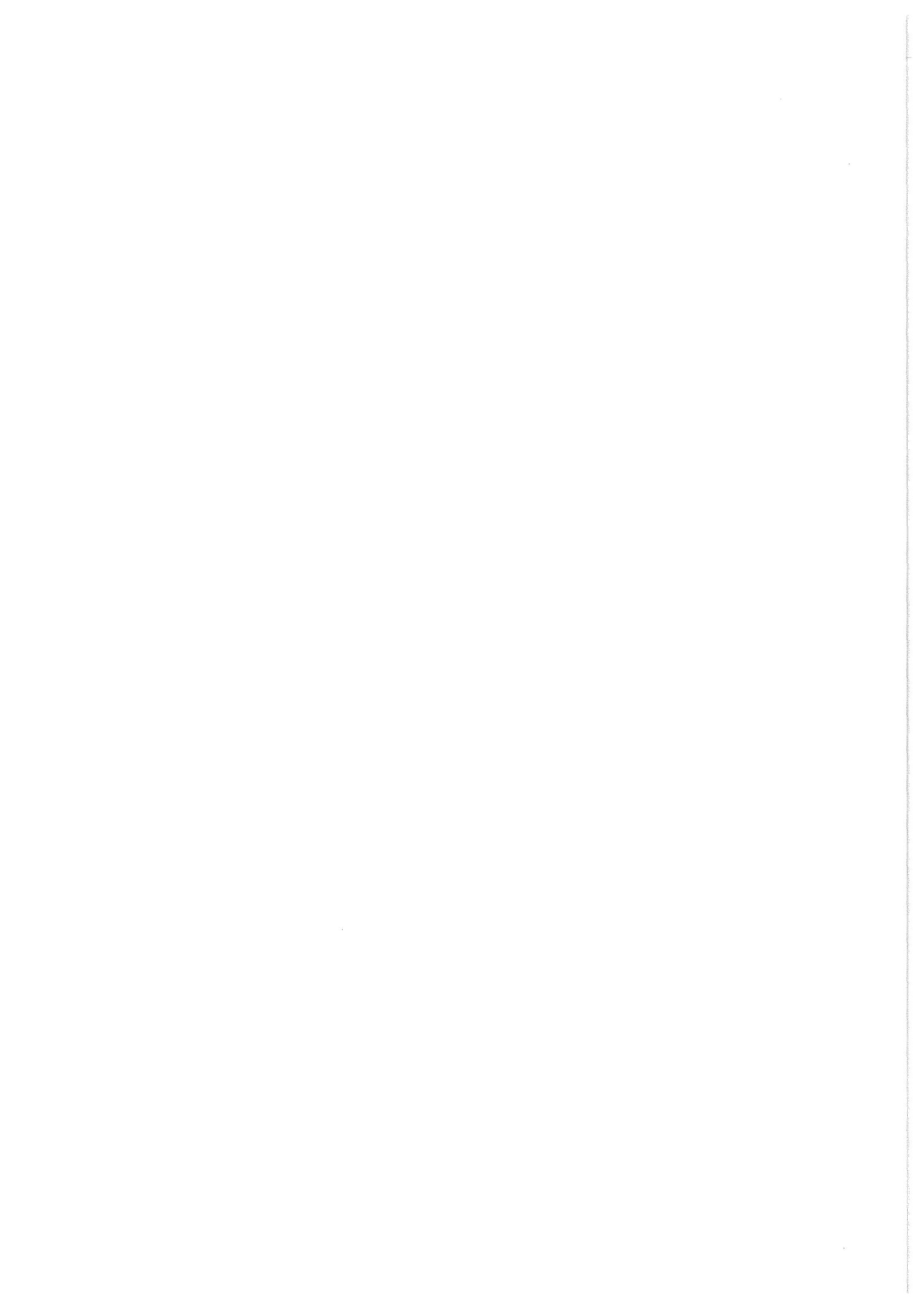


KfK 3256  
September 1982

# Das Bestrahlungsexperiment Mol-7B

K. Kummerer, P. Weimar  
Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung  
Projekt Schneller Brüter

KfK 3256

Das Bestrahlungsexperiment Mol-7B

K. Kummerer, P. Weimar

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

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

**Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003**

## V O R B E M E R K U N G

Der in diesem Bericht beschriebene Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe und im Centre d'Etude de l'Energie Nucleaire in Mol/Belgien. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Auch danken wir allen, die unmittelbar zur Abfassung dieser Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn F. Bauer und Herrn L. Deffaa für die Ausarbeitung der Faltblätter, Diagramme und Abbildungen sowie Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes und die redaktionelle Hilfe. Herrn Dr. Steiner danken wir schließlich für die modelltheoretische Analyse der Schadensursachen.

Mai 1982

K. Kummerer, P. Weimar

Das Bestrahlungsexperiment Mol-7B

Der im Rahmen der Brennstabentwicklung für schnelle Brutreaktoren durchgeführte Bestrahlungsversuch Mol-7B umfaßte die Bestrahlung eines Brennstab-Bündels mit 18 Stäben im epithermischen Neutronenfluß des belgischen Reaktors BR 2. Das Stabbündel war in dem Natrium-Kreislauf im Zentralkanal des BR 2, dem sogenannten IPSL-Loop, eingesetzt. Die Brennstäbe enthielten  $UO_2$ - $PuO_2$ -Brennstoff und Hüllmaterial aus Edelstahl. Die Auslegung der Brennstäbe hinsichtlich Materialzusammensetzung und Geometrie stellen eine sehr weitgehende Simulation der Verhältnisse in einem Schnellbrüter-Prototyp wie etwa dem SNR-300 dar. Bei einem  $PuO_2$ -Anteil von 30 Gew.-% betrug die Brennstoffschmierdichte 80 % der theoretischen Dichte. Für die Stabhüllen kamen zwei verschiedene hochwarmfeste Edelstähle zum Einsatz. Der Stabdurchmesser war 6,0 mm.

Die betriebliche Beanspruchung während der Bestrahlung war mit 450 W/cm maximaler Stabileistung und einer maximalen Hüllwandtemperatur von knapp 700 °C vorgesehen. Die tatsächlich im Experiment aufgetretene maximale Stabileistung lag aber deutlich höher, nämlich bei etwa 590 W/cm. Der Zielabbrand wurde beträchtlich überzogen, nämlich auf 125000 MWd/t M. Nach Erreichen von ca. 60000 MWd/t M wurde der erste Stabdefekt im Bündel durch Spaltgassignale bemerkt. Nichtsdestoweniger wurde beschlossen, das Experiment mit dem Defekt über die volle Bestrahlungszeit von 384 Tagen zu bestrahlen.

Der vorliegende Bericht stellt eine Dokumentation dieses Bestrahlungsversuches dar. In ihr sind alle Einzelheiten über die Aufgabenstellung, die Auslegung, Konstruktion und Spezifikation der Stäbe und des Bündels, über die Stabherstellung, die Prüfungen vor der Bestrahlung, die gesamte Bestrahlungsgeschichte sowie über die zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung der bestrahlten Stäbe zusammengestellt. Am Schluß wird eine Wertung des Experiments vorgenommen sowie mögliche Versagensursachen diskutiert.

## A b s t r a c t

### The Irradiation Experiment Mol-7B

Within the fuel pin development for fast breeder reactors the irradiation experiment Mol-7B comprised the irradiation of a fuel pin bundle with 18 pins in the epithermal neutron flux of the Belgian reactor BR 2. The bundle was loaded in the sodium circuit in the central channel of the BR 2, the so-called IPSL-Loop. The pins contained  $UO_2$ - $PuO_2$  fuel in a stainless steel cladding. The design of the pins with respect to material composition and geometry were representative for the conditions in a fast breeder prototype like the SNR 300. Having a  $PuO_2$ -content of about 30 w/o, the smeared density of the fuel was 80 % of theoretical density. The claddings consisted of two different types of high temperature resistant stainless steels. The pin diameter was 6.0 mm.

The operational conditions during irradiation were designed to be 450 watts/cm for the linear rod power and almost 700 °C for the maximum cladding midwall temperature. In the course of the experiment the power happened to be remarkably higher, up to about 590 watts/cm. The target burnup was overdrawn up to 125000 Mwd/t M. After reaching about the half of this burnup the first pin failure in the bundle was revealed by fission gas signals. Nevertheless it was decided to run the experiment beyond breach up to the full irradiation time of 384 days.

This report is a documentation of this irradiation experiment, where all data and facts on the experimental objectives, pin design, specifications for pin and bundle, fabrication of the pins including preirradiational tests, the irradiation history, and the destructive and nondestructive post irradiation examination are compiled. Finally an evaluation of the experiment is given and possible reasons for pin failures are discussed.

I N H A L T	Seite
1. Einführung	1
2. Auslegung und Spezifikationen	3
2.1 Allgemeine Hinweise	3
2.2 Ursprüngliche Zielsetzung	3
2.3 Aufbau des Bündels	4
2.4 Radiales Leistungsprofil im Bündel	4
2.5 Auslegung der Brennstäbe und Spezifikationen	5
2.6 Auslegung und Spezifikationen der Bündelstruktur	8
2.7 Beabsichtigte Betriebsbedingungen	10
2.8 Revidierte Zielsetzung	11
Abb. 2.1 bis 2.6	12
3. Herstellung der Brennstäbe des Bündels	18
3.1 Übersicht	18
3.2 Hüllrohre und Strukturteile der Stäbe	18
3.3 Herstellung der Stäbe mit Tablettenbrennstoff	19
3.4 Herstellung der Stäbe mit Pulverbrennstoff	19
3.5 Herstellung des Brennstabbündels	21
Abb. 3.1 bis 3.4	24
4. Bestrahlung im BR 2	27
4.1 Bestrahlungseinrichtung	27
4.2 Ablauf der Bestrahlung	27
4.3 Neutronenfluß und Fluenz	28
4.4 Stableistung und Abbrand	29
4.5 Temperaturen	30
Abb. 4.1 bis 4.10	31
5. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	42
5.1 Durchleuchtung des Bündels	42
5.2 Zerlegung des Bündels	42
5.3 Fotodokumentation der einzelnen Stäbe	43
5.4 Dimensionskontrolle	44
5.5 Gamma-Spektrometrie	44
Abb. 5.1 bis 5.11	46

	Seite
6. Zerstörende Nachuntersuchung	65
6.1 Spaltgasmessung	65
6.2 Abbrandbestimmung	66
6.3 Keramografie	67
Abb. 6.1 bis 6.3	69
7. Auswertung der Ergebnisse	70
7.1 Schadensanalyse auf modelltheoretischer Basis	70
7.2 Radiales Temperaturprofil	72
7.3 Teilblockade im Bereich der Stabdefekte	72
7.4 Schlußbetrachtung	73
Abb. 7.1 bis 7.5	75
8. Referenzen	79
Liste der Tabellen	81
Liste der Abbildungen	82
Anhang I:    Dokumentation der Stabschäden	I/1
Anhang II:   Dokumentation der zerstörenden Nachuntersuchung	II/1

## 1. Einführung

Das Bestrahlungsexperiment Mol-7B umfaßte die Bestrahlung von 18 Schnellbrüterbrennstäben in einem Hexagonalbündel, die in ihrer Auslegung typisch für den ersten Kern Mark Ia des SNR-300 sind. Beabsichtigt waren Bestrahlungsbedingungen, die deutlich oberhalb der Nominalbedingungen für SNR-300-Stäbe liegen, nämlich möglichst in der Nähe der auslegungsgemäßen Extremalbedingungen.

Erst bei der Auswertung des Experimentes stellte es sich heraus, daß die tatsächlichen Betriebsbedingungen die Auslegungswerte des Experiments ganz erheblich überschritten. Aus dem geplanten Experiment für auslegungsgemäße Extremalbedingungen wurde so ein reales Experiment unter Überlast. Der Vergleich in Tabelle I macht die Situation deutlich.

Tabelle I: Auslegungswerte und reale Betriebsbedingungen für Mol-7B

	SNR-300		Höchstbelasteter Stab im Experiment Mol-7B	
	nominal	extremal	Auslegung	Realität
Maximale Stableistung (W/cm)	355	500	450	586
Maximale Hüllwandmitten- temperatur (°C)	620	685	697	697
Max. lokaler Abbrand (MWd/t Me)	85000		80000	125000

Die Bestrahlung des Brennstabbündels erfolgte in einem geschlossenen Natrium-Versuchskreislauf, dem sogenannten "In-Pile Sodium Loop IPSL" auf der zentralen Position des belgischen Versuchsreaktors BR 2 in Mol. Das Bündel enthielt 16 Brennstäbe mit Tablettenbrennstoff gleicher Spezifikation von drei verschiedenen Herstellern sowie zwei Stäbe mit einvibriertem Partikelbrennstoff. Außerdem kamen zwei unterschiedliche Stahlsorten als Hüllmaterial zum Einsatz.

Infolge der Überlastbedingungen kam es ab dem Bereich mittleren Abbrandes zu Stabschäden. Der geschlossene Versuchskreislauf erlaubte jedoch die Weiterführung der Bestrahlung bis hin zu sehr hohen Abbränden, so daß auch zum Verhalten schadhafter Brennstäbe unter hartem Dauerbetrieb Erkenntnisse gewonnen werden konnten.

In diesem Bericht werden die Teilschritte des Experimentes von der Auslegung über die Bestrahlung bis hin zur Nachuntersuchung und Auswertung zusammenfassend dargestellt. Das Ausgangsmaterial hierzu liefern zahlreiche interne Notizen und Berichte der bei dem Experiment zusammenarbeitenden Organisationen sowie einige wenige Publikationen, die bei den Referenzen angeführt sind. Der Detaillierungsgrad in den einzelnen Abschnitten des Berichtes ist unterschiedlich. Wenn gerade die Ergebnisse der "deutschen" Stäbe bzw. der in Karlsruhe nachuntersuchten Stäbe besonders eingehend dokumentiert sind, dann bedeutet dies keinerlei Werturteil. Es hat schlicht den Grund, daß wir uns damit eingehender befassen konnten.

Die Zeitskala des Experimentes umfaßt etwa ein Jahrzehnt. Die nachstehende Tabelle II soll einen Überblick über den zeitlichen Verlauf hinsichtlich der Teilarbeiten sowie über die beteiligten Organisationen geben.

Tabelle II: Ablauf des Experiments Mol-7B und beteiligte Organisationen

1970/71	Auslegung, Spezifikationen	KfK, IA, CEN, BN
1971	Herstellung der Stäbe	ALKEM, BN, KfK/IMF
1972	Assemblieren des Bündels	CEN
1972 - 1974	Organisation und Betreuung der Bestrahlung	KfK/PSB, KfK/AG-Mol, CEN
11.07.1972 - 13.02.1974	Bestrahlung im BR 2	CEN, KfK/AG-Mol
1974 - 1978	Organisation und Betreuung der Nachuntersuchung	BN, KfK/IMF
1975 1976	Untersuchung und Zerlegung des Bündels	KfK/KTB-HZ
1976	Nachuntersuchung der BN-Stäbe	TU-I
1976 - 1978	Nachuntersuchung der Alkem- und KfK-Stäbe	KfK/KTB-HZ
1977 - 1981	Auswertung und interne Dokumentation	BN IA KfK/IMF
1981/1982	Abschließende Gesamtdokumentation	KfK/IMF

Abkürzungen:

KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
KfK/PSB	Projekt Schneller Brüter
KfK/AG-Mol	Arbeitsgruppe Mol
KfK/IMF	Institut für Material- und Festkörperforschung
KfK/KTB-HZ	Kerntechnische Betriebe - Heiße Zellen
TU-I	Europäisches Institut für Transurane, Karlsruhe
IA	INTERATOM GmbH, Bergisch Gladbach (Bensberg)
ALKEM	Alkem GmbH, Hanau
CEN	Centre d'Etude de l'Energie Nucléaire, Mol, Belgien
BN	Belgonucléaire S.A., Bruxelles, Belgien

2. Auslegung und Spezifikationen

2.1 Allgemeine Hinweise

Die Auslegung des Experiments und die Spezifikationen orientierten sich an der vorgegebenen Zielsetzung, die wir hier als "ursprüngliche Zielsetzung" bezeichnen wollen. Dazu gehörten auch die "beabsichtigten Betriebsbedingungen". Wie in der Einführung bereits erläutert wichen die tatsächlichen Betriebsbedingungen so sehr von den Absichten der Auslegung ab, daß die ursprüngliche Zielsetzung gegenstandslos wurde. Für eine sinnvolle Auswertung des Experimentes erwies sich eine nachträglich "revidierte Zielsetzung" als angemessen.

2.2 Ursprüngliche Zielsetzung

Die ursprüngliche Zielsetzung war, einige der extremen Betriebsbedingungen eines vorhergegangenen Bestrahlungsexperimentes im schnellen Reaktor - des sog. RAPSODIE I-Experimentes - zu simulieren /1/. Während für das RAPSODIE-Experiment die bleibende Hülldehnung auslegungsgemäß maximal 0,2 % betragen durfte, sollte mit diesem Experiment ein Hülldehnungsbereich von 0,2 bis 0,5 % erprobt werden und zwar bei den beiden bereits früher ausgewählten Hüllmaterialsorten der Werkstoff-Nummern 1.4970 und 1.4988.

Als weitere Randbedingungen des Mol-7B-Experiments wurden festgelegt:

- Die maximale Stableistung sollte den nominalen maximalen RAPSODIE-Wert von 470 W/cm nicht wesentlich überschreiten.
- Die angestrebte bleibende Hülldehnung sollte ausschließlich durch den Spaltgasdruck und nicht durch mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle hervorgerufen werden.
- Die Hülltemperaturen und Spaltgasdrucke sollten in etwa den Extremwerten des genannten RAPSODIE-Experimentes entsprechen.

### 2.3 Aufbau des Bündels

Das Brennstabbündel Mol-7B umfaßt in einer hexagonalen Querschnittsanordnung mit 19 Stabplätzen 18 Brennstäbe, die um einen zentralen Strukturstab gruppiert sind. Die Stäbe sind im Bündelfuß durch Querkeile gehalten und werden durch 8 Gitterabstandshalter (5 Waben-Abstandshalter und 3 Röhrrchen-Abstandshalter) positioniert. Das Bündel ist von einem hexagonalen Kasten umschlossen. Die wesentlichen Zahlenwerte des Bündelaufbaus sind in Tabelle III zusammengefaßt, die Abb. 2.1 und 2.2 machen die Konstruktion des Bündels und der Abstandshalter deutlich. Abb. 2.3 bringt eine schematische Bündelübersicht mit Angabe der Abstandshalterverteilung und der Positionierung im Reaktorkern. In Abb. 2.4 ist die Nummerierung der Stabplätze im Bündel festgelegt. Der Strukturstab, an dem die Abstandshalter befestigt sind, ist in seinem oberen Teil als Rohr ausgeführt zur Aufnahme von Thermoelementen.

### 2.4 Radiales Leistungsprofil im Bündel

Das radiale Leistungsprofil über den Bündelquerschnitt wurde mit Hilfe von Messungen an einer Nulleistungskonfiguration ermittelt. Es ergaben sich für die drei unterschiedlichen Stabpositionen folgende Relativwerte:

- Eckstab            1,00,
- Randstab          0,93,
- Innstab            0,79.

Es wird angenommen, daß dieser radiale Verlauf der Flußabsenkung auch für den Abbrand repräsentativ sein wird.

## 2.5 Auslegung der Brennstäbe und Spezifikationen

Die 18 Brennstäbe des Bündels setzen sich zusammen aus 12 Außenstäben und 6 Innenstäben. Es war vorgesehen, 16 Stäbe mit Tablettenbrennstoff und 2 Stäbe mit einvibriertem Pulverbrennstoff einzusetzen. Weiterhin sollten die beiden Hüllmaterialwerkstoffe Nr. 1.4970 und Nr. 1.4980 verwendet werden.

Die Auslegungsrechnungen wurden so geführt, daß bei den beabsichtigten Betriebsbedingungen (siehe 2.7) die ursprüngliche Zielsetzung, nämlich eine bleibende Hülldehnung bis ca. 0,5 % erreicht werden sollte. Dabei war zu berücksichtigen, daß die Außenstäbe wegen der Flußabsenkung im Bündelzentrum stärker belastet sein würden als die Innenstäbe. Weiterhin war anzunehmen, daß bei den Außenstäben ein ziemlich starker radialer Temperaturgradient eine zusätzliche Belastung bringen würde. Aus diesen Gründen wurde bei der Auslegung der Außenstäbe mit Tablettenbrennstoff ein wesentlich größerer Spaltgasraum als bei den Innenstäben vorgesehen. Es ergaben sich somit drei in ihren äußeren Abmessungen gleiche, aber im inneren Aufbau unterschiedliche Stabtypen, siehe Abb.2.5. Die Auslegungsdaten und Spezifikationen dieser Stäbe sind in den Tabellen IV bis VII zusammengefaßt.

Tabelle III: Zahlenwerte zum Bündelaufbau

Gesamtlänge des Bündels	1158 mm
Schlüsselweite des Mantelrohrs außen/innen	38,6/36,6 mm
Anzahl der Stabplätze	19
Brennstäbe	18
Strukturstab	1
Abstandshalter, Anzahl	8
Waben-/Röhrchen-Typ	5/3
Schlüsselweite	36,5 mm
Axialer Abstand	130 mm
Zellendurchmesser	6,12 mm
Stababstand	8,0 mm
Brennstab, Länge	1080 mm
Durchmesser	6,0 mm

Tabelle IV: Aufbau der drei Stabtypen

	Innenstab mit Tabletten- brennstoff	Außenstab mit Tabletten- brennstoff	Außenstab mit Pulverbrenn- stoff
Stabdurchmesser (mm)	6,0	6,0	6,0
Stablänge (mm)	1080 ± 1	1080 ± 1	1080 ± 1
- Gasraum oben (mm)	0	228 ± 0,2	282 ± 0,2
- Federlänge (mm)	82 ± 3	82 ± 3	82 ± 3
- Brutstoff oben (mm)	288 ± 3	60 ± 3	6 ± 1
- Brennstoffsäule (mm)	500 ± 3	500 ± 3	500 ± 6
- Brutstoff unten (mm)	6 ± 1	6 ± 1	6 ± 1
- Gasraum unten (mm)	159 ± 0,2	159 ± 0,2	147 ± 0,2
Füllgas	≥ 60 v/o He, ≤ 40 v/o Ar, ≤ 5 v/o H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>		
Stabverbiegung	≤ 0,07 mm pro 100 mm		

Tabelle V: Brennstoffspezifikation

	Tabletten- brennstoff	Pulver- brennstoff
Material	UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub> -Mischoxid	
U-235-Gehalt U <sub>5</sub> /U <sub>tot</sub> (Gew.-%)	70	
Pu-Gehalt Pu <sub>fiss</sub> /Pu <sub>tot</sub> +U <sub>5</sub> (Gew.-%)	27,3	
O/Me-Verhältnis	1,98	
Verunreinigungen (ppm)	C	< 100
	Cl	25
	F	25
gebund. N		50
H <sub>2</sub> O		50

Fortsetzung von Tabelle V:

Gasgehalt	(cm <sup>3</sup> /g)	< = 0,1	
Tabletten, Durchmesser	(mm)	5,12	
Höhe	(mm)	6,0	
Dichte	(% th.D.)	86,8	
Einsenkvolumen	(%)	2,3	
Schulterbreite	(mm)	0,7	
Lineare Brennstoffdichte	(g/cm)	1,92	1,9
Länge der Brennstoffsäule	(mm)	500	500

Tabelle VI: Brutstoffspezifikation

Material	UO <sub>2</sub> mit natürl. Uran	
O/Me-Verhältnis	2,0	
Verunreinigungen (ppm)	C	< = 100
	Cl	< = 25
	F	< = 25
gebund.	N	< = 50
	H <sub>2</sub> O	< = 50
Gasgehalt	(cm <sup>3</sup> /g)	< = 0,1
Tabletten, Durchmesser	(mm)	5,05
Höhe	(mm)	6,0
Dichte	(% th.D.)	95

Tabelle VII: Spezifikationen des Hüll- und Strukturmaterials im Brennstab

Hüllrohr	Material	W.-Nr.	1.4970/1.4988
	Außendurchmesser	(mm)	6,0
	Innendurchmesser	(mm)	5,25 / 5,245
	Minimale Wandstärke	(mm)	0,35
Endkappen	Material	W.-Nr.	1.4970/1.4988
	Länge oben	(mm)	12,5
	Länge unten	(mm)	24,0
Feder	Material	W.-Nr.	1.4310
	Freie Länge	(mm)	106
	Länge im Stab	(mm)	82
Stützrohr	Material	W.-Nr.	1.4970/1.4988
	Außendurchmesser	(mm)	6,0
	Innendurchmesser	(mm)	5,24

## 2.6 Auslegung und Spezifikationen der Bündelstruktur

Die Auslegung des Bündels orientierte sich an folgenden Zielen:

- Der radiale Temperaturgradient in den 6 Innenstäben soll möglichst klein bleiben.
- Die Kühlmittelaustrittstemperatur des Bündels soll so eingestellt werden, daß für das Hüllmaterial der 6 Innenstäbe der erwünschte Kriechbereich verifiziert wird.

Unter diesen Randbedingungen wurde die Kühlfluß- und Temperaturverteilung im Bündel sowie das thermomechanische Verhalten des Bündels und seiner einzelnen Komponenten detailliert berechnet. Dabei wird die in Tabelle VIII näher spezifizierte Bündelstruktur zugrundegelegt.

Zur Verminderung des radialen Temperaturgradienten ist im Brennstoffbereich des Bündels eine thermische Isolation vorgesehen. Der Strukturstab ist in seinem oberen Teil hohl ausgeführt zur Aufnahme von Thermoelementen.

Tabelle VIII: Bündelstruktur

Bündellänge	(mm)	1158
Schlüsselweite	(mm)	38,6
Werkstoffe der Strukturteile		
Fußstück mit Stabverankerung		AISI 316
Strukturstab		AISI 316
Waben-Abstandshalter		1.4981
Röhrchen-Abstandshalter		1.4988
Brennelementkasten		AISI 316
Wabenabstandshalter (W)		
Zellmittenabstand	(mm)	8,0
Zellendurchmesser	(mm)	6,12 ± 0,03
Schlüsselweite	(mm)	36,5
Höhe	(mm)	15
Anzahl im Bündel		5
Röhrchenabstandshalter (R)		
Zellmittenabstand	(mm)	8,0
Zellendurchmesser	(mm)	6,10 bis 6,15
Schlüsselweite	(mm)	36,5
Höhe	(mm)	10
Anzahl im Bündel		3
Brennelementkasten		
Schlüsselweite innen/außen	(mm)	36,6 / 38,6
Axialer Abstand der Abstandshalter	(mm)	130
Anordnung der Abstandshalter von unten nach oben		WWRRRRWW

## 2.7 Beabsichtigte Betriebsbedingungen

Diese Betriebsbedingungen wurden auf Grund der ursprünglichen Zielsetzung festgelegt bzw. mit Hilfe der modelltheoretischen Rechenprogramme CRASH /2/ und COMETHE II /3/ ermittelt. Leitlinie war die Absicht,

- die Hüllwandmittentemperatur unter 700 °C zu halten,
- eine Spaltgasfreisetzung zu erhalten, welche in den inneren Stäben eine Hülldehnung bis zu 0,5 % erzeugt.

Insgesamt ergaben sich damit die Festlegungen und Rechenwerte gemäß Tabelle IX. Es ist zu beachten, daß bei den äußeren Stäben zwischen den Eckstäben des hexagonalen Bündelquerschnitts und den (jeweils dazwischen stehenden) Randstäben zu unterscheiden ist. Die Eckstäbe stehen im höchsten Neutronenfluß, bei den Innenstäben macht sich die Flußabsenkung besonders stark bemerkbar. Umgekehrt ist die (rechnerisch ermittelte) Kühlmitteltemperatur in den inneren Kühlkanälen erheblich höher, siehe hierzu Abb.2.6.

Tabelle IX: Beabsichtigte Betriebsbedingungen

	Eckstäbe	Randstäbe	Innenstäbe
Wandmittentemperatur, max, nom. (°C)			697
Max. Abbrand MWD/t Oxid	80000	74500	64000
Stableistung (W/cm)			
am Zyklusanfang	450	419	358
am Zyklusende	419	390	333
Max. Zentraltemperatur im Brennstoff (°C)	2380	2290	2240
Max. Temperatur der Brennstoffoberfläche (°C)	1290	1320	1410
Spaltgasfreisetzung beim Zielabbrand (%)	70	66	65
Spaltgasdruck beim Zielabbrand (bar)	56	50,5	68

Obwohl die Stableistung bei den Außenstäben deutlich höher ist, wird die Hülle erheblich weniger belastet, insbesondere auch deswegen, weil die Spaltgasräume größer sind und damit der Druckaufbau geringer wird.

## 2.8 Revidierte Zielsetzung

Wie in Kapitel 4 näher erläutert, waren die tatsächlichen Betriebsbedingungen während der Bestrahlung erheblich härter als die geplanten. Dies führte zu großen Schäden in 17 Stäben des Bündels, nur 1 Stab blieb intakt. Damit war die ursprüngliche Zielsetzung überholt. Die Nachuntersuchung und Auswertung des Experimentes wurde auf eine neue Zielsetzung hin ausgerichtet, nämlich wie folgt:

- Verhalten der Brennstäbe unter Überlast,
- Verhalten des Bündels bei Langzeitbetrieb mit defekten Brennstäben,
- Ausmaß einer Blockadebildung in den Kühlkanälen,
- Defektstruktur in den Hüllrohren,
- Chemische Wechselwirkung zwischen Na und Brennstoff und daraus folgende Sekundärschäden.

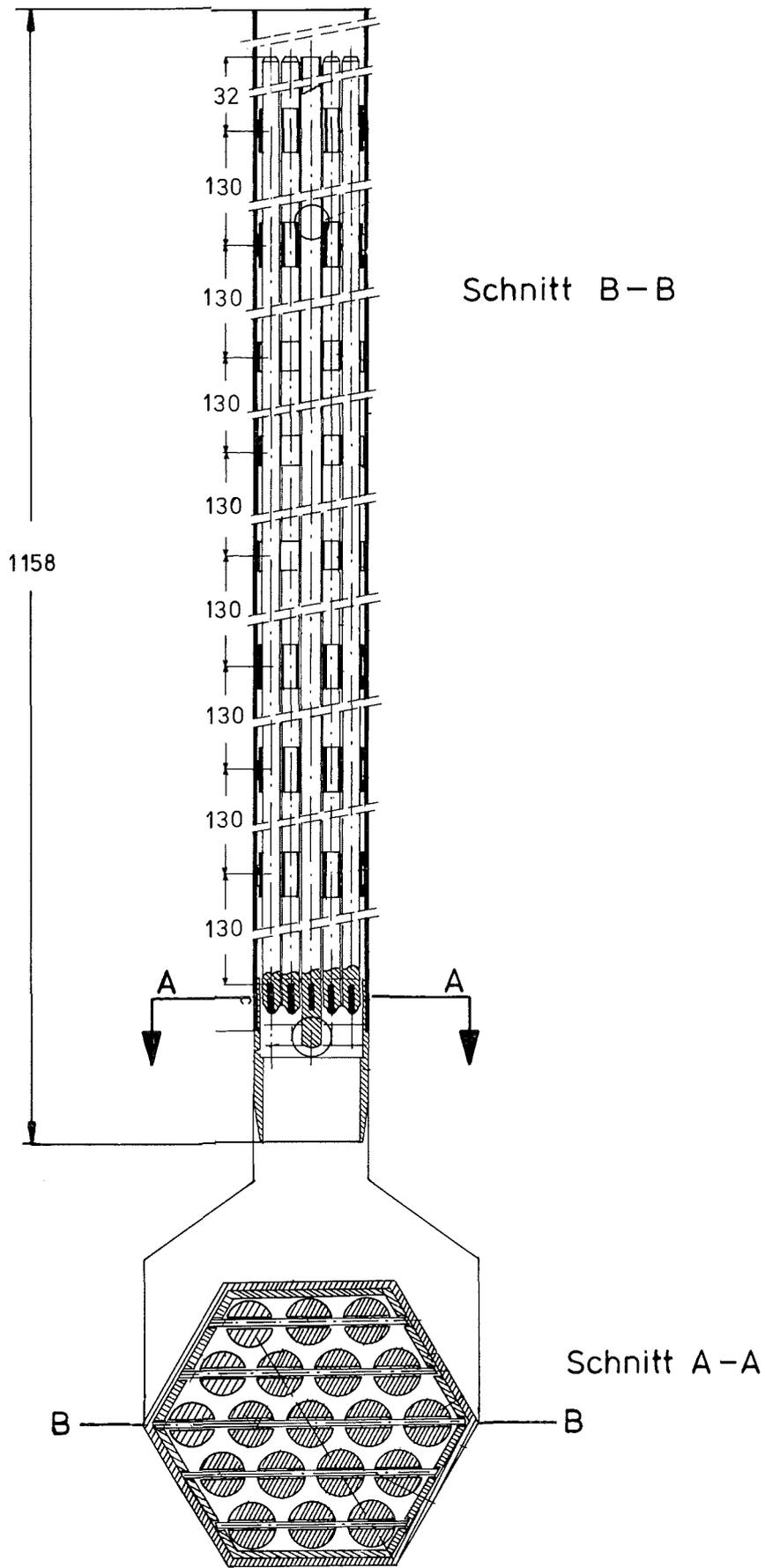
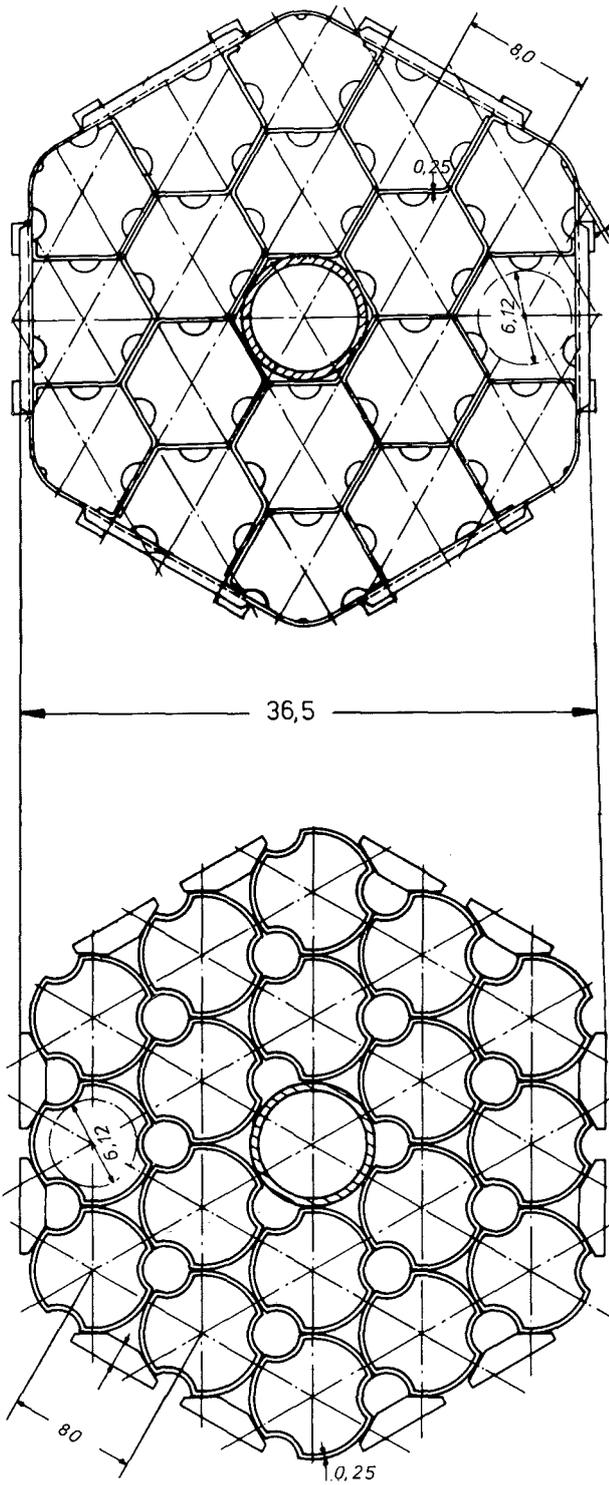


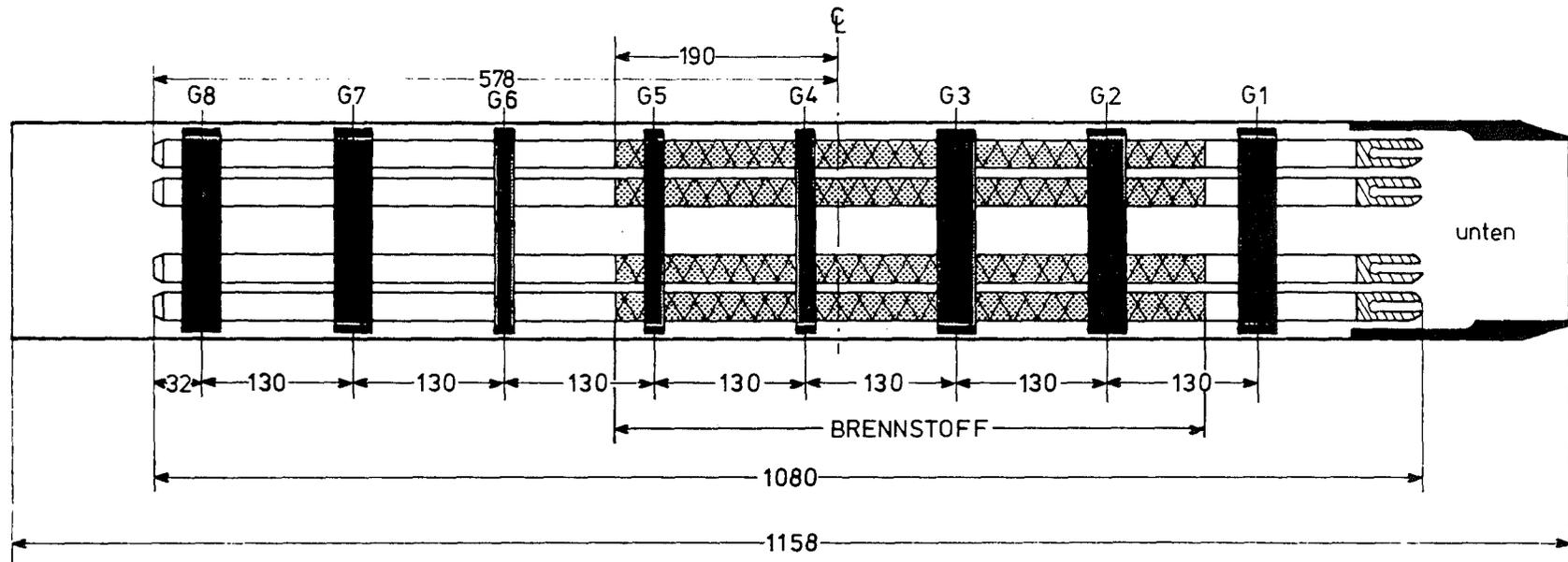
Abb. 2.1: Aufbau des Bündels Mol-7B



Waben - Abstandshalter  
Höhe 15 mm

Röhrchen - Abstandshalter  
Höhe 10 mm

Abb. 2.2: Gitterabstandshalter im Bündel



G1-G2-G3-G7-G8 Waben-Abstandshalter  
 G4-G5-G6 Röhren-Abstandshalter

Abb. 2.3: Schematische Bündelübersicht

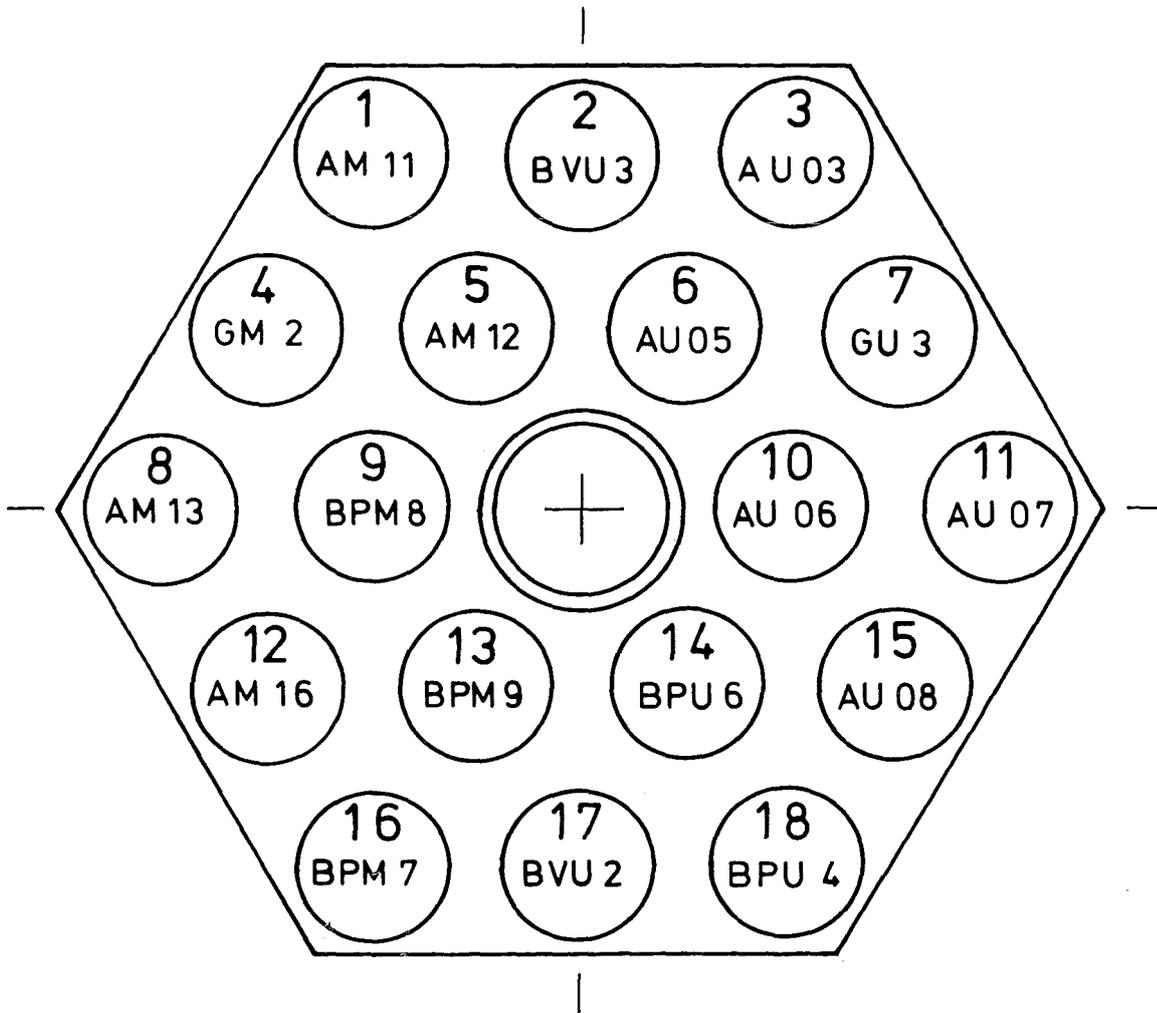


Abb. 2.4: Position der Stäbe im Bündel

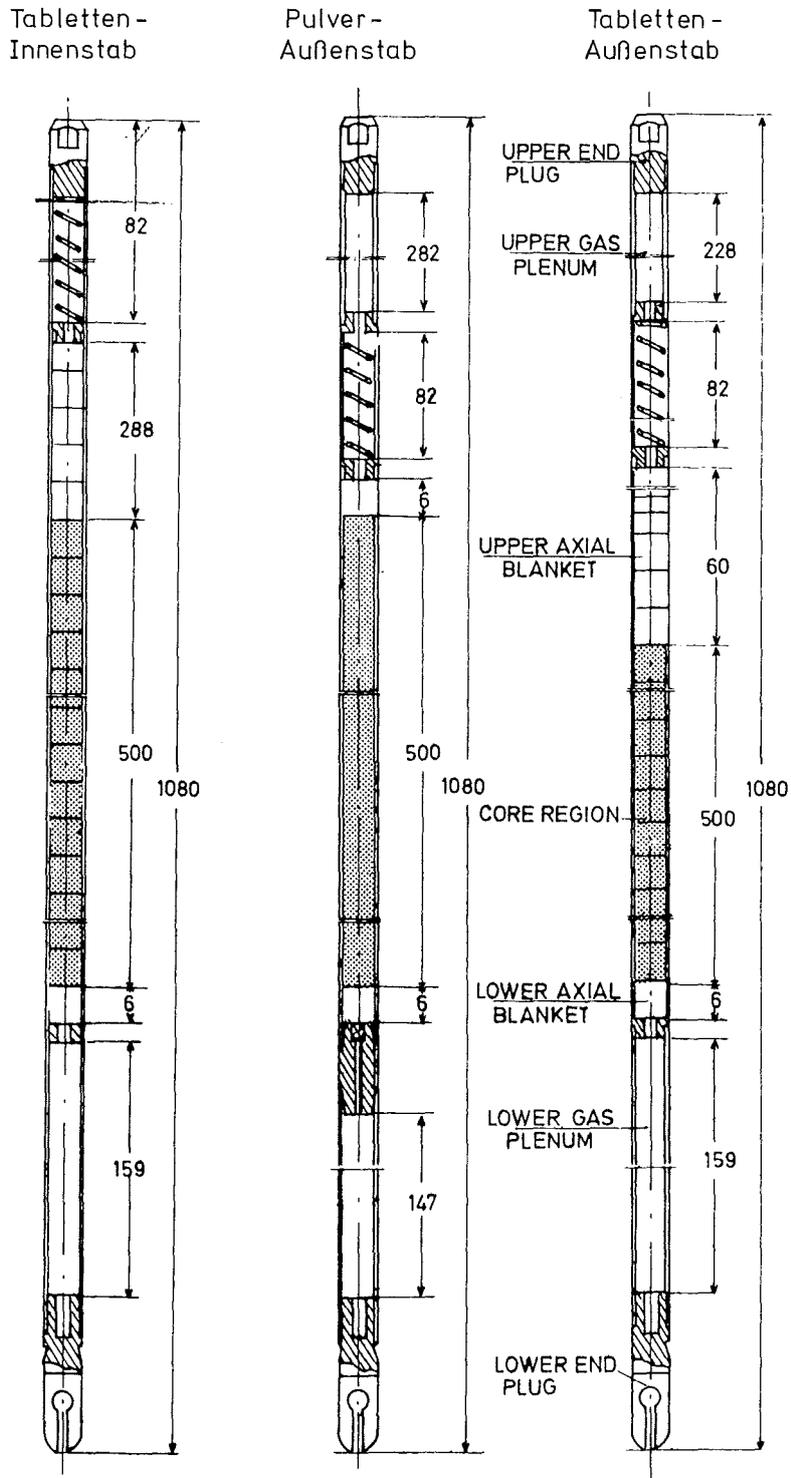


Abb. 2.5: Aufbau der 3 Stabtypen

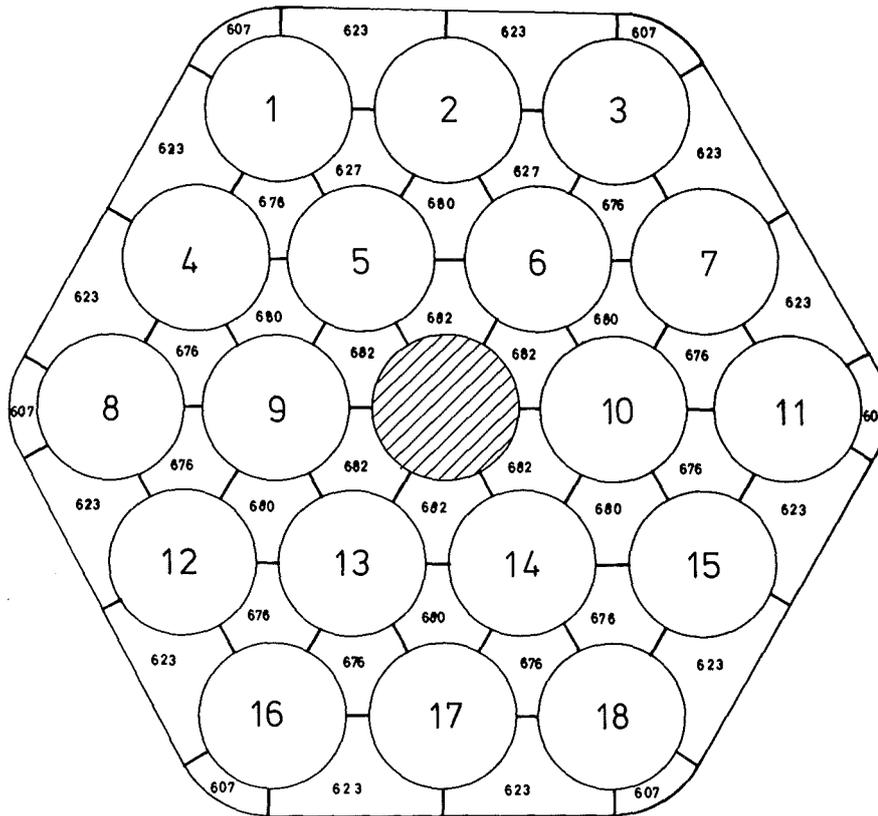


Abb. 2.6: Austrittstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) in den Kühlkanälen des Bündels am oberen Ende des Reaktorkerns bei 400 W/cm maximaler Stableistung, 1 kg/s Na-Fluß, 460  $^{\circ}\text{C}$  Na-Eintrittstemperatur

### 3. Herstellung der Brennstäbe und des Bündels

#### 3.1 Übersicht

Die Stäbe für das Brennelementbündel Mol-7B wurden von drei verschiedenen Herstellern nach einheitlichen Spezifikationen gefertigt. Von den 18 eingesetzten Stäben enthielten 16 Stäbe Tablettenbrennstoff und zwei Stäbe Brennstoff in Form von einvibriertem Pulver. Außerdem kamen zweierlei Hüllmaterialien, nämlich Edelstähle der Werkstoff-Nummern 1.4988 und 1.4970 zum Einsatz.

Neun Stäbe des Bündels stammten aus einer Fertigung der Firma Alkem in Hanau (Kennbuchstabe A), sie enthielten alle Tablettenbrennstoff. Sieben Stäbe des Bündels wurden von der Firma Belgonucléaire in Brüssel in Zusammenarbeit mit CEN-Mol geliefert (Kennbuchstabe B), fünf Stäbe davon mit Tablettenbrennstoff und zwei Stäbe mit Pulverbrennstoff. Die restlichen Stäbe mit Tablettenbrennstoff wurden im Kernforschungszentrum Karlsruhe - damals GfK - hergestellt (Kennbuchstabe G). Die Bezeichnung der Brennstäbe ist wie folgt:

- Erster Buchstabe: Hersteller (A,B oder G)
- Letzter Buchstabe: Hüllmaterial (M = 1.4988, U = 1.4970)
- Zwischenbuchstabe (nur bei BN/CEN): Brennstoffart (P = Pellet, V = Vibrierbrennstoff)
- Nummer: Fabrikationsnummer des Herstellers

Die Übersicht in Tabelle X weist die hergestellten Stäbe und ihre Verwendung aus. Man unterscheidet dem Aufbau nach Außenstäbe und Innenstäbe, wie in Kapitel 2.4 näher ausgeführt ist. Nicht alle gefertigten Stäbe wurden bestrahlt. Die überzähligen dienten als Reservestäbe, wurden für das Experiment aber dann nicht benötigt.

#### 3.2 Hüllrohre und Strukturteile der Stäbe

Die Hüllrohre und sonstigen Strukturteile für die Stabfertigung wurden von der Fa. Belgonucléaire für alle drei Stabfabrikationen gemeinsam beschafft. Hersteller und Behandlungszustand der Hüllrohre sind wie folgt zu unterscheiden:

Hüllrohre der W.-Nr.	Rohrhersteller	Behandlungszustand
1.4988	Mannesmann	lösungsgeglüht (lg)
1.4970	Sandvik	kaltverformt (kv)

Tabelle X: Übersicht zur Stabherstellung und Bezeichnung

	Hersteller	Stahl 1.4988		Stahl 1.4970	
		Außenstäbe	Innenstäbe	Außenstäbe	Innenstäbe
Tablettenbrennstoff	Alkem	AM 11	AM 12	AU 03	AU 05
		AM 13	AM 17 <sup>+) </sup>	AU 07	AU 06
		AM 16		AU 08	
GfK		GM 1 <sup>+) </sup>		GU 3	
		GM 2			
BN/CEN		BPM 7	BPM 8	BPU 4	BPU 6
			BPM 9	BPU 5 <sup>+) </sup>	
Pulver- brennstoff	BN/CEN			BPU 10 <sup>+) </sup>	
				BVU 1 <sup>+) </sup>	
				BVU 2	
				BVU 3	
<sup>+) </sup> Diese Stäbe wurden nicht bestrahlt. Sie dienen als Reservestäbe.					

### 3.3 Herstellung der Stäbe mit Tablettenbrennstoff

Die Fabrikationsdaten der Brennstäbe mit Tablettenbrennstoff sind in Tabelle XI zusammengefaßt. Die Brutstofftabletten stammen aus einer einheitlichen Herstellung bei der belgischen Firma MMN in Dessel, ihre tatsächlichen Werte liegen innerhalb der Spezifikation gemäß Tabelle VI in Kapitel 2.4.

### 3.4 Herstellung der Stäbe mit Pulverbrennstoff

Das zum Einvibrieren nötige Brennstoffpulver wurde durch einen Schmelzprozeß mit anschließendem Brechen und Fraktionieren gewonnen. Die ausgewählten drei Fraktionen sind wie folgt

Siebfraktion	Anteil (Gew.-%)
8 - 10 mesh	60
50 - 60 mesh	25
270 mesh	15

Tabelle XI: Fabrikationsdaten der Stäbe mit Tablettenbrennstoff

	Spezifikation		Fabrikation		
			Alkem	GfK	BN/CEN
UO <sub>2</sub> -PuO <sub>2</sub>	70	U-235-Gehalt $U_5/U_{tot}$ (Gew.-%)	70,01	69,18	70,13
	27,3	Pu-Gehalt $Pu_{fiss}/Pu_{tot}+U_5$ (Gew.-%)	27,2	27,5	26,86
	1,98	O/Me-Verhältnis	1,976 (Mittel)	1,99	1,97 ± 0,015
	siehe Tab. V	Verunreinigungen	innerhalb der Spezifikation		
Tabletten	5,12	Durchmesser (mm)	5,09 bis 5,16	5,143 bis 5,158	5,133 bis 5,173
	2,3	Einsenkvolumen (%)	2,59	2,72 bis 2,82	2,53 bis 2,65
	0,7	Schulterbreite (mm)		0,78 (Mittel)	0,712 (Mittel)
Hüllrohr	5,245	Innendurchmesser (mm) - bei W.-Nr. 1.4988	5,240 bis 5,248	5,225 bis 5,246	5,241 bis 5,257
	5,25	- bei W.-Nr. 1.4970	5,246 bis 5,262	5,235 bis 5,246	5,246 bis 5,261
Brennstab	500	Brennstoffsäule (mm)	497,2 bis 502,6	497,4 bis 498,5	497,8 bis 502,8
		Brennstoffgewicht (g)	94,8 bis 97,5	98,13 bis 98,42	95,0 bis 96,7
	1,92	Lineare Dichte (g/cm)	1,899 bis 1,940	1,969 bis 1,979	1,908 bis 1,923
	$\geq$ = 60	Füllgas He (Vol.-%)	99,8	99,8	98,4 bis 99,7

Das Einvibrieren der Stäbe in Hüllrohre aus Edelstahl W.-Nr. 1.4970 erfolgte bei Frequenzen zwischen 300 und 3500 Hz unter einer Last von 1 kg, Vibrierdauer 2 bis 3 Minuten. Die Fabrikationsdaten der einvibrierten Stäbe sind in Tabelle XII enthalten.

Tabelle XII: Fabrikationsdaten der Stäbe mit Pulverbrennstoff

Spezifikation		Fabrikation			
Brennstoffpulver	70	U-235-Gehalt $U_5/U_{tot}$ (Gew.-%)	68,58		
	27,3	Pu-Gehalt $Pu_{fiss}/Pu_{tot} + U_5$ (Gew.-%)	26,9		
	1,98	O/Me-Verhältnis	2,005		
	siehe Tab. V	Verunreinigungen	Spez. erfüllt		
Einvibrierte Brennstoffsäule	500	Brennstoffsäule (mm)	500,4	499,3	500,3
		Brennstoffgewicht (g)	95,02	95,00	95,00
	1,9 g/cm	Mittl. lin. Brennstoffdichte (g/cm)	1,899	1,903	1,899
		Abweichung (%)			
		- über die ganze Säule (ohne ob. Ende)	+5,2/ -4,9	+4/-4	+5/-4,7
		- im 100 mm-Zentralbereich		+3,6/ -2,8	+1,6/ -4,0
		BVU 1	BVU 2	BVU 3	

### 3.5 Herstellung des Brennstabbündels

Die Strukturteile des Bündels, nämlich Fußstück, Strukturstab, Abstandshalter und Kasten, wurden entsprechend den Spezifikationen gefertigt. Besondere Sorgfalt war auf die beiden Typen der Abstandshalter zu verwenden.

Die Wabenabstandshalter, hergestellt von Belgonucléaire, bestehen aus gebogenen Blechstreifen, die durch Punktschweißen miteinander verbunden wurden. Bei den Röhren-Abstandshaltern, hergestellt bei Interatom, wurden entsprechend verformte Röhren durch Hartlöten verbunden. Die abschließende Prüfung legte besonderen Wert auf den Zellendurchmesser, den Zellenabstand (entsprechen dem Stababstand) und auf die Außendimensionen der Gitter. Tabelle XIII bringt entsprechende Meßwerte für die zum Bündelaufbau tatsächlich ausgewählten 8 Abstandshalter.

Tabelle XIII: Fabrikationsdaten der Abstandshalter

		Position im Bündel (1=unten, 8=oben)	Zellendurchmesser <sup>1)</sup> (mm)	Zellenabstand (mm)		Schlüsselweite außen <sup>4)</sup> (mm) einschl. Abstandstücke
				Mittelwert	Extremwerte <sup>3)</sup>	
Waben- Abstandshalter	Spezifikation		6,12 ± 0,03	8,0	7,9 bis 8,1	36,6 <sup>+0</sup> -0,03
	Gitter R 273/6	7	3 x > 6,15	7,982	7,900/8,048	36,60 - 36,55
	Gitter R 273/7	1	4 x > 6,15	7,995	7,808/8,124	36,60 - 36,55
	Gitter R 273/8	8	1x < 6,09/2x > 6,15	7,982	7,848/8,079	36,60 - 36,55
	Gitter R 273/9	2 } Brennstoffzone	2x < 6,09/2x > 6,15	7,985	7,870/8,065	36,60 - 36,55
	Gitter R 273/10	3	2x < 6,09/2x > 6,15	7,895	7,898/8,116	36,60 - 36,55
Röhrchen- Abstandshalter	Spezifikation		6,10 bis 6,15	8,0	7,9 bis 8,1	36,5 <sup>+0</sup> -0,03
	Gitter R 291/1	6	6,10 - 6,12	7,982/7,986 <sup>2)</sup>	7,850/8,093	36,492 - 36,499
	Gitter R 291/6	5 } Brennstoffzone	6,10 - 6,12	7,956	7,870/8,017	36,483 - 36,497
	Gitter R 291/7	4	6,10 - 6,12	7,939	7,850/7,996	3 x 36,497
<p>Anmerkungen:</p> <p>1) Messungen an 18 Zellen; Waben-AH: Anzahl der Abweichungen</p> <p>2) nach Messung von BN bzw. IA</p> <p>3) Bereich umfaßt alle Abstände in einem Gitter</p> <p>4) Bereich für die 3 Schlüsselweiten eines Abstandshalters</p>						

Der Zusammenbau des Bündels geschah in folgenden Schritten:

- Einfügen des Strukturstabes in das Fußstück,
- Fixieren der Abstandshalter auf dem Strukturstab,
- Einziehen der Brennstäbe in dieses Gerüst und Befestigung im Fußstück,
- Einschieben des Bündels in den Kasten und Verschweißen des Kastens mit dem Fuß.

Die Positionierung der verschiedenen Stäbe im Bündel ist aus Abb. 3.1 zu entnehmen, Die Abb. 3.2, 3.3 und 3.4 zeigen Ansichten des Bündels ohne Kasten.

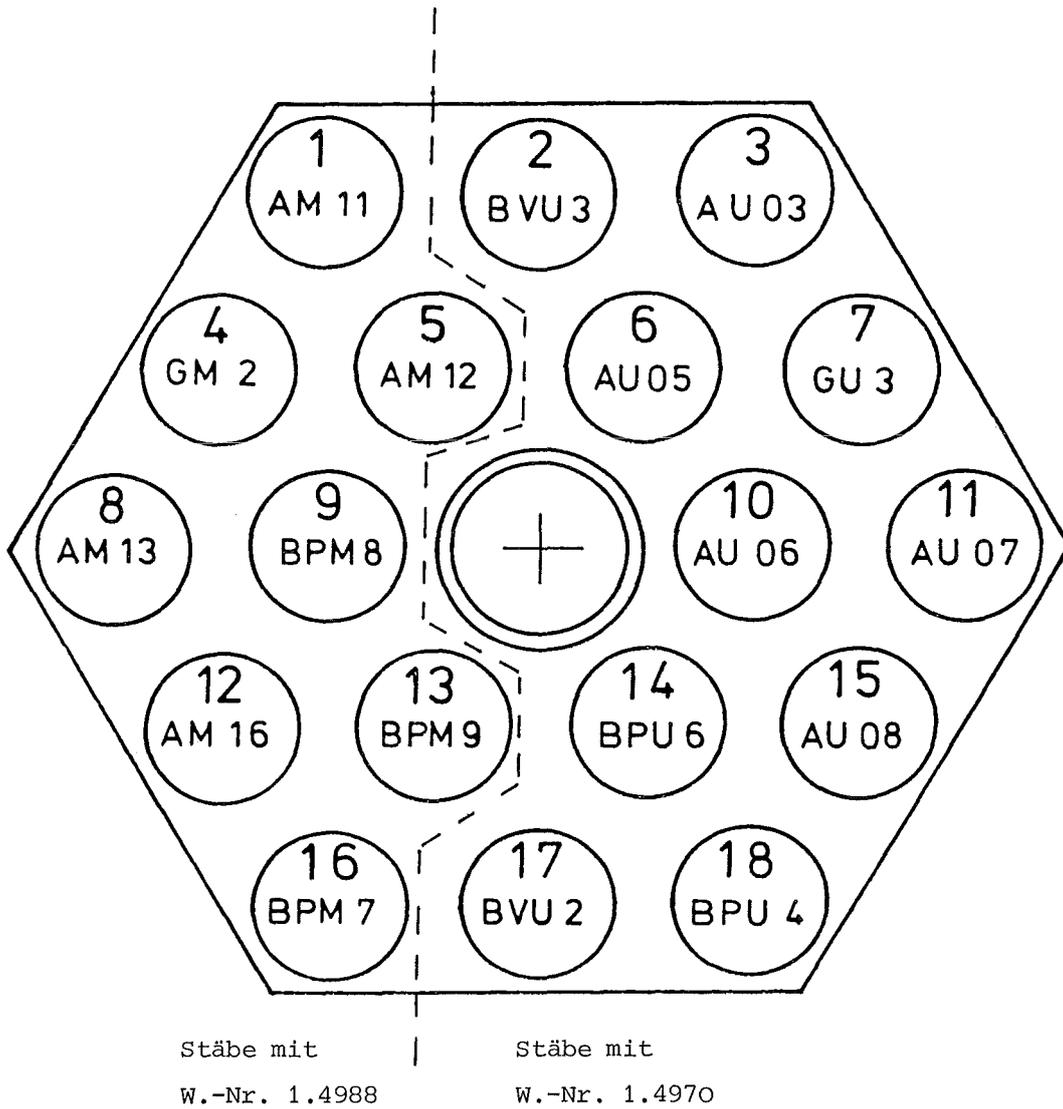


Abb. 3.1: Schematischer Bündelquerschnitt mit Positionierung der Brennstäbe

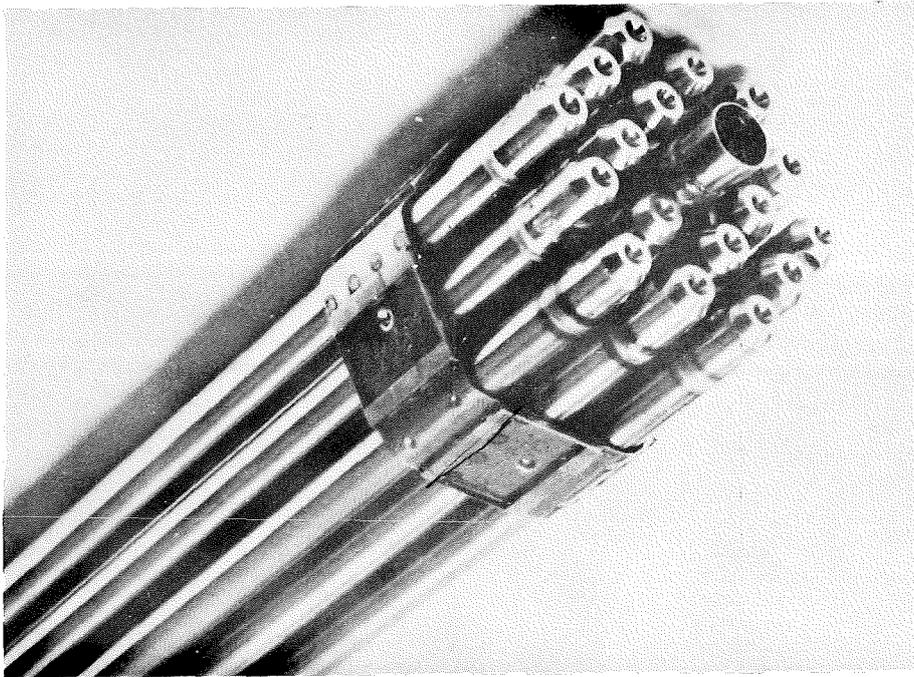


Abb. 3.2: Ansicht des oberen Bündelendes

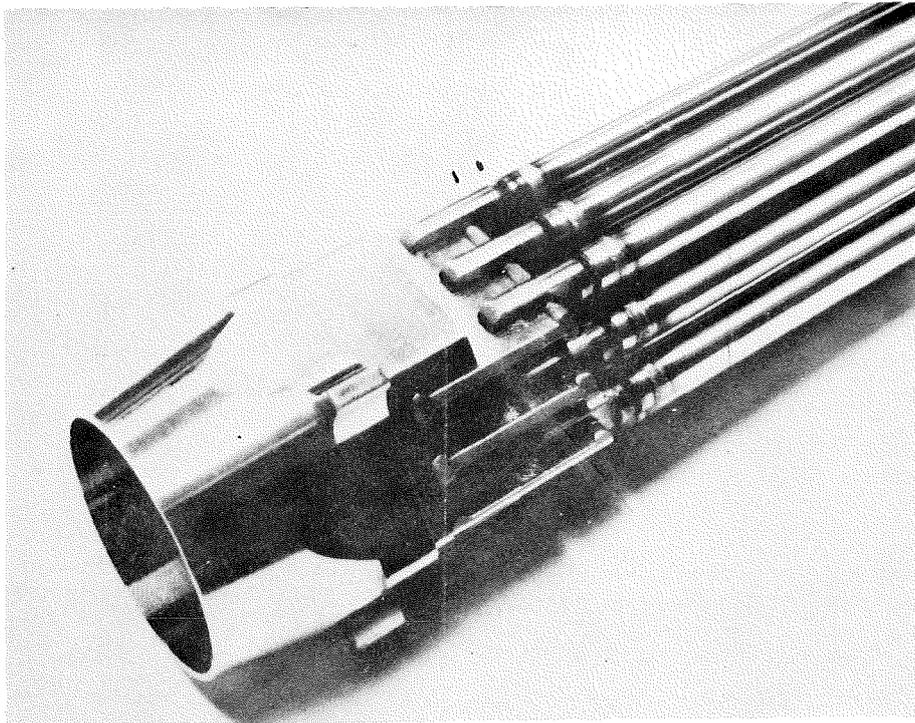


Abb. 3.3: Unteres Bündelende mit Fuß

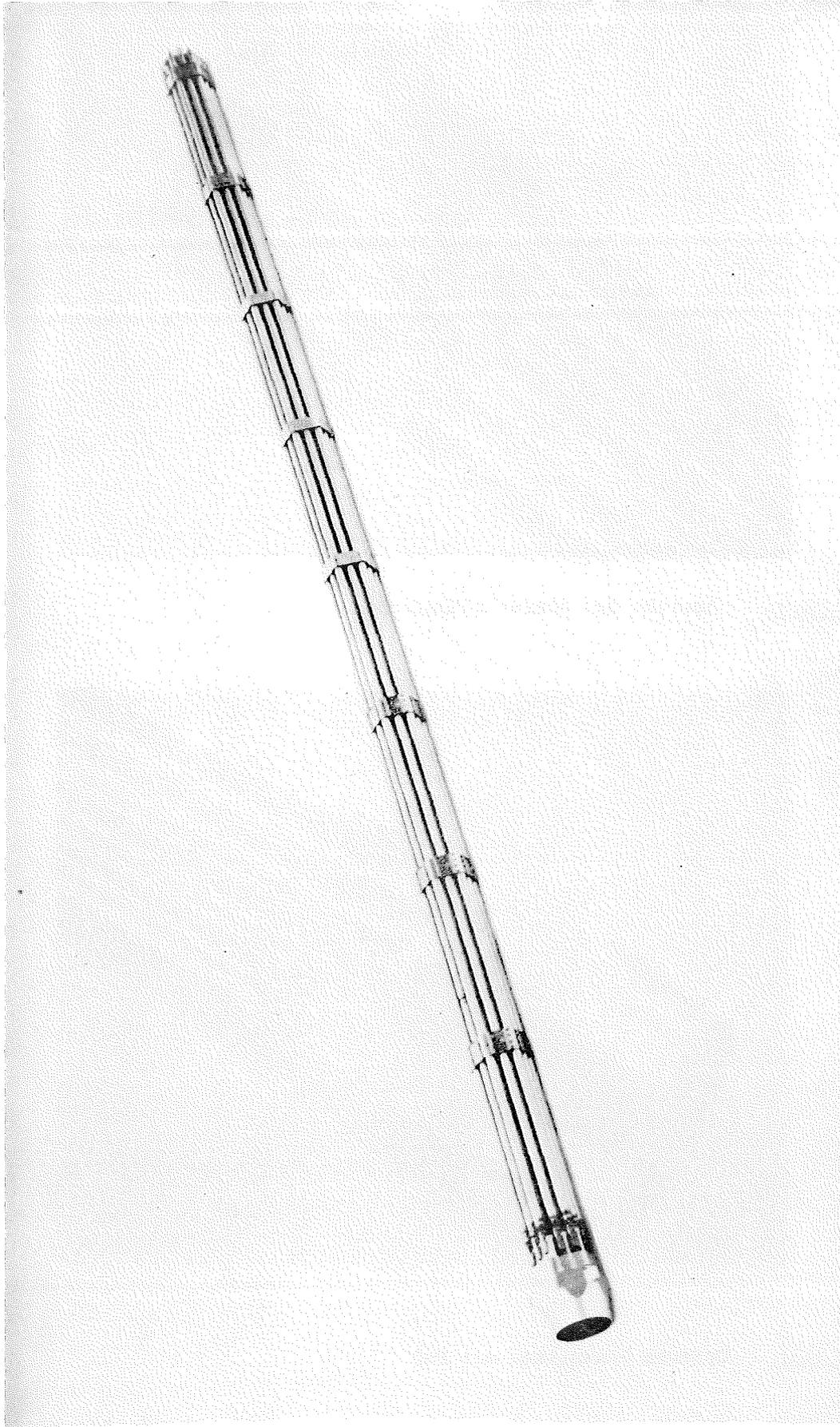


Abb. 3.4: Komplettes Bündel ohne Kasten

## 4. Bestrahlung im BR 2

### 4.1 Bestrahlungseinrichtung

Die Bestrahlung fand in einem geschlossenen Natrium-Versuchskreislauf, dem sogenannten "In-Pile-Sodium-Loop (IPSL)", im Zentralkanal des belgischen Versuchsreaktors BR 2 in Mol statt. Eine nähere Beschreibung dieser Einrichtung findet sich in /4/ und /5/, die Lage innerhalb des Reaktorkerns wird aus den Abb. 4.1, 4.2 und 4.3 deutlich.

Der IPSL-Kreislauf enthielt außer den eigentlichen Kreislaufkomponenten (Teststrecke mit Brennelementbündel, Ausdehnungstank, Na-He-Wärmetauscher, Na-Durchflußmesser, Na-Pumpen) eine Vielzahl von Temperaturmeßstellen mit Thermoelementen. In Abb. 4.4 sind die Thermoelementpositionen im Bereich der Teststrecke eingetragen. Besonders wichtig für die Auswertung der Betriebsbedingungen sind

- die Thermoelemente TE 13, TE 14 am Na-Eintritt in das Bündel,
- die Thermoelemente TE 30, TE 31, die durch den oberen Hohlteil des Strukturstabes in die Bündelmitte eingeführt wurden.

Der Na-Kreislauf enthielt keine Kaltfalle. Das Natrium wurde während des Einfüllens mittels eines "Filling Loop" gereinigt. Der gemessene Sauerstoff-Grenzwert im Na lag bei  $\leq 5$  ppm. Während und nach dem Experiment konnte keine Sauerstoff-Bestimmung erfolgen. Es ist jedoch davon auszugehen / 6 /, daß derselbe nach Auftreten der Stabdefekte stark anstieg.

Ein Hauptproblem bei der Auslegung des Bündels war der radiale Wärmeabfluß in das kältere, außen abwärts strömende Natrium. Um eine gewisse Isolierung zu erreichen, wurde daher um den Hüllkasten über die ganze Brennstablänge ein Isoliermantel aus Stahl gelegt, Dicke 2,8 mm, siehe Abb. 4.5. Dieser Isoliermantel enthielt Nuten für Vorheizdrähte und für Flußsonden. Mit letzteren konnte die axiale Verteilung des Neutronenflusses ermittelt werden. Der Loop-Einsatz IPSL war im BR 2-Kern von einem Cadmium-Schirm umgeben, wodurch das Neutronenspektrum des BR 2 in Richtung höherer Energie verschoben war.

### 4.2 Ablauf der Bestrahlung

Die Leistungsgeschichte des BR 2 während der Mol-7B-Bestrahlung ist in Abb. 4.6 dargestellt. Die Bestrahlung begann am 11.7.1972 und endete am 13.2.1974.

Während der 18 BR 2-Zyklen, die einer Bestrahlungszeit von 383,9 äquivalenten Volllasttagen entsprechen, erfolgten insgesamt 30 Normal- und Schnellabschaltungen des Reaktors.

Im Zyklus 03/73 trat nach einer Schnellabschaltung ein erstes Schadenssignal (Spaltgas im Schutzgas) auf. Damit deutete sich nach 186 Volllasttagen, das ist etwa die Hälfte der vorgesehenen Bestrahlungszeit, ein Stabdefekt an. Es wurde - ungeachtet dieses so früh aufgetretenen Stabschadens - beschlossen, das Bündel bis zu dem spezifizierten Zielabbrand weiter zu bestrahlen.

Die Leistung des Bündels schwankte im Laufe der Bestrahlungszyklen zwischen 280 und 340 kW, der Mittelwert war 320 kW. Die Wärmeproduktion in den 18 Stäben entspricht der Bündelleistung abzüglich der Gamma-Heizung im Loop.

Die gesamte Gamma-Heizung wird mit 5,6 kW angegeben. Der Berechnung wurde ein Wert von 1 Watt pro Gramm Strukturmaterial im Flußmaximum des Bestrahlungskanals zugrunde gelegt.

Tabelle XIV: Mol-7B-Bestrahlungsdaten

Bestrahlungszeit	11.7.1972 - 13.2.1974; 383,9 Volllasttage
Bestrahlungsposition	Zentralposition im BR 2 im IPSL
Gesamtleistung des Bündels	280 - 340 kW
Max. lineare Stableistung	586 W/cm
Max. lokaler Abbrand	125000 MWd/t Me
Schneller Neutronenfluß	$2,95 \cdot 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> s (lok.Max., zeitl. gemittelt)
Schnelle Neutronenfluenz	$1,12 \cdot 10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> (lokales Maximum)
Temperaturen im Heißkanal	
- Na-Eintritt	450 °C
- Na-Austritt	675 °C
- max. Hüllwandmitte	697 °C

#### 4.3 Neutronenfluß und Fluenz

Infolge der Cadmium-Abschirmung stand das Bündel in einem Neutronenfluß vom epithermischen bis zum schnellen Energiebereich. Der epithermische Fluß ist hierbei fast ausschließlich für die Kernspaltungen und die Spaltrate in den Brennstäben zuständig. Er erleidet im Bündel eine Flußabsenkung in radialer

Richtung von außen nach innen und entsprechend sind auch die Stabileistungswerte unterschiedlich. Der schnelle Neutronenfluß dagegen hat seinen höchsten Wert im Bündelzentrum.

Die Bestimmung des schnellen Flusses erfolgte mit Fe-Monitoren, die am Hüllkasten angebracht waren, nach der Kernreaktion  $^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$ . Abb. 4.7 bringt die so ermittelte axiale Flußverteilung am Hüllkasten sowie die daraus errechnete Fluenz. Beim Neutronenfluß handelt es sich hierbei um über die ganze Bestrahlungszeit gemittelte Werte. Um auf die Flußwerte an den Brennstäben selbst zu kommen, sind Korrekturfaktoren anzubringen. Diese und die sich daraus ergebenden Flußwerte im axialen Flußmaximum sind in Tabelle XV zusammengefaßt.

Tabelle XV: Schneller Neutronenfluß und Fluenz im axialen Flußmaximum

	Faktor	Schneller Fluß ( $10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> s)	Fluenz ( $10^{22}$ n/cm <sup>2</sup> )
Hüllkasten	1,00	2,42	0,92
Eckstab	1,12	2,71	1,03
Randstab	1,16	2,81	1,07
Innenstab	1,22	2,95	1,12

#### 4.4 Stableistung und Abbrand

Wie bereits in Kapitel 1 und 2 ausgeführt, sollte die maximale Stableistung (für den Eckstab) bei 450 W/cm und der Abbrand bei 9 at-% liegen. Die zerstörende Nachuntersuchung, speziell die Abbrandmessungen an einer Reihe von Stäben in drei unabhängigen Labors erbrachte die Aussage, daß der maximale Abbrand ca. 13 at-% betrug.

Unter Berücksichtigung des in Kapitel 6.2 angegebenen Korrekturfaktors 1,22 ist in Abb. 4.8 der zeitliche Verlauf der lokal maximalen Stableistung für einen Eckstab eingetragen. Die entsprechenden Werte für die anderen Stabpositionen sind niedriger. Für einen Randstab ist eine Minderung um etwa den Faktor 0,93 anzusetzen, für einen Innenstab um den Faktor 0,79. Weiterhin ist in Abb. 4.8 der Verlauf des Abbrandes für einen Eckstab angegeben.

Die axiale Verteilung der Stableistung über die Stablänge ist in Abb. 4.9 wiedergegeben. Es handelt sich dabei um zeitliche Mittelwerte über alle Zyklen. Zur Verdeutlichung wird eine Zusammenstellung der Maximal- und Mittelwerte in Tabelle XVI gegeben.

Tabelle XVI: Lineare Stableistung, Maximal- und Mittelwerte in W/cm

	Lokaler und zeitlicher Spitzenwert	Zeitlicher Mittelwert des lokalen Maximums	Zeitlicher Mittelwert des axialen Mittels
Eckstab	586	550	488
Randstab	545	520	445
Innenstab	463	455	378

Es sei darauf hingewiesen, daß eine erneute Nachrechnung der Leistungsgeschichte des Bündels - siehe hierzu Kapitel 7.1 - einen höheren Korrekturfaktor als 1,22, nämlich 1,34, für die Stableistung erbrachte. Wegen der recht großen Fehlerbandbreite wird dies aber nicht weiter berücksichtigt.

#### 4.5 Temperaturen

Der Temperaturverlauf im Bündel wurde mit Hilfe von Thermoelementen am Natrium-Eintritt und in der Bündelmittel bestimmt, siehe hierzu Abb. 4.4. Die maximale Hüllwandmittentemperatur wird mit 697 °C angegeben. In Abb. 4.10 sind die aus den Meßwerten ermittelten Temperaturverläufe für das Natrium und für die Hüllwandmitte aufgetragen. Eine offene Frage ist, ob die Quervermischung des Natriums hinreichend vollständig war.

Description

1. PRESSURE TUBE
2. FUEL ASSEMBLY
3. CENTRAL TUBE
4. Na CONTAINMENT TUBE
5. FILLING DEVICE
6. EXPANSION TANK
7. Na OUTLET CONE
8. Na CONNECTING PIPE
9. DOUBLE PASSAGE
10. Na RETURN COLLECTOR
11. HEAT EXCHANGER Na/He
12. MAGNETIC FLOWMETER
13. ELECTROMAGNETIC PUMPS
14. Na PUMP COLLECTOR
15. Na RETURN PIPES (8)
16. VAPOUR TRAP (2)
17. He SUPPLY (Na COVER GAS 2)
18. He SUPPLY (GAS GAP 2)
19. He INLET EXPANSION BELLOW
20. He INLET CONE
21. He JACKET WITH INSULATION
22. HEAVY METAL SHIELD SUPPORT
23. HEAVY METAL SHIELD
24. HEAVY METAL SHIELD
25. GUIDE FOR WIRES
26. CONNECTION BOX
27. SLEEVE
28. SLEEVE
29. SLEEVE
30. POROUS METAL FILTER
31. CABLE HOLDER
32. He CONNECTION
33. EXPANSION BELLOW
34. CLOSURE FLANGE
  
40. LEAD SHIELD
41. O-RING HOLDER

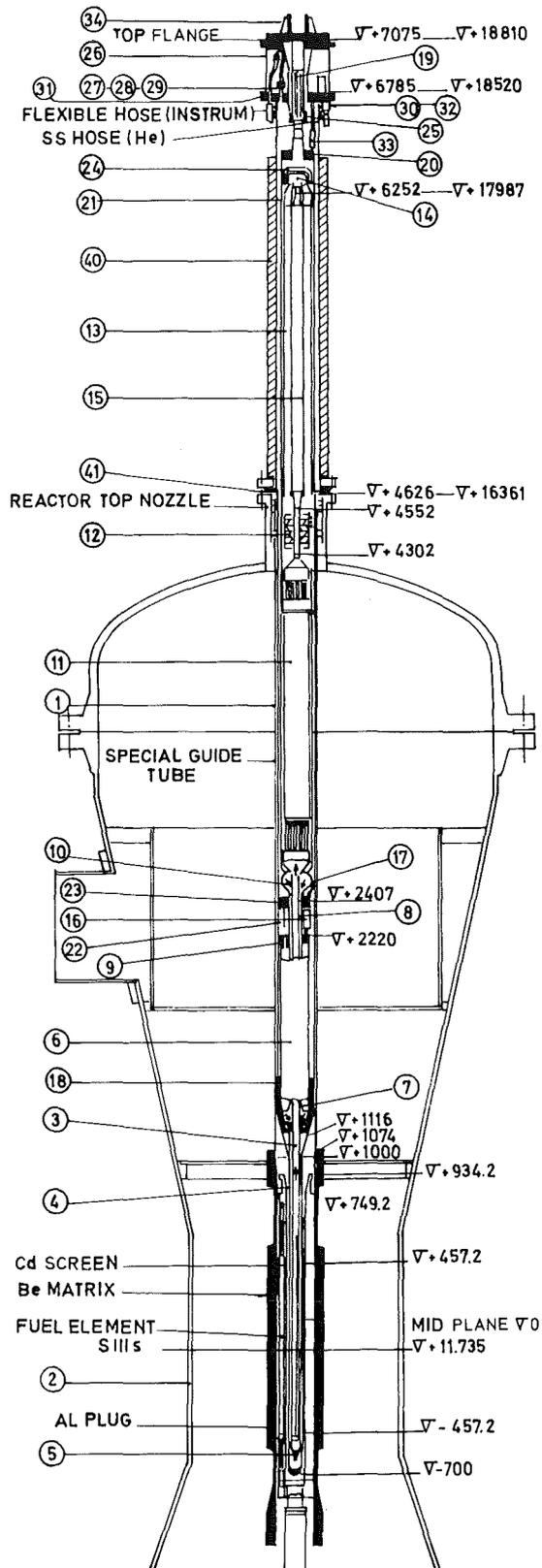


Abb. 4.1: Lage des Versuchskreislaufes IPSL im BR 2-Kern

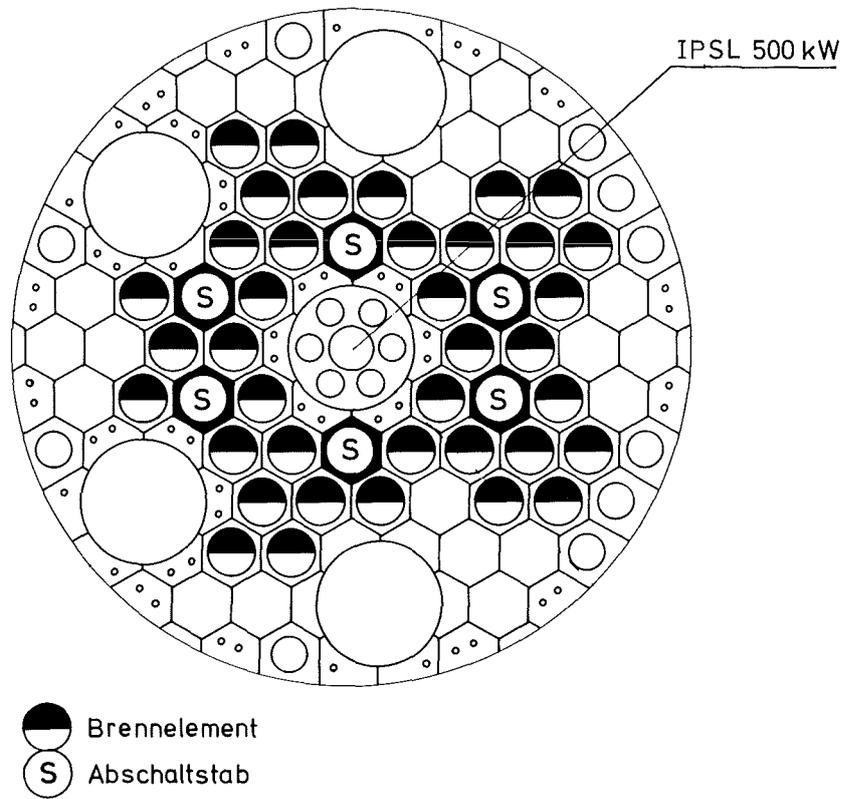
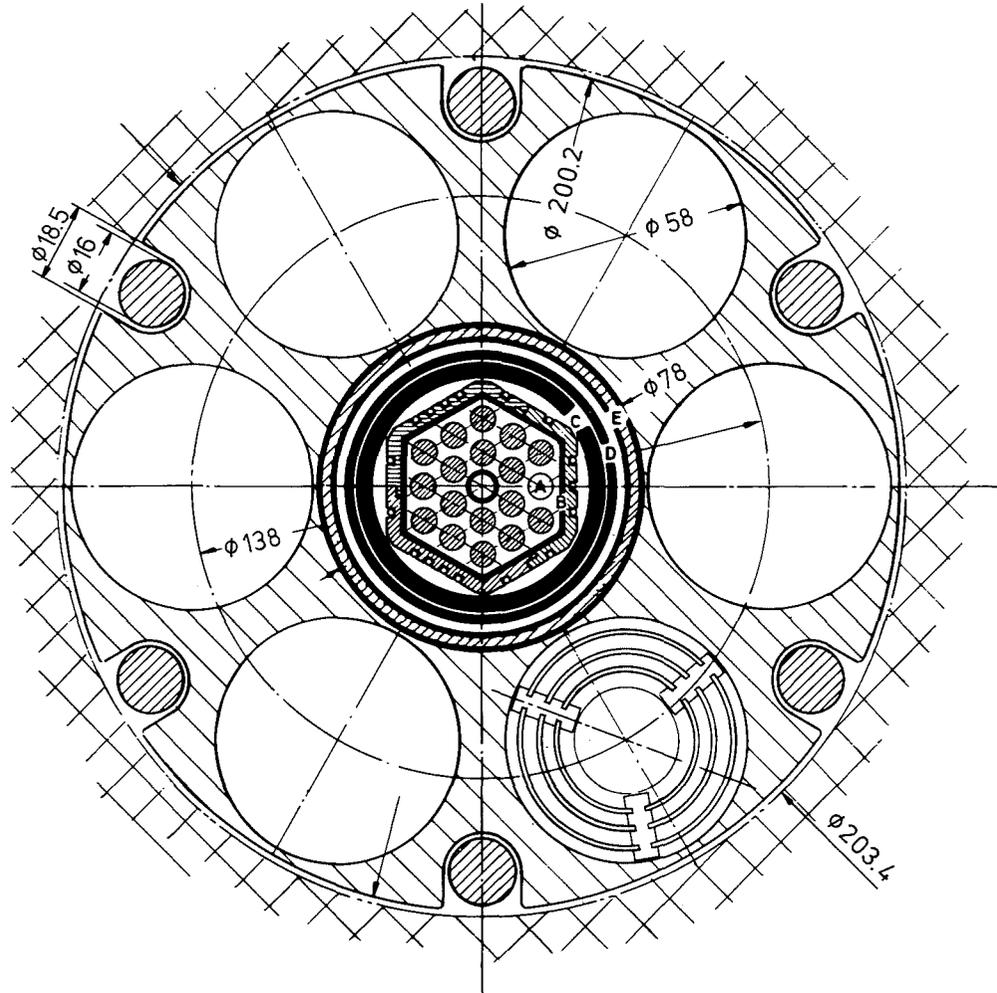


Abb. 4.2: Kernkonfiguration im BR 2



- A 19 FUEL PINS  $\phi 6$  : TRIANGULAR PITCH = 7.9  
CIRCULATION Na HEX A/F 36.6
- B CENTRAL TUBE HEX. A/F 36.6/38.6 (AISI 316)  
CIRCULATION Na HEX A/F 38.6/ $\phi 52$
- C Na CONTAINMENT TUBE  $\phi 52.1/58.9$  (AISI 316)  
STAGNANT He  $\phi 58.9/60.9$
- D PRESSURE TUBE  $\phi 60.9/64.2$  (AISI 316)  
H<sub>2</sub>O  $\phi 64.2/69$
- E Cd SCREEN  
INSIDE CLADDING  $\phi 69/71$  (Al)  
Cd  $\phi 71/76$   
OUTSIDE CLADDING  $\phi 76/78$  (Al)

Abb. 4.3: Querschnitt durch den 500 kW-Kreislauf IPSL auf Reaktormittelebene

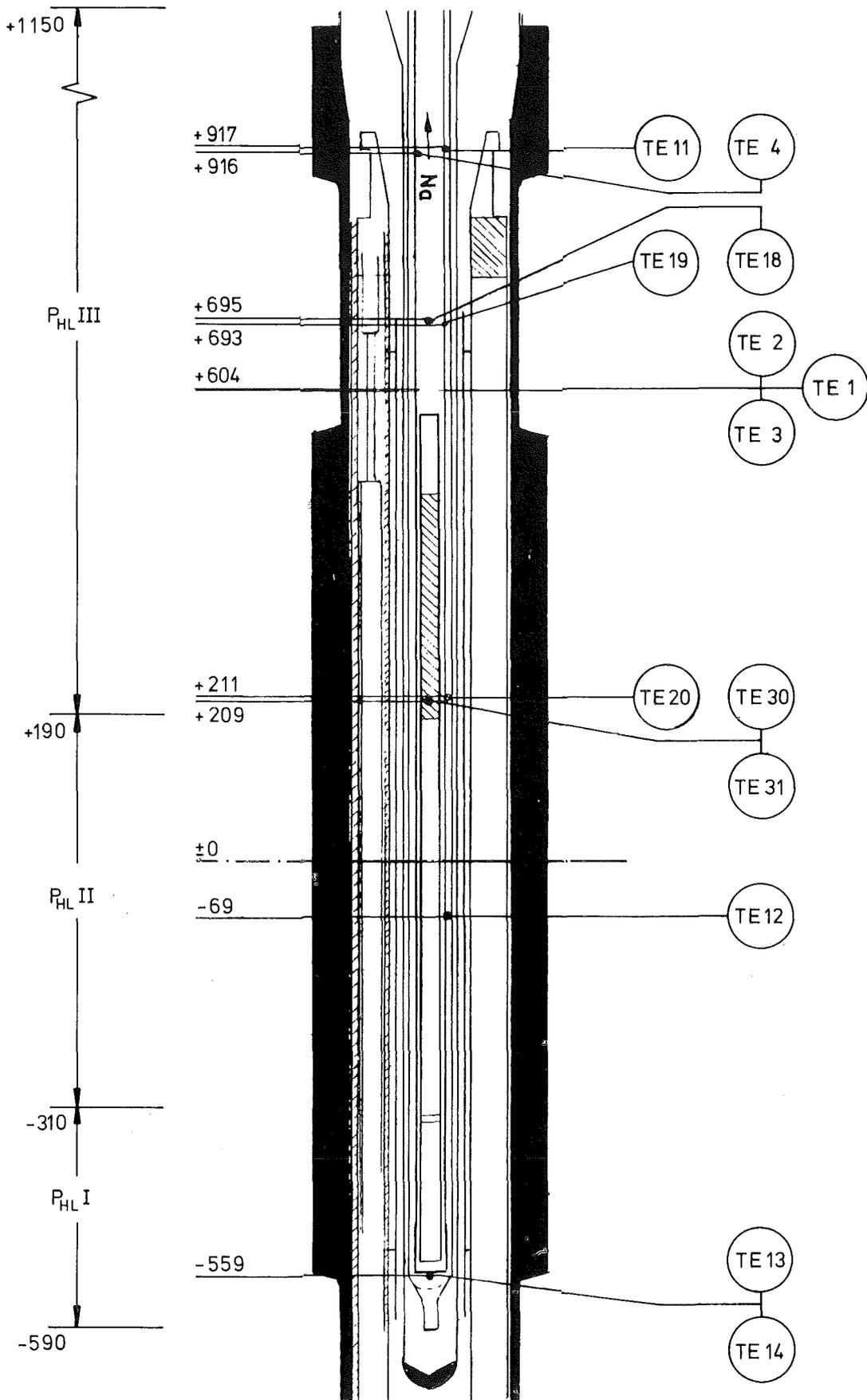


Abb. 4.4: Thermoelementpositionen im Bereich der Teststrecke des IPSL

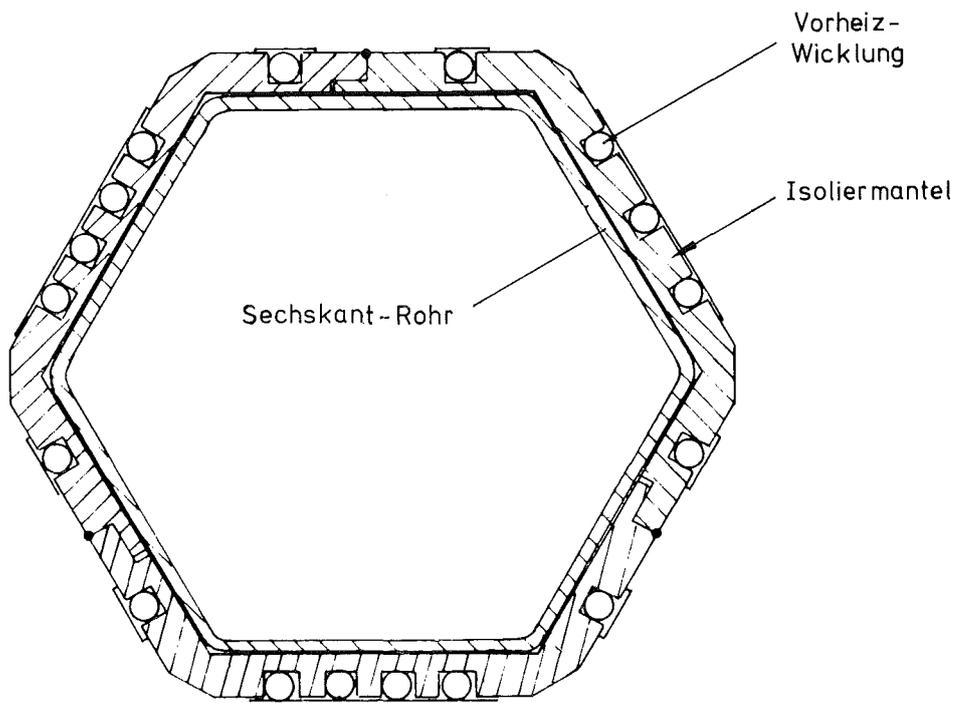


Abb. 4.5: Isoliermantel um den Hüllkasten

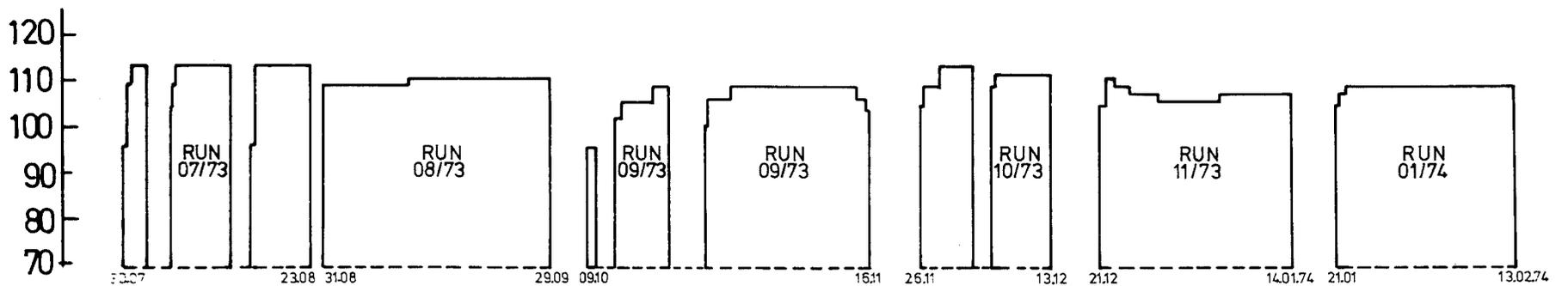
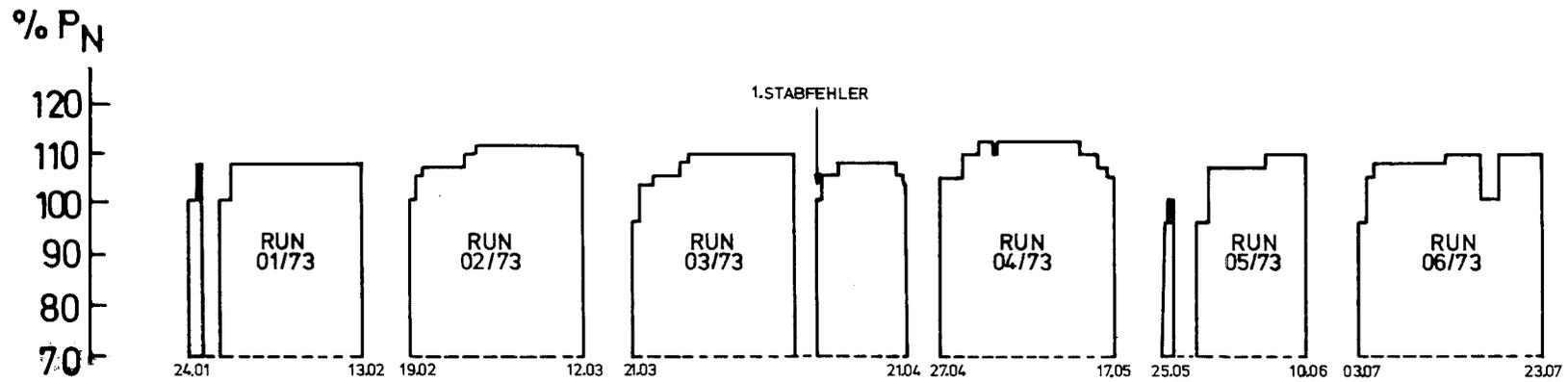
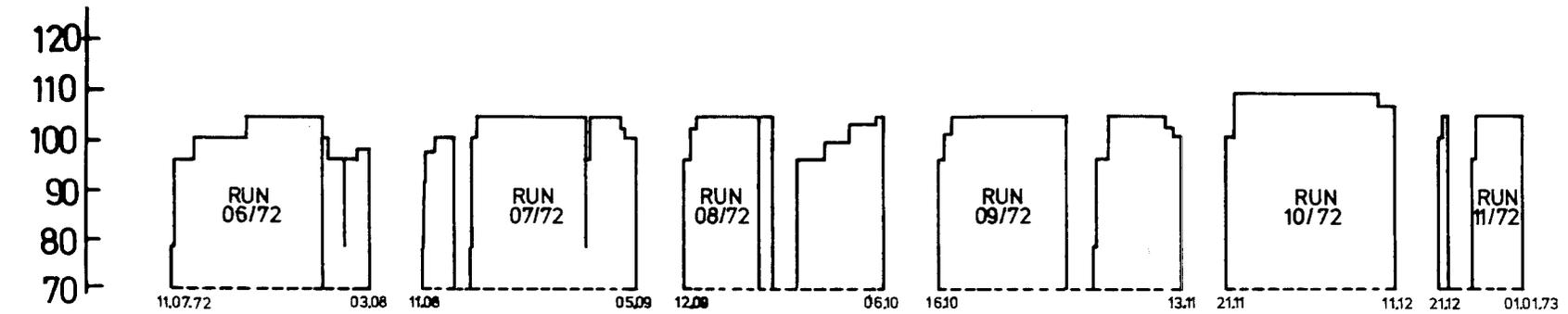


Abb. 4.6: Leistungsgeschichte des BR 2 während der Mol-7B-Bestrahlung

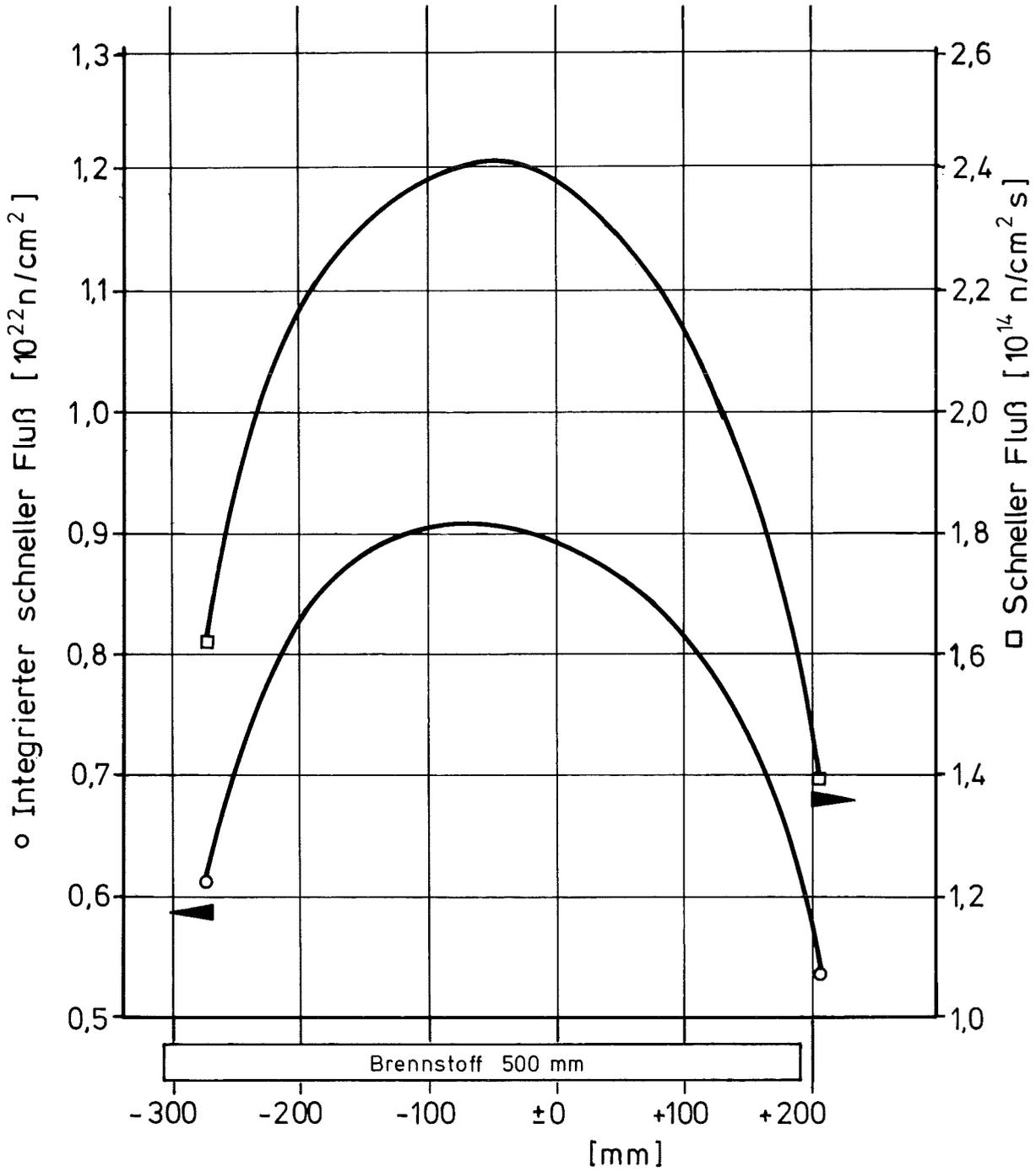


Abb. 4.7: Axiale Verteilung des schnellen Neutronenflusses am Hüllkasten



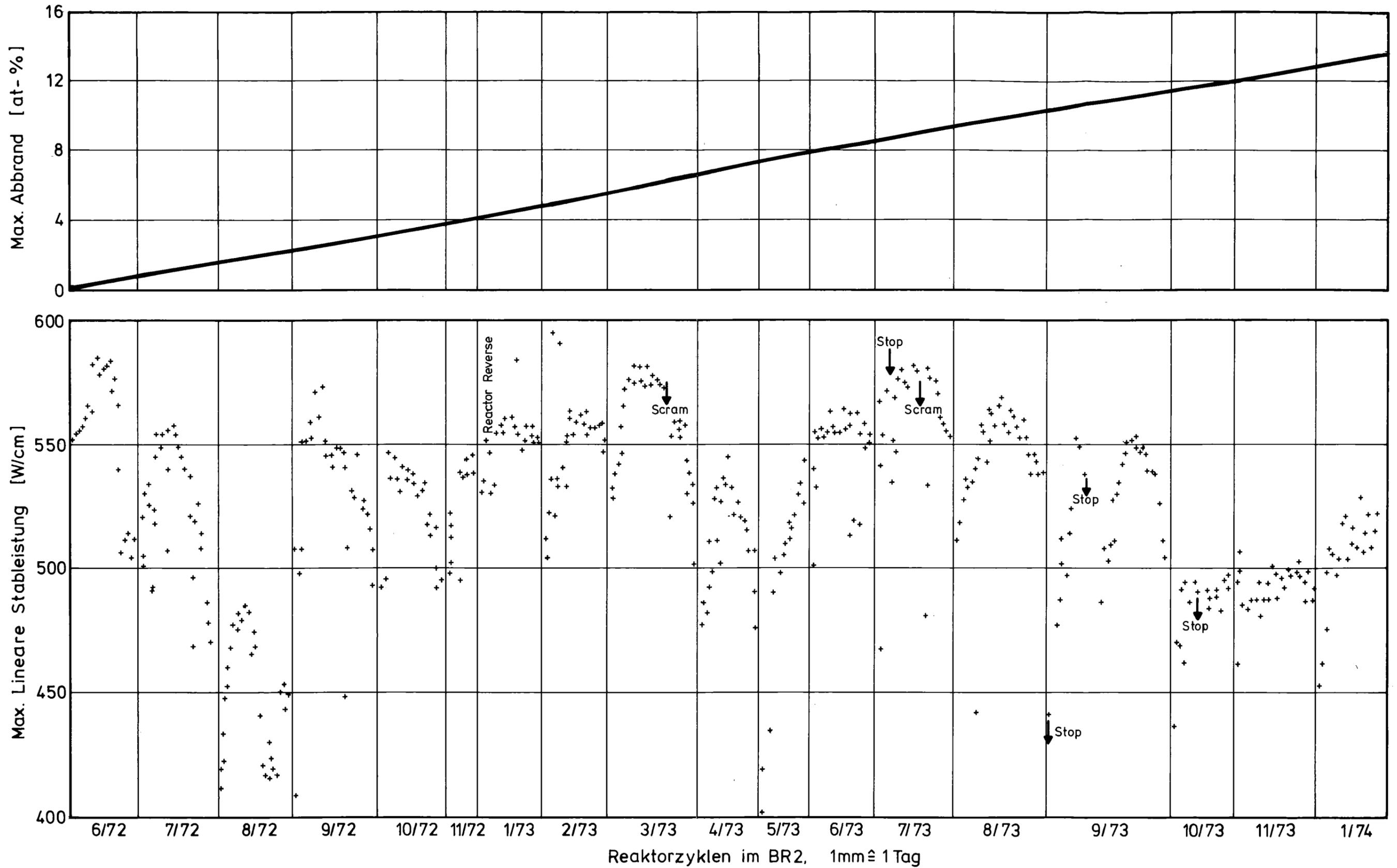


Abb. 4.8: Stableistung und Abbrand in einem Eckstab



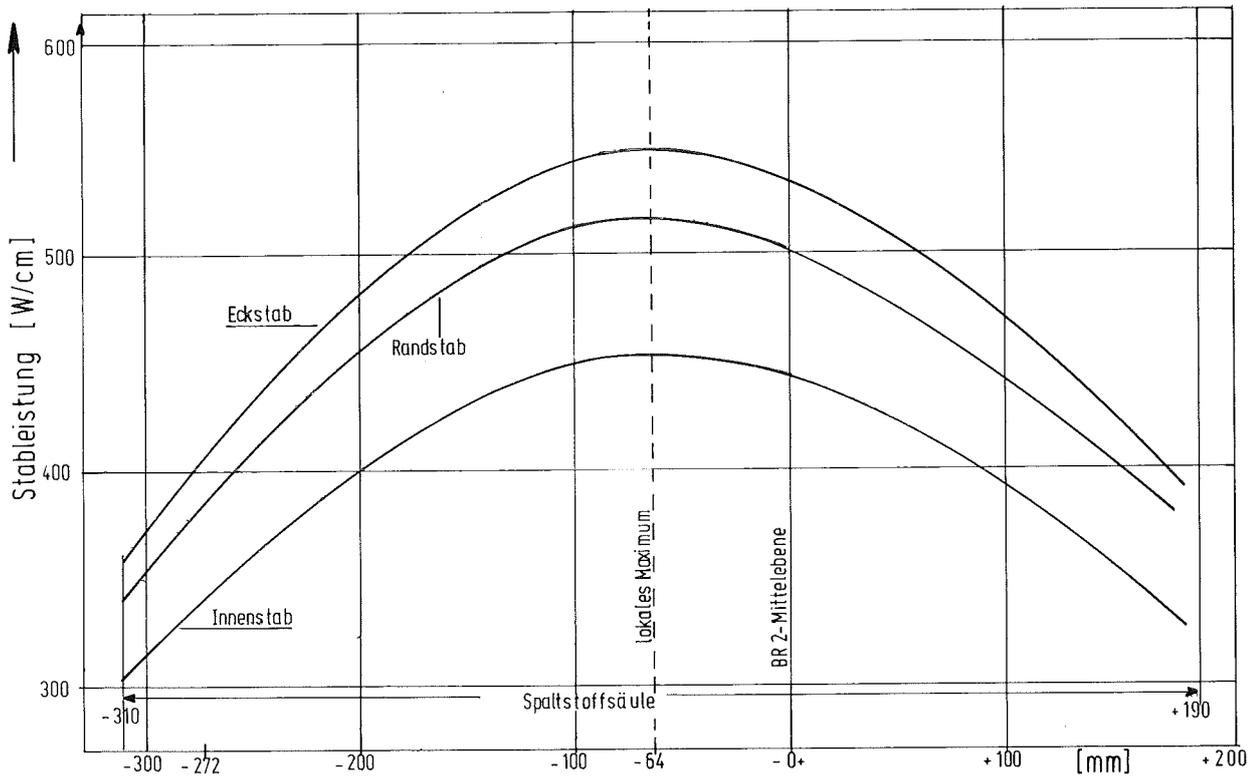


Abb. 4.9: Axialer Verlauf der Stableistung, zeitlicher Mittelwert über alle Zyklen

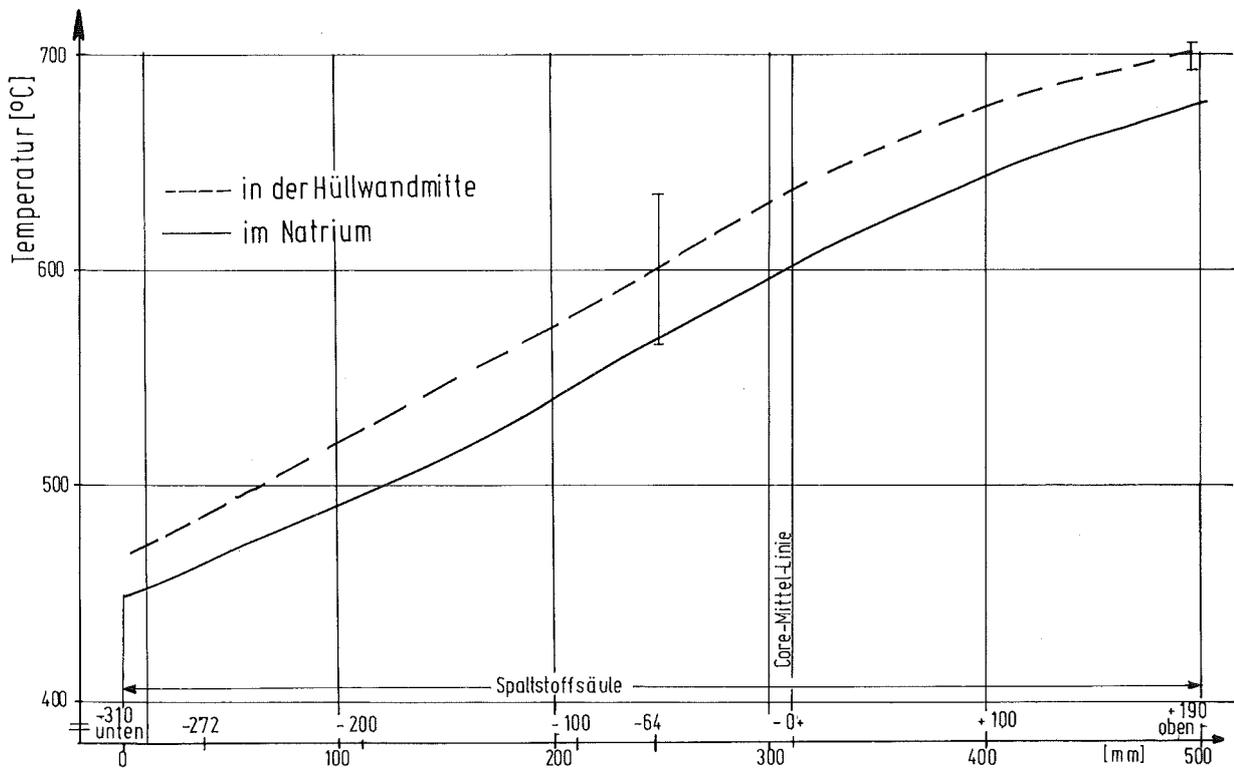


Abb. 4.10: Temperaturverlauf im Heißkanal längs eines Eckstabes

## 5. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

### 5.1 Durchleuchtung des Bündels

Das gesamte Bestrahlungsloop wurde in Mol am BR 2 mittels Neutronen radiographiert. Die Handhabung des langen Loop-Einsatzes bereitete hierbei Schwierigkeiten, speziell das Ausrichten in exakten Orientierungen.

Dennoch hat die Neutronografie ein wichtiges Detail, nämlich Brennstoffablagerungen an der Anströmseite der Abstandshalter und im Umlenkbogen, erkennen lassen (Abb. 5.1).

Das Bündel wurde im mittlerweile erstarrten Natrium im Na-Führungsrohr nach Karlsruhe transportiert und dort nochmals einer radiographischen Inspektion unterzogen. Der Einsatz wurde mittels eines Betatrons (10 MeV Röntgenstrahlung) durchstrahlt. Die Strahlrichtung konnte hierbei so ausgerichtet werden, daß der Blick durch die Stabreihen gelang. Die Aussagekraft im Schadensbereich (oberer Abstandshalter) war allerdings sehr gering. Kleinere Brennstoffablagerungen wurden wegen der höheren Energie der Gamma-Quanten durchstrahlt und konnten so nicht mehr sichtbar gemacht werden (Abb. 5.2).

### 5.2 Zerlegung des Bündels

Das hexagonale Mantelrohr des Bündels war - wie bereits erwähnt - mit einem Isoliermantel umgeben, in dem axial ein Flußmonitor eingebettet war. Derselbe wurde ausgebaut und für weitere Untersuchungen in Mol sichergestellt. Anschließend wurde der Heizmantel mittels Fräser aufgeschlitzt und vom Mantelrohr abgezogen. Da das Bündel wegen der massiven Stabschäden nicht durch Ziehen aus dem Mantelrohr entnommen werden konnte, mußte dasselbe ebenfalls durch Fräsen (an 2 gegenüberliegenden Seiten) aufgeschnitten werden. Danach konnte das Bündel freigelegt werden. Die Trennfuge lag zwischen den Stäben AM 11/GM O2 und PBU 04/ AU 08 (siehe Abb. 5.3). Die in Abb. 5.3 angegebene Pfeilrichtung deutet die Folge der Stabvereinzelung an. Die beiden Halbschalen wurden mit 1 und 2 gekennzeichnet. Halbschale 1 wurde nun entfernt und das Bündel in Halbschale 2 liegend fotografiert (Abb. 5.4).

An 3 Außenstäben konnte man bereits stärkere Hüllrohrschäden (z.T. aufklaffende Längsrisse) im Bereich von Abstandshalter G5 erkennen. Wie aus

Abb. 5.4 hervorgeht, befand sich auf den Oberflächen ein dünner Natriumoxid-Belag. Größere Natrium-Reste befanden sich an den Abstandshalter-Unterseiten (Anströmrichtung) und Schadensstellen. Die Stabkennzeichnungen an den Stopfen waren gut zu erkennen.

Es wurde versucht, die Durchbiegung des freigelegten Bündels zu messen. Wegen der großen Flexibilität desselben waren die Messungen nicht reproduzierbar. Von den Abstandshaltern G7 und G8 wurden die Schlüsselweiten vor und nach der Bestrahlung vermessen. Es ergaben sich maximal Differenzen von + 0,47 bis - 0,08 mm.

Es erfolgte nun die Vereinzelung der Stäbe. Anfänglich wurde versucht, die Stäbe aus den Abstandshaltern herauszuziehen. Zu diesem Zweck wurden die Halteplatten an den Fußenden der Stäbe (bei der Kote - 490 mm) durchgetrennt. Die äußeren Halteplatten konnten nun entfernt werden. Wegen der blockierenden Wirkung der Stabschäden in Höhe des Abstandshalters G5 konnten die Stäbe jedoch nicht gezogen werden. Es wurde daher entschieden, die Abstandshalter einzeln aufzuschneiden und so die Stäbe sukzessive zu entnehmen. Die Stäbe wurden nun in der in Abb. 5.3 angegebenen Reihenfolge freigelegt und entnommen. Sie waren mit Ausnahme von AU 07 alle defekt. Der Stab AU 07 wurde angestochen, um das freie Spaltgas zu messen. Es zeigte sich, daß der Stab kein freies Gas mehr enthielt. Da während der Demontage die Heiße Zelle im geschlossenen  $N_2$ -Kreislauf gefahren wurde, konnte mit dem normalen Spaltgasüberwachungssystem der Zellen kein Spaltgasausbruch detektiert werden. Mit Hilfe einer Lecksuche konnte eine Frässpur im Bereich des Plenums festgestellt werden, die von der Demontage der Abstandshalter herrühren muß.

Die Innenfläche von Halbschale 1 wurde ebenfalls fotografiert. An den Kontaktstellen mit den Abstandshaltern befinden sich Natrium-Reste. Im Bereich von G5 (Hüll-Heißstelle) ist ein dunkler Belag zu sehen.

Nach Entfernen der Halbschale 2 wurde das Bündel auch von der Gegenseite aus fotografiert. Hierbei wurden 3 Außenstäbe als defekt erkannt. Ein Schaden befand sich nicht im Bereich von G5 sondern ca. 250 mm darunter bei G3. Die Einzelaufnahmen der schadhaften Stellen im Bereich der Abstandshalter G3 und G5 werden in Abb. 5.5 und Abb. 5.6 wiedergegeben.

### 5.3 Fotodokumentation der einzelnen Stäbe

Die Schäden an den vereinzelten Stäben werden in einer Auswahl im Anhang I in den Abb. I.1 bis I.12 wiedergegeben.

#### 5.4 Dimensionskontrolle

Die Dimensionskontrolle an den stark geschädigten Stäben bereitete naturgemäß einige Schwierigkeiten. An den intakten Partien der Stäbe wurden Wendelschriebe mittels Meßschneiden und induktiven Wegaufnehmern aufgenommen. Die Maximal- und Minimalausschläge wurden gemittelt und so eine Mantellinie wiedergegeben. Im Bereich der Risse wurde mit einer Meßuhr in drei je 120° zueinander versetzten Ebenen gemessen. Die Abb. 5.7.a bis d enthalten diese Profile. Wie man sieht, sind in dem Schadensbereich die Durchmesseränderungen beachtlich. Die maximalen Aufweitungen werden nochmals gesondert in Tabelle XVII wiedergegeben. Eine Auswertung der Längenvermessung erscheint wegen der Stabschäden nicht sinnvoll.

Tabelle XVII: Lokale Defektaufweitung bei Mol-7B-Stäben

Stab-Nr.	Außenstab (o) Innenstab (i)	O/M-Wert	$\Delta D$ (%) <sup>+</sup>
AM-11	o		38,0
AU-03	o		16,7
AU-05	i		13,3
AU-06	i		8,3
AU-07	o	1,976	0,7
AM-13	o		50,0
AU-08	o		16,6
AM-16	o		66,6
AM-12	i		16,6
GU-03	o		50,0
GM-02	o	1,990	41,6

<sup>+</sup>) durch Auswertung von Röntgenbildern gewonnen.

#### 5.5 Gamma-Spektrometrie

Es wurden von allen Stäben Gamma-Scans bei drei verschiedenen Energiebereichen aufgenommen und zwar

- für den Bereich 400 - 1700 keV ein integraler Gamma-Scan,
- für den Bereich 640 - 680 keV ein Cs-137-Scan,
- für den Bereich 710 - 780 keV ein Zr/Nb-95-Scan.

Da diese Gamma-Profile im Bereich der Stabdefekte stark gestört sind, sollen hier nur die drei Profile des intakten Stabes (AU-07) wiedergegeben werden

(Abb. 5.8 - 5.10). Eine Auswertung hinsichtlich des Nuklid-Inventars der Stäbe wurde nur für das Cs-137 gemacht. Es wurde jeweils das Integral des Gamma-Scans des defekten Stabes von dem des intakten abgezogen und so der sogenannte Cs-Freisetzungswert ermittelt. Cs-137 ist bekanntlich im Kühlmittel Natrium völlig löslich und wird beim Auftreten von Stabdefekten vom Kühlmittel aus dem Stab ausgeschwemmt. Abb. 5.11 zeigt diese Freisetzungswerte für die untersuchten 11 Stäbe. Es ergibt sich eine mittlere Cs-137-Freisetzung von 86 %, ein Wert, der für höher abgebrannte Stäbe typisch ist.

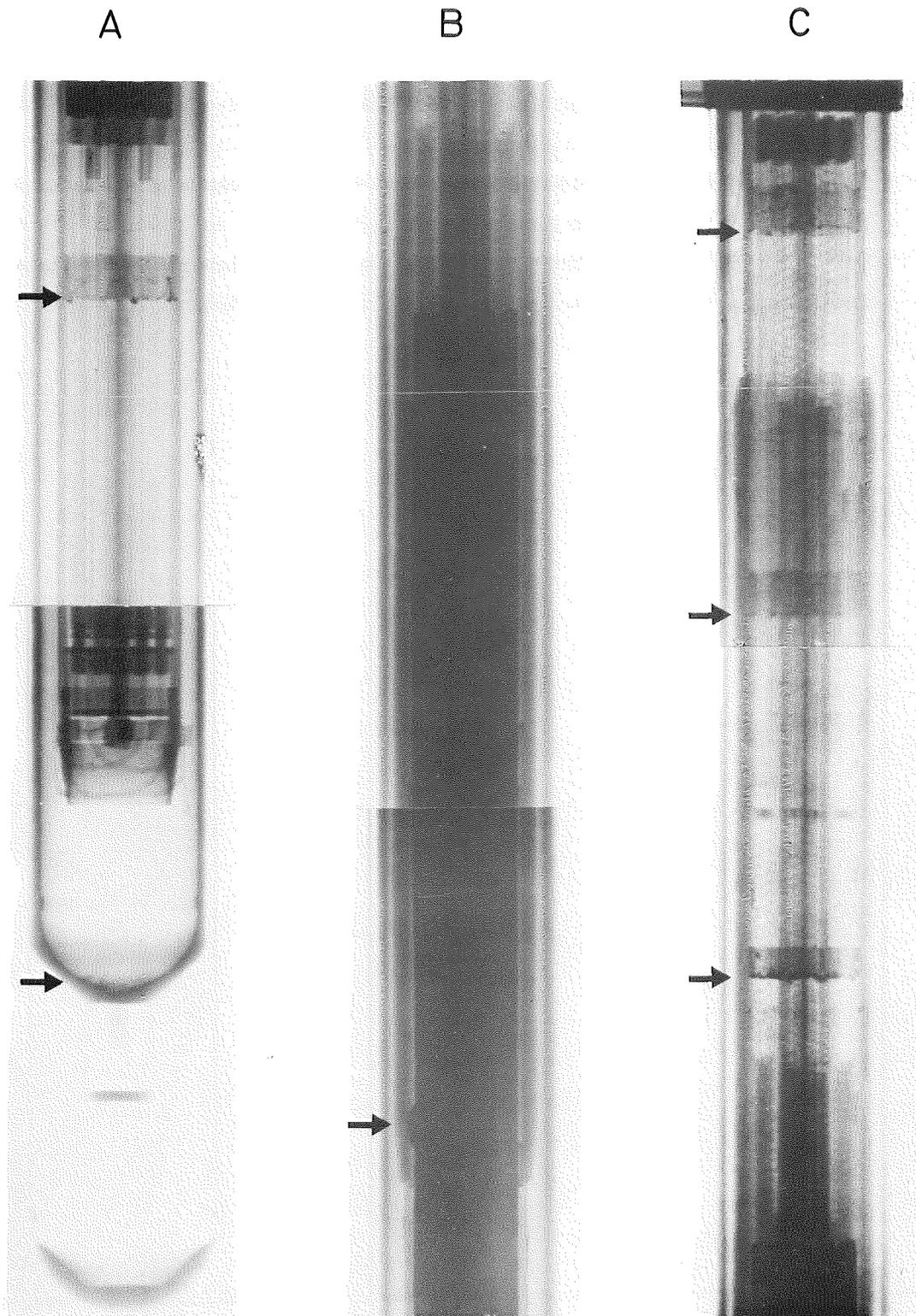
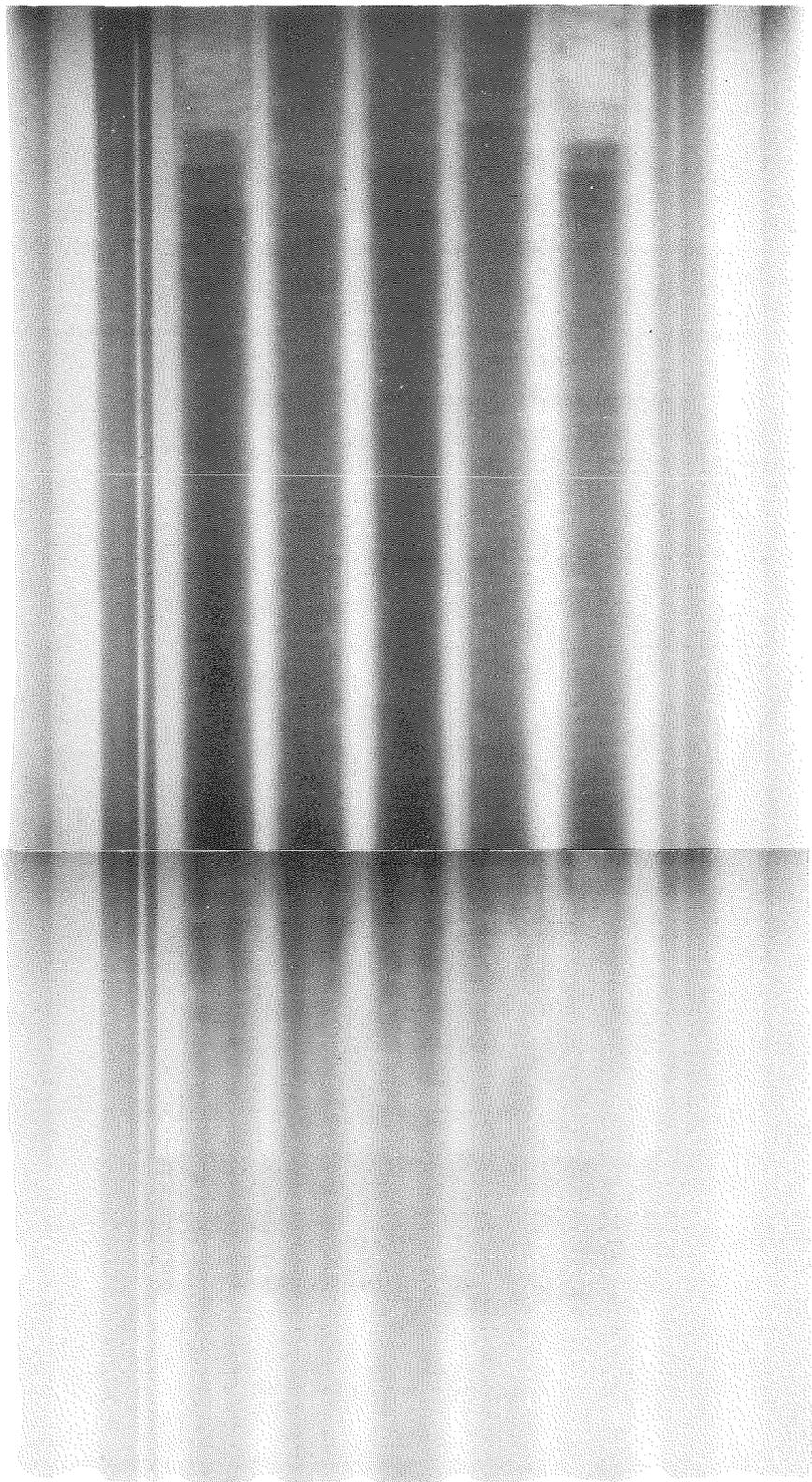


Abb. 5.1: Neutronografie des Bestrahlungseinsatzes



oben

-----  
Abstands-  
halter -----

Abb. 5.2: Betatron-Durchleuchtung im Bereich der Stabdefekte

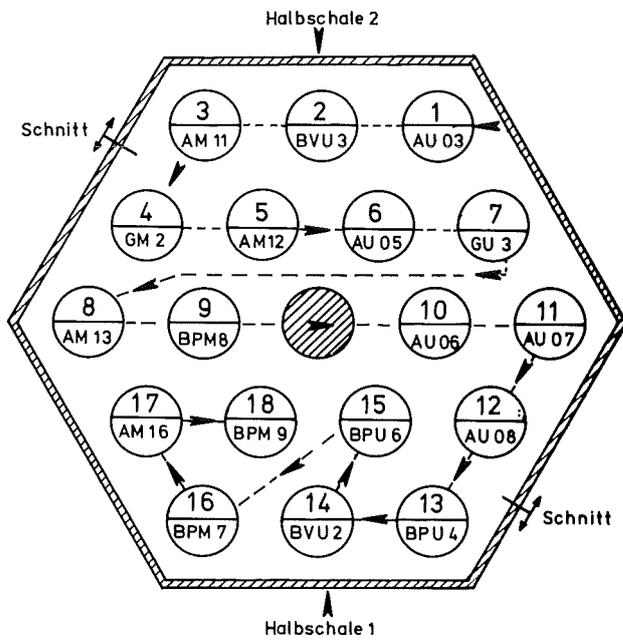
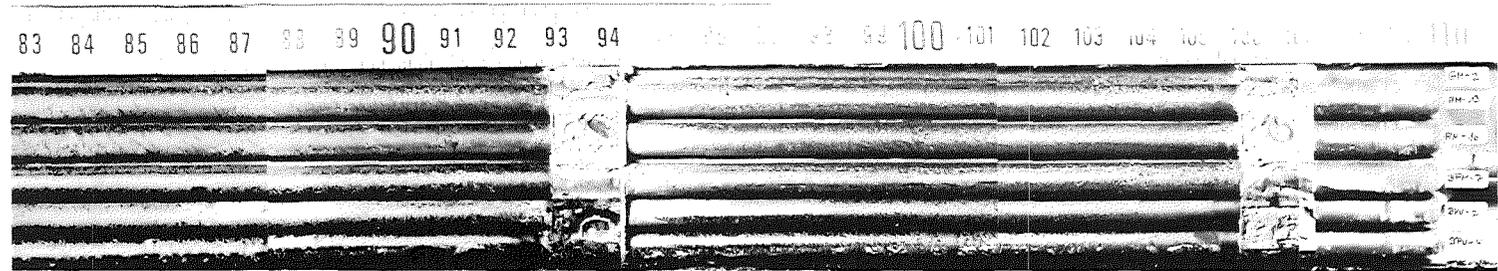
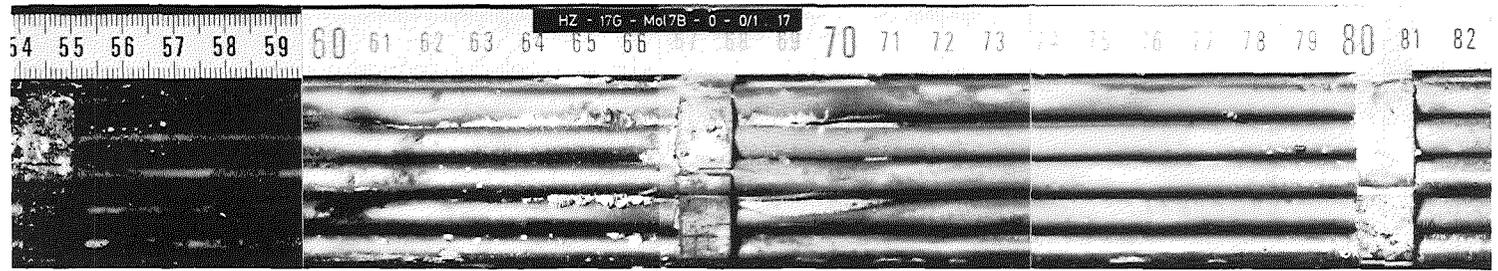
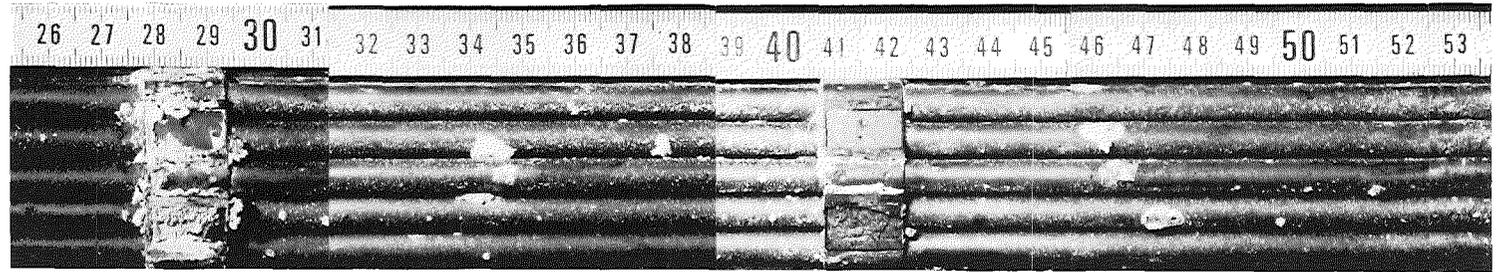
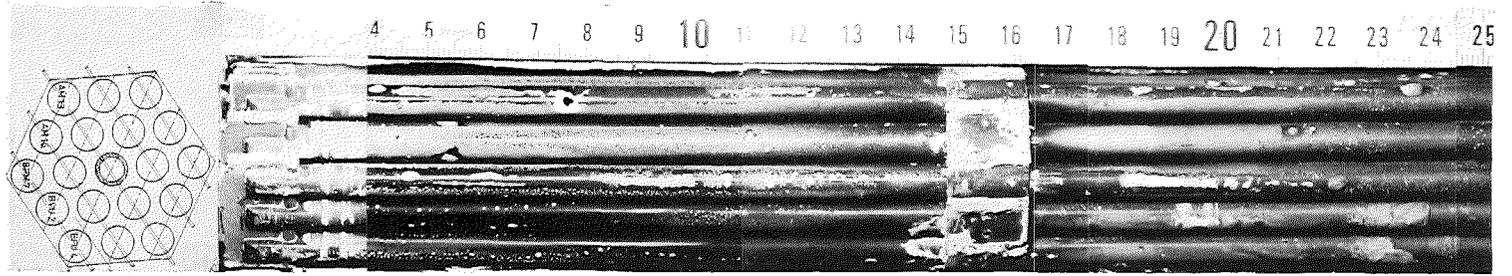


Abb. 5.3: Schematischer Ablauf der Vereinzelung der Stäbe

Abb. 5.4:

Freigelegtes Stabbündel



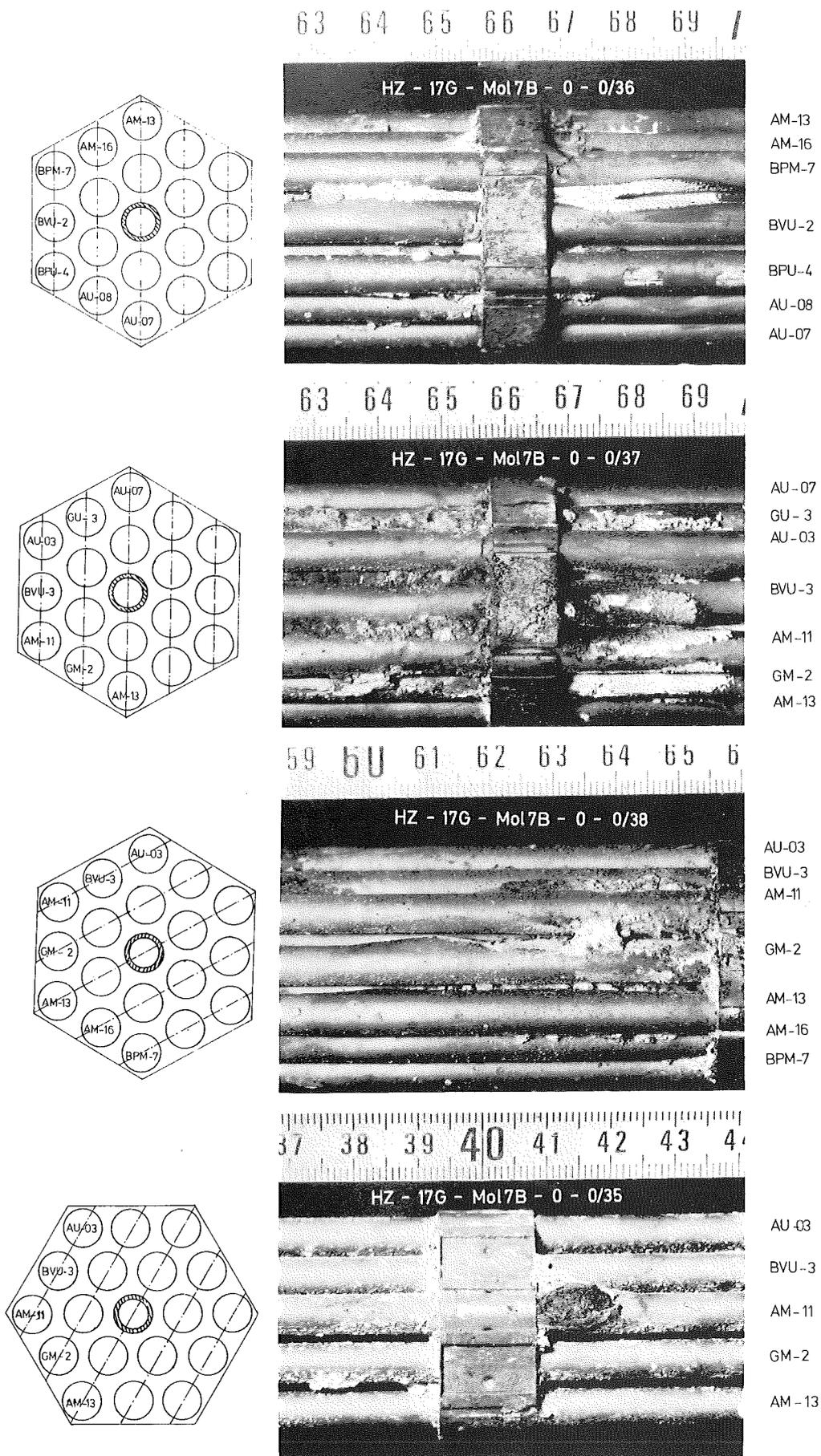


Abb. 5.5: Schadhafte Stellen in Höhe der Abstandshalter

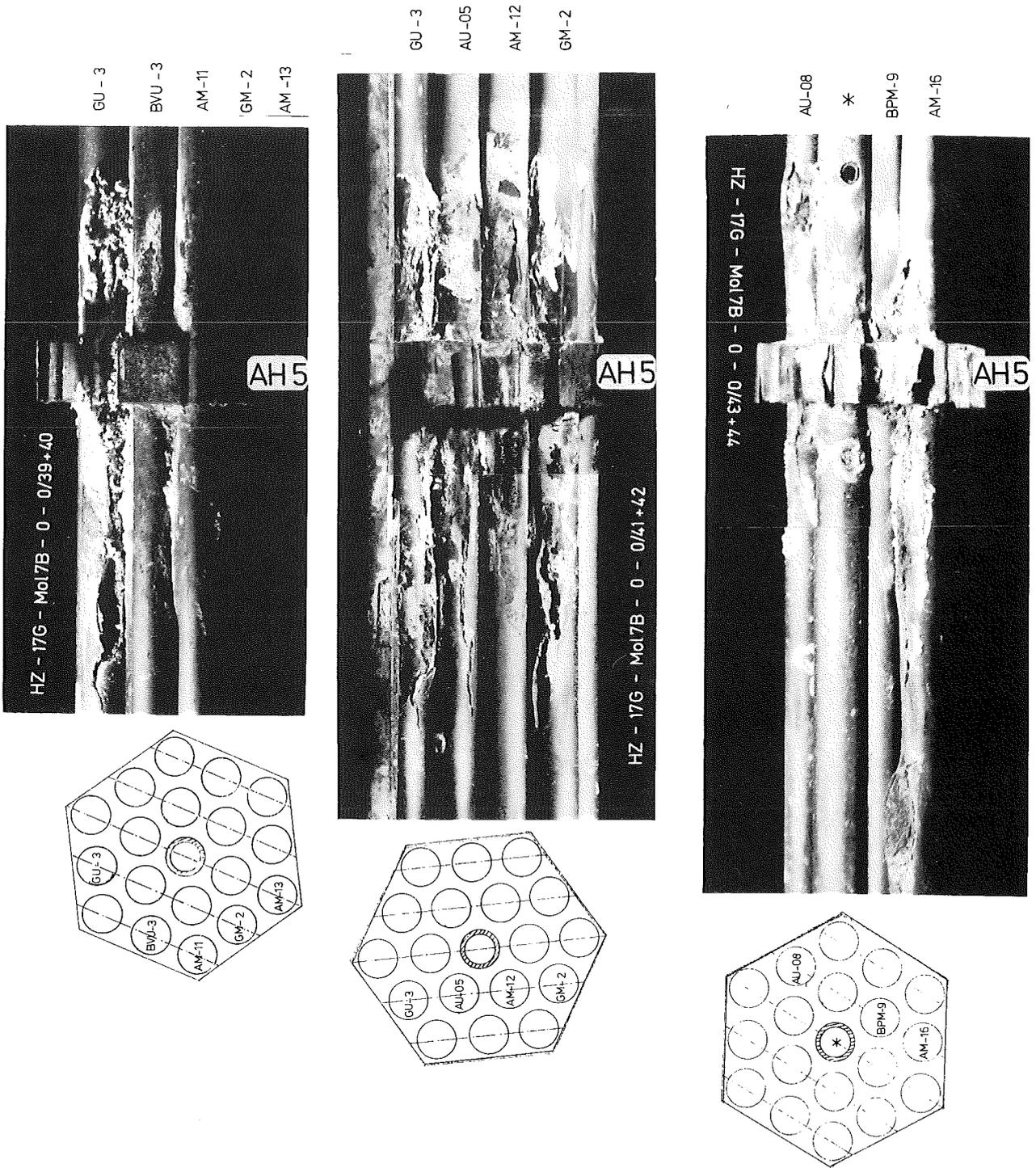


Abb. 5.6: Schadhafte Stellen in Höhe der Abstandshalter







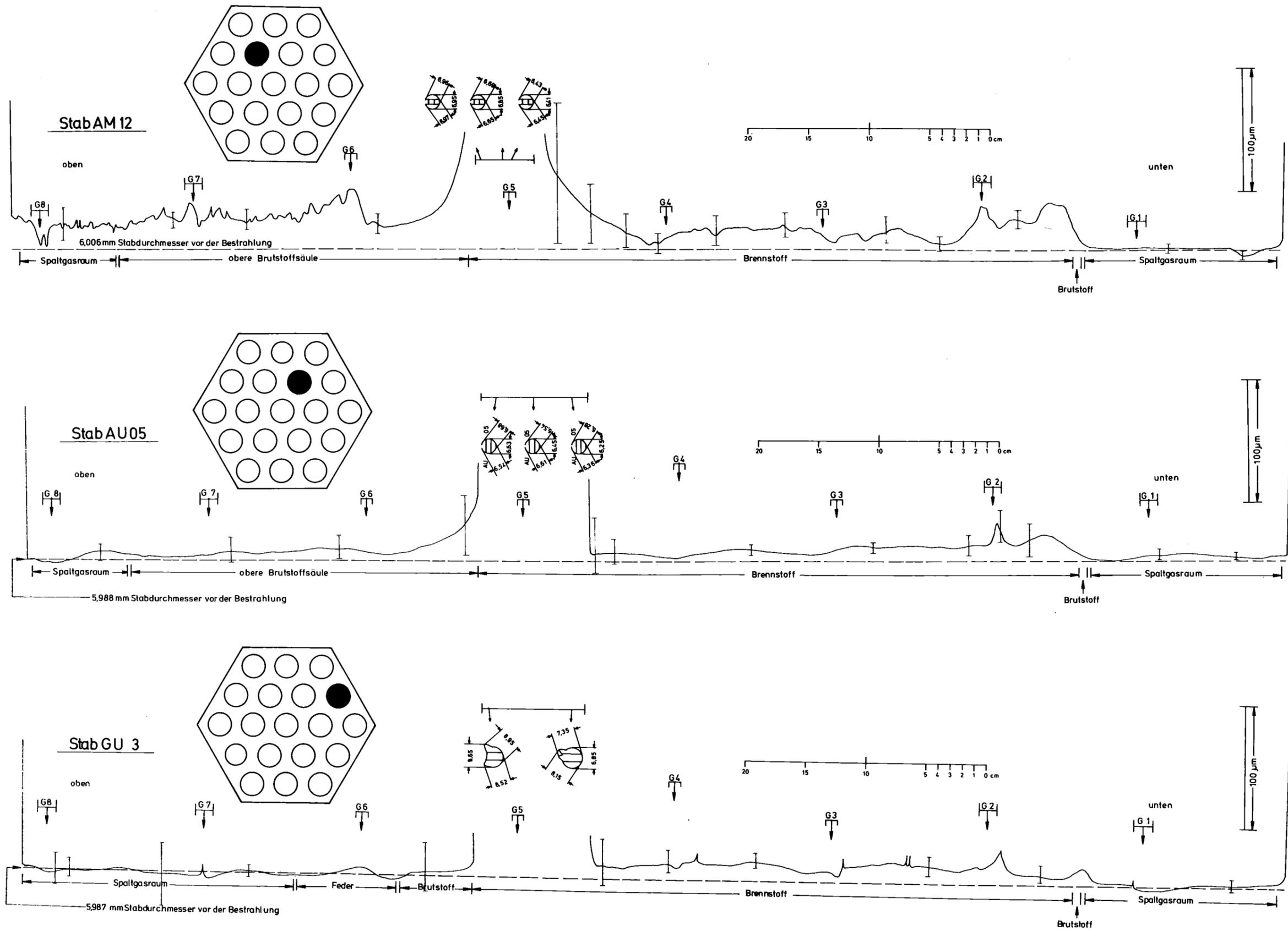


Abb. 5.7 b: Profilometrie der Einzelstäbe



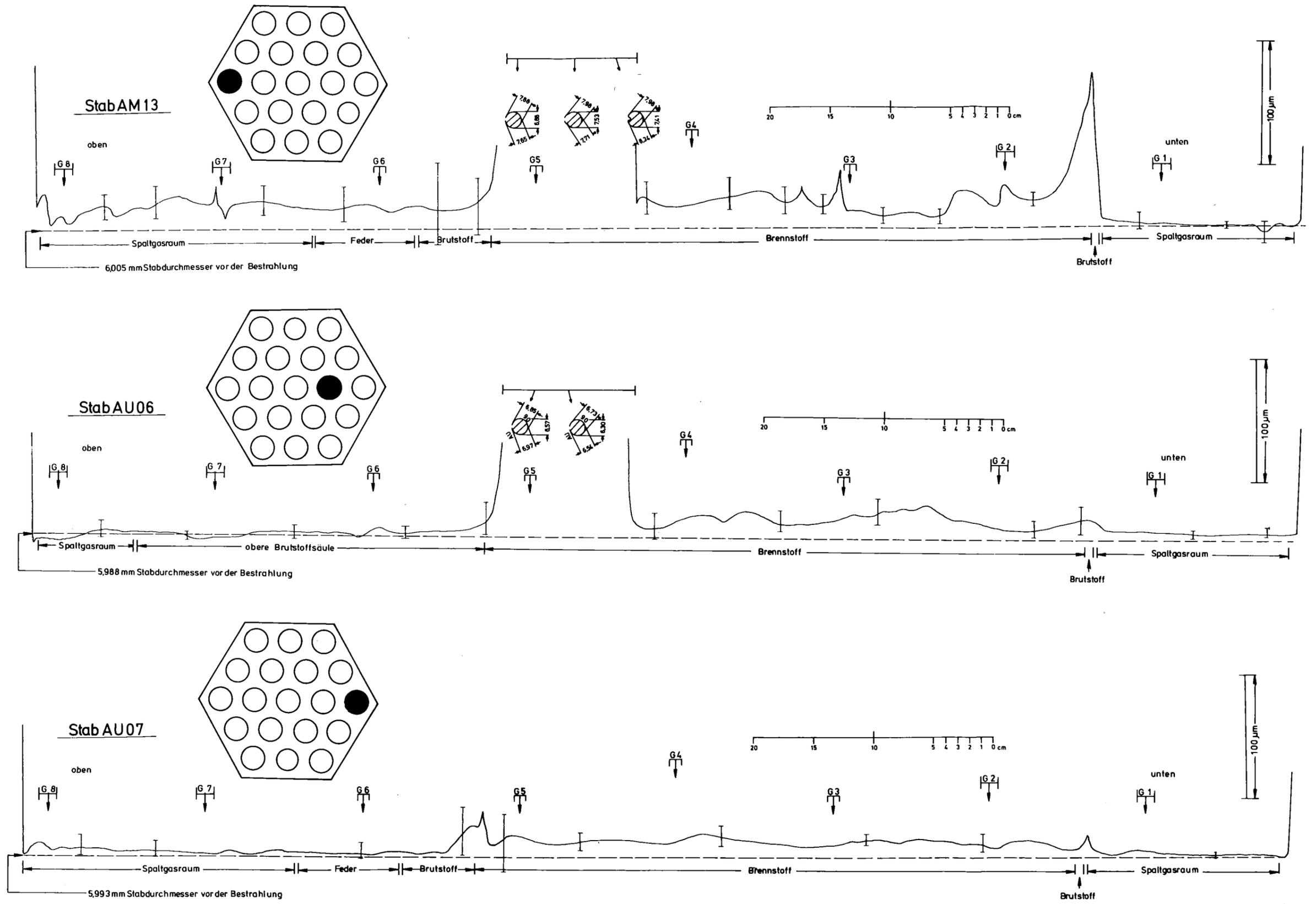


Abb. 5.7 c: Profilometrie der Einzelstäbe



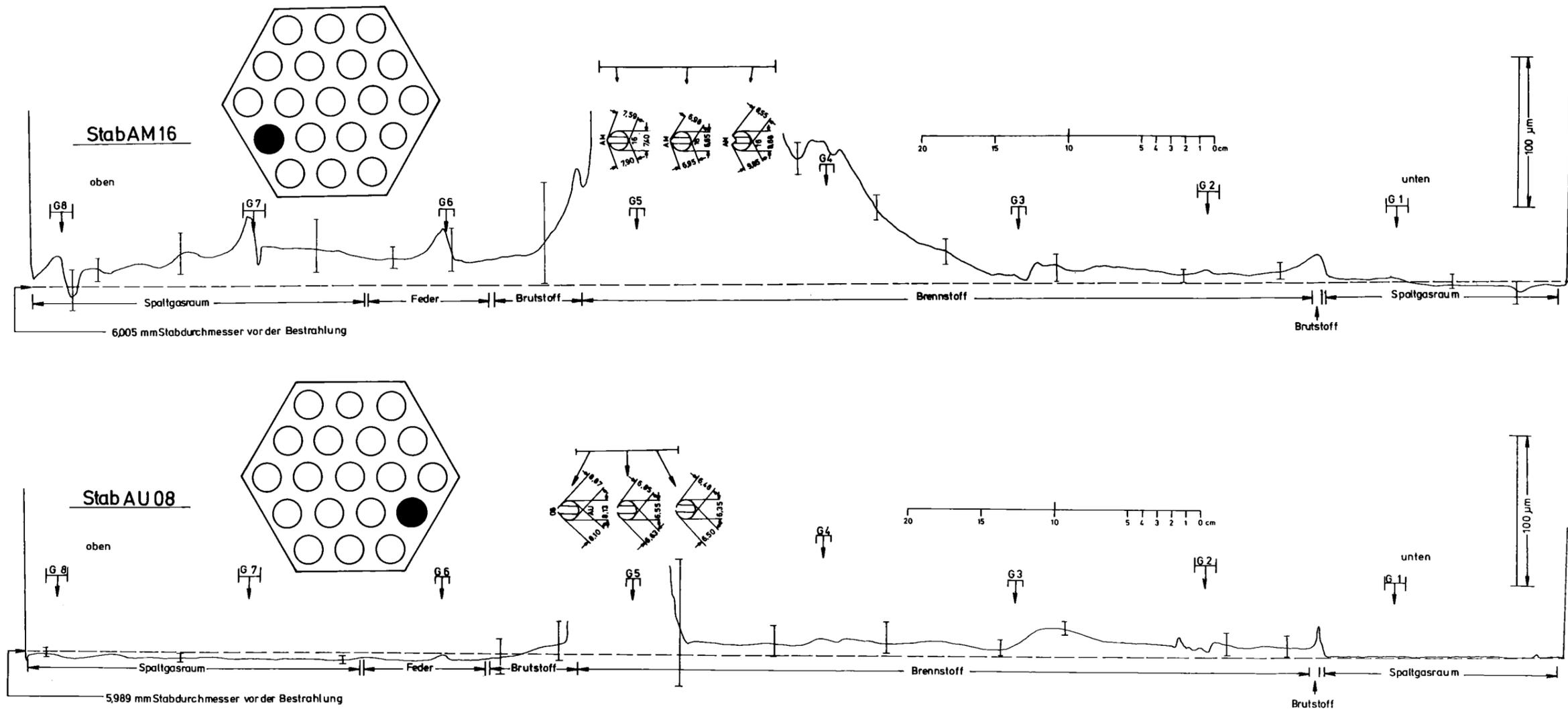


Abb. 5.7 d: Profilometrie der Einzelstäbe



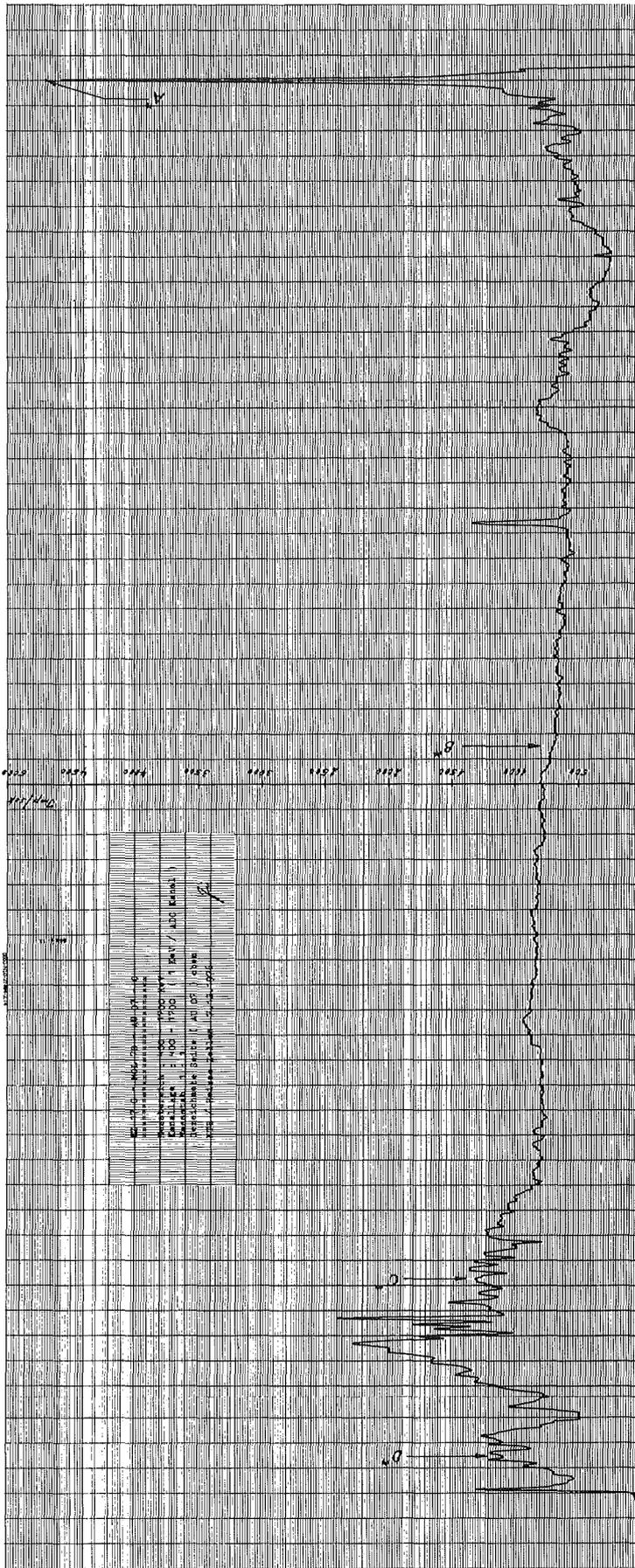


Abb. 5.8: Integrales Gamma-Profil vom Stab AU 07

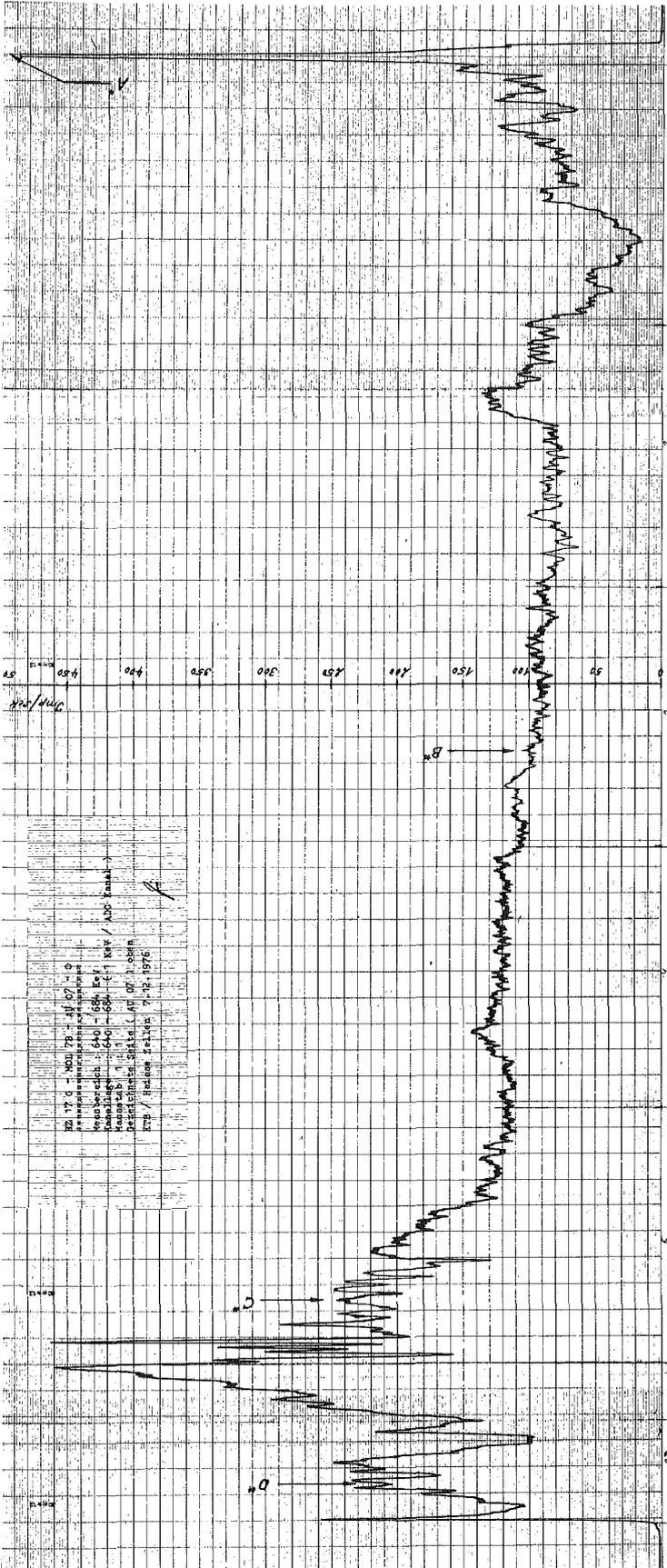


Abb. 5.9: Cs-137-Profil vom Stab AU 07

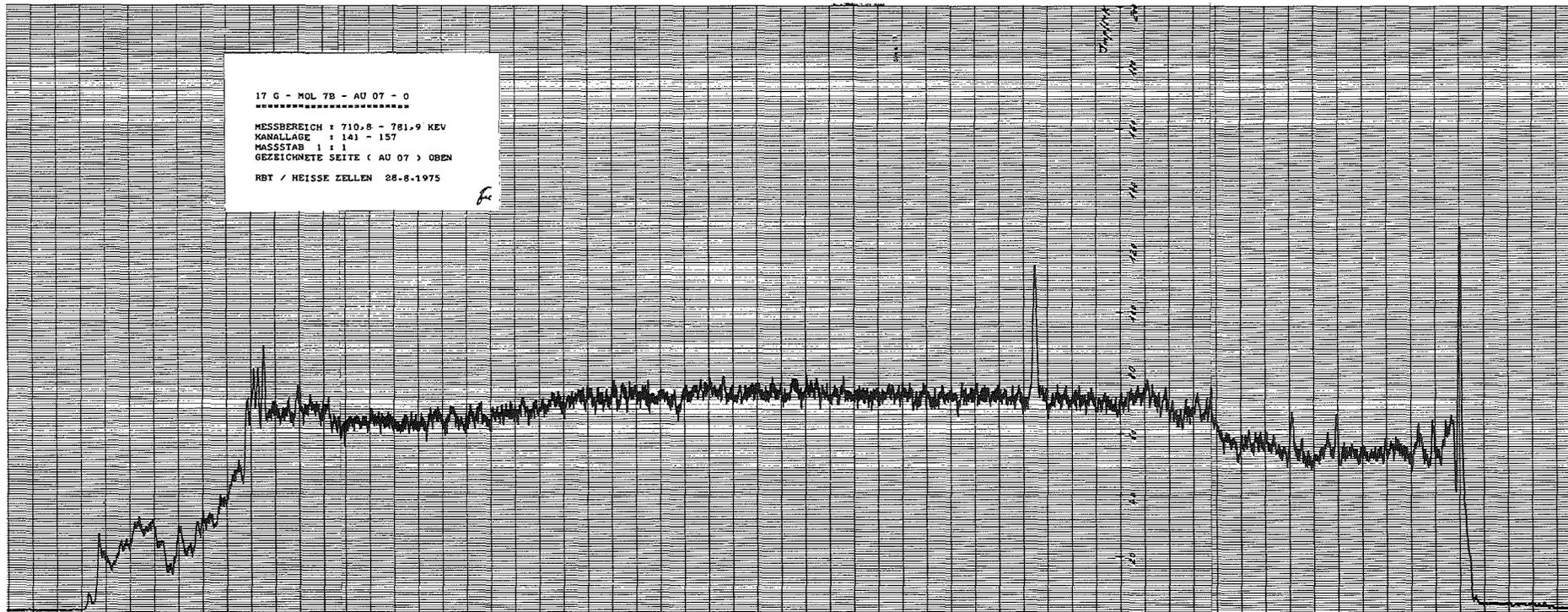


Abb. 5.10: Zr-Nb-Profil vom Stab AU 07

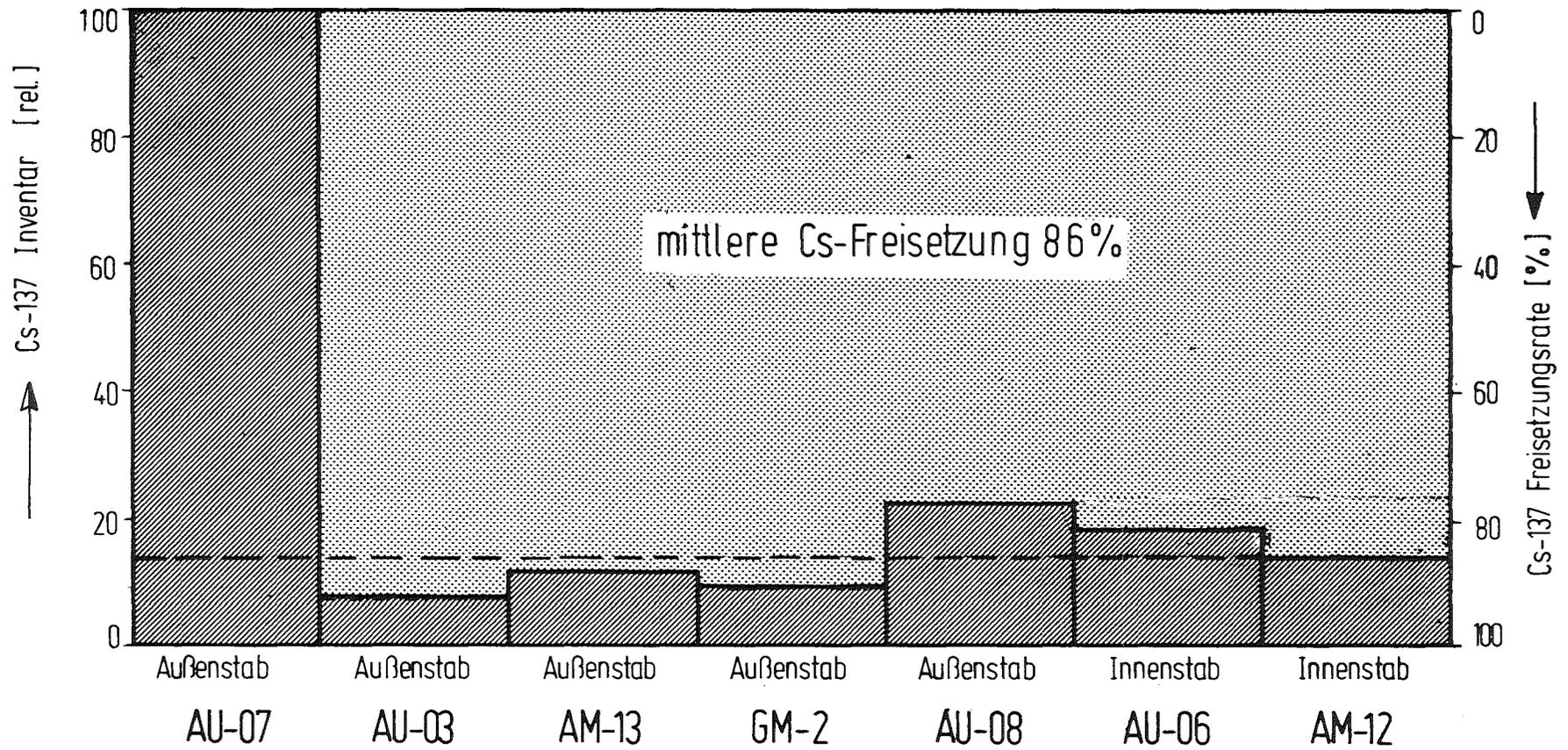


Abb. 5.11: Freisetzung von Cs-137 aus den defekten Stäben

## 6. Zerstörende Nachuntersuchung

### 6.1 Spaltgasmessung

Eine Messung der freien Spaltgase konnte naturgemäß an den defekten Stäben nicht mehr erfolgen. Am intakten Stab AU 07 mußte diese Messung ebenfalls entfallen, da dieser bei der Demontage des stark angegriffenen Bündels beschädigt wurde und hierbei sein Spaltgas verlor.

Von Stab AU 07 wurden als einzigem der KfK-ALKEM-Serie die gebundenen Spaltgase, die sich aus sog. "Porensplattgas" und "Gittersplattgas" zusammensetzen, bestimmt. Die Meßprozedur wurde bereits öfters beschrieben /7/. Tabelle XVIII enthält die Werte von insgesamt 3 Proben dieses Stabes, die von verschiedenen Stellen längs der Stabachse stammten. Abb. 6.1 gibt diesen Sachverhalt nochmals graphisch wieder. Wie daraus hervorgeht, wurden am "kalten" unteren Stabende die größten Gasmengen (Xe + Kr) gespeichert.

Tabelle XVIII: Gebundene Spaltgase (in cm<sup>3</sup>) im Stab AU 07

	Unten Proben-Nr. 15	Mitte Proben-Nr. 12	Oben Proben-Nr. 6
Porengas	7,877	3,850	5,337
Gittergas	4,447	2,244	3,187
Summe	12,324	6,094	8,524
Mittelwert	8,981		

Die rechnerische Gesamtmenge an entstandenem Spaltgas bei einem mittleren Abbrand von 12 at-% beträgt 241 cm<sup>3</sup>. Unter Abzug der gebundenen Spaltgasmenge laut Messung ergibt sich eine Gasfreisetzung von ca. 232 cm<sup>3</sup>, das sind etwas mehr als 96 %. Dieser Wert ist für Oxid-Stäbe mit hohem Abbrand und hoher mittlerer Brennstofftemperatur typisch. Nimmt man vollständige Freisetzung an und bezieht diese Gasmenge auf die vorhandenen Gasplena, so ergibt sich für die Außenstäbe ein Gasdruck im heißen Zustand von ca. 58 bar, für die Innenstäbe mit kleinerem Plenum ein Druck von 112 bar.

Tabelle XIX zeigt zum Vergleich Xe-Inventare, die an Belgonucléaire-Stäben desselben Bündels gemessen wurden.

Tabelle XIX: Xe-Inventar im Poren- und Gittergas

Stabbezeichnung	Abbrand (at-%)	Xe-Inventar (%)
BPM 7	12,55	4,7
BPU 4	13,24	1,4
BPM 8	10,23	2,6
BPM 9	10,23	2,5
AU 07	12,30	3,7 (Xe + Kr)

## 6.2 Abbrandbestimmung

Der Abbrand wurde an 13 der insgesamt 18 Stäbe radiochemisch bestimmt und zwar an jeweils einer Probe jedes einzelnen Stabes. Die Messungen erfolgten in drei verschiedenen Laboratorien, nämlich

- beim Transurane-Institut Karlsruhe (TU-I),
- im Kernforschungszentrum Mol in Belgien (CEN-Mol),
- im Institut für Radiochemie des Kernforschungszentrums Karlsruhe (KfK).

Die Abbrandproben des TU-I entstammten der axialen Position - 60 (Mitte der Spaltstoffsäule), die des KfK aus etwa der gleichen Position, während die des CEN-Mol bei ca. - 130, also 70 mm unterhalb, entnommen wurden.

Die aus diesen Messungen ermittelten Werte sind in Abb. 6.2 eingetragen. Die Werte der äußeren Stabreihe des Bündels liegen im Mittel bei 12,5 at-%, die Werte der inneren Stabreihe um einen Mittelwert von 10,4 at-%.

Belgonucléaire kommt mit einer Auswertung unter Berücksichtigung der jeweiligen Höhenlage der Abbrandprobe zu folgender radialen Abbrandverteilung über den Bündelquerschnitt:

- Eckstäbe            13,0 at-%,
- Randstäbe        12,1 at-%,
- Innenstäbe       10,3 at-%.

Diese Werte sind in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Nulleistungsversuche, siehe Kapitel 2.4.

Insbesondere aufgrund dieser Meßergebnisse wurde klar, daß die Stableistung weit höher als der ursprüngliche Auslegungswert gewesen war. Daher wird folgende Korrektur für die lineare Stableistung vorgeschlagen:

$$\chi_{\text{Korr}} = 1,22 \cdot \chi_{\text{alt}} .$$

Diese Korrektur beinhaltet eine Änderung der Na-Enthalpie um 6 %. Die verbleibenden 16 % können nicht zufriedenstellend erklärt werden. Die Ursachen werden in der ungenügenden Kenntnis der Gamma-Heizung, Flußverteilung und der thermischen Bilanz des Loops vermutet. Letztere wird beeinflusst von einer größeren Unsicherheit der Na-Temperatur am Bündelaustritt.

### 6.3 Keramografie

Es wurden 7 Stäbe der ALKEM- bzw. KfK-Fertigung keramografisch untersucht. Das Bündelschema in Abb. 6.3 gibt die untersuchten Stäbe schraffiert wieder. Es handelte sich mit Ausnahme von Stab AU 05 durchwegs um Stäbe der äußeren Reihe. Die umfangreiche Dokumentation der Keramografie ist in Anhang II zusammengefaßt und gegliedert wie folgt:

Die Dokumentation für jeden untersuchten Stab umfaßt ein Falblatt und einige Einzelblätter. Auf dem Falblatt sind die Röntgenaufnahme, ein Schnittschema und die Übersichtsaufnahme in 7-facher Vergrößerung mit ihrer Zuordnung dargestellt. Auf den Einzelblättern werden eine zusammengesetzte Übersicht (Panorama) und Details der Querschliffe wiedergegeben. Beigefügt zur Dokumentation jedes Einzelstabes ist außerdem eine Liste mit Bemerkungen und Erläuterungen zu den Schliffaufnahmen.

Die Präparation der z.T. stark ausgebrochenen Stabquerschnitte erwies sich als sehr problematisch und erforderte ein sogenanntes "Nachbetten" mit Araldit sowie wasserfreie Präparation wegen der im Stab vorhandenen Natrium-Reste.

Die aus der Keramografie sich ergebenden Meßwerte sind in Tabelle XX zusammengestellt. Diese umfassen die Strukturradien des Brennstoffgefüges und den Durchmesser des Zentralkanals sowie die intakte Hüllrohrwandstärke und die Schichtdicke der Na-Uranat-Plutonat-Schicht.

Als Resümee der Diskussion der einzelnen Schliffe (Anhang II) sollte festgehalten werden:

- Die 6 defekten Stäbe zeigten alle Anschmelzungen in Zentralkanalnähe infolge der  $\text{Na}_3\text{MO}_4$ -Schichten zwischen Hülle und Brennstoff (siehe auch Kapitel 7.2).
- Im Bereich der Risse wird häufig eine Verlagerung des Zentralkanals zur heißeren Hüllseite beobachtet (exzentrische Lage des Zentralkanals).
- Besonders starke Schmelzerscheinungen des Oxidgefüges wies Stab AU 05 (innere Reihe) auf.

Tabelle XX: Meßwerte der keramografischen Untersuchungen

Stab-Nr.	Probe	minimale intakte Hüllrohrwandstärke (mm)	Na-Uranat/Plutonatschichtdicke ( $\mu\text{m}$ )	Brennstoffgefügeradius (mm)			Zentralkanalbreite (mm)
				Ausgangsgefüge	Regellooses Kornwachstum	Säulenkristalle	
AM11	1	0.22		2.60	2.20	1.70	1.80
	2	0.25					1.60
	4	0.34	100	2.50	2.25	1.90	2.00
	5	0.36	180	2.45	2.20	1.45	0.80
	6	0.37	120	2.50	2.25	1.90	1.10
	7	0.35	140	2.47	2.20	1.70	4.00
	AU03	11	0.32	120			
10		0.29	80		2.60	1.90	1.50
1		0.28	100		2.60	1.90	0.80
3		0.31	250		2.50	2.10	2.50
4		0.30	350		2.40	2.10	2.40
5		0.34	200		2.55	2.10	1.60
7		0.34	370		1.60		0.20
8		0.34	460		2.20		
GMO2	1	0.21	200				1.80
	2	0.26	150		2.50	1.60	2.10
	3	0.31	200		2.50	1.80	1.60
	4	0.355	230		2.45	1.30	
AU05	1						
	2	0.31		2.48		1.65	2.50
	3	0.36	100	2.50	2.30	1.65	0.50-1.70
	6	0.34	100		2.51	1.65	1.90-2.00
	7	0.36		2.50	2.30	1.80	1.40
	8	0.35	240		2.40	1.50	0.90-1.00
	9	0.36	250		2.40	2.25	1.50
GU03	1	0.27	400	2.42	2.15	1.90	2.40-2.90
	2	0.20					
	3	0.28	350	2.53	2.30	2.00	
	5	0.31	200	2.50	2.40	2.20	1.53
	6	0.32	150	2.55	2.45	2.15	1.45
	8	0.35	120	2.55	2.45	1.85	1.20-1.30
	7	0.36	150/400		2.55	1.85	0.55-0.90
AU07	3	0.27	250				2.30-2.40
	5	0.22		2.56	2.45	2.00	1.70
	7	0.27	150	2.57	2.50	2.00	1.72
	11	0.33	85	2.58	2.51	2.05	1.85-2.00
	13	0.34	30	2.56	2.40	1.90	1.50-1.80
	14	0.34		2.58	2.50	2.00	1.40
	16	0.35	130	2.50	2.45	1.95	1.40-1.50
AM16	1	0.24			2.60		
	2	0.18	100				
	3	0.24			2.40	2.20	1.50-2.00
	4	0.24			2.60	2.20	
	5	0.30			2.57	2.10	1.85-2.10
	7	0.33	70		2.60	2.10	1.70-2.15
	9	0.35	220		2.43	1.50	0.38-0.35

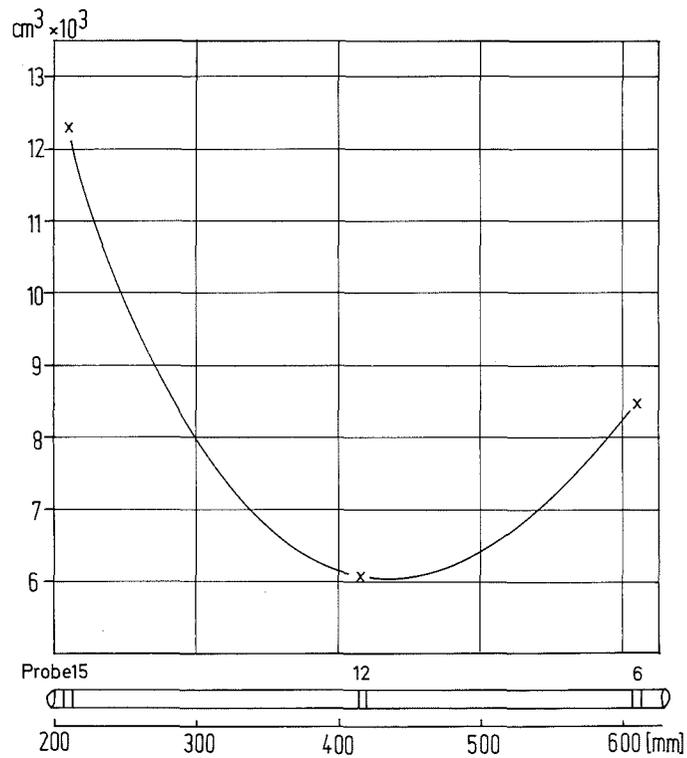
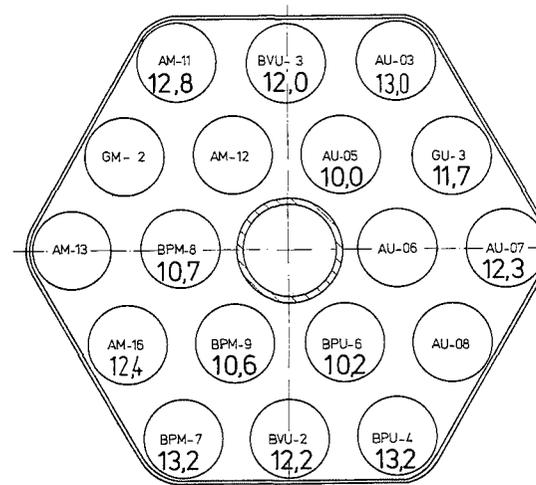


Abb. 6.1:

Gebundenes Spaltgas im Stab AU 07



- A = ALKEM
- B = BELGONUCLEAIRE
- G = KFK
- M = Hüllrohr aus Werkstoff-Nr. 1.4988
- U = " " " 1.4970
- V = einvibrierter Brennstab

Abb. 6.2:

Gemessene Abbrände im Bündelquerschnitt

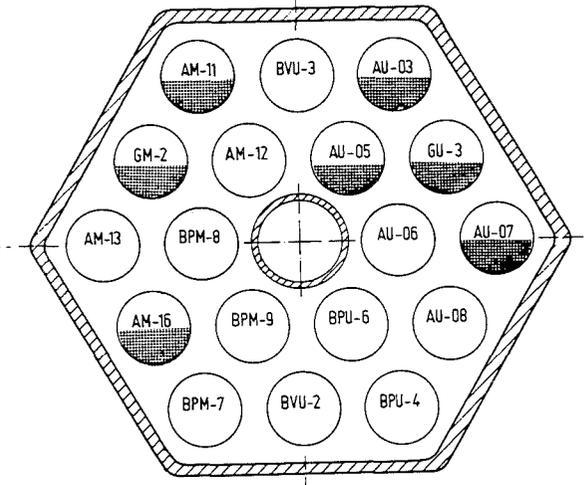


Abb. 6.3:

Bündelschema mit Lage der in Karlsruhe untersuchten Stäbe

## 7. Auswertung der Ergebnisse

### 7.1 Schadensanalyse auf modelltheoretischer Basis

Da die Brennstäbe größtenteils stark geschädigt sind, ist eine modelltheoretische Analyse des Bestrahlungsverhaltens sehr erschwert. Die vorhandenen Rechenprogramme zum Brennstabverhalten setzen nämlich die Intaktheit des Brennstabes voraus. Weiterhin sind die tatsächlichen Betriebsbedingungen (Stableistung und Kühlmitteltemperatur) nur relativ ungenau bekannt.

Auch mit dem im CEN-Mol im nachhinein angegebenen Korrekturfaktor 1,22 lassen sich die gemessenen Abbrände nicht reproduzieren. Dazu müßte der Korrekturfaktor bei ca. 1,34 liegen. Bei der Kühlmittelaustrittstemperatur als einer weiteren wichtigen Betriebsgröße wurden nur Werte in der Bündelmitte gemessen. Absenkungen der Kühlmittelaustrittstemperatur zum Bündelrand hin von 40 bis 60 °C können aber das Stabversagen ganz wesentlich beeinflussen.

Aus dem Hülldehnungsprofil des einzigen intakt gebliebenen Brennstabes AU 07 erkennt man eine Dehnungsspitze im Bereich des oberen Brennstoff-Brutstoff-Übergangs. Man kann davon ausgehen, daß diese durch mechanische Wechselwirkung zwischen Brennstoff und Hülle infolge Cs-Uranat-Schwellung aufgetreten ist. Da bis auf eine Ausnahme alle Stabdefekte in diesem Bereich lagen, muß die Ursache für das Stabversagen in der Cs-Anhäufung am oberen Brennstoff-Brutstoff-Übergang gesucht werden. Durch diese Anhäufung kam es zu verstärktem Brennstoffschwellen und folglich zum Aufbau eines Festkörperdruckes und zur Hülldehnung. Nach Erschöpfung der Duktilität der eingesetzten Hüllmaterialien kam es dann zum Hüllbruch. Begünstigt wurde dies noch durch starke Hüllkorrosion infolge der sehr hohen Kühlmittelaustritts-Temperaturen.

Da bis jetzt noch kein quantitatives Modell zur Cs-Umverteilung in Abhängigkeit von den beteiligten Parametern Stöchiometrie, Brennstofftemperatur usw. existiert, sind hierzu Modellrechnungen wenig sinnvoll.

Aus den Hülldehnungsprofilen (siehe Abb. 5.7.a bis d) läßt sich weiterhin erkennen, daß auf Höhe des oberen Spaltgasplenums zum Teil ganz merkliche Hülldehnungen vorhanden sind. Desweiteren besteht ein systematischer Unterschied zwischen Brennstäben mit dem Hüllmaterial 1.4988 und denen mit 1.4970. Diese Hülldehnungen sind die alleinige Folge des Spaltgasdruckaufbaus und unbeeinflußt von Cs-Akkumulation und Na-Uranat-Schichtbildung nach dem Eintritt des Defekts. Da nach dem Aufreißen der Hüllen das im Brennstab vorhandene Gas

aus diesem austritt, die defekten Brennstäbe also drucklos sind, spiegeln die Dehnungen auf Höhe des oberen Spaltgasplenums den Zustand bei Defekteintritt wider. Dies bedeutet, daß man durch Berechnung des Spaltgasdruckaufbaus und den daraus resultierenden Hüllverformungen den Defektzeitpunkt in etwa bestimmen kann. Solche Rechnungen wurden mit dem Code PSTAT /8/ durchgeführt. Einige Ergebnisse sind in den Abb. 7.1 und Abb. 7.2 aufgetragen. Den Spaltgasdruckaufbau in den Eck- und Innenstäben zeigt Abb. 7.1. Infolge des stark verkleinerten oberen Plenums ist trotz der geringeren Stableistungen und Abbrände der Druckaufbau in den Innenstäben noch um knapp 40 % höher als in den Eckstäben.

Die berechneten Druckwerte nach Eintritt des Defekts sind natürlich fiktiv, da das Gas dann aus dem Brennstab austritt. Nur für den einen Eckstab AU 07, der intakt geblieben ist, läßt sich der errechnete Enddruck von ca. 60 bar mit dem aus den Spaltgasmessungen der zerstörenden Nachuntersuchung (siehe Abschnitt 6.1) ermittelten Wert von 58 bar vergleichen. Wie man sieht, besteht in diesem Fall gute Übereinstimmung zwischen beiden Werten.

Die in Abb. 7.2 dargestellten, mit PSTAT berechneten Hülldehnungen für zwei Eckstäbe und einen Innstab sind im wesentlichen durch thermisches Kriechen des Hüllmaterials verursacht. Thermisches Kriechen führt im Gegensatz zum bestrahlungsinduzierten Kriechen zur Hüllschädigung. Bei der Auslegung von Brennstäben wird hierbei ein maximal zulässiger Wert von 0,2 % angenommen. Diese Grenze wurde bei den Brennstäben mit Hülle des Typs 1.4988 lg deutlich überschritten. Wäre es nicht zur Cs-Akkummulation gekommen, dann wären diese Brennstäbe wahrscheinlich allein infolge des Spaltgasdruckaufbaus defekt geworden. Anders ist die Situation bei den Stäben mit Hüllmaterial aus 1.4970 kv. Die berechneten Dehnungen erreichen nur Werte von 0,1 %. Diese Stäbe hätten aller Wahrscheinlichkeit nach den Spaltgasdruck ausgehalten.

In der Abb. 7.2 sind für einige Brennstäbe die gemessenen mittleren Hülldehnungen im oberen Plenumsbereich eingetragen. Aus dem Wert für den Stab AM 12 ergibt sich z.B. als erster Schadenszeitpunkt ein Wert von 208 Tagen. Bekanntlich wurde nach einer Betriebszeit von 180 Tagen zum ersten Mal ein Spaltgas-signal aufgenommen, das auf einen Stabschaden hindeutete. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und experimentellem Befund ist angesichts der immanenten Unsicherheiten (Betriebsdaten, Kriechdaten der Hülle) als gut anzusehen.

## 7.2 Radiales Temperaturprofil

Mit Hilfe des Programms TUNAT /9/ wurde das radiale Temperaturprofil im Eckstab AU O3 berechnet. Gewählt wurde ein Höhenkote im unteren Stabteil (17 mm vom unteren Ende der Brennstoffsäule), der eine breite Natrium-Uranat/Plutonatschicht aufwies. Nach neueren, unveröffentlichten Messungen beträgt die Wärmeleitfähigkeit dieser Substanz  $0,8 \text{ W/m K}$  bei  $500^\circ\text{C}$  /10/. Weitere Eingabewerte waren die Temperatur an der Hülle mit  $460^\circ\text{C}$ , die lokale Stableistung mit  $385 \text{ W/cm}$  und ein mittleres O/M von 1,96 (am Zentralkanal 1,93 und außen 2,0). In Abb. 7.3 wird das Temperaturprofil wiedergegeben. Außerdem ist dort der radiale Porositätsverlauf dargestellt. Die Temperatur am Zentralkanal beträgt  $2500^\circ\text{C}$  und überschreitet damit die Schmelztemperatur von  $2450^\circ\text{C}$  /11/. Letzteres ist in guter Übereinstimmung mit dem Gefügebild (Abb. 7.3). Nicht kongruent mit der Rechnung ist die radiale Ausdehnung des Schmelzgefüges. Die starke Materialansammlung in diesem Querschnitt nahe der unteren Brennstoffsäule kann nur mit einem Materialtransport von flüssigem  $(\text{U,Pu})\text{O}_2$  von einem höher gelegenen sehr heißen Brennstoffbereich erklärt werden. Letzteres wird auch sichtbar im folgenden Axialschnitt, der ein Vollaufen des ursprünglichen Zentralkanals vermuten läßt.

## 7.3 Teilblockade im Bereich der Stabdefekte

Wie anhand der Querschliffe im Anhang II zu erkennen ist, sind die Stabdefekte mit einer starken Hüllaufweitung (s.a. Tabelle XVII in Kapitel 5.4) bzw. Ovalisierung im Bereich der Schäden verbunden.

Durch die Literatur /12,13/ ist bereits seit längerem bekannt, daß Natrium mit Mischoxid in Gegenwart von überschüssigem Sauerstoff eine chemische Verbindung der Form  $\text{Na}_3(\text{U,Pu})\text{O}_4$  eingeht. Da das Molvolumen dieser Verbindung um den Faktor 2,7 höher ist als das des Mischoxids, ist die Reaktion mit einer Volumenvergrößerung verbunden.

Die Reaktionsschwellung beträgt nach /11/  $1,7 \text{ Vol.-%}$  pro % umgewandeltem Brennstoff. Diese Schwellung führt im Bereich der Hüllrisse zu einer "Extrusion" des Na-Uranat-Plutonats.

Hierdurch wird der oben geschilderte Effekt der Stabaufweitung bzw. Ovalisierung noch verstärkt, es kommt so zur Berührung von Nachbarstäben im Bündelverband und zu Teilblockaden in den Unterkanälen des Brennelements.

Die in Tabelle XVII in Kapitel 5.4 aufgeführten Stabaufweitungen traten alle an der Hüllheißstelle, d.h. am oberen Brennstoffsäulenende auf. Sie wurden in ihrer Orientierung im Bündelverband eingezeichnet und so ein Bild der Teilblockade gewonnen. In Abb. 7.4 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Die schraffierten Bereiche zeigen quantitativ die Blockade an. Durch Ausplanimetrieren wurde die Fläche der Blockade zu 38 % bestimmt /14,15/. Während des Betriebes des Bündels im BR 2 wurde nach 200 Vollasttagen ein starker Anstieg des Druckverlustes im Loop festgestellt. Die Erhöhung des Druckverlustes betrug am Bestrahlungsende + 50 %, was in relativ guter Übereinstimmung mit dem grafisch wiedergegebenen Bild der Blockade ist. Die Auswirkung dieser Blockade auf die Na-Austrittstemperatur konnte nicht studiert werden, da spezifikationsgemäß die Temperatur an der Hüllheißstelle konstant auf 700 °C gehalten werden sollte. Letzteres wurde erreicht, in dem der Na-Durchsatz kontinuierlich hochgeregelt wurde.

Abb. 7.5 zeigt in einer Grafik die beobachteten Uranatschichtstärken in Abhängigkeit der jeweiligen Lage des Schliffs von der Stabachse. Man sieht, in guter Übereinstimmung mit anderen Experimenten, daß in den kälteren Stabebereichen (anströmseitig) die dickeren Uranatschichten entstehen.

#### 7.4 Schlußbetrachtung

Mol-7B, ursprünglich als Testbestrahlung unter Heißkanal-Bedingungen des Mark Ia-Stabes des SNR-300 konzipiert, wurde durch die umfangreichen Stabdefekte und deren langen Weiterbetrieb zu einem "Defektbündelexperiment" /16/. Als Grund für die Stabschäden müssen die zum Zeitpunkt der Auslegung zu ungenau bekannte Fluß- und Leistungsdichteverteilung im BR-2 angesehen werden. Hierdurch bedingt wurden die spezifizierte Stableistung und Abbrand um ca. 20 % überschritten. Die tatsächliche maximale Stableistung der Eckstäbe betrug so 586 W/cm. Die hohe Belastung der z.T. infolge Innenkorrosion stark angegriffenen Hüllrohre durch Spaltgasinnendruck und Cäsium-Uranat-Schwellen müssen als Ursache für die starken Stabschädigungen angesehen werden.

Da der Betrieb des Experimentes spezifikationsgemäß mit konstanter Na-Austrittstemperatur zu Ende geführt wurde, konnte der sehr wichtige Aspekt der Na-Austrittstemperatur-Erhöhung infolge der Teilblockade nicht studiert werden.

Es konnten jedoch wichtige Erkenntnisse über die Na-Brennstoff-Reaktion zu Natrium-Urano-Plutonat ( $\text{Na}_3\text{MO}_4$ ) mit genügender "Statistik" gewonnen werden,

die mit ein Anlaß waren, die sogenannten Defektstab-Experimente /17/ in Zusammenarbeit mit der CEA in Grenoble in Angriff zu nehmen. Abschließend soll nochmals betont werden, daß trotz der sehr hohen Stableistung, der hohen Hülltemperatur und der Blockade kein Hüllrohrschmelzen beobachtet wurde, wohl aber teilweises Aufschmelzen des Mischoxids in Zentralkanalnähe. Trotz der massiven Stabschäden blieb die integrale Stabilität des Bündels erhalten.

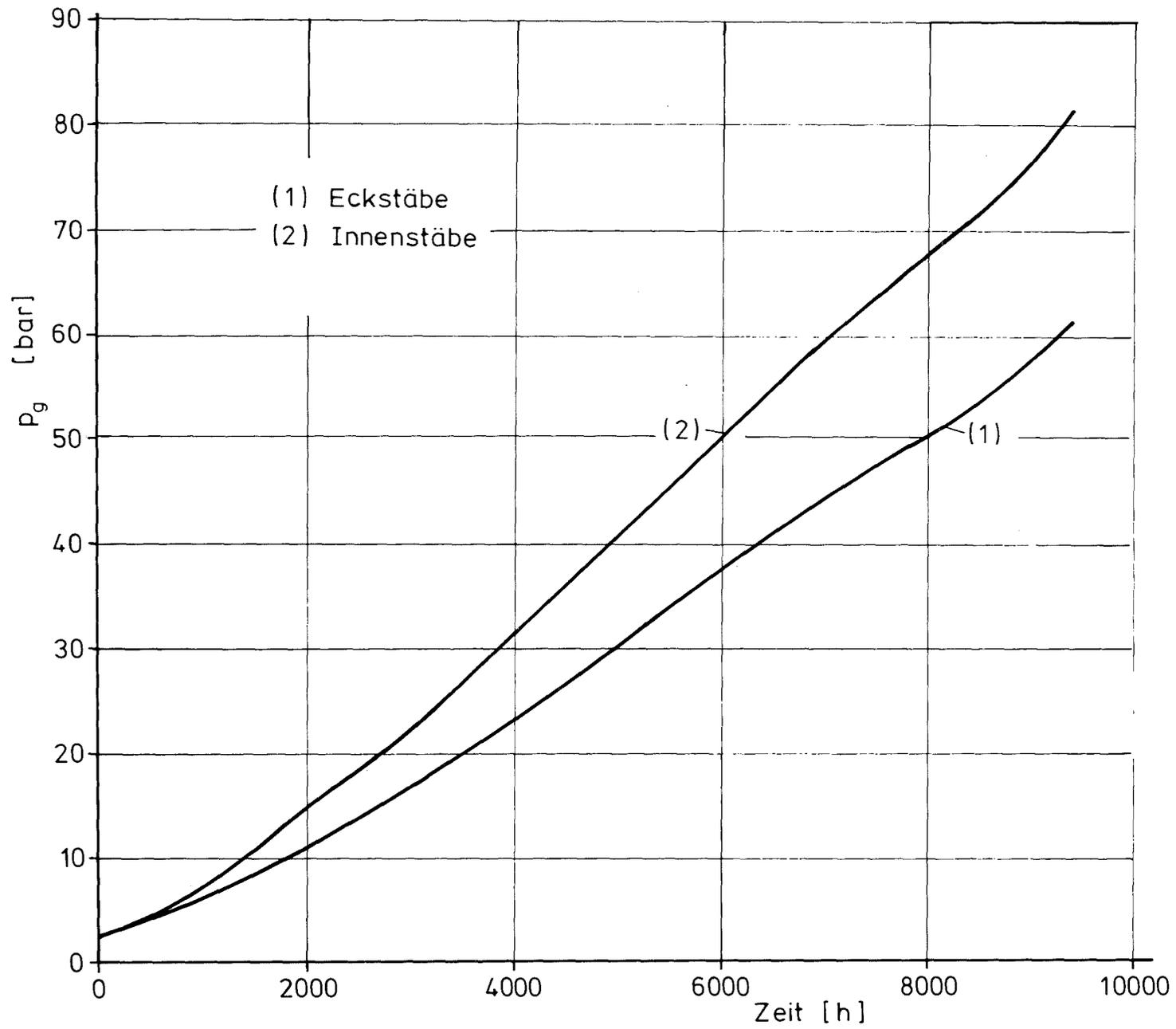


Abb. 7.1: Geglätteter Verlauf des Spaltgasdruckaufbaus in den Brennstäben

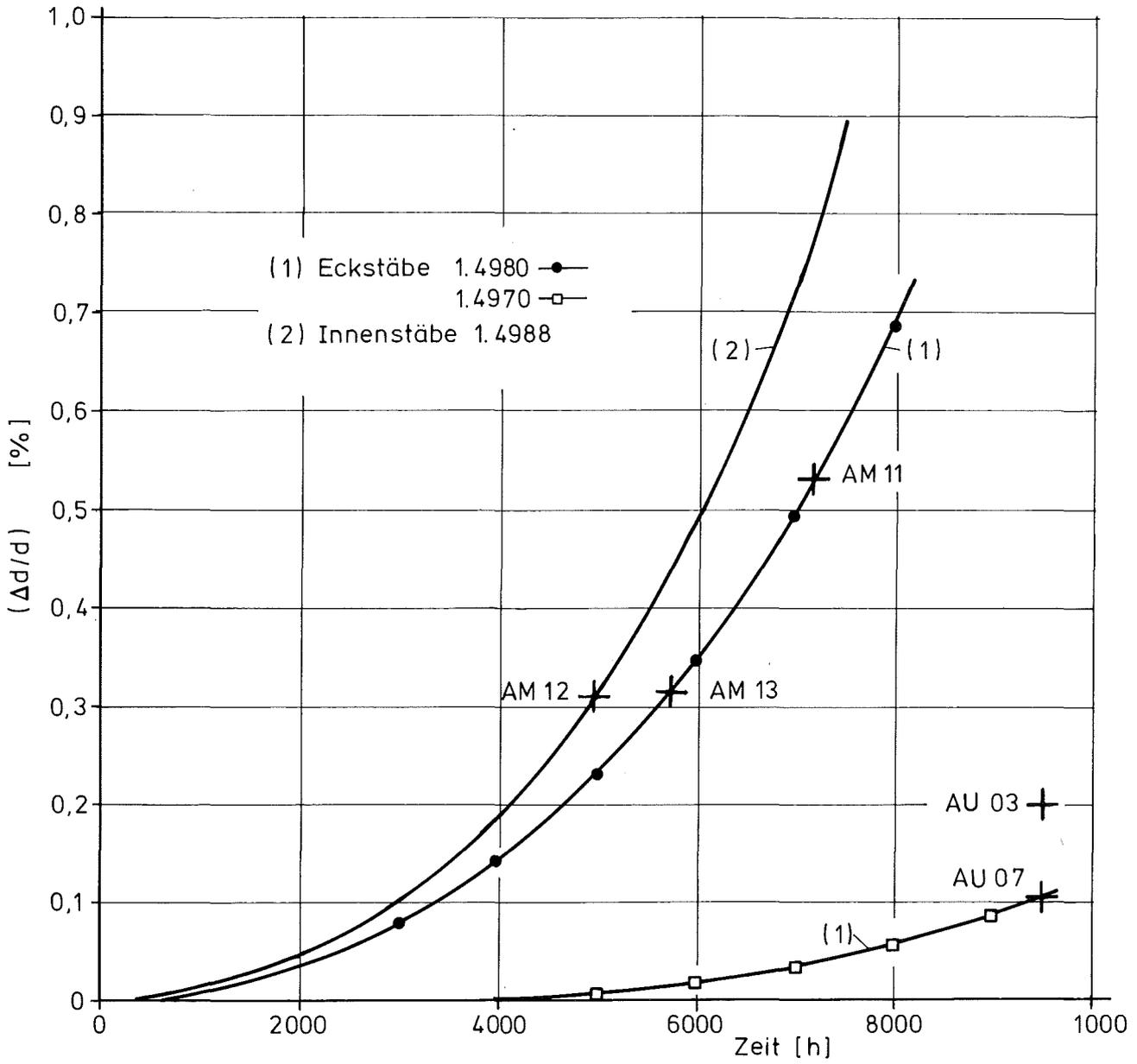


Abb. 7.2: Bleibende Hüllverformung an den Brennstäben auf Höhe des oberen Spaltgasplenums

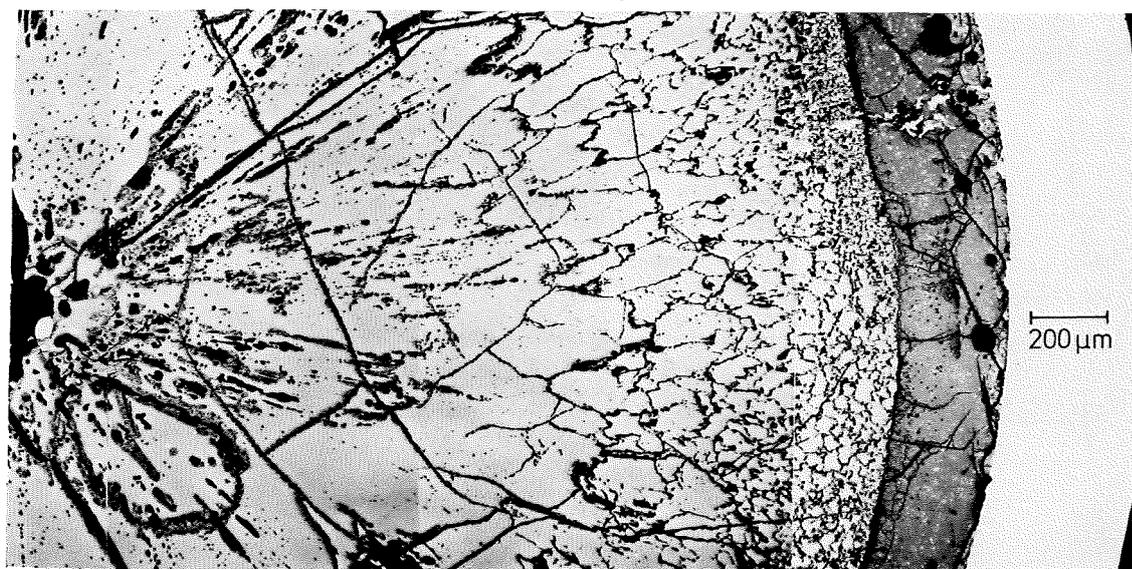
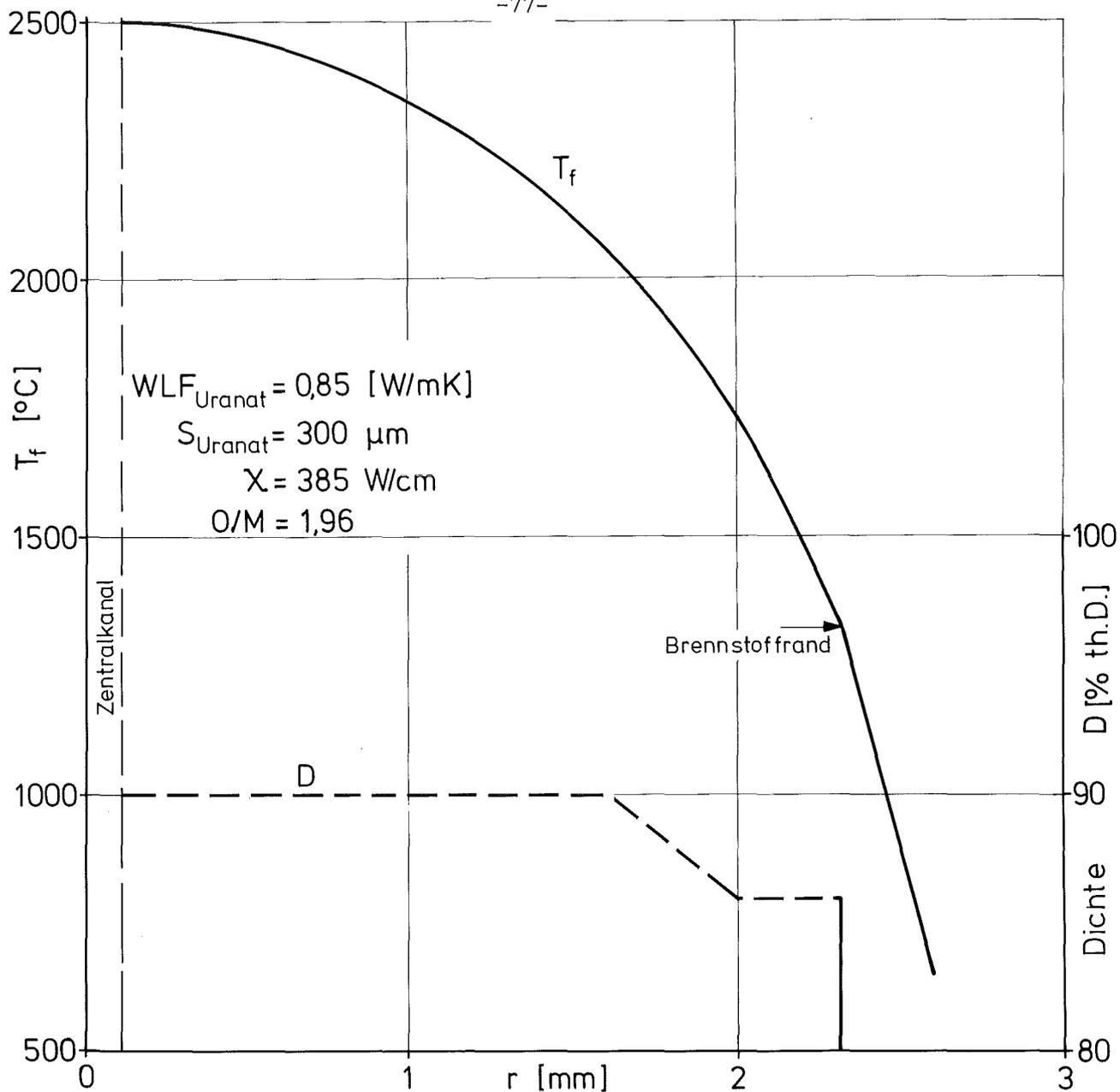


Abb. 7.3: Radiales Temperaturprofil im Eckstab AU 03

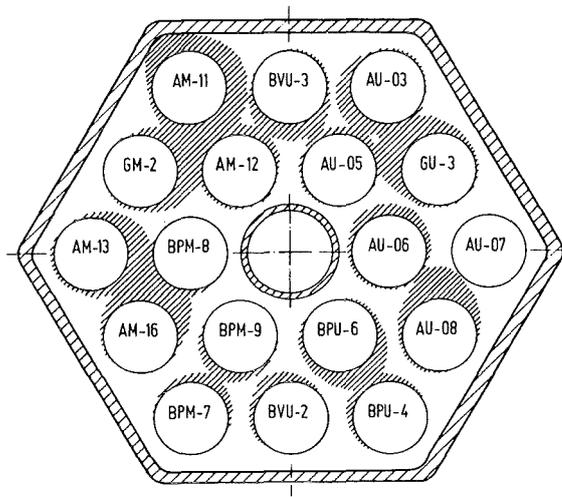


Abb. 7.4: Teilblockade im Bündel

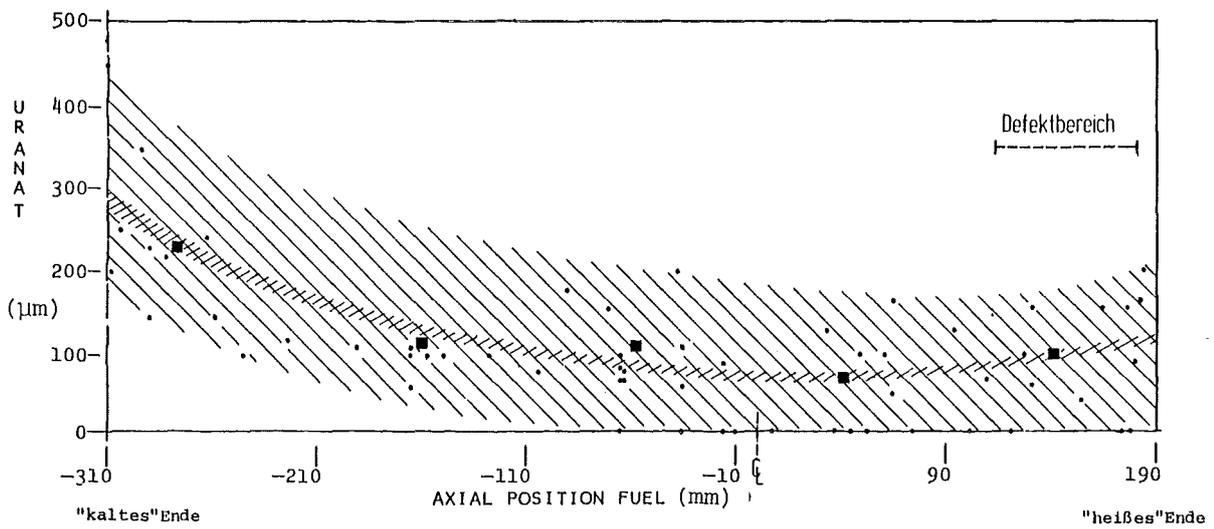


Abb. 7.5: Stärke der Uranatschicht als Funktion der axialen Position

- Meßwerte an Querschliffen verschiedener Stäbe
- Mittelwerte eines axialen Bereiches

## 8. Referenzen

- /1/ J. Van Miegroet, J. Dewandeleer, A. Michel, K. Kummerer, G. Van Massenhove:  
Design and Preparation of the Mol-7B Irradiation Experiment, Proc. Symp. on Fuel and Fuel Elements for Fast Reactors, Brussels 1973, IAEA Vienna 1974, 163-183
- /2/ M. Guyette:  
CRASH - A Computer Program for the Evaluation of the Creep and Plastic Behaviour of Fuel Pin Sheats, American Nucl. Soc. Winter Meeting in San Francisco, 1969
- /3/ R. Godesar, M. Guyette, N. Hoppe:  
COMETHE II - A Computer Code for Predicting the Mechanical and Thermal Behaviour of a Fuel Pin, American Nucl. Soc. Winter Meeting in San Francisco, 1969
- /4/ J. Van Looy, G. Van Massenhove:  
Performance Assessment of Fast Reactor Fuel in Cadmium-Screened BR 2 Irradiation Devices, Proc. Symp. on Fuel and Fuel Elements for Fast Reactors, Brussels 1973, IAEA Vienna 1974, 125-146
- /5/ A. Michel, G. Van Massenhove, W. Detavernier:  
New Developments in Fast Flux Irradiation Facilities in BR 2, Proc. Am. Nucl. Soc. Top. Meeting on Irradiation Experimentation in Fast Reactors, Jackson Lake Lodge 1973, 105-118
- /6/ D.R. Olander:  
Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements, TID-26711-P1 ERDA, 1976, 556 ff.
- /7/ K. Kummerer, D. Geithoff, P. Weimar:  
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung des  $UO_2/PuO_2$ -Brennstab-Bündels Mol-7A, KfK-Bericht Nr. 1522, 1972
- /8/ H. Steiner:  
PSTAT - Ein Rechencode für die mechanische Wechselwirkung Brennstoff/Hülle in Schnellbrüterbrennstäben, KfK-Bericht Nr. 3319, 1982
- /9/ T.J. Bjørlo:  
A Thermal Model for Numerical Calculations of Temperature Transients in Cylindrical Fuel Rods, HPR 190, 1975
- /10/ B. Schulz:  
Pers. Mitteilung (unveröffentlicht), 1982
- /11/ H. Kleykamp:  
Folgerungen aus den Mikrosondenuntersuchungen an bestrahlten  $UO_2$ - $PuO_2$ -Brennstäben für das SNR 300-Brennstabverhalten, Reaktortagung Nürnberg, 1975, 451 ff.
- /12/ M.G. Adamson:  
Sodium Fuel Reaction Studies, GEAP-14093, 1976

- /13/ M. Housseau et al.:  
Study of Reactions between Fuel (U,Pu)O<sub>2</sub> and Na, AEC-Tr.-7492, 1973
- /14/ P. Weimar:  
Experimental and Theoretical Evaluation of Defect Growth of Fuel Pin Cladding by Chemical Fuel-Sodium Interaction, Trans. 4th Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, San Francisco, 1976, Vol. C, 4.6.
- /15/ H. Miemczyk, D. Geithoff, D. Haas:  
Zum Betrieb mit defekten Stäben; ein 18-Stab-Bündel mit SNR-Brennstäben (Mol-7B), Reaktortagung Düsseldorf, 1976, 478 ff.
- /16/ P. Weimar, W. Ernst:  
Mol-7B - An 18-Pin Bundle Operating 200 Days beyond Breach, Nucl. Techn. 57, 1982, 81-89
- /17/ P. Weimar et al.:  
Joint German-French Investigation on Defective Fuel Pin Behaviour, Proc. Conf. on Fast Reactor Safety Technology, Seattle, 1979, Vol. 5, 2440 ff.

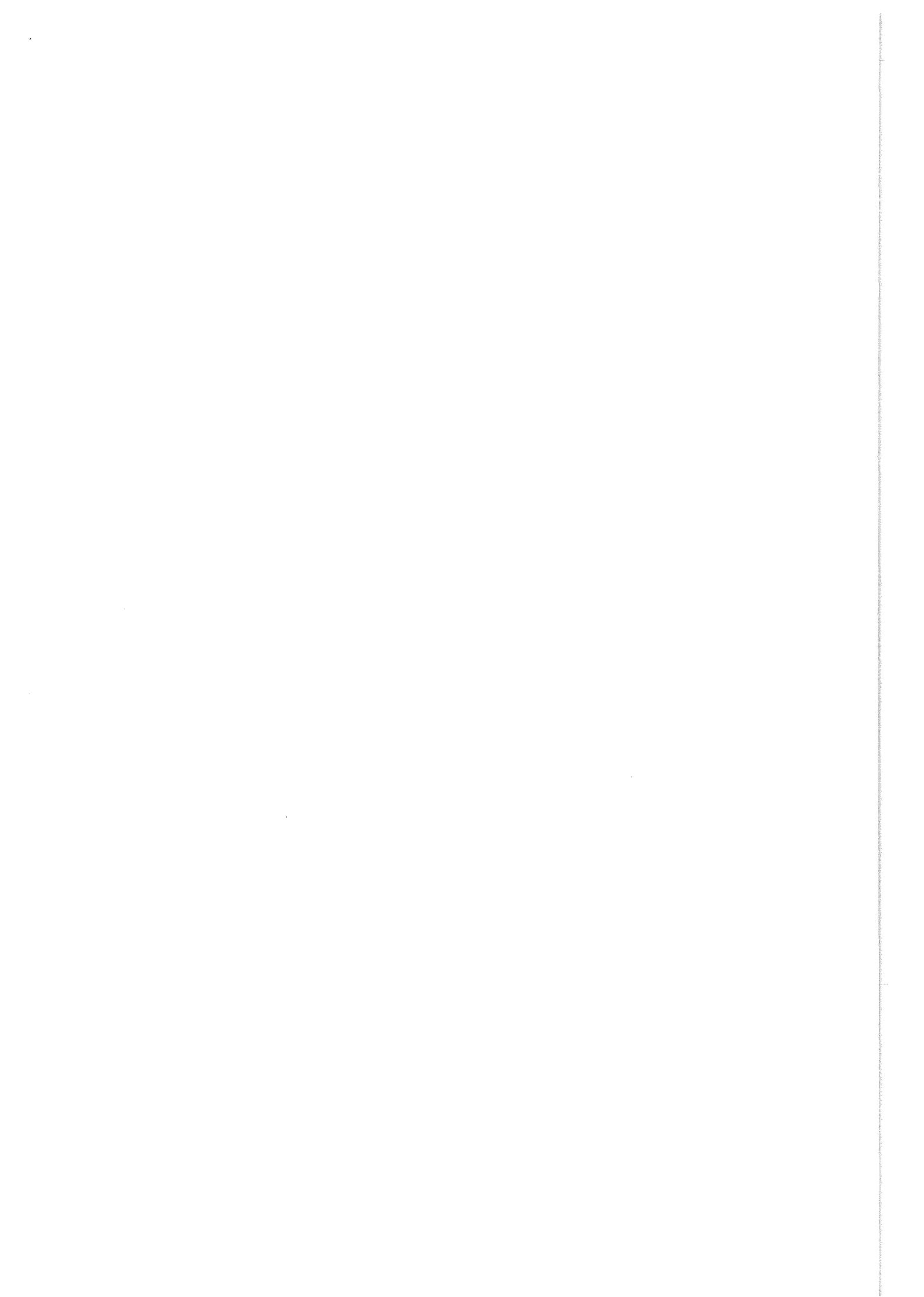
<u>Liste der Tabellen</u>	Seite	
I	Auslegungswerte und reale Betriebsbedingungen für Mol-7B	1
II	Ablauf des Experiments Mol-7B und beteiligte Organisationen	2
III	Zahlenwerte zum Bündelaufbau	5
IV	Aufbau der drei Stabtypen	6
V	Brennstoffspezifikation	6
VI	Brutstoffspezifikation	7
VII	Spezifikationen des Hüll- und Strukturmaterials im Brennstab	8
VIII	Bündelstruktur	9
IX	Beabsichtigte Betriebsbedingungen	10
X	Übersicht zur Stabherstellung und Bezeichnung	19
XI	Fabrikationsdaten der Stäbe mit Tablettenbrennstoff	20
XII	Fabrikationsdaten der Stäbe mit Pulverbrennstoff	21
XIII	Fabrikationsdaten der Abstandshalter	22
XIV	Mol-7B-Bestrahlungsdaten	28
XV	Schneller Neutronenfluß und Fluenz im axialen Flußmaximum	29
XVI	Lineare Stableistung, Maximal- und Mittelwerte in W/cm	30
XVII	Lokale Defektaufweitung bei Mol-7B-Stäben	44
XVIII	Gebundene Spaltgase im Stab AU 07	65
XIX	Xe-Inventar im Poren- und Gittergas	66
XX	Meßwerte der keramografischen Untersuchungen	68

<u>Liste der Abbildungen</u>	Seite	
2.1	Aufbau des Bündels Mol-7B	12
2.2	Gitterabstandshalter im Bündel	13
2.3	Schematische Bündelübersicht	14
2.4	Position der Stäbe im Bündel	15
2.5	Aufbau der 3 Stabtypen	16
2.6	Austrittstemperatur in den Kühlkanälen des Bündels am oberen Ende des Reaktorkerns bei 400 W/cm maximaler Stableistung	17
3.1	Schematischer Bündelquerschnitt mit Positionierung der Brennst.	24
3.2	Ansicht des oberen Bündelendes	25
3.3	Unteres Bündelende mit Fuß	25
3.4	Komplettes Bündel ohne Kasten	26
4.1	Lage des Versuchskreislaufes IPSL im BR 2-Kern	31
4.2	Kernkonfiguration im BR 2	32
4.3	Querschnitt durch den 500 kW-Kreislauf IPSL auf Reaktormittelebene	
4.4	Thermoelementpositionen im Bereich der Teststrecke des IPSL	34
4.5	Isoliermantel um den Hüllkasten	35
4.6	Leistungsgeschichte des BR 2 während der Mol-7B-Bestrahlung	36
4.7	Axiale Verteilung des schnellen Neutronenflusses am Hüllkasten	37
4.8	Stableistung und Abbrand in einem Eckstab	39
4.9	Axialer Verlauf der Stableistung, zeitlicher Mittelwert über alle Zyklen	41
4.10	Temperaturverlauf im Heißkanal längs eines Eckstabes	41
5.1	Neutronografie des Bestrahlungseinsatzes	46
5.2	Betatron-Durchleuchtung im Bereich der Stabdefekte	47
5.3	Schematischer Ablauf der Vereinzelung der Stäbe	48
5.4	Freigelegtes Stabbündel	49
5.5	Schadhafte Stellen in Höhe der Abstandshalter	50
5.6	Schadhafte Stellen in Höhe der Abstandshalter	51
5.7 a)	Profilometrie der Einzelstäbe	53
b)	" " "	55
c)	" " "	57
d)	" " "	59

Liste der Abbildungen - Fortsetzung		Seite
5.8	Integrales Gamma-Profil vom Stab AU 07	61
5.9	Cs-137-Profil vom Stab AU 07	62
5.10	Zr-Nb-Profil vom Stab AU 07	63
5.11	Freisetzung von Cs-137 aus den defekten Stäben	64
6.1	Gebundenes Spaltgas im Stab AU 07	69
6.2	Gemessene Abbrände im Bündelquerschnitt	69
6.3	Bündelschema mit Lage der in Karlsruhe untersuchten Stäbe	69
7.1	Geglätteter Verlauf des Spaltgasdruckaufbaus in den Brennstäben	75
7.2	Bleibende Hüllverformungen an den Brennstäben auf Höhe des oberen Spaltgasplenums	76
7.3	Radiales Temperaturprofil im Eckstab AU 03	77
7.4	Teilblockade im Bündel	78
7.5	Stärke der Uranatschicht als Funktion der axialen Position	78

A N H A N G I

DOKUMENTATION DER STABSCHÄDEN



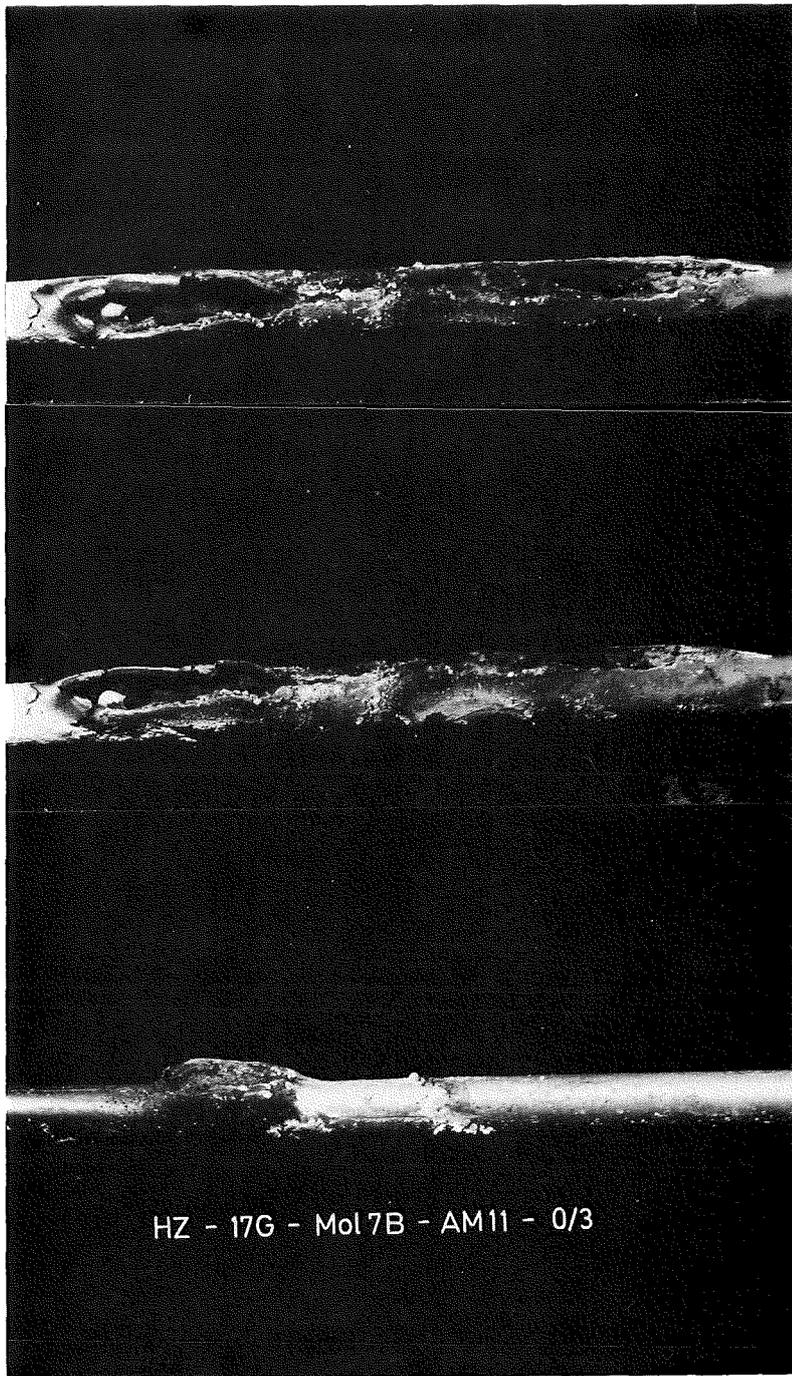


Abb. I.1: Schäden am Stab AM 11

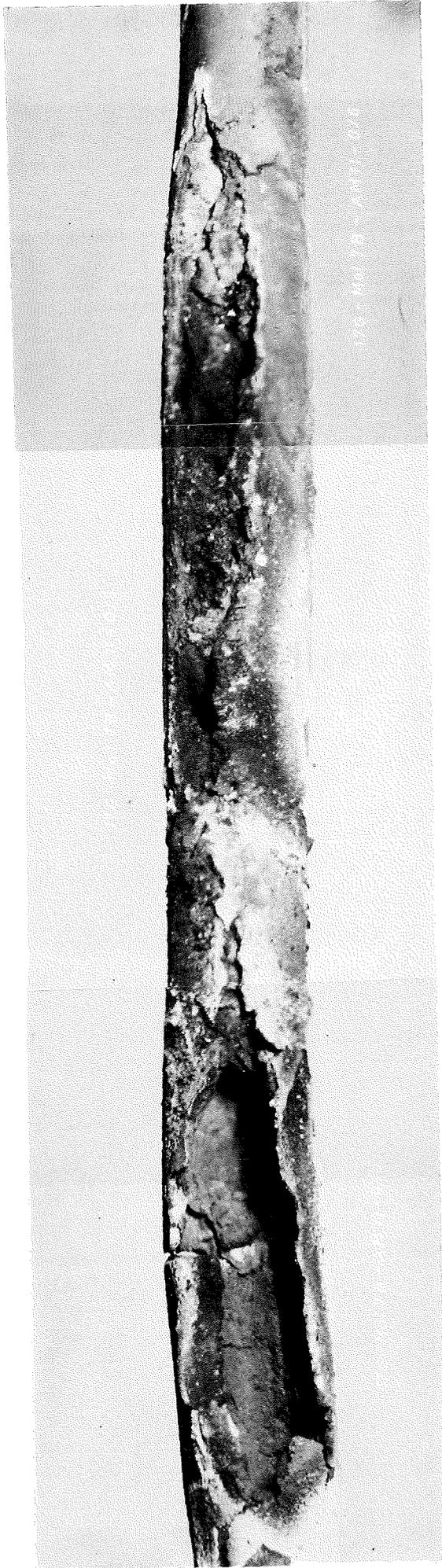


Abb. I.2.: Schäden am Stab AM 11

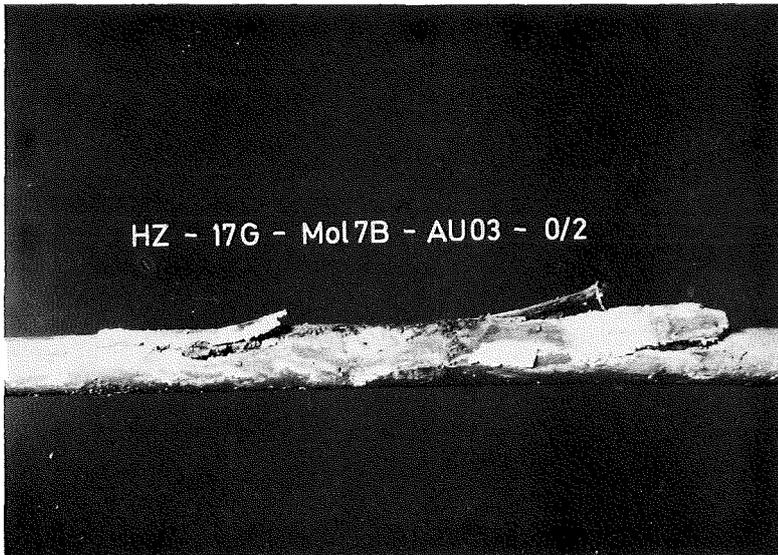
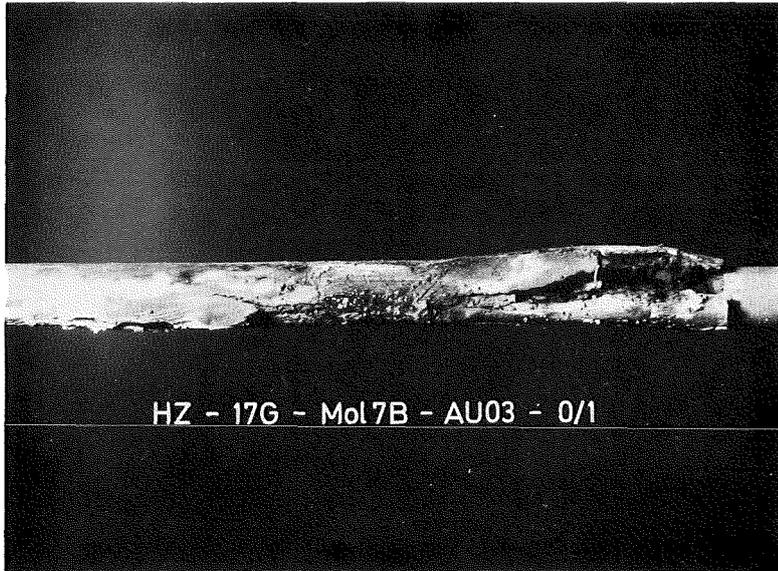


Abb. I.3:      Schäden am Stab AU 03



Abb. I.4:      Schäden am Stab GM 2

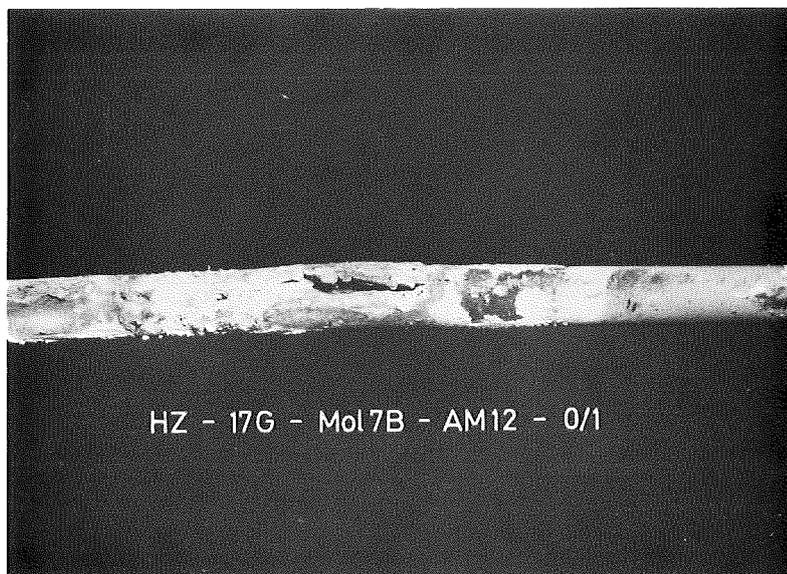
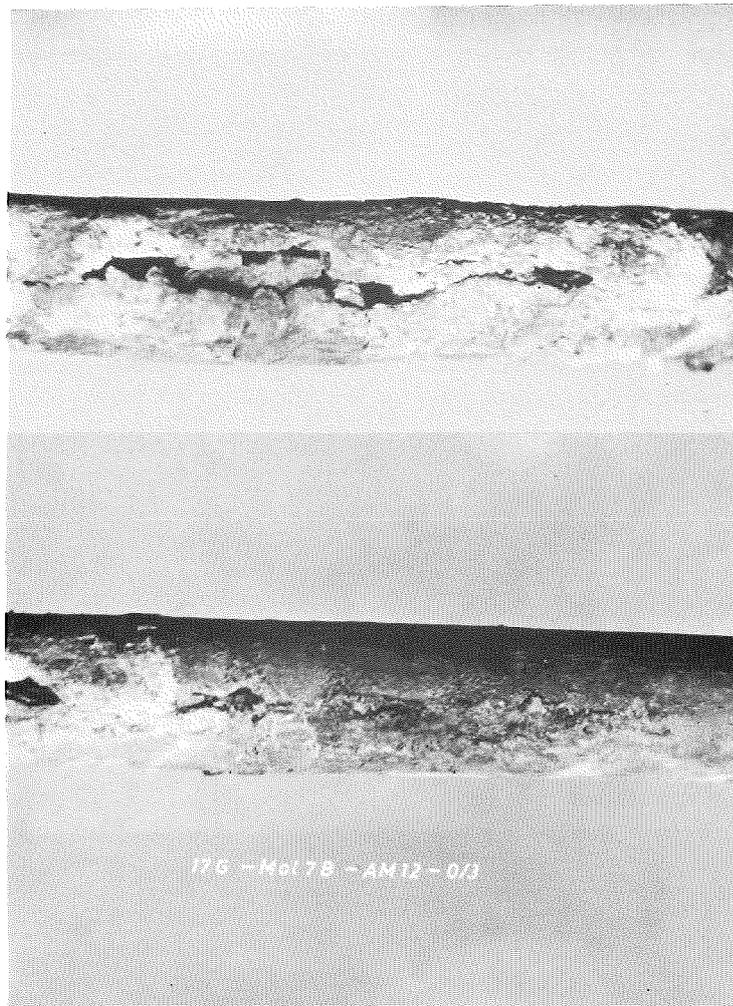


Abb. I.5: Schäden am Stab AM 12

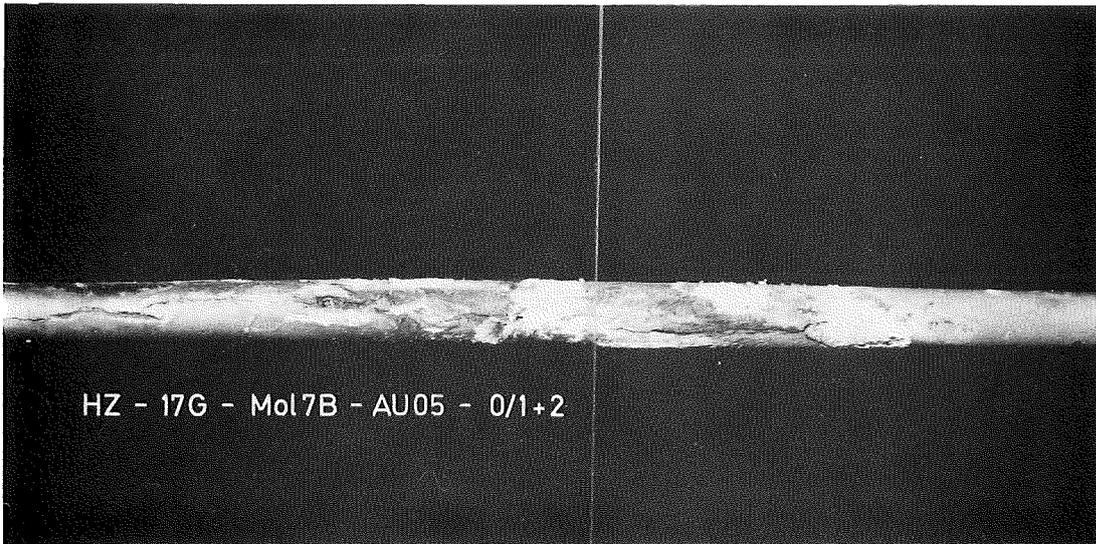
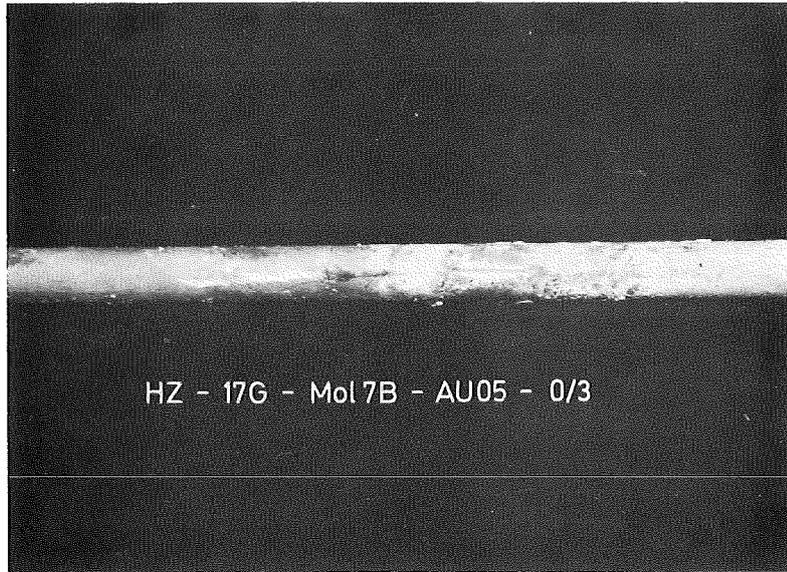


Abb. I.6: Schäden am Stab AU 05

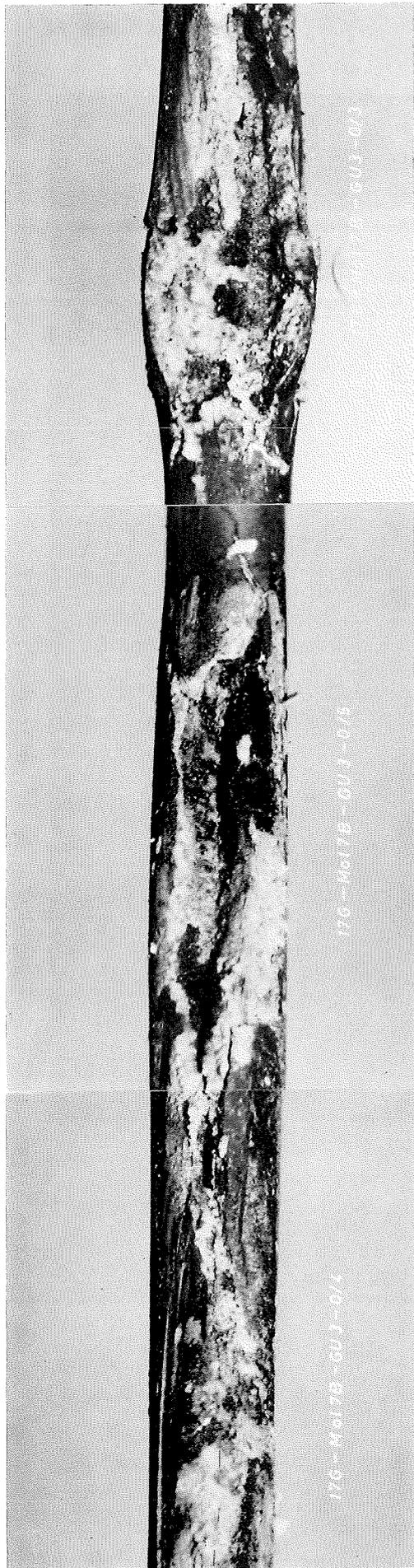


Abb. I.7: Schäden am Stab GU 3

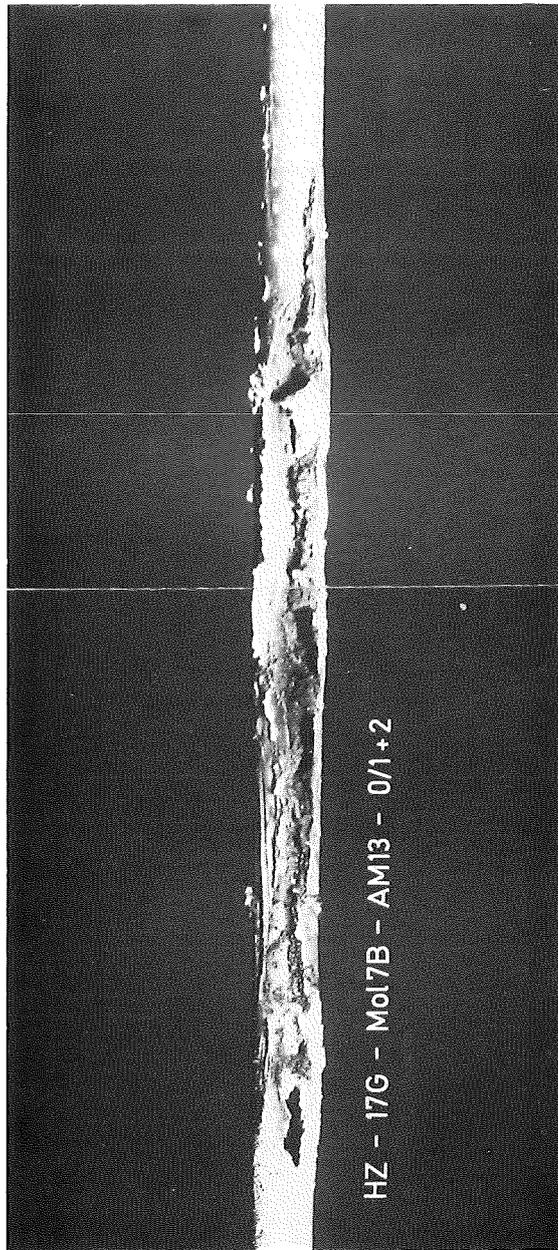


Abb. I.8: Schäden am Stab AM 13

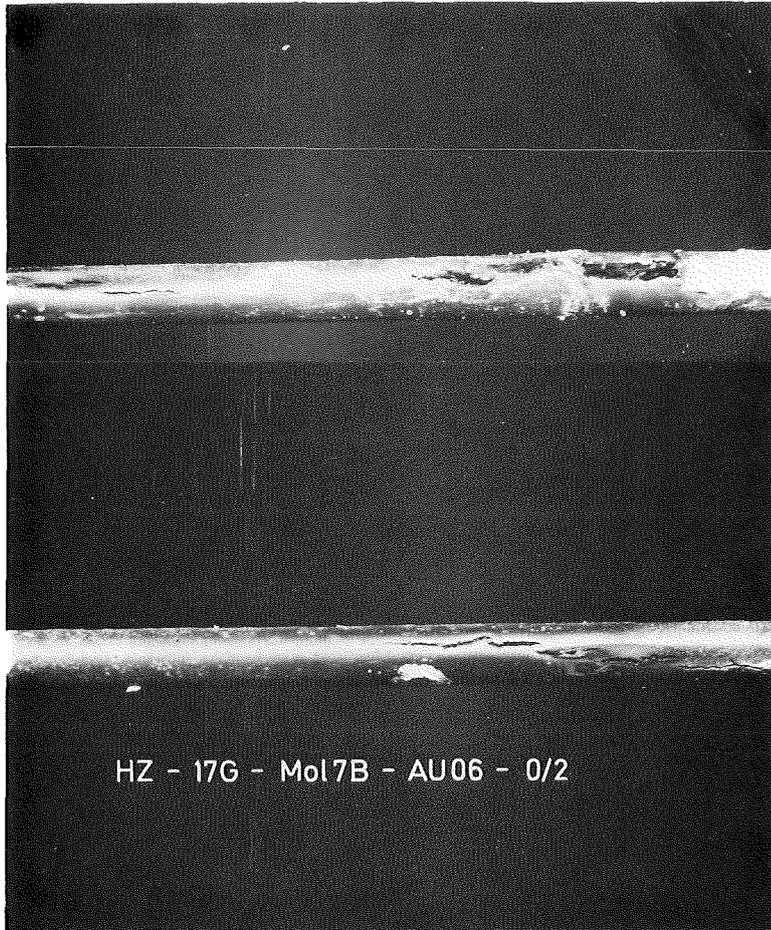


Abb. I.9:      Schäden am Stab AU 06

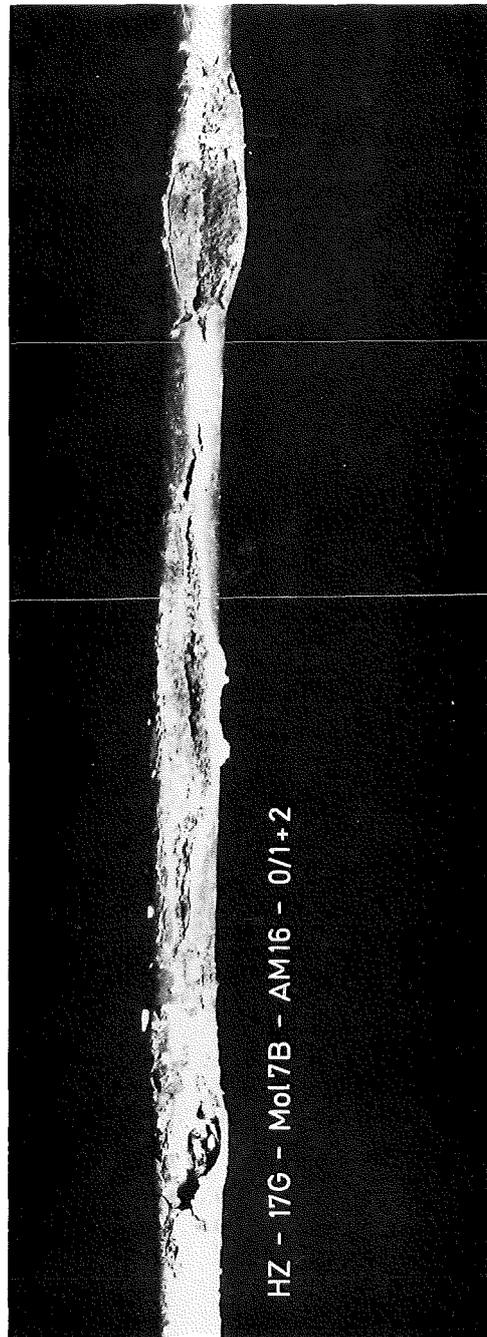


Abb. I.10: Schäden am Stab AM 16

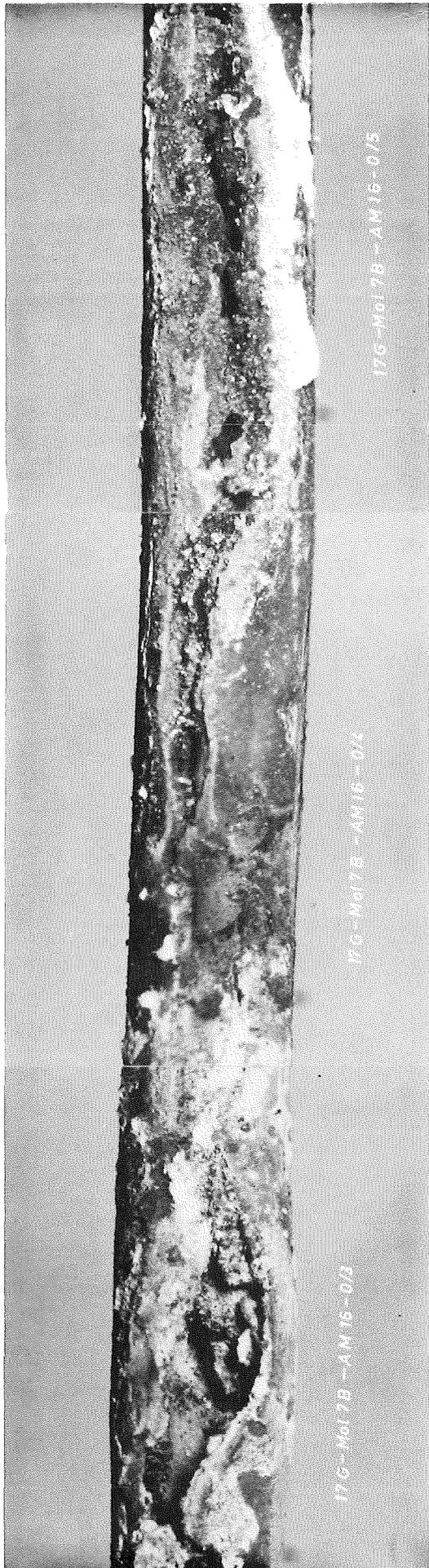


Abb. I.11: Schäden am Stab AM 16

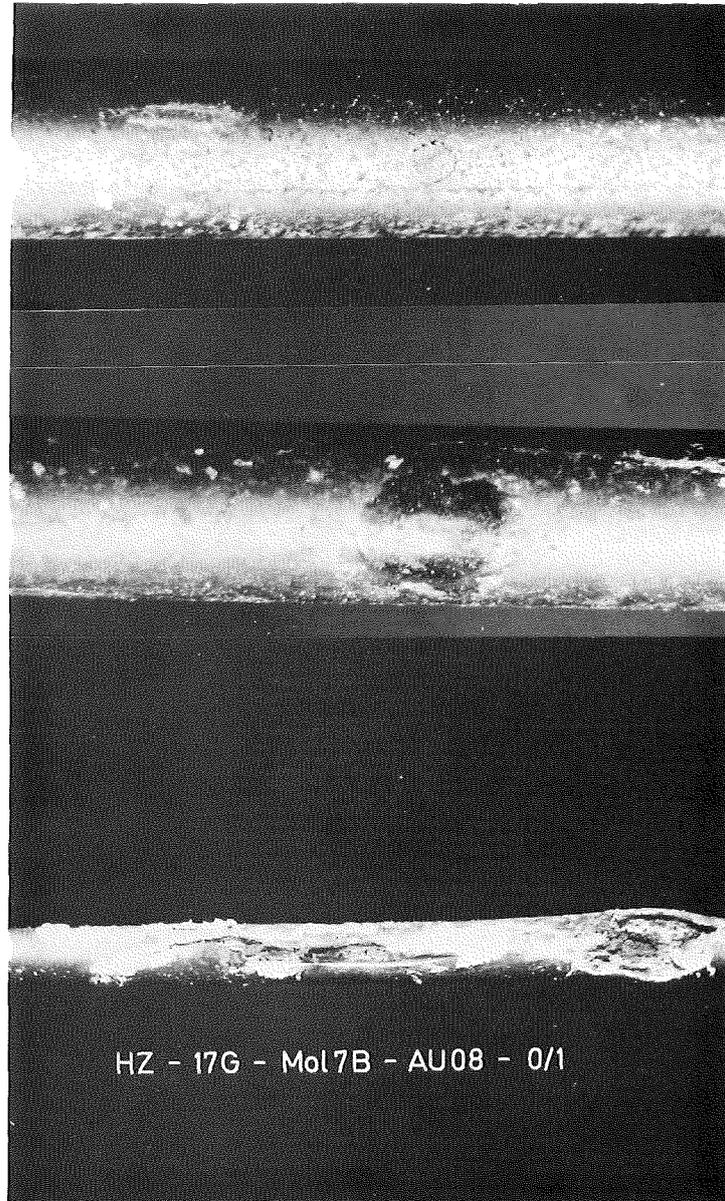
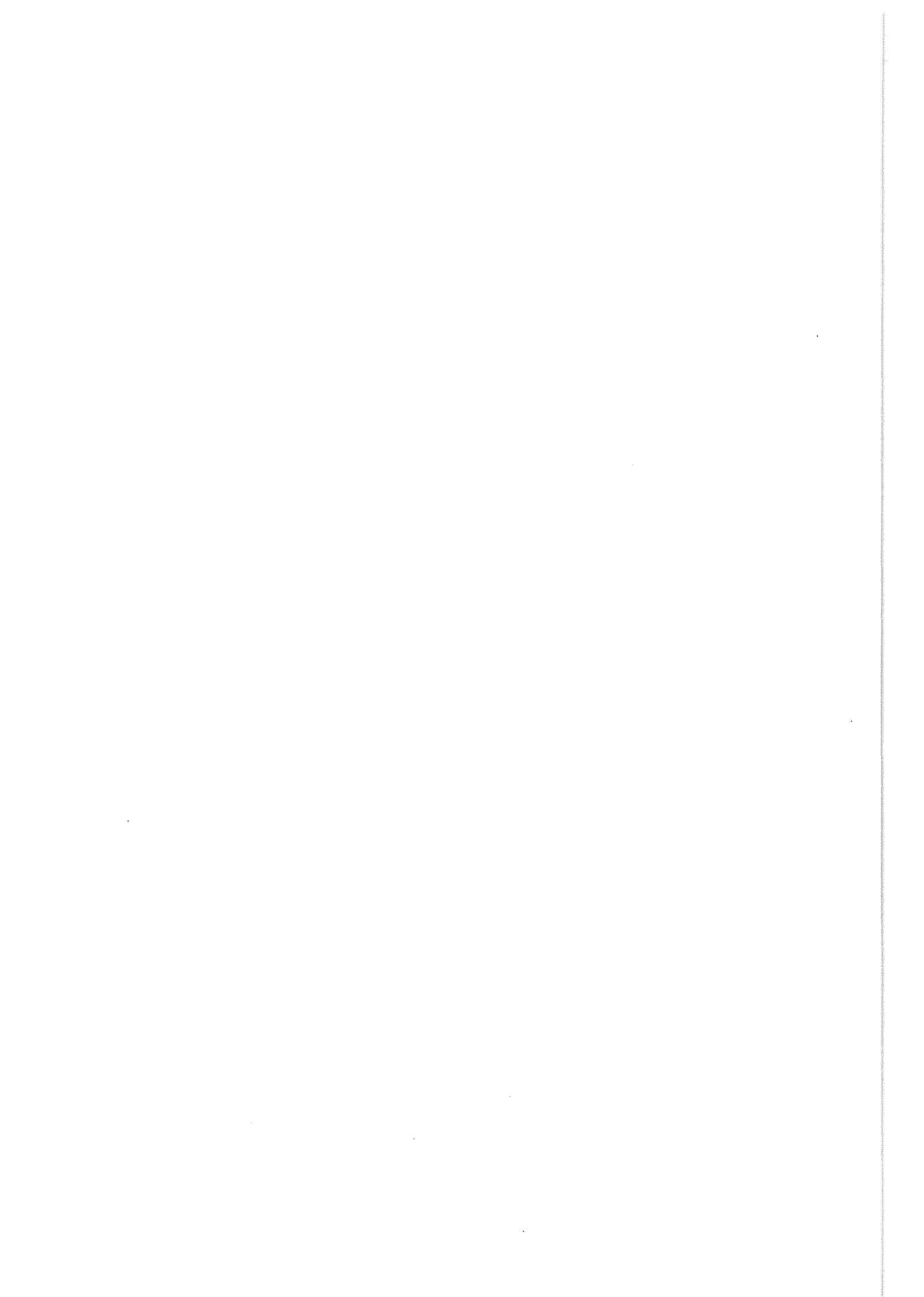


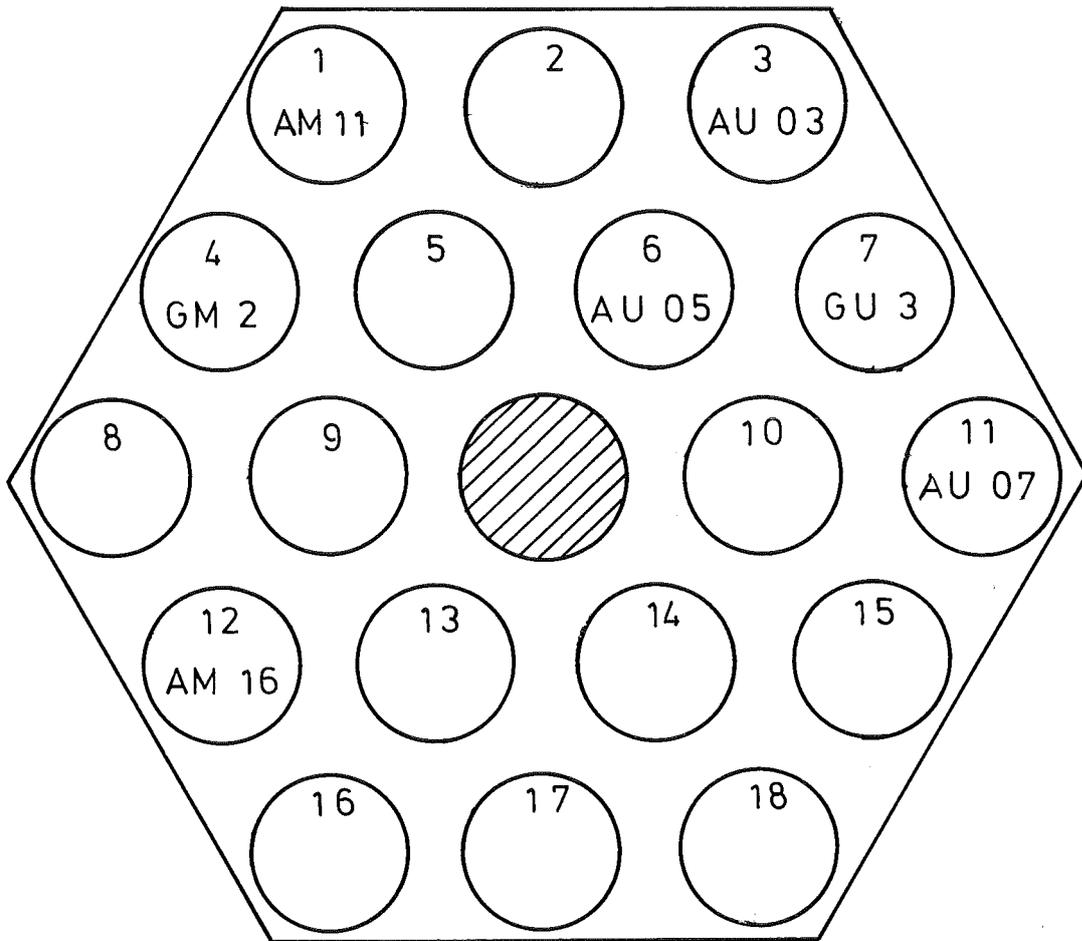
Abb. I.12: Schäden am Stab AU 08

A N H A N G   I I

DOKUMENTATION DER ZERSTÖRENDE NACHUNTERSUCHUNG

Stab AM-11	-	Seite II/4	bis	Seite II/11
" AU-03	-	" II/12	"	" II/22
" GM-02	-	" II/23	"	" II/30
" AU-05	-	" II/31	"	" II/40
" GU-03	-	" II/41	"	" II/51
" AU-07	-	" II/52	"	" II/62
" AM-16	-	" II/63	"	" II/73



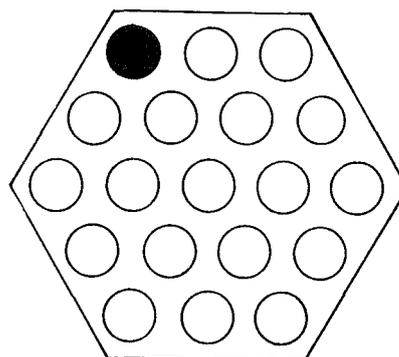


	Brennstoff-Form	Hüllrohrwerkstoff
AM 11	Tabletten	Stahl 1.4988
AU 03	"	Stahl 1.4970
GM 2	"	Stahl 1.4988
AU 05	"	Stahl 1.4970
GU 3	"	Stahl 1.4970
AU 07	"	Stahl 1.4970
AM 16	"	Stahl 1.4988

Anordnung der untersuchten Stäbe  
im Bündel

Stab: AM11

Faltblatt: A3



Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
1	A4	Im Bereich des Hülldefekts. Oxidgefüge stark durchlöchert.
2	A5	Hüll- und Brennstoffverlust in Form eines Sektors. Verlagerung des thermischen Zentrums zur defekt-abgewandten (heißeren) Seite.
4	A6	Lage in Brennstoffsäulenmitte. Hülle ist hier intakt. Zentralkanal ist mit Brennstoffbruchstücken gefüllt (Präparation?).
5	A7	Lage 25 mm unterhalb. Zentralkanal ist 60 % kleiner, mit Schmelzgefüge und metallischem Ingot. Brennstoffschmelzen vermutlich oberhalb dieser Position.
6 (längs)	A3	Zeigt in der Übersicht starke Ausbrüche am Zentralkanal. Schmelzingot im unteren Teil. Angeschmolzene Zentralkanalränder - "Basalt-Struktur".
7	A8	Starker Brennstoff- und Hüllrohrverlust. Im Restspalt zwischen Hülle und Brennstoff ist Natrium-Urano-Plutonat ( $\text{Na}_3\text{MO}_4$ ).
unten		

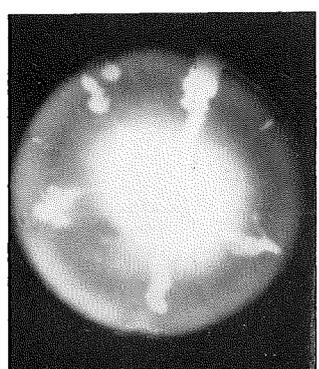
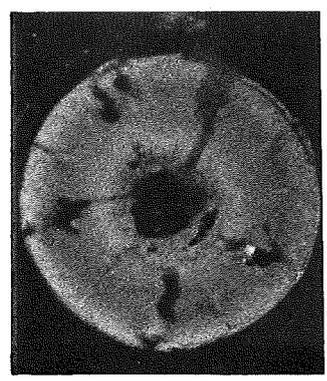
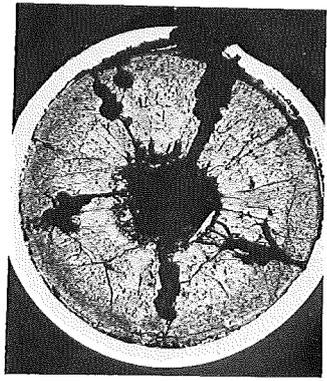
75cm 70 5 60

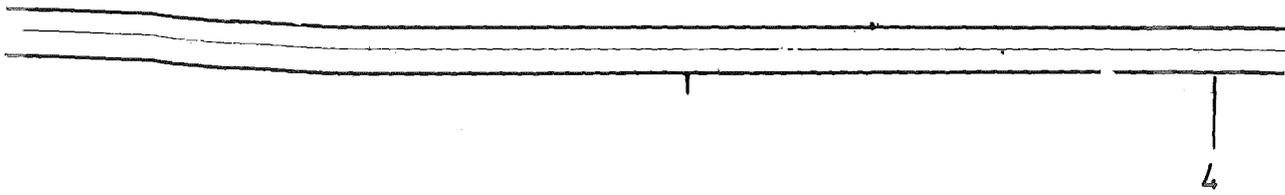
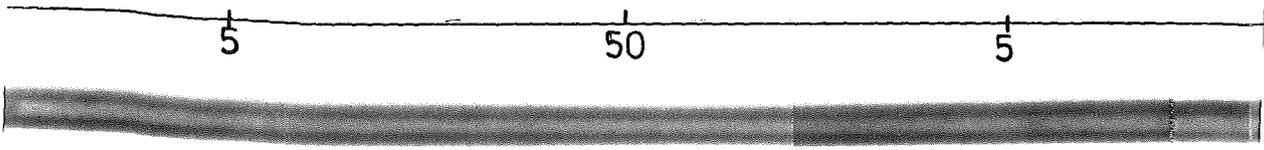


1

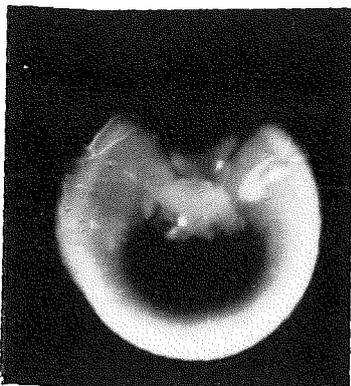
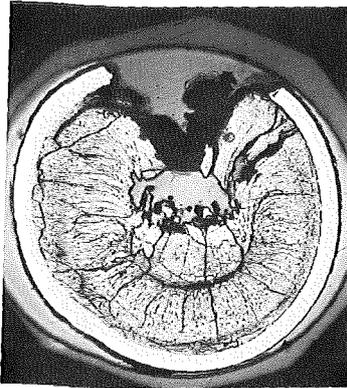
2

1





2



40

5

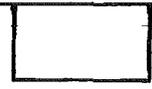
30



Stablänge: 1080mm

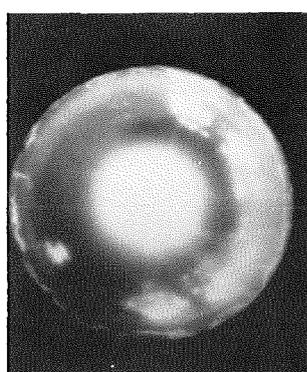
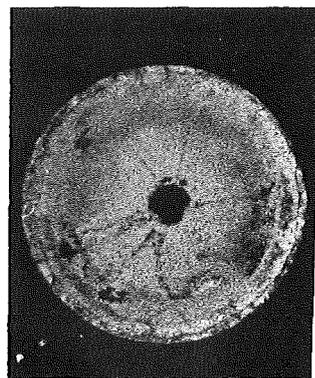
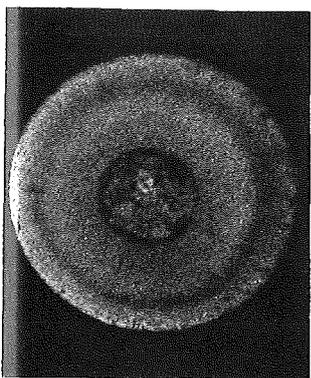
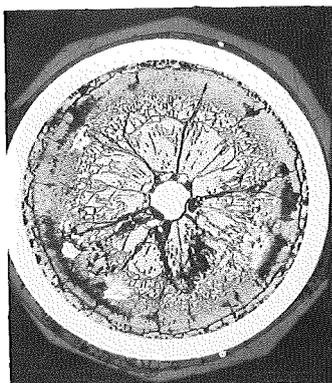
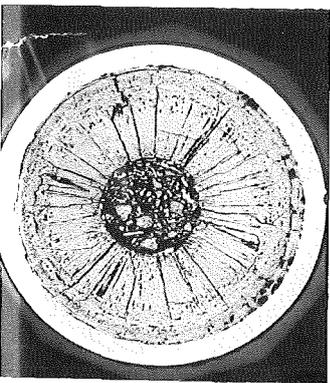
5

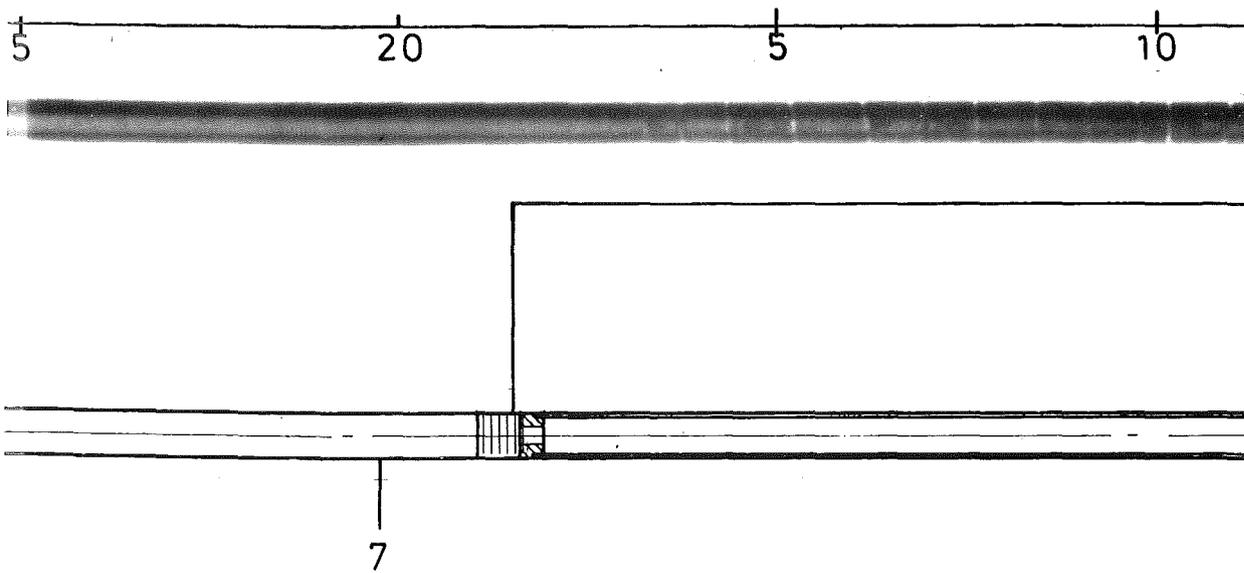
6



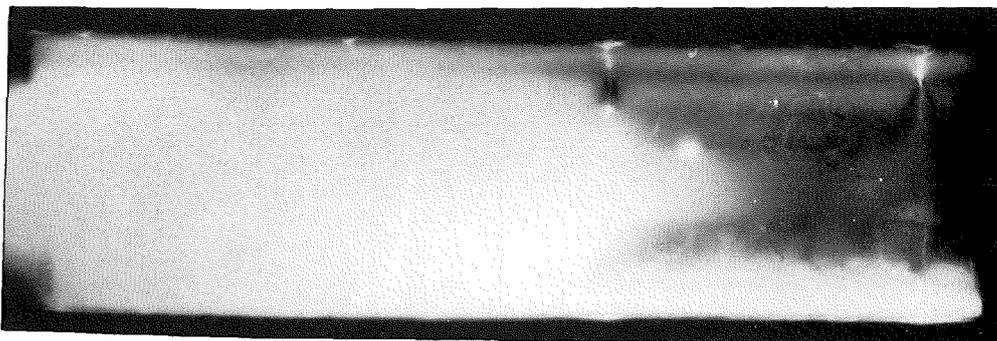
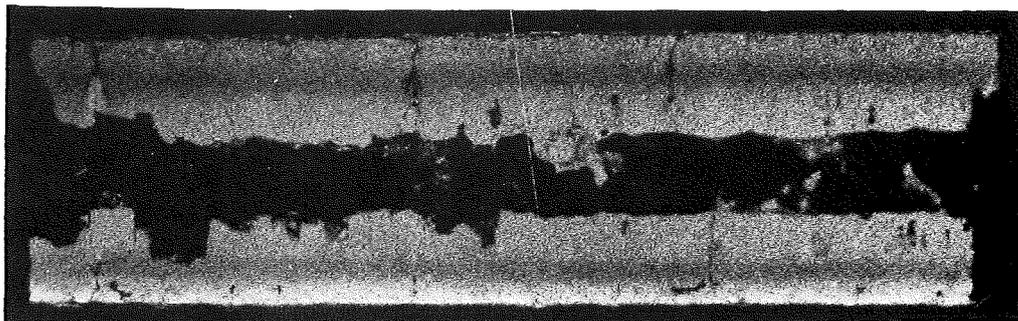
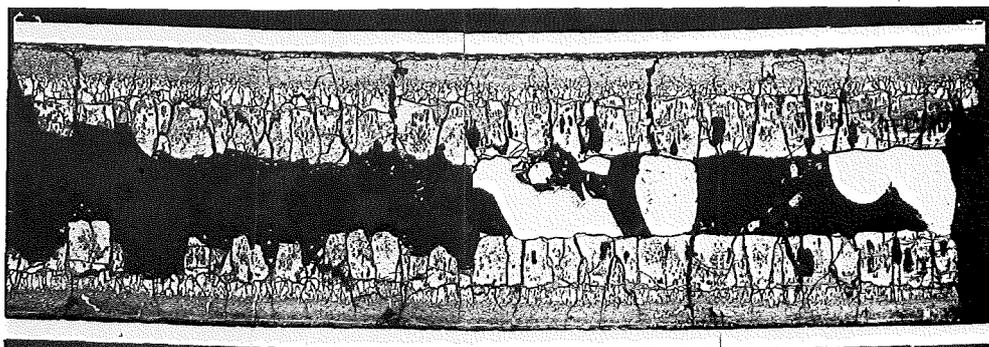
4

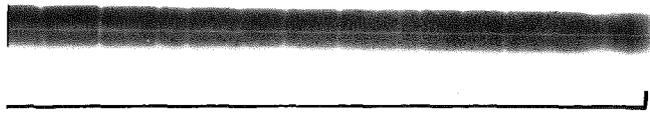
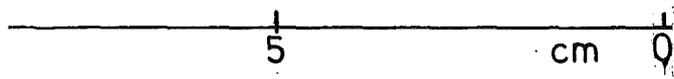
5





6





# Stab AM 11

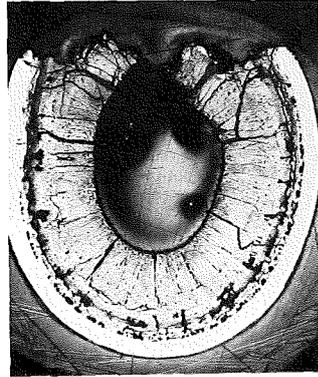
unten



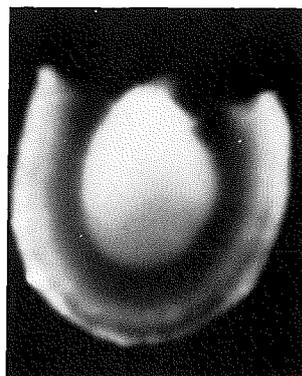
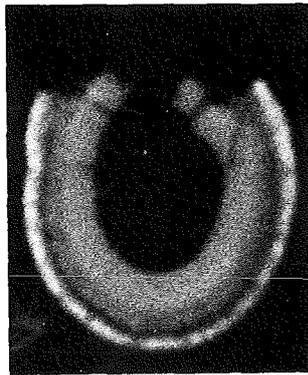
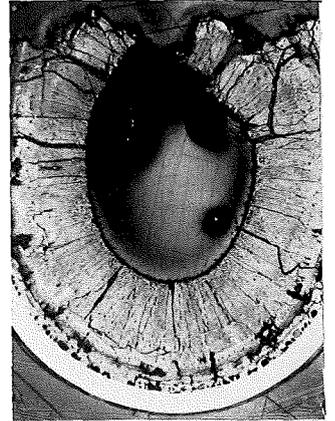
6 $\phi$

A 3

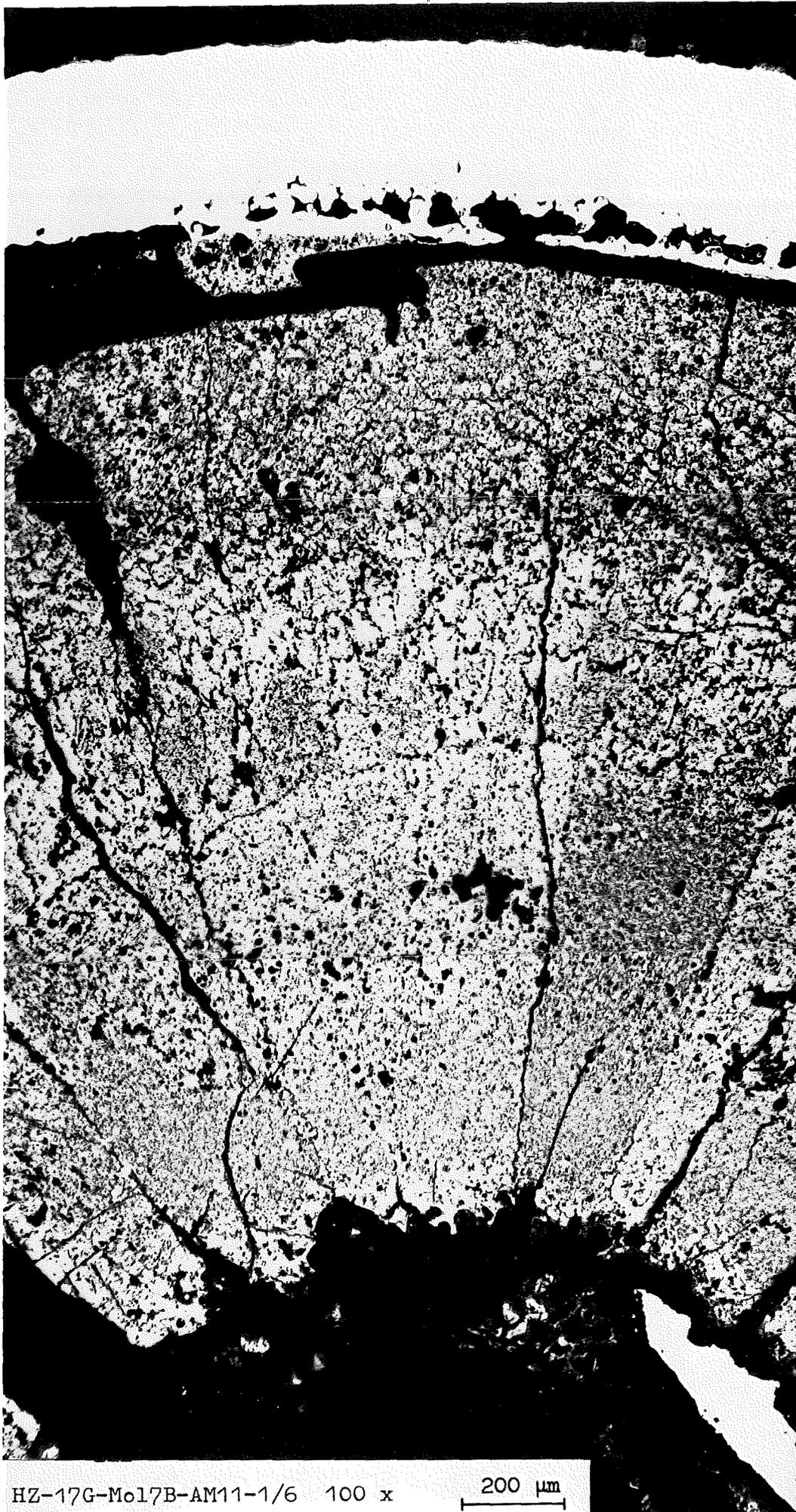
7 1mm



1mm

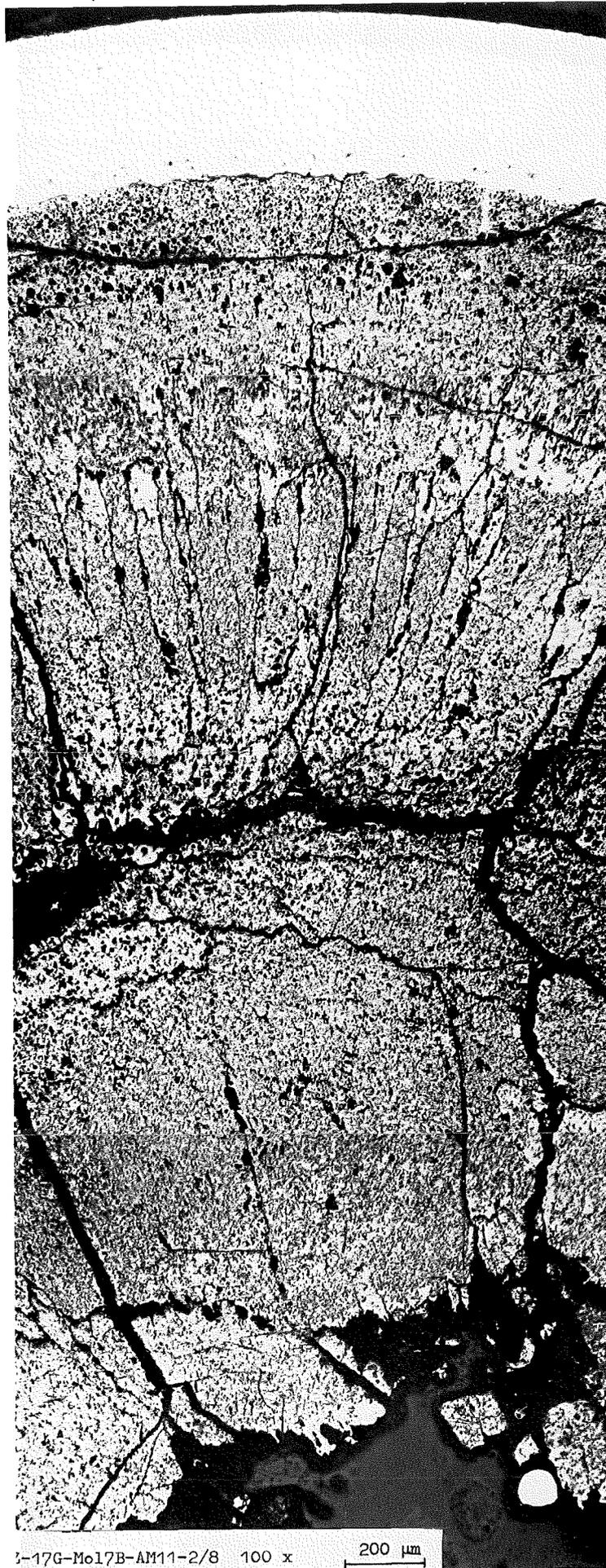






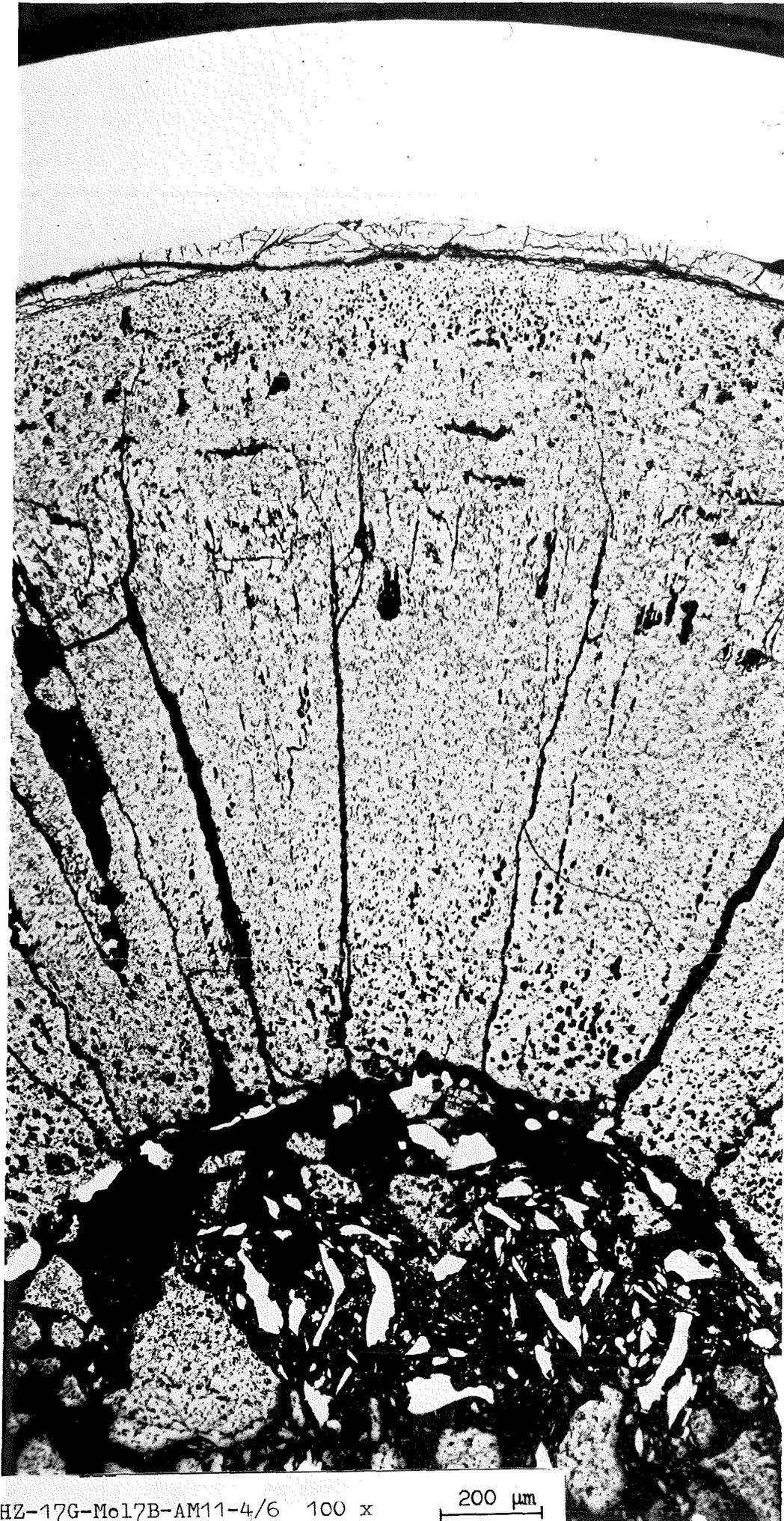
HZ-17G-Mo17B-AM11-1/6 100 x

200  $\mu\text{m}$



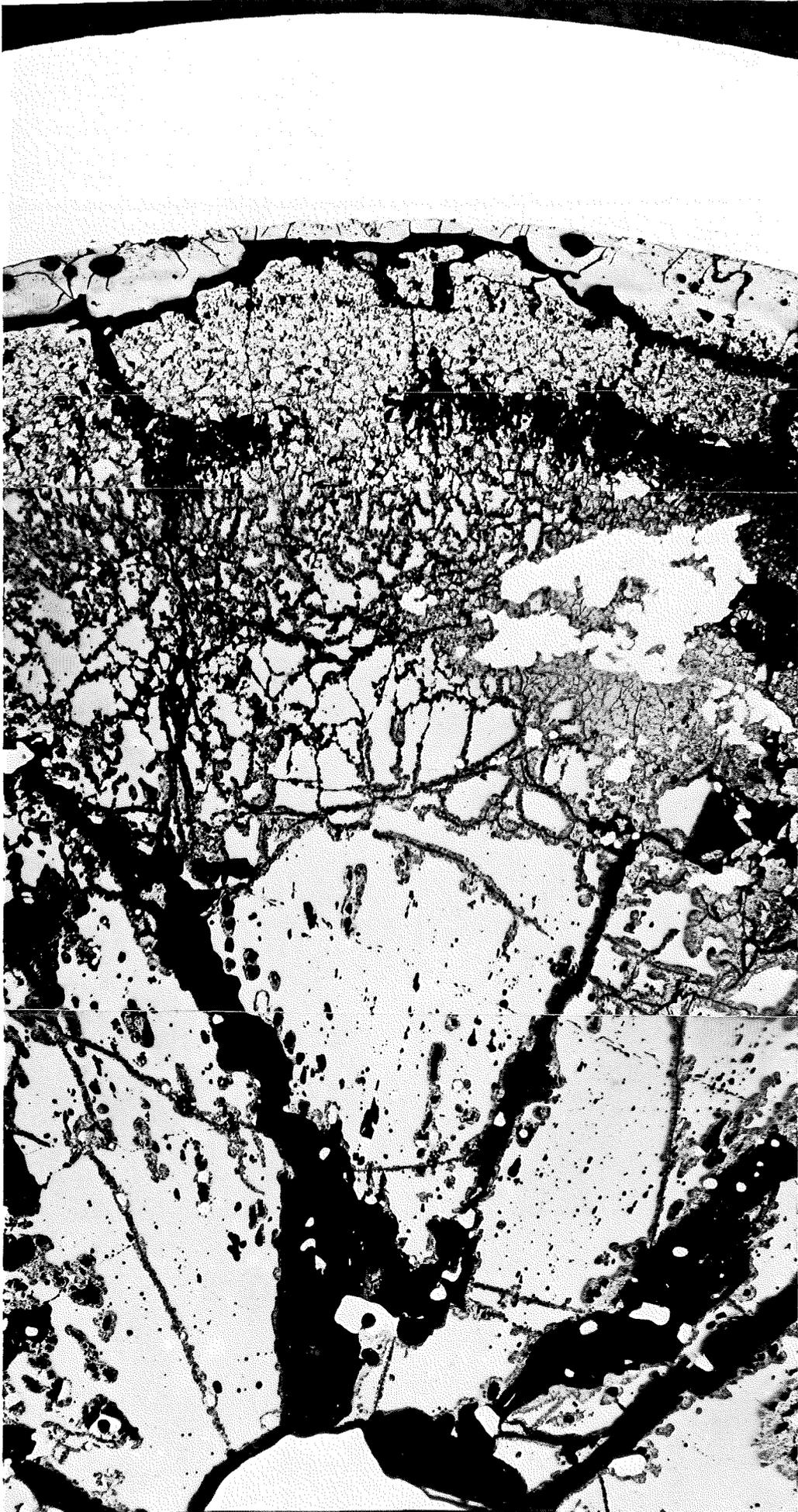
2-17G-Mo17B-AM11-2/8 100 x

200  $\mu\text{m}$



HZ-17G-Mo17B-AM11-4/6 100 x

200  $\mu\text{m}$



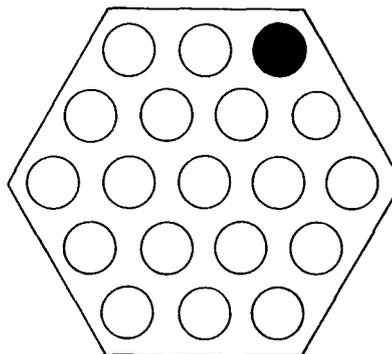
17G-Mo17B-AM11-5/6 100 x 200 μm



Z-17G-Mo17B-AM11-7/7 100 x 200 μm

Stab: AUO3

Faltblatt: A9

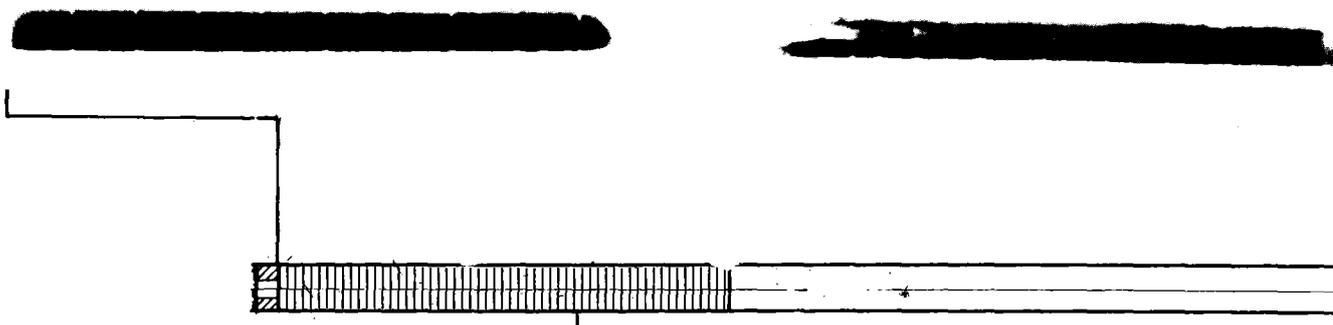


Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
11	A10	Querschliff durch obere Brutstoffsäule. Keine Anomalie.
10	A11	Querschliff ca. 90 mm unterhalb des oberen Endes der Spaltstoffsäule (unterhalb des Schadensbereiches).
1	A12	Starker Hüllrohrangriff. In Nähe des Zentralkanals: Erstarrtes und neu umstrukturiertes Oxidgefüge.
3	A13	Querschliff in Brennstoffsäulenmitte. Im Zentralkanalbereich derselbe Befund wie bei Schliff 1, zusätzlich ist ein Schmelzingot vorhanden.
4	A14	Querschliff dicht unterhalb Schliff 3. Brennstoffschmelzen trat hier nicht auf. Der große Zentralkanal ist restlos mit Spalt-Metall angefüllt.
5	A15	Liegt 25 mm unterhalb Schliff 4. Normales Oxidgefüge mit Na-Urano-Plutonat im Ring-spalt.
7	A16	Zeigt im Zentrum umstrukturierte Oxid-Schmelze und eine relativ dicke Uranat-schicht (ca. 300 $\mu$ m).
8 (längs)	A17	Ähnliches Bild wie auf Blatt A16. Uranatschichtstärke beträgt ca. 400 $\mu$ m.
unten		

75cm

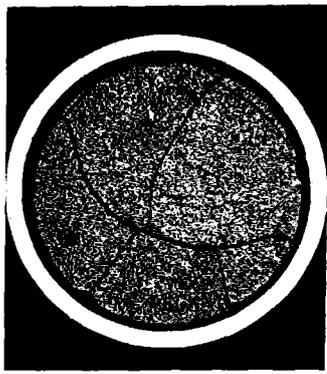
70

5

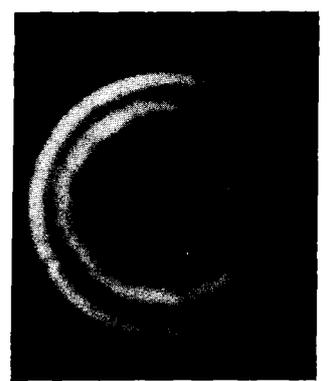
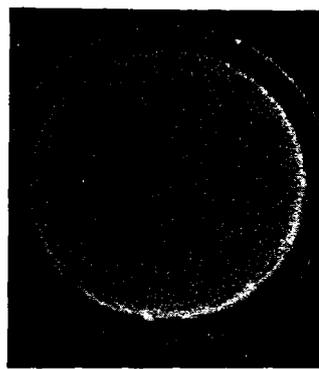
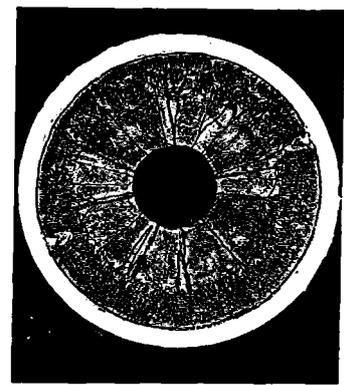


11

11



10

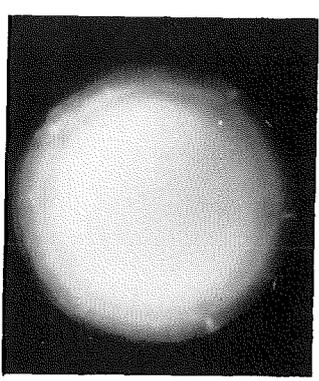
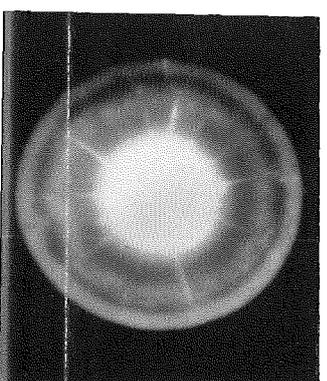
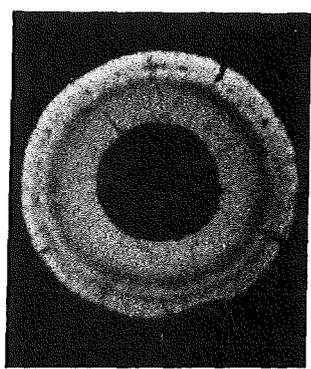
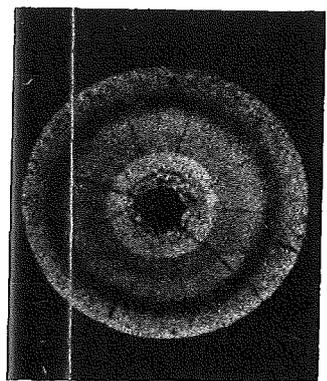
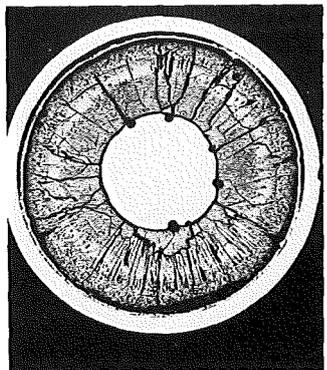
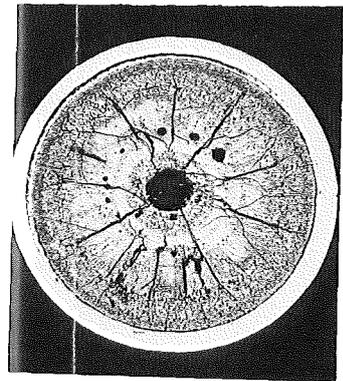


60 5 50 5

10 1 3 4 5

1

3



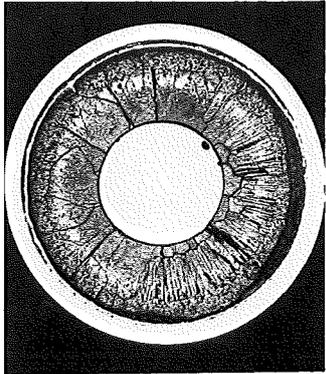
40

5

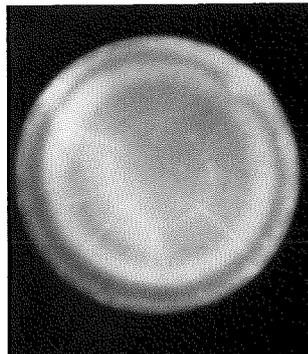
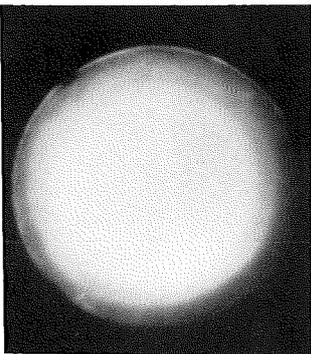
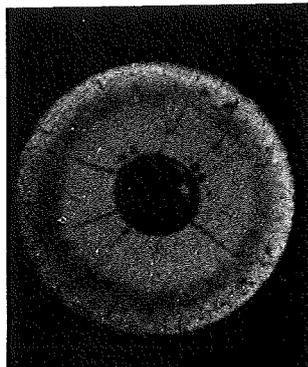
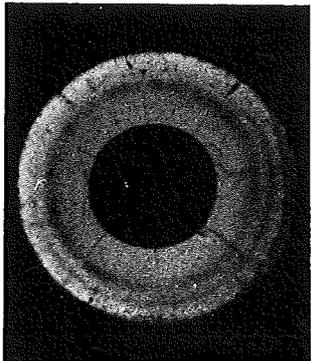
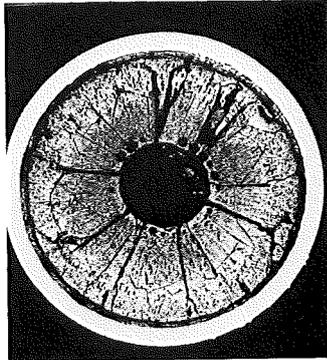
30

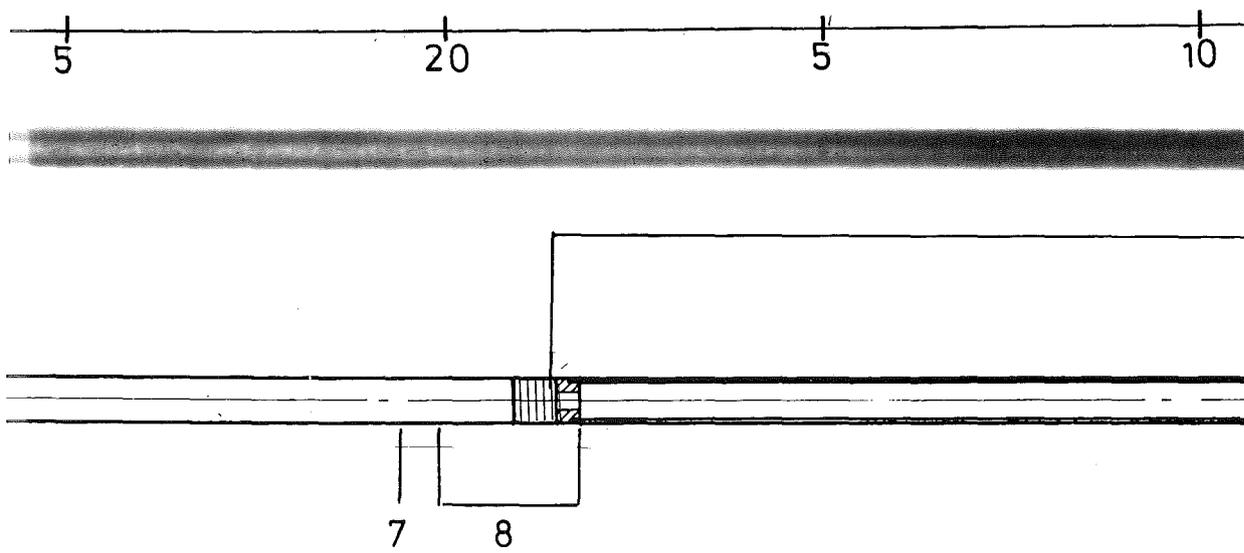
Stablänge 1080 mm

4

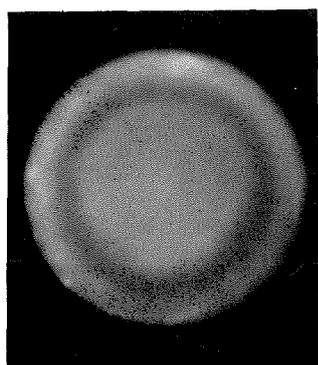
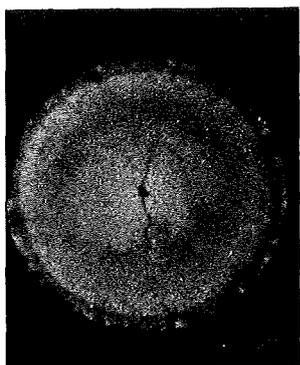
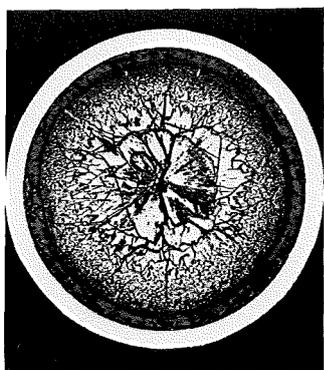


5





7



5 cm 0

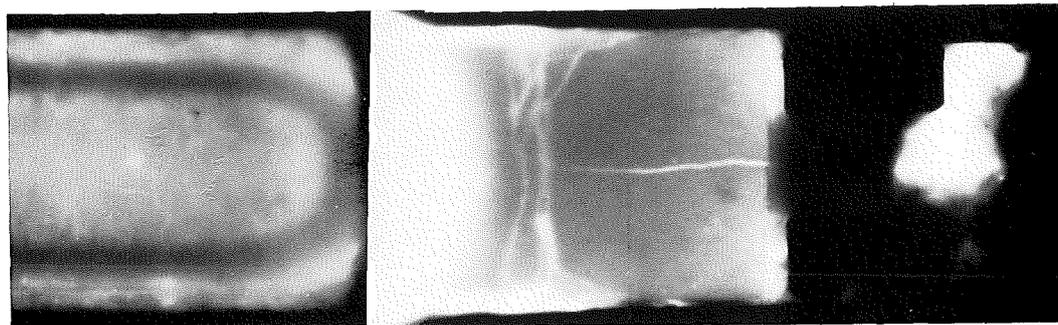
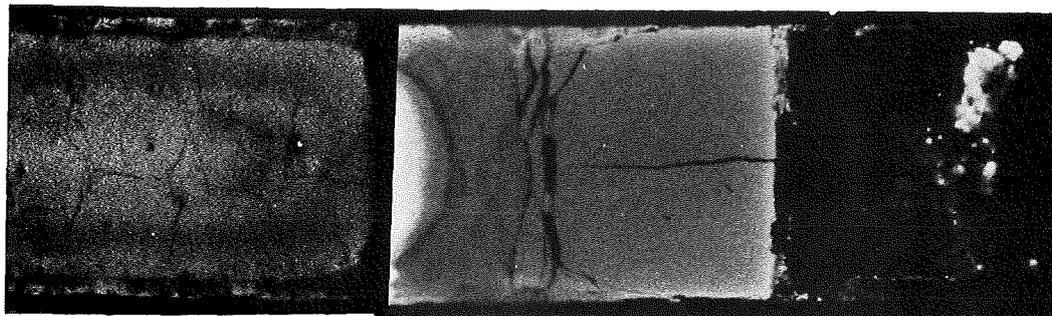
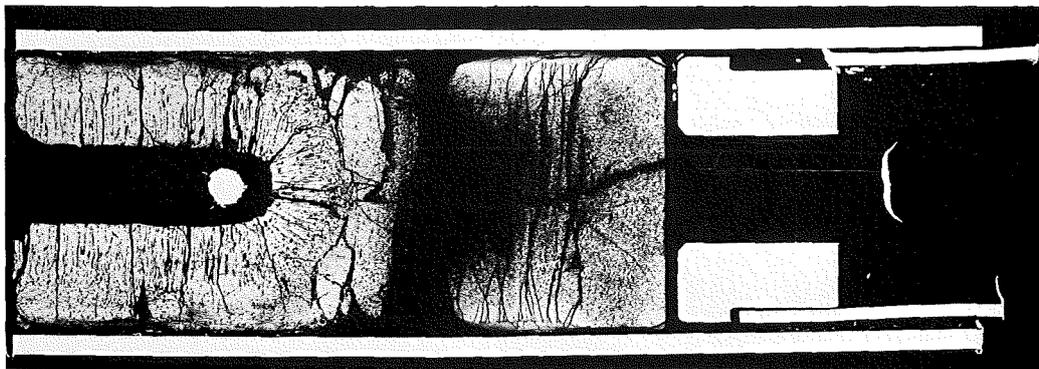
Stab AU 03

unten

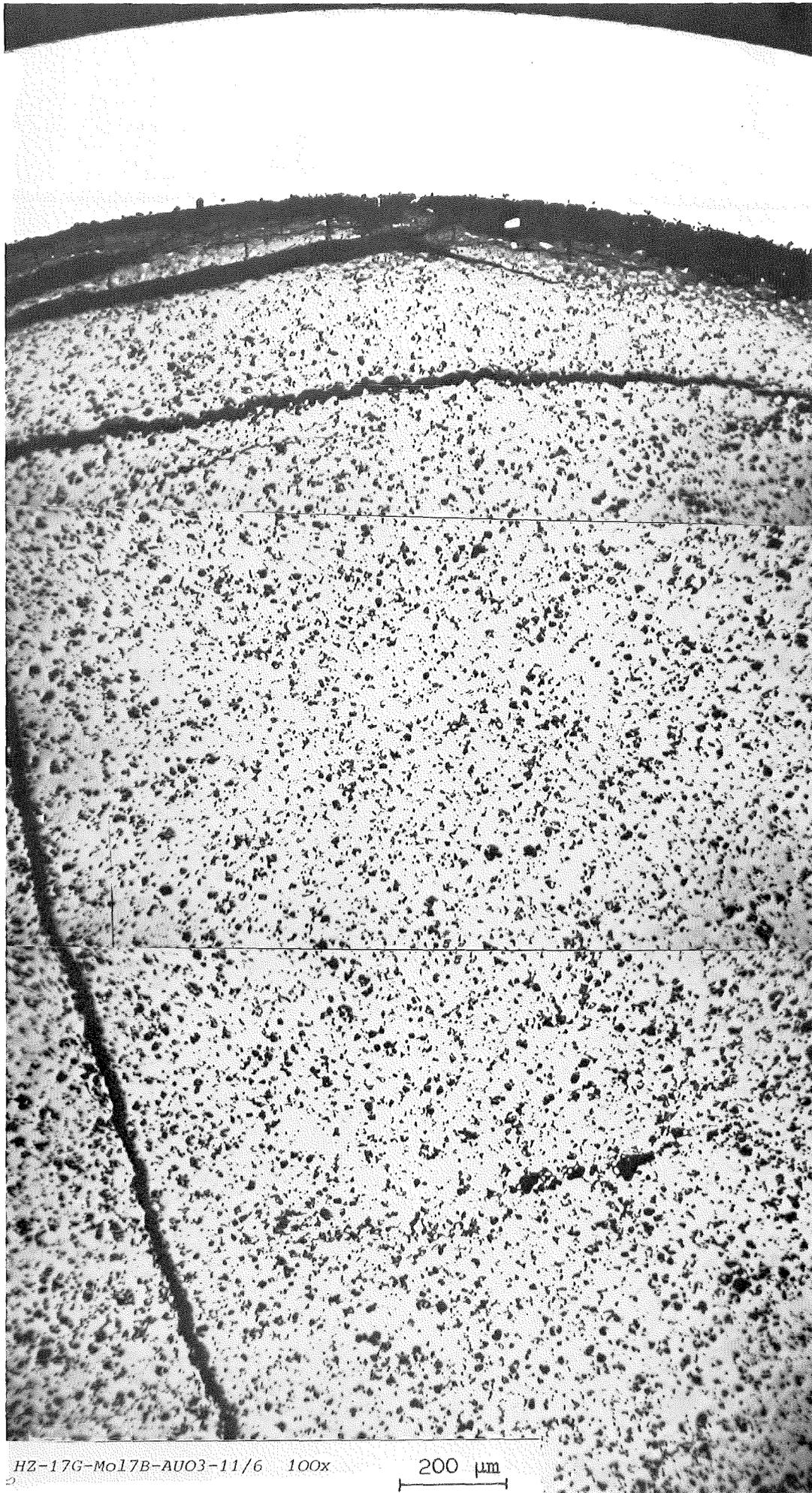
A9

6φ

8







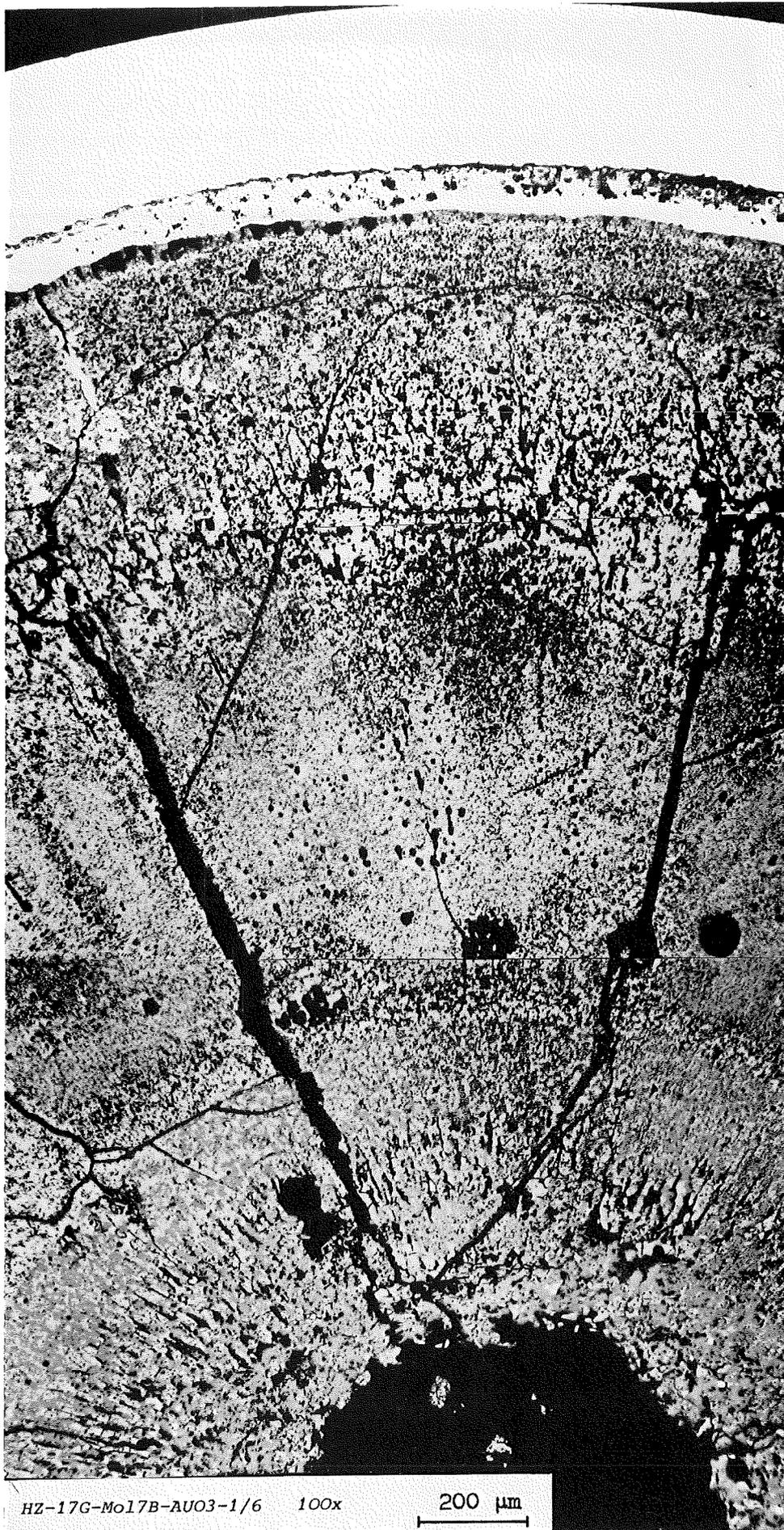
HZ-17G-Mo17B-AUO3-11/6 100x

200  $\mu$ m



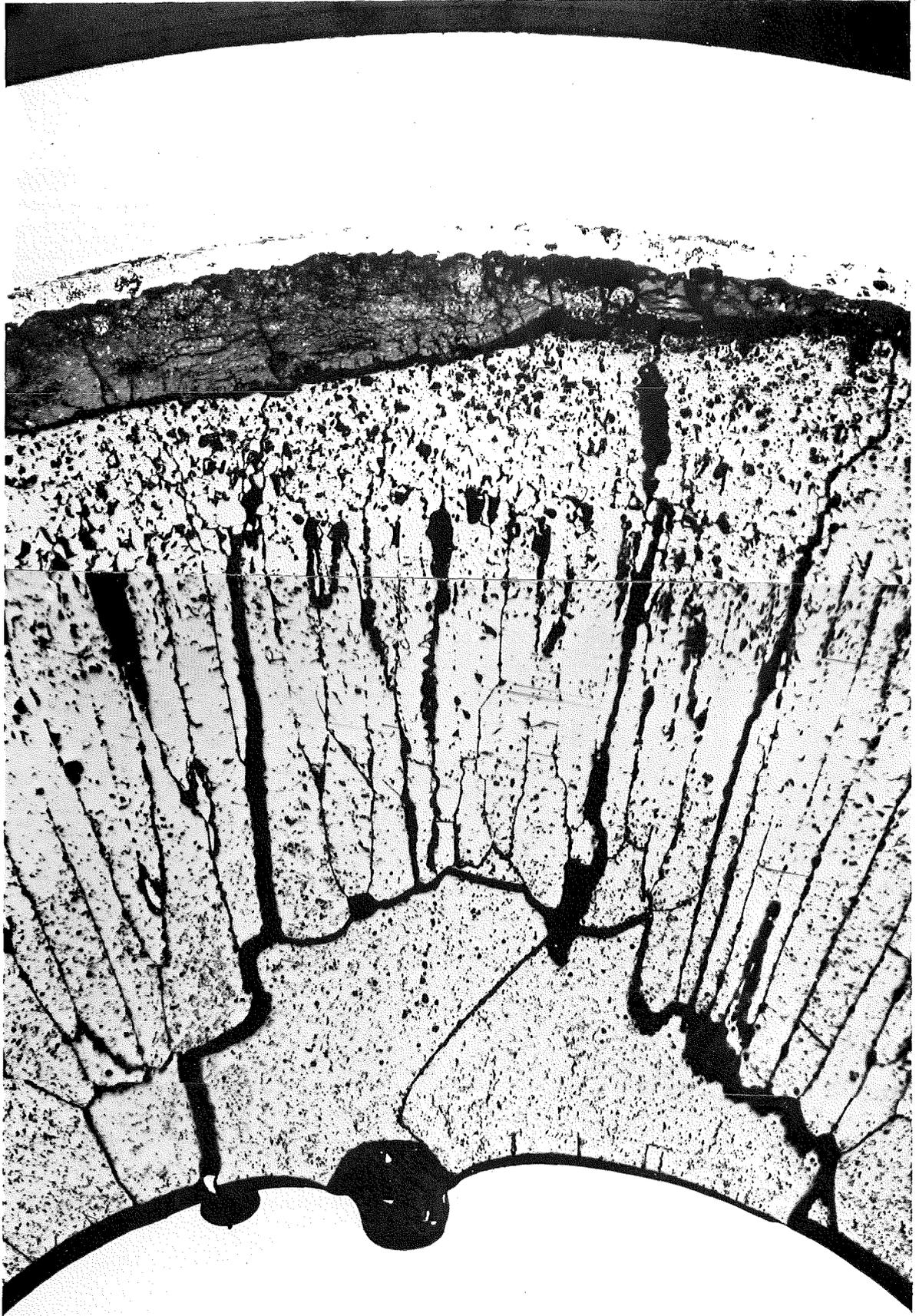
IZ-17G-Mo17B-AU03-10/6 100x

200  $\mu\text{m}$



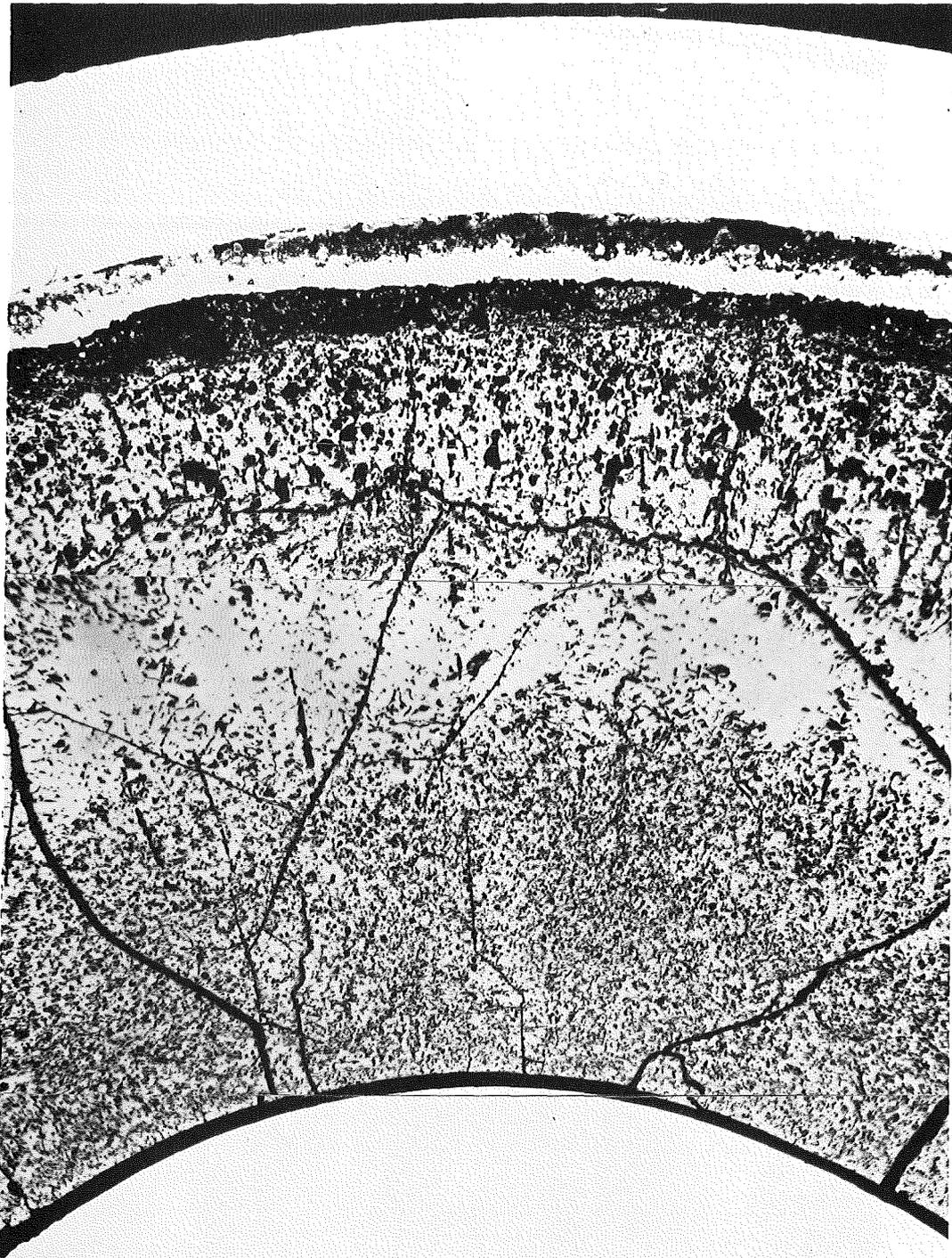
HZ-17G-Mo17B-AUO3-1/6 100x

200 μm



HZ-17G-Mo17B-AU03-3/6 100x

200  $\mu$ m



HZ-17G-Mo17B-AU03-4/6 100x

200  $\mu$ m



HZ-17G-Mo17B-AU03-5/6 100x

200  $\mu$ m



HZ-17G-Mo17B-AU03-7/7 100x

200  $\mu\text{m}$

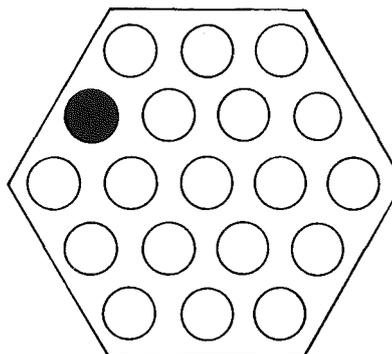


HZ-17G-Mo17B-AU03-8/10 100x

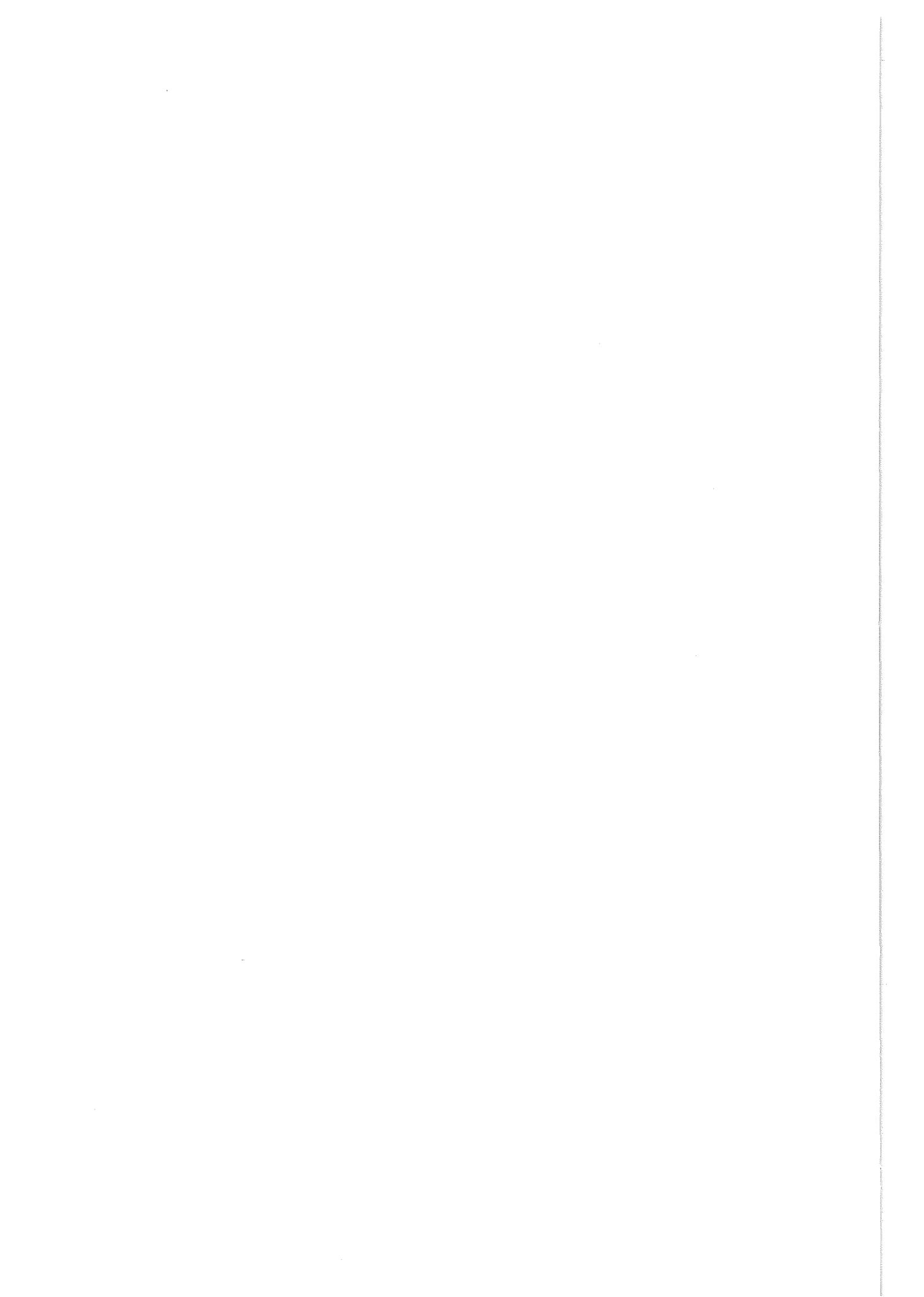
200 μm

Stab: GMO2

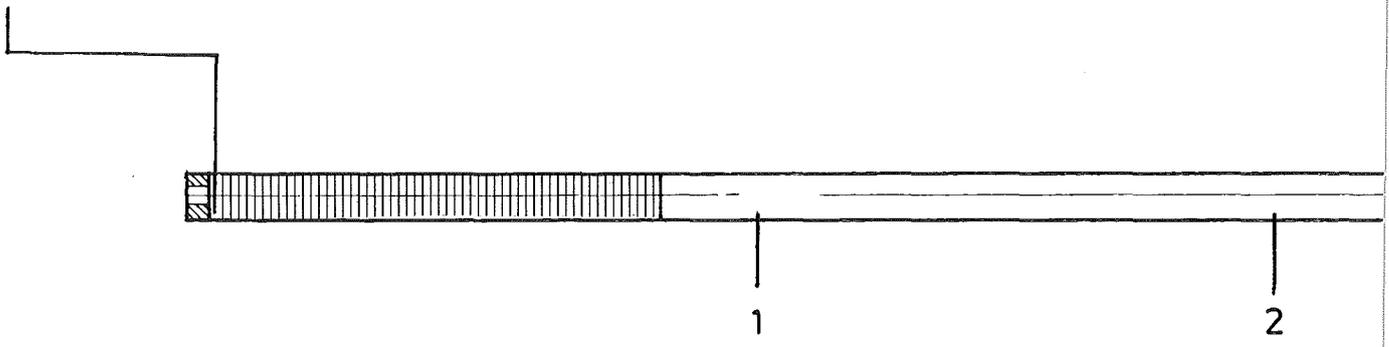
Faltblatt: A18



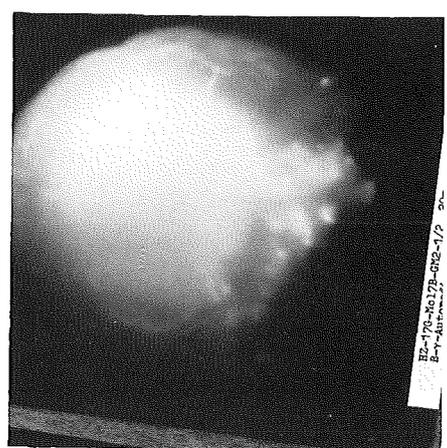
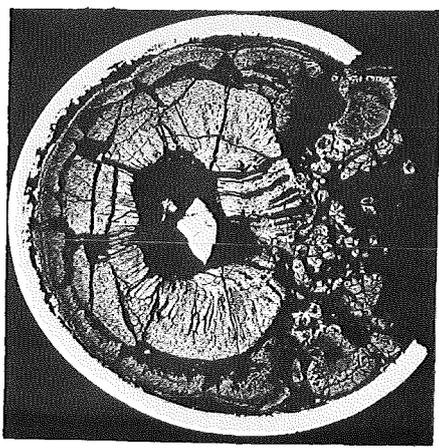
Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben 1	A19	Lage 10 mm vom oberen Ende der Spaltstoffsäule. Starke Hüllschädigung und großer Brennstoffverlust. Verlagerung des thermischen Zentrums zur "heißen" Hüllseite.
2	A20	Lage 70 mm unterhalb Schliff 1. Bild ähnlich wie bei demselben. Im Randspalt sind neben Korrosionsprodukten $\text{Na}_3\text{MO}_4$ -Reste erkennbar.
3	A21	Lage in Stabmitte. Ausgeprägter Ring von Na-Urano-Plutonat.
4	A22	Lage im unteren, kälteren Stabteil. Ausgeprägte Na-Uranat-Plutonat-Schicht von ca. 200 $\mu\text{m}$ Stärke. Ein Zentralkanal hat sich hier - niedrige Stableistung - nicht mehr ausgebildet.
unten		



75 cm                      70                      5                      60



1



5

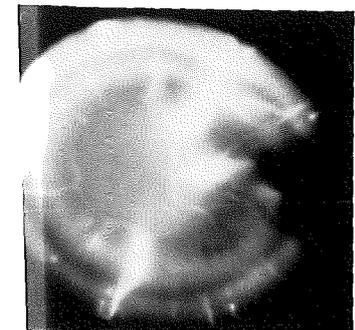
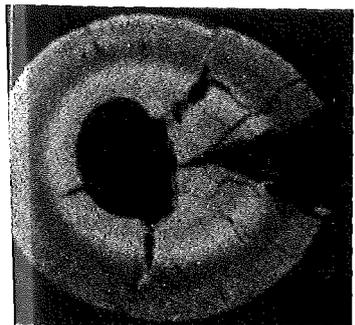
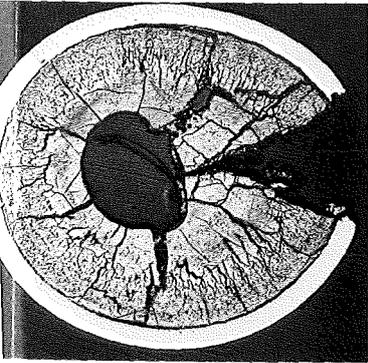
50

5



3

2



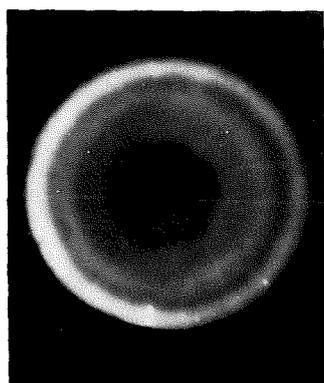
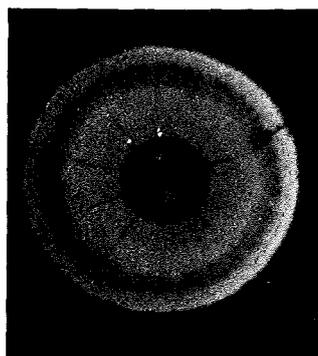
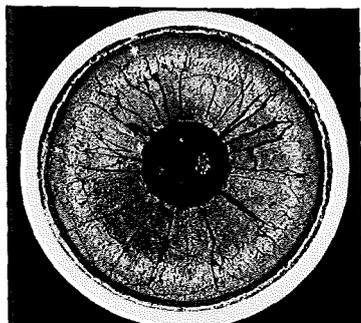
40

5

30

Stablänge: 1080 mm

3

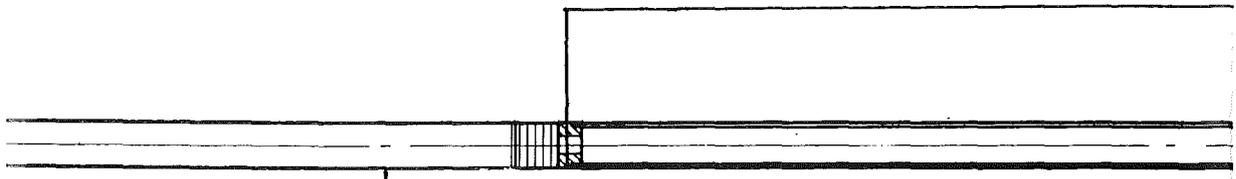


5

20

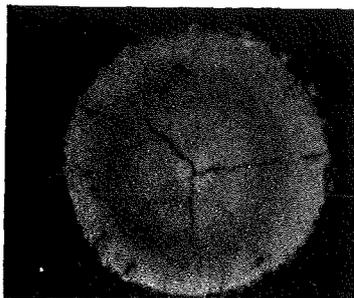
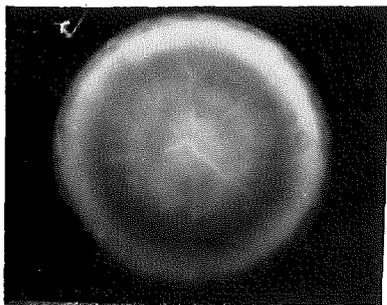
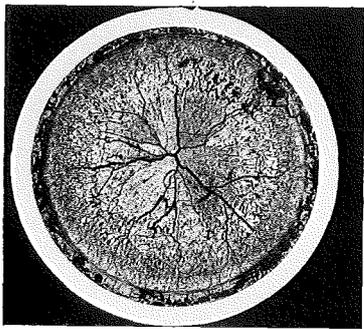
5

10



4

4



5 cm 0



Stab GM2

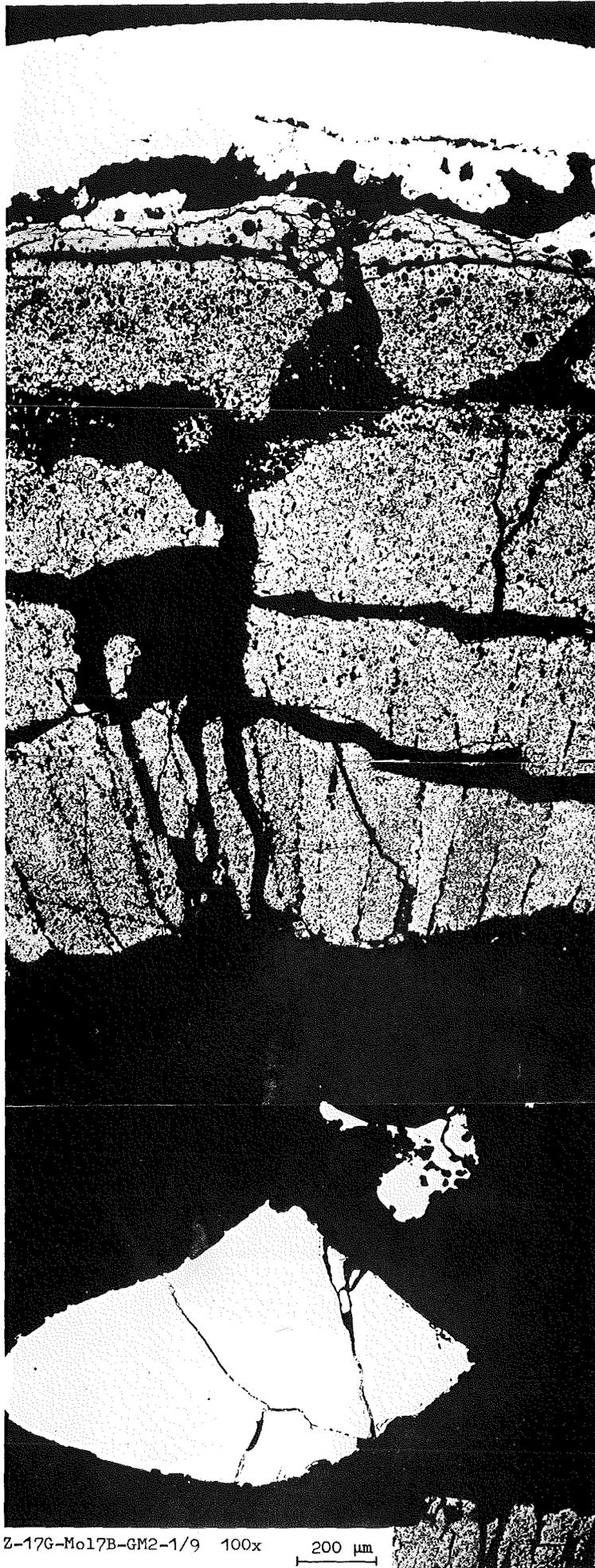
unten



6  $\phi$

A18





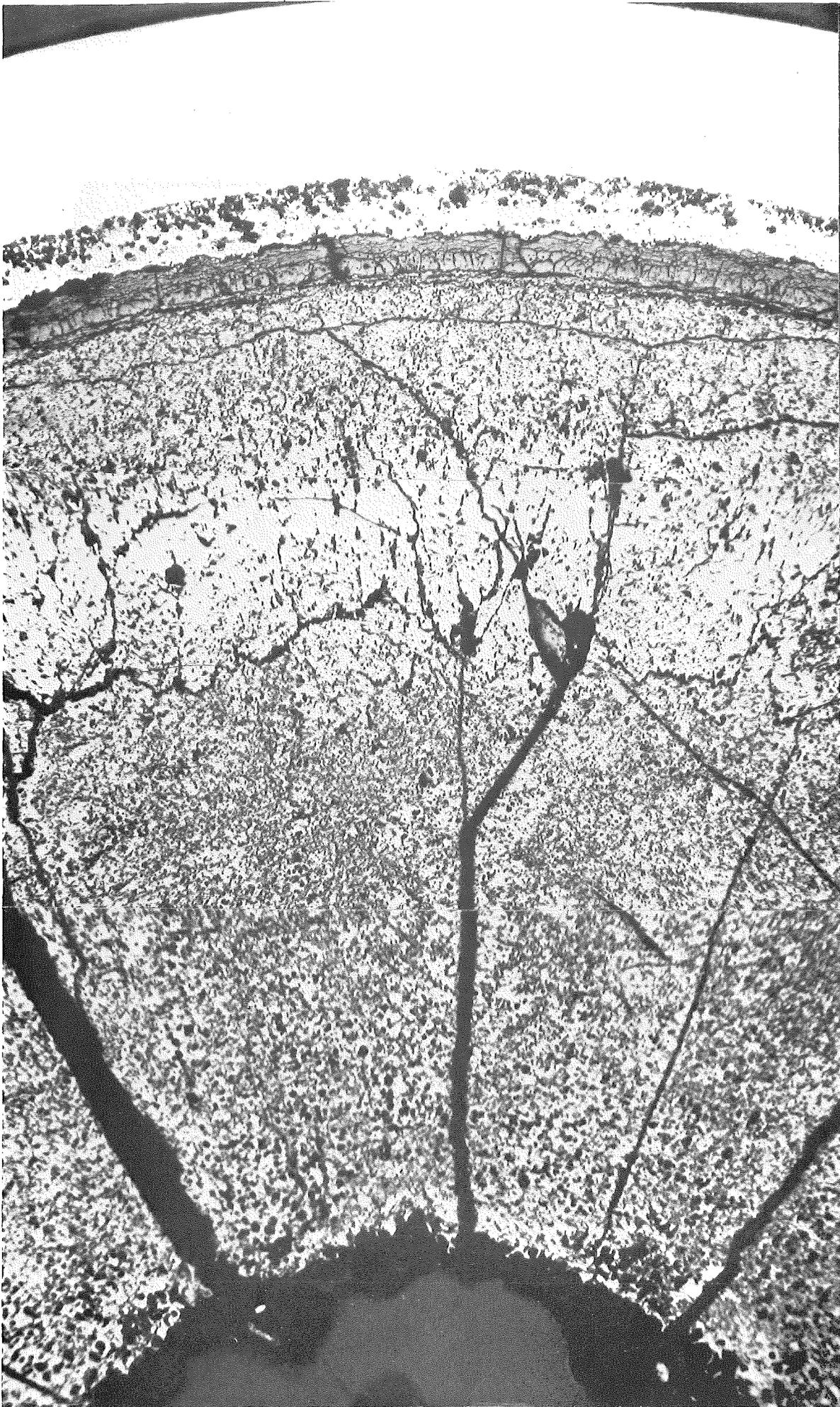
Z-17G-Mo17B-GM2-1/9 100x

200  $\mu$ m



Z-17G-Mo17B-GM2-2/8 100x

200 μm



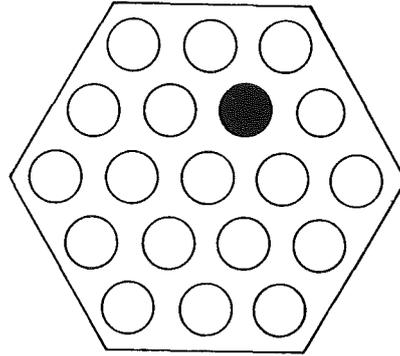
HZ-17G-Mo17B-GM2-3/6 100x 200 μm



Z-17G-Mo17B-GM2-4/7 100x 200 μm

Stab: AU05

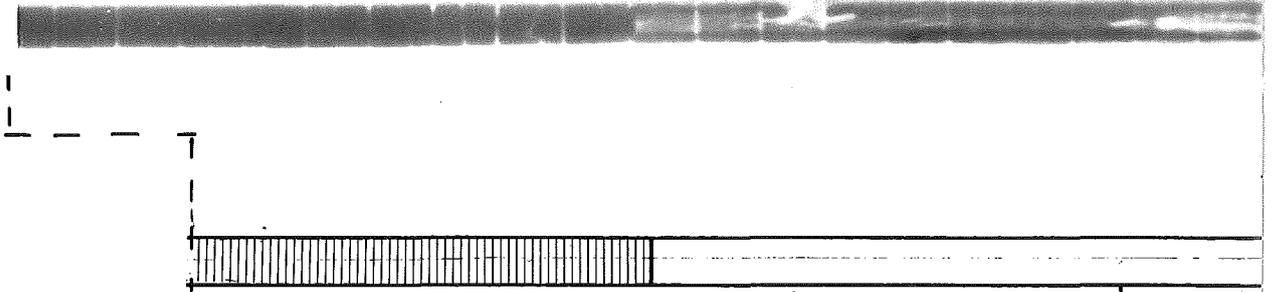
Faltblatt: A23



Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
1	A24	Lage am oberen Ende der Brennstoffsäule. Axialer Hüllriß (Hüllheizstelle). Starker Umfangsriß im Brennstoff in Hüllnähe.
2	A25	Ähnliches Bild wie bei Schliff 1. Zusätzlich ist eine starke Hüllaufwölbung feststellbar. Im Ringspalt befindet sich Na-Uranat/Plutonat.
3 (längs)	A26	Basaltstruktur in Zentralkanalnähe - ein Zeichen für zentrales Schmelzen infolge des verschlechterten Wärmeübergangs durch Na-Uranat im Spalt. Schmelzingot erkennbar.
6	A27	Querschliff in Stabmitte. Zentrales Schmelzen. Na-Uranat im Spalt.
7	A28	Ähnliches Bild wie bei A27. Stärkere Ausbrüche.
8	A29	Lage im unteren Stabbereich (45 mm von unten). Auch hier ist noch zentrales Schmelzen feststellbar. Im Ringspalt Na-Uranat/Plutonat.
9 unten	A30	Ebenfalls noch Schmelzerscheinungen. Gleichmäßige Uranatschicht im Spalt ersichtlich.



75 cm                      70                      5

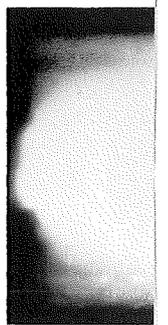
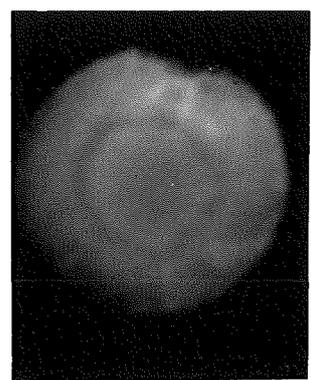
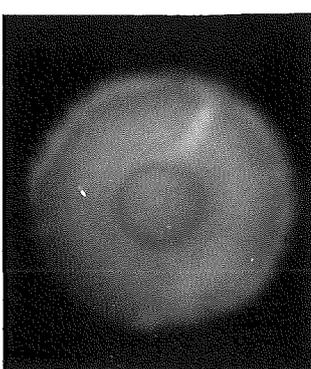
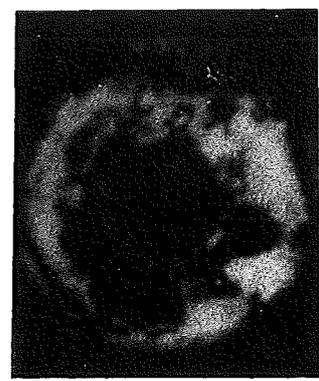
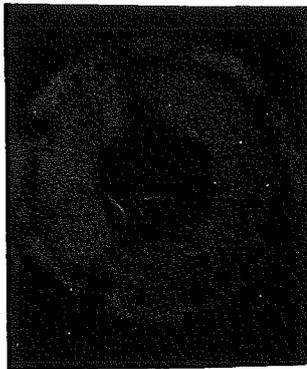
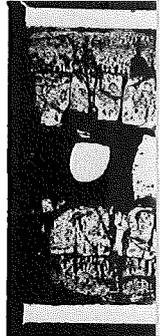
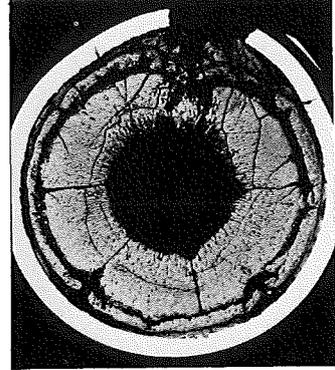
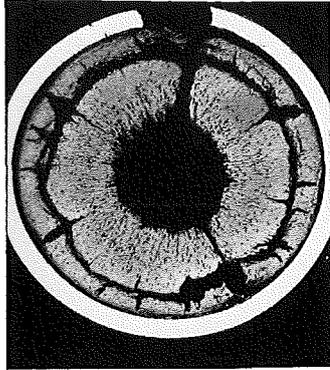


1

2

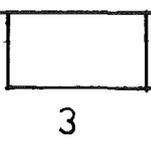
1

2



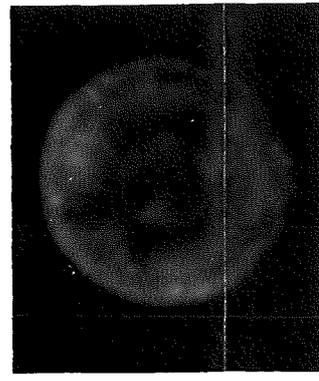
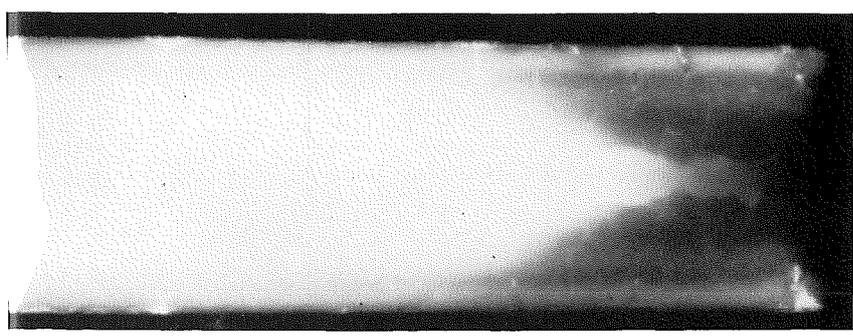
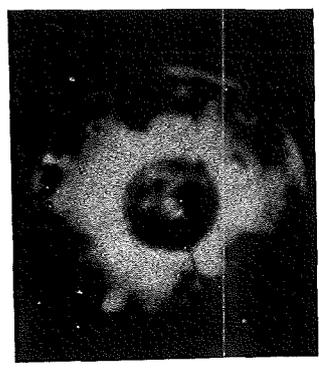
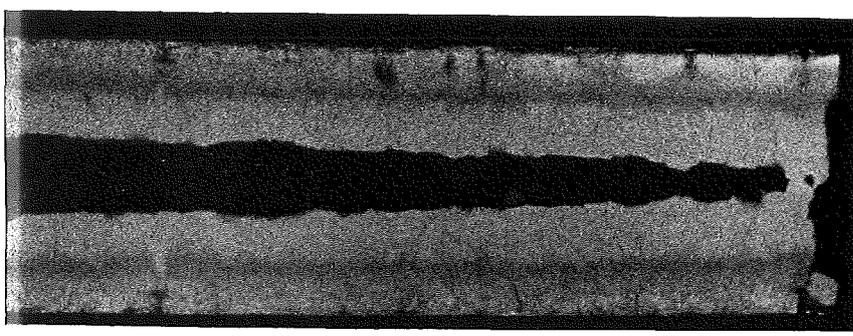
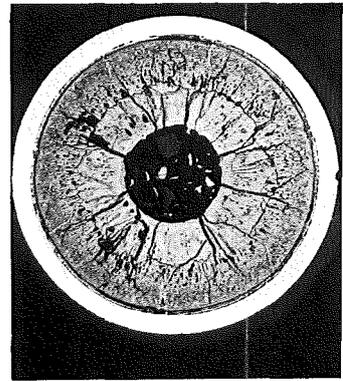
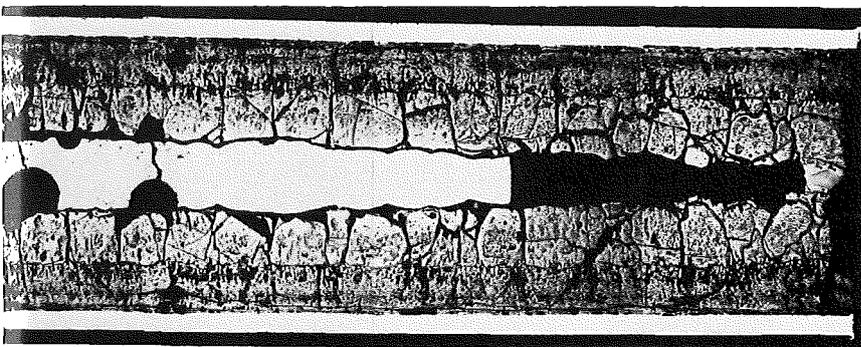
60 5 50 5

Stablänge 10



3

6



40

5

30

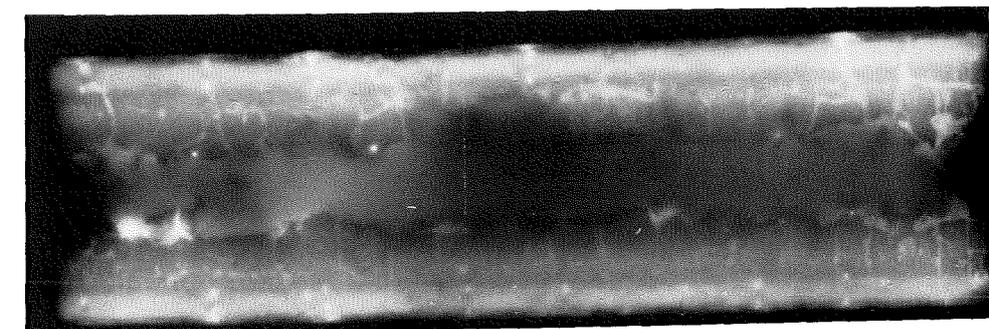
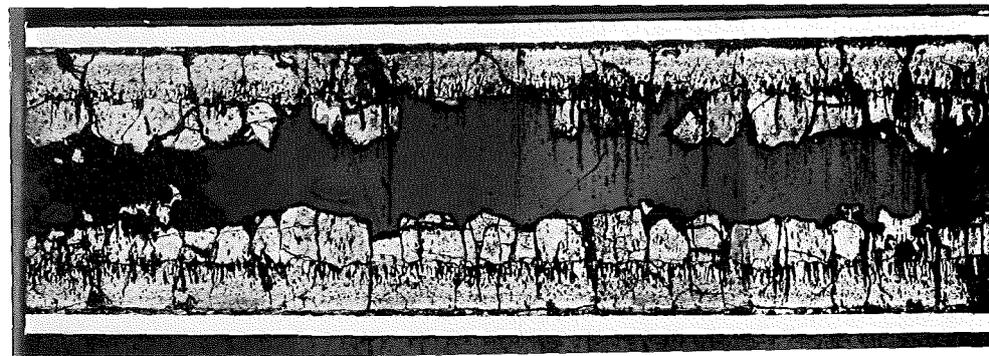


80mm



7

7



5

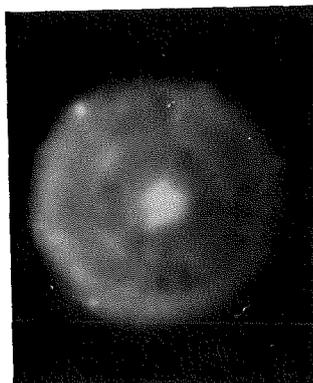
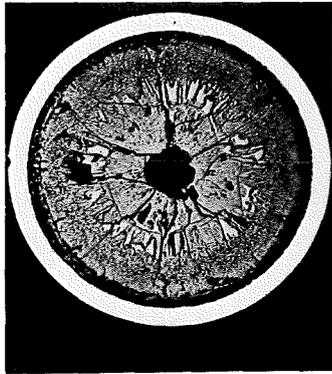
20

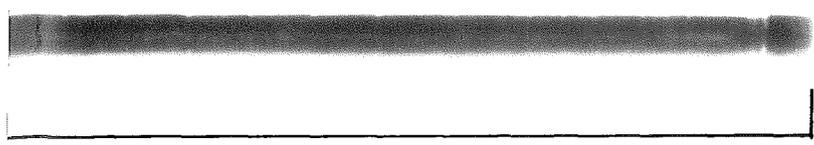
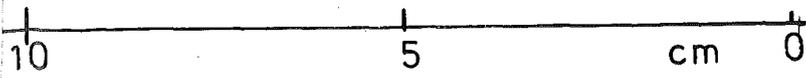
5

8

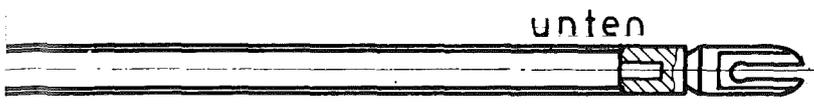
9

8





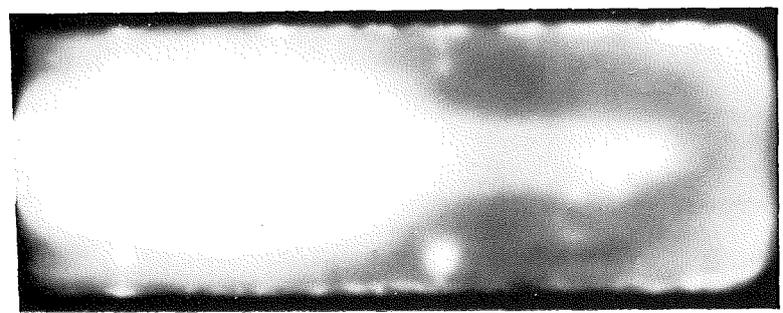
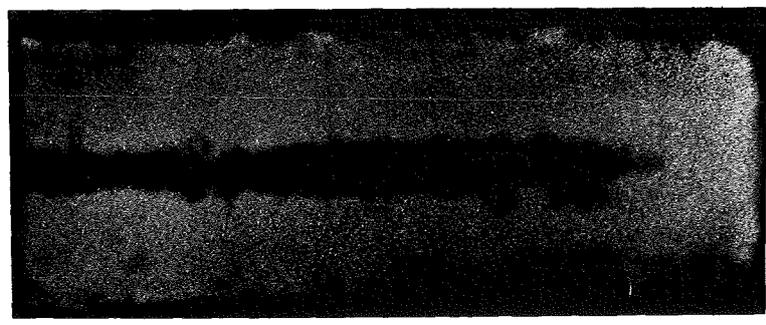
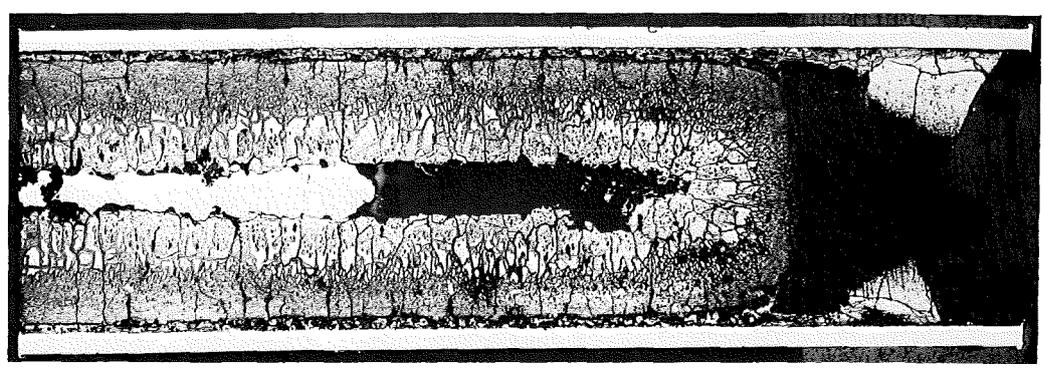
# Stab AU 05



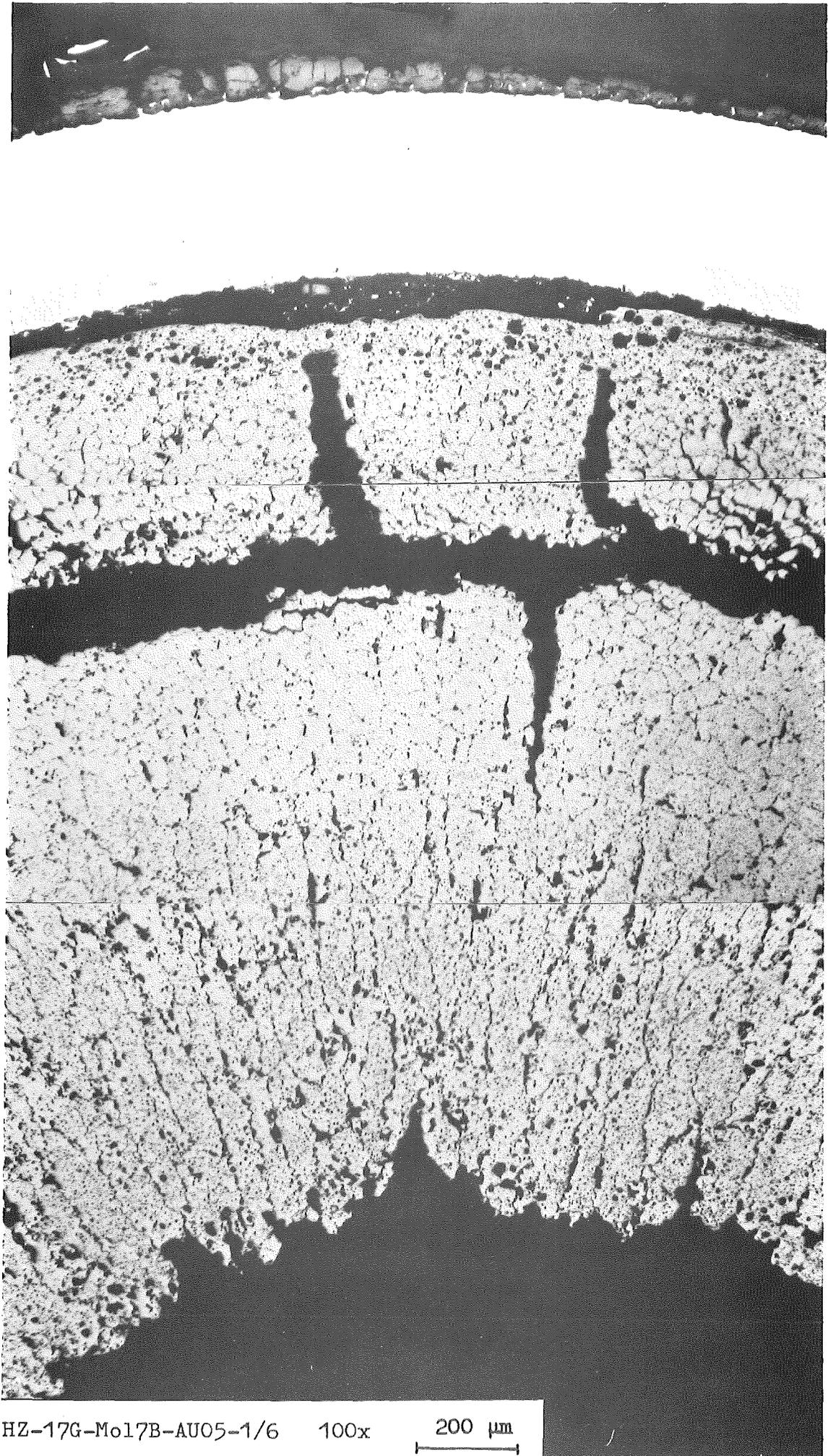
6φ

A 23

9



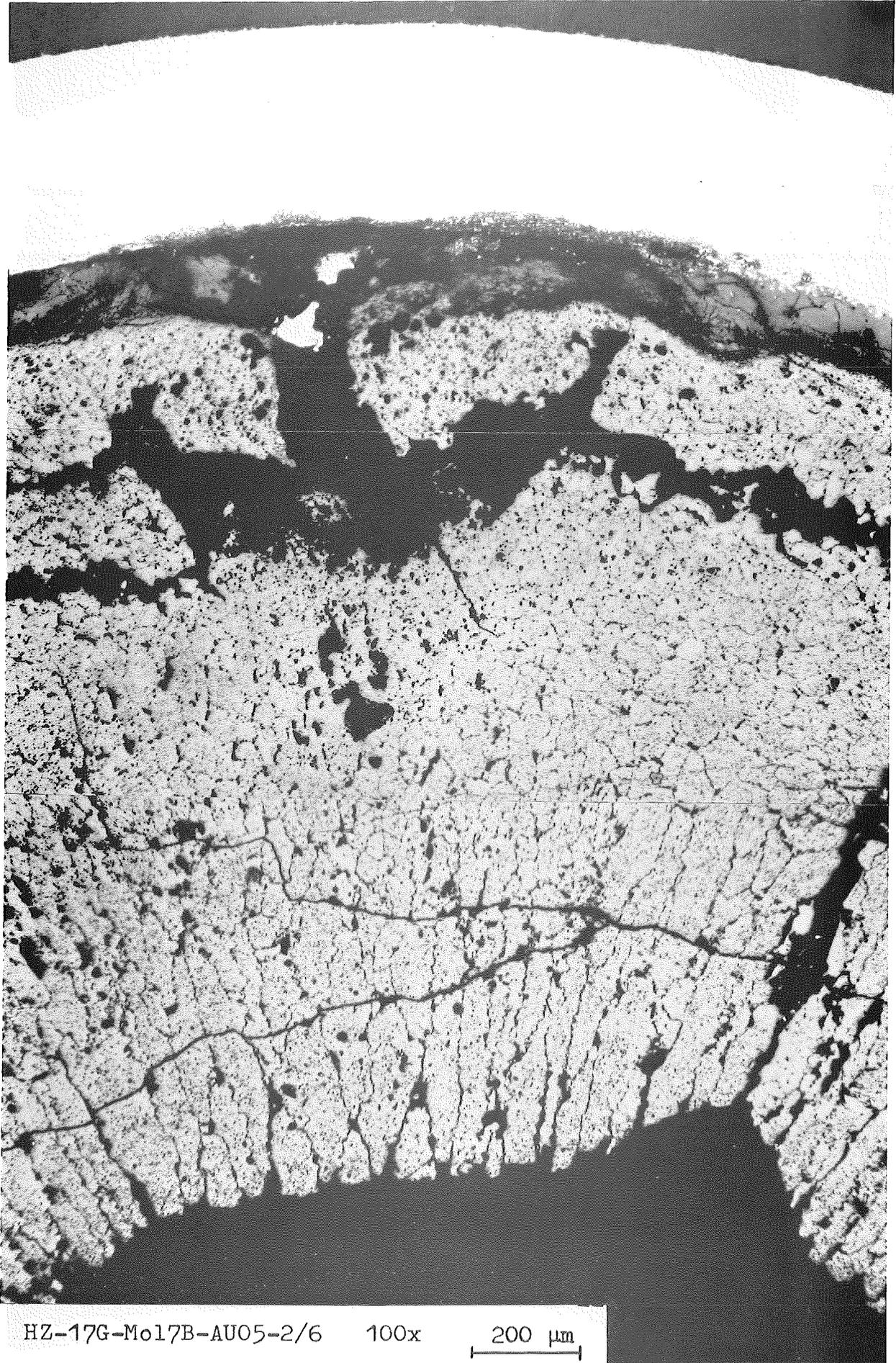




HZ-17G-Mo17B-AU05-1/6

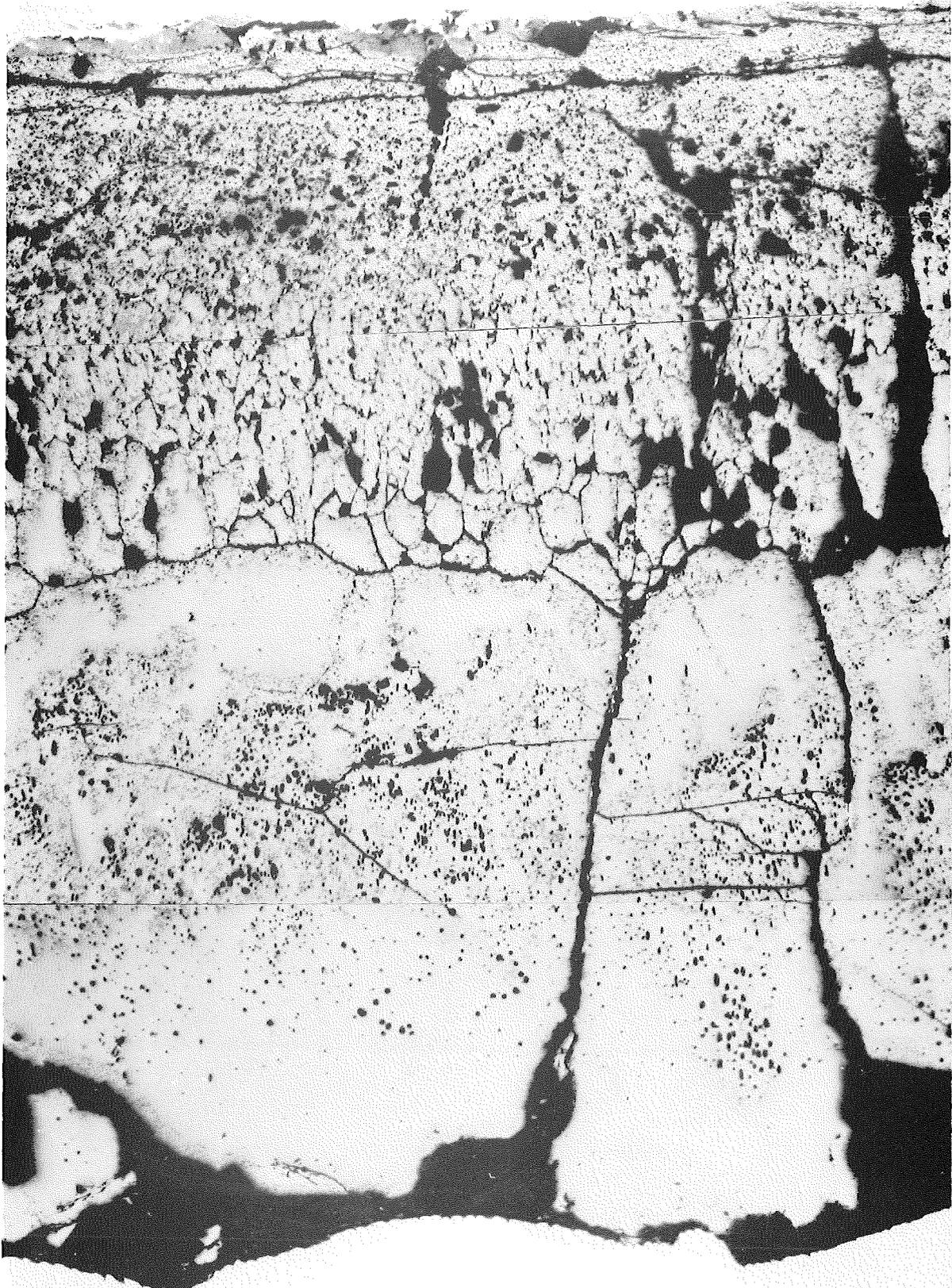
100x

200  $\mu\text{m}$



HZ-17G-Mo17B-AU05-2/6 100x

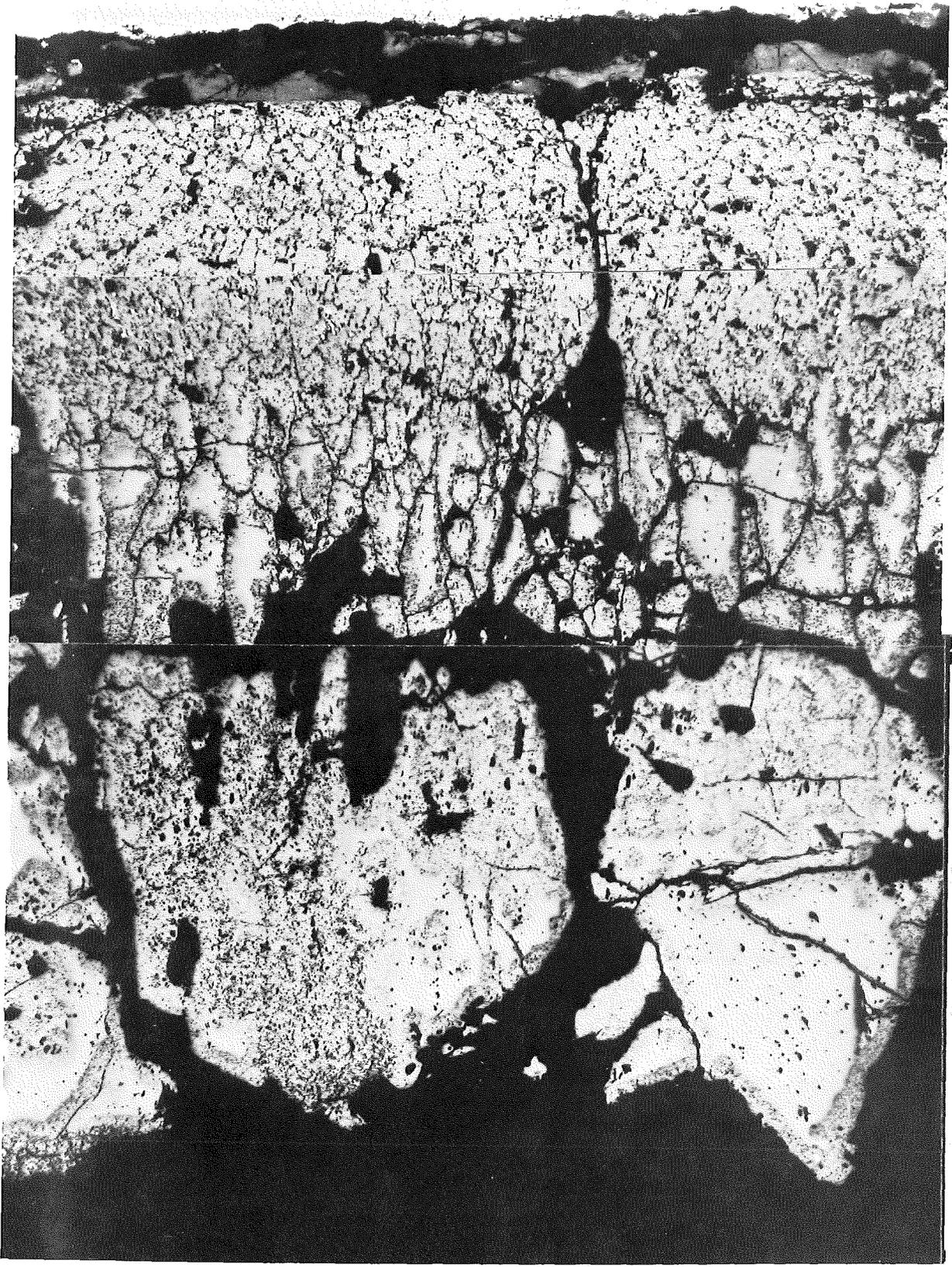
200  $\mu\text{m}$



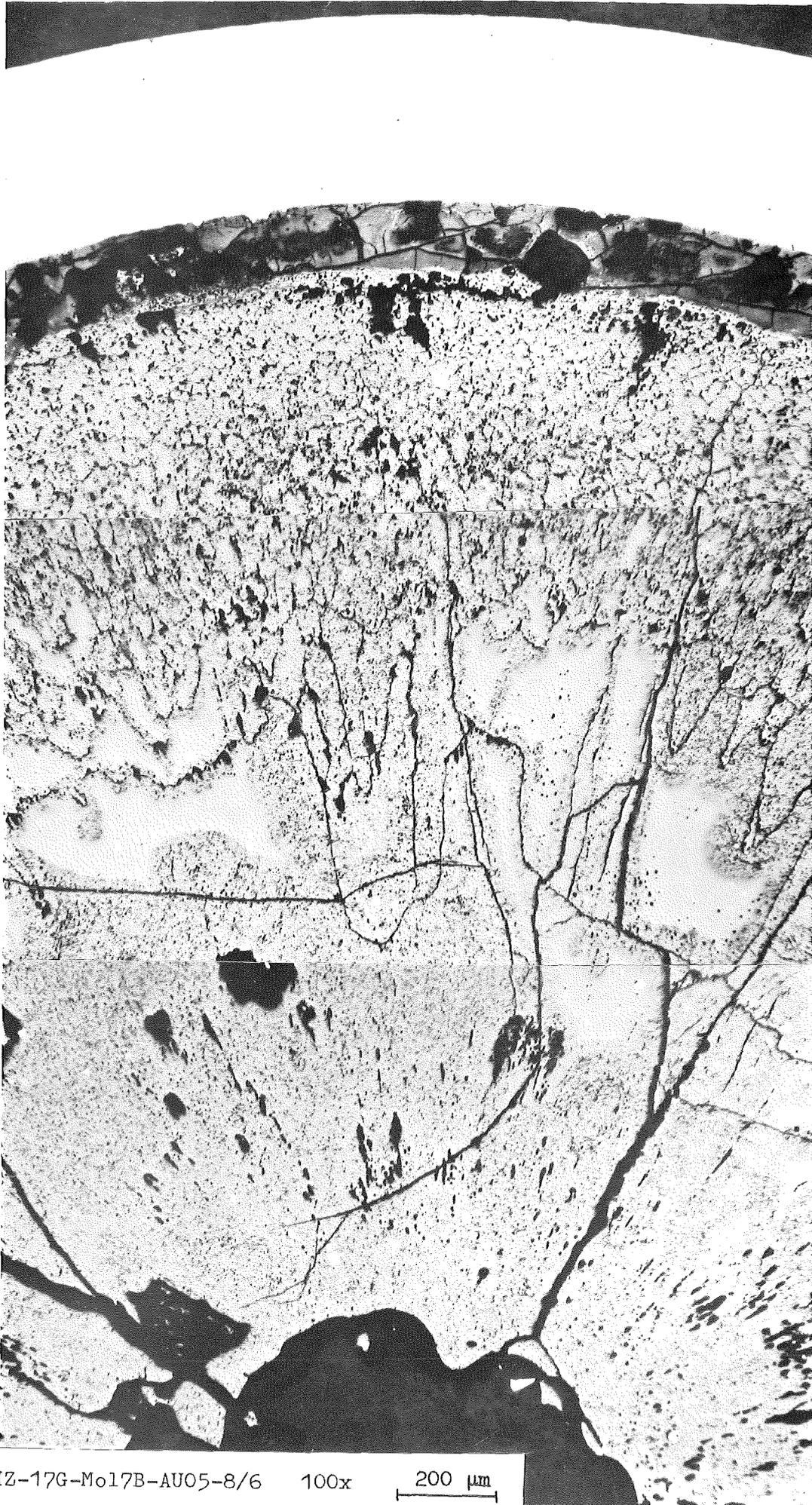
HZ-17G-Mo17B-AU05-3/10 100x 200  $\mu\text{m}$



HZ-17G-Mo17B-AU05-6/6 100x 200  $\mu\text{m}$



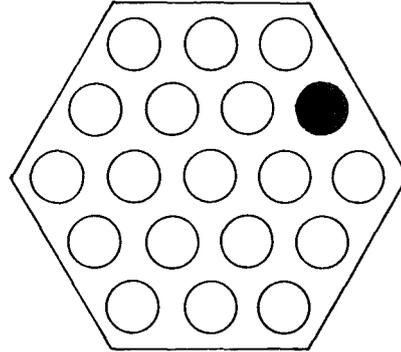
HZ-17G-Mo17B-AU05-7/10 100x 200  $\mu$ m



Z-17G-Mo17B-AU05-8/6 100x 200  $\mu\text{m}$

Stab: GUO3

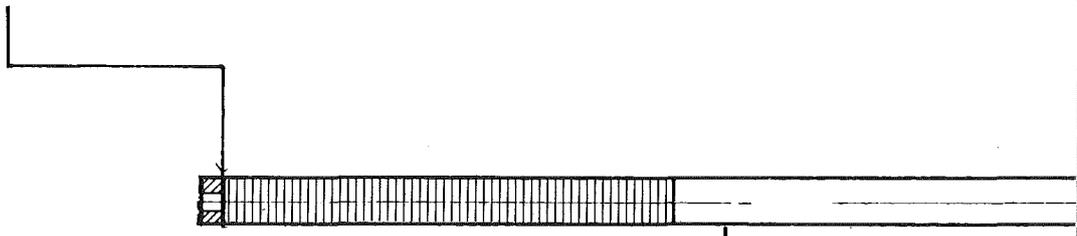
Faltblatt: A30



Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
1	A31	Starker Hüllrohrschaden, massive Hüllinnenkorrosion und großer Umfangsriß im Brennstoff sichtbar.
2	A32	Die aufgewölbte Hülle hat sich komplett vom Brennstoff gelöst. Ein Ring von Hüllkomponenten ist im Brennstoff erkennbar. Exzentrischer Zentralkanal mit Ingot.
3 (längs)	A33	Zentralkanal ist komplett mit geschmolzenem Mischoxid angefüllt. $\text{Na}_3\text{MO}_4$ ist im Ringspalt erkennbar.
5	A34	Lage in Stabmitte. Die Säulenkorn Grenzen wurden während der Abkühlphase von Na, das aus dem Zentralkanal stammte, angeätzt.
6 (längs)	A35	Dasselbe Erscheinungsbild wie auf Seite A34. Struktur in Zentralkanalnähe deutet auf Oxidschmelzen hin.
8	A36	Dasselbe Erscheinungsbild wie bei A35.
7	A37	Übergang Brennstoff/Brutstoff. Dicke Na-Uranatschicht erkennbar. Korn Grenzen wurden von Na angeätzt.
unten		

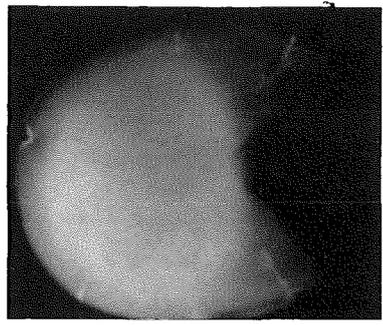
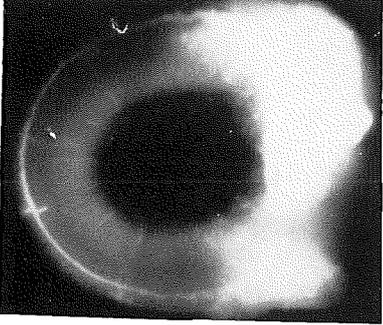
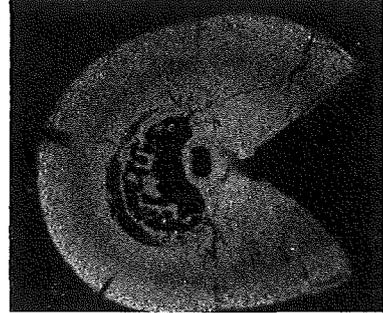
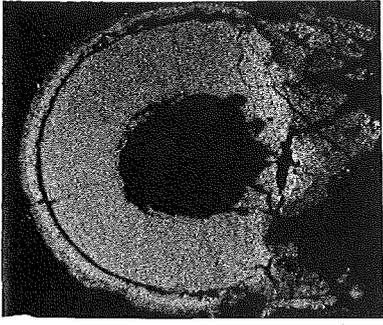
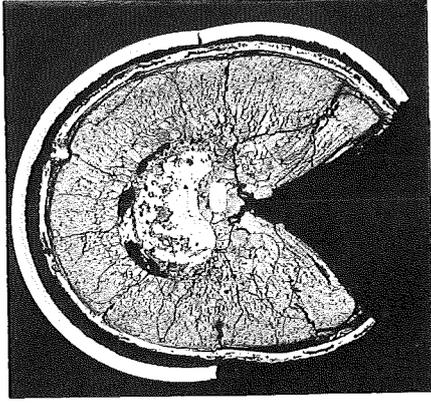
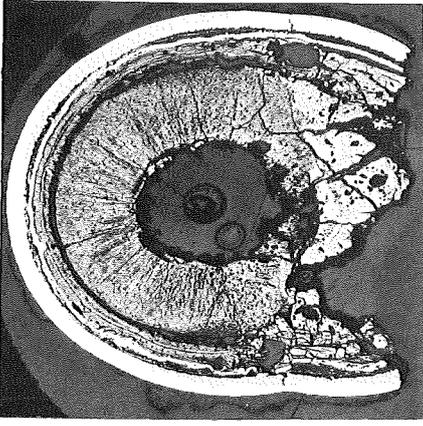


75cm 70 5



1

2



60

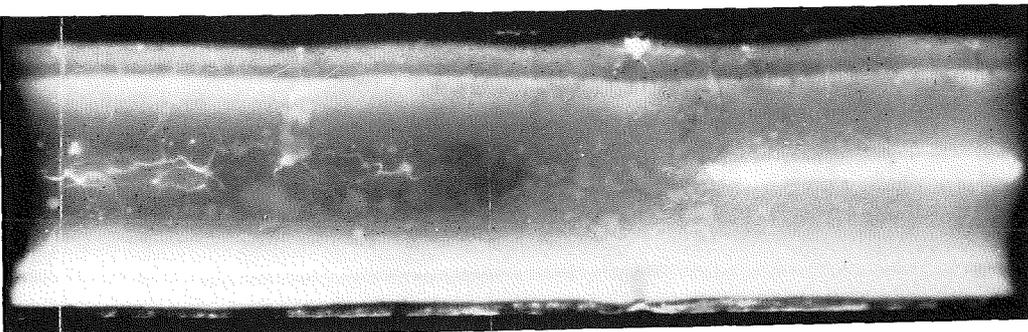
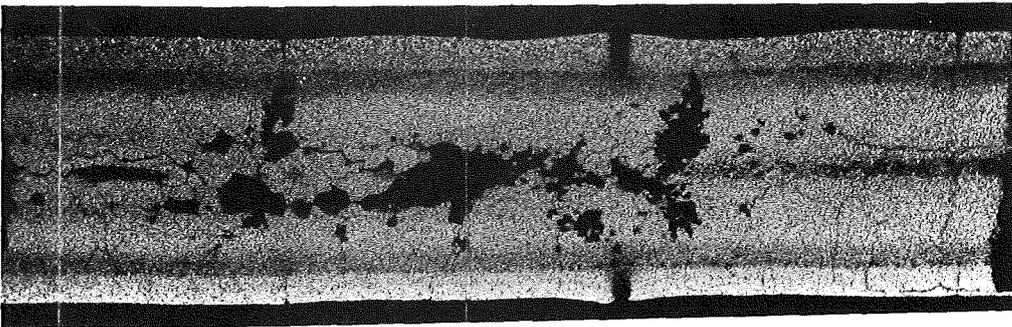
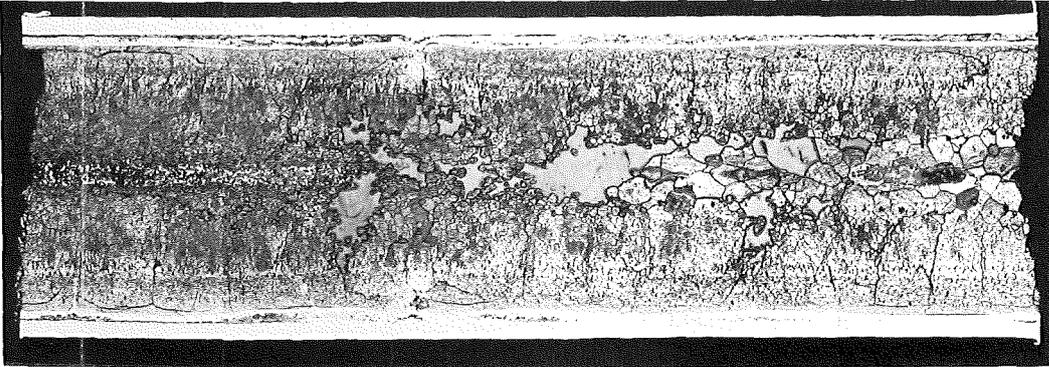
5

50

2

3

3



5

40

5

30

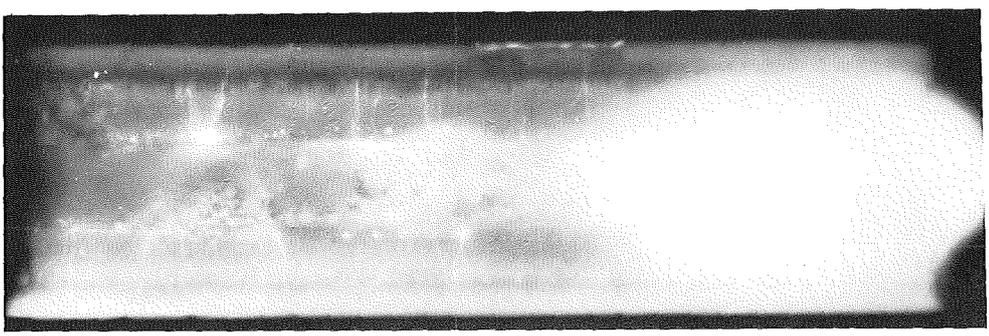
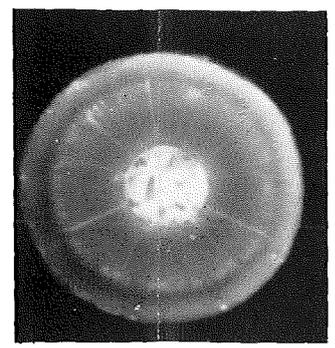
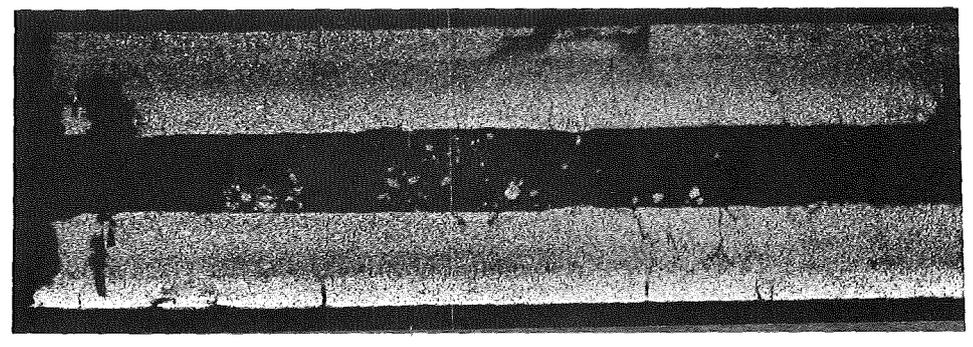
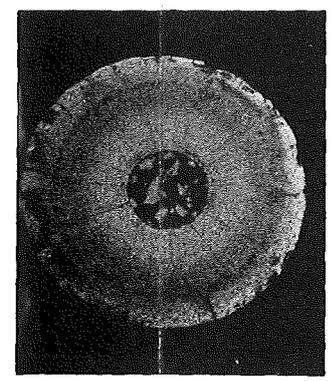
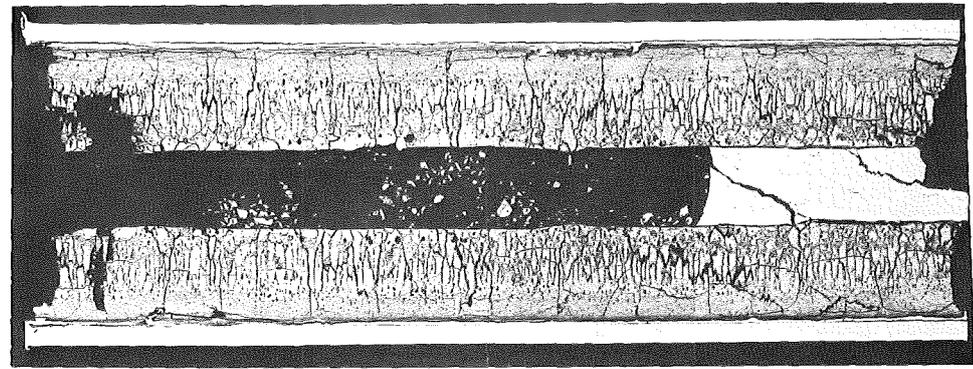
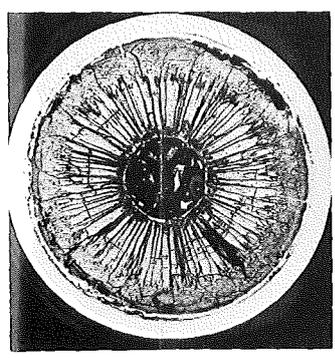
Stablänge 1080 mm

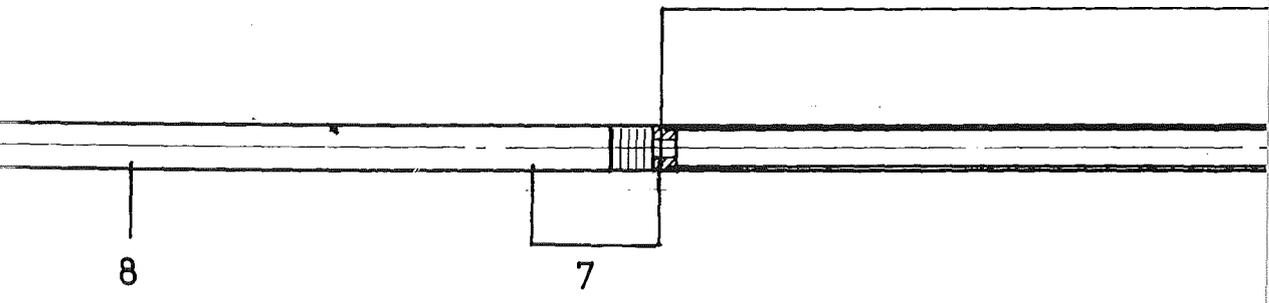
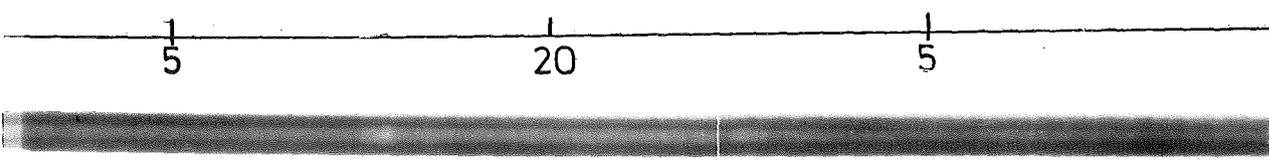
5

6

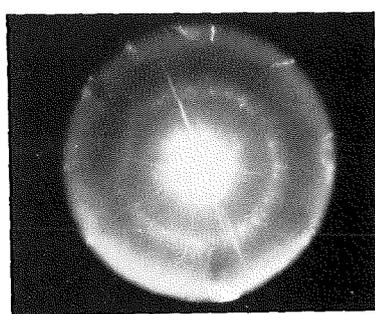
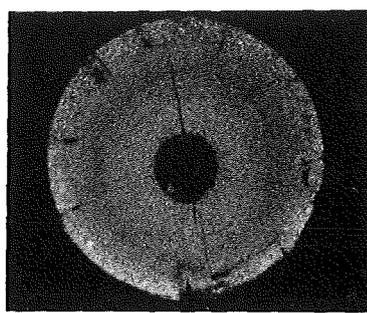
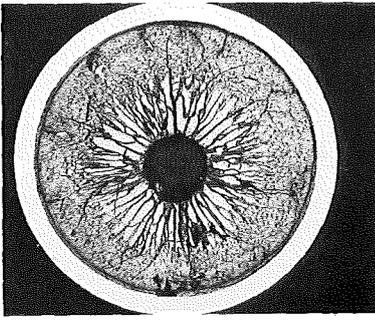
5

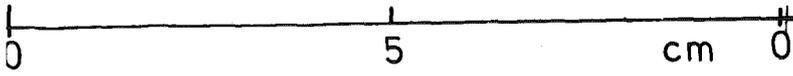
6





8





- II/43 -



Stab GU 3

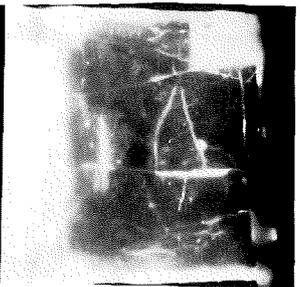
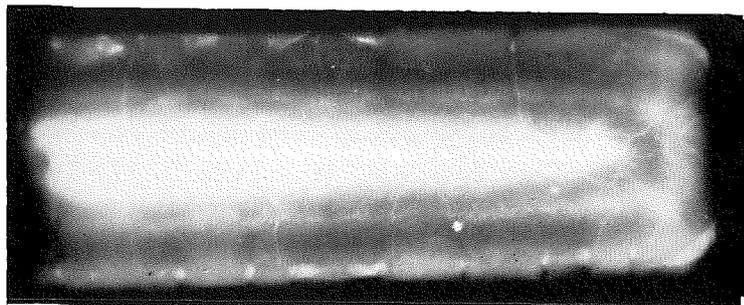
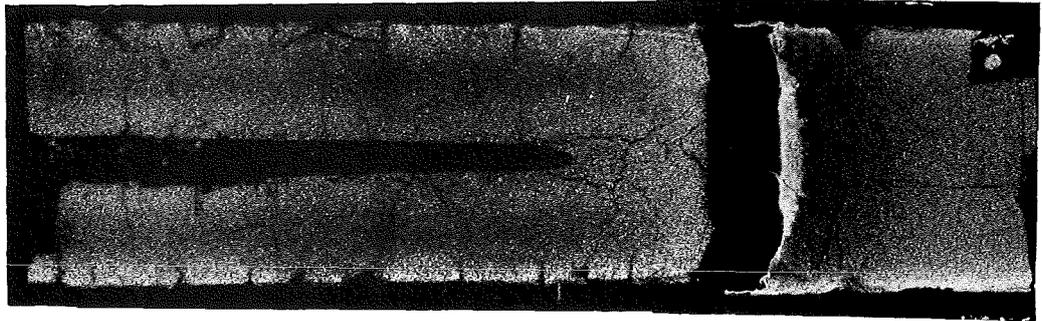
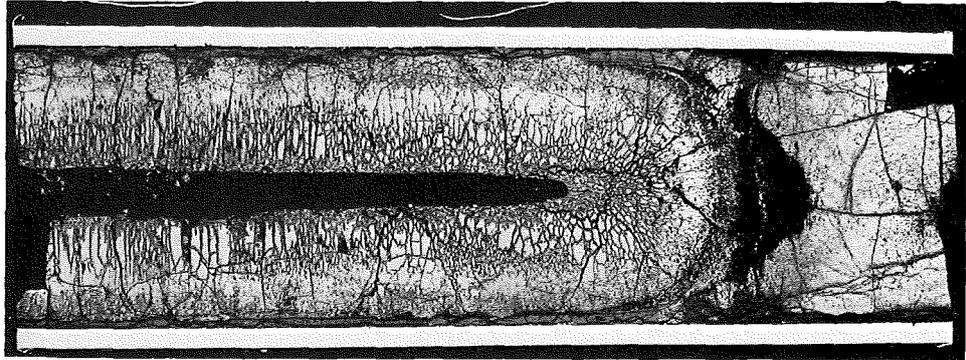
unten



6φ

A 30

7

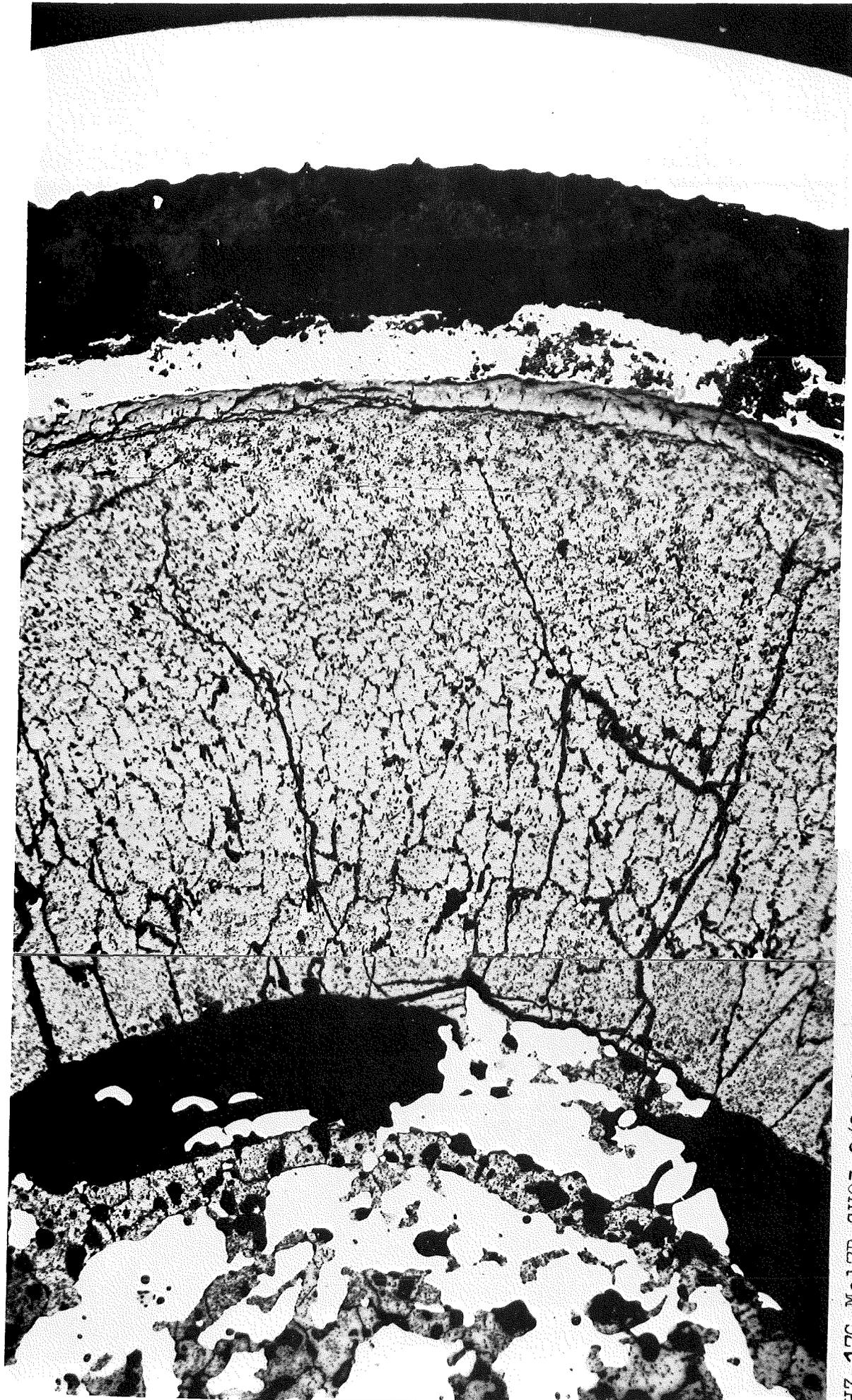




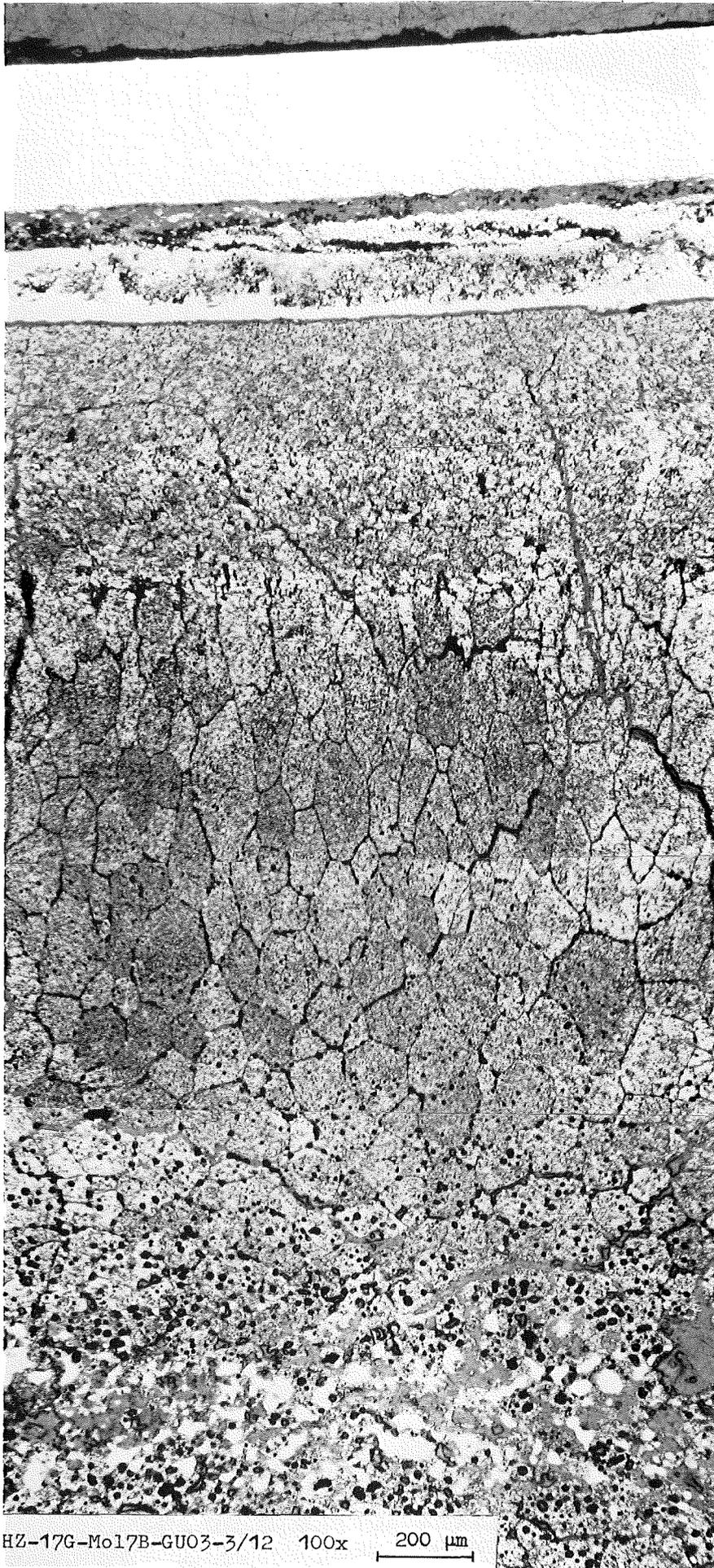


HZ-17G-Mo17B-GU03-1/8 100x

200  $\mu\text{m}$



HZ-17G-Mo17B-GU03-2/8 100x  
200  $\mu\text{m}$

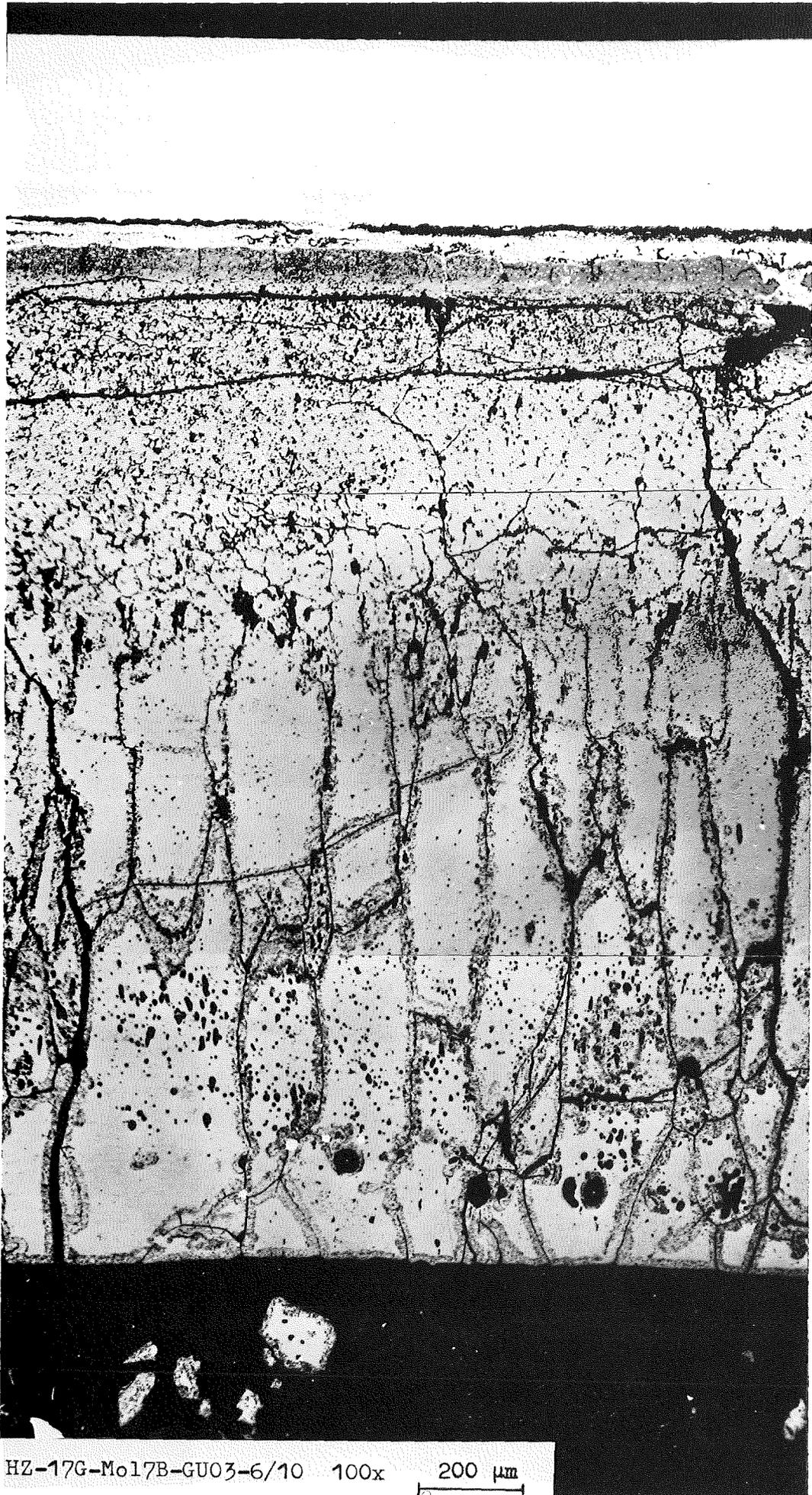


HZ-17G-Mo17B-GU03-3/12 100x 200  $\mu$ m



HZ-17G-Mo17B-GU03-5/6 100x

200 μm

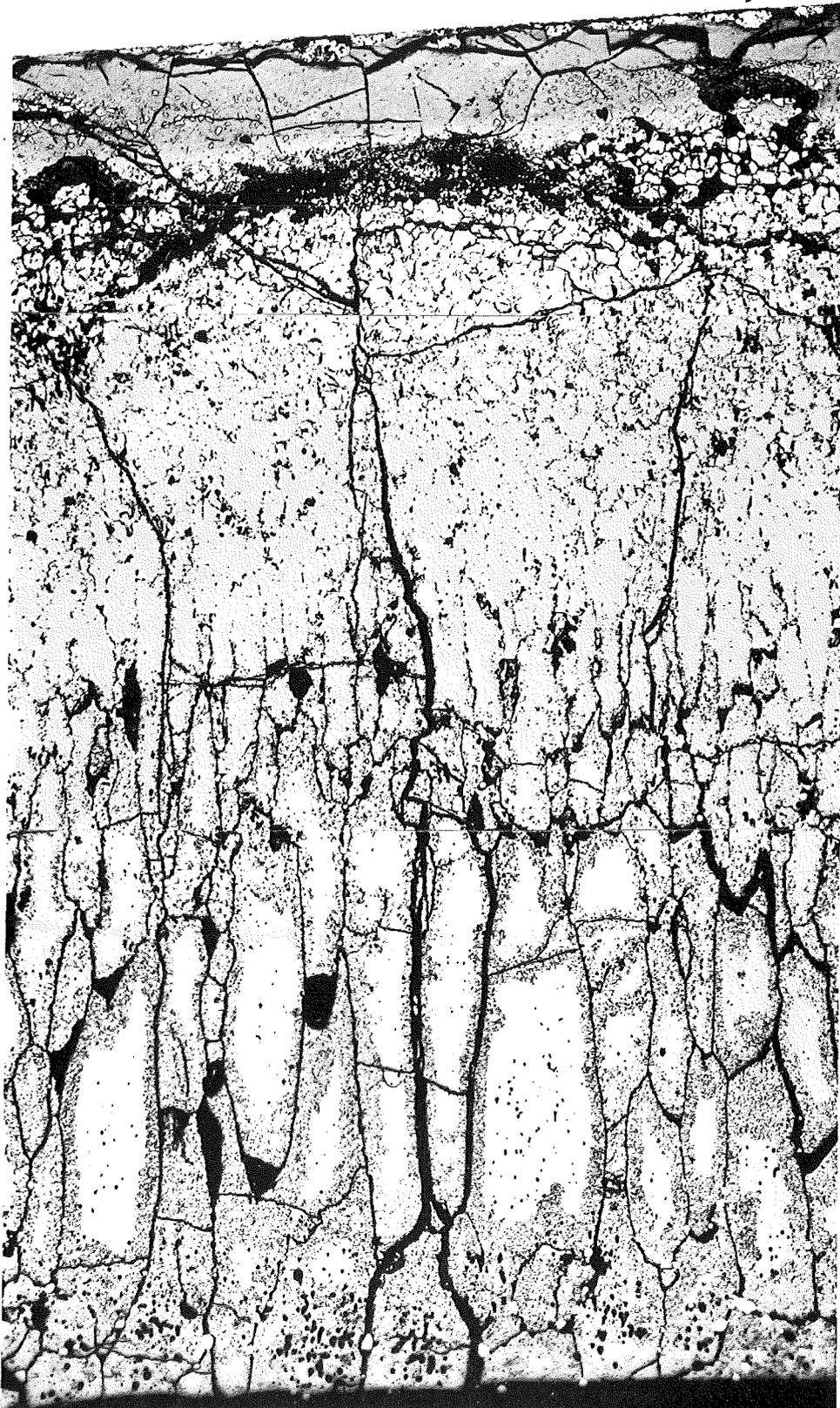


HZ-17G-Mo17B-GU03-6/10 100x 200  $\mu$ m



HZ-17G-Mol17B-GU03-8/6 100x

200  $\mu$ m

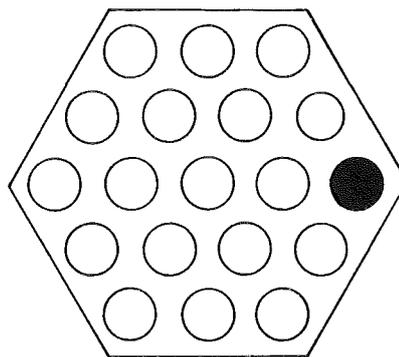


HZ-17G-Mo17B-GU03-7/10 100x

200  $\mu$ m

Stab: AU07 - intakter Stab -

Faltblatt: A38

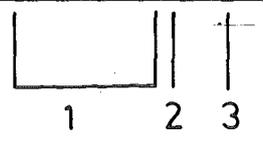
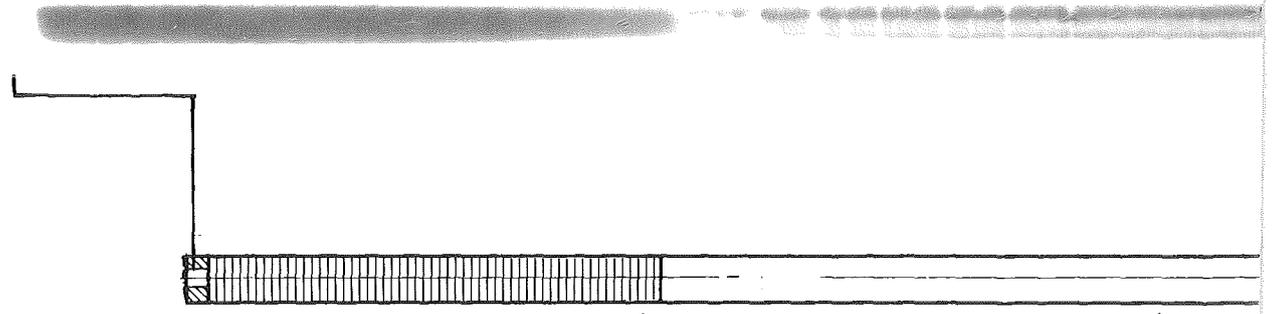


Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
3	A39	Stark zerrüttetes Oxidgefüge mit Ausbrüchen. Großer Zentralkanal.
5	A40	55 mm unterhalb Schliff 3. Kleiner Zentralkanal. Dichte Brennstoffmatrix mit langen Stengelkörnern.
7	A42	55 mm unterhalb Schliff 5. Stark verdichteter Brennstoff mit langen Stengelkörnern. Konzentrischer Ring von Korrosionsprodukten im Brennstoff eingelagert.
11	A43	Lage in Stabmitte. Befund wie bei Schliff 7.
13 (längs)	A44	Normales Oxidgefüge. Stengelkörner nicht ausgeprägt.
14	A45	Konzentrischer Ring von Großporen (ca. 400 $\mu$ m) um Zentralkanal gruppiert.
16	A46	Übergang Brennstoff/unteres Isolierpellet. Hochdichte Stengelkörner.
unten		

75cm

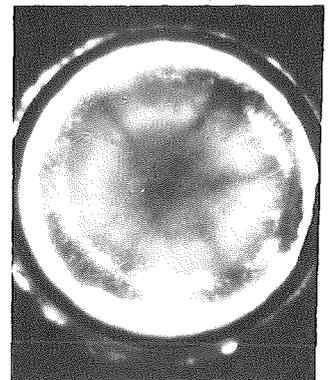
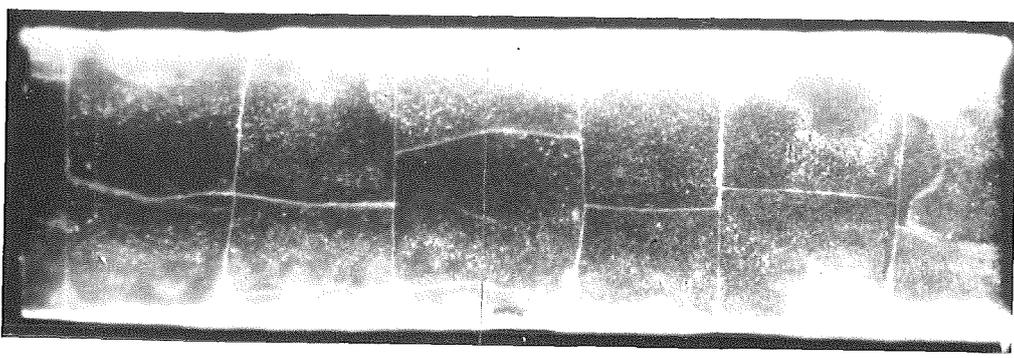
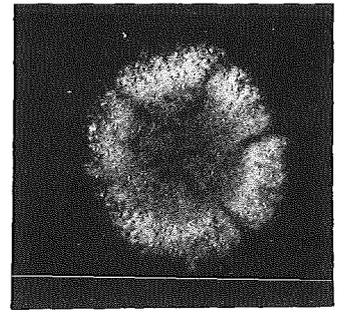
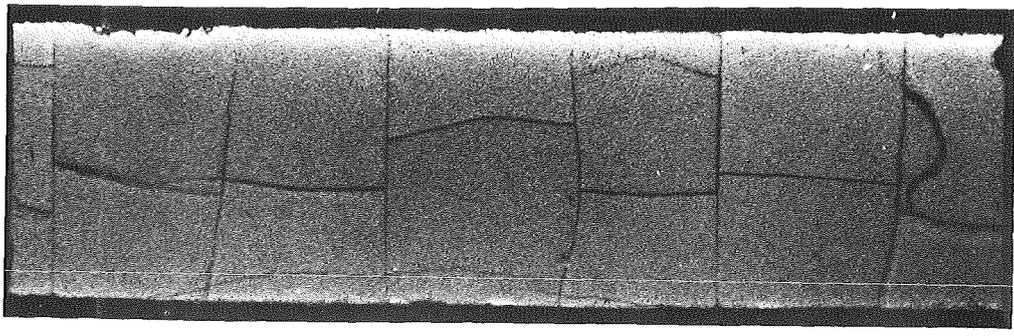
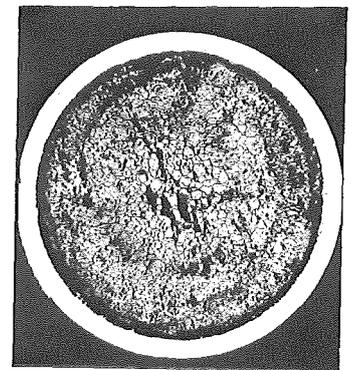
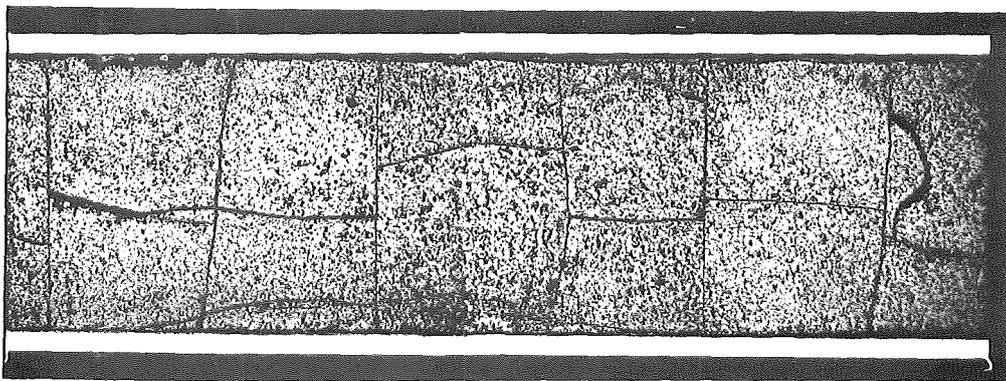
70

5



1

2



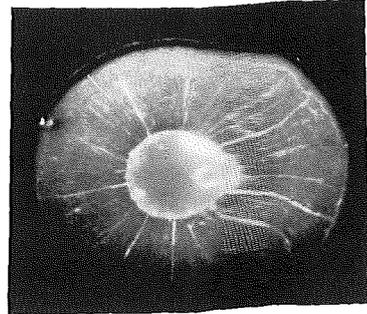
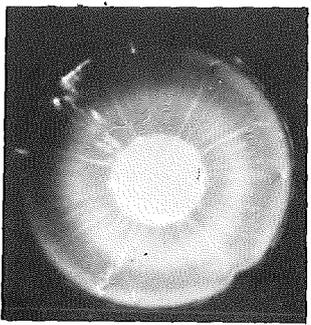
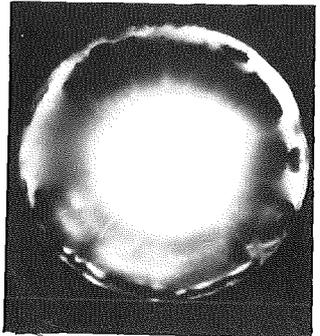
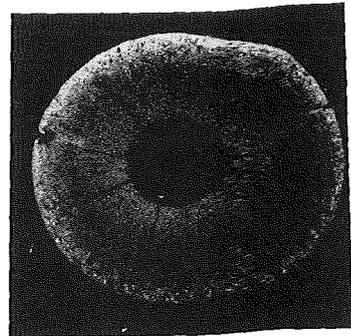
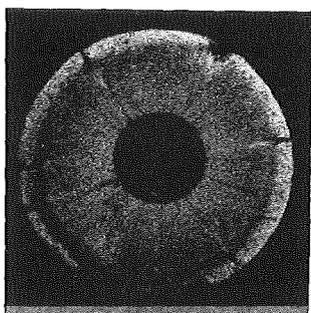
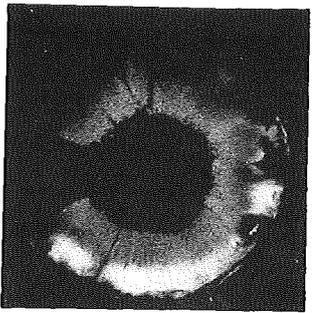
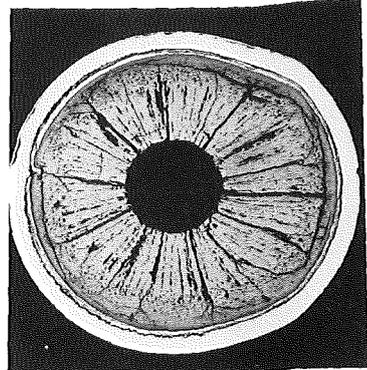
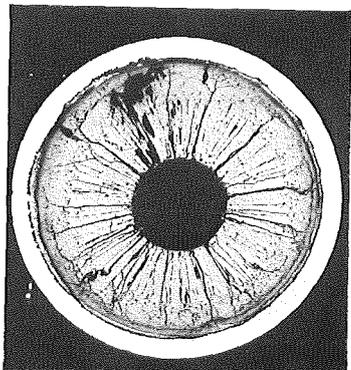
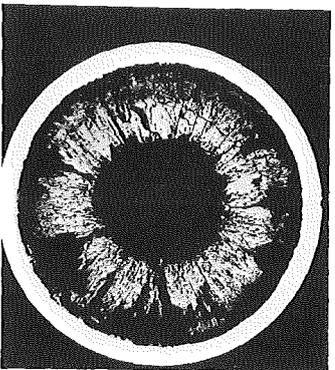
60 5 50 5

7 9 11

3

5

7



40

5

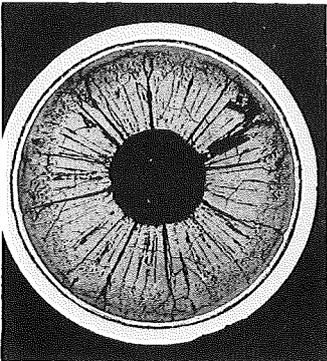
30

Stablänge: 1080 mm

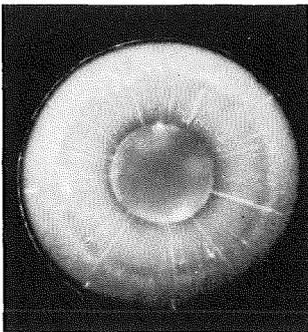
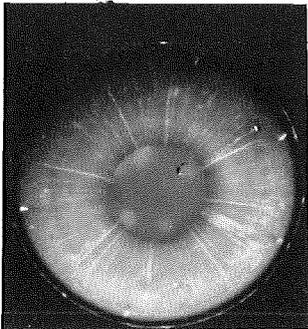
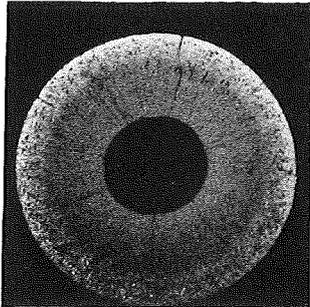
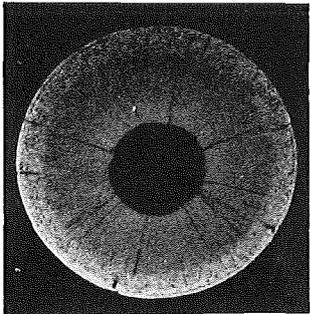
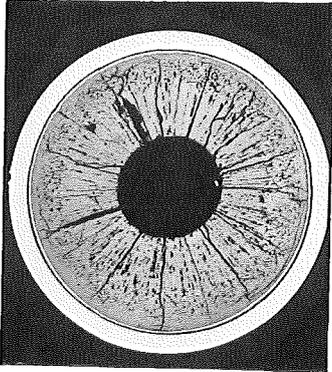


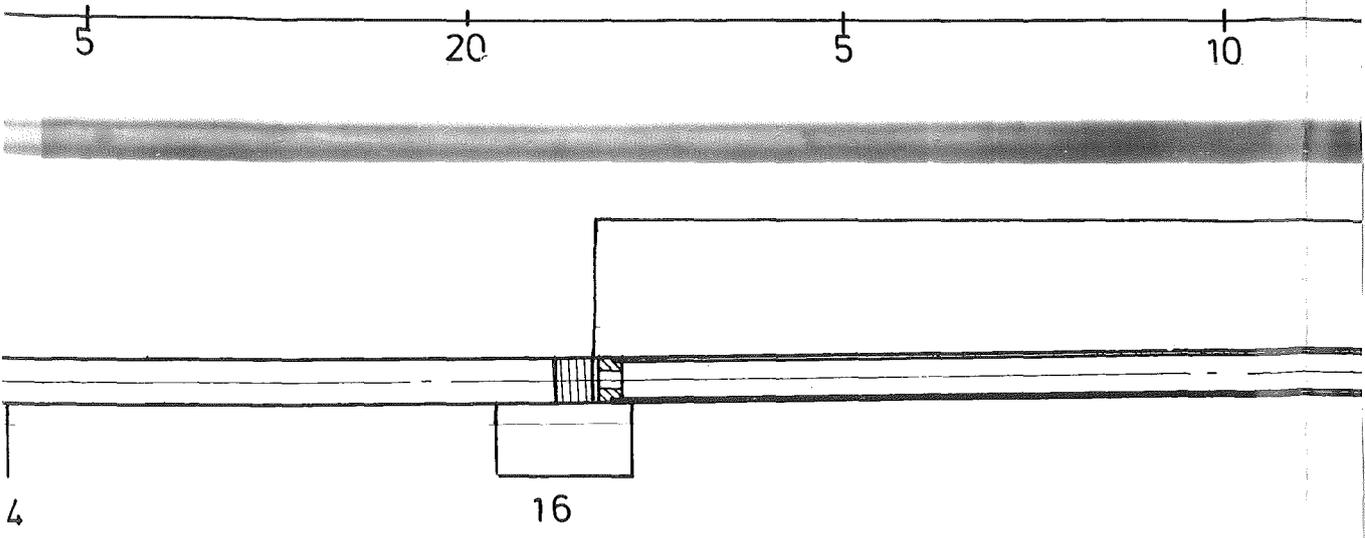
13

9

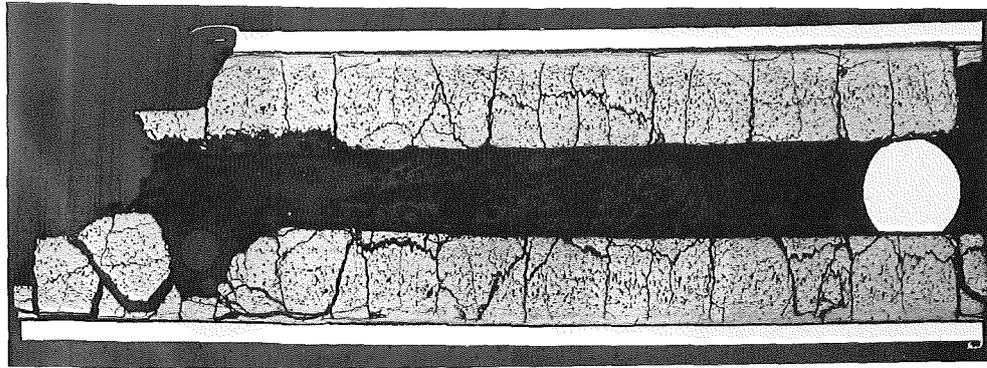


11

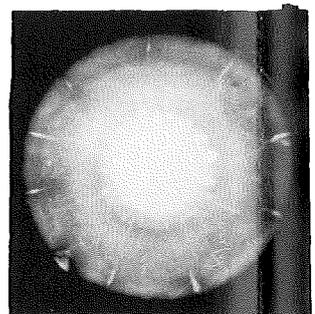
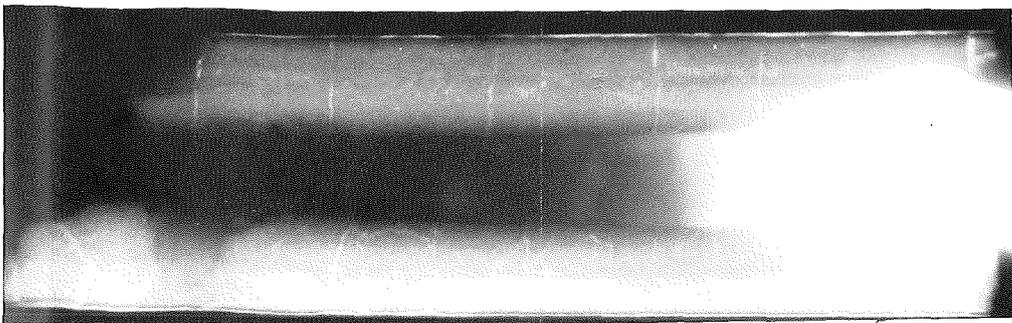
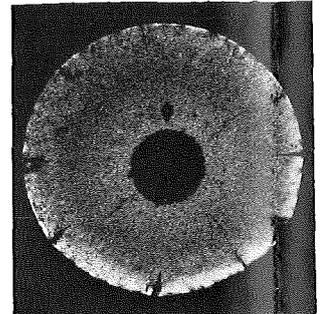
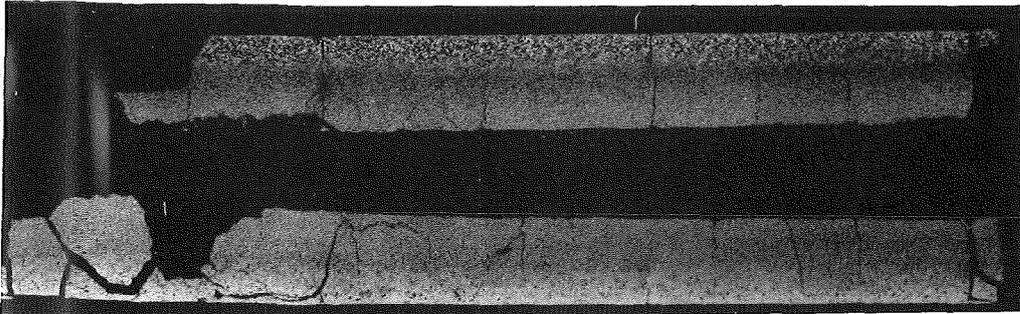
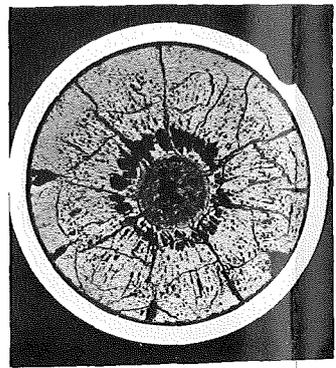




13



14



5 cm 0

- 11/53 -

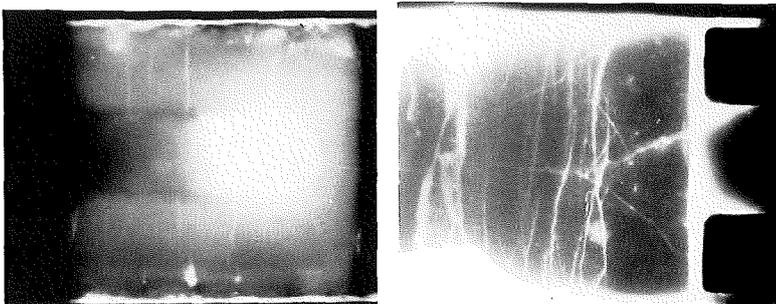
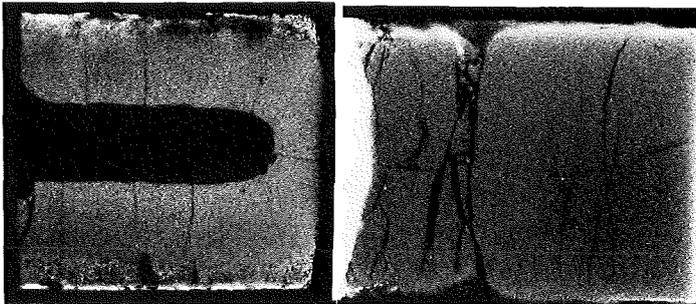
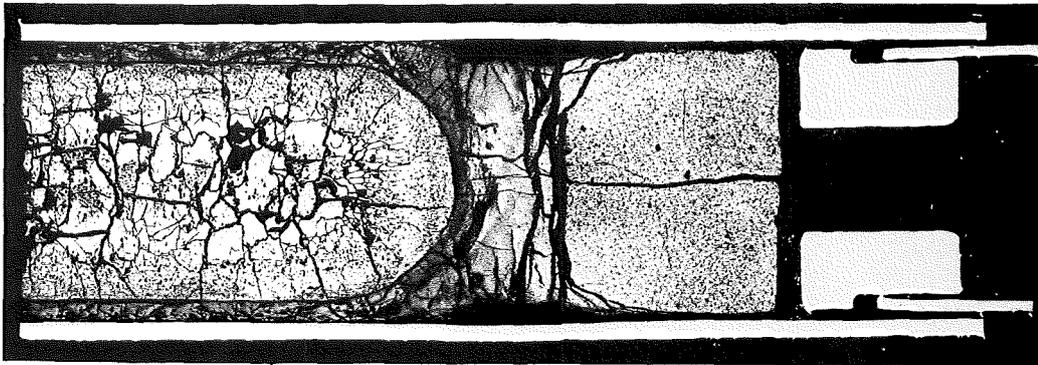
unten

Stab AU 07

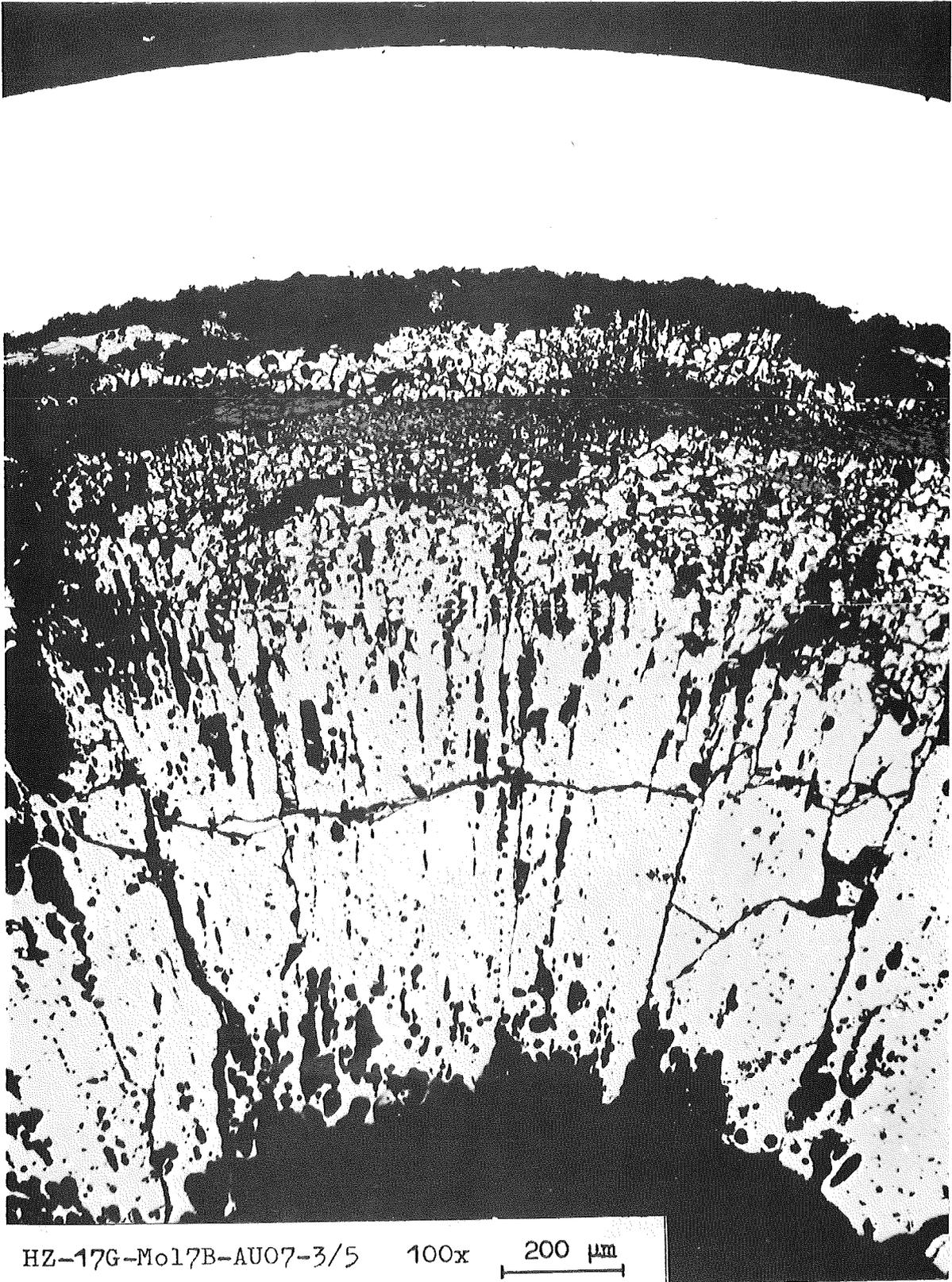
6  $\phi$

A 38

16



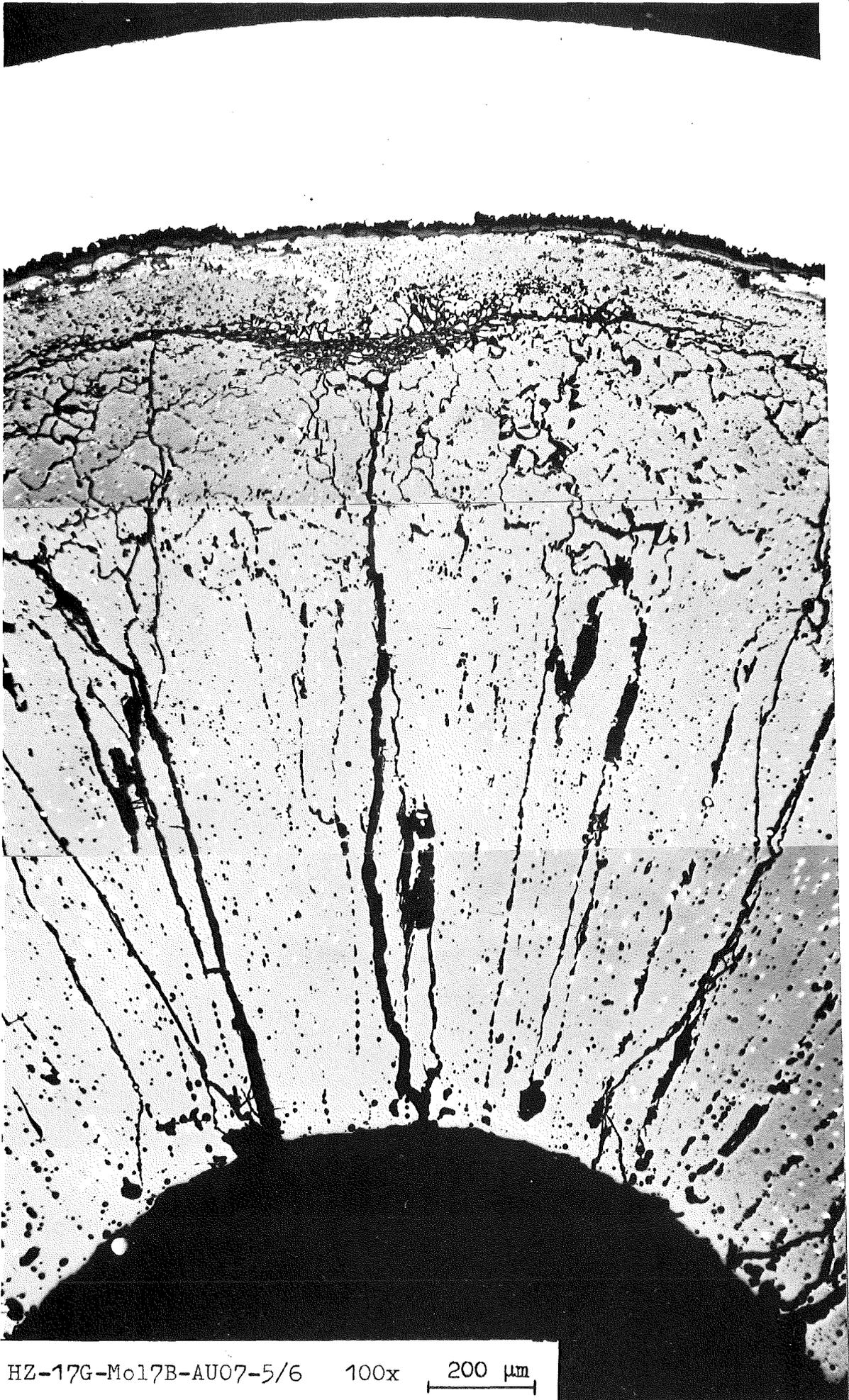




HZ-17G-Mo17B-AU07-3/5

100x

200  $\mu\text{m}$



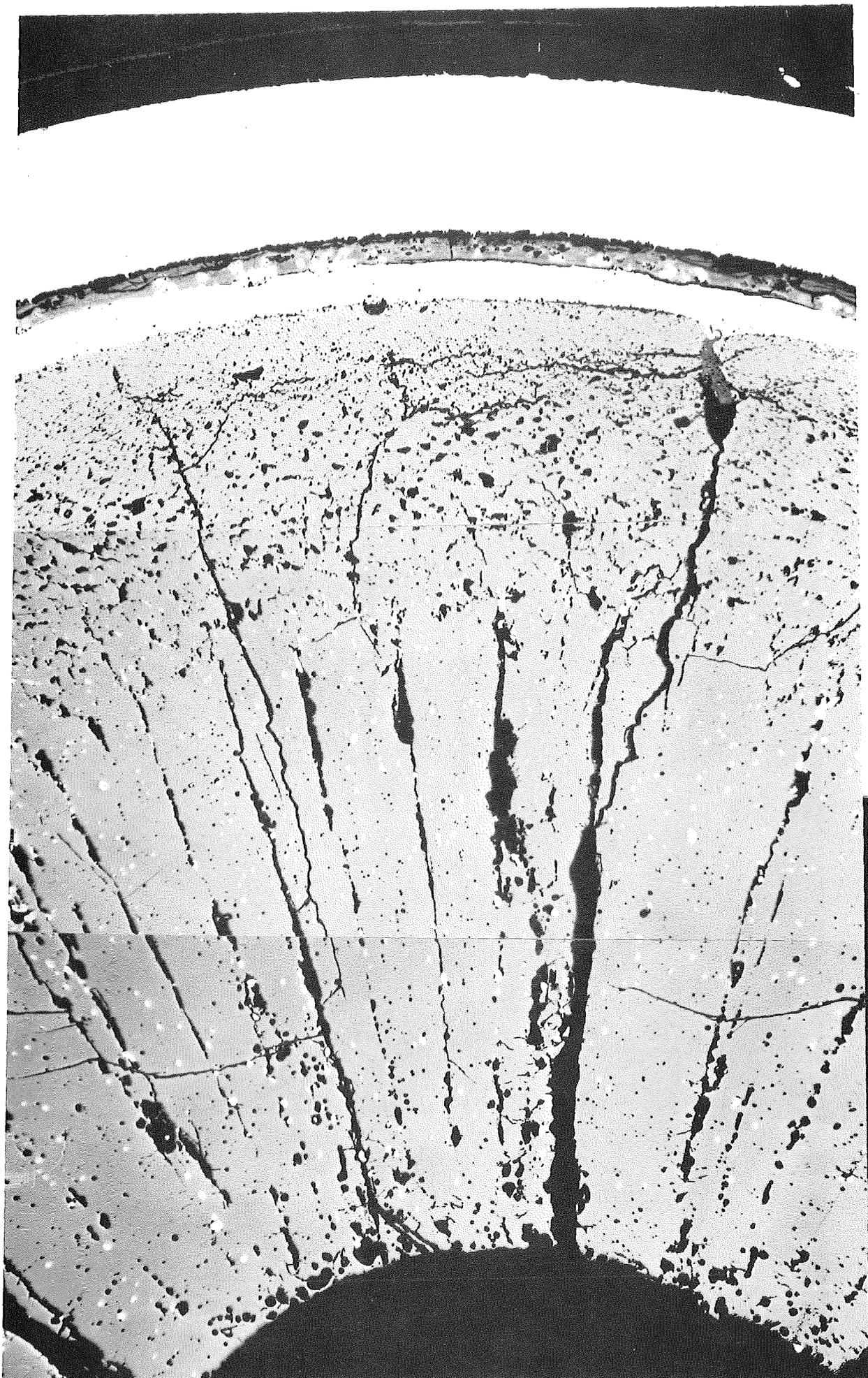
HZ-17G-Mo17B-AU07-5/6

100x

200  $\mu\text{m}$



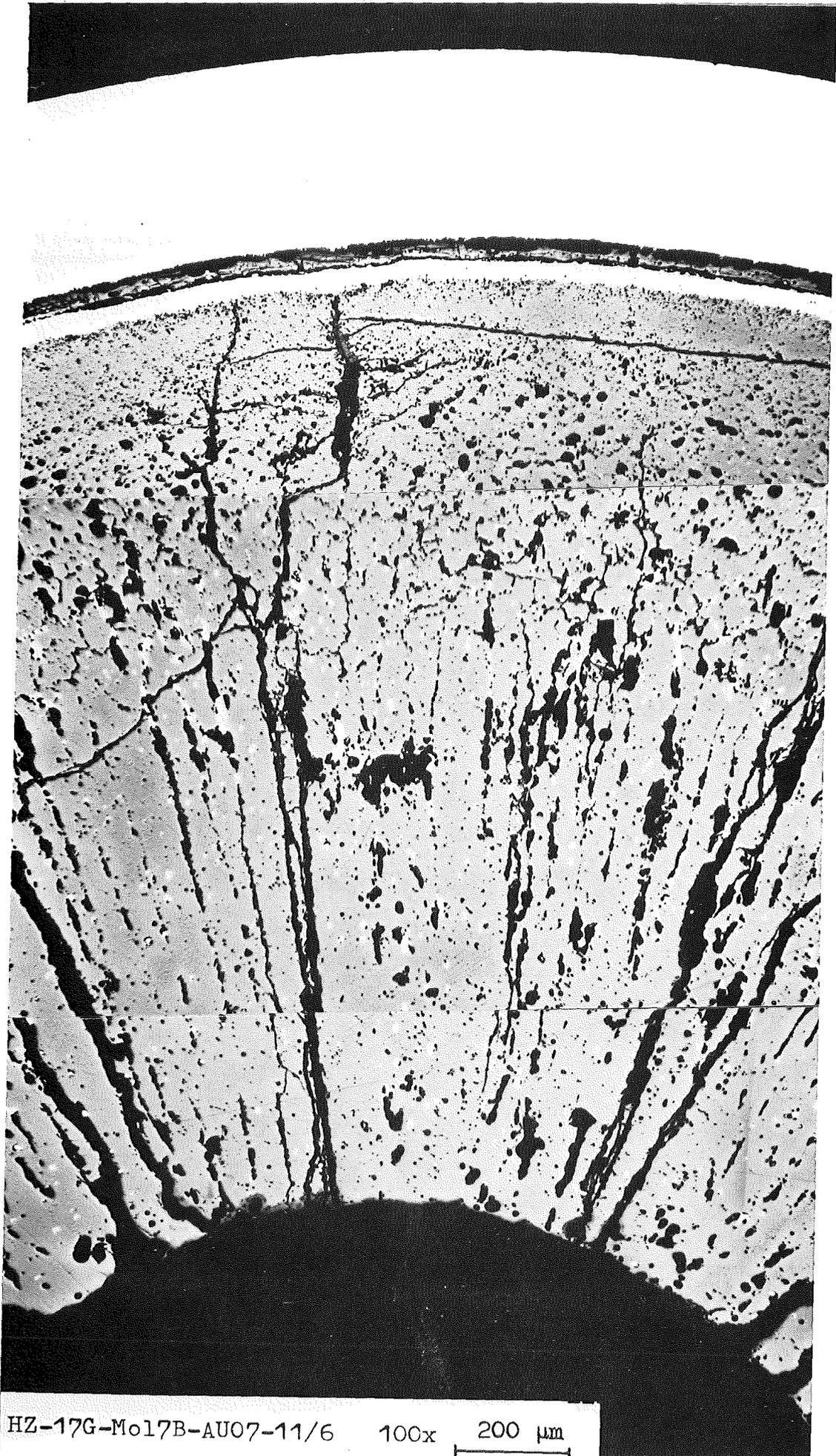
HZ-17G-Mo17B-AUC7-7/6 100x 200  $\mu\text{m}$



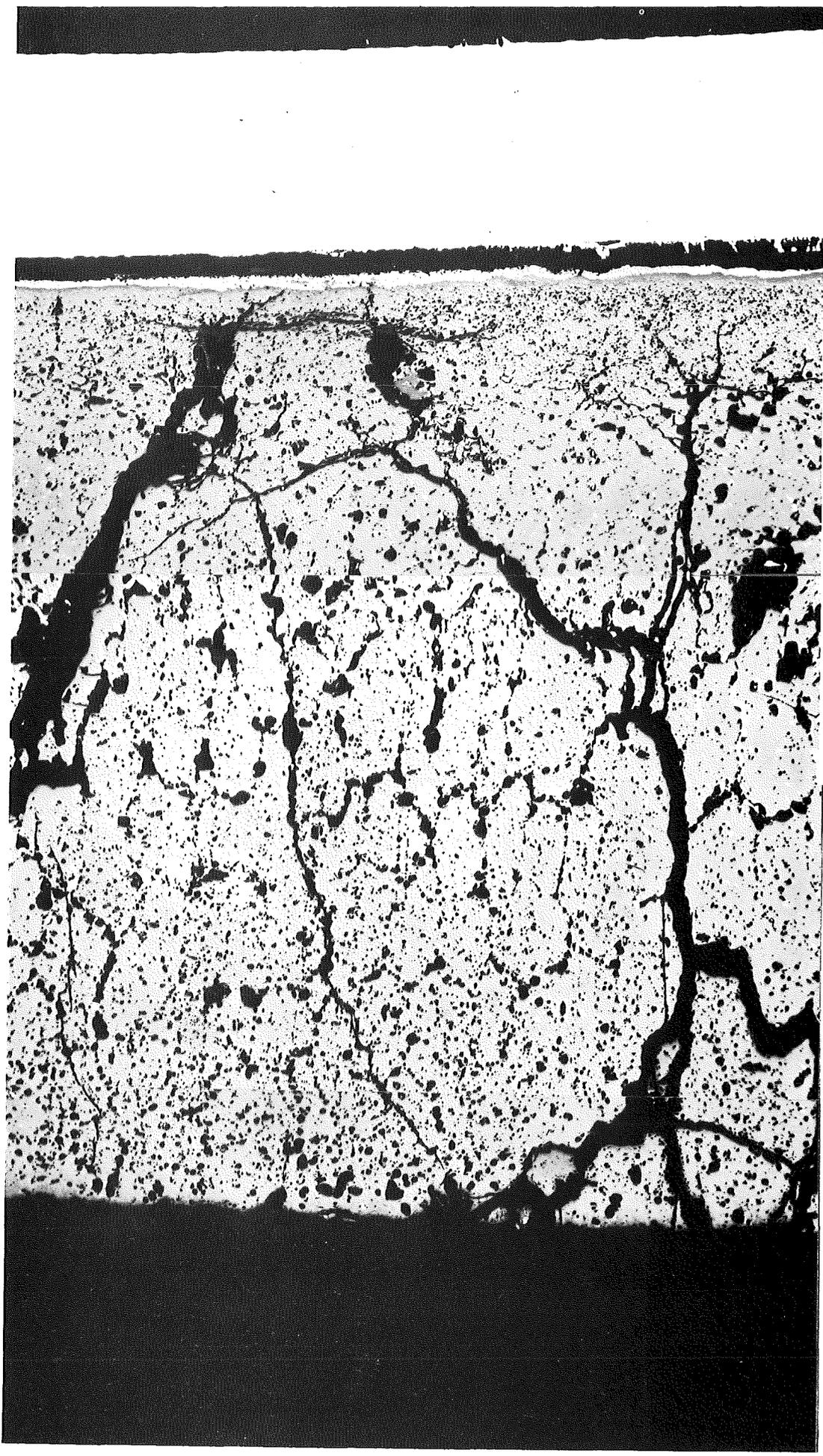
200 μm

100X

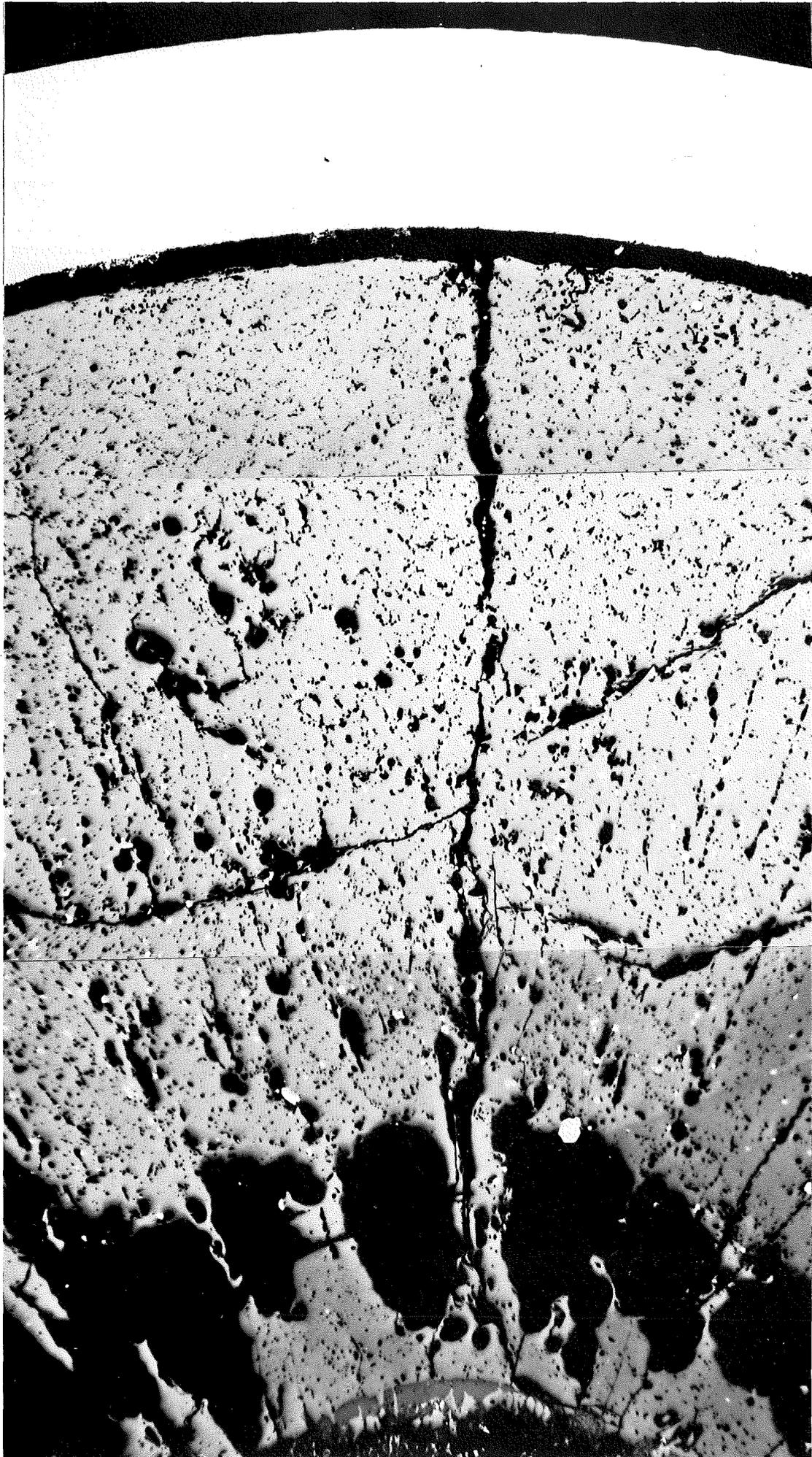
HZ-17G-Mo17B-AUC7-9/6



HZ-17G-Mo17B-AU07-11/6 100x 200 μm



HZ-17G-Mo17B-AU07-13/8 100x 200  $\mu$ m



200  $\mu\text{m}$

100x

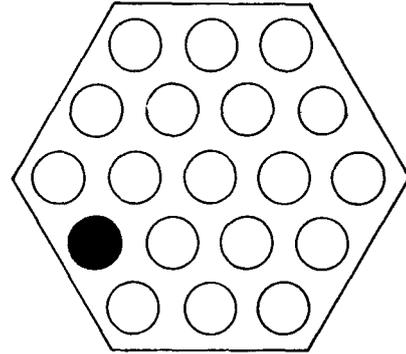
HZ-17G-Mo17B-AU07-14/6



HZ-17G-Mo17B-AU07-16/10 100x 200  $\mu\text{m}$

Stab: AM16

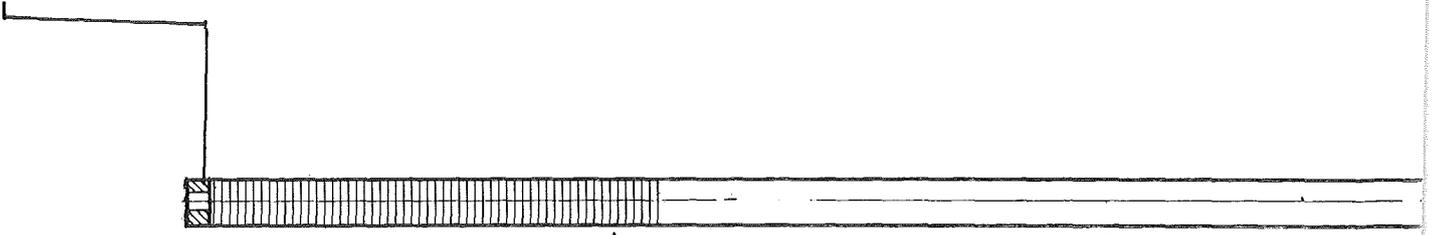
Faltblatt: A47



Schliff Nr.	Blatt Nr.	B e m e r k u n g
oben		
1	A48	Querschliff durch obere Brutstoffsäule. Normales Gefüge.
2	A49	Querschliff durch Brennstoff. Hülldefekt, starke Hüllinnenkorrosion. Schmelzingot im exzentrisch verschobenen Zentralkanal.
3	A50	Plastisch(?)verformtes Oxidgefüge. Querschliff stark ovalisiert. Großer Schmelzingot.
4	A51	10 mm unterhalb Schliff 3. Exzentrischer, umstrukturierter, halbkreisförmiger Zentralkanal. Starke Ovalität.
5	A52	Schmelzerscheinungen in Zentralkanalhöhe.
(längs)		
7	A53	Derselbe Befund wie bei Blatt A52.
9	A54	Lage 20 mm vom unteren Brennstoffsäulende. Hochverdichteter ehemals geschmolzener Bereich um den Zentralkanal.
unten		

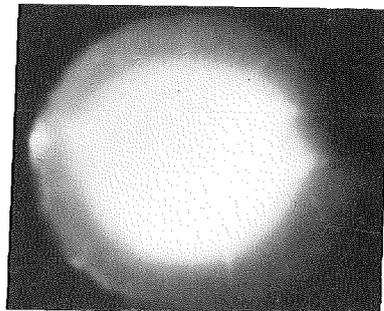
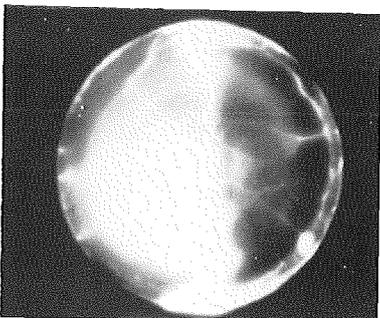
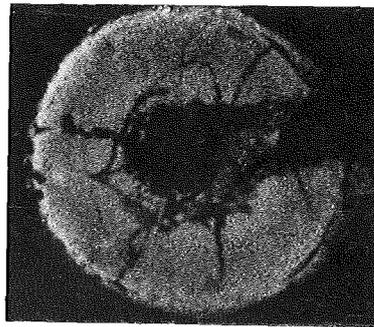
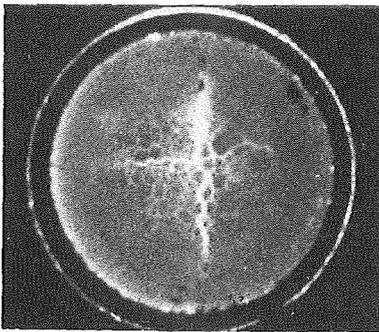
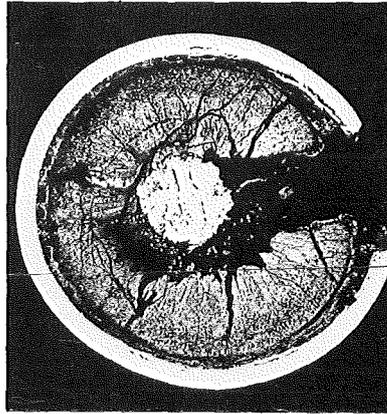
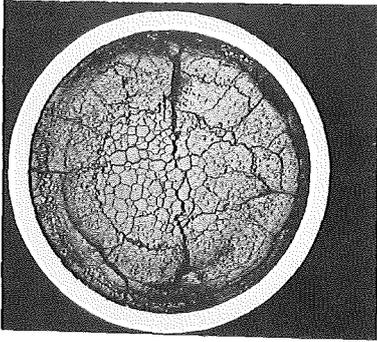


75 70 5 60



1

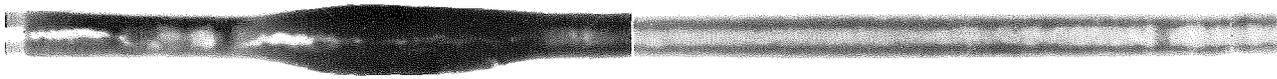
2



5

50

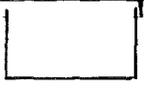
5



St

3

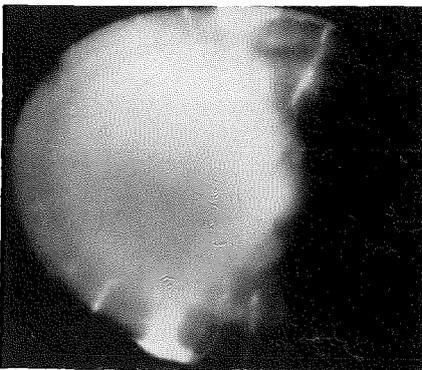
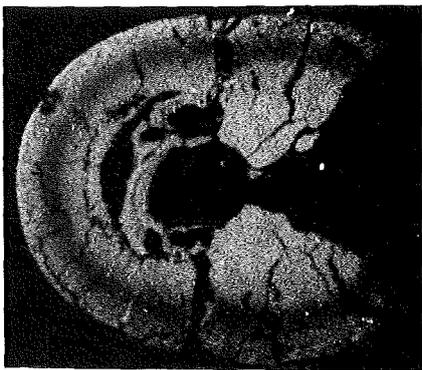
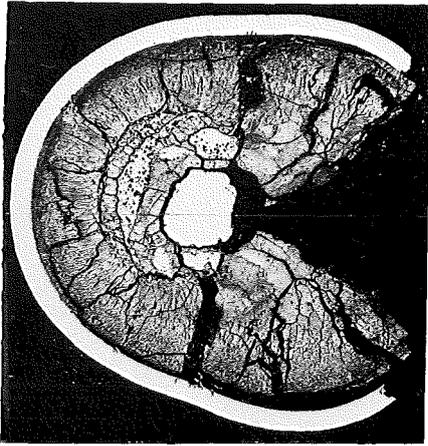
4



5

7

3



40

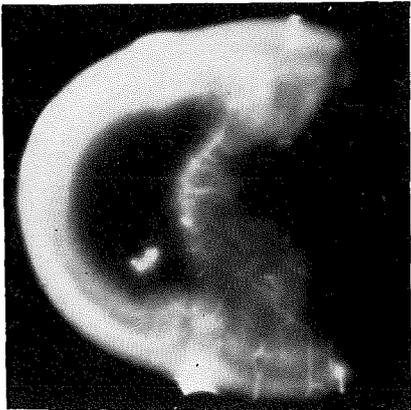
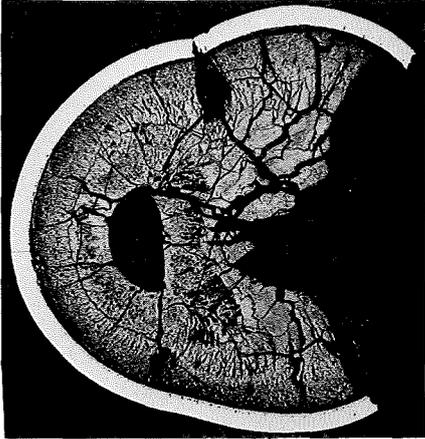
5

30

5

ablänge 1080 mm

4



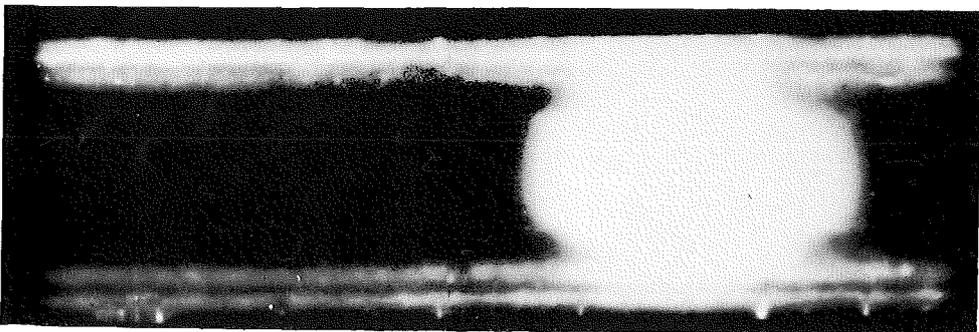
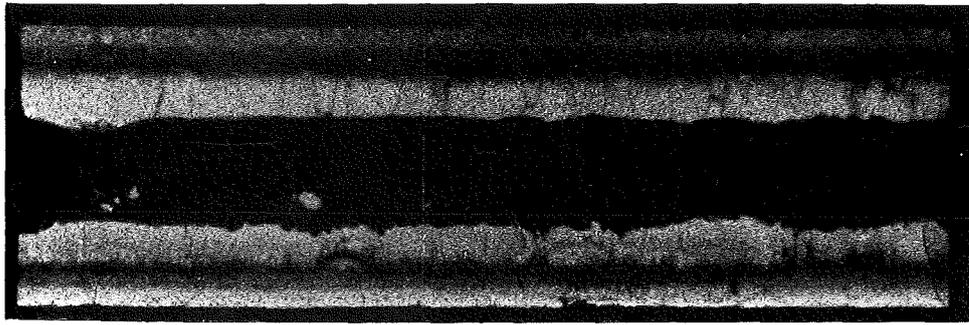
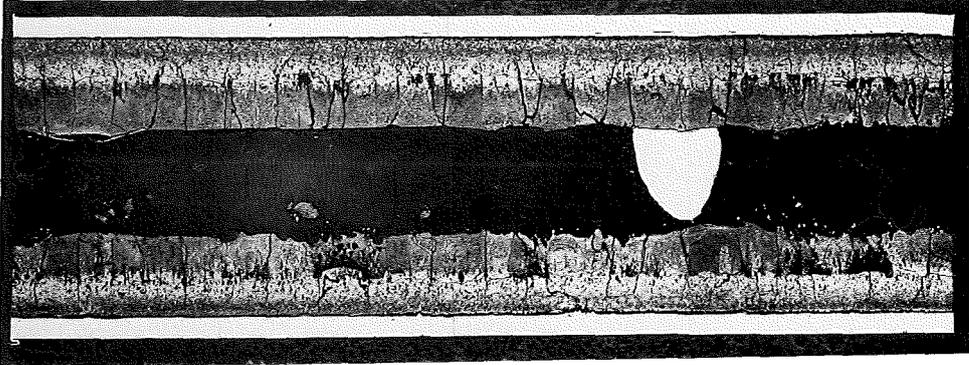
20

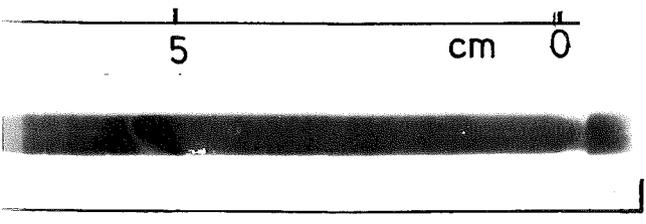
5

10

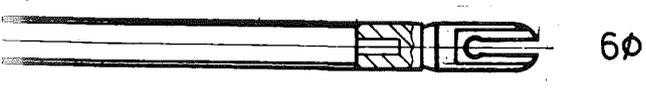
9

5





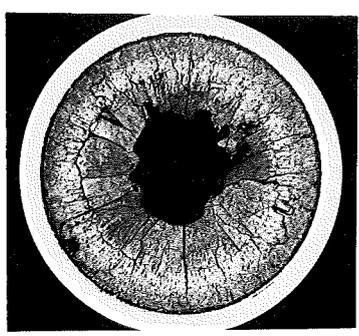
unten



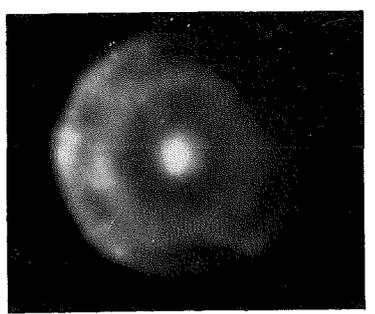
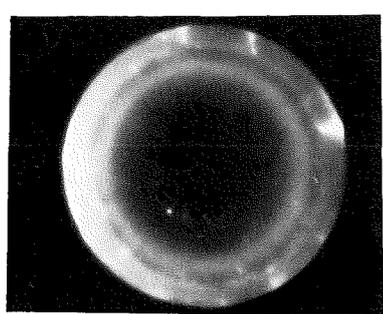
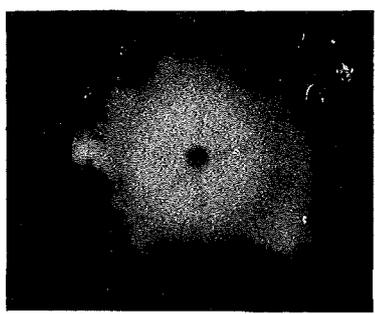
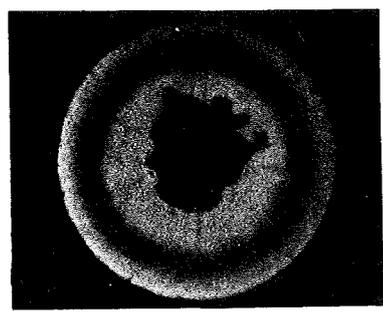
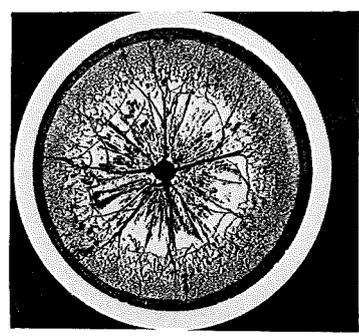
# Stab AM 16

A47

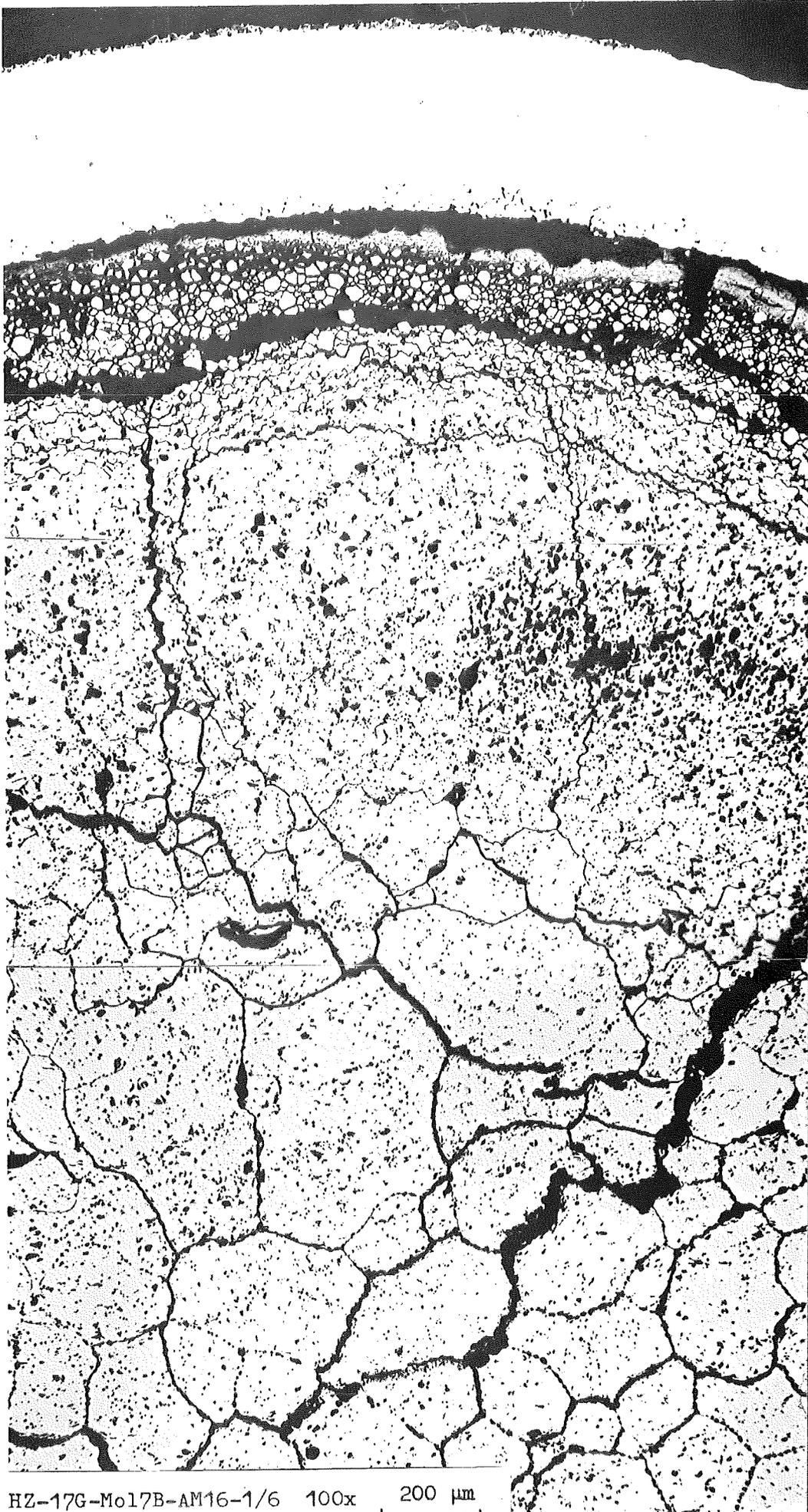
7



9







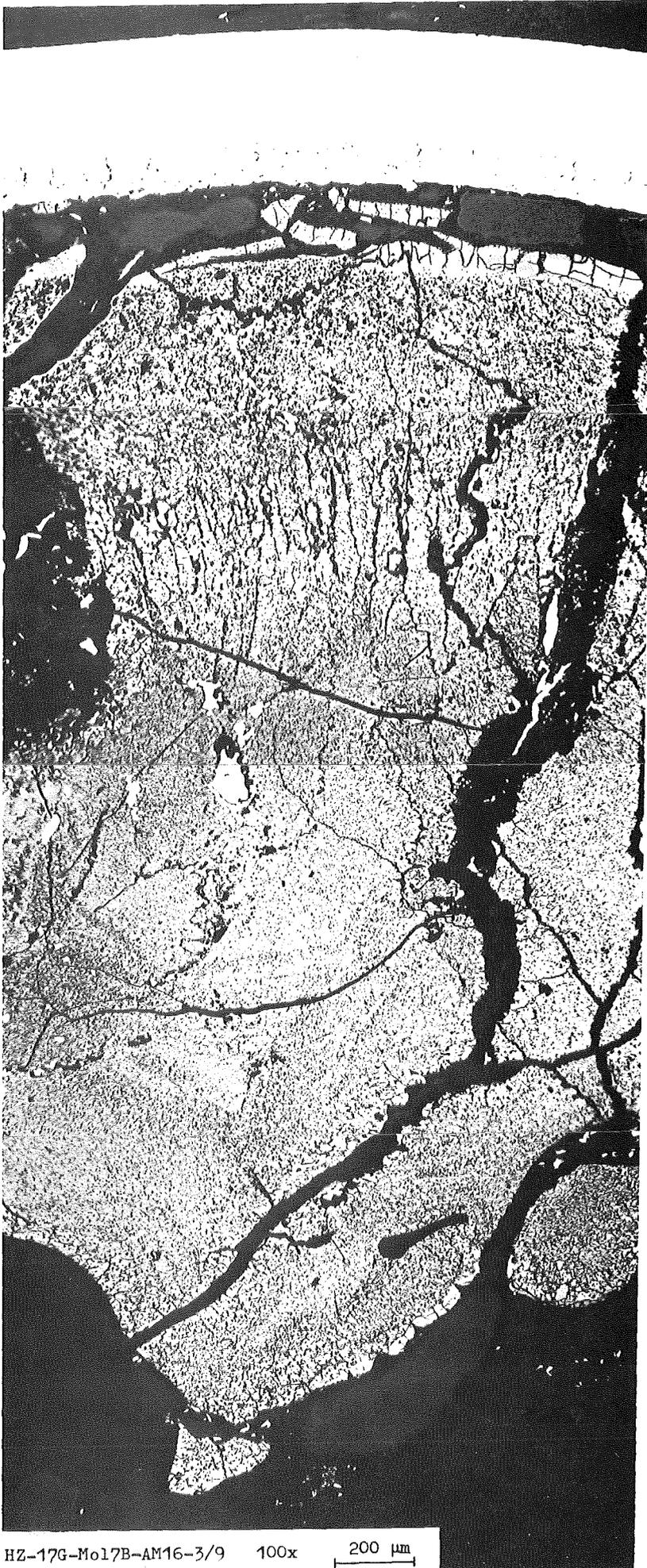
HZ-17G-Mo17B-AM16-1/6 100x 200  $\mu\text{m}$



HZ-17G-Mo17B-AM16-2/8

100x

200  $\mu\text{m}$



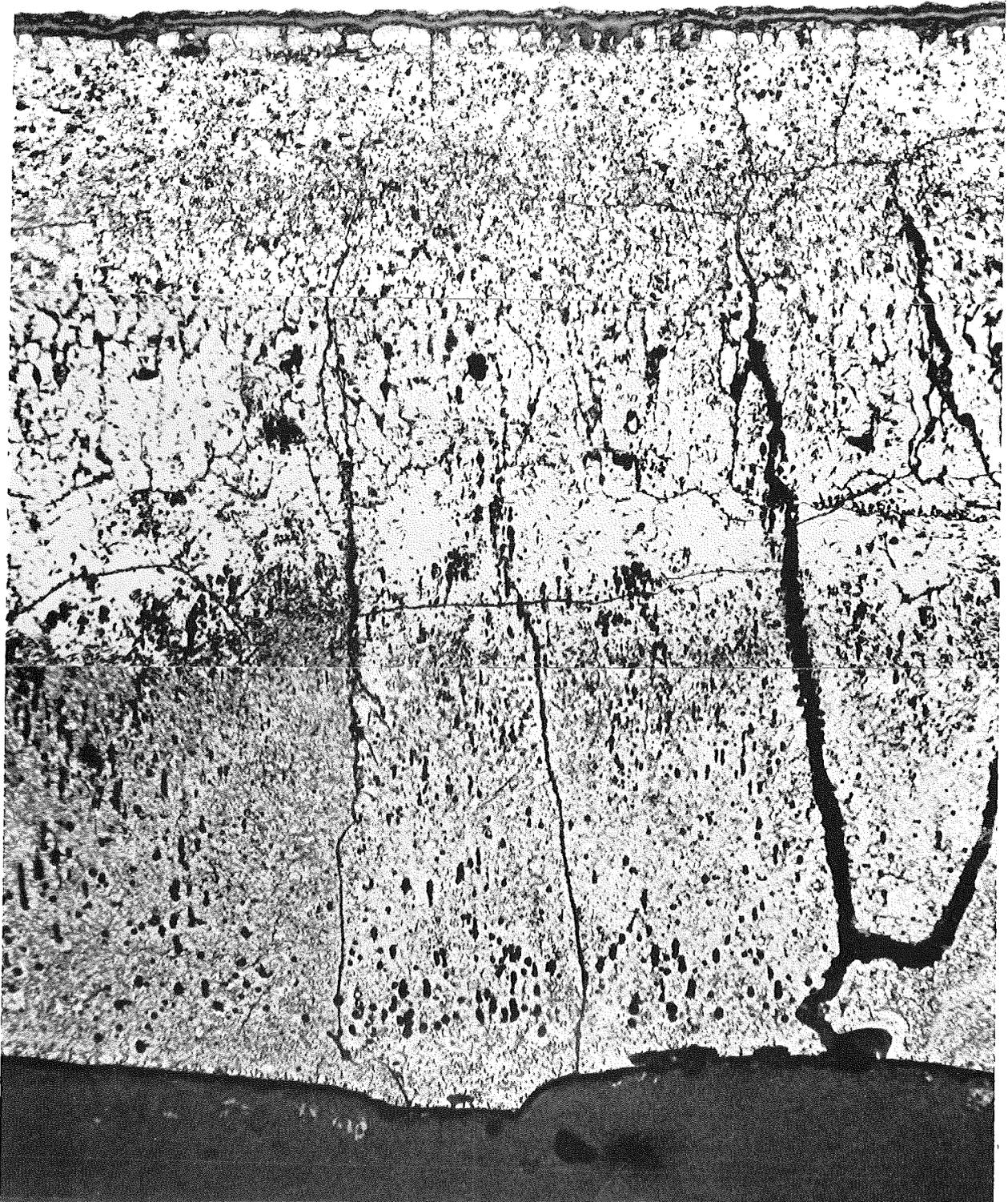
HZ-17G-Mo17B-AM16-3/9 100x 200  $\mu$ m



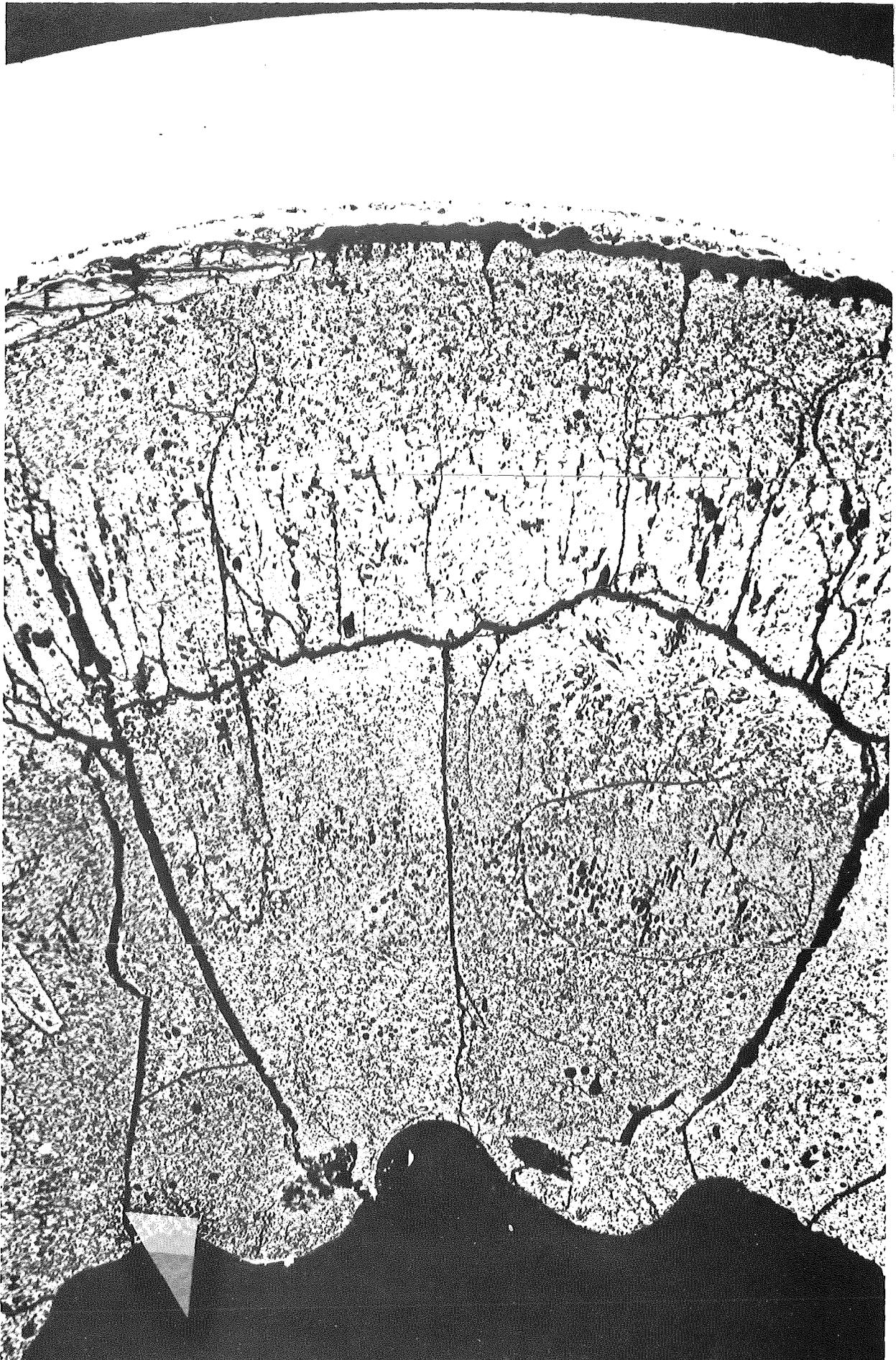
HZ-17G-Mo17B-AM16-4/8

100x

200 μm



HZ-17G-Mo17B-AM16-5/10 100x 200  $\mu$ m

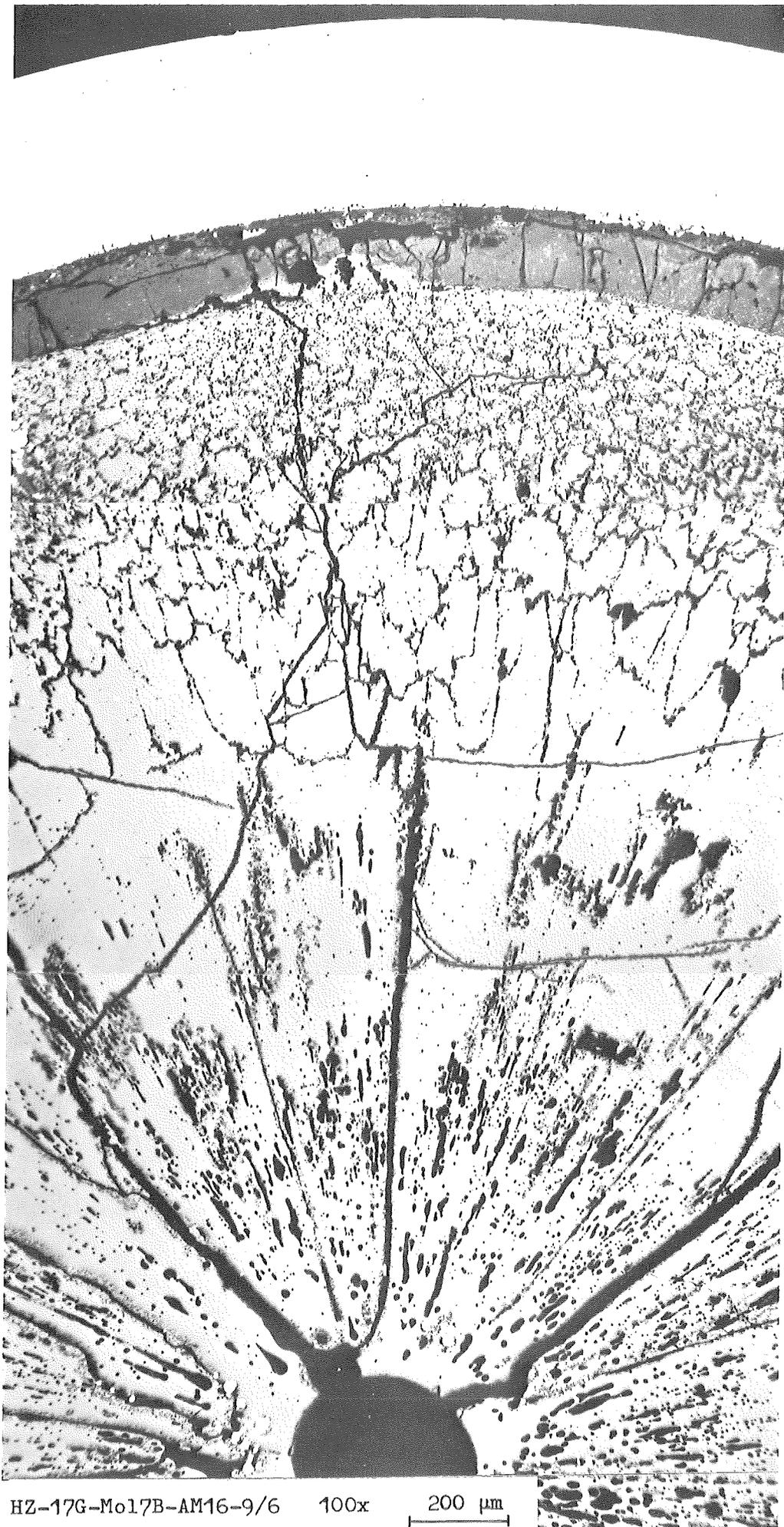


HZ-17G-Mo17B-AM16-7/6

100x

200  $\mu\text{m}$





HZ-17G-Mol17B-AM16-9/6

100x

200  $\mu$ m

