanderung innerhalb der Brennstoffsäule zu erklären, nur die Verteilung von Cs-137 betrachtet.

Die Tatsache, daß die Brennstäbe, bedingt durch ihre Position, im Bündel (innere bzw. äußere Brennstäbe) unterschiedlichen axialen Temperaturgradienten zwischen Ein- und Austritt des Kühlmittels ausgesetzt sind, ließ vermuten, daß ein Zusammenhang zwischen dem Temperaturgradienten und dem Ort der maximalen Cs-Anreicherung besteht. Deshalb wurden die maximale, die mittlere und die minimale Aufheizspanne (Differenz zwischen der Kühlmittelaustritts- und Eintrittstemperatur) der verschiedenen Brennstäbe über die Lage der Brennstäbe in Diagrammen aufgetragen (Abb. 15, 16, 17). Diese drei Abbildungen zeigen, daß innerhalb der Brennstoffsäule bei allen inneren Brennstäben eine starke Anreicherung von Cs-137 im oberen Bereich



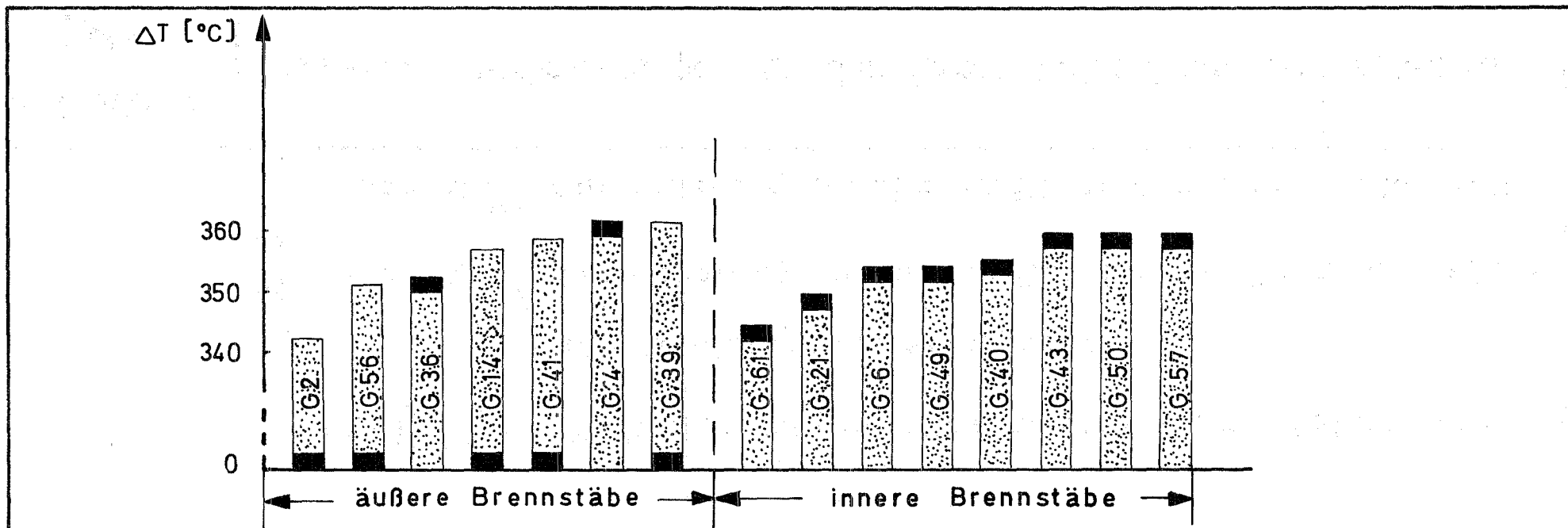
GfK Karlsruhe

IMF

DFR - 350


Verteilung von Spaltcäsium


Abb. 14



$\Delta T = T_1 - T_2$ $T_1 = \text{max. Kühlmittelaustrittstemperatur am Stabumfang}$

$T_2 = \text{Kühlmiteleintrittstemperatur}$

 max. Cs^{137} -Anreicherung im unteren Bereich der Brennstoffsäule

 max. Cs^{137} -Anreicherung im oberen Bereich der Brennstoffsäule

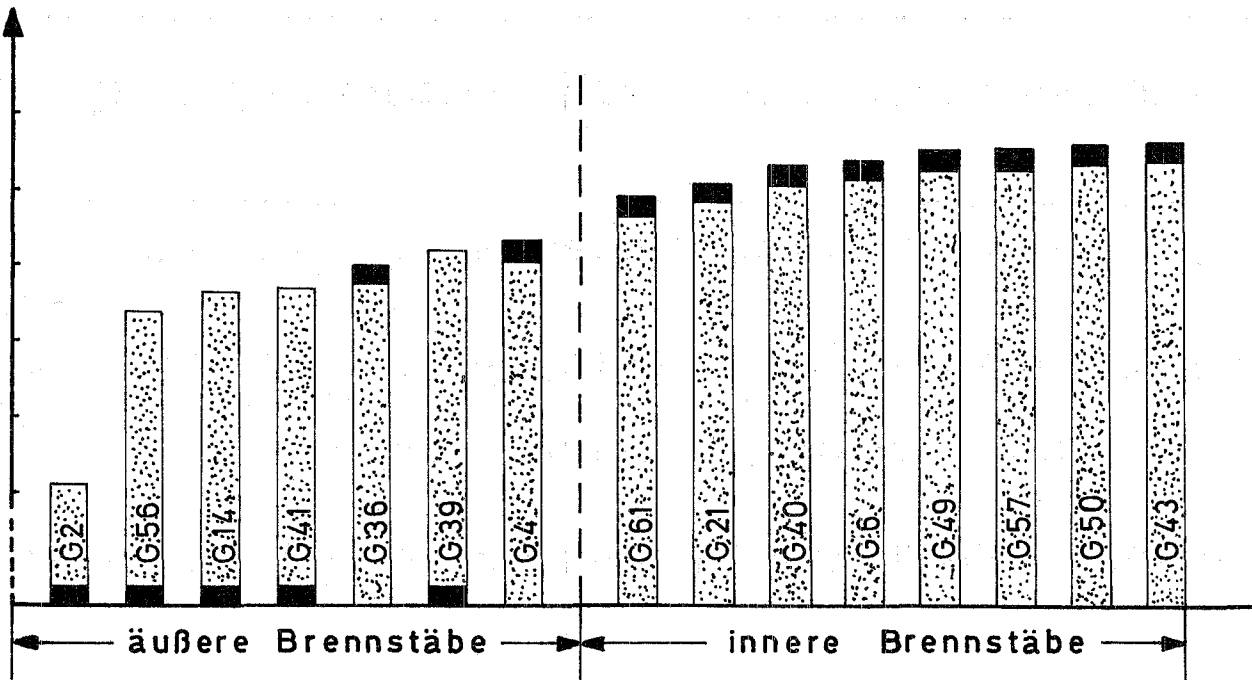
GfK Karlsruhe
IMF

Cs - 137 -Anreicherungen an den Brennstoffsäulenenden

Abb. 15

ΔT [°C]

360
340
320
300
280
260
0



$\Delta T = T_1 - T_2$ T_1 = mittl. Kühlmittelaustrittstemperatur am Stabumfang

T_2 = Kühlmiteleintrittstemperatur



max. Cs^{137} -Anreicherung im unteren Bereich der Brennstoffsäule

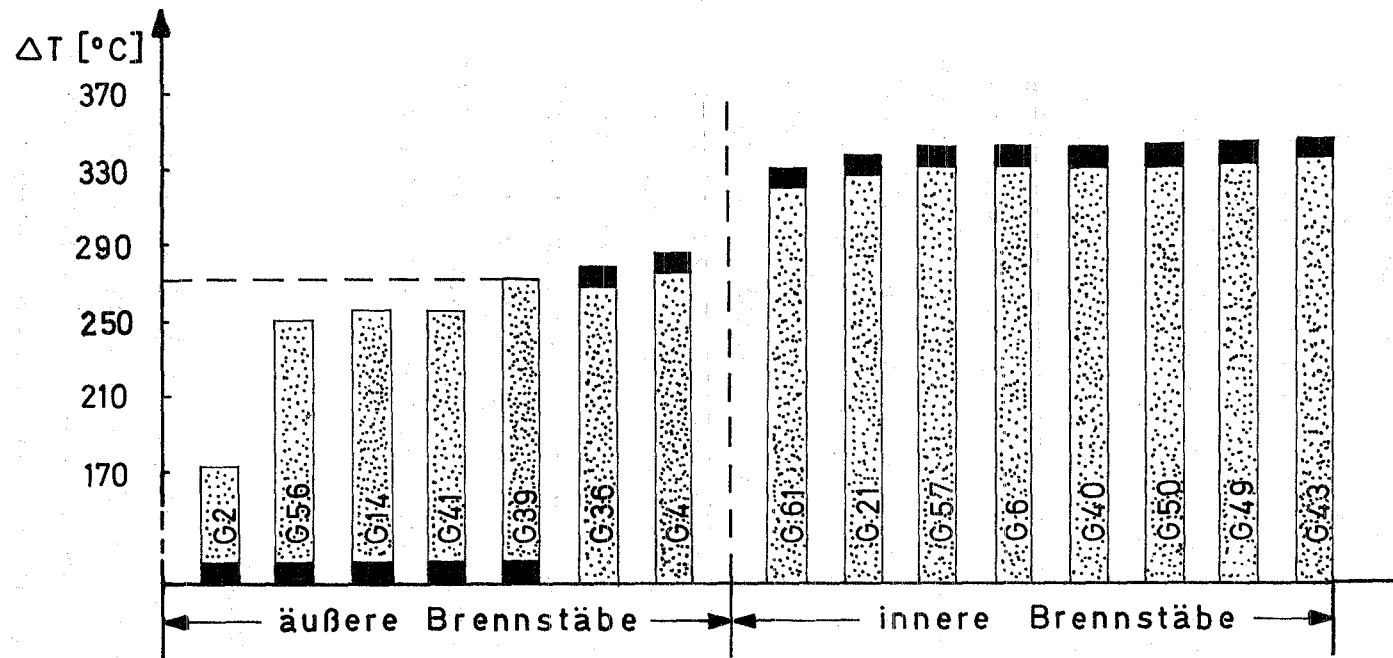
max. Cs^{137} -Anreicherung im oberen Bereich der Brennstoffsäule

GfK Karlsruhe

IMF

Cs -137-Anreicherungen an den Brennstoffsäulenenden

Abb. 16



$\Delta T = T_1 - T_2$ $T_1 =$ min. Kühlmittelaustrittstemperatur am Stabumfang

$T_2 =$ Kühlmittelintrittstemperatur



max. Cs^{137} -Anreicherung im unteren Bereich der Brennstoffsäule

max. Cs -Anreicherung im oberen Bereich der Brennstoffsäule

GfK Karlsruhe
IMF

Cs-137-Anreicherung an den Brennstoffsäulenenden

Abb. 17

der Brennstoffsäule vorliegt, während dagegen die äußeren Brennstäbe bis auf zwei Ausnahmen (G⁴ und G³⁶) starke Cs-137-Anreicherungen im unteren Bereich der Brennstoffsäule besitzen. Ferner zeigen die Abb. 15 und 16, daß es keine Temperaturgrenze gibt, oberhalb der die Brennstäbe unabhängig von ihrer Lage im Bündel ein einheitliches Verhalten bezüglich der Cs-137-Anreicherung im oberen bzw. unteren Bereich der Brennstoffsäule besitzen. Es scheint also, daß die maximale und die mittlere Aufheizspanne keinen Einfluß auf die Cs-137-Wanderung haben. Dagegen zeigt die Abb. 17, daß sowohl die inneren als auch die beiden äußeren Brennstäbe G⁴ und G³⁶, die ihre maximale Cs-137-Anreicherung im oberen Bereich der Brennstoffsäule haben, eine Temperaturdifferenz zwischen der minimalen Kühlmittelaustritts- und Eintrittstemperatur (minim. Aufheizspanne) höher als 270°C aufweisen und somit einen größeren axialen Temperaturgradienten zwischen Eintritt (230°C) und Austritt des Kühlmittels haben als die übrigen äußeren Brennstäbe mit einer Temperaturdifferenz niedriger als 270°C.

Daraus schließen wir, daß die unterschiedlichen axialen Temperaturgradienten zwischen Ein- und Austritt des Kühlmittels bei den verschiedenen Brennstäben eine Ursache für die Cs-137-Anreicherung im oberen bzw. unteren Bereich der Brennstoffsäule sind; und zwar bei den Brennstäben mit einem größeren axialen Temperaturgradienten, das ist hier der Fall. Bei den inneren Brennstäben und den beiden äußeren G⁴ und G³⁶, wanderte das Cs-137 zu der kälteren Zone (oberer Bereich der Brennstoffsäule) und kondensierte dort, während dagegen bei den Brennstäben mit einem kleineren axialen Temperaturgradienten das Cs-137 in der Brennstoffsäule zunächst gleichmäßig verteilt blieb und dann durch Wechselwirkung mit der Hülle am heißen Ende angereichert wurde. Über die Form in der das Spaltcäsium im Brennstoff des Bündels zumindest an den heißen Anreicherungs-Orten vorliegt, läßt sich sagen, daß es wahrscheinlich in gebundener Form vorhanden ist, z.B. als Chromat ($Cs_x Cr_y O_z$), da sowohl das Sauerstoffangebot als auch die Temperatur genügend hoch sind (O/M = 2,0; mittl. Abbrand ca. 5,15 At.-%) und damit die Voraussetzungen für eine Reaktion mit der Hülle gegeben sind.

10. Experiment zur Wanderung des Spaltcäsiums

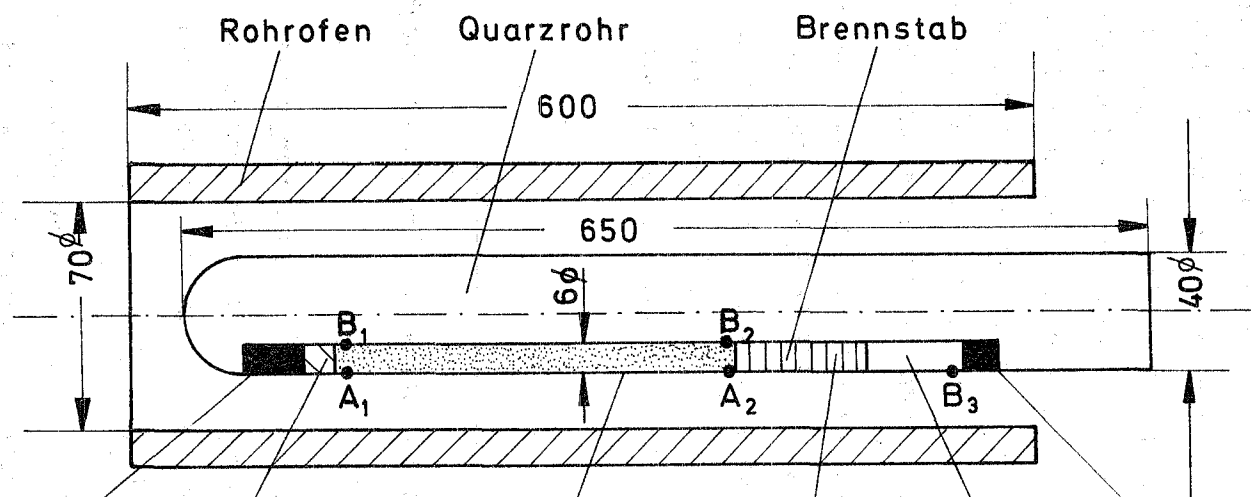
Um zu zeigen, daß die Cäsium-Verteilung im Brennstab, die mit Hilfe der γ -spektrometrischen Analyse ermittelt wurde, mit der Verteilung unmittelbar nach dem Abschalten des Reaktors übereinstimmte, wurden die Brennstäbe G⁴⁹ und G⁵⁰, die eine starke Cäsium-Anreicherung im oberen Bereich der Brenn-

stoffsäule zeigten, in einem Quarzrohrföfen (Abb. 18) acht bzw. drei Stunden lang im Hochvakuum ($\leq 10^{-4}$ Torr) in einem Temperaturgradienten geglüht, wobei die höchste Temperatur annähernd der maximalen Hüllwandtemperatur entsprach. Dabei wurde bei dem Brennstab G49 ein Temperaturgradient derart eingestellt, daß die Cs-Anreicherung bei einer Temperatur von 600°C lag, während das untere Stabende eine Temperatur von 300°C aufwies. Beim Stab G50 wurde die Cs-Anreicherung auf 640°C aufgeheizt, die Temperatur der Stabenden betrug 430 bzw. 300°C . Eine schematische Darstellung der Temperaturgradienten ist in Abb. 19 zu sehen. Die Temperaturmessung erfolgte mittels Ni/CrNi-Thermoelementen, die am Quarzrohr an den jeweiligen Meßstellen angebracht waren. Nach einer Glühzeit von acht bzw. drei Stunden wurden die Brennstäbe in einem Zeitraum von ca. vier Stunden abgekühlt. Die anschließende γ -spektrometrische Aufnahme der Cs-Profile zeigte, daß die Cs-Verteilung sowohl im Brennstab G49 als auch in G50 nach dem Glühen sich durch die thermische Behandlung nicht verändert hatte (s. Abb. 20). Dieses Versuchsergebnis zeigt, daß die Cs-Anreicherungen sich nach der Bestrahlung nicht mehr leicht verschieben können, sei es durch einen zufälligen Temperaturgradienten bei der Nachuntersuchung oder auch durch die üblichen Manipulationen in den Heißen Zellen. Damit besteht kein Zweifel, daß die untersuchte Cs-Verteilung der Situation im Stab in der letzten Phase der Bestrahlung entspricht.

11. Schlußfolgerungen

Aus den Ergebnissen der γ -spektrometrischen Analyse und des Glüh-Versuches sind folgende Schlußfolgerungen zu ziehen:

- Die Cäsium-Verteilung, wie sie in der Nachuntersuchung vorgefunden wird, entspricht der Verteilung während der letzten Bestrahlungsphase. Temperaturschwankungen und Manipulationen während der Nachuntersuchung beeinflussen die Verteilung nicht.
- Bei den 15 Stäben kann zwischen zwei unterschiedlichen Verteilungstypen für das Cs-137 unterschieden werden. In einem Fall ist das Cs-137 im oberen Bereich der Brennstoffsäule (Kühlmitteleintritt), im anderen Fall im unteren Bereich (Kühlmittelaustritt) bevorzugt angereichert.



unt. Endstopfen

Isolierplatte

Brennstoffsäule

Brutstoffsäule

Spaltgasraum

ob. Endstopfen

A_1, A_2, B_1, B_2, B_3

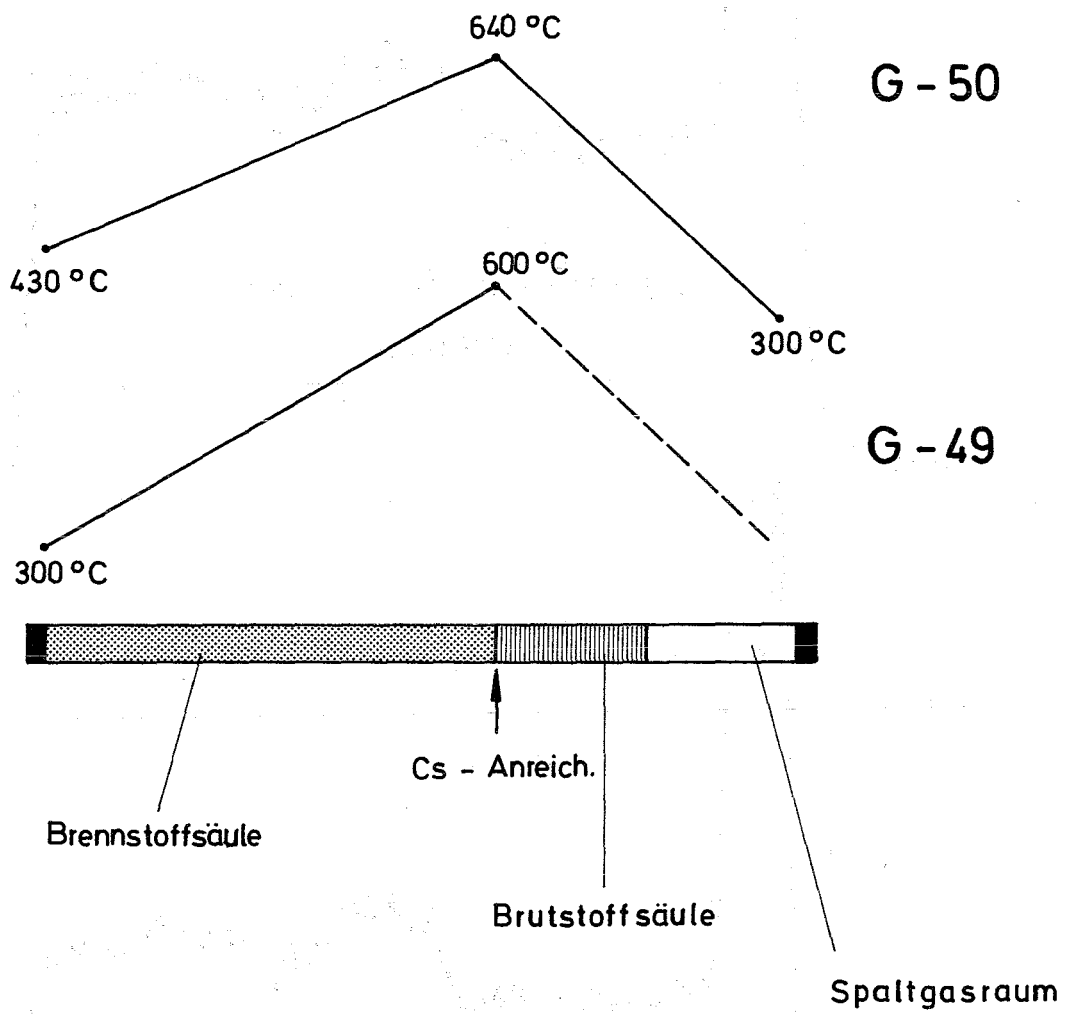
Temperaturmeßstellen

GfK Karlsruhe

IMF

Glühversuch zur Cs-Wanderung im Temperaturgradienten

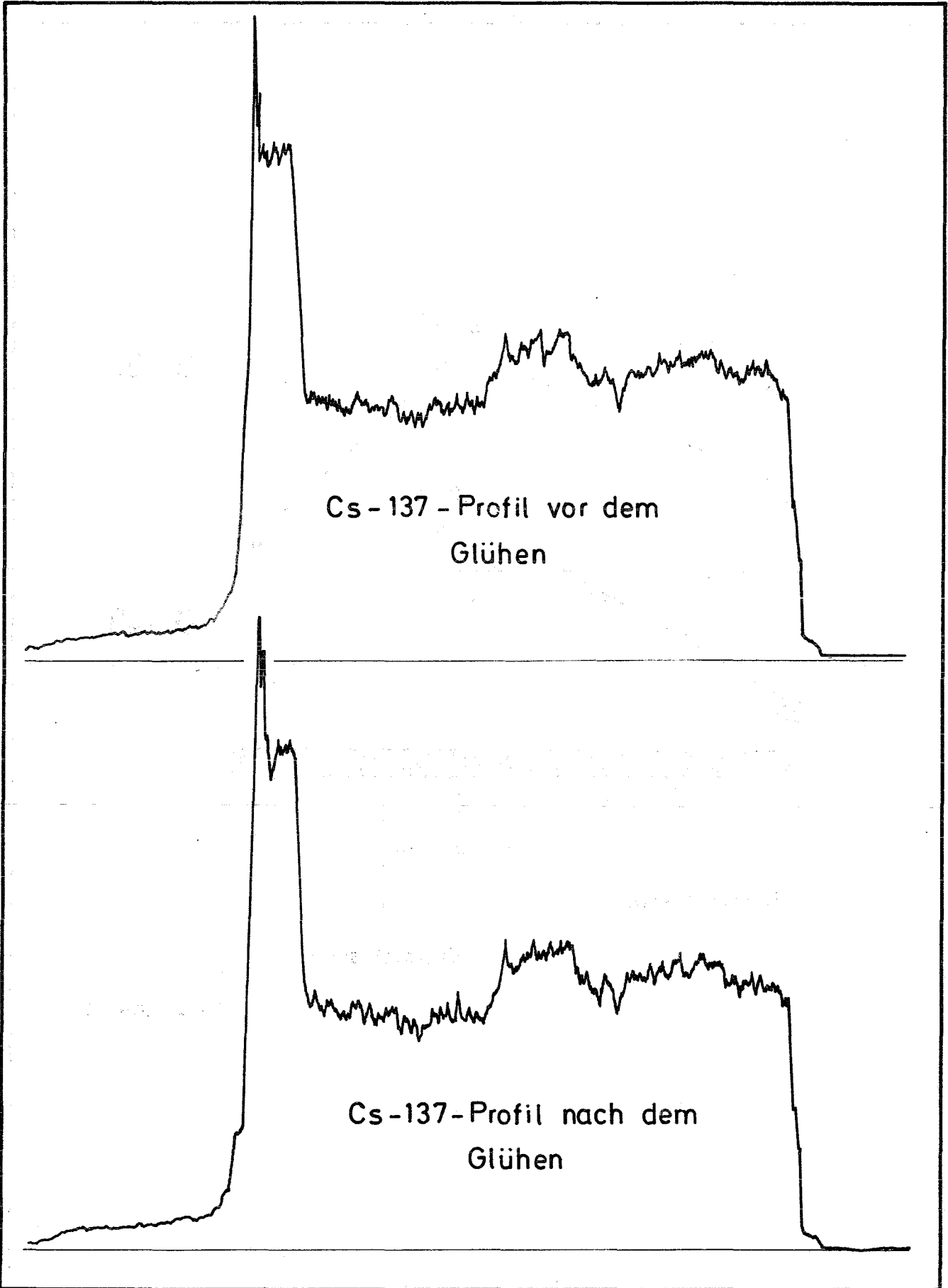
Abb. 18



GfK Karlsruhe
IMF

Schema für die Temperatur-
verteilung bei den Glühversuchen

Abb. 19



GfK Karlsruhe

IMF

DFR-350 Stab G-49

Versuch zur Cs - Wanderung

Abb. 20

- Aufheizspannen von mehr als 270°C im Kühlmittel veranlassen das Spaltcäsium, sich bevorzugt am kalten Ende anzusammeln. Vermutlich ist eine Destillation hier der Wanderungsmechanismus.

Sind die Aufheizspannen kleiner als 270°C , so sammelt sich das Spaltcäsium bevorzugt am heißen Stabende an. Es wird offenbar nicht schnell genug wegtransportiert und reagiert dann mit dem Hüllrohr, wodurch es zu der Ansammlung am heißen Ende kommt.

- Bei den Spaltnukliden Ce/Pr-144 und Zr/Nb-95 ist eine Wanderung nicht zu beobachten. Beim Ru/Rh-106 ergeben sich nur selten und dann auch nur geringfügige Anreicherungen.

Die experimentellen Arbeiten zur γ -Spektrometrie und der Glühversuch wurden von der Abteilung Reaktorbetrieb/Heiße Zellen unter der Leitung von Herrn M. Scheeder und Herrn H. Enderlein durchgeführt. Ihnen sowie der Heißen-Zellen-Mannschaft, insbesondere den Herren B. Schweigel und H. Späte sei hier gedankt.

Literatur

- [1] D. Geithoff, K. Kummerer
Auslegung, Bestrahlung und zerstörungsfreie Nachuntersuchung des UO_2 - PuO_2 -Brennstab-Bündels DFR-350
KFR-Bericht Nr. 1377, Mai 1972
- [2] C.M. Lederer, J.M. Hollander, J. Perlman
Table of Isotopes (Sixth Edition)
Verlag John Wiley and Sons Inc., New York
- [3] W. Seelmann-Eggebert, G. Pfennig
Radionuklid-Tabellen
Bundesministerium für Wissenschaftliche Forschung 1964
- [4] D. Geithoff
Die Bestrahlungsnachuntersuchung von SNR-Prototyp-Brennstäben aus einem Sieben-Stab-Bündel
Vortrag gehalten auf der Reaktortagung 1971 des Deutschen Atomforums vom 30.3. - 2.4.1971 in Bonn
(Tagungsbericht)

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

- Abb. 1 DFR-350, Spezifikationen der Brennstäbe
- Abb. 2 DFR-350, 77-Stab-Bündel
- Abb. 3 DFR-350, Axiale Leistungsverteilung
- Abb. 4 DFR-350, Kühlmittel-Austrittstemperaturen in °C
- Abb. 5 Meßanordnung für γ -Spektrometrie
- Abb. 6 DFR-350 Stab G 43 γ -Spektrum aus dem Bereich der Brennstoffsäule
- Abb. 7 DFR-350 Stab G 4 γ -Spektrum mit Cäsium-Anreicherung
- Abb. 8 DFR-350 Stab G 61 Cs/Ba-134 im Radon-Monitor
- Abb. 9 DFR-350 Stab G 6 γ -Spektrum des Endstopfens
- Abb.10 Axiale Verteilung des Nuklids Ce/Pr-144 in 15 Stäben des Bündels DFR-350
- Abb.11 DFR-350 Stab G 40 Ru-106-Profil
- Abb.12 DFR-350 Stab G 14 Ru-106-Profil
- Abb.13 Axiale Verteilung des Nuklids Ru-106 in 15 Stäben des Bündels DFR-350
- Abb.14 DFR-350 Verteilung von Spaltcäsium
- Abb.15 Cs-137-Anreicherungen an den Brennstoffsäulenenden (für maximale Kühlmittelaustrittstemperaturen)
- Abb.16 Cs-137-Anreicherungen an den Brennstoffsäulenenden (für mittlere Kühlmittelaustrittstemperaturen)
- Abb.17 Cs-137-Anreicherungen an den Brennstoffsäulenenden (für minimale Kühlmittelaustrittstemperaturen)
- Abb.18 Glühversuch zur Cs-Wanderung im Temperaturgradienten
- Abb.19 Schema für die Temperatur-Verteilung bei den Glühversuchen
- Abb.20 DFR-350 Stab G 49 Versuch zur Cs-Wanderung
- Abb.21 bis Abb.35 Verteilung von Spaltnukliden (s. Anhang II)
- Tab. 1 bis Tab.15 Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide (s. Anhang I)

A n h a n g I

| | | |
|--------------------|------------------------------|--|
| Tab. 1 | DFR 350 Stab G 2 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 2 | DFR 350 Stab G 4 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 3 | DFR 350 Stab G 6 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 4 | DFR 350 Stab G 14 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 5 | DFR 350 Stab G 21 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 6 | DFR 350 Stab G 36 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 7 | DFR 350 Stab G 39 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 8 | DFR 350 Stab G 40 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 9 | DFR 350 Stab G 41 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 10 | DFR 350 Stab G 43 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 11 | DFR 350 Stab G 49 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 12 | DFR 350 Stab G 50 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 13 | DFR 350 Stab G 56 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 14 | DFR 350 Stab G 57 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |
| Tab. 15 | DFR 350 Stab G 61 | Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide |

D F R - 350 Stab G 2

Tabelle 1

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | 13.300 | 8.500 | 9.000 | 206.000 | 140 |
| | B | 51.700 | 55.600 | 2.100 | 63.700 | 500 |
| | C | 53.000 | 33.600 | 3.100 | 59.000 | 530 |
| | D | 53.400 | 33.700 | 2.300 | 53.700 | 530 |
| | E | 51.500 | 34.500 | 5.400 | 103.600 | 480 |

Bemerkungen

- Position A Brennstoffsäule, unteres Ende
 " B Brennstoffsäule, Stirnseite z. Isoliertabl.
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberes Ende

D F R - 350 Stab G 4

Tabelle 2

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | - | - | - | - | - |
| | B | 4.200 | 3.700 | 3.000 | 105.000 | 80 |
| | C | 42.300 | 33.000 | 1.400 | 43.700 | 400 |
| | D | 56.400 | 34.800 | 2.000 | 36.600 | 640 |
| | E | 56.500 | 36.300 | 5.400 | 107.000 | 500 |
| | F | 48.000 | 29.000 | 9.600 | 127.000 | 450 |
| | G | 3.800 | 4.500 | 900 | 9.200 | 45 |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Endstopfen unten
 " B Isol. Tab. Stirnseite z. unt. Endstopfen
 " C Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Brennstoffsäule, oberes Ende
 " G Brutstoffsäule

D F R - 350 Stab. G 6

Tabelle 3

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | - | - | - | - | - |
| | B | 58.000 | 29.200 | 1.400 | 40.000 | 450 |
| | C | 82.200 | 37.900 | 2.400 | 33.200 | 570 |
| | D | 71.800 | 37.000 | 5.700 | 124.000 | 630 |
| | E | - | 13.400 | 15.200 | 388.000 | - |
| | F | 4.300 | 4.700 | 250 | 3.400 | 50 |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Endstopfen unten

" B Brennstoffsäule, unteres Ende

" C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich

" D Brennstoffsäule, oberer Bereich

" E Brennstoffsäule, Stirnseite zur Brutstoffsäule

" F Brutstoffsäule

Tabelle 4

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 5.500 | 4.000 | 6.500 | 182.300 | - |
| | B | 29.100 | 13.400 | 7.500 | 211.000 | 235 |
| | C | 80.300 | 36.300 | 2.800 | 43.100 | 680 |
| | D | 83.000 | 69.000 | 2.700 | 45.200 | 640 |
| | E | 82.800 | 39.600 | 4.000 | 76.200 | 665 |
| | F | - | - | 26.200 | 330 | - |
| | G | - | - | 2.600 | - | - |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Isol. Tabl. Stirnseite zum unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, Stirnseite z. Isoliertablette
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Radon-Monitor
 " G oberer Endstopfen

D F R - 350 Stab G 21

Tabelle 5

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./_{20 min.}]

| | Nuklid | Zr/Mb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 2.300 | 2.900 | 1.500 | 30.000 | 30 |
| | B | 42.000 | 32.000 | 3.900 | 78.000 | 460 |
| | C | 46.000 | 34.800 | 2.400 | 42.500 | 550 |
| | D | 49.300 | 40.400 | 4.500 | 88.600 | 570 |
| | E | 48.300 | 35.500 | 5.200 | 98.000 | 530 |
| | F | 20.300 | 15.000 | 17.000 | 227.300 | 265 |

Bemerkungen

- Position A Isol. Tabl. Stirnseite z. unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Brennstoffsäule, Stirnseite zur Brutstoffsäule

D F R - 350 Stab G 36

Tabelle 6

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P O S I T I O N | A | 3.100 | 3.800 | 5.450 | 111.700 | 85 |
| | B | 46.100 | 29.200 | 3.000 | 65.800 | 470 |
| | C | 57.500 | 35.100 | 2.100 | 40.500 | 495 |
| | D | 57.500 | 34.800 | 5.100 | 109.000 | 570 |
| | E | - | 9.000 | 13.300 | 281.000 | 150 |
| | F | - | - | - | - | - |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Isol. Tabl. Stirnseite zum unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " E Brennstoffsäule, Stirnseite zur Brutstoffsäule
 " F Zwischenstopfen

D F R - 350 Stab G 39

Tabelle 7

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 6.300 | 4.400 | 6.400 | 154.500 | - |
| | B | 43.600 | 26.000 | 1.800 | 43.000 | 400 |
| | C | 56.100 | 33.200 | 2.500 | 45.100 | 550 |
| | D | 50.400 | 30.000 | 4.350 | 123.900 | 610 |
| | E | - | - | 24.600 | - | - |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Isol. Tabl. Stirnseite zum unt. Endstopfen

" B Brennstoffsäule, unterer Bereich

" C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich

" D Brennstoffsäule, oberes Ende

" E Radon-Monitor

D F R - 350 Stab G 40

Tabelle 8

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| Nuklid | | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|-----------|---|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| γ-Energie | | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | 59.100 | 55.700 | 3.100 | 78.100 | 620 |
| | B | 67.400 | 41.200 | 3.400 | 61.700 | 430 |
| | C | 73.400 | 35.400 | 3.400 | 59.900 | 540 |
| | D | 80.600 | 38.900 | 6.200 | 122.500 | 620 |
| | E | 73.500 | 41.900 | 4.000 | 74.700 | 510 |
| | F | 46.200 | 19.700 | 17.600 | 236.000 | 340 |
| | G | - | - | 250 | - | - |
| | H | - | - | 21.000 | - | - |

Bemerkungen: - Nicht bestimmbar

Position A Brennstoffsäule, unteres Ende
 " B Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " C Brennstoffsäule, mittl. Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberer Bereich

Position E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Brennstoffsäule, Stirnseite zur
 Brutstoffsäule
 " G Spaltgasraum
 " H Radon-Monitor

D F R - 350 Stab G 41

Tabelle 9

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | - | 3.300 | 11.200 | 302.000 | 50 |
| | B | 4.700 | 32.400 | 2.650 | 47.700 | 430 |
| | C | 58.700 | 34.200 | 4.100 | 92.500 | 560 |
| | D | 64.600 | 37.900 | 2.000 | 40.800 | 650 |
| | E | 63.700 | 36.300 | 4.300 | 104.800 | 490 |
| | F | 50.600 | 30.400 | 5.500 | 169.600 | 480 |

Bemerkungen: - Nicht bestimmbar

Position A Isoliertabl., Stirnseite z. unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " C Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Brennstoffsäule, oberes Ende

D F R - 350 Stab. G 43

Tabelle 10

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp/20 min]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 54.100 | 30.300 | 1.900 | 40.100 | 420 |
| | B | 55.800 | 27.300 | 2.200 | 39.800 | 460 |
| | C | 72.800 | 38.800 | 2.500 | 42.000 | 600 |
| | D | 65.700 | 35.700 | 4.500 | 85.000 | 510 |
| | 2A | - | - | 26.700 | 660 | - |
| | 2B | - | - | 8.400 | 330 | - |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Brennstoffsäule, unteres Ende
 " B Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " 2A Radon-Monitor
 " 2B Radon-Monitor

D F R - 350 Stab G 49

Tabelle 11

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 2.950 | 3.700 | 1.700 | 33.400 | 60 |
| | B | 39.600 | 42.600 | 2.500 | 49.400 | 520 |
| | C | 47.550 | 33.700 | 2.800 | 51.800 | 545 |
| | D | 49.200 | 34.600 | 5.200 | 96.000 | 450 |
| | E | 21.300 | 24.300 | 12.600 | 217.000 | 265 |

Bemerkungen

- Position A Isol. Tabl. Stirnseite u. unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, unteres Ende
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " E Brennstoffsäule, Stirnseite zur Brutstoffsäule

Tabelle 12

Relative Aktivitäten verschiedener Spalt nuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 57.600 | 28.100 | 2.750 | 55.000 | 540 |
| | B | 70.300 | 37.400 | 2.400 | 46.900 | 630 |
| | C | 65.400 | 36.600 | 6.400 | 139.000 | 555 |
| | D | 70.700 | 37.200 | 5.100 | 89.600 | 560 |
| | E | 5.200 | 5.800 | 4.300 | 98.800 | 40 |
| | 2A | - | - | 22.500 | 575 | - |
| | 2B | - | - | 9.500 | 495 | - |

Bemerkungen: - Nicht bestimmbar

Position A Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " B Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " C Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberes Ende
 " E Brutstoffsäule
 " 2A Radon-Monitor
 " 2B Radon-Monitor

D I F R - 350 Stab G 56

Tabelle 13

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-----|
| γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV | |
| P o s i t i o n | A | - | 4.000 | 7.900 | 279.000 | 40 |
| | B | 4.400 | 4.300 | 2.100 | 65.900 | 75 |
| | C | 49.300 | 31.400 | 2.400 | 47.000 | 545 |
| | D | 63.700 | 35.100 | 1.600 | 41.300 | 560 |
| | E | 58.600 | 32.000 | 6.800 | 133.000 | 580 |
| | F | 57.750 | 33.300 | 6.900 | 137.800 | 510 |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Isol. Tabl. Stirnseite z. Endstopfen
 " B Isol. Tabl.
 " C Brennstoffsäule, unterer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " F Brennstoffsäule, oberes Ende

D F R - 350 Stab G 57

Tabelle 14

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp./20 min.]

| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|--------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| P o s i t i o n | A | 36.100 | 33.800 | 4.500 | 61.700 | 430 |
| | B | 47.800 | 34.800 | 2.400 | 49.600 | 470 |
| | C | 47.200 | 36.100 | 1.900 | 31.600 | 550 |
| | D | 51.000 | 33.900 | 7.950 | 171.300 | 540 |
| | E | 19.100 | 14.000 | 13.800 | 185.500 | 190 |

Bemerkungen

- Position A Brennstoffsäule, unteres Ende
 " B Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " C Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " D Brennstoffsäule, oberer Bereich
 " E Brennstoffsäule, Stirnseite zur Brutstoffsäule

D F R - 350 Stab G 61

Tabelle 15

Relative Aktivitäten verschiedener Spaltnuklide

[Imp/20 min.]

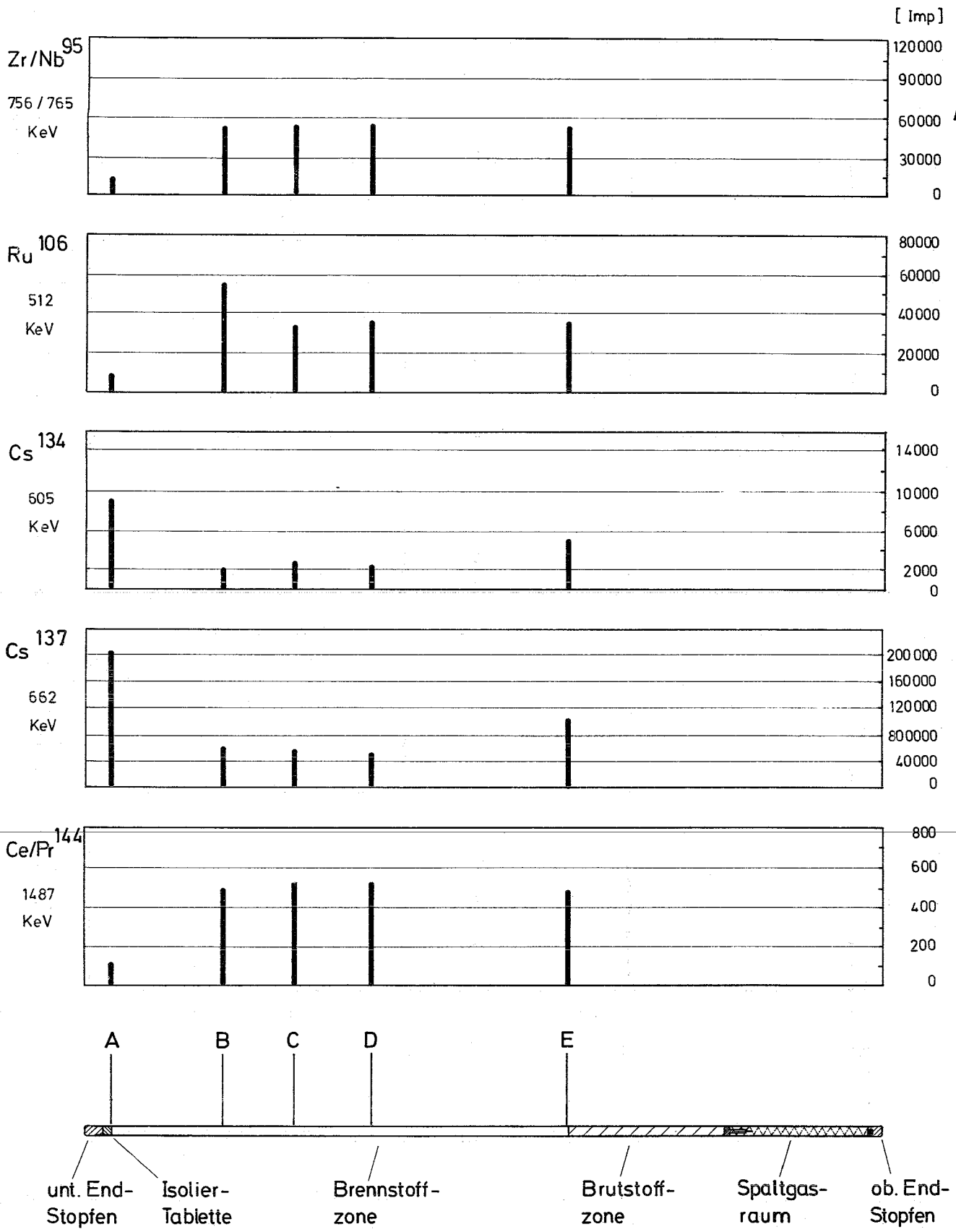
| | Nuklid | Zr/Nb ⁹⁵ | Ru ¹⁰⁶ | Cs ¹³⁴ | Cs ¹³⁷ | Ce/Pr ¹⁴⁴ |
|----------|-----------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| | γ-Energie | 756/765 KeV | 512 KeV | 605 KeV | 662 KeV | 1487 KeV |
| Position | A | 2.650 | 3.200 | 2.700 | 71.000 | 30 |
| | B | 40.400 | 25.700 | 2.900 | 78.400 | 400 |
| | C | 47.200 | 38.000 | 2.000 | 34.100 | 535 |
| | D | 52.600 | 34.700 | 2.300 | 41.500 | 525 |
| | E | 51.400 | 34.300 | 5.500 | 110.000 | 610 |
| | F | - | - | 29.100 | - | - |

Bemerkungen - Nicht bestimmbar

Position A Isol. Tabl., Stirnseite zum unt. Endstopfen
 " B Brennstoffsäule, unteres Ende
 " C Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " D Brennstoffsäule, mittlerer Bereich
 " E Brennstoffsäule, oberes Ende
 " F Radon-Monitor

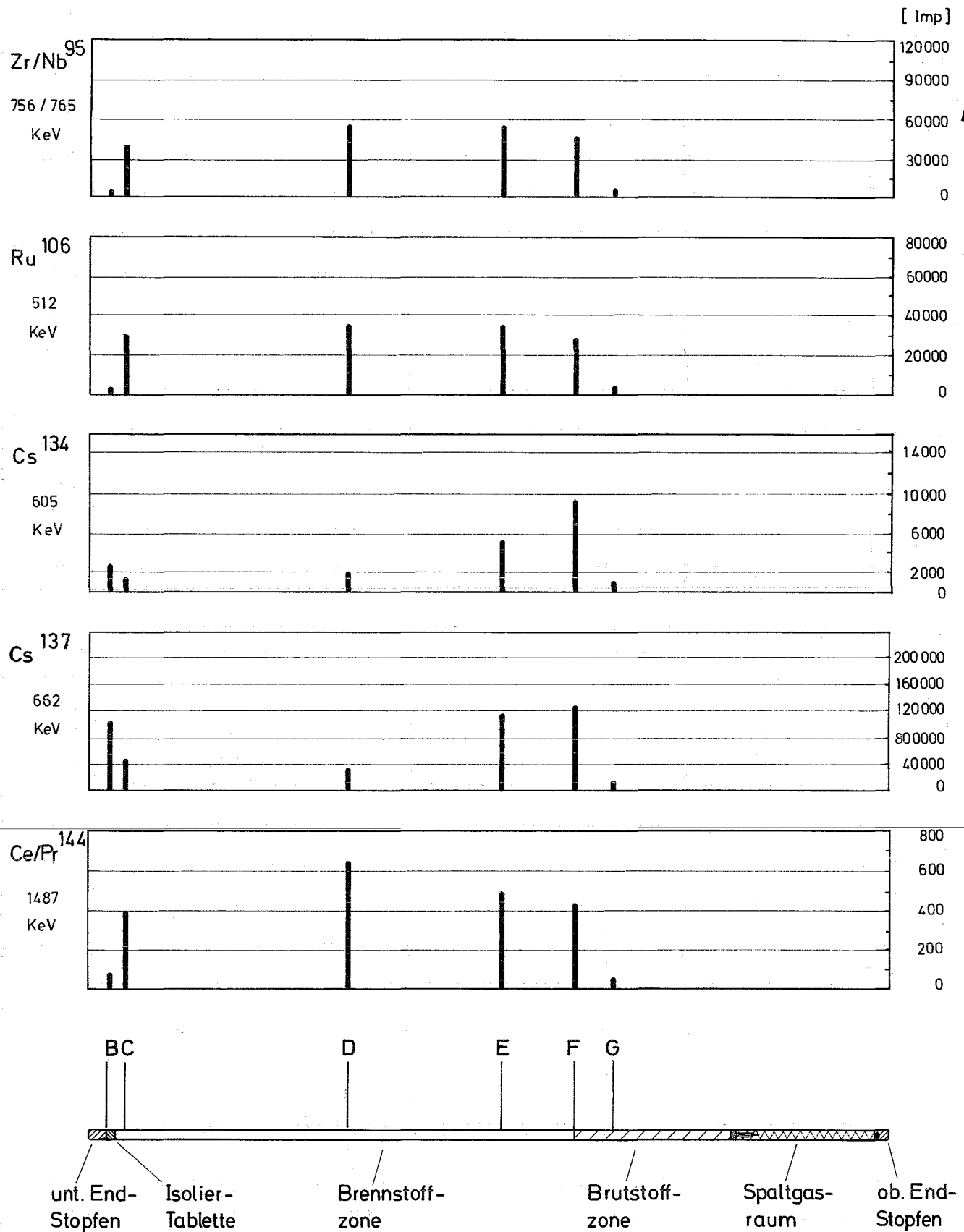
A n h a n g II

- Abb. 21 DFR 350 Stab G 2 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 22 DFR 350 Stab G 4 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 23 DFR 350 Stab G 6 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 24 DFR 350 Stab G 14 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 25 DFR 350 Stab G 21 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 26 DFR 350 Stab G 36 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 27 DFR 350 Stab G 39 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 28 DFR 350 Stab G 40 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 29 DFR 350 Stab G 41 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 30 DFR 350 Stab G 43 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 31 DFR 350 Stab G 49 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 32 DFR 350 Stab G 50 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 33 DFR 350 Stab G 56 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 34 DFR 350 Stab G 57 Verteilung von Spaltnukliden
Abb. 35 DFR 350 Stab G 61 Verteilung von Spaltnukliden



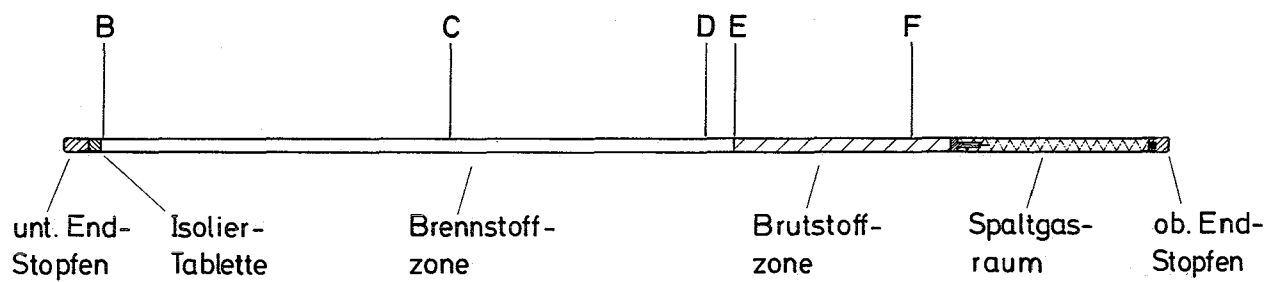
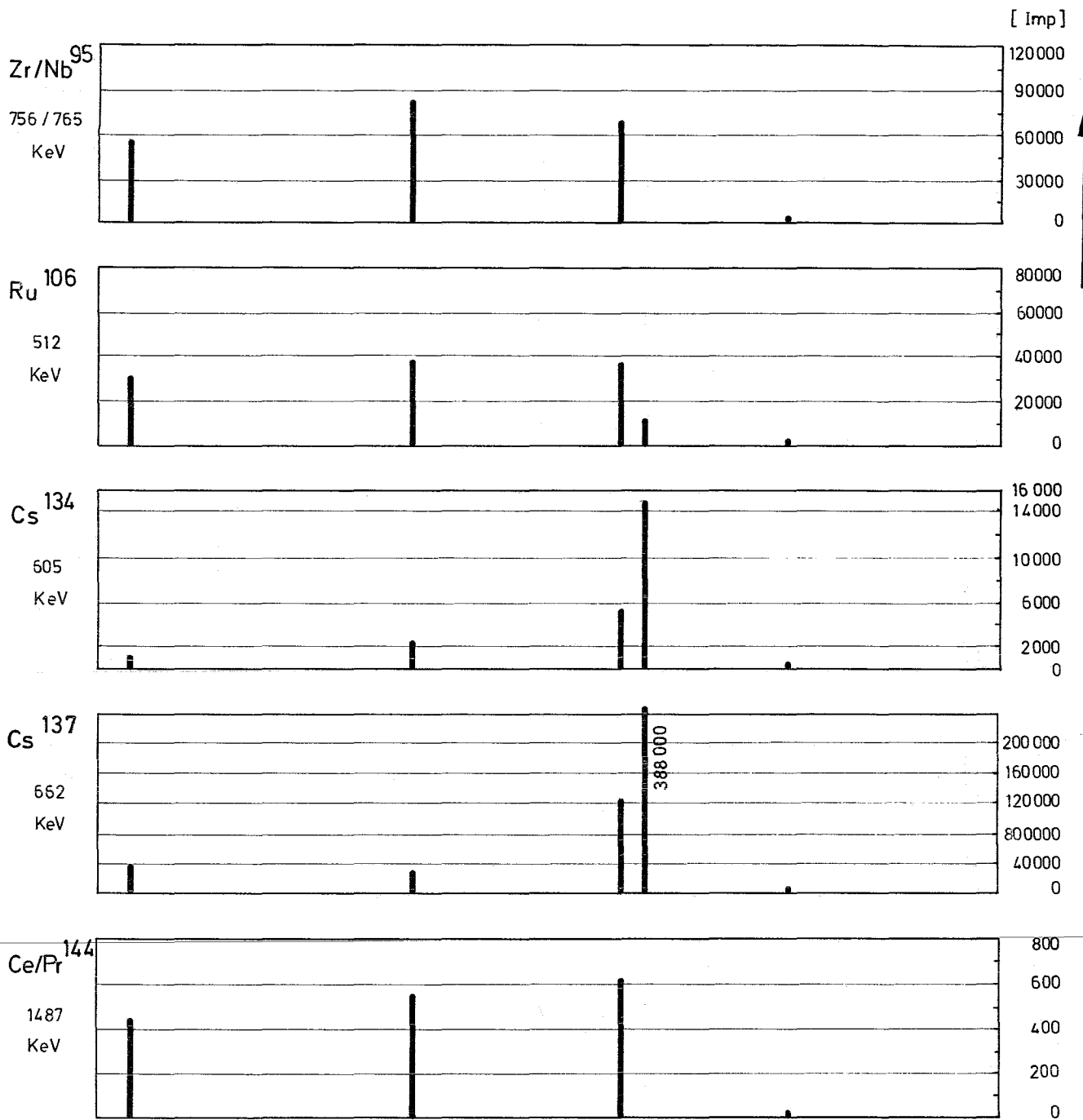
DFR-350 Stab G 2
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 21



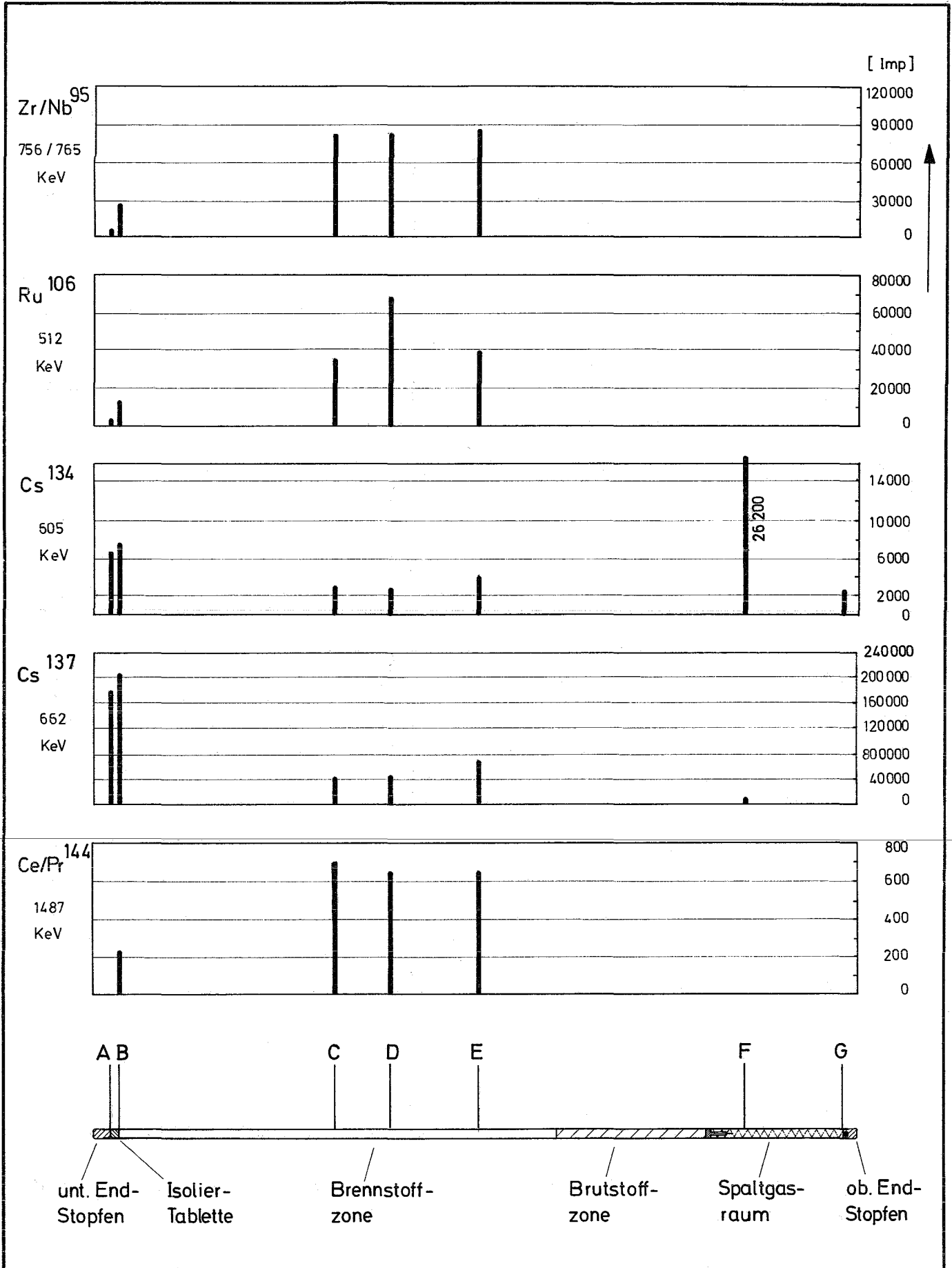
DFR-350 Stab G 4
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 22



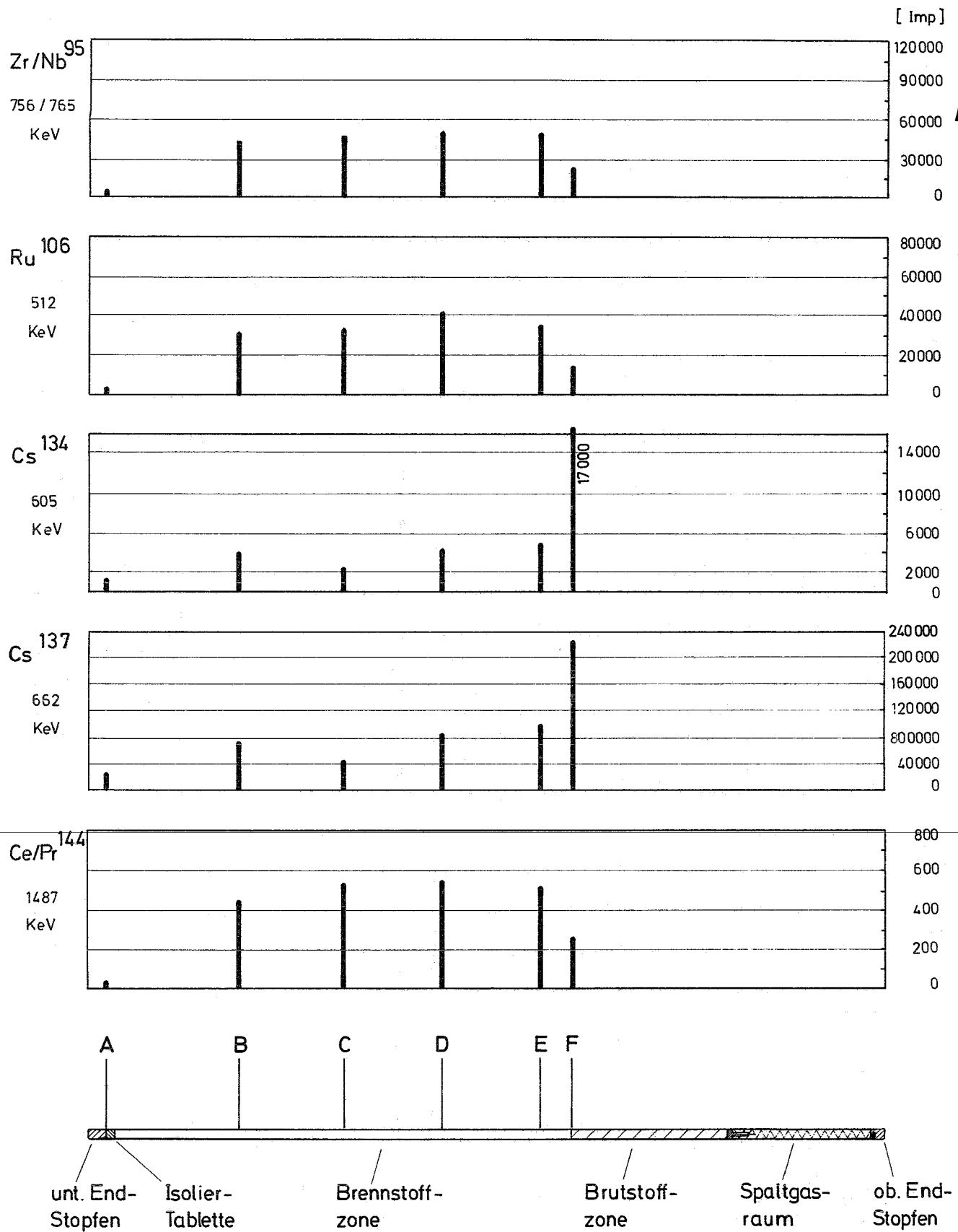
DFR-350 Stab G 6
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 23



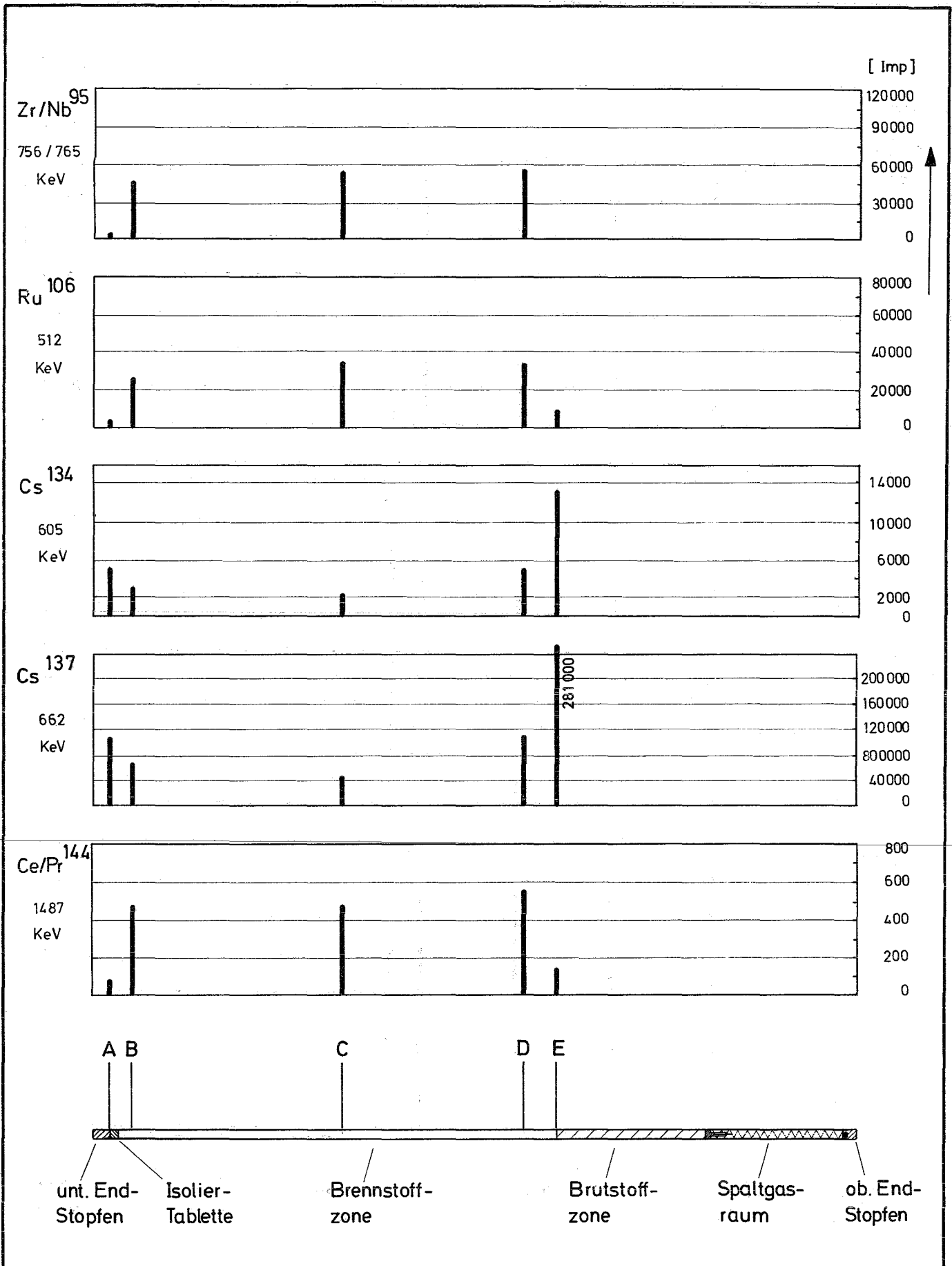
DFR-350 Stab G 14
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 24



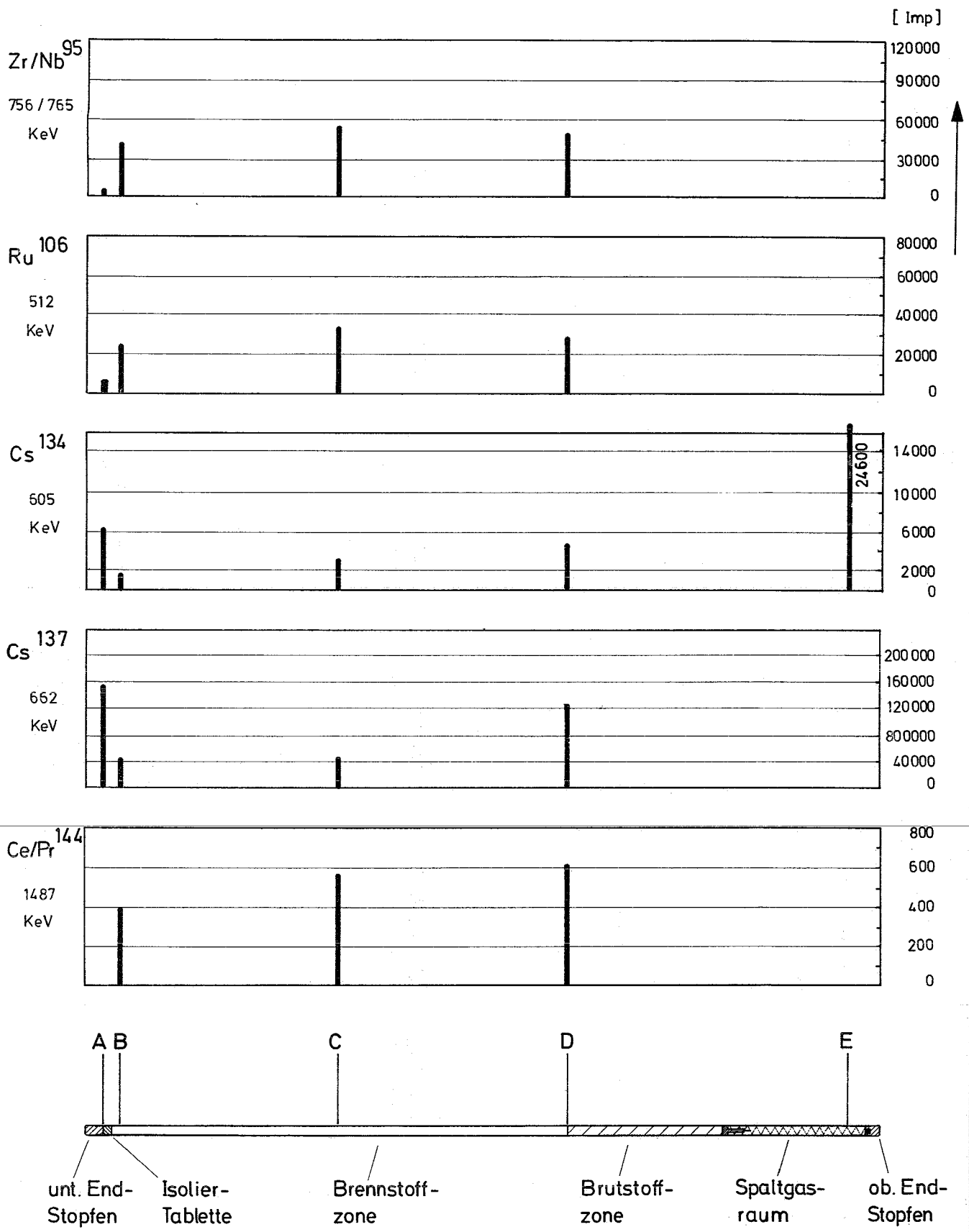
DFR-350 Stab G 21
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 25



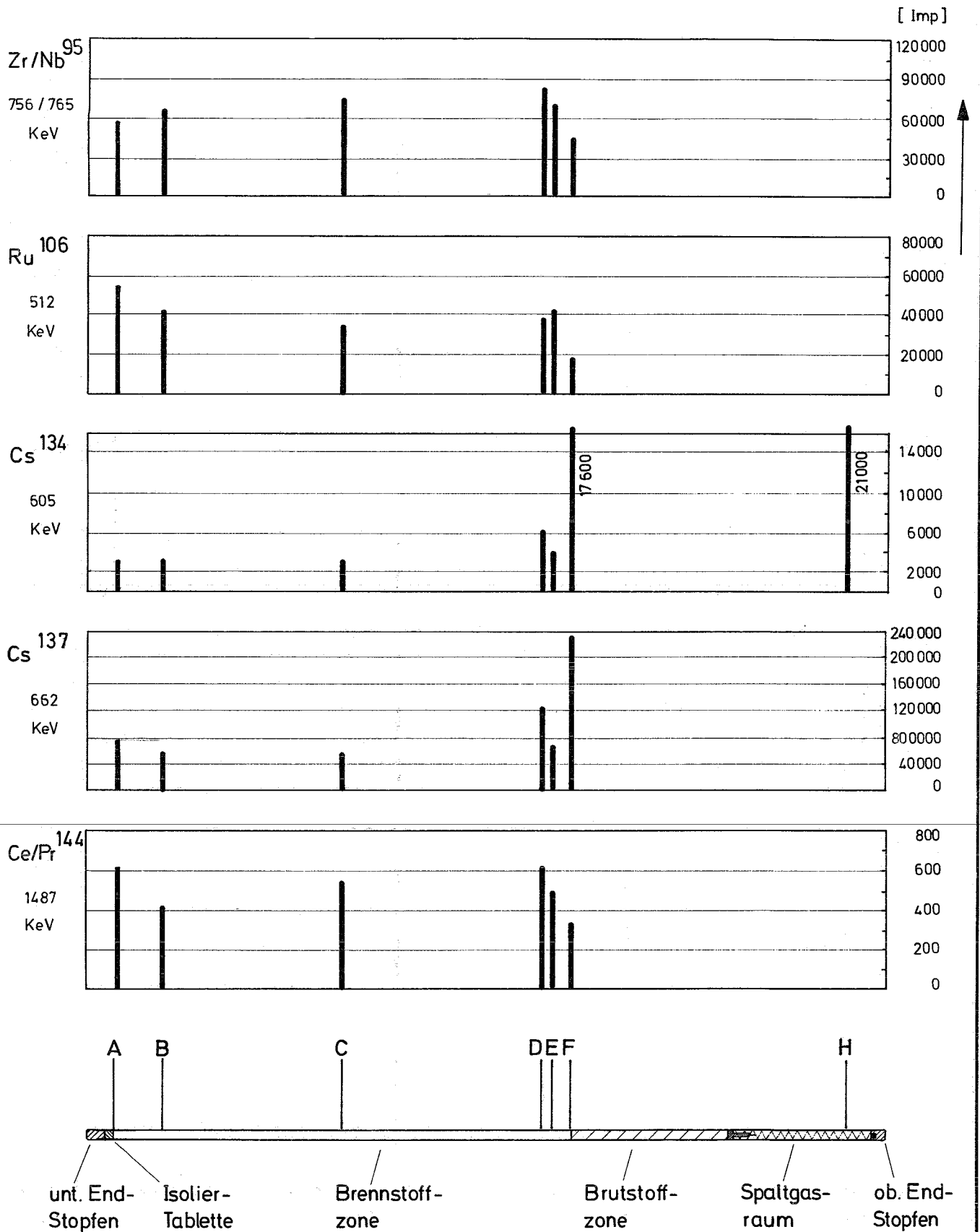
DFR-350 Stab G 36
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 26



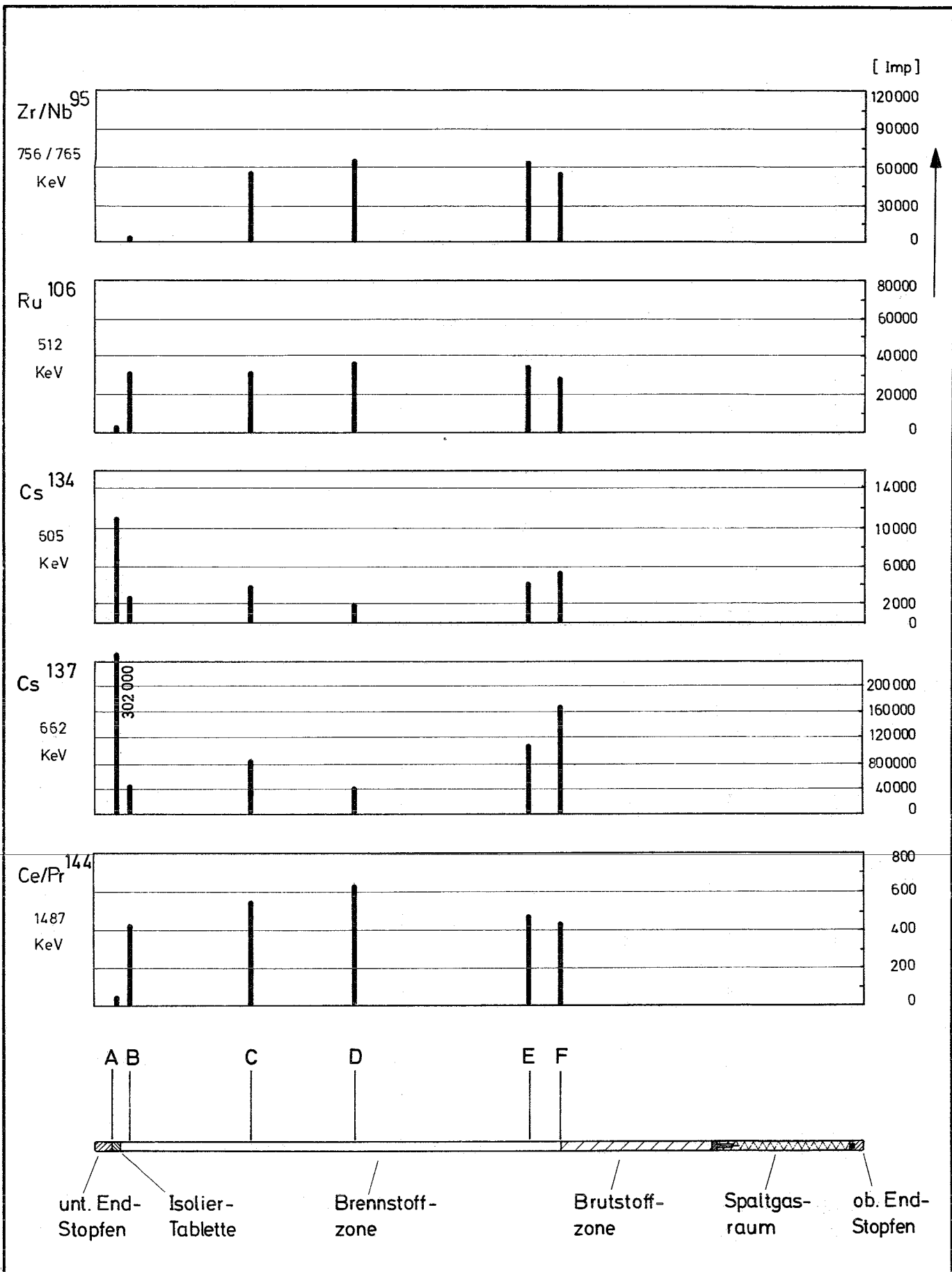
DFR-350 Stab G 39
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 27



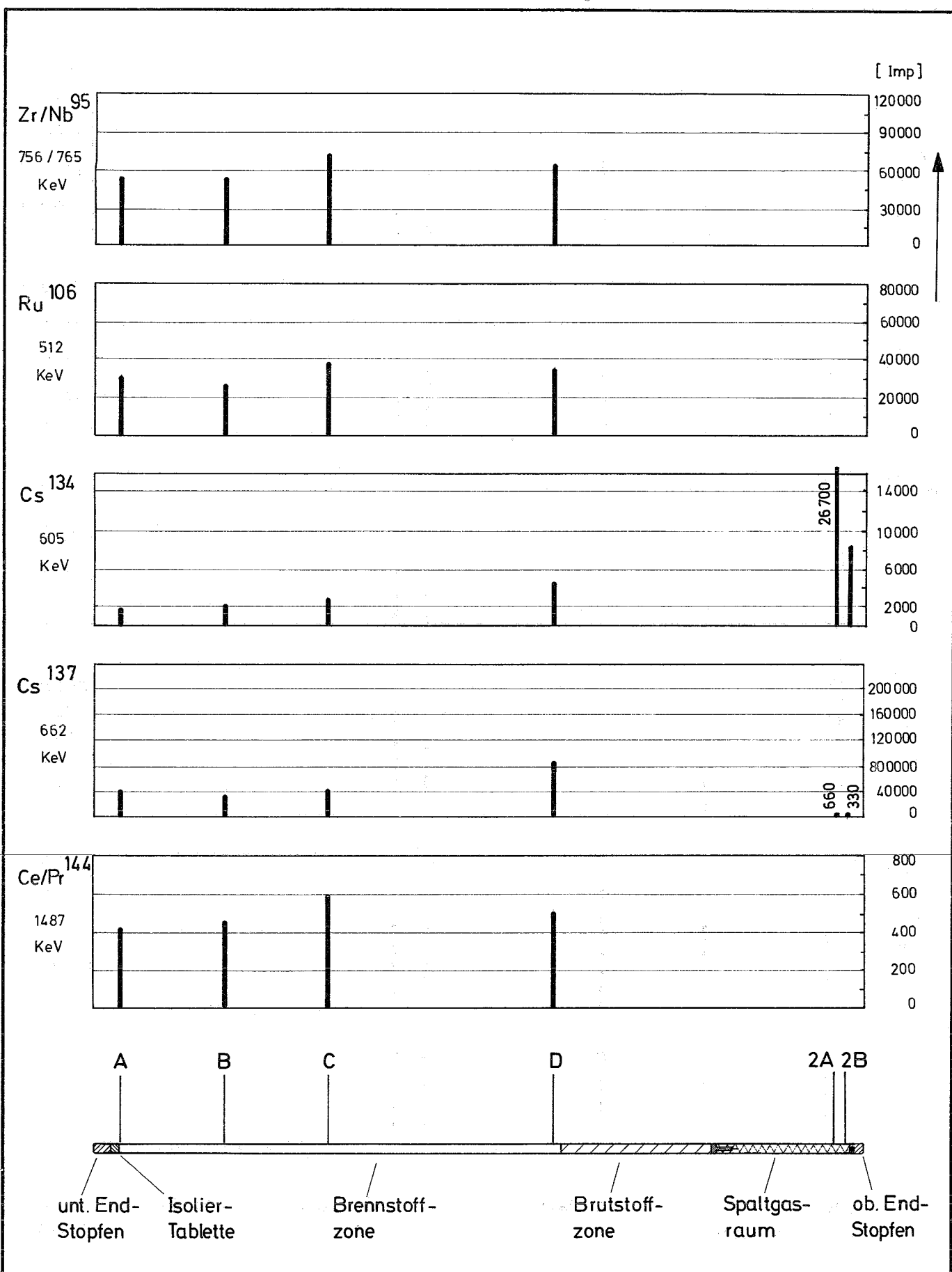
DFR-350 Stab G 40
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 28



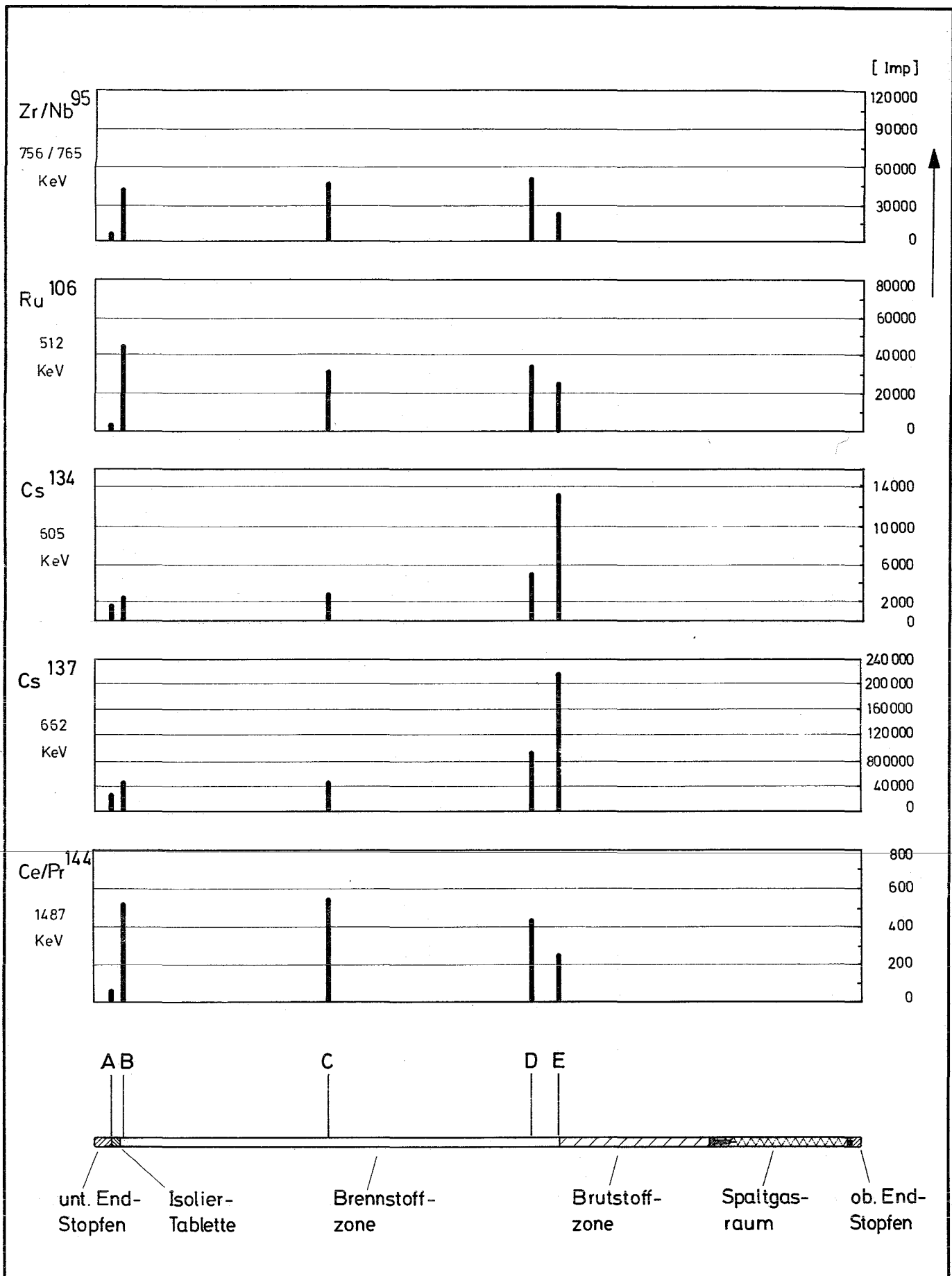
DFR-350 Stab G 41
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 29



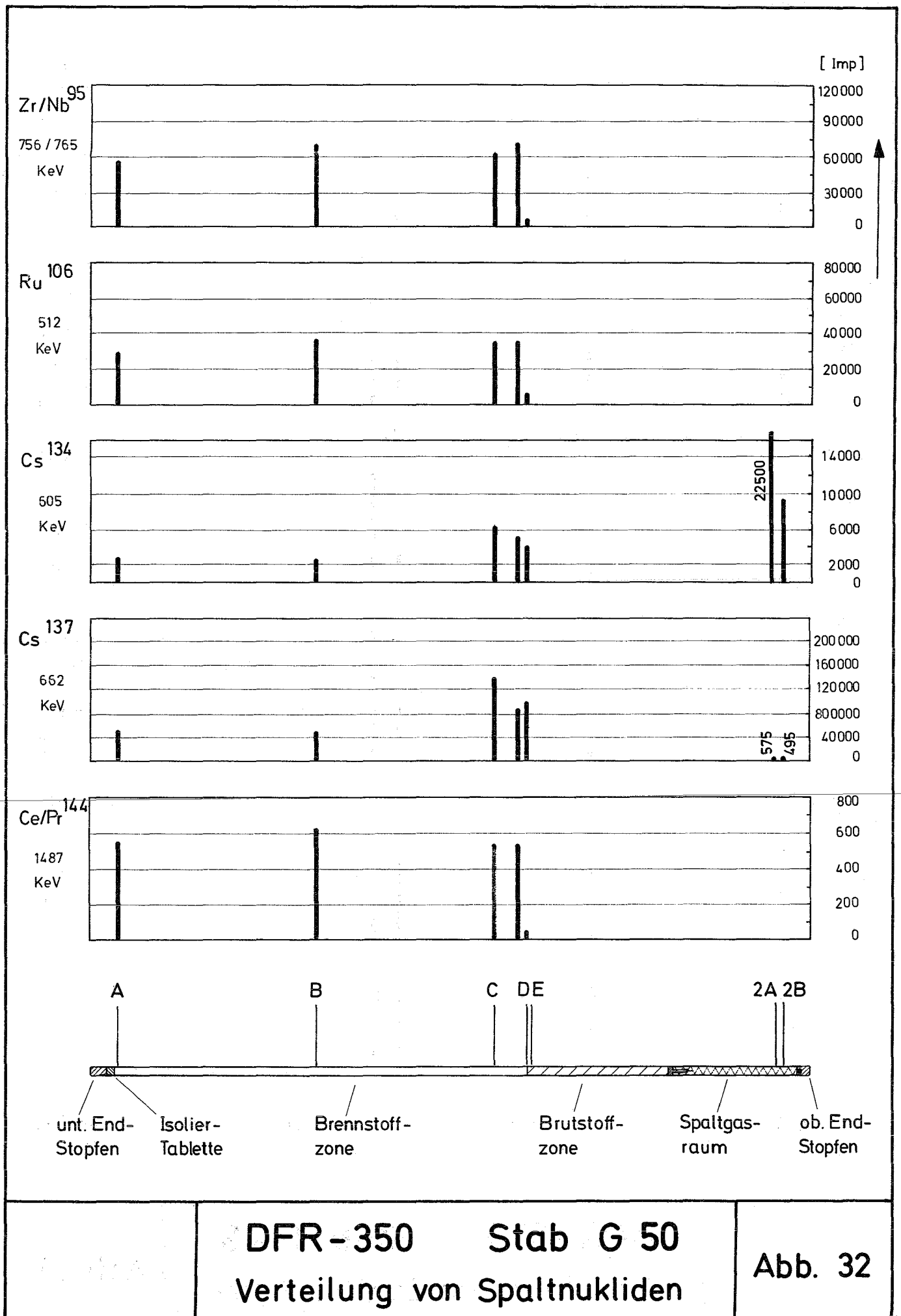
DFR-350 Stab G 43
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 30



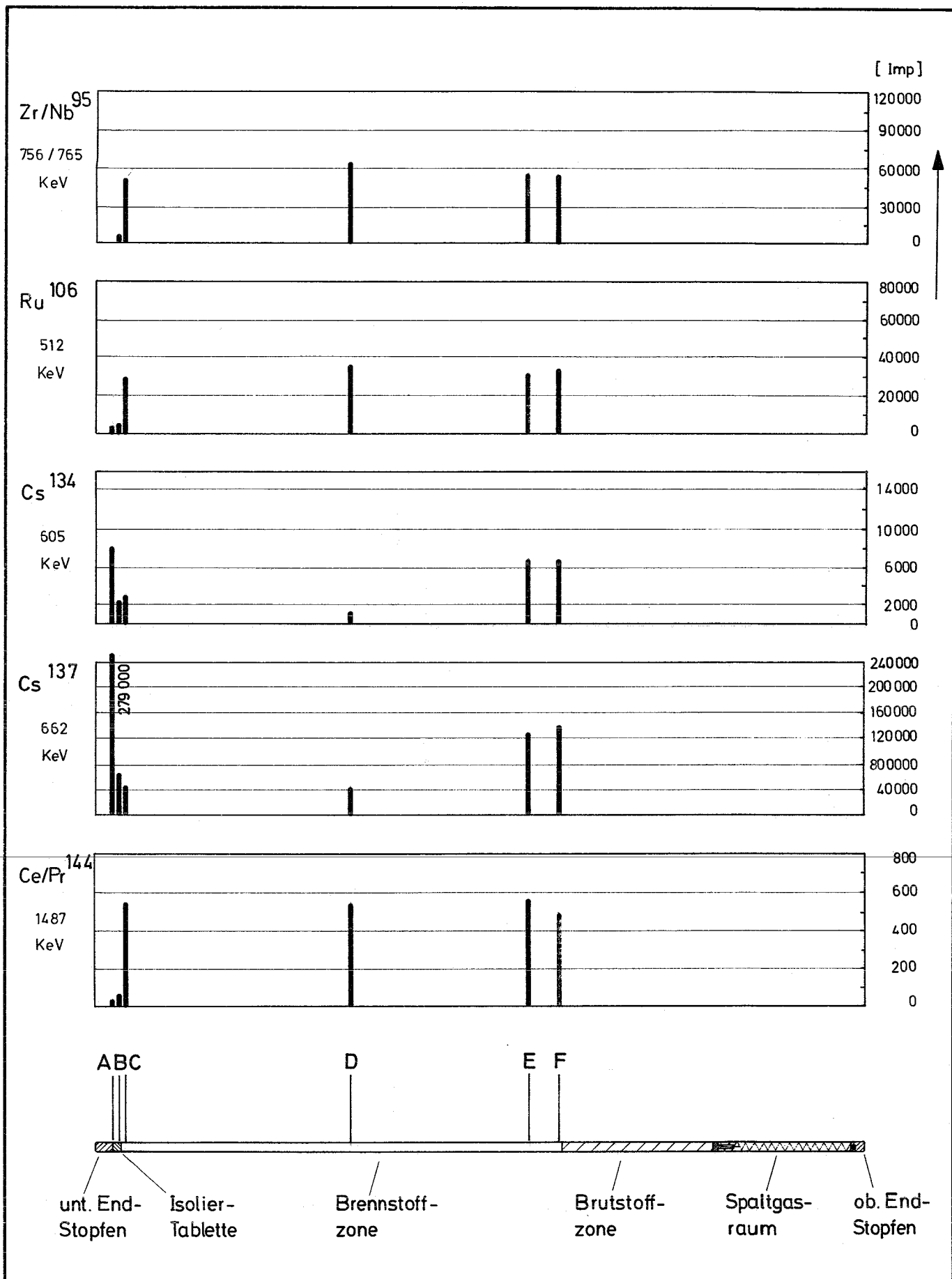
DFR-350 Stab G 49
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 31



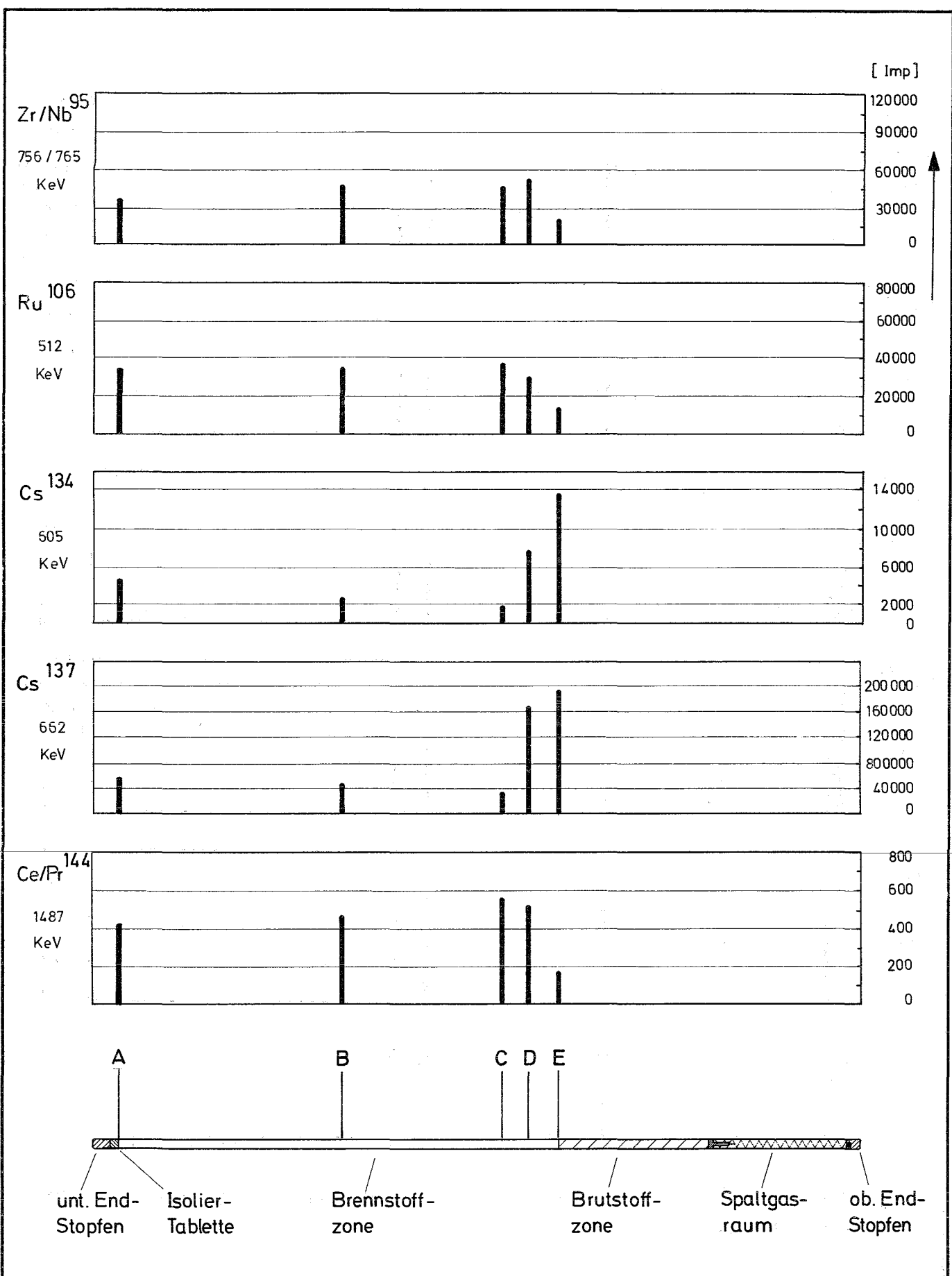
DFR-350 Stab G 50
 Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 32



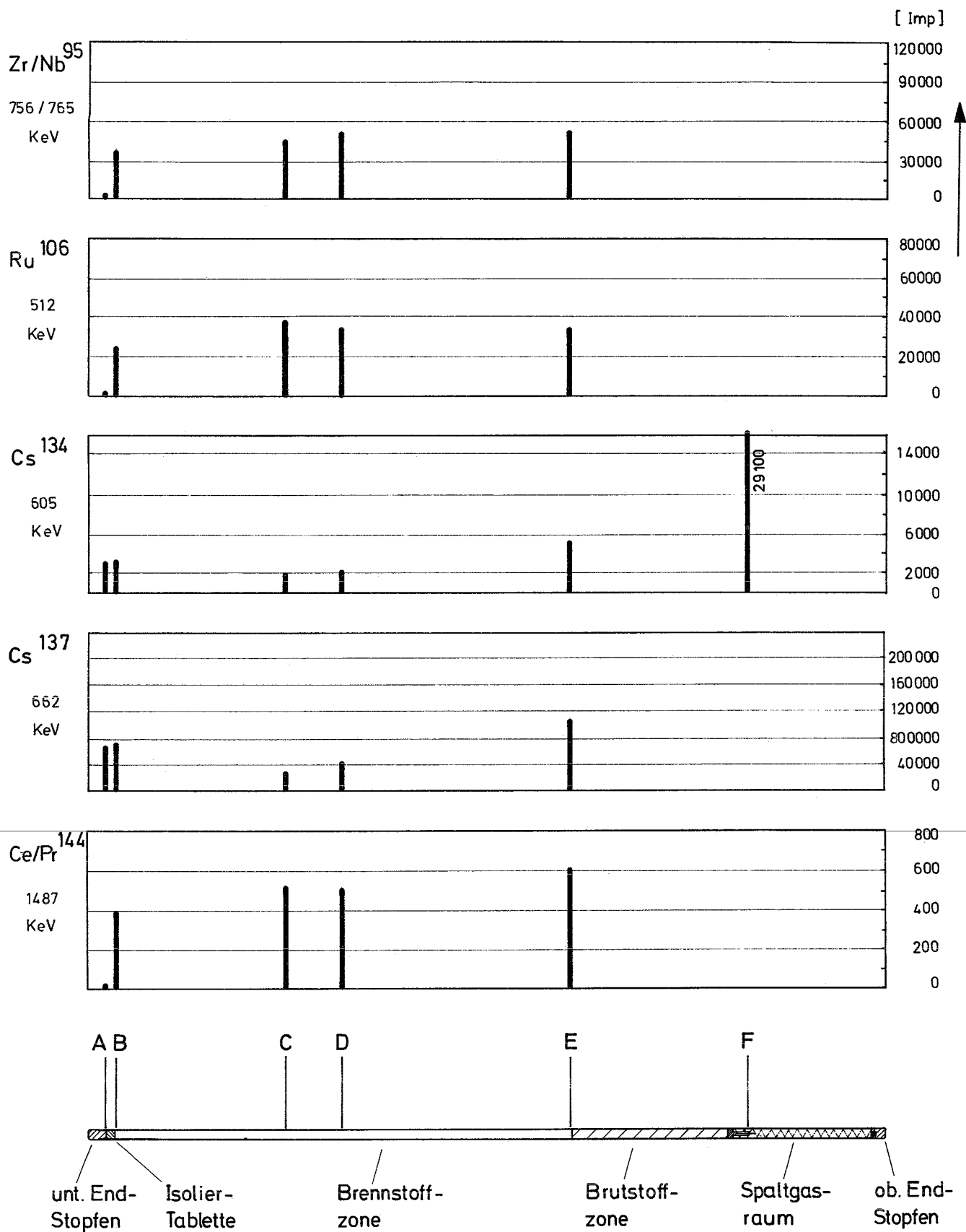
DFR-350 Stab G 56
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 33



DFR-350 Stab G 57
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 34



DFR-350 Stab G 61
Verteilung von Spaltnukliden

Abb. 35

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that proper record-keeping is essential for the integrity of the financial system and for the ability to detect and prevent fraud. The text notes that without reliable records, it would be difficult to track the flow of funds and identify any irregularities.

2. The second part of the document outlines the various methods used to collect and analyze data. It describes how different types of information are gathered from various sources and how this data is then processed to identify trends and patterns. The text highlights the need for a systematic approach to data collection and analysis to ensure that the information is both accurate and relevant.

3. The third part of the document focuses on the role of technology in modern data analysis. It discusses how advanced software tools and algorithms have revolutionized the way data is processed and analyzed. The text notes that these technologies allow for much faster and more accurate analysis of large volumes of data, which is particularly important in today's data-driven environment.

4. The fourth part of the document addresses the challenges of data security and privacy. It discusses the various risks associated with storing and processing sensitive information and the measures that can be taken to protect this data. The text emphasizes that organizations must implement robust security protocols and regularly update their systems to stay ahead of potential threats.

5. The fifth part of the document concludes by discussing the future of data analysis. It notes that as technology continues to advance, the possibilities for what can be learned from data will expand. The text suggests that organizations should continue to invest in research and development to explore new ways of using data to gain insights and improve their operations.

6. The sixth part of the document provides a detailed overview of the data analysis process. It starts with the identification of the problem or question that needs to be answered. This is followed by the collection of data from various sources, which is then cleaned and prepared for analysis. The text describes how different statistical methods and machine learning algorithms are applied to the data to extract meaningful information.

7. The seventh part of the document discusses the importance of interpreting the results of the analysis. It notes that simply having data is not enough; the results must be carefully examined and interpreted in the context of the original question. The text emphasizes that clear communication of the findings is essential for the information to be useful to decision-makers.

8. The eighth part of the document provides a summary of the key points discussed throughout the document. It reiterates the importance of accurate record-keeping, the role of technology, and the challenges of data security and privacy. The text concludes by encouraging organizations to embrace data analysis as a key tool for improving their performance and staying competitive in the market.

9. The ninth part of the document includes a list of references to the various sources of information used in the document. It provides a comprehensive list of books, articles, and other resources that readers can consult for more information on the topics discussed.

10. The tenth part of the document is a concluding statement that summarizes the overall message of the document. It emphasizes that data analysis is a powerful tool that, when used correctly, can provide valuable insights and help organizations make better decisions. The text ends with a call to action, encouraging readers to explore the world of data analysis for themselves.