

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

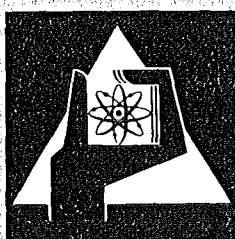
März 1974

KFK 1952

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

**Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der
UO₂/PuO₂-Brennstab-Bestrahlungsexperimente der
FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4b**

P. Weimar, Th. Dippel, D. Freund



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

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1952

Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Schneller Brüter

Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der
UO₂/PuO₂-Brennstab-Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4b

von

P.Weimar, Th.Dippel, D.Freund

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

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

Der in dem vorliegenden Bericht dargestellte Bestrahlungsversuch basiert auf der Zusammenarbeit mehrerer Arbeitsgruppen im Kernforschungszentrum Karlsruhe. Die vielfältige Mühe und Sorgfalt aller Beteiligten sei ausdrücklich anerkannt. Die Autoren danken an dieser Stelle weiterhin allen, die unmittelbar zur Abfassung der Dokumentation beitrugen, insbesondere Herrn F. Bauer für die Ausarbeitung der Diagramme und Abbildungen und Frau B. Hauth für die Reinschrift des Manuskriptes sowie die redaktionelle Hilfe.

Februar 1974

P. Weimar, Th. Dippel, D. Freund

KURZFASSUNG

Im Rahmen der im Karlsruher Forschungsreaktor FR 2 durchgeführten Brennstabbestrahlungsexperimente stellt die Bestrahlung von 35 Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff - zusammengefaßt unter der Bezeichnung "Kapselversuchsgruppe 4b" - eine weitere Erprobung des SNR-Brennstabgrundkonzeptes im thermischen Fluß dar.

Die Bestrahlung wurde in Na/PbBi-Doppelkapseln durchgeführt, wobei jeweils 3 bis 4 Kurzprüflinge mit 80 mm Brennstoffsäule übereinander angeordnet waren. Bei einem PuO_2 -Anteil von 20 Gew.-% betragen die Tablettendichten 84 und 90 % th.D., welches Schmierdichten von 80 bzw. 85 % th.D. entspricht. Die Brennstabhüllen aus austenitischem Edelstahl der Werkstoff-Nr. 1.4988 haben bei einem Außendurchmesser von 6,0 mm eine Wandstärke von 0,38 mm. Die Länge der Prüflinge beträgt 172 mm.

Die Bestrahlung der insgesamt 11 Kapselversuchseinsätzen wurde auf normalen FR 2-Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen durchgeführt. Bei Stableistungen bis max. 620 W/cm und Hülloberflächentemperaturen von max. 770 °C wurden Abbrände von 10 bis etwa 120 MWd/kg M erreicht. Die Bestrahlungszeiten lagen zwischen 46,2 und 517,5 Tagen Vollastäquivalent. Alle Prüflinge blieben intakt.

In der vorliegenden Dokumentation wird nach der Darstellung von Aufgabe und Ziel des Experimentes, Auslegung, Spezifikation und Herstellung der Prüflinge eine detaillierte Schilderung des Bestrahlungsablaufes gegeben. Hieran anschließend werden sämtliche Ergebnisse der zerstörungsfreien und der zerstörenden Nachuntersuchung dargestellt und vergleichend analysiert.

A B S T R A C T

Design, Irradiation and Post Irradiation Examination of the UO_2/PuO_2 Fuel Pin Irradiation Experiments of the FR 2 Capsule Group No. 4b

The irradiation of 35 fuel pin samples with UO_2 - PuO_2 fuel of the experiment called "Capsule Group No. 4b", irradiated in the thermal flux of the Karlsruhe research reactor FR 2, represents a further testing of the SNR basic fuel pin concept.

The irradiation has been carried out in 11 Na/PbBi double-capsules, where 3 - 4 samples are stacked one above the other. The fuel column of 80 mm length consists of pellets with a Pu-content of 20 w/o. Two different fuel densities of 84 and 90 % T.D., corresponding to smeared densities of 80 resp. 85 % T.D., have been realized. The austenitic stainless steel claddings have an outer diameter of 6,0 mm with a wall thickness of 0,38 mm. The total length of the fuel pin is 172 mm.

The capsules have been irradiated at normal fuel element or isotope canal positions. At linear rod powers up to 620 W/cm and clad surface temperatures of max. 770 °C the burnup lies between 10 and 120 MWd/kg Metal. The samples have been irradiated between 46,2 and 517,5 days full power (44 MW) equivalent. All fuel pins are intact.

In the present documentation a compilation of design, specification and fabrication as well as a detailed description of irradiation and post irradiation examination results are given.

<u>I n h a l t</u>	Seite
1. Einleitung	1
2. Aufgabe und Ziel des Experimentes	2
3. Auslegung und Spezifikation	4
3.1 Brennstabauslegung	4
3.2 Brennstoffspezifikation	6
3.3 Hüllrohrspezifikationen	8
3.4 Brennstabspezifikationen	10
4. Herstellung der Prüflinge	12
4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung	12
4.2 Tablettenherstellung	14
4.3 Herstellung des Vibrierbrennstoffes	14
4.4 Brennstoffeigenschaften	15
4.5 Hüll- und Strukturmaterial	15
4.6 Hüllrohrprüfung	15
4.7 Stabherstellung	18
4.8 Stabprüfung	21
5. Bestrahlungseinrichtung	23
5.1 Versuchseinsatz	23
5.2 Bestrahlung im FR 2	29
6. Ablauf der Bestrahlung	29
6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß	29
6.2 Temperatur und Stableistung	36
6.3 Thermische Abbrandberechnung	37
7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	75
7.1 Äußere Vermessung	75
7.2 Durchleuchtung	90
7.3 γ -Profile und γ -Spektren	92
8. Zerstörende Nachuntersuchung	97
8.1 Spaltgasbestimmungen	97
8.2 Keramografie	104
8.3 Radiochemische Abbrandbestimmungen	110
8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte	110
9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung	113
10. Schlußbetrachtung	116
Literatur	118

Liste der Tabellen

		<u>Seite</u>
I	Brennstabauslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4b	4
II	Kenndaten der Ausgangspulver	13
III	Brennstoffanalysen	16
IV	Hüllrohre und Prüfungsergebnisse	16
V	Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nennichte 90 % th.D.	19
VI	Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nennichte 84 % th.D.	20
VII	Materialwerte für die Prüflinge mit Vibrierbrennstoff, Nennichte 80 % th.D.	22
VIII	Länge der Tablettensäulen	27
IX	Länge der Vibrierpulversäulen	27
X	Stabvermessung vor der Bestrahlung	28
XI	Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Vg 4b	32
XII	Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopen- kanal-Positionen in Höhe der Prüflingsmitte	34
XIII	Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 4b	39
XIV	Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge	40
XV	Mittlere Stabileistungen der Prüflinge bei Zyklusbeginn und -ende	41
XVI	Thermische Abbrandwerte der Prüflinge	74
XVII	Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung	89
XVIII	Längenvermessungen der Prüflinge (vor und nach der Bestrahlung)	91
XIX	Veränderung der Brennstoffsäulenlänge	93
XX	Freies Spaltgas - Spaltgasdruck	98
XXI	Gebundenes Spaltgas	99
XXII	Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V' (mm ³ /g)	101
XXIII	Spaltgasbilanz	102
XXIV	Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt	103
XXV	Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrände	114

Liste der Abbildungen

	<u>Seite</u>	
1	BE-Prüfling, Versuchsgruppe 4b	11
2	Alpha-Autoradiographien einer Tablette	17
3	Brennstofftabletten mit Stirnflächeneinsenkung	17
4	Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen	24
5	Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen	25
6	Röntgen-Aufnahme der einvibrierten Prüflinge	26
7	Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel	30
8	Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung	31
9	Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses	35
10	Temperatur-Stableistungscharakteristik Kapseltyp 4a	38
11	Kapselversuchsgruppe 4b, KVE 42	42
12	Kapselversuchsgruppe 4b, KVE 43	43
13	" , KVE 44	44
14	" , KVE 45	45
15	" , KVE 47, Blatt 1	46
16	" , KVE 47, Blatt 2	47
17	" , KVE 47, Blatt 3	48
18	" , KVE 48, Blatt 1	49
19	" , KVE 48, Blatt 2	50
20	" , KVE 49, Blatt 1	51
21	" , KVE 49, Blatt 2	52
22	" , KVE 49, Blatt 3	53
23	" , KVE 49, Blatt 4	54
24	" , KVE 55, Blatt 1	55
25	" , KVE 55, Blatt 2	56
26	" , KVE 56, Blatt 1	57
27	" , KVE 56, Blatt 2	58
28	" , KVE 57, Blatt 1	59
29	" , KVE 57, Blatt 2	60
30	" , KVE 57, Blatt 3	61
31	" , KVE 58, Blatt 1	62
32	" , KVE 58, Blatt 2	63
33	" , KVE 58, Blatt 3	64
34	Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)	65
35	" "	66
36	" "	67
37	" "	68
38	" "	69
39	" "	70
40	" "	71
41	" "	72
42	" "	73

	<u>Seite</u>
43 Prüfling 4B/32 nach der Bestrahlung	76
44 Veränderungen der Stab-Außendurchmesser	78
45 " "	79
46 " "	80
47 " "	81
48 " "	82
49 " "	83
50 " "	84
51 " "	85
52 " "	86
53 " "	87
54 " "	88
55 γ -Profil von Prüfling 4b/34	95
56 γ -Profil von Prüfling 4b/30	96
57 Brennstoffstruktur	106
58 Brennstoffstruktur	107
59 Brennstoffstruktur	108
60 Brennstoffstruktur	109
61 Abbrandverteilung über Brennstofflänge, KVE 49	111
62 Abbrandverteilung über Brennstofflänge, KVE 57	112
63 Abweichung der gerechneten gegenüber den radiochemisch bestimmten Abbrand-Werten	115

1. Einleitung

Die Versuchsgruppe 4b (Vg 4b) besteht aus 35 Kurzstäben. Als Brennstoff dient Mischoxid UO_2 - PuO_2 verschiedener Dichte sowohl in Tabletten- als auch in einvibrierter Form. Diese Versuchsgruppe setzt die in Vg 4a begonnenen Abbrandversuche an Pu-haltigem Brennstoff fort.

Der Stabaufbau und die Bestrahlungsvorrichtung ist identisch mit dem in Versuchsgruppe 4a gewählten wie Brennstoffsäule mit Gasplenum am oberen Ende, bestrahlt in NaK/PbBi-Kapseln im stagnierenden Kühlmittel Natrium-Kalium.

Hinsichtlich der Versuchsgruppe 4a wurden folgende Parameter variiert:

- Stabdurchmesser hier kleiner: 6 mm
- Stableistung hier niedriger: ~ 500 W/cm
- Max. Hülloberflächen-Temperatur 680 °C
- Pu-Anreicherung hier höher: ~ 20 Gew.-%
- Tablettenform hier mit Dishing an den Stirnflächen
 bzw. vibriertem Brennstoff

Weiterhin wurden in dieser Bestrahlungsserie erstmals solche Hüllrohr-abmessungen verwendet, wie sie für die Brennstäbe des Prototyps des Natrium-gekühlten Schnellen Brütters (SNR) vorgesehen sind.

In diesem Bericht werden alle Details über die 35 Prüflinge dieser Versuchsgruppe angegeben, wie Aufgabenstellung, Auslegung, Spezifikation, Herstellung der Prüflinge, Bestrahlungsablauf, zerstörungsfreie und zerstörende Nachuntersuchung der Prüflinge. Diese Zusammenstellung basiert auf einer Vielzahl von internen Niederschriften und persönlichen Mitteilungen. In der folgenden Übersicht ist der Zeitablauf des Experimentes und die für die einzelnen Schritte verantwortlichen Stellen und Personen angegeben.

Zeitraum	T e i l a r b e i t	Institution/Hauptbeteil.
1967/68	Vorüberlegungen und Versuchsauslegung	IAR; Karsten, Gerken
1967/68	Bestrahlungskapseln	IRE; Häfner, Bojarsky
1967	Spezifikationen	IAR; Karsten, Gerken
1969	Herstellung der Prüflinge	IMF; Dippel, Kummerer, Triemer
1967/71	Organisation der Bestrahlung und Betreuung	IAR; Gerken IRE; Häfner / IMF; Freund
1967/71	Bestrahlung im FR 2	Abt.Reaktorbetrieb FR 2
1971/72	Organisation der Nachuntersuchung und Betreuung	IMF; Geithoff, Weimar
1969/72	Zerstörungsfreie Nachuntersuchung	RB/Z; Scheeder, Enderlein
1972/73	Spaltgasuntersuchungen	RB/CuM; Gräbner
1970 + 72	Keramografie	RB/Z; Pejsa
1972/73	Abbrandbestimmung	IRCH; Wertenbach
1973	Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse	IMF; Weimar, Freund, Dippel

2. Aufgabe und Ziel des Experimentes

Die Bestrahlung von prototypischen Brennstabprüflingen (hinsichtlich der Durchmesser) mit Mischoxidbrennstoff ist die Hauptaufgabe dieser Kapselversuchsgruppe. Die Simulation der Schnellbrüter-Verhältnisse für die Brennstäbe weicht in folgenden Punkten von der Wirklichkeit ab:

- Die Stablängen entsprechen nur einem Bruchteil der Abmessungen echter Brüterbrennstäbe.
- Die Brutstoffpartien in axialer Richtung fehlen.
- Die Bestrahlung erfolgt (wie in Vg 4a) wieder im thermischen Fluß, mit den hieraus resultierenden Unterschieden in der radialen Wärmequelllichte- und Spaltproduktverteilung, der Spaltproduktverteilung sowie der Hüll- und Strukturmaterialbelastung.
- Die Kühlung erfolgt durch stagnierendes Natrium.

Unter Berücksichtigung dieser Abweichung von den zu erwartenden Beanspruchungen - im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf realistische Bestrahlungen im schnellen Fluß - muß die Aufgabenstellung wie folgt festgelegt werden:

- Es sollen Prüflinge mit Mischoxid-Brennstoff unter schnellbrüter-ähnlichen Bedingungen bis zu hohen Abbränden bestrahlt werden.
- Die Brennstoffsäulen haben unterschiedliche Dichte, Topographie (vibriertes bzw. gesinterter Brennstoff) und Durchmesser.
- Die Zielabbrände sollen bis zu 80.000 MWd/t variiert werden.

Die Bestrahlung kann unter Berücksichtigung der erwähnten Einschränkungen folgende Aussagen liefern:

- Ist das Stabgrundkonzept mit dem neuen prototypischen Stabdurchmesser 6,0 mm bei einer Wandstärke von 0,38 mm für Bestrahlungen bis zu hohen Abbränden geeignet? Bleiben die Prüflinge intakt?
- Ändert sich die äußere Geometrie der Prüflinge?
- Welche radialen und evtl. axialen Strukturänderungen erfährt der Brennstoff?
- Wie ändert sich die Spaltstoffverteilung und welche Folgerungen ergeben sich hieraus für das Stabverhalten?
- Wie ist die Verteilung der Spaltprodukte?
- Wie groß ist der Anteil des freien und des gebundenen Spaltgases?

3. Auslegung und Spezifikation

3.1 Brennstabauslegung

Wie einleitend bereits erwähnt, werden mit der Bestrahlung der Prüflinge der Versuchsgruppe 4b die Abbrandversuche an Prüflingen mit UO_2 - PuO_2 -Brennstoff der Versuchsgruppe 4a [1,2,3,4] fortgesetzt, wobei im Hinblick auf die Brennstabauslegung eine weitere Annäherung an den zum Auslegungszeitpunkt diskutierten SNR-Brennstab angestrebt wird: Die Hüllrohrabmessungen ($6^{\phi} \times 0,38$) sowie die Pu-Anreicherung (20 Gew.-%) und die Tablettenform mit beidseitiger Stirnflächeneinsenkung entsprechen dem SNR-Konzept. Als weitere Varianten werden Tabletten mit einseitiger Einsenkung, Dichten von 84 und 96 % th.D. sowie Brennstäbe mit vibriertem Brennstoff mit 80 % th.D. verwendet. Die Aufteilung der Prüflinge auf die einzelnen Auslegungsvarianten ist in Tabelle I zusammengestellt.

Tabelle I: Brennstabauslegungsvarianten der Versuchsgruppe 4b

Prüfling Nr.	Brennstoff Form	Dichte (% th.D.)	Stirnflächeneinsenkung
4B/1-6	Tabletten	90	beidseitig 2 x 1,5 v/o
4B/7-12	Tabletten	90	einseitig 3 v/o
4B/13-24	Tabletten	84	einseitig 3 v/o
4B/25-35	vibriert	80	-

Die Bestrahlungsbedingungen orientieren sich an den SNR-Bedingungen und sind durch folgende Festlegung von Hülltemperatur, Stableistung und Abbrand gegeben: [5]

- Maximale Nominalstabelleistung	600 W/cm
- Mittlere Nominalstabelleistung	500 W/cm
- Maximale Nominalhülltemperatur, außen	450 °C
- Mittlerer Abbrand	80 MWd/kg Metall

Weiterführende Rechnungen während der Auslegung und Vorbereitung der Versuchsgruppe 4b ergaben, daß im SNR-Betrieb höhere maximale Hülloberflächentemperaturen zu erwarten sind. Dies führte zu einer Auslegungsänderung, welche zu Hülloberflächentemperaturen $T_{Ha,max}$ von ca. 680 °C [6] sowie zu einer Modifikation der benutzten Bestrahlungskapsel führten (vergl. Kap. 5 und 6.2).

Die Bestrahlung der Prüflinge wird auf normalen Brennelement- bzw. Isotopenkanalpositionen des FR 2 (vergl. Kap. 5) durchgeführt. Der ungestörte thermische Fluß des FR 2 beträgt maximal ca. 1×10^{14} n/cm²sec.

Der Brennstab besteht aus einer Hülle mit verschweißten Endstopfen, der Brennstoffzone, bestehend aus Tabletten bzw. vibriertem Brennstoff, mit je einer UO₂-Isoliertablette am oberen und unteren Säulenende (nicht bei den vibrierten Säulen), einem Führungsstücke sowie einer Feder zur Transportsicherung. Zusätzlich ist im unteren Endstopfen sowie im Führungsstück ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils angebracht. Durch die Sinterstahlfilter im Führungsstück und oberen Endstopfen wird schließlich gewährleistet, daß beim Öffnen des Stabes nur gasförmige Spaltprodukte entweichen können. Damit erhält man folgende Stabeinteilung:

Oberer Endstopfen	22 mm	
Spaltgasraum (mit Führungsstück)	45 mm	55 mm bei vibr. Brennstoff (keine Isoliertabletten)
Isoliertablette oben	5 mm	
Brennstoffsäule	80 mm	
Isoliertablette unten	5 mm	
Unterer Endstopfen	15 mm	
<hr/>		
Gesamtlänge	172 mm	

Die Bezeichnung der Stäbe ist an zwei Schlüsselflächen des oberen Endstopfens angebracht.

3.2 Brennstoffspezifikation

3.2.1 Chemische Zusammensetzung

- Brennstoff: UO_2/PuO_2 -Mischoxid
- Anreicherung: $Pu/U+Pu = 20$ Gew.-%, Rest U_{nat}
- Isoliertabletten: U_{nat}
- Stöchiometrie O/Me: $1,98 \pm 0,02$
- Chemische Reinheit: Verunreinigungen insgesamt maximal 2500 ppm entsprechend 4 ppm Boräquivalent, mit folgenden Einschränkungen:

Verunreinigung	Grenzwert in ppm
C	150
H_2O	100
N	100
Cl	50
F	50

Der gesamte Gasgehalt des Brennstoffes soll nicht höher als $0,1 \text{ Norm-cm}^3$ je Gramm Brennstoff bei einer Freisetzungstemperatur von 1600°C sein.

3.2.2 Isotopenzusammensetzung

- Gew.-% von Pu:
 - Pu-239 $90,9 \pm 0,2$
 - Pu-240 $8,15 \pm 0,15$
 - Pu-241 $0,83 \pm 0,05$
 - Pu-242 $0,04 \pm 0,005$
- Gew.-% von U_{nat} :
 - U-235 $0,7 \pm 0,1$
 - U-238 $99,3 \pm 0,1$

3.2.3 Homogenität im Mischbrennstoff

- Die Komponenten des Mischbrennstoffes sollen zu größtmöglicher Homogenität gesintert werden.
- Die PuO_2 -Partikel sollen $\leq 0,15$ mm sein

3.2.4 Brennstoff-Form

- Es kommen zylindrische, maßgesinterte Tabletten zum Einsatz.
- Die Tabletten weisen an den Stirnflächen Einsenkungen von 1,5 Vol.-% (beidseitig) bzw. 3 Vol.-% (einseitig) entsprechend der Aufteilung in Tabelle I auf.
- Elf Prüflinge enthalten Brennstoffsäulen aus vibriertem Brennstoff (vergl. Tabelle I).

3.2.5 Brennstoffdichte (Zuordnung vergl. Tabelle I)

- Geometrische Dichte: $84 \pm 2,2$; $90 \pm 2,2$ ‰ th.D.
- Materialdichte: $87 \pm 2,2$; $93 \pm 2,2$ ‰ th.D.
- Vibrierdichte: $80 \pm 1,5$ ‰ th.D.
- Isoliertabletten: $95 \pm 2,2$ ‰ th.D.

3.2.6 Tablettengeometrie

- Tablettendurchmesser: $5,10 \pm 0,03$
- Tablettenhöhe: $6,0 \pm 1,0$
- Isoliertablettenhöhe: $5,0 \pm 0,2$

3.2.7 Oberflächenbeschaffenheit der Tabletten

- Kantenabplatzungen $\leq 0,3$ mm
- Risse maximal 0,2 mm lang und 0,1 mm breit
- Flächenabplatzungen maximal 2 mm Durchmesser

3.2.8 Untersuchungen und Prüfungen am Brennstoff

- BET-Oberfläche (m^2/g)
- Stöchiometrie
- Primärpartikelgröße (max.)
- Sekundäragglomerate (max.)
- Chemische Analyse (aliquote Mischung aller Chargen) mit Angabe für die Elemente Ag, B, C, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, F, Fe, Mg, Mn, Mo, N, Ni, Pb, V, H₂O und Seltene Erden (Gesamtgehalt in ppm Boräquivalent)
- Pu-Analyse mit Mischungsverhältnis Pu-239 + Pu-241 / U+Pu
- Bestimmung von Durchmesser, Dichte und Höhe jeder Tablette einer Brennstoffsäule

- Keramographische Untersuchungen an den Tabletten mit Radial-schliffen (Vergrößerung 10-fach), α -Autoradiografie sowie Schliffbildern (x 200) von Tablettenrand und -mantelfläche (10 Tabletten je Charge).
- Dichteverteilung des vibrierten Brennstoffes mit Duschstrahl-methode.
- Keramografische Untersuchung an vibrierfähigen Kornfraktionen (Schliffaufnahmen (x 400) und α -Autoradiografie).

3.3 Hüllrohrspezifikationen

3.3.1 Werkstoff

Die Hüllrohre werden aus dem Werkstoff

X8CrNiMoVNb1613 (Werkstoff-Nr. 1.4988)

hergestellt.

Chemische Zusammensetzung:

Element	Gew.-%
C	$\leq 0,1$
Si	0,3 - 0,6
Mn	1,0 - 1,5
Cr	15,5 - 17,5
Ni	12,5 - 14,5
Mo	1,1 - 1,5
V	0,6 - 0,85
N ₂	0,1
Nb - Ta	$\leq 1,2$
P	$\leq 0,02$
S	$\leq 0,02$
Fe	Rest

3.3.2 Abmessungen

- Außendurchmesser: $6,0 \pm 0,04$ mm
- Innendurchmesser: $5,24 \pm 0,025$ mm
- Wanddicke: $0,38 \pm 0,03$ mm
- Geradheit: 1:1500, bezogen auf jeweils 10 cm Länge
- Ovalität: Innerhalb der Außendurchmessertoleranz

3.3.3 Oberflächenbeschaffenheit

- Rauigkeit: $\leq 2 \mu\text{m}$
- Oberflächenriefen und -fehler: $\leq 20 \mu\text{m}$
- Oberflächenrisse: Nicht zulässig
- Oberflächenbeschaffenheit: Innere und äußere Oberfläche muß frei von Anlauffarben, Öl, Schmutz, Metallspänen und sonstigen Fremdkörpern sein.

3.3.4 Materialbedingungen

- Vorbehandlung: 10 - 20 % kaltverformt und Wärmebehandlung (40 h - 750 °C)
- Korngröße: kleiner 2,5 Körner/cm² bei 100-facher Vergrößerung (ASTM Nr. 5)
- Mechanische Eigenschaften: Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung: maximal und minimal. Werte bei RT und 650 °C.
- Innere Fehler: kleiner 10 % der Wandstärke
- Einschlüsse: kleiner 0,05 mm oder 10⁻³ mm²
- Abdruckversuch nach DIN 50104 mit 200 at Druck
- Querfaltversuch nach DIN 50136
- Aufweitversuch nach DIN 50135

3.3.5 Hüllrohrprüfungen

Für jedes Hüllrohr wird ein Prüfzeugnis erstellt. Die Prüfzeugnisse des Herstellerwerkes müssen den Werksabnahmezeugnissen nach DIN 50049/3B entsprechen. Die Prüfungen betreffen folgende Punkte:

- Werkstoff: Chemische Analyse entsprechend Werksabnahmezeugnis.
- Abmessungen: Vermessung von Außen- und Innendurchmesser sowie Wandstärke mit geeigneten Verfahren, entsprechend für Geradheit und Ovalität.
- Oberflächenbeschaffenheit: Durchführung einer Riß-, Rauigkeits und Meßprüfung

- Materialbedingungen: Nachweis von Vorbehandlung, Korngröße, mechanischen Eigenschaften, Untersuchung auf innere Fehler und Einschlüsse, Durchführung von Abdrück-, Querfalt- und Aufweitversuchen.

3.4 Brennstabspezifikationen

3.4.1 Innere Geometrie

- Länge der Brennstoffsäule (mm) 80 ± 2 mm
- Länge einer Isoliertablette $5 \pm 0,2$ mm
(Die Brennstäbe mit vibriertem Brennstoff enthalten keine Isoliertabletten)
- Im unteren Endstopfen ist ein Rh-Plättchen zur Absorption des axialen Flußanteils befestigt.
- Innerer Aufbau gemäß Zeichnung Nr. TA2K-16-07-~~3~~-2861 (Abb. 1) und Tabelle I (s.Seite 4).

3.4.2 Äußere Geometrie

- Die Gesamtlänge des Stabes beträgt $172 \pm 0,5$ mm
- Außendurchmesser $6,0 \pm 0,04$ mm
- Schweißnahtdurchmesser $\leq 6,15$ mm

3.4.3 Füllgas

- Die Stabprüflinge erhalten vor dem Zuschweißen eine Helium-Füllung.

3.4.4 Schweißnähte

- Die Endkappen werden in die Hüllrohre unter Helium aufgeschweißt. Die Schweißnähte dürfen diametral um maximal 0,15 mm überstehen. Eine maximale He-Leckrate von 10^{-8} Torr-liter/sec ist zulässig.

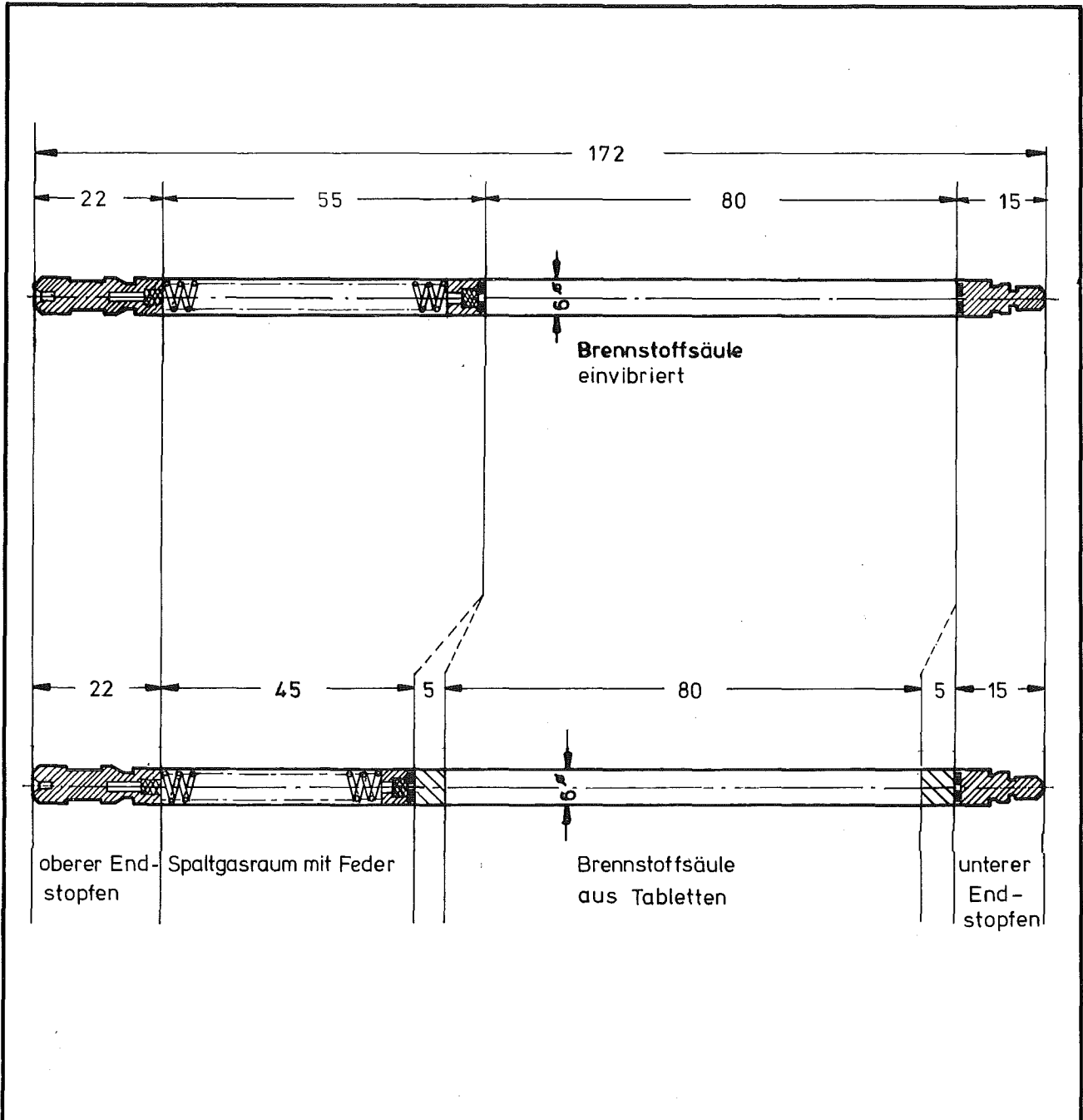


Abb. 1

8	1	Unterer Endstopfen	4988	6 [#] x 15	TA 2K-16-07-4-2865	
7	2	Isolierpellet	U _{nat} O ₂	51 [#] x 5	o. Z.	
6	2	Rhodium-Plättchen		4,5 [#] x 1	o. Z.	
5	1	Führungsstück	4988	5 [#] x 7	TA 2K-16-07-4-2864	
4	1	Druckfeder	4310	5 [#] x 44	o. Z.	
3	2	Sinterstahlfilter	CrNi-Stahl	2,8 [#] x 3	o. Z.	
2	1	Hüllrohr	4988	6 [#] x 0,38 x 144	TA 2K-16-07-4-2863	
1	1	Oberer Endstopfen	4988	6 [#] x 22	TA 2K-16-07-4-2862	
Teil	Stück	Benennung	Werkstoff	Abmessung	Zeichngs.-Nr. Norm Bemerkung	
Oberflächenzeichen	~	▽	▽▽	▽▽▽	▽▽▽▽	
Rauhiefe max. in μ	1000	40	10	4	1,6	
1967	Tag	Name	Werkstoff	Gesellschaft für Kernforschung m. b. H.	Zugeh. Zeichng.	
gez.	26.10.	<i>D. B. B.</i>		7500 Karlsruhe Postfach 947	Ersatz für	
gepr.		<i>U. H. W.</i>			Ersetzt durch	
ges.					Zeichnungs-Nr.	
Maßstab	Benennung		BE-Prüfling		TA 2K-16-07-3-2861	
5:1			Versuchsgruppe 4b			

3.4.5 Prüfung an den fertigen Brennstäben

- Länge
- Durchmesser, jeweils um 90° versetzt, bei b) um 60° versetzt
 - a) an den Endstopfen
 - b) an den Schweißnähten $\leq 6,15$ mm
 - c) am Hüllrohr, je 10 mm
- Durchbiegung und Rundheit werden auf einer besonders dazu geeigneten Meßeinrichtung profilometrisch gemessen und aufgezeichnet.
- Gewicht
- He-Lecktest: Zum Nachweis der Dichtheit der Schweißnähte ist jeder Brennstab im Anschluß an die letzte Schweißung einem Helium-Dichtheitstest unter äußerem Vakuum zu unterziehen. Die Leckrate soll kleiner als 10^{-8} Torr-liter/sec sein.
- Röntgen-Prüfung: Alle Schweißnähte werden einer Röntgenprüfung unterzogen. Von jedem Stabende werden 2 Aufnahmen (um 90° verdreht) senkrecht zur Stabachse angefertigt. An den Schweißnähten dürfen keinerlei Fehler erkennbar sein.
Desweiteren ist über die gesamte Brennstablänge ein Röntgenbild anzufertigen, aus dem die Lage der Innenteile, insbesondere auch die vorgespannte Länge der Schraubenfeder, eindeutig hervorgeht. Die Ergebnisse sind zu protokollieren.
- Kontamination: Die Oberflächenkontamination darf nicht mehr betragen als
$$22 \alpha\text{-Zerfälle pro cm}^2 \text{ und Minute}$$
Diese Kontamination ist als obere Grenze für haftende Verunreinigungen zu betrachten. Der Wischtest dagegen soll keine Kontamination zeigen.

4. Herstellung der Prüflinge

4.1 Ausgangspulver für die Brennstoffherstellung

Zur Verarbeitung zu Tablettenbrennstoff standen als oxidisches Ausgangspulver folgende Produkte zur Verfügung:

- UO_2 mit Natururan, ADU-gefällt, von Fa. NUKEM
- PuO_2 mit nominell 8,3 % Pu-240, aus verschiedenen Chargen der Lieferung der U.S.A.E.C.

Zur Herstellung des Tablettenbrennstoffes wurde das UO_2 unter Argon-5 %-Wasserstoffgemisch bei 1250 °C und das PuO_2 unter Kohlendioxid bei 1100 °C je 2 Stunden lang geglüht, um die Sinteraktivität dieses Pulver zu reduzieren. Zur Herstellung des Vibrierbrennstoffes wurde das Pulver im Anlieferungszustand belassen. In Tabelle II sind die Isotopenzusammensetzungen und die maximale Teilchengröße angegeben.

Tabelle II: Kenndaten der Ausgangspulver

		Meßergebnisse (Gew.-%) von	
		Hanford/U.S.A.	Karlsruhe
Charge CO-25-10-3	Pu-239	90,940	90,974
	Pu-240	8,154	8,167
	Pu-241	0,868	0,819
	Pu-242	0,038	0,040
Charge CO-25-10-23	Pu-239	90,844	90,899
	Pu-240	8,238	8,209
	Pu-241	0,877	0,852
	Pu-242	0,041	0,040
Charge CO-26-6-2	Pu-239	90,961	90,997
	Pu-240	8,199	8,161
	Pu-241	0,802	0,802
	Pu-242	0,038	0,040
Charge CO-26-6-8	Pu-239	90,845	90,850
	Pu-240	8,301	8,240
	Pu-241	0,813	0,867
	Pu-242	0,040	0,044
Maximale Teilchen- größe (mm)		UO_2 PuO_2	< 0,063 < 0,032

4.2 Tablettenherstellung

In zwei Mischansätzen wurden abgewogene UO_2 - bzw. PuO_2 -Mengen mechanisch in einem Schaufelmischer trocken gemischt. Die Homogenität und das Verhältnis Pu/U+Pu wurde durch chemische Analyse kontrolliert. Diese Mischungen wurden mit Polyvenylalkohol und Stearinsäure zu preßbaren Granulaten verarbeitet. Da Tablettenhöhe, Tablettendurchmesser und das Volumen der einseitigen bzw. beidseitigen Stirnflächeneinsenkung durch Maßsintern eingestellt werden mußte, wurde mit Vorversuchen die günstigste Preßdichte und der Schrumpfungsgrad von Höhen und Durchmessern bestimmt. Mit den so gewonnenen Daten wurde das Granulat auf einer mechanischen Presse mit 2 to/cm^2 Druck verpreßt. Mit Hilfe eines entsprechend geformten Oberstempels bzw. einer Ober- und Unterstempelkombination wurde die einseitige bzw. beidseitige Stirnflächeneinsenkung dabei in die Preßkörper eingepreßt.

Eine stichprobenweise Prüfung der Preßlinge hinsichtlich der Dimensionen und ihrer Gewichte schloß sich an. Danach wurde das Gleit- und Bindemittel durch Erhitzen der Preßlinge unter Kohlendioxid entfernt. Die Tabletten mit 94 % th.D. aus dem 1. Mischansatz wurden unter Stickstoff-8 %-Wasserstoff bei 1450°C , die Tabletten mit 84 % th. D. aus dem 2. Mischansatz bei 1580°C unter Argon-5 %-Wasserstoff gesintert. Die Sinterzeit war jeweils 2 Stunden.

Die Isoliertabletten aus UO_2 mit Natururan waren nach einem Verfahren ähnlich dem beschriebenen hergestellt worden.

4.3 Herstellung des Vibrierbrennstoffes

Das gewählte Herstellungsverfahren geht von Pulvern mit hoher Sinteraktivität aus. Diese wurden granuliert, zu Preßlingen hoher Dichte gepreßt und in grobe Fraktionen gebrochen. Aus dem Brechgut wurden dann die Fraktionen ausgesiebt, die nach einem Rundungsprozeß bzw. dem anschließenden Entwachsen und Sintern bei 1700°C in Argon-5 %-Wasserstoff hauptsächlich in die folgenden vier Teilchengrößenbereiche fielen:

Fraktion	Teilchengröße
I	1,25 - 1,50 mm
II	0,8 - 1,0 mm
III	0,1 - 0,2 mm
IV	< 0,06 mm

Mit dem zweistündigen Sinterprozeß bei 1700 °C wurde eine möglichst hohe Sinterdichte der Brennstoffpartikel angestrebt.

4.4 Brennstoffeigenschaften

Aus den Tablettenmengen jeder Dichte und aus den Fraktionen des Vibrierbrennstoffes wurden Proben entnommen und mit diesen chemische Analysen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Tabelle III zusammengefaßt. Die Abb. 2 zeigt Autoradiographien, die die hinreichende Homogenität der Brennstofftabletten und der Vibrierbrennstoffpartikel nachweisen. Die Abb. 3 ist eine Aufnahme von Brennstofftabletten, deren Kantenbeschaffenheit von typischer Qualität ist.

4.5 Hüll- und Strukturmaterial

Zur Herstellung der Stabumhüllung wurde Rohr- und Stabmaterial aus austenitischem Edelstahl X8CrNiMoVNb1613, Werkstoff-Nr. 1.4988 bereitgestellt. Die Nennabmessungen dieses Halbzeuges waren:

- bei den Rohren Durchmesser 6,0 mm, Wandstärke 0,38 mm
- beim Stabmaterial Knüppeldurchmesser ca. 10 mm .

4.6 Hüllrohrprüfung

Die Prüfung der Rohre führte die Fa. NUKEM aus. Zur weiteren Verwendung wurden die Rohre Nr. 1, 3 und 4 aufgrund der Angaben im NUKEM-Prüfzeugnis Nr. 944/275/68 vom 26.4.1968 ausgewählt.

Querfehler, Längsfehler und Wandstärke wurden mit Ultraschall ermittelt. Der Innendurchmesser wurde mit einem pneumatischen Verfahren, der Außendurchmesser kontinuierlich mit einem mechanischen Taster gemessen.

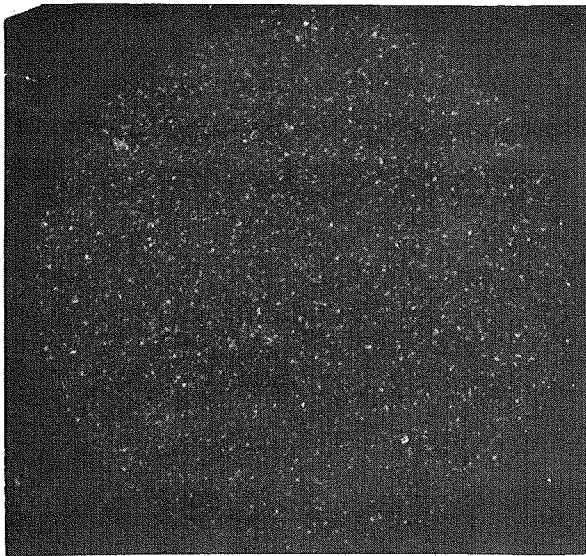
Tabelle III: Brennstoffanalysen

Materialtyp	Tabletten mit 90 % th.D.	Tabletten mit 84 % th.D.	Vibrier- brennstoff
$\frac{\text{Pu}}{\text{U} + \text{Pu}}$			
1. Analyse	19,94	20,22	+))
2. " "	19,85	-	+))
Chemische Verunreinigungen	(ppm)	(ppm)	(ppm)
C	22	109	50
Ca	130	55	40
Mg	20	10	50
Cl	66	< 5	66
F	8	10	10
Ag	5	- ++)	< 1
B	1,2	< 1	4
Cd	5,0	< 1	< 1
Co	-	-	-
Cr	20	30	40
Cu	3	< 5	< 5
Fe	60	155	160
Mn	10	15	5
Mo	40	60	< 10
Ni	20	45	40
Pb	< 1	< 5	< 10
V	4	< 10	< 10
W	-	-	-
Zn	< 5	< 10	30
O/Me-Verhältnis	1,98 - 1,99 +++)		

- +) Kein geeignetes Analysenmaterial
 ++) Nicht analysiert
 +++) Angabe auf Grund späterer Messungen

Tabelle IV: Hüllrohre und Prüfungsergebnisse

Hüllrohr-Nummer nach Prüfzeugnis 944/275/68	1	3	4
Querfehleranzeige (μ)	o.B.	ca. 25	o.B
Längsfehleranzeige (μ)	o.B.	ca. 20	ca. 10
Wandstärke (mm)	0,350 - 0,380	0,350 - 0,390	0,350 - 0,370
Innendurchmesser (mm)	5,225 - 5,235	5,220 - 5,260	5,230 - 5,235
Außendurchmesser (mm)	5,975 - 6,000	5,975 - 6,025	5,975 - 5,990

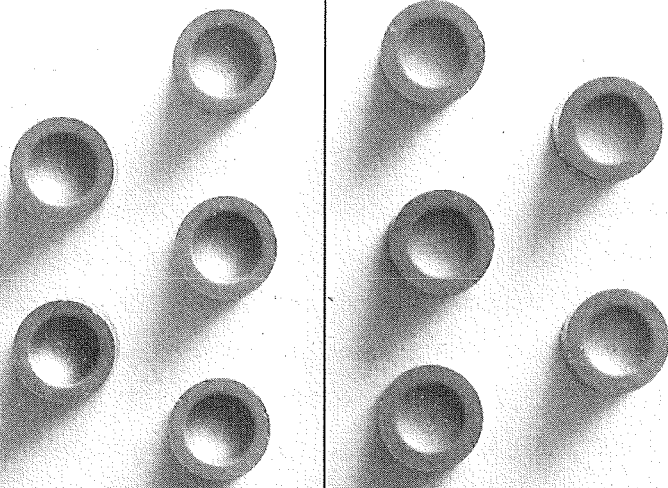


90 % Nenndichte (1. Mischungsansatz)



84 % Nenndichte (2. Mischungsansatz)

Abb. 2 Alpha-Autoradiographien einer Tablette



Einseitige Einsenkung
3 Vol.-%

Beidseitige Einsenkung
2 x 1,5 Vol.-%

Abb. 3 Brennstofftabletten mit Stirnflächeneinsenkung

Als Eichfehler für die Quer- und Längsfehlerprüfung dienten Testriefen, auf Rohrstücke außen und innen angebracht. Die Riefentiefe für den Querfehler außen war 28μ , für den Querfehler innen 19μ . Für den Längsfehler außen betrug die Riefentiefe 32μ , für den Längsfehler innen 37μ .

Zur Eichung von Wandstärke und Außendurchmesser dienten genau vermessene Testrohrstücke. Das Normal für die Wandstärke hatte (in 2 Stufen) Abmessungen von $0,35$ bzw. $0,41$ mm. Das Außendurchmessernormal hatte die Maße $5,97$ bzw. $6,03$ mm.

Die wichtigsten Ergebnisse für diese drei Rohre sind in Tabelle IV zusammengefaßt.

4.7 Stabherstellung

4.7.1 Stabprüflinge mit Tablettenbrennstoff

Die Prüflinge mit Tablettenbrennstoff enthalten 13 Brennstofftabletten sowie an den Enden der Brennstoffsäule je eine UO_2 -Isolier-tablette. Jede Tablette wurde einzeln vermessen hinsichtlich Gewicht und Dimension. Alle diese Ergebnisse sind in Datenlisten zusammengefaßt [7]. Die Prüflinge 4b/1 bis 4b/12 enthalten Tabletten mit 90 % th.D., die Prüflinge 4b/13 bis 4b/28 Tabletten mit 84 % th.D. (bei der angegebenen Dichte handelt es sich um die geometrische Dichte, vergl. 3.2). In den ersten sechs Prüflingen jeder Serie sind die Tabletten mit einseitiger Stirnflächeneinsenkung, in die restlichen Prüflinge wurden die Tabletten mit beidseitiger Stirnflächeneinsenkung eingebaut. Die Zusammenfassung der Materialwerte aller Prüflinge bringen die Tabellen V und VI. Diese Angaben werden dort noch durch die Bezifferung der verwendeten Hüllrohrabschnitte ergänzt.

Die Tablettensäulen wurden durch eine Kappe, die das offene Rohrende vor Kontamination schützte, in das Hüllrohr eingeschoben, nachdem zuvor der untere Endstopfen unter Helium-Schutzgas eingeschweißt worden war. Danach wurde die Kappe abgenommen, der Metalleinsatz mit dem Sinterfilter und die Haltefeder eingeführt, der Prüfling mit Helium gefüllt und unverzüglich mit dem oberen Endstopfen verschlossen. Nach sorgfältiger optischer Kontrolle des Stopfensitzes wurde dieser unter Helium mit dem Hüllrohr verschweißt. Der obere Endstopfen trug jeweils die Bezifferung des Prüflings.

Tabelle V Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nenndichte 90 % th.D.

Prüfling Nr.	Hüllrohr Nr./Abschnitt	13 Brennstofftabletten				2 Isoliertabletten		
		Gewicht (g)	Höhe ¹⁾ (mm)	Geom.Dichte ²⁾ (% th.D.)	Pu-Menge ³⁾ (g)	Gewicht (g)	Höhe ¹⁾ (mm)	Dichte ²⁾ (% th.D.)
4B-1	1/5	15,870	79,11	90,04	2,799	2,089	9,77	96,30
4B-2	1/8	15,924	79,21	90,00	2,809	2,089	9,78	96,38
4B-3	1/10	15,893	79,23	89,59	2,804	2,097	9,80	95,95
4B-4	1/12	15,935	79,24	89,68	2,811	2,104	9,81	96,05
4B-5	1/13	15,942	79,26	89,57	2,812	2,086	9,79	95,75
4B-6	1/14	15,925	79,30	89,27	2,809	2,102	9,79	96,03
4B-7	1/15	16,029	79,18	89,85	2,828	2,096	9,78	95,95
4B-8	1/20	16,095	79,35	89,68	2,839	2,099	9,79	96,00
4B-9	1/24	16,065	79,26	89,53	2,834	2,102	9,80	95,80
4B-10	3/1	16,042	79,26	89,26	2,830	2,092	9,76	95,10
4B-11	3/2	16,189	79,64	89,34	2,856	2,095	9,77	95,70
4B-12	3/3	16,245	79,52	89,53	2,866	2,089	9,76	95,95

- Anmerkungen: 1) Die Höhenangaben sind durch Addition der Einzelhöhen der Tabletten ermittelt.
 2) Die Dichtewerte sind arithmetische Mittel der Einzeldichten.
 3) berechnet für den nominellen PuO₂-Anteil von 20,0 Gew.%

Prüflinge 4B-7 bis 4B-12 haben einseitige Stirnflächeneinsenkung,
 Prüflinge 4B-1 bis 4B-6 haben beidseitige Stirnflächeneinsenkung

Tabelle VI Materialwerte für die Tabletten-Prüflinge, Nennichte 84 % th.D.

Prüfling Nr.	Hüllrohr Nr./Abschnitt	13 Brennstofftabletten				2 Isolierttabletten		
		Gewicht (g)	Höhe ¹⁾ (mm)	Geom.Dichte ²⁾ (% th.D.)	Pu-Menge ³⁾ (g)	Gewicht (g)	Höhe ¹⁾ (mm)	Dichte ²⁾ (% th.D.)
4B-13	3/4	15,204	80,13	83,40	2,682	2,091	9,82	94,83
4B-14	3/6	15,171	79,85	84,12	2,676	2,088	9,80	94,95
4B-15	3/7	15,212	79,93	84,31	2,683	2,095	9,81	95,00
4B-16	3/16	15,154	79,81	84,37	2,673	2,097	9,82	95,55
4B-17	3/19	15,254	79,89	84,66	2,691	2,089	9,80	95,00
4B-18	3/21	15,288	80,04	84,59	2,697	2,090	9,82	94,80
4B-19	3/23	15,208	79,71	84,24	2,683	2,092	9,81	95,10
4B-20	3/22	15,365	80,17	84,23	2,710	2,083	9,78	95,20
4B-21	4/1	15,359	80,25	84,04	2,709	2,085	9,84	94,45
4B-22	4/2	15,347	80,18	84,20	2,707	2,090	9,80	95,05
4B-23	4/3	15,256	79,80	84,57	2,691	2,094	9,88	94,33
4B-24	4/4	15,219	79,75	84,34	2,685	2,087	9,88	94,38

- Anmerkungen:
- 1) Die Höhenangaben sind durch Addition der Einzelhöhen der Tabletten ermittelt.
 - 2) Die Dichtewerte sind arithmetische Mittel der Einzeldichten.
 - 3) berechnet für den nominellen PuO₂-Anteil von 20,0 Gew.%

Prüflinge 4B-13 bis 4B-18 haben einseitige Stirnflächeneinsenkung,
 Prüflinge 4B-19 bis 4B-24 haben beidseitige Stirnflächeneinsenkung

4.7.2 Prüflinge mit Pulverbrennstoff

Um eine 80 mm lange Brennstoffsäule mit 80 % th.D. (geometrische Dichte) zu erhalten, mußte in jedes Hüllrohr ca. 15,3 g Pulverbrennstoff einvibriert werden. Das Einvibrieren selbst geschah mit einem elektrodynamischen Vibrator unter Vakuum (Frequenz 400 bis 2000 Hz; Beschleunigung max. 50 g ; Vibrationszeit 3 min). Nach dem Vibrieren wurden die Prüflinge mit Helium geflutet und die Federn und obere Endstopfen eingesetzt. Das Einschweißen erfolgte mit Hilfe des Elektronenschweißverfahrens im Hochvakuum. Daher war ein abschließender Druckausgleich mit Helium erforderlich. Dazu diente eine kleine seitliche Bohrung im oberen Endstopfen, die dann nach dem Argonarc-Verfahren verschlossen wurde.

Die Einzelangaben zu den Prüflingen mit Vibrierbrennstoff finden sich in Tabelle VII.

4.8 Stabprüfungen

4.8.1 Dichtheitsprüfung und Schweißnahtkontrolle

Alle Prüflinge wurden mit Hilfe des Helium-Lecktests auf Dichtheit geprüft und die Schweißnähte der Röntgendurchstrahlung unterzogen. Die Prüfberichte Nr. 196/68, 231/68 und 70/69 weisen die Dichtheit der verschlossenen Brennstäbe nach. Die Schweißnahtqualität an den unteren und oberen Endstopfen war einwandfrei. Die Prüfprotokolle RÖ 63/68, RÖ 66/68 und RÖ 75/68 enthalten die Angaben zur Prüfung der unteren Endstopfen, die Prüfprotokolle RÖ 78/68, RÖ 96/68 und RÖ 47/69 die Angaben zur Prüfung der oberen Endstopfen [7].

4.8.2 Kontaminationsprüfung

Bei der Prüfung auf Kontaminationsfreiheit war zwischen abwischbarer und an der Staboberfläche fixierter Aktivität zu unterscheiden. Abwischbare Aktivität konnte bei keinem Prüfling festgestellt werden. Mit Ausnahme der Prüflinge 4b/8, 4b/9 und 4b/10 lag die fixierte Aktivität unter dem Grenzwert von 22 Zerfällen/min \cdot cm². Die Menge des an den genannten Prüflingen punktförmig fixierten radioaktiven Materials war jedoch ohne Bedeutung.

Tabelle VII: Materialwerte für die Prüflinge mit Vibrierbrennstoff, Nenndichte 80 % th.D.

Prüfling Nr.	Hüllrohr Nr./Abschnitt	Brennstoffgewicht (g)	Brennstoffhöhe (mm)	Schmierdichte (% th.D.)	Pu-Menge ^{*)} (g)	Zusammensetzung des Pulver- brennstoffes nach Teilchengrößen	
						Fraktion	Anteil
4B-25	3/10	15,258	78,5	81,46	2,692		
4B-26	3/11	15,286	78,0	82,14	2,696		
4B-27	3/8	15,275	79,0	81,03	2,695	I	40 %
4B-28	3/9	15,249	79,0	80,90	2,690		
4B-29	1/17	15,250	79,5	80,39	2,690		
4B-30	4/6	15,259	79,5	80,44	2,692	II	20 %
4B-31	4/7	15,262	78,5	81,48	2,692		
4B-32	4/8	15,263	79,0	80,97	2,692	III	25 %
4B-33	4/9	15,273	80,0	80,01	2,694		
4B-34	4/10	15,265	80,0	79,97	2,693	IV	15 %
4B-35	4/11	15,271	79,0	81,01	2,694		

^{*)} berechnet für den nominellen PuO₂-Anteil von 20,0 Gew-%

4.8.3 Innere Abmessungen

Im Rahmen der abschließenden Prüfungen wurden die Prüflinge auch in ihrer ganzen Länge geröntgt. Die Abb. 4, 5 und 6 zeigen diese Röntgenaufnahmen. In Tabelle VIII sind die daraus entnommenen Werte für die Länge der Tablettensäule (mit Isoliertabletten) den berechneten Werten gegenübergestellt. Beim Einfüllen der Tabletten ergab sich ein zusätzlicher Längenbedarf von 0,6 bis 1,2 mm. In Tabelle IX sind die Längenwerte für die einvibrierten Brennstoffsäulen zusammengefaßt. Zwischen den gemessenen Längenwerten und den Werten aus den Röntgenaufnahmen ergaben sich nur Differenzen von einigen zehntel Millimetern, die hauptsächlich auf die Meßgenauigkeiten zurückzuführen sind.

4.8.4 Äußere Abmessungen

Die Prüflinge wurden abschließend vollständig vermessen. Es wurde u.a. die Gesamtlänge, der Durchmesser an mehreren Stellen und der Rundlauf bestimmt. Die Ergebnisse sind in den Prüfberichten Nr. 188/68, 220/68 und Nr. 75/69 zusammengestellt [7]. Es ergaben sich nur wenige Überschreitungen der zulässigen Toleranzen. Zum Vergleich mit entsprechenden Messungen bei der Nachbestrahlungsuntersuchung sind die Meßwerte der Durchmesser- und Rundlaufprüfungen in Tabelle X zusammengefaßt. Die schematische Darstellung des Prüflings gibt die Meßposition an.

5. Bestrahlungseinrichtung

5.1 Versuchseinsatz

Die Bestrahlung der Prüflinge wird in den bereits erprobten Doppelkapseln des Typs 4a [8, 9] durchgeführt, wobei infolge der geforderten höheren Hülloberflächentemperaturen das Kühlmittel Natrium durch die eutektische Mischung NaK ersetzt wird ($\lambda_{\text{Na}}, 400^{\circ}\text{C} = 0,722 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$, $\lambda_{\text{NaK}}, 400^{\circ}\text{C} = 0,262 \text{ W/cm}^{\circ}\text{C}$). Im Inneren der Kapsel befindet sich der Prüfling in einer dicht verschlossenen Edelstahlkapsel, welche mit dem Kühlmittel gefüllt ist. Der Radialspalt

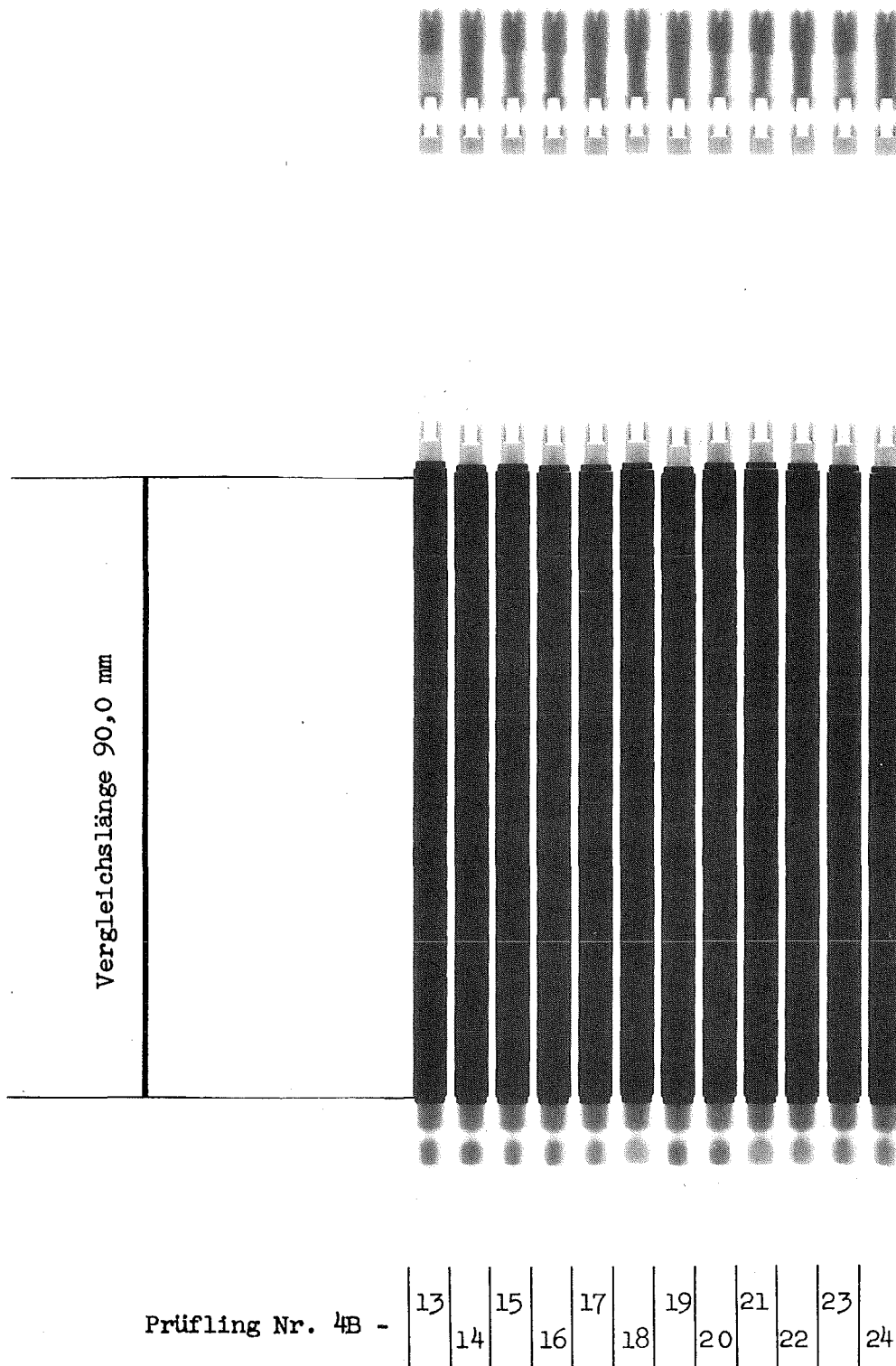
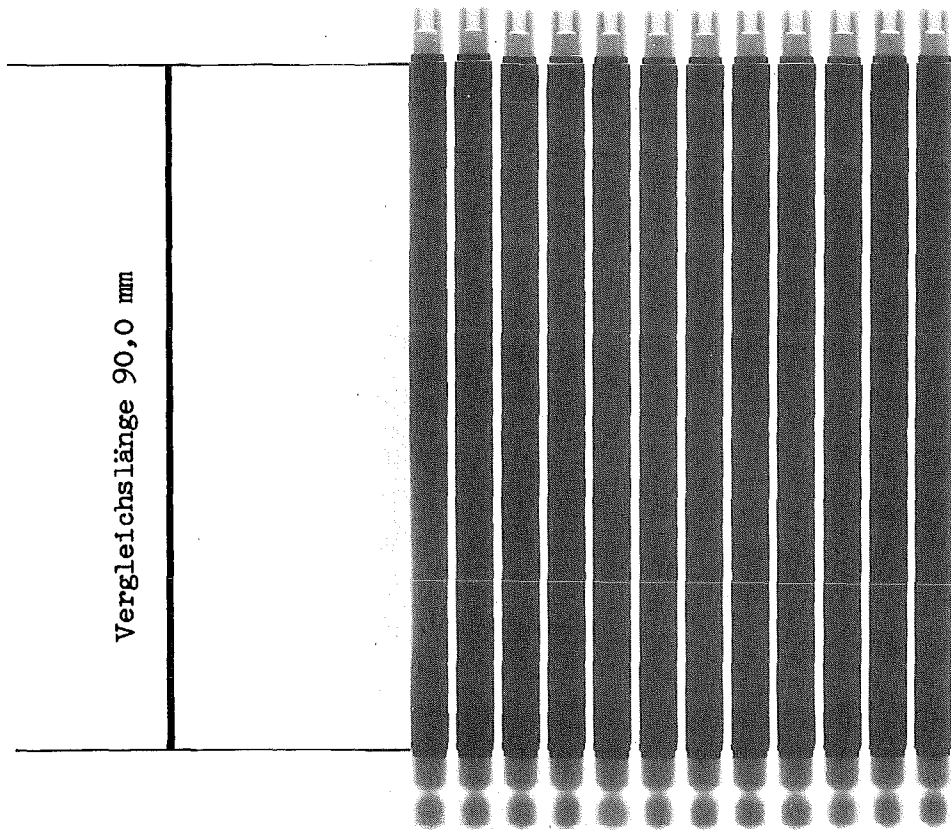
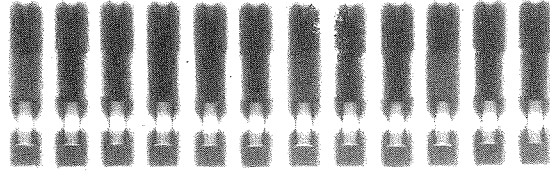


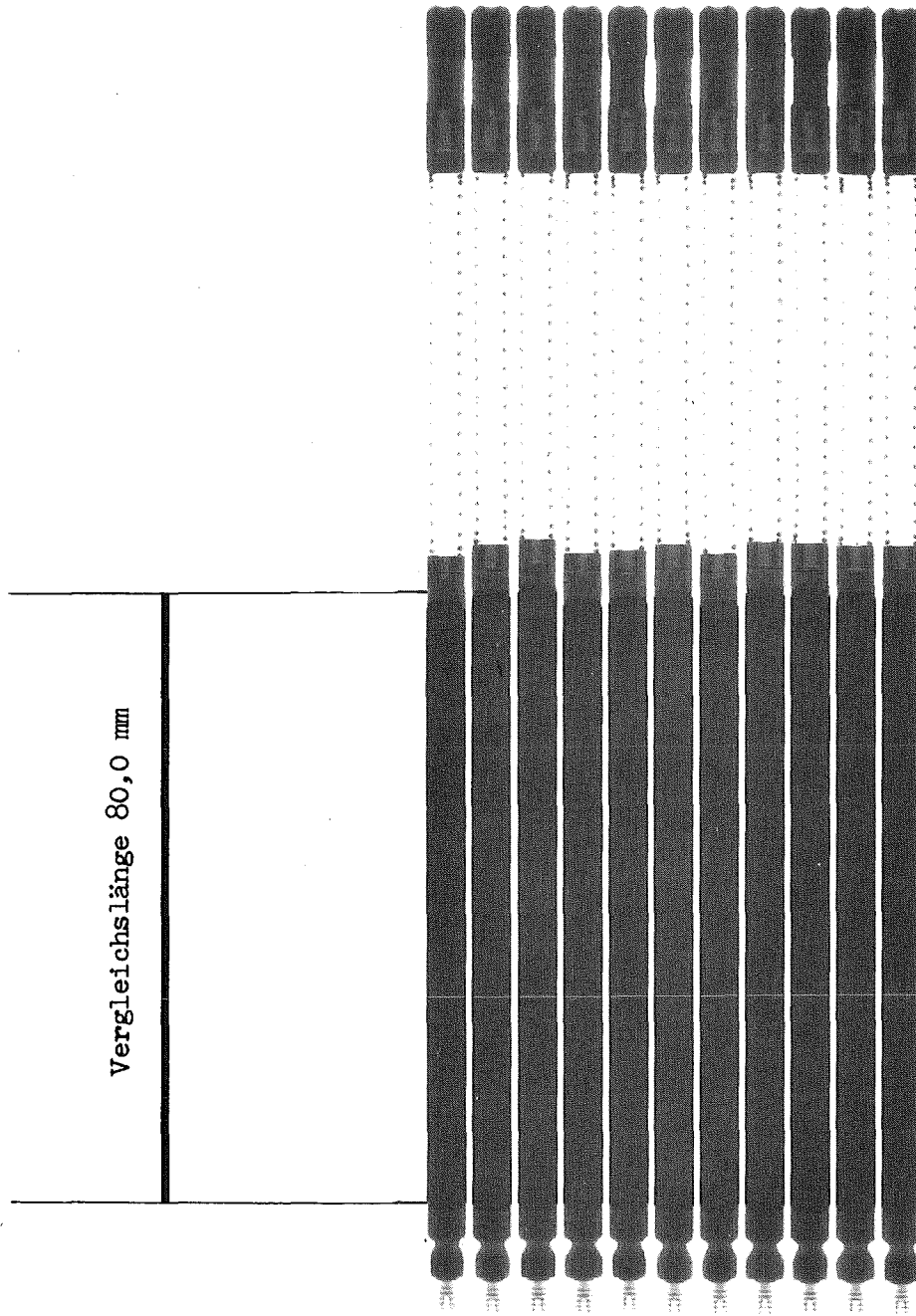
Abb. 4 Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen Nr. 4B-13 bis 4B-24



Prüfling Nr. 4B -

12	10	8	6	4	2
11	9	7	5	3	1

Abb. 5 Röntgen-Aufnahme der Tablettensäulen in den Prüflingen Nr. 4B-1 bis 4B-12



Prüfling Nr. 4B -

26	33	35	31	32	28
27	25	29	34	30	

Abb. 6 Röntgen-Aufnahme der einvibrierten Prüflinge

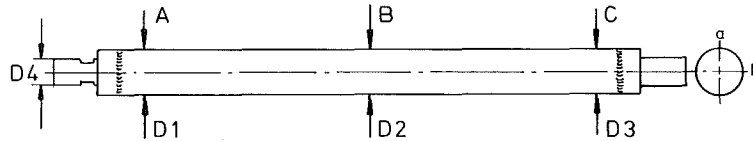
Tabelle VIII: Länge der Tablettensäulen

Prüfling Nr.	Summe der Tablettenhöhen Brennstoff + Isolierung (mm)	Röntgenaufnahmen Brennstoff + Isolierung (mm)
4B-1	88,87	89,9
4B-2	88,99	90,0
4B-3	89,02	90,1
4B-4	89,05	90,1
4B-5	89,05	90,2
4B-6	89,09	89,9
4B-7	88,96	89,8
4B-8	89,14	90,1
4B-9	89,06	90,0
4B-10	89,02	89,8
4B-11	89,41	90,4
4B-12	89,28	90,2
4B-13	89,95	90,7
4B-14	89,64	90,4
4B-15	89,74	90,5
4B-16	89,63	90,3
4B-17	89,69	90,5
4B-18	89,86	90,6
4B-19	89,52	90,3
4B-20	89,95	90,6
4B-21	90,09	90,7
4B-22	89,98	90,6
4B-23	89,68	90,4
4B-24	89,63	90,5

Tabelle IX: Länge der Vibrierpulversäulen

Prüfling- Nr.	Gemessene Längen (mm)	Röntgenaufnahmen (mm)
4B-25	78,5	78,4
4B-26	78,0	78,0
4B-27	79,0	79,7
4B-28	79,0	79,7
4B-29	79,5	79,8
4B-30	79,5	79,6
4B-31	78,5	78,4
4B-32	79,0	79,8
4B-33	80,0	80,3
4B-34	80,0	79,9
4B-35	79,0	78,9

Tabelle X : Stabvermessung
vor der Bestrahlung



Prüflings- bezeichnung	Meß- position	Durchmesser (mm)				Rundlauf (mm)		
		1	2	3	4	A	B	C
4 B 27	a	6,014	6,018	6,012	5,995	0,05	0,12	0,06
	b	6,010	6,019	6,010	5,996			
4 B 26	a	6,011	6,016	6,005	5,997	0,12	0,07	0,05
	b	6,010	6,015	6,006	5,997			
4 B 25	a	6,015	6,015	6,010	6,002	0,08	0,22	0,29
	b	6,018	6,015	6,012	6,004			
4 B 34	a	6,013	6,018	6,009	5,972	0,13	0,10	0,08
	b	6,008	6,021	6,009	5,974			
4 B 32	a	6,013	6,016	6,010	5,991	0,07	0,04	0,03
	b	6,015	6,014	6,013	5,992			
4 B 30	a	6,012	6,014	6,008	6,000	0,07	0,01	0,06
	b	6,016	6,016	6,008	5,994			
4 B 35	a	6,010	6,017	6,012	6,007	0,14	0,09	0,03
	b	6,010	6,016	6,010	6,004			
4 B 33	a	6,012	6,017	6,006	5,995	0,10	0,09	0,04
	b	6,012	6,016	6,016	6,002			
4 B 31	a	6,017	6,014	6,012	5,997	0,14	0,09	0,09
	b	6,016	6,012	6,000	5,999			
4 B 29	a	6,008	6,016	6,013	6,000	0,18	0,23	0,00
	b	6,017	6,014	6,010	6,000			
4 B 28	a	6,010	6,016	6,010	6,000	0,16	0,11	0,08
	b	6,010	6,014	6,010	5,994			
4 B 4	a	5,936	5,978	5,992	6,014	0,07	0,27	0,01
	b	5,992	5,981	5,995	6,014			
4 B 3	a	5,995	5,987	5,990	6,036	0,07	0,02	0,07
	b	5,998	5,985	5,993	6,039			
4 B 2	a	5,994	5,983	5,990	6,019	0,09	0,02	0,07
	b	5,995	5,983	5,993	6,017			
4 B 1	a	5,990	5,983	5,991	6,030	0,10	0,02	0,02
	b	5,989	5,980	5,984	6,030			
4 B 9	a	5,994	5,975	5,992	6,022	0,07	0,14	0,04
	b	5,998	5,979	5,992	6,024			
4 B 8	a	5,986	5,978	5,982	6,012	0,02	0,09	0,11
	b	5,985	5,979	5,986	6,014			
4 B 7	a	5,984	5,980	5,990	6,008	0,14	0,26	0,02
	b	5,984	5,979	5,988	6,011			
4 B 5	a	5,995	5,982	5,994	6,012	0,10	0,03	0,01
	b	5,995	5,982	6,002	6,016			
4 B 11	a	5,999	5,978	5,994	6,005	0,08	0,09	0,03
	b	5,996	5,978	5,996	6,009			
4 B 12	a	5,989	5,973	5,987	6,029	0,13	0,13	0,01
	b	5,984	5,974	5,981	6,029			
4 B 10	a	5,988	5,980	5,993	6,013	0,11	0,04	0,05
	b	5,996	5,979	5,993	6,015			
4 B 6	a	5,994	5,984	5,997	6,004	0,06	0,03	0,02
	b	5,995	5,984	5,990	6,010			
4 B 15		5,98		5,99	6,01	0,08	0,06	0,06
4 B 14		5,98		5,99	6,01	0,06	0,02	0,06
4 B 13		5,98		5,99	6,02	0,03	0,02	0,00
4 B 18		5,98		5,99	6,01	0,12	0,13	0,06
4 B 17		5,98		5,99	6,015	0,06	0,09	0,10
4 B 16		5,98		5,99	6,01	0,04	0,04	0,08
4 B 21		5,99		6,01	6,01	0,09	0,07	0,04
4 B 20		5,98		5,99	6,015	0,08	0,12	0,03
4 B 19		5,98		5,99	6,01	0,05	0,03	0,05
4 B 24		5,995		6,005	6,015	0,10	0,06	0,05
4 B 23		5,99		6,01	6,02	0,12	0,14	0,06
4 B 22		6,00		6,01	6,03	0,03	0,05	0,09

zwischen Hülloberfläche und dem Edelstahlrohr beträgt 6 mm. In diesen Spalt werden sogenannte Antikonvektionsrohre eingeführt, welche eine Erhöhung des Temperatursprungs in diesem Spalt und damit der Hülloberflächentemperatur bewirken. In der ersten Kapselserie der Versuchsgruppe wurde ein Rohr, in der zweiten Serie zwei dieser Antikonvektionsrohre eingesetzt, welches einer Temperaturerhöhung um ca. 50 ° entspricht (vgl. Kap. 6.2).

Der weitere Aufbau der Kapsel sowie der Temperaturverlauf ist aus den Abb. 7 und 8 ersichtlich.

5.2 Bestrahlung im FR 2

Die Kapselversuchseinsätze (KVE), welche bis zu vier Prüflingen aufnehmen können, wurden im FR 2 auf normalen Brennelement- sowie Isotopenkanal-Positionen bestrahlt. (Tabelle XI).

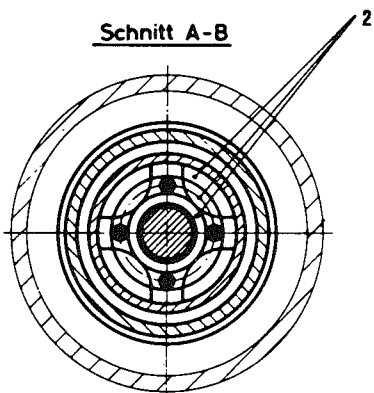
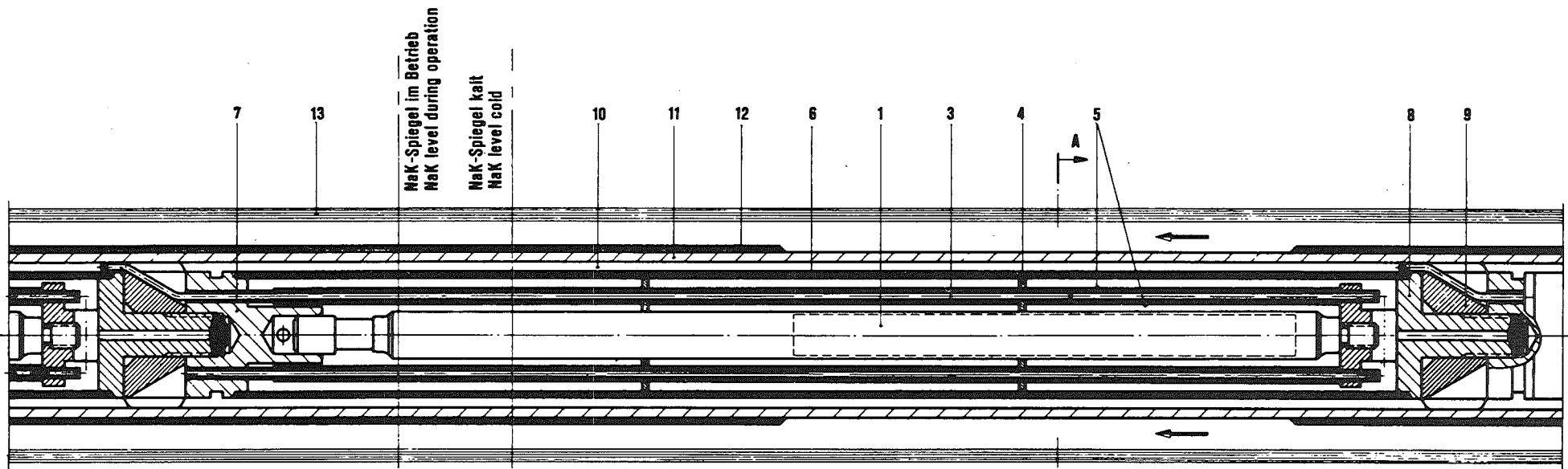
Die Bestrahlungszeiten lagen je nach Zielabbrand zwischen 46 und 637 Tagen (Vollastäquivalent).

Aus der in Tabelle XI enthaltenen Positionskarte des FR 2-Cores sind die Bestrahlungspositionen der einzelnen Kapselversuchseinsätze je Reaktorzyklus ersichtlich.

6. Ablauf der Bestrahlung

6.1 Reaktorzyklen und Neutronenfluß

Die Bestrahlung der insgesamt 35 Brennstabprüflinge in 11 Kapselversuchseinsätzen (KVE) begann mit KVE 42 am 16.9.1968 in Zyklus I/68 und endete mit dem Ausbau der KVE's 49 und 58 am 14.6.1971 nach Zyklus D/71. Die Bestrahlung mußte bei den KVE's 42 bis 45 frühzeitig abgebrochen werden, da infolge überhöhter Temperaturen Stabdefekte vermutet wurden. Bei der Kapseldemontage stellte es sich heraus, daß lediglich zwei Prüflinge in KVE 43 defekt waren (vergl. Kap. 7): Infolge eines starken Hochwachsens der vibrierten Brennstoffsäule unter die Wärmedämmung (Abb. 7, Kapselausschnitt) kam es zu starker Überhitzung und einem Durchschmelzen der Prüflinge. Bei den



- 1 Brennstabprüfling mit Spaltgasplenum
- 2 NaK-Spalte
- 3 Tauchrohr mit Thermoelement 1mm ϕ
- 4 Zentrierplatte
- 5 Zwischenrohre 0,1mm dick
- 6 Edelstahlkapsel 20 mm ϕ ×1 mm Wand
- 7 Endstopfen
- 8 NaK-Einfüllstopfen
- 9 Zwischenstück
- 10 PbBi-Spalt 1,5 mm dick
- 11 Zirkaloy-2-Kapsel 26 mm ϕ ×1,5 mm Wand
- 12 Wärmedämmrohr
- 13 Wasserführungsrohr 40 mm ϕ ×2 mm Wand

- 1 Fuel pin specimen with fission gas plenum
- 2 NaK annular space
- 3 Immersion tube with thermocouple 1 mm dia.
- 4 Centering plate
- 5 Intermediate tube 0,1 mm thick
- 6 Stainless steel capsule 20 mm dia.×1 mm thick
- 7 End plugs
- 8 NaK filling plug
- 9 Intermediate piece
- 10 PbBi annular space 1,5 mm wide
- 11 Zircaloy-2 capsule 26 mm dia.×1,5 mm thick
- 12 Thermal insulation tube
- 13 Water inlet tube 40 mm dia.×2 mm thick

Abb. 7 Ausschnitt aus der NaK/PbBi-Doppelkapsel

Abb. 8 Temperaturverlauf innerhalb der Bestrahlungskapsel bei 550 W/cm Stableistung

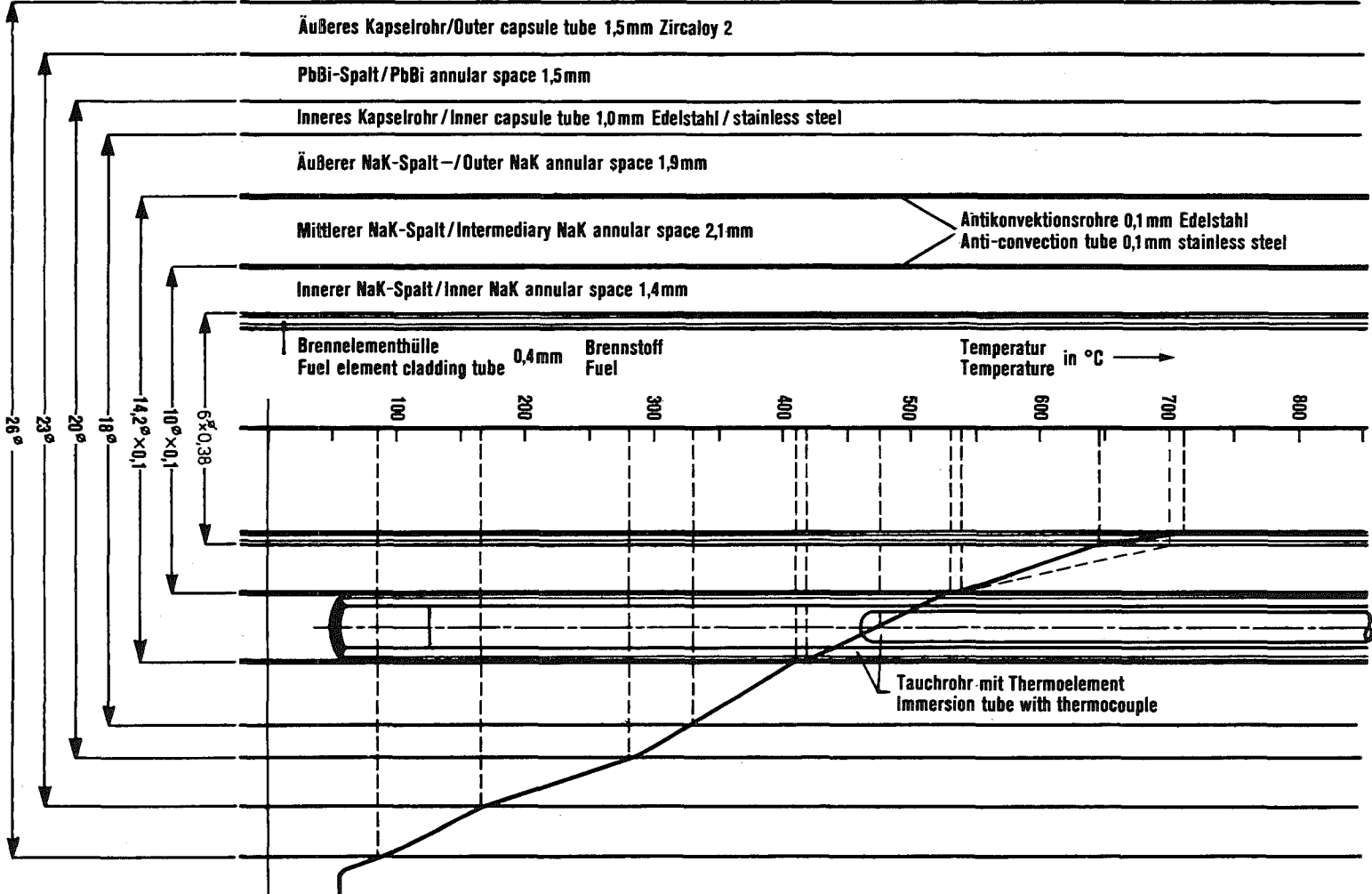
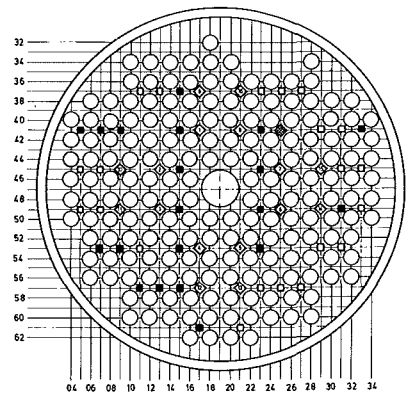


Tabelle XI : Bestrahlungsablauf der Kapselversuchseinsätze der Versuchsgruppe 4b
(Bestrahlungspositionen im FR 2-Core)

1968				1969										1970										1971			
Zyklus	I	K	L	A	B	C	D	E	G	H	I	K	L	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	A	B	C	D
Volllast- tage	29,7	30,0	37,9	29,5	29,8	29,7	30,9	29,2	24,2	36,3	24,5	28,0	22,6	28,8	19,9	29,9	32,9	29,2	29,4	29,7	29,5	27,7	15,0	29,8	25,1	29,7	27,5
KVE- SS Nr. A	1-1	0-3	-1	2-0	2-2	1-2	1-1	6-2	0-4	1-3	2-1	1-6	1-1	4-1	2-0	3-0	2-3	2-0	2-1	0-1	1-0	3-0	0-2	4-0	1-1	0-2	0-0
4 2	49	45	37	40																							
	33	31	13	22																							
4 3	-	61	40																								
	-	21	22																								
4 4	-	49	49	49	36																						
	-	33	33	33	20																						
4 5	-	-	45	44																							
	-	-	31	26																							
4 7	-	-	-	45	45	49	49	49	49	49	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	50
	-	-	-	31	31	33	33	33	33	33	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	22
4 8	-	-	-	45	45	45	45	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	-	-	-	5	5	5	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
4 9	-	-	-	49	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
	-	-	-	33	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
5 5	-	-	-	-	-	-	-	-	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	-	-	-	-	-	-	-	-	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
5 6	-	-	-	-	-	-	-	-	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	-	-	-	-	-	-	-	-	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
5 7	-	-	-	-	-	-	-	-	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	57	57	52	52
	-	-	-	-	-	-	-	-	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	23	23	10	10
5 8	-	-	-	-	-	-	-	-	45	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	54	50	50	50	50	50
	-	-	-	-	-	-	-	-	33	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

- Brennelementposition
- ◇ Trimm-Abschaltstab
- ◊ Feinregelstab
- Isolopenkanal-Position
- zu Flußmessungen benutzte Isolopenkanal-Positionen



Positionskarte
FR 2 - Core

+) SS = Schnellschluß
A = Abschaltung normal

anderen Kapseln (42, 44 und 45) sind die Temperaturerhöhungen auf Verformungen der NaK-Kapsel und der Antikonvektionsrohre, auf Beschädigungen der Thermoelement-Tauchrohre, der Thermoelemente selbst sowie auf Lunkerbildung im PbBi und im NaK zurückzuführen. Bei den Kapselstrukturteilen (Kapselrohr, Antikonvektionsrohre) wurden z.T. starke Korrosionsangriffe festgestellt [10, 11].

In Tabelle XI ist der zeitliche Bestrahlungsablauf der einzelnen Kapselversuchseinsätzen, charakterisiert durch Bestrahlungsposition, Bestrahlungsdauer je Zyklus (in Tagen Vollastäquivalent, bezogen aus 44 MW (s.u.)) sowie durch Abschaltungen und Schnellschlüsse, die ein qualitatives Maß für die thermisch-zyklische Belastungen darstellen, zusammengestellt. Bei den Abschaltungen sind neben den echten Abschaltungen auch Leistungsreduktionen auf Leistungen mit $N < 10^{-3} N_{\text{nom}}$, wobei $N_{\text{nom}} = 44$ MW Nominalleistung darstellt, berücksichtigt worden.

Im Bestrahlungszeitraum der Versuchsgruppe 4b sind verschiedene Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen des FR 2 (vergl. Positionskarte in Tabelle XI) durchgeführt worden [12]. Es handelt sich um Messungen des vertikalen Flußverlaufes, bei denen Co-Sonden als Flußdetektoren eingesetzt wurden. In Tabelle XII und Abb. 9 sind die Flußwerte der verschiedenen Messungen in den Isotopenkanälen in Höhe der Prüflingsmitten zusammengestellt. Unter den Flußwerten ist der Zeitpunkt der Messung sowie die Stellung der Trimmabschaltstäbe (TA) in mm angegeben.

Die Auswertung der Messungen zeigt über einen längeren Zeitraum im Mittel keinen ausgeprägten Trend nach niedrigeren Flüssen. Den Messungen mit gleichmäßiger TA-Eintauchtiefe entnimmt man, wie der Fluß sich mit wachsender Eintauchtiefe in den unteren Core-Bereich verschiebt. Der Fluß kann sich hierbei um bis zu 50 % verändern (s. Spalte 49/23 der Tabelle XII).

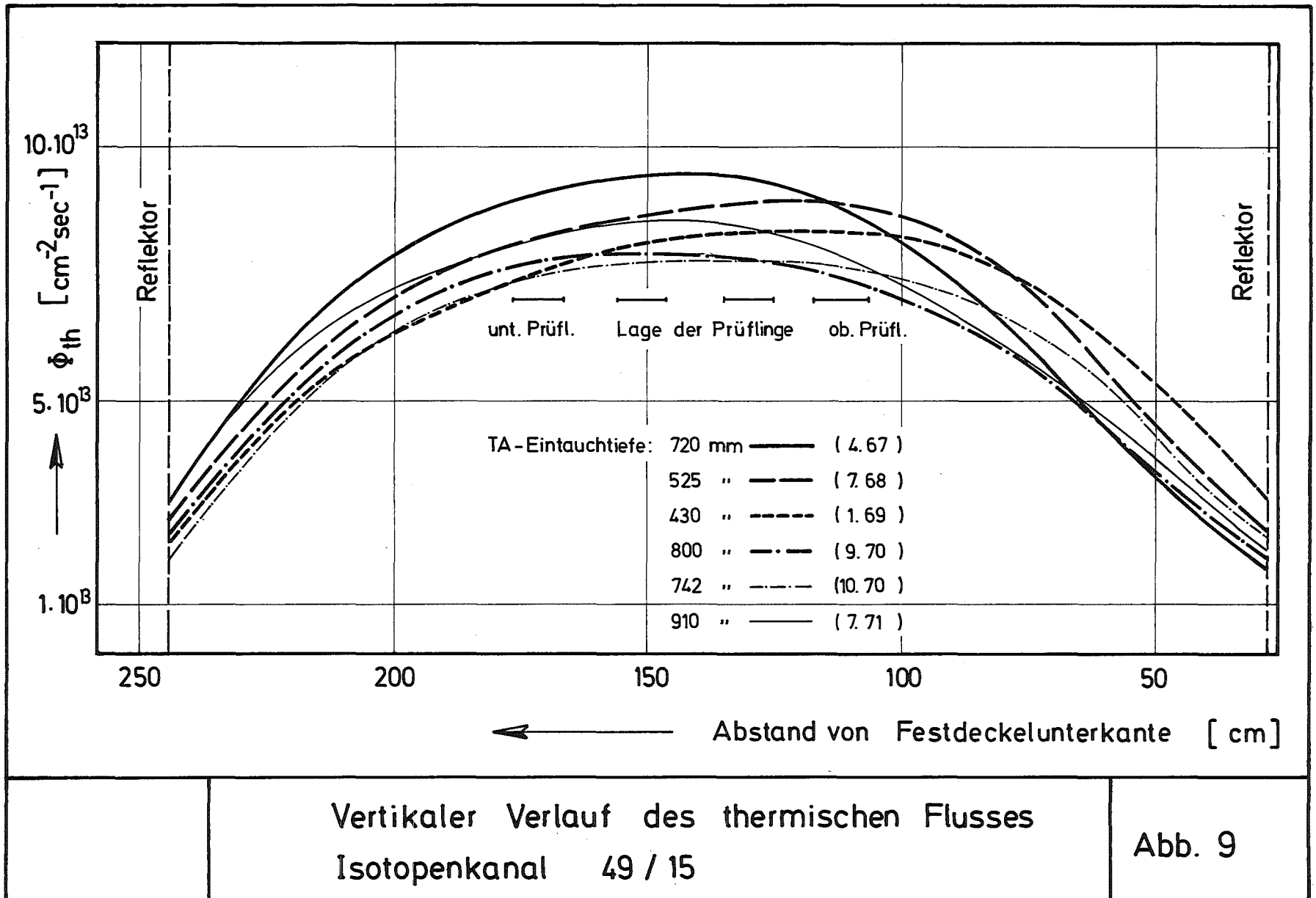
Wie Rechnungen mit den Zellprogramm WIMS [13] zeigten, beträgt die Flußabschwächung entgegen den Annahmen bei der Auslegung in der Na/PbBi-Doppelkapsel tatsächlich etwa 30 %. Die Flußmessungen zeigen weiterhin, daß der Fluß über die Prüflingslänge als nahezu konstant angenommen werden kann.

Tabelle XII Vertikaler Verlauf des thermischen Flusses in den Isotopenkanal-Positionen in Höhe der Prüflingsmitte
 ($\phi_{th} \times 10^{-13} / \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} /$)

Iso. ϕ_{th}	37/15	41/05	41/07	41/09	41/15	41/23	41/33	45/15	45/23	49/15	49/23	49/31	53/07	53/09	51/15	53/23	57/13	57/15	61/17	
	7,9 (7/68) 525 mm	4,2 (3/67) 1020mm	6,2 (4/67) 720 mm	7,1 (4/67) 720 mm	8,9 (4/67) 720 mm	7,3 (4/67) 720 mm	4,4 (7/68) 525 mm	9,0 (4,67) 720 mm	7,8 (4/67) 720 mm	8,8 (4/67) 720 mm	8,3 (4/67) 635 mm	5,3 (4/67) 720 mm	6,9 (7/68) 525 mm	6,8 (4/67) 720 mm	8,2 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	6,3 (4/67) 720 mm	6,8 (4/67) 720 mm	5,0 (7/68) 525 mm	
	7,5 (1/69) 430 mm	4,7 (4/67) 640 mm		7,4 (7/68) 525 mm	8,8 (7/68) 525 mm		4,9 (1/69) 430 mm	8,9 (7/68) 525 mm		8,9 (7/68) 525 mm	6,2 (3/67) 1020mm	6,5 (7/68) 525 mm		7,6 (7/68) 525 mm	8,6 (7/68) 525 mm	7,3 (7/68) 525 mm		7,3 (7/68) 525 mm		
				7,1 (1/69) 430 mm	7,9 (1/69) 430 mm			8,4 (1/69) 430 mm		8,3 (1/69) 430 mm									7,5 (1/69) 430 mm	
	8,2	5,0	6,7	8,1	9,6	8,6	4,6	9,6	8,7	9,4	8,6	6,4	7,1	7,4	8,7	7,4	6,8	7,3	5,1	
	7,5	5,0		7,5	9,0		5,1	8,9		8,9	7,7	6,6		7,6	8,6	7,3		7,4		
				7,1	8,0			8,3		8,3									7,7	
	8,1	5,4	6,8	8,2	9,8	9,3	4,6	9,7	9,1	9,4	8,6	7,0	7,0	7,4	8,8	7,6	6,9	7,4	5,1	
	7,3	4,8		7,4	8,9		5,0	8,7		8,6	8,8	6,6		7,3	8,3	7,2		7,2		
				6,9	7,8			8,0		8,1							7	7,5		
	7,6	5,6	6,6	7,9	9,5	9,3	4,4	9,4	9,1	9,1	8,3	7,1	6,6	7,1	8,4	7,4	6,6	7,0	5,0	
	6,8	4,7		7,0	8,3		4,7	8,2		8,3	9,4	6,3		6,8	7,8	7,0		6,7		
				6,5	7,3			7,5		7,6								7,1		

Erläuterung:

Spalte 1: $\phi_{th} = 7,9 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ sec}$ bei TA-Stellung 525 mm, gemessen Juli 1968 in Iso.-Kanal 37/15 in Höhe der oberen Prüflingsmitte
 $\phi_{th} = 7,5 \times 10^{13} \text{ " " " " 430 mm, " Jan. 1969 " " " "$
 (entsprechend für die folgenden Prüflinge und Iso.-Kanäle)



6.2 Temperatur und Stabileistung

Die bei den Bestrahlungen der Versuchsgruppe 4b verwendeten NaK-PbBi-Doppelkapseln sind mit Thermoelementen ausgestattet, welche die Messung der Na-Temperatur in Höhe der Bestrahlungsprüflinge gestatten. Aus diesem Meßwert kann die Hülloberflächentemperatur sowie die Stabileistung des Prüflings ermittelt werden. Wie Eichversuche zeigen, besteht gute Übereinstimmung zwischen experimentell und rechnerisch ermittelten Werten. Abweichungen von Maximal 20°C rühren von der Einbringung der Thermoelemente in Tauchrohren mit 0,2 mm Spiel her. Der Gesamtfehler der Temperaturbestimmung wird auf $\pm 5\%$ abgeschätzt.

Die Umrechnung der Meßwerte erfolgt über die in Abb. 10 dargestellten Zusammenhänge zwischen Meßstellentemperatur T_m , Hülloberflächentemperatur T_{Ha} und Stabileistung X .

Die Auswertung der Meßwerte umfaßt tabellarische und grafische Darstellungen des zeitlichen und axialen Verlaufes der Hüllrohroberflächentemperaturen und der Stabileistungen der einzelnen Prüflinge. Die geometrische Zuordnung der Meßwerte zu den Prüflingen ist aus dem Instrumentierungsplan (Tabelle XIII) ersichtlich. Die Zahlen neben den TE-Nummern bedeuten die Lage des Thermoelementes in mm vom unteren Prüflingsende entsprechend der Skizze.

In den Tabellen XIV und XV sind die Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge bei Zyklusbeginn und Maximalwerte sowie die mittleren Stabileistungen bei Zyklusbeginn und -ende zusammengestellt. Die Abb. 11 bis 33 zeigen schließlich den zeitlichen Temperaturverlauf.

Wie die Abbildungen zeigen, treten während der Bestrahlung trotz konstanter Reaktorleistung einzelne Temperaturspitzen auf, deren Ursachen in Lageänderungen des Thermoelement-Meßpunktes durch radiale und axiale Verschiebungen, in Fehlmessungen der Thermoelemente sowie in lokalen Zustandsänderungen des Reaktors (Änderung der TA-Stableistung) zu suchen sind. In den Abb. 34 - 42 ist schließlich der axiale Verlauf der Hülloberflächentemperatur einiger Prüflinge mit 2 bis 3 Thermoelementen dargestellt, wobei der Anfangs-, End- und Maximalzustand ausgewählt wurde.

Aus diesen Abbildungen sowie aus den Überprüfungen der Thermoelemente geht hervor, daß bei KVE-47 die Thermoelemente 1 und 2, bei KVE-49 die Thermoelemente 1, 2 und 6 sowie bei KVE-55 das Thermoelement 2 nach einer bestimmten Zeit deutlich abgefallen und als defekt zu bezeichnen sind. In diesen Abbildungen ist daher ein (gestrichelt gezeichneter) Verlauf angegeben, welcher den wahrscheinlichen Temperaturverlauf darstellt, wobei als Orientierung der Verlauf der Temperaturen der anderen Prüflinge des KVE zugrundegelegt wurde. Diese korrigierten Werte werden zur Korrektur der Abbrände herangezogen (s. Abschn. 6.3).

6.3 Thermische Abbrandberechnung

Zur Berechnung des Abbrandes der Prüflinge werden die aus den Meßwerten nach obiger Umrechnungsvorschrift berechneten Stableistungen herangezogen. Der Abbrand ist bestimmt durch

$$A = \frac{\ell}{m} \cdot \Sigma \chi_i \cdot t_i \quad \text{MWD/kg M}$$

mit ℓ = Brennstofflänge (cm)

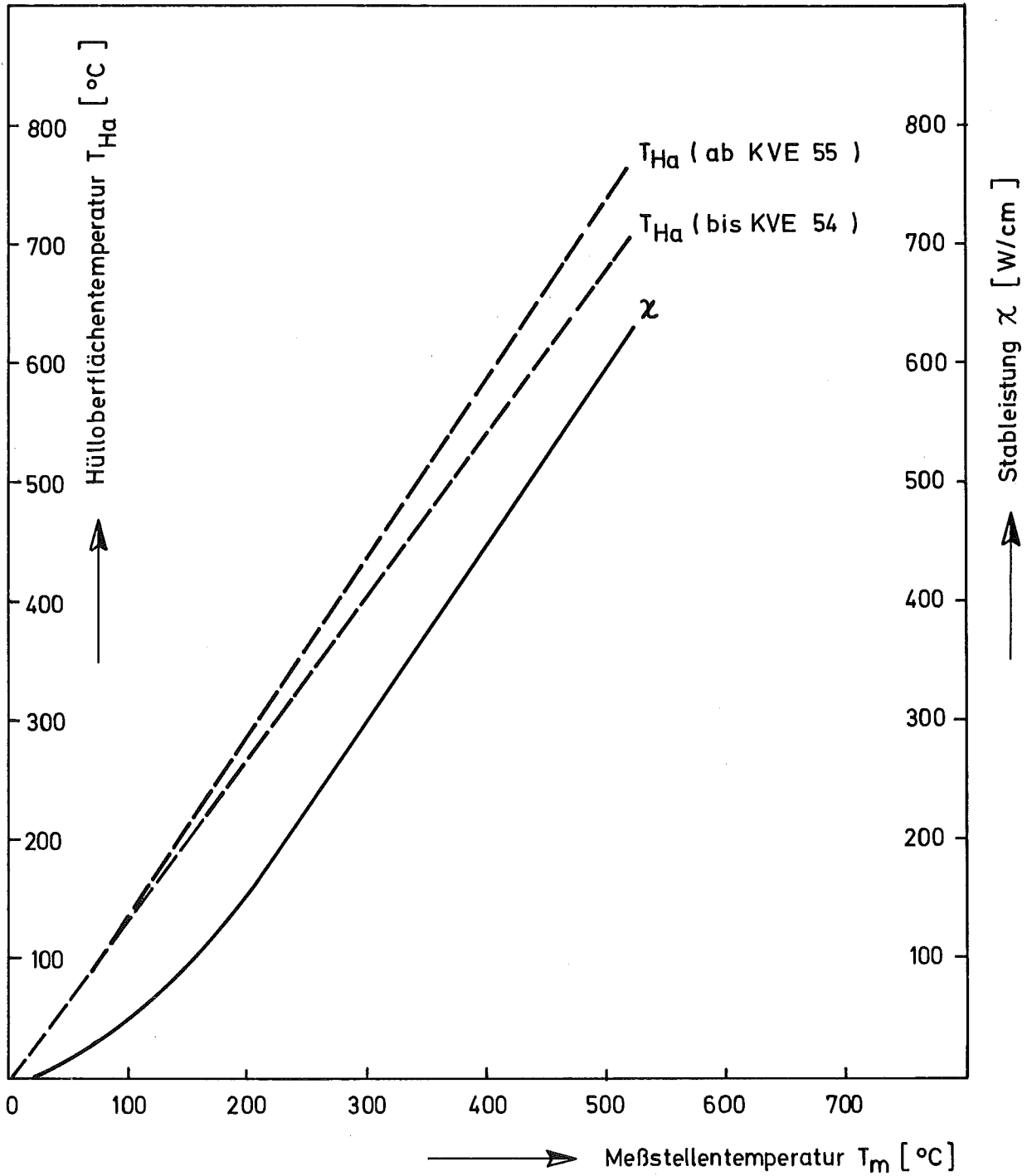
m = Brennstoffgewicht (g)

χ_i = Stableistung (W/cm) (arithmetisches Mittel/Zyklus)

t_i = Bestrahlungszeit (Vollastäquivalent) (d) je Zyklus

In Tabelle XVI sind die aus den Meßwerten aller Thermoelemente berechneten Abbrände sowie die hieraus - bei Prüflingen mit mehreren Thermoelementen - resultierenden Mittelwerte zusammengestellt. Bei Prüflingen mit defekten Thermoelementen sind die korrigierten Abbrandwerte aus den über die geschätzten Hülltemperaturen nach der Umrechnungsvorschrift ermittelten (mittleren) Stableistungen in Klammern hinzugefügt.

Wie der Vergleich mit den radiochemisch bestimmten Werten zeigt, besteht relativ gute Übereinstimmung, lediglich bei Prüflingen mit Strukturänderungen, hervorgerufen durch Schmelzen und axialen Brennstofftransport sind erwartungsgemäß höhere Abweichungen festzustellen (vergl. Kap. 8.4).



ab KVE 55 2 Antikonvektionsrohre im NaK

FR-2 Kapsel - Versuchsgruppe 4b

Temperatur - Stableistungscharakteristik Kapseltyp 4a(NaK)

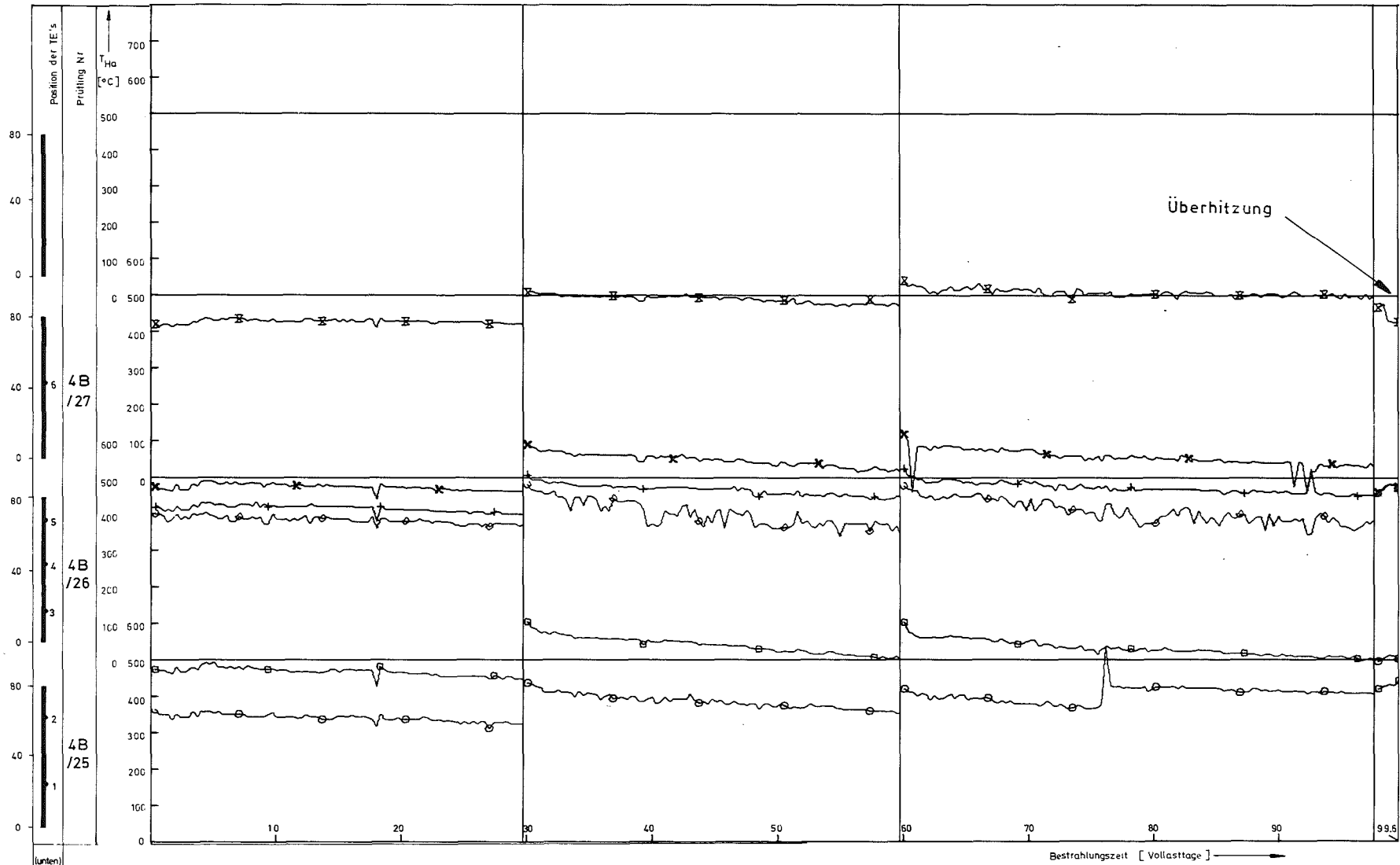
Abb. 10

Tabelle XIII

Instrumentierungsplan der Versuchsgruppe 4b

K V E

	42	43	44	45	47	48	49	55	56	57	58	<p><u>Erklärung:</u> Die Verteilung der Thermoelemente auf die einzelnen Prüflinge der Kapselversuchseinträge ist folgendermaßen zu verstehen: Beispiel: KVE 42, unterster Prüfling 4B/25, Thermoelement 1 in 22 mm Abstand vom unteren Brennstoffsäulenende, Thermoelement 2 in 60 mm Abstand. Die Genauigkeit der Höhenangabe beträgt ± 1 mm.</p>
80	Prüfling TE	-	-	-	<u>4B/4</u> 7/40	<u>4B/9</u> 7/40	<u>4B/11</u> 7/40	<u>4B/15</u> 7/60 6/22	<u>4B/18</u> 7/60 6/22	<u>4B/21</u> 7/60 6/22	<u>4B/24</u> 7/60 6/22	
80	<u>4B/27</u> 6/42	<u>4B/34</u> 6/42	<u>4B/35</u> 6/42	<u>4B/29</u> 6/42	<u>4B/3</u> 6/55 5/25	<u>4B/8</u> 6/55 5/25	<u>4B/12</u> 6/55 5/25	<u>4B/14</u> 5/60 4/22	<u>4B/17</u> 5/60 4/22	<u>4B/20</u> 5/60 4/22	<u>4B/23</u> 5/60 4/22	
80	<u>4B/26</u> 5/67 4/42 3/17	<u>4B/32</u> 5/67 4/42 3/17	<u>4B/33</u> 5/67 4/42 3/17	<u>4B/28</u> 5/67 4/42 3/17	<u>4B/2</u> 4/55 3/25	<u>4B/7</u> 4/55 3/25	<u>4B/10</u> 4/55 3/25	<u>4B/13</u> 3/65 2/40 1/15	<u>4B/16</u> 3/65 2/40 1/15	<u>4B/19</u> 3/65 2/40 1/15	<u>4B/22</u> 3/65 2/40 1/15	
80	<u>4B/25</u> 2/60 1/22	<u>4B/30</u> 2/60 1/22	<u>4B/31</u> 2/60 1/22	<u>4A/24</u> (Vg. 4a) 2/60 1/22	<u>4B/1</u> 2/55 1/25	<u>4B/5</u> 2/55 1/25	<u>4B/6</u> 2/55 1/25	-	-	-	-	



(unten)
Kapsel
Typ
4a(Nak)

Abb. 11 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 42 Blatt 1 von 1
Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊠

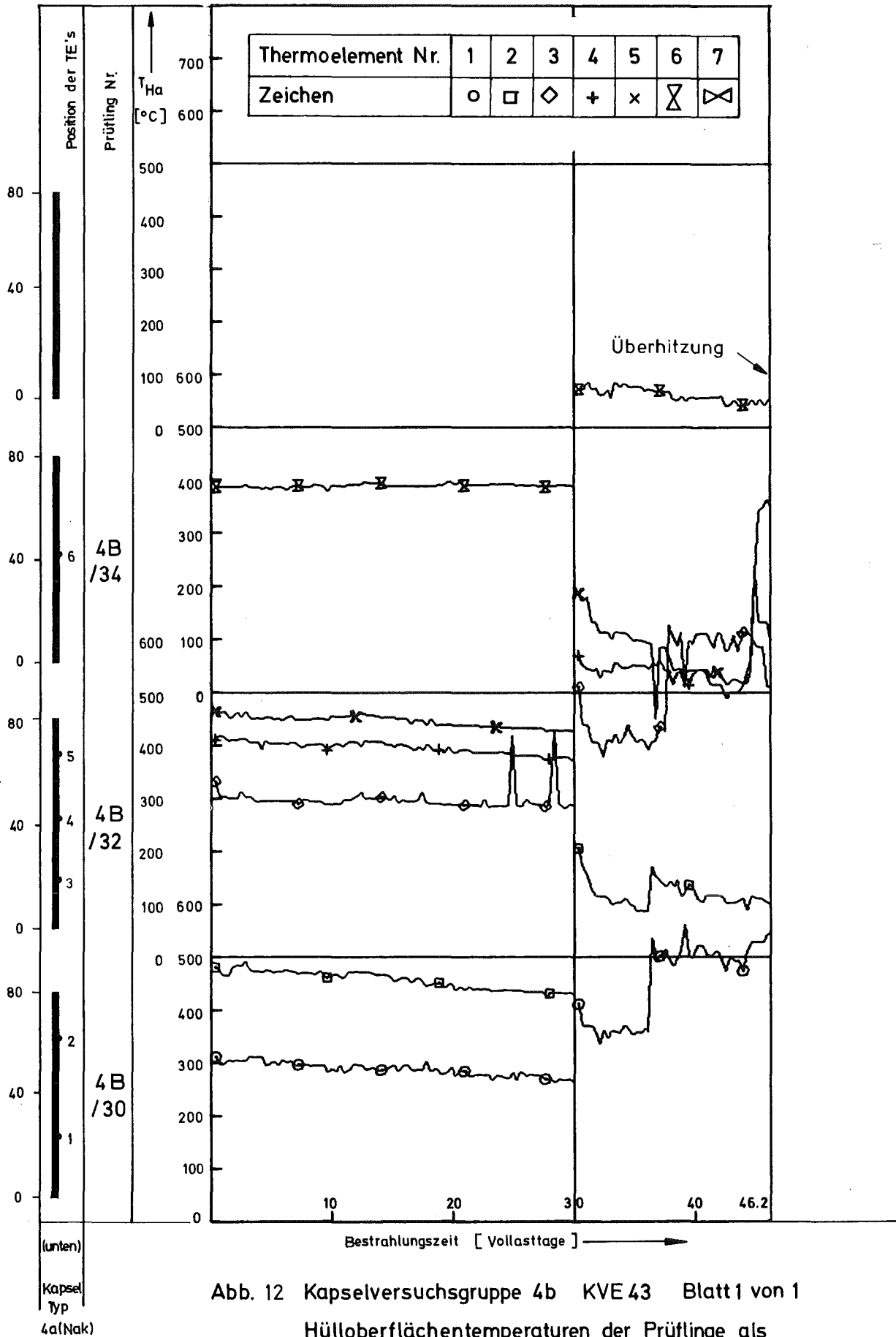


Abb. 12 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 43 Blatt 1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

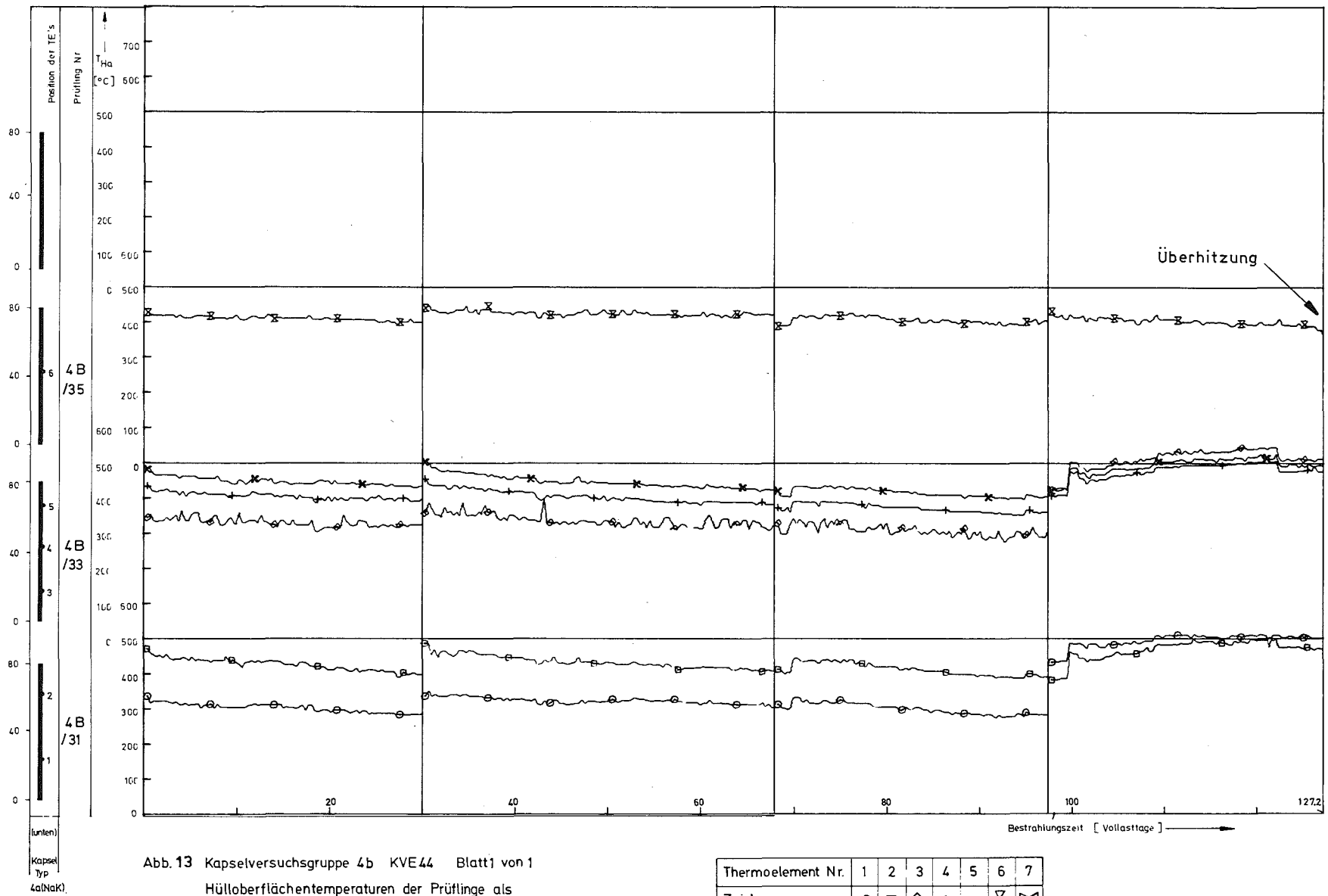


Abb. 13 Kapselversuchsgruppe 4b KVE44 Blatt 1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

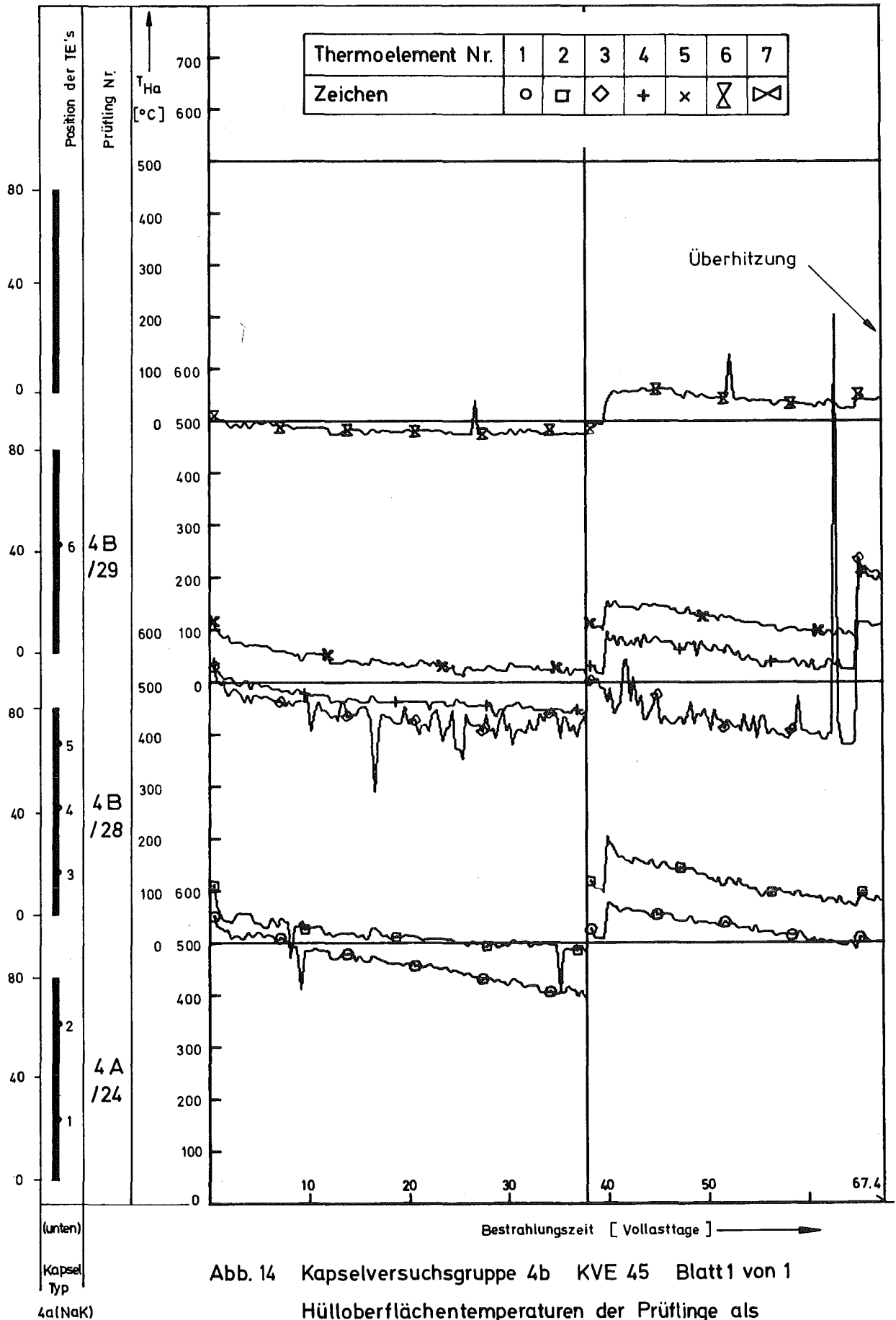
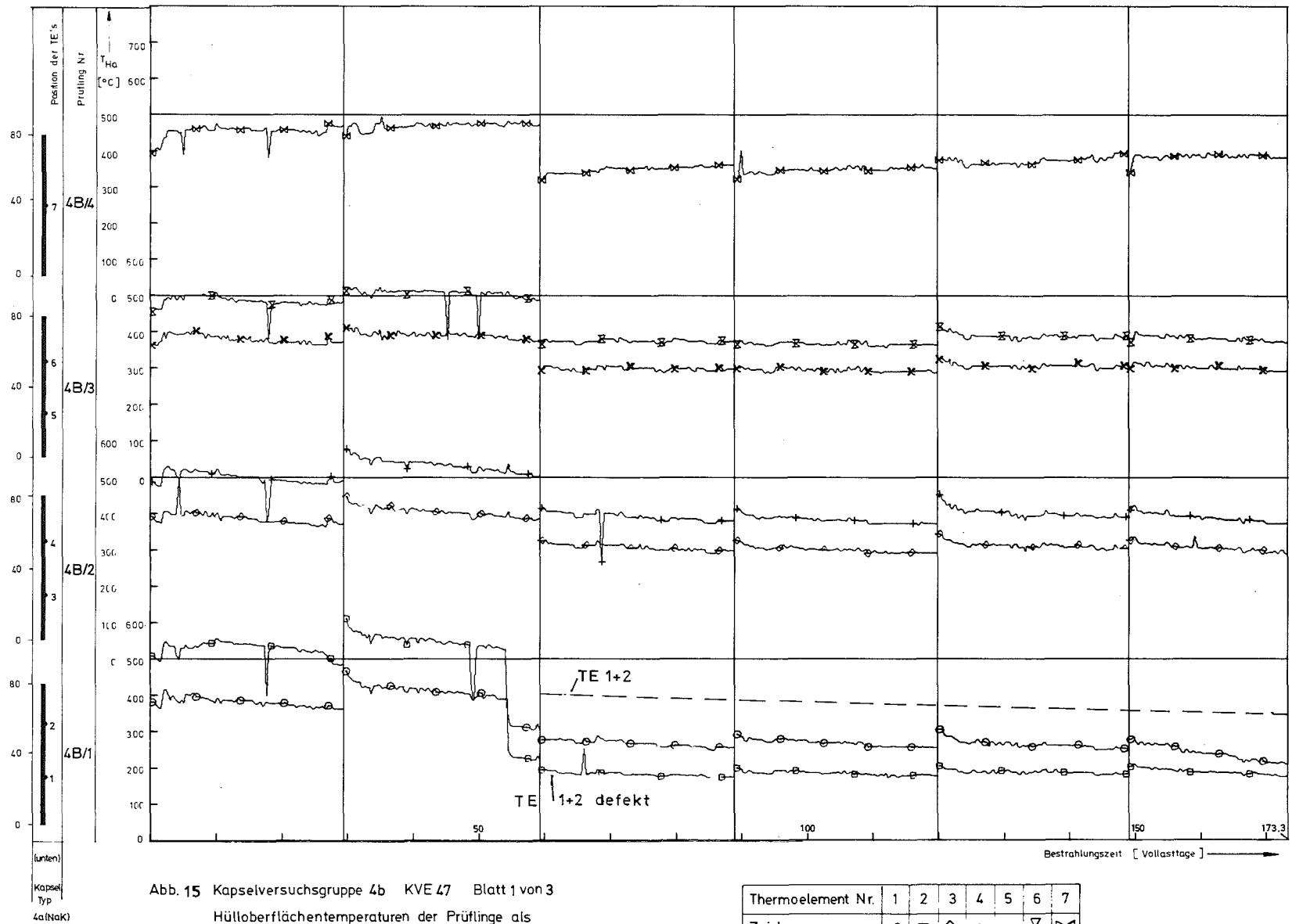


Abb. 14 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 45 Blatt 1 von 1
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit



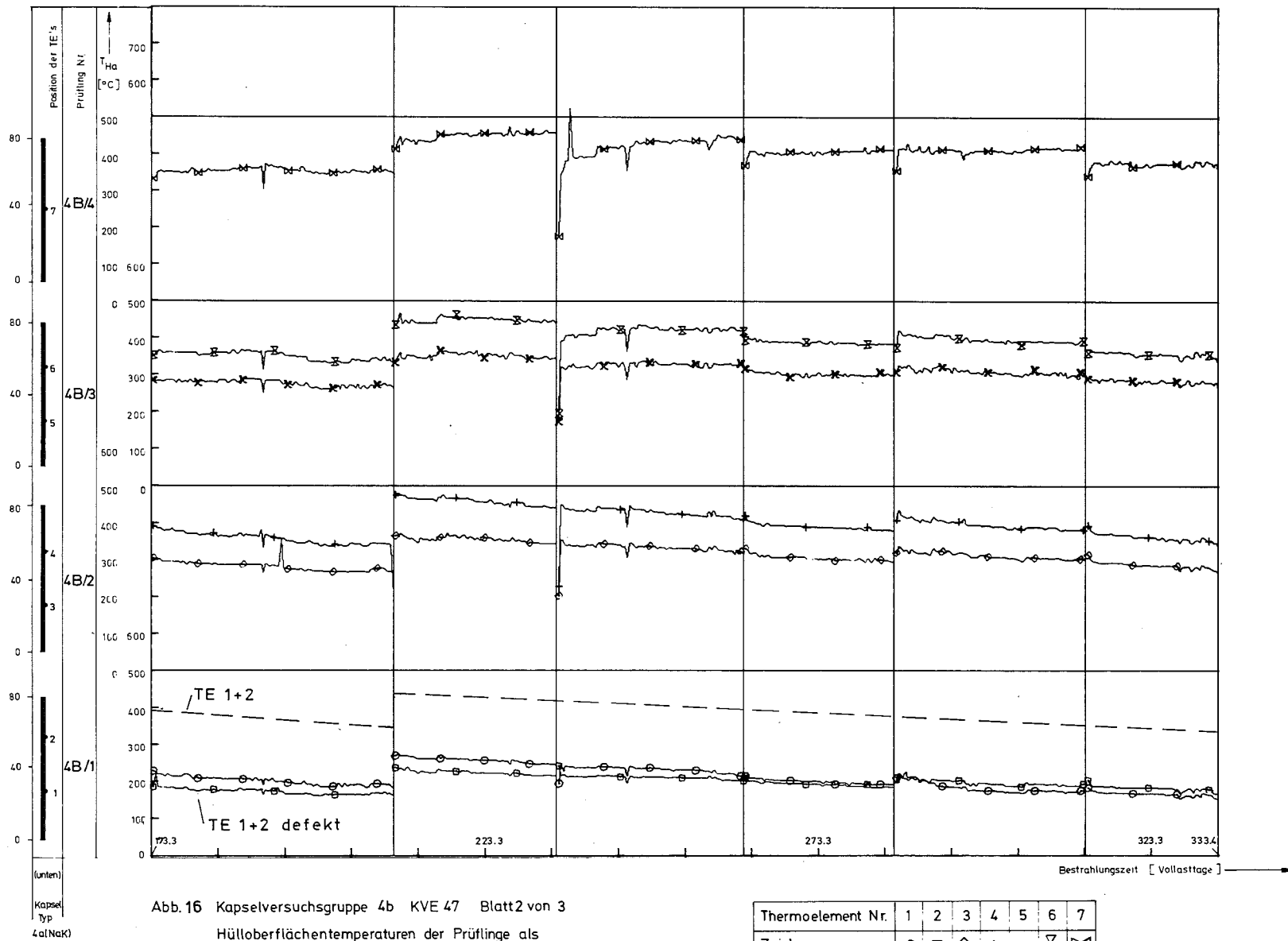


Abb. 16 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 47 Blatt 2 von 3
 Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
 Funktion der Zeit

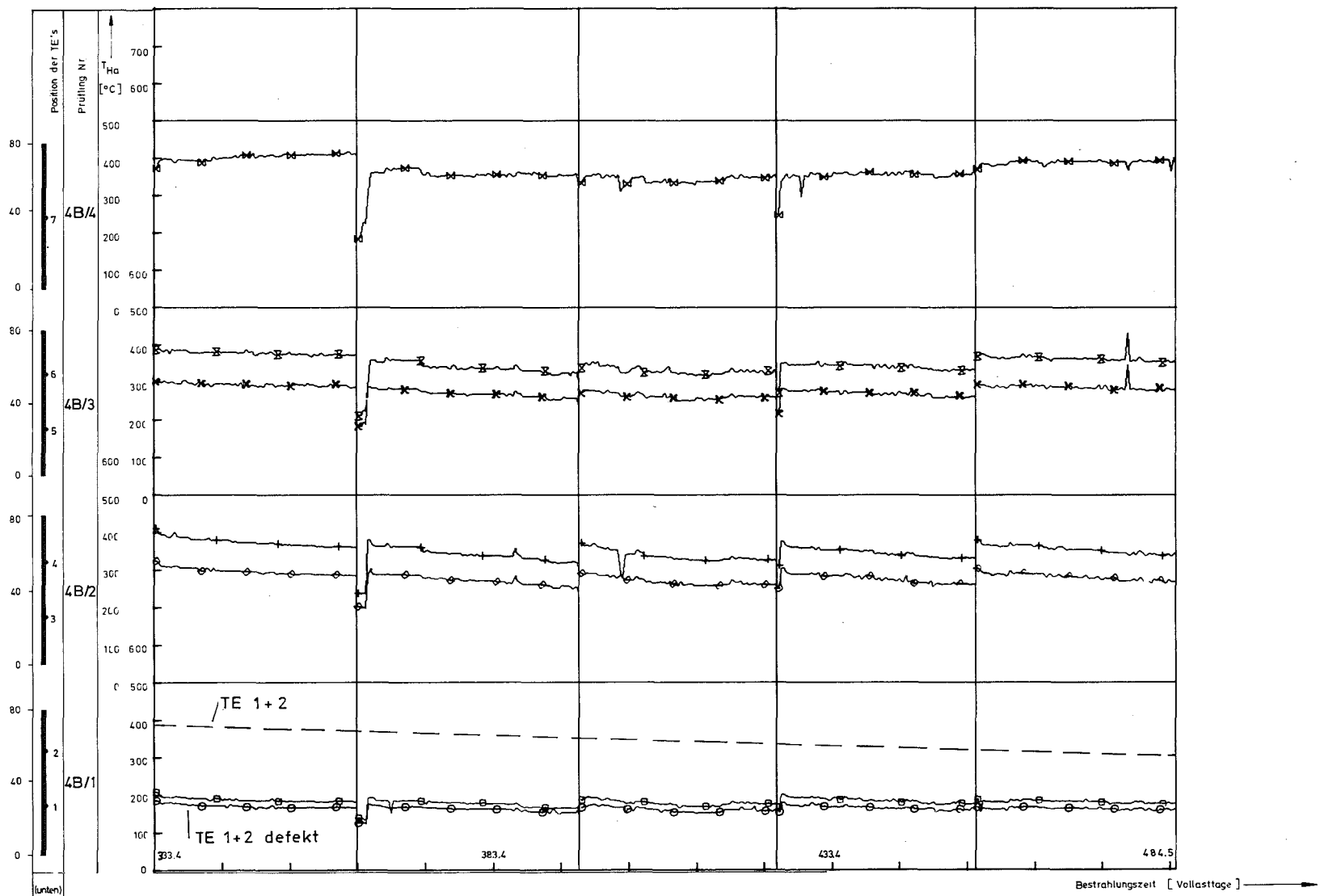
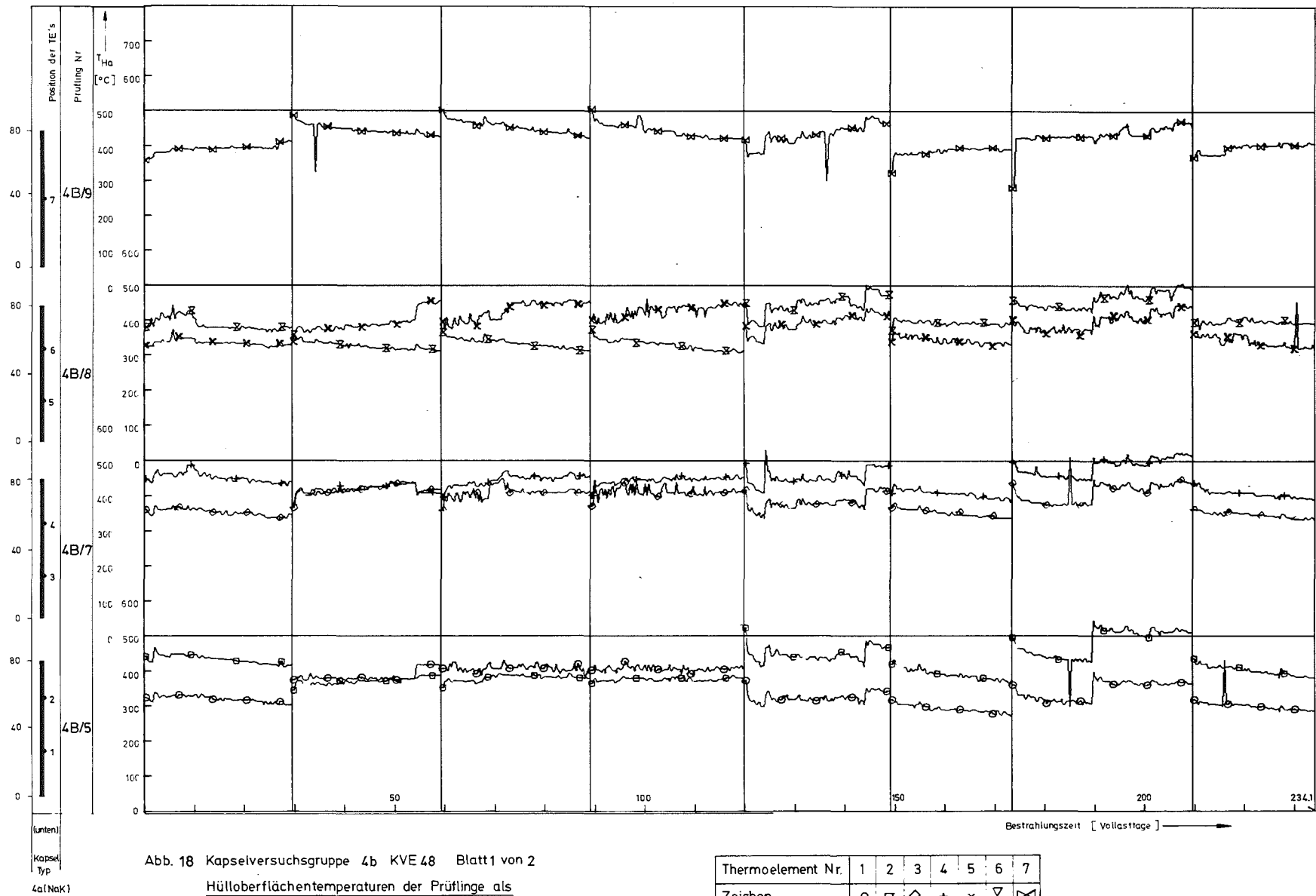
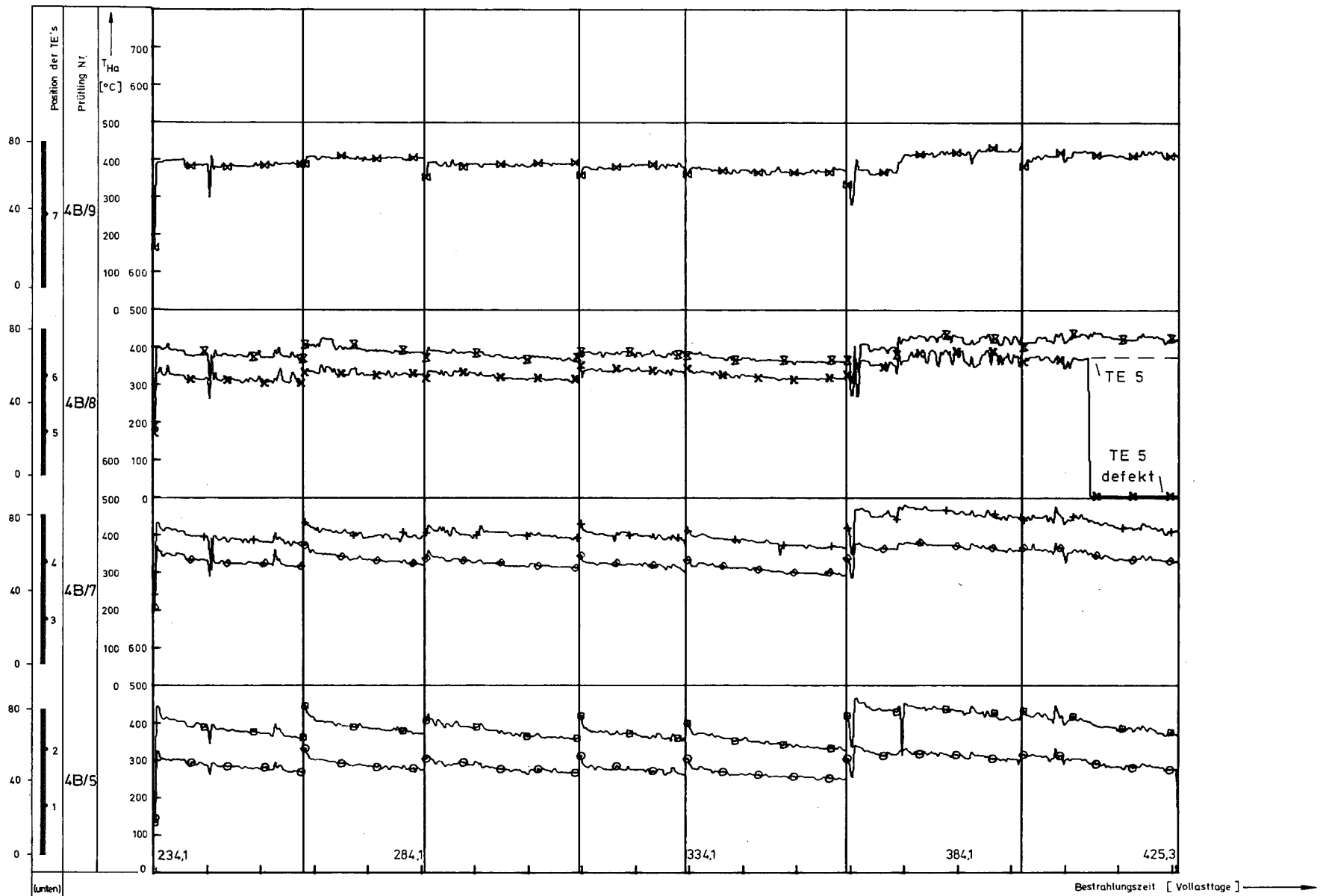


Abb. 17 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 47 Blatt 3 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊠





(unten)
Kapsel
Typ
4a(NaK)

Abb. 19 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 48 Blatt 2 von 2
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊠	⊗

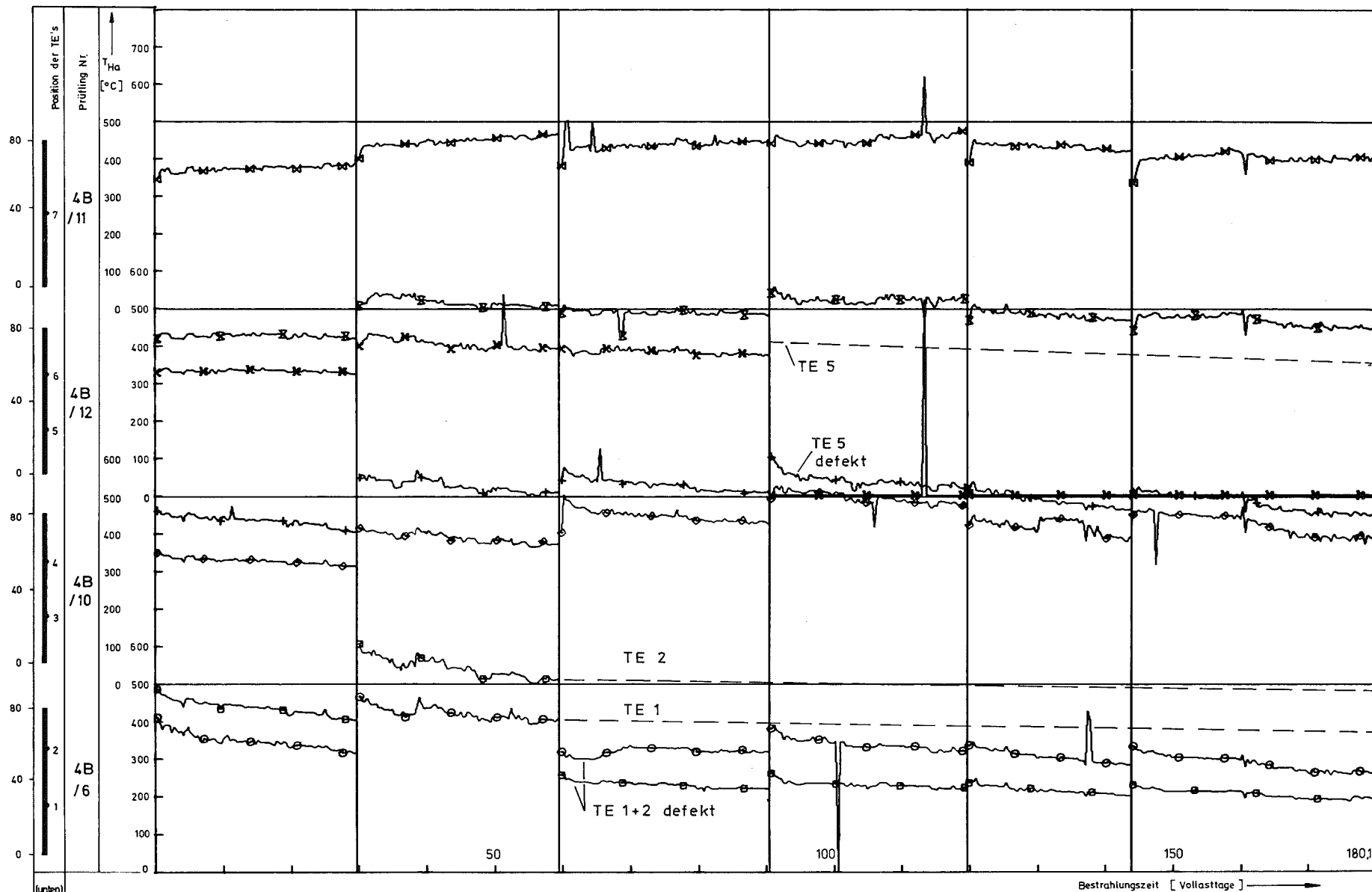


Abb. 20 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt 1 von 4
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊠

(unten)
Kapsel Typ
4a(NaK)

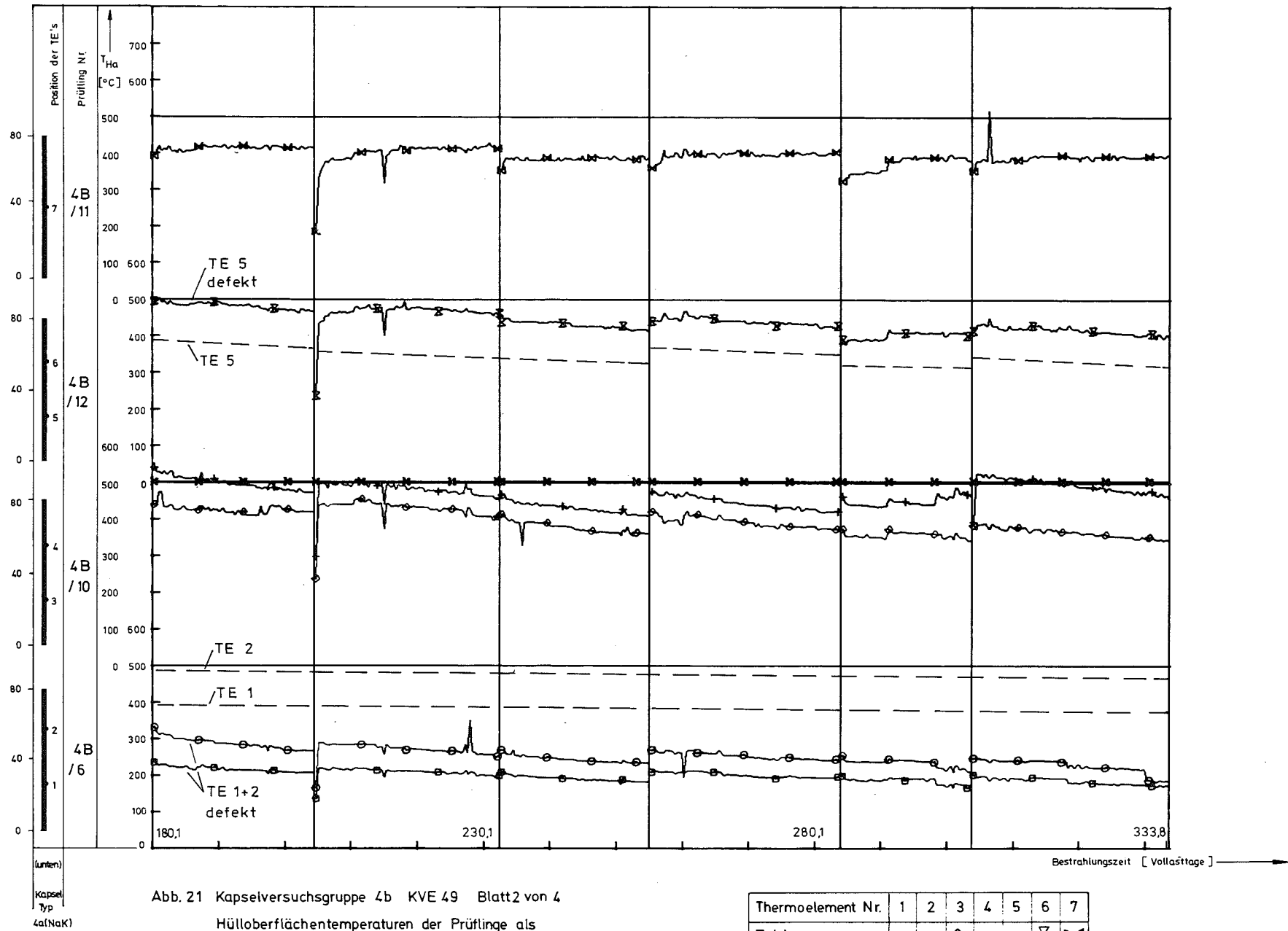


Abb. 21 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt 2 von 4

Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	x	⊗	⊗

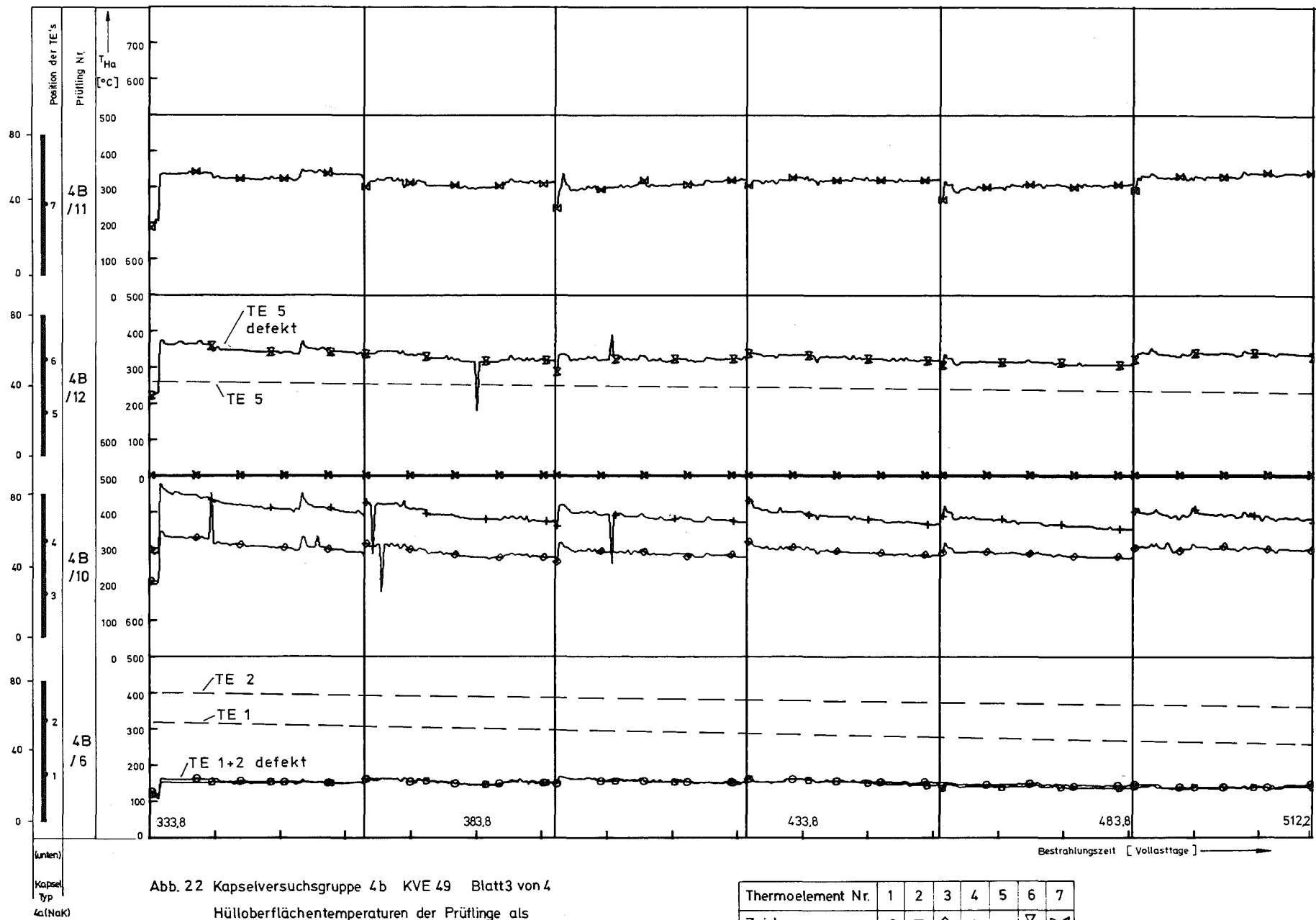


Abb. 22 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt3 von 4
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
 Funktion der Zeit

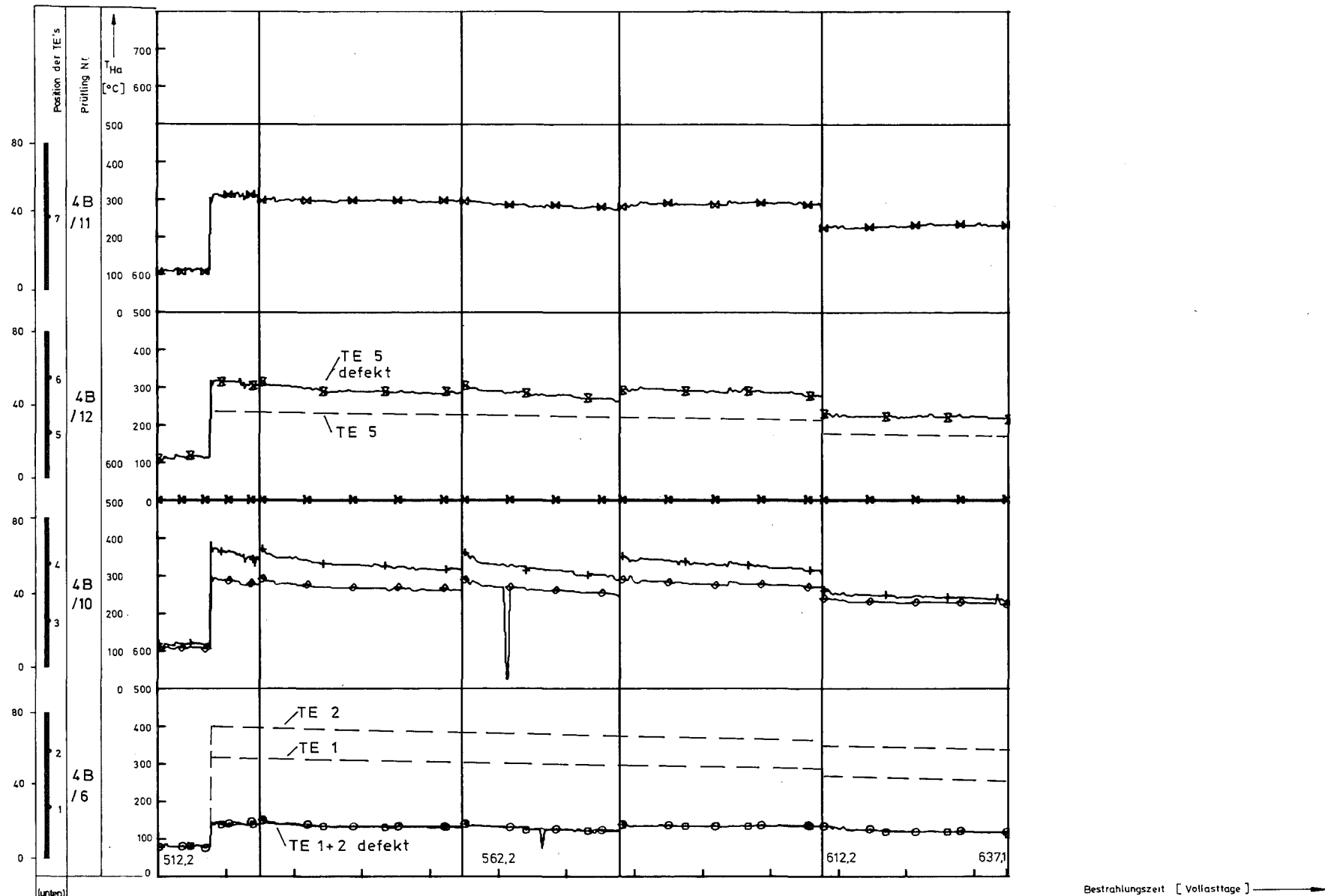
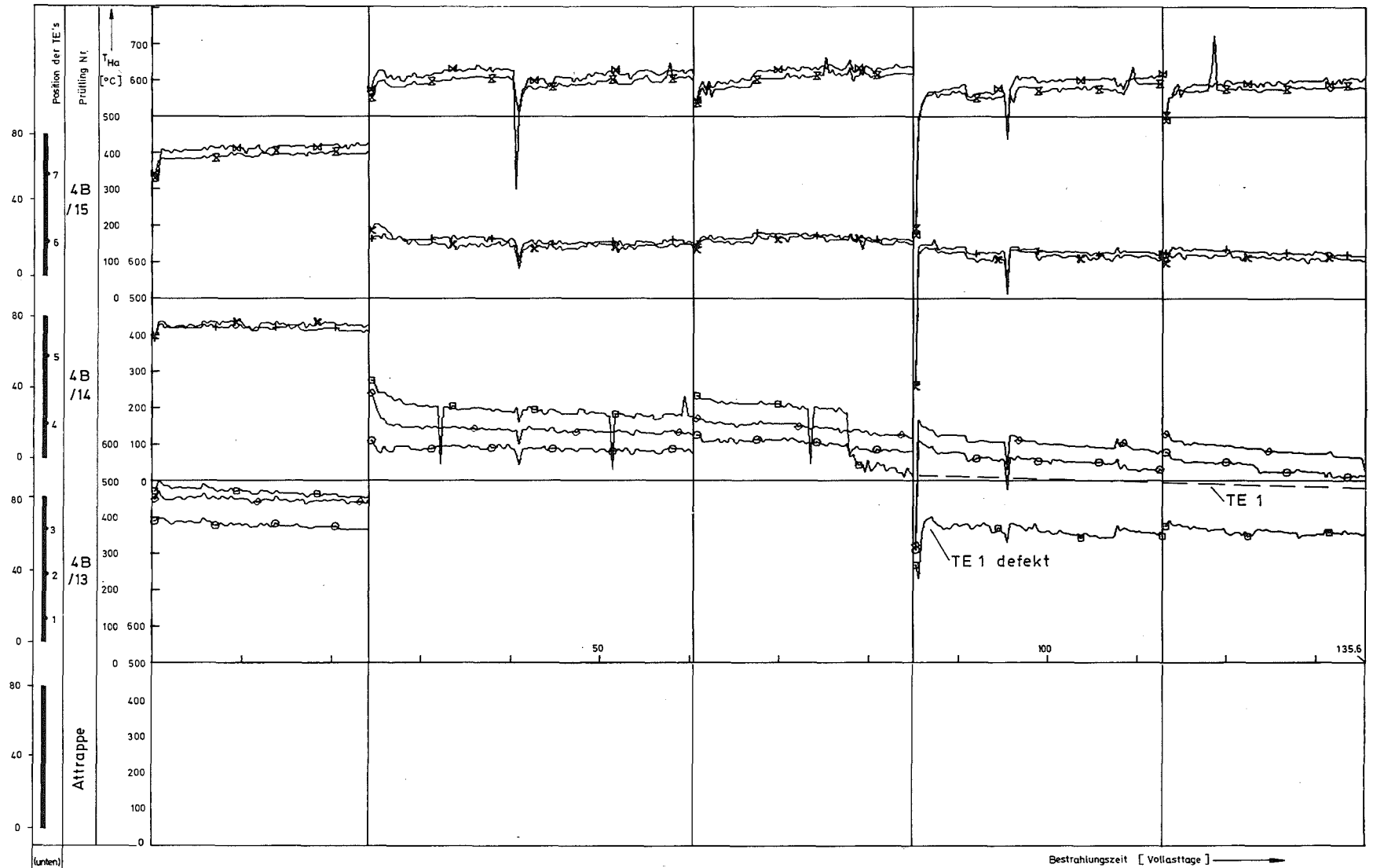


Abb. 23 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 49 Blatt 4 von 4

Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

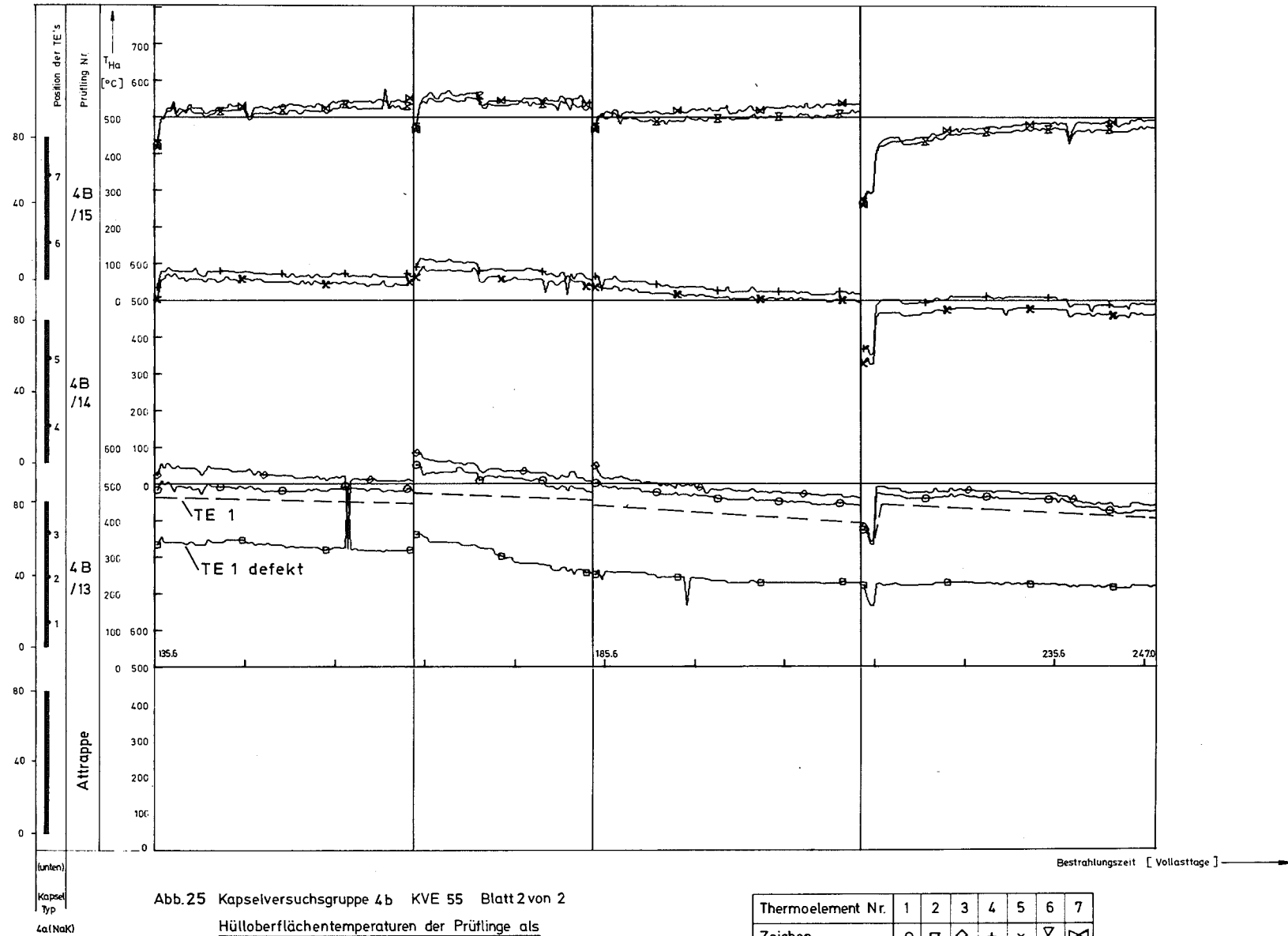
Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

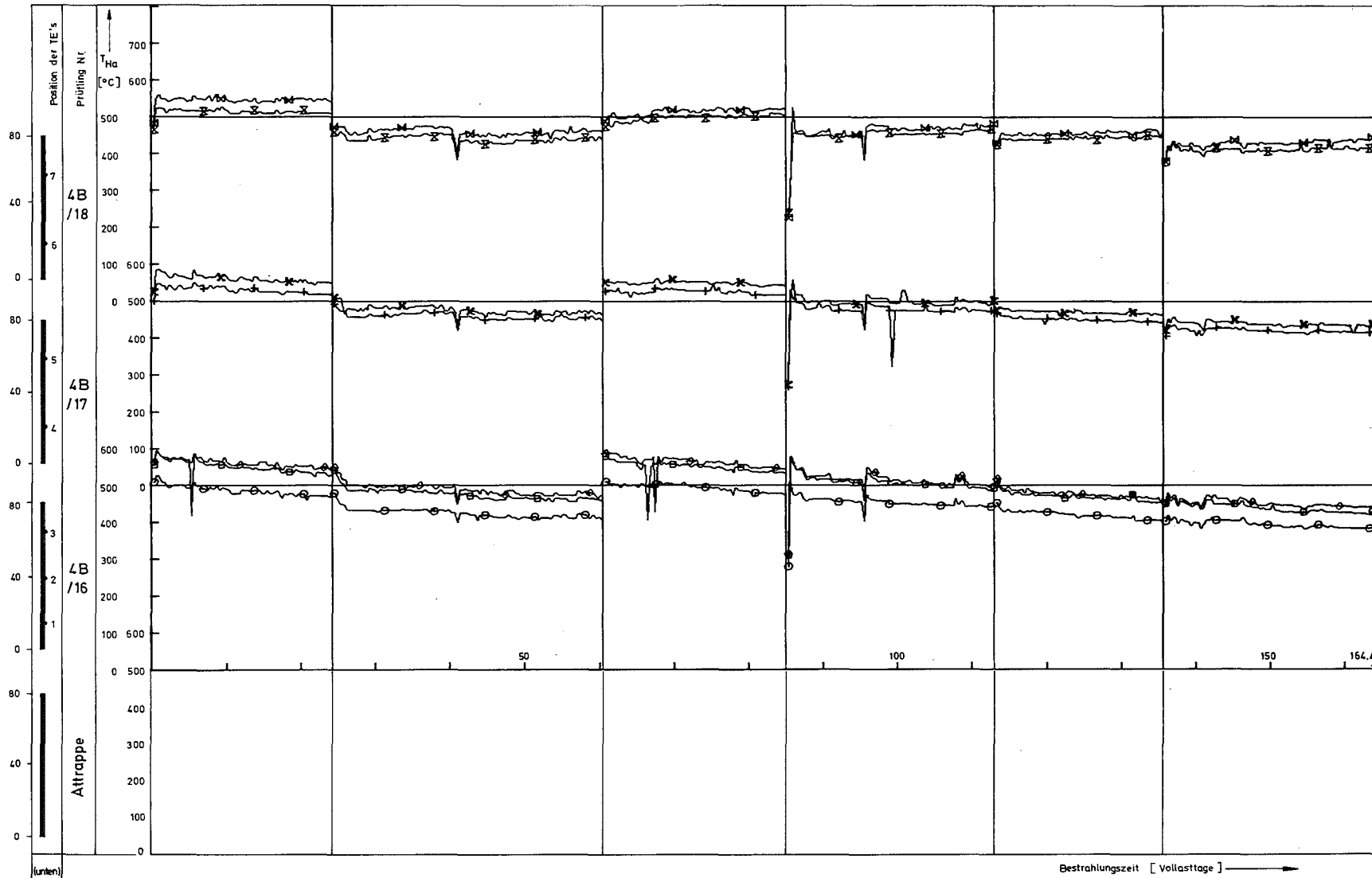


(unten)
Kapsel
Typ
4a(NaK)

Abb. 24 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 55 Blatt 1 von 2
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊠

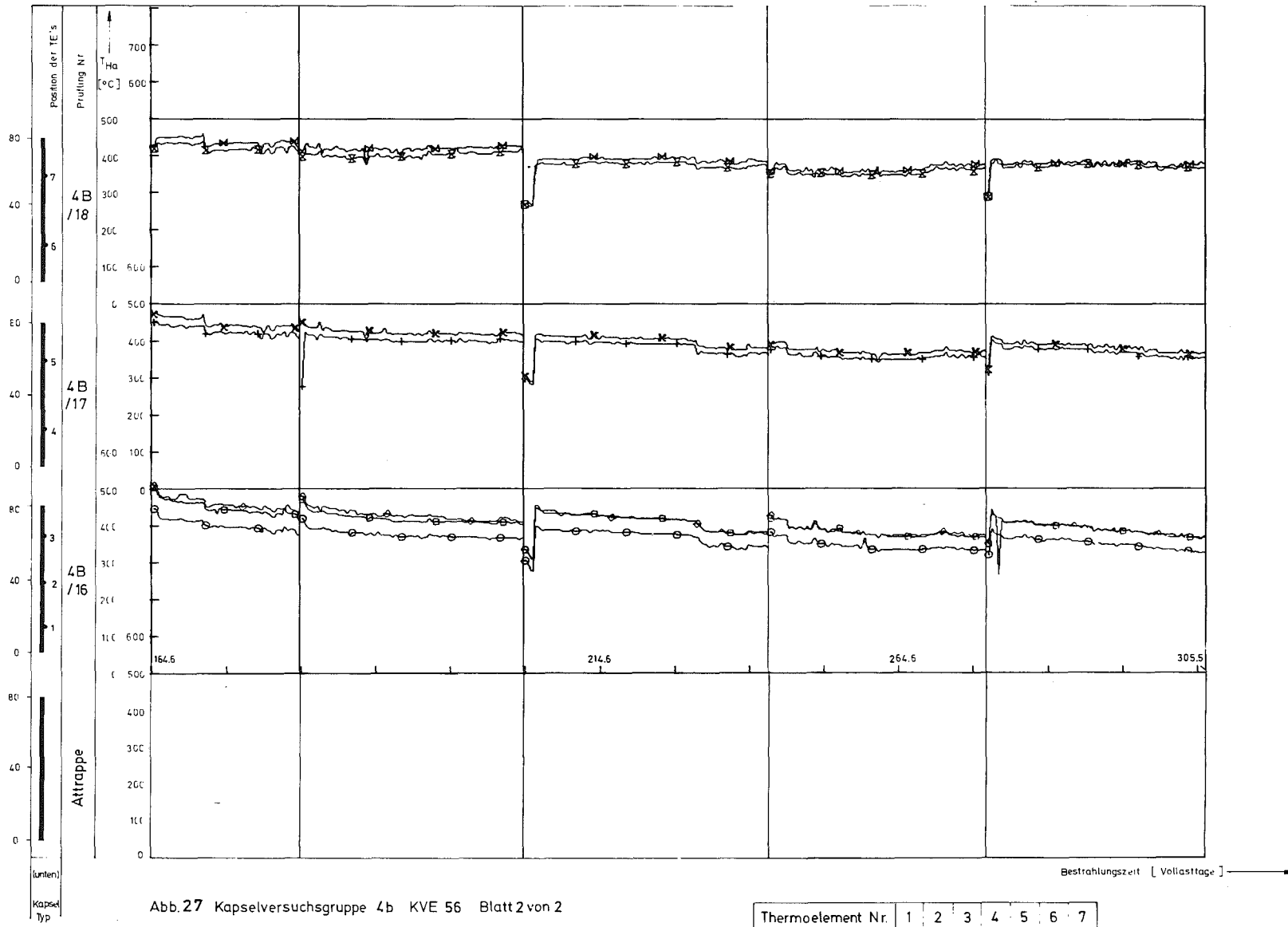




(unten)
Kapsel
Typ
4a(NaK)

Abb. 26 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 56 Blatt1 von 2
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
 Funktion der Zeit

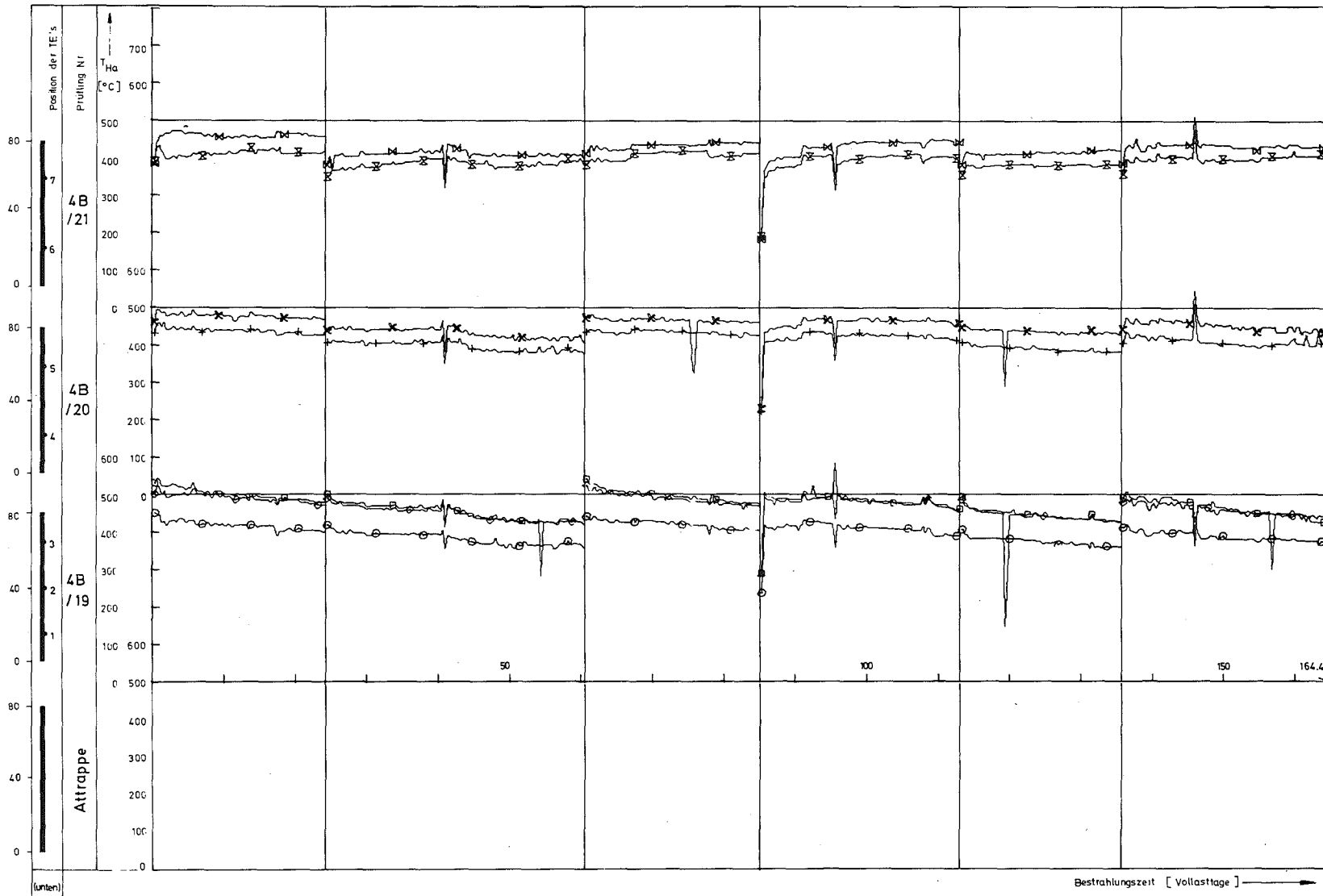
Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗



Position der TE's
 Prüfling Nr.
 4B / 18
 4B / 17
 4B / 16
 Attrappe
 (unten)
 Kapsel
 Typ
 4a (Nak)

Abb.27 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 56 Blatt 2 von 2
Hüelloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊙



(unten)
Kapsel
Typ
4a(NaK)

Abb. 28 Kapselversuchsgruppe 4B KVE 57 Blatt 1 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

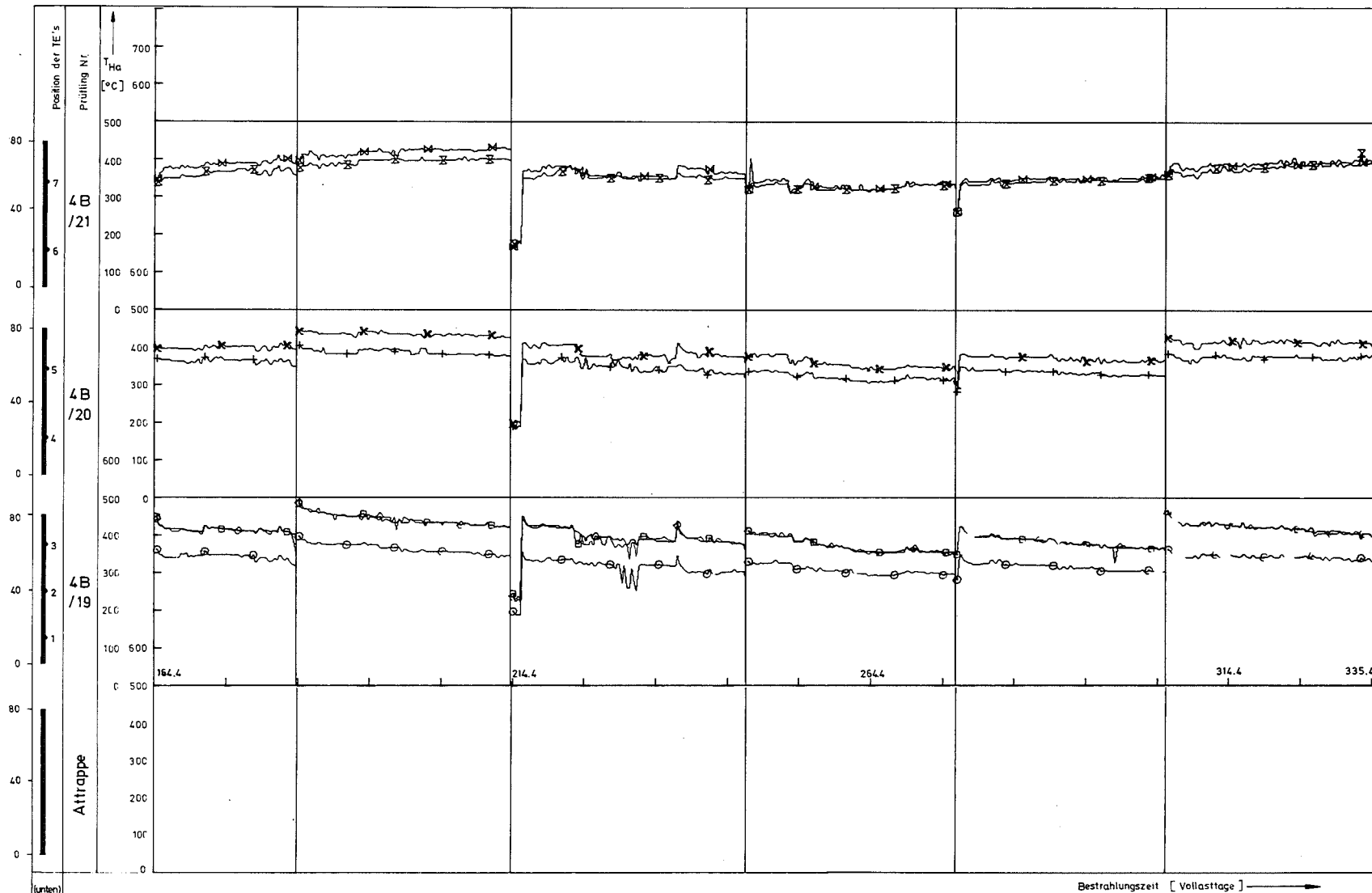
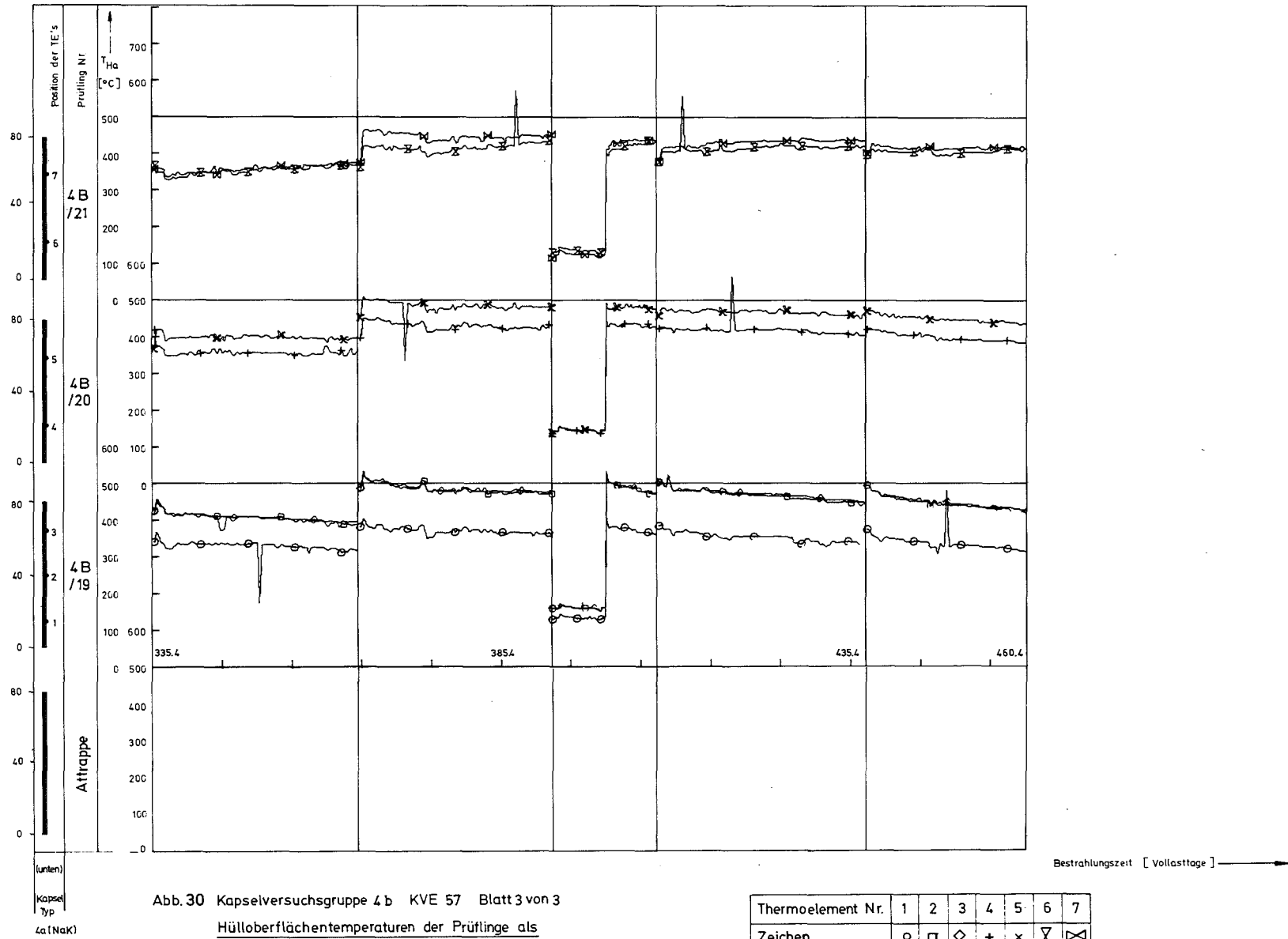
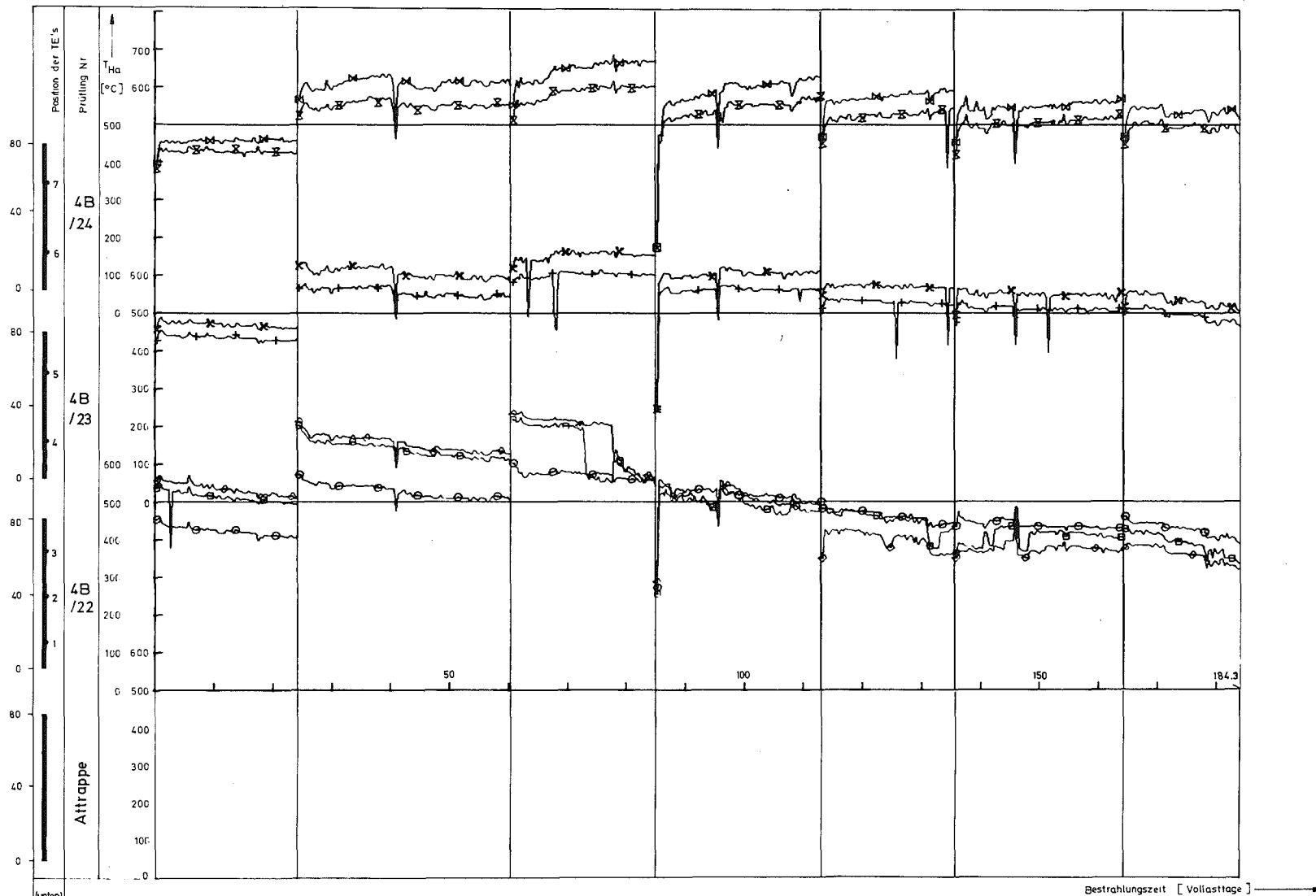


Abb. 29 Kapselversuchsgruppe KVE 57 Blatt 2 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊙





(mmen)
 Kapsel
 Typ
 4a(Nak)

Abb. 31 Kapselversuchsgruppe 4b KVE 58 Blatt 1 von 3
 Hülloberflächentemperaturen der Prüflinge als
 Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗

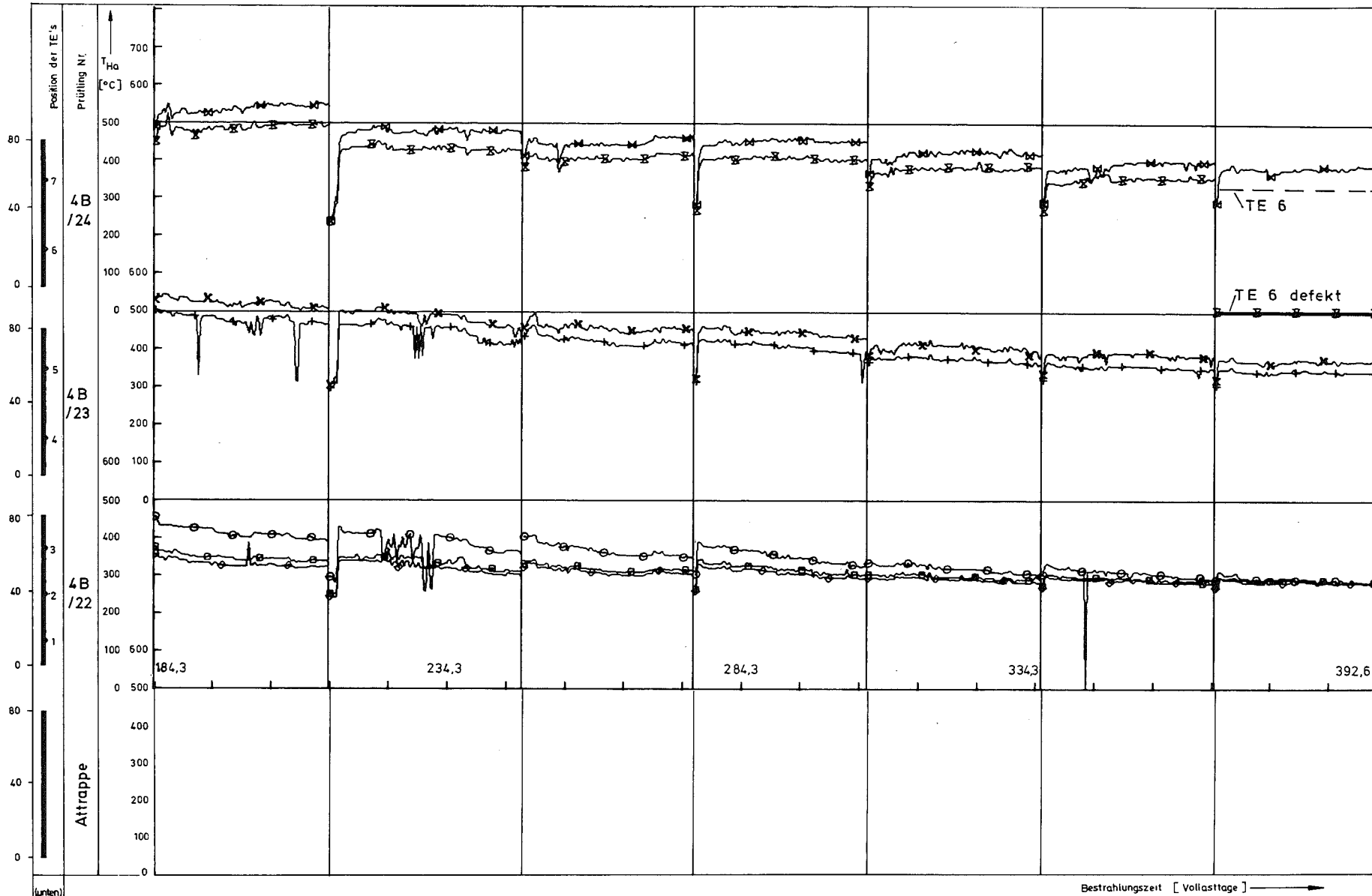
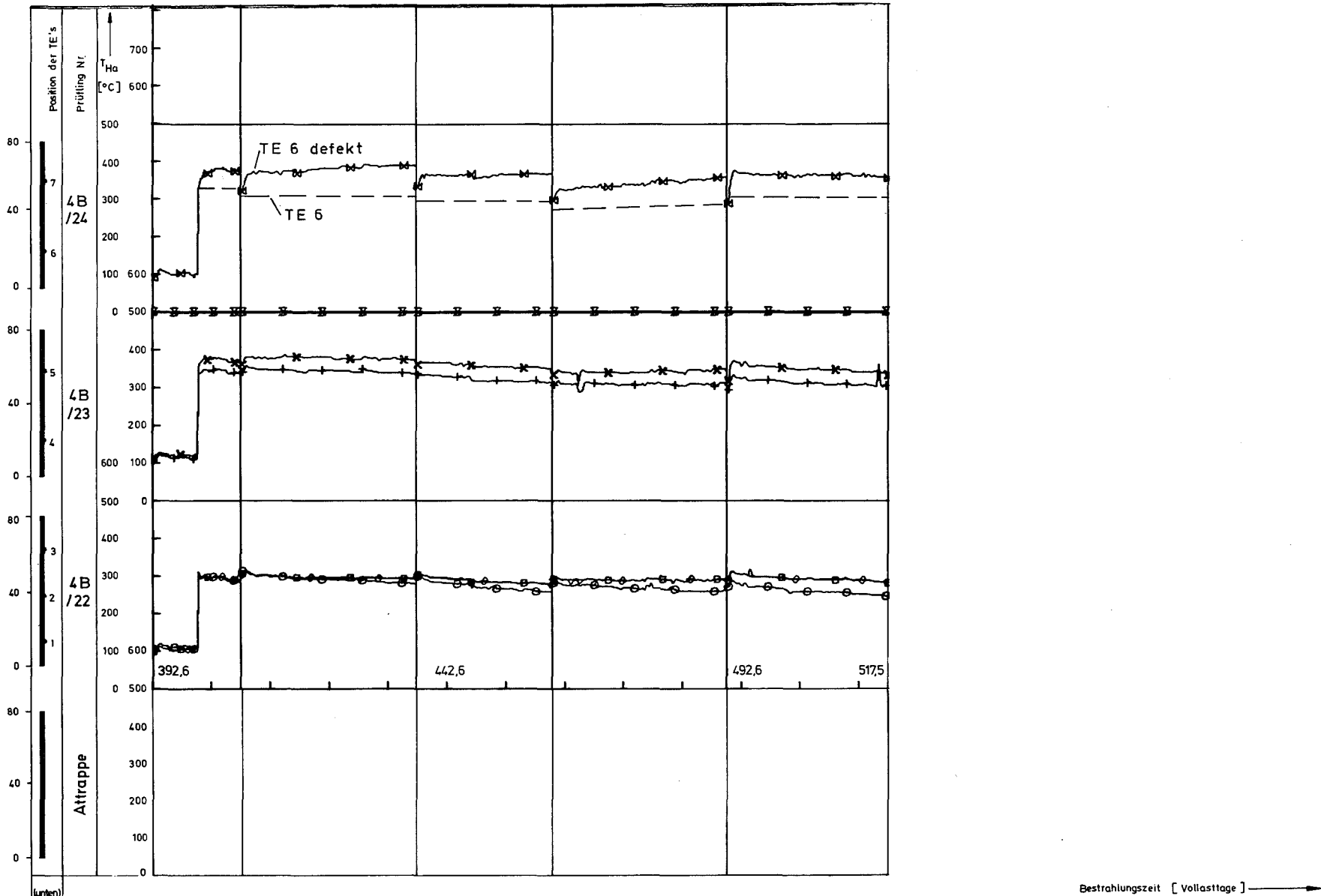


Abb. 32 Kapselversuchsgruppe 4 b KVE 58 Blatt 2 von 3

Hüloberflächentemperaturen der Prütlinge als
Funktion der Zeit

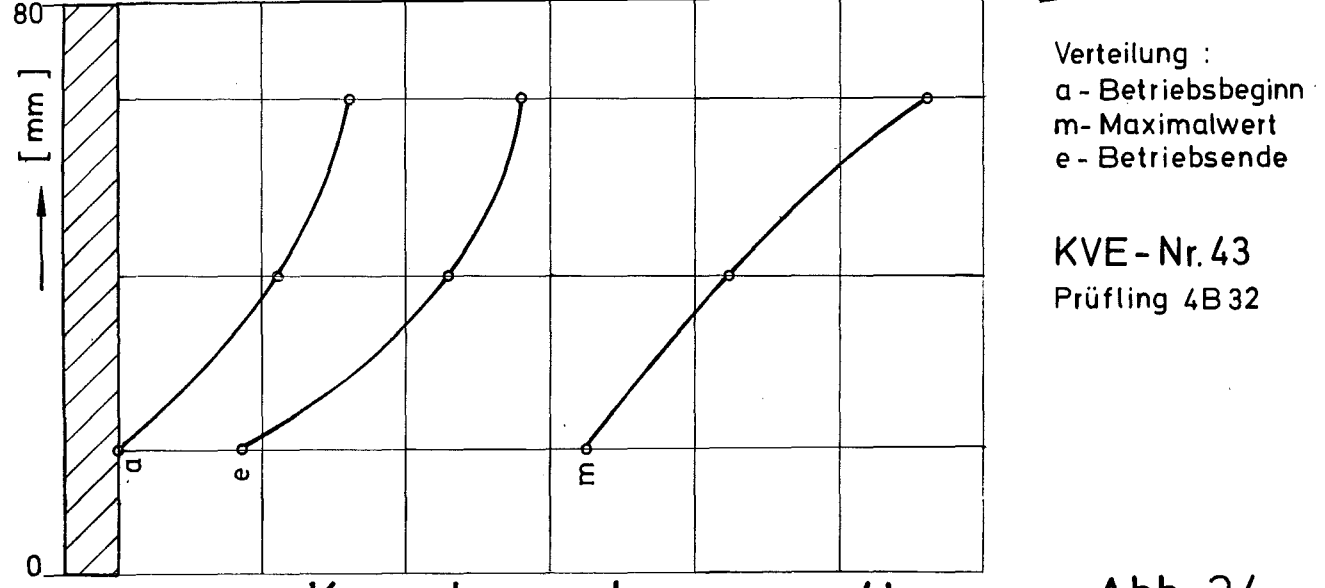
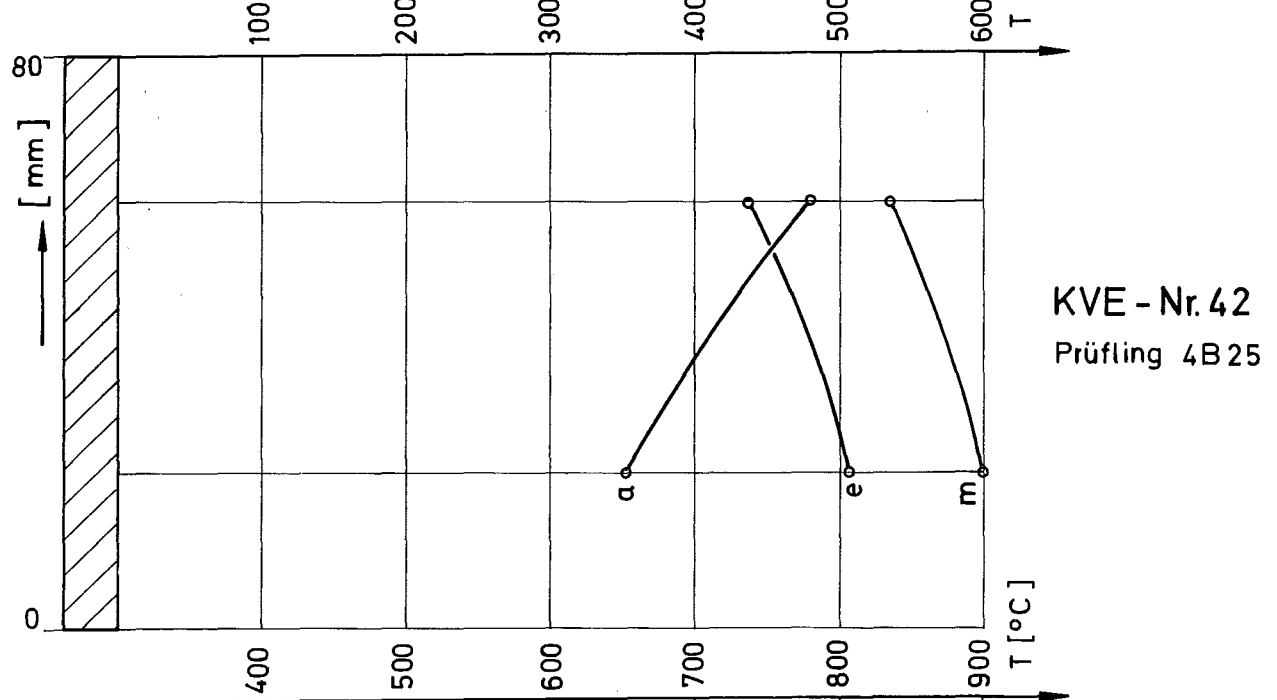
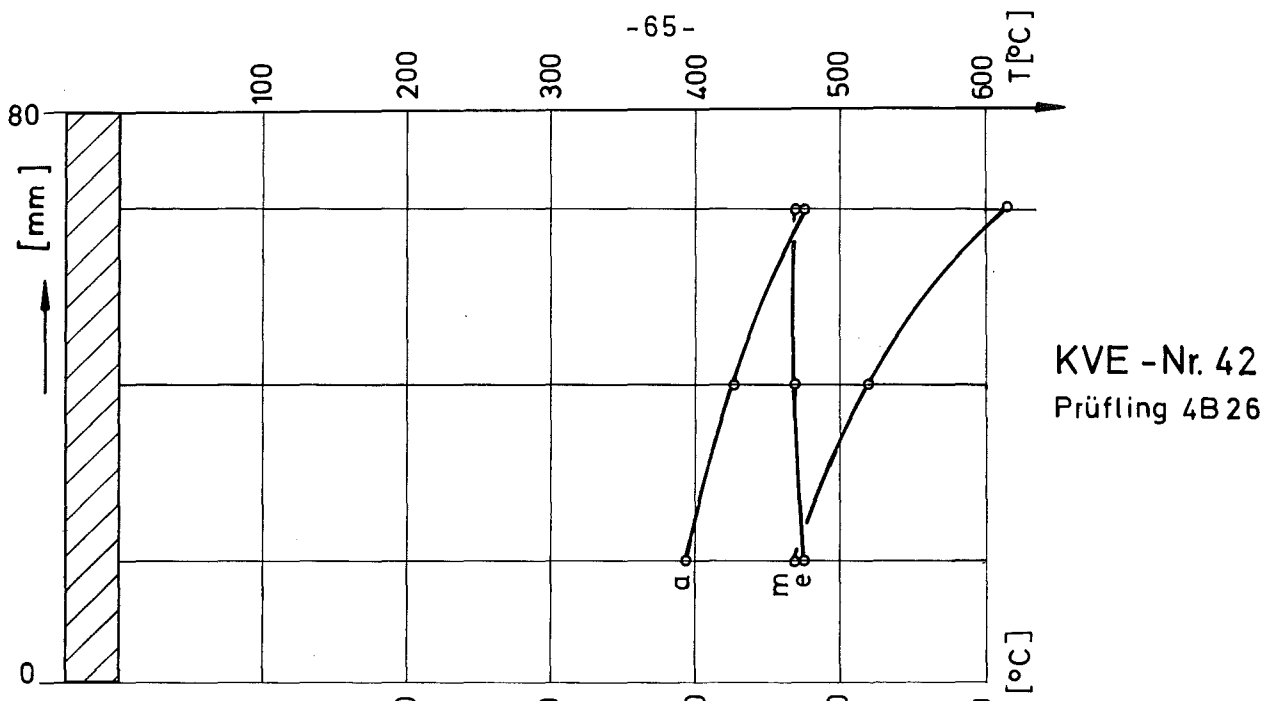
Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	○	□	◇	+	×	⊗	⊗



(unten)
Kapsel
Typ
4a(NaK)

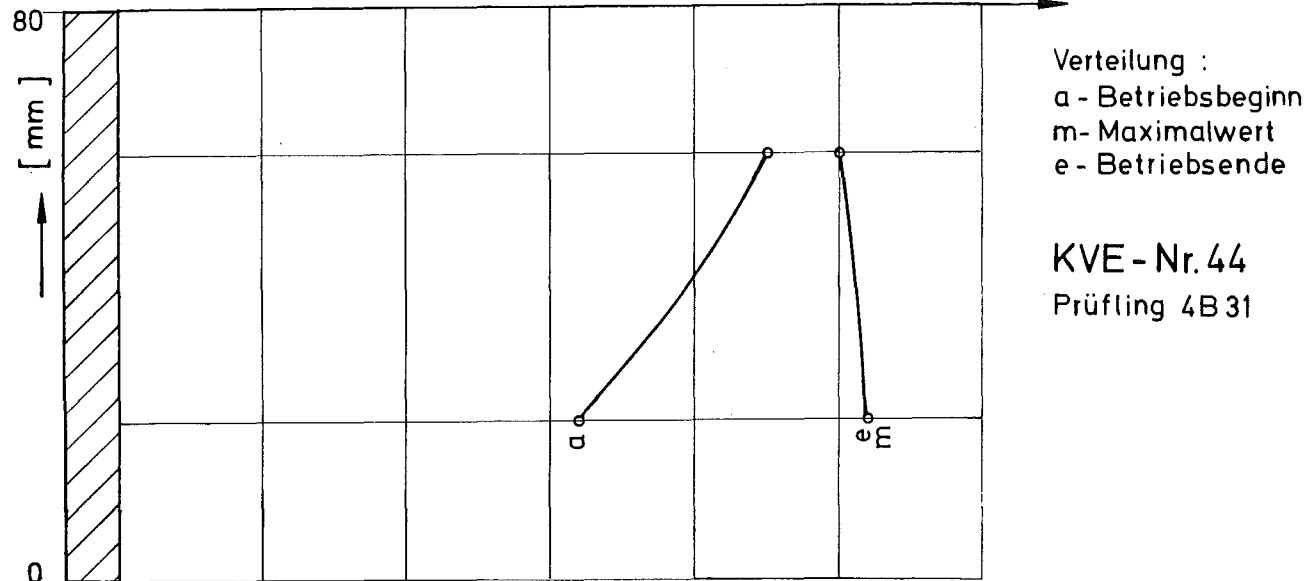
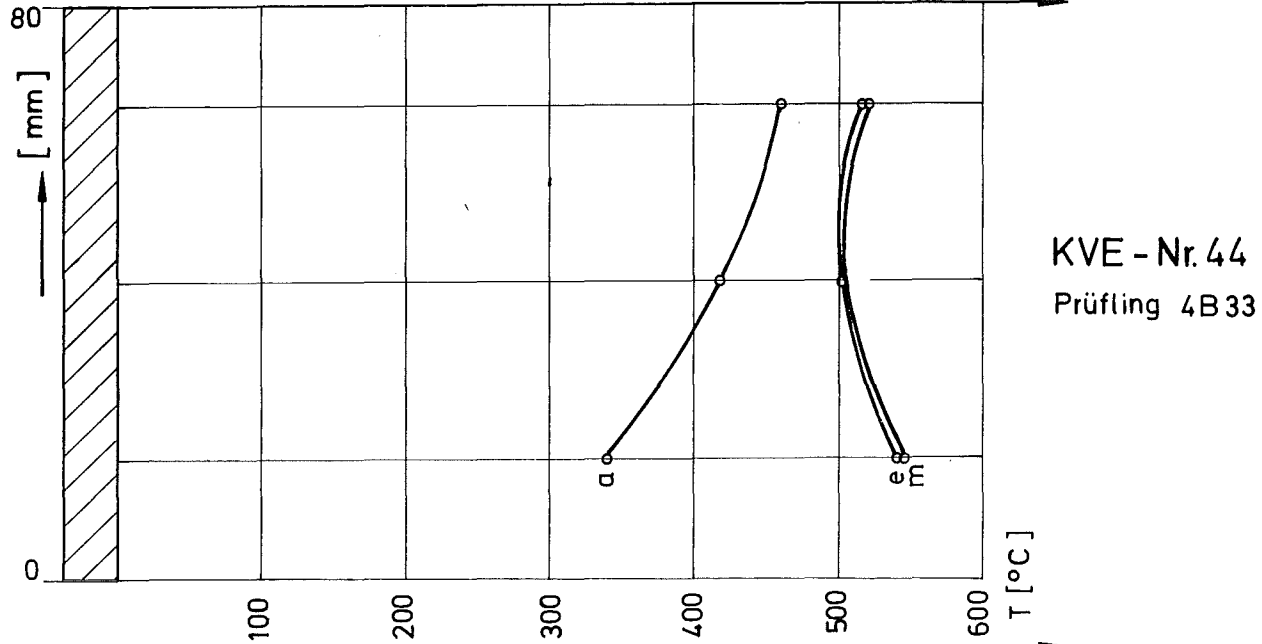
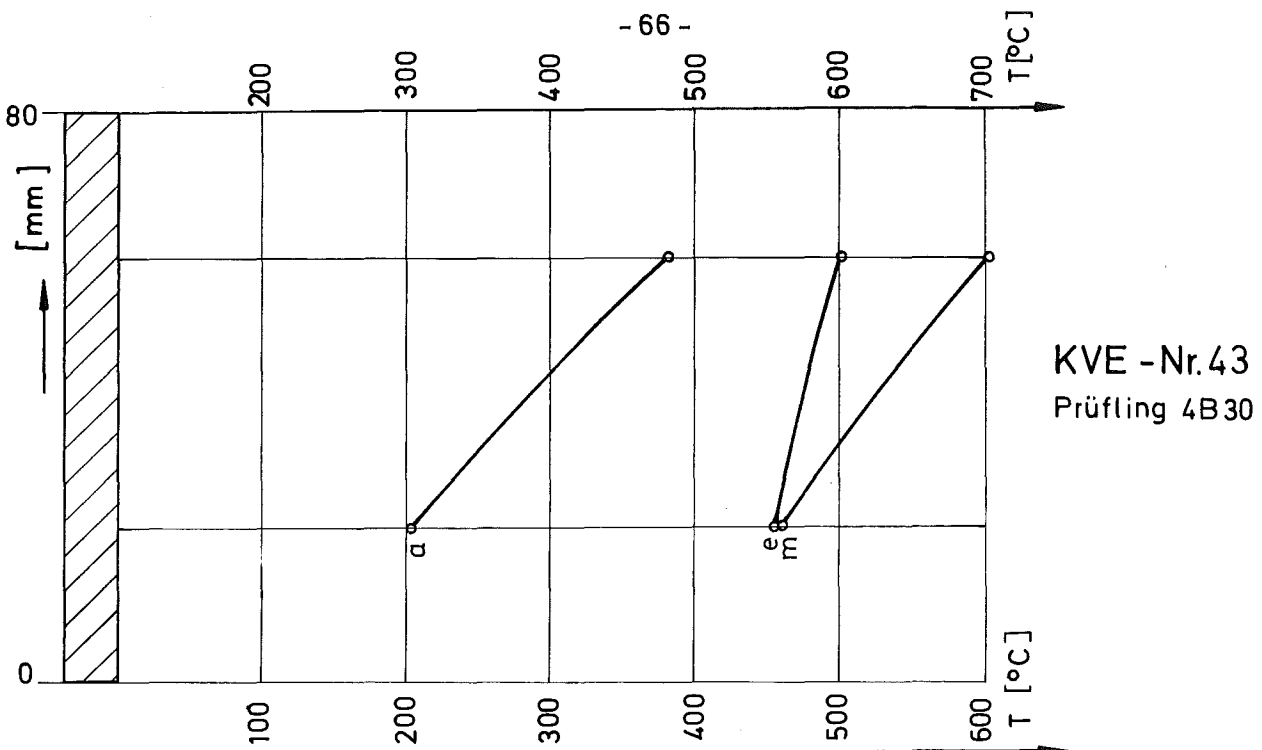
Abb. 33 Kapselversuchsgruppe 4B KVE 58 Blatt3 von 3
Hüloberflächentemperaturen der Prüflinge als
Funktion der Zeit

Thermoelement Nr.	1	2	3	4	5	6	7
Zeichen	o	□	◇	+	x	⊗	⊗



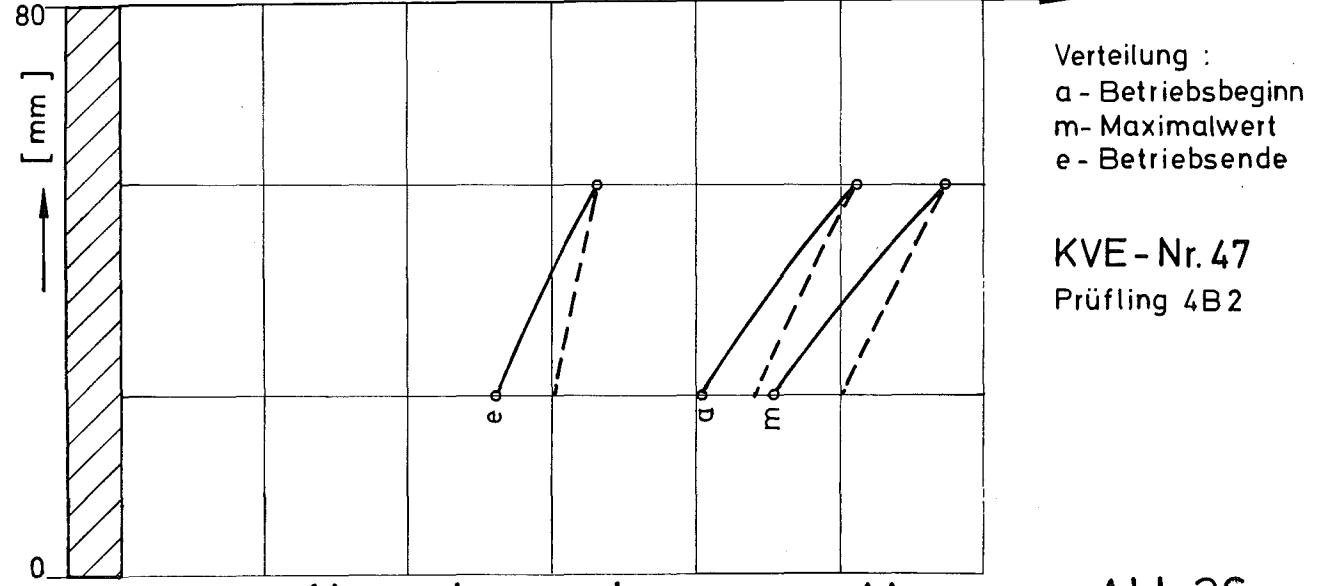
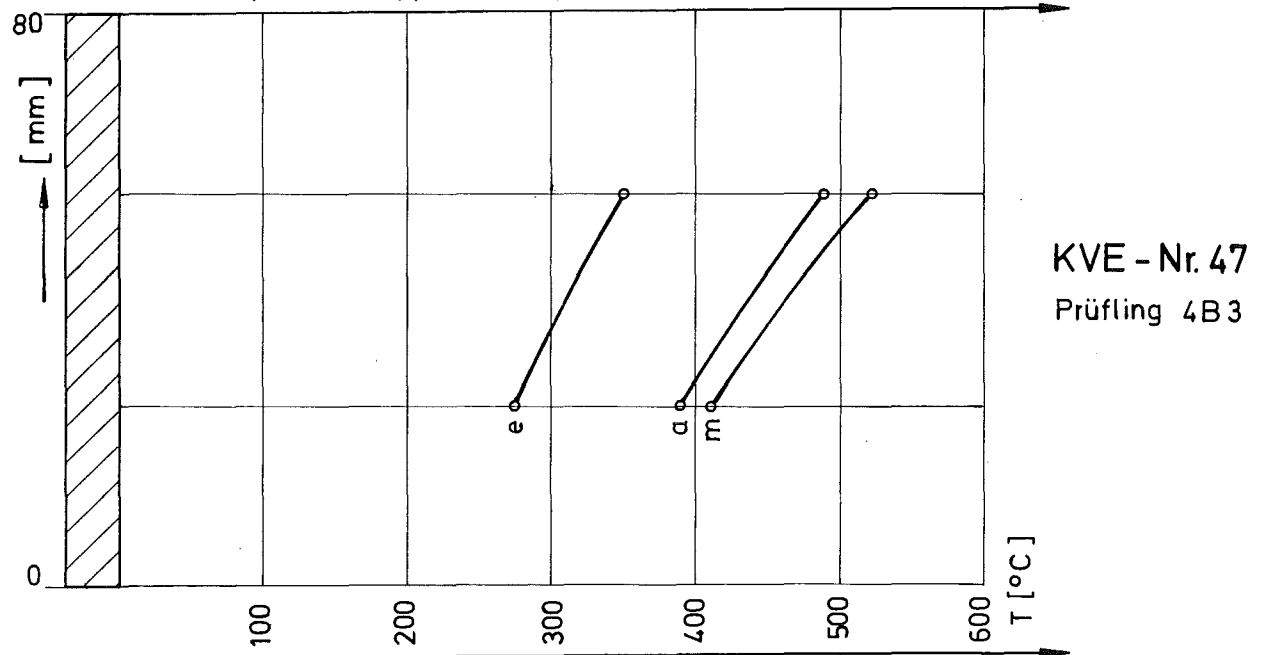
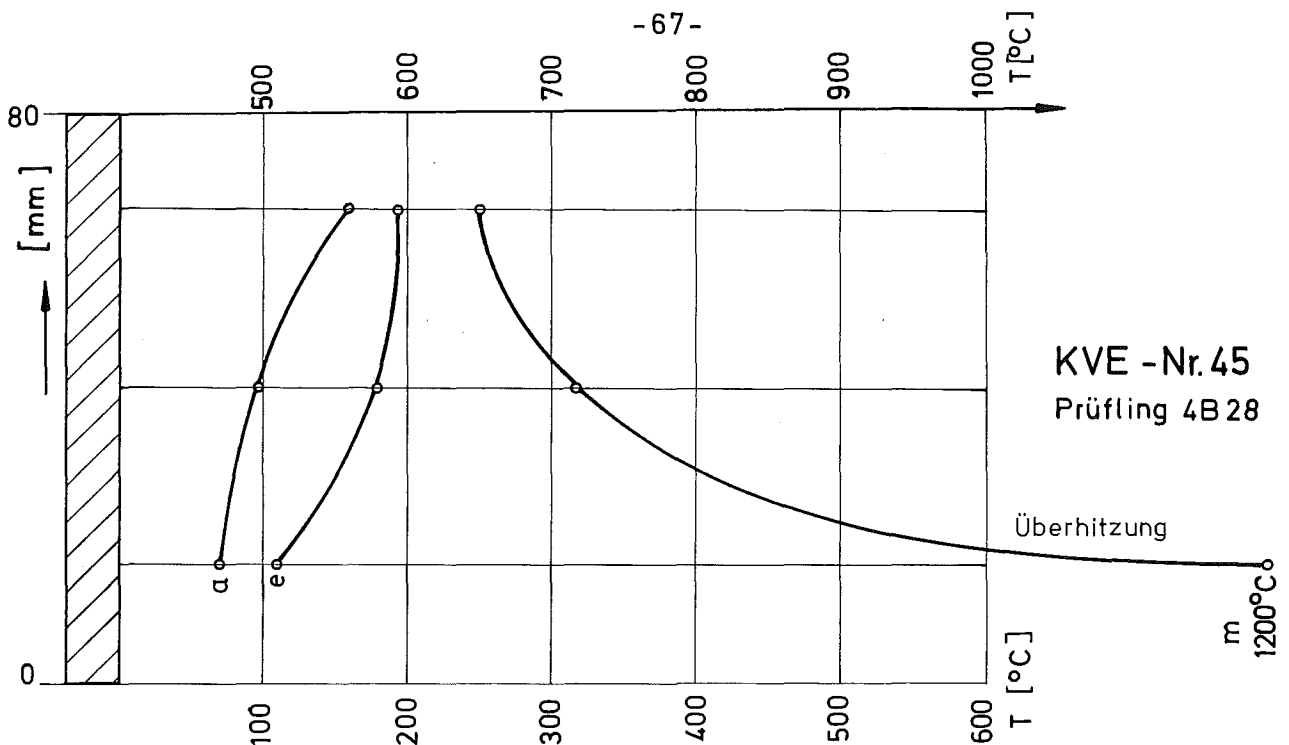
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 34



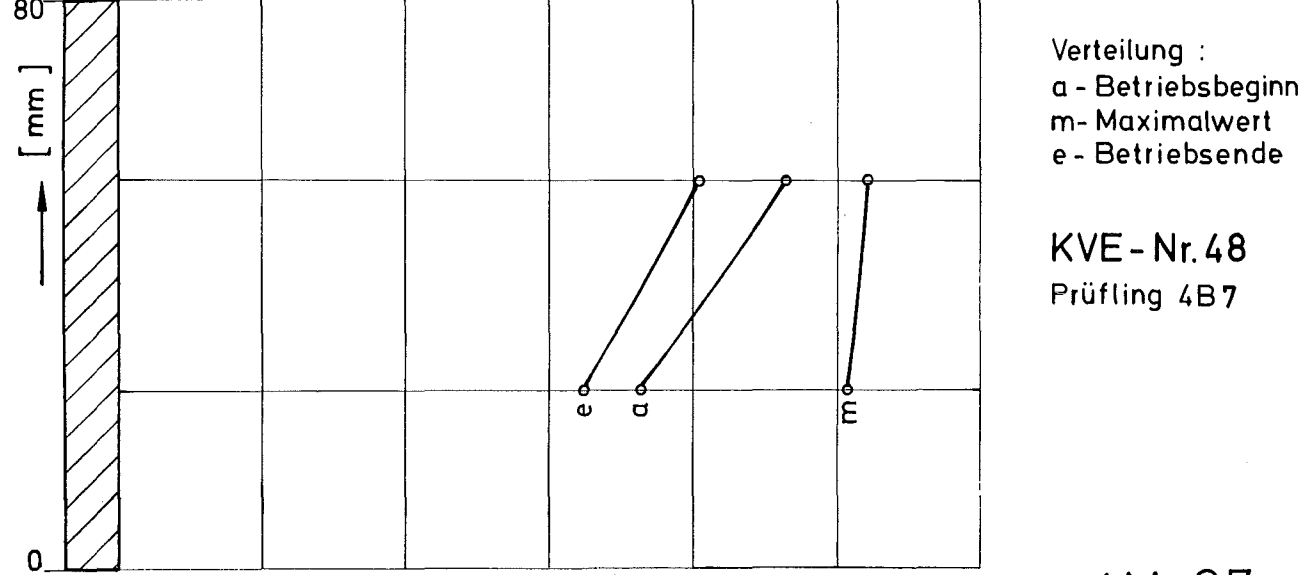
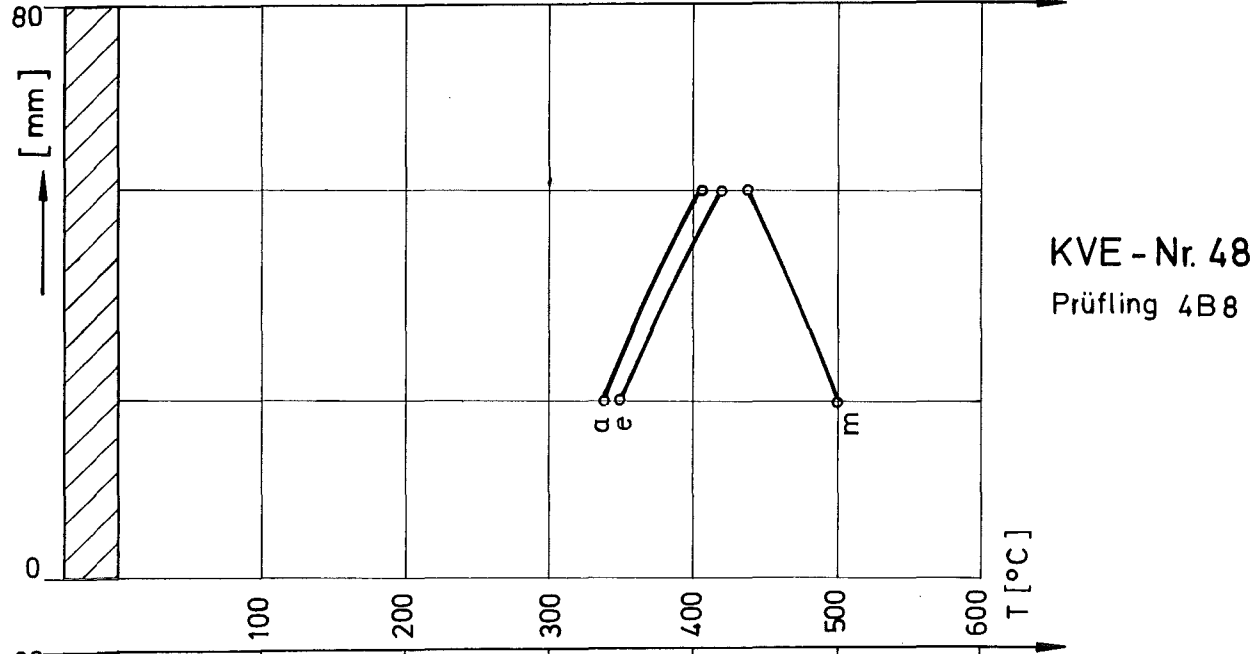
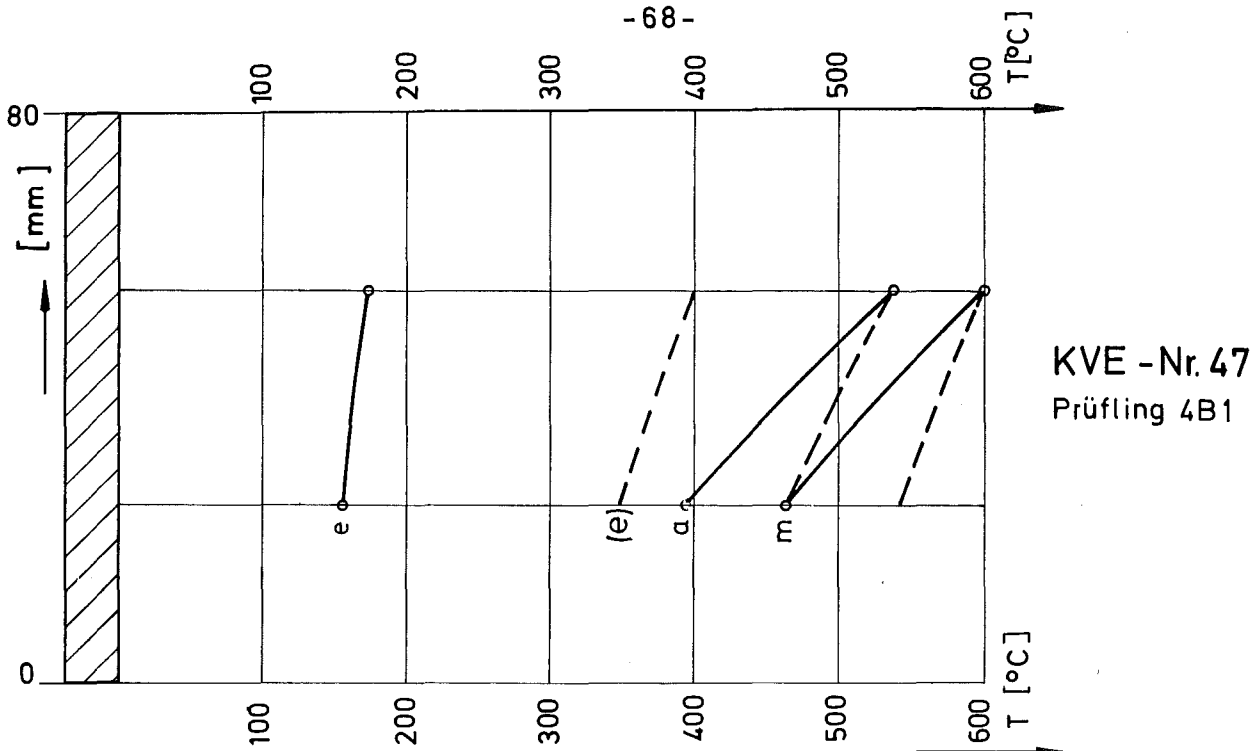
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 35



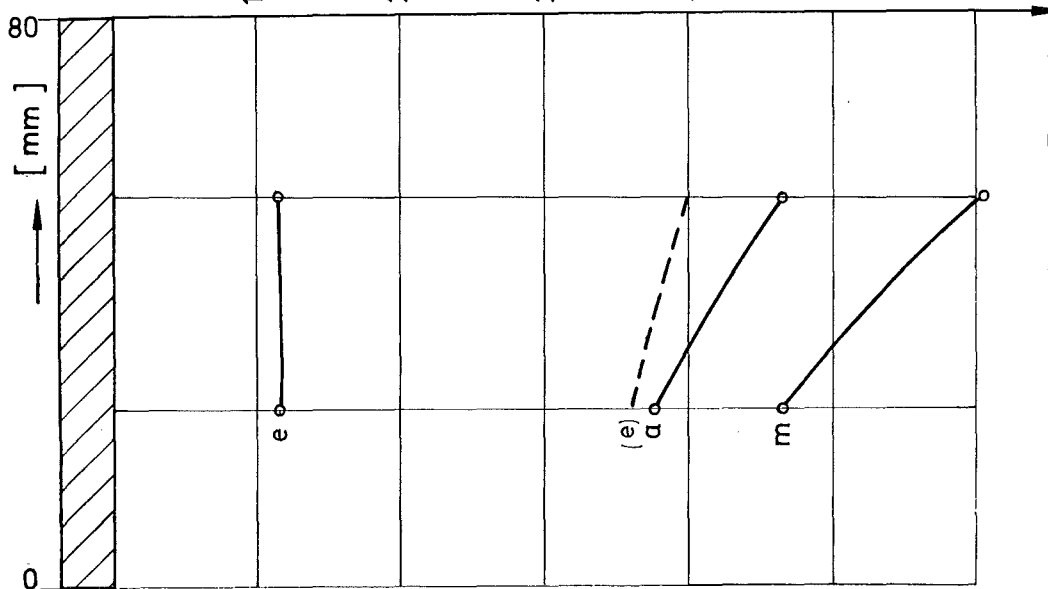
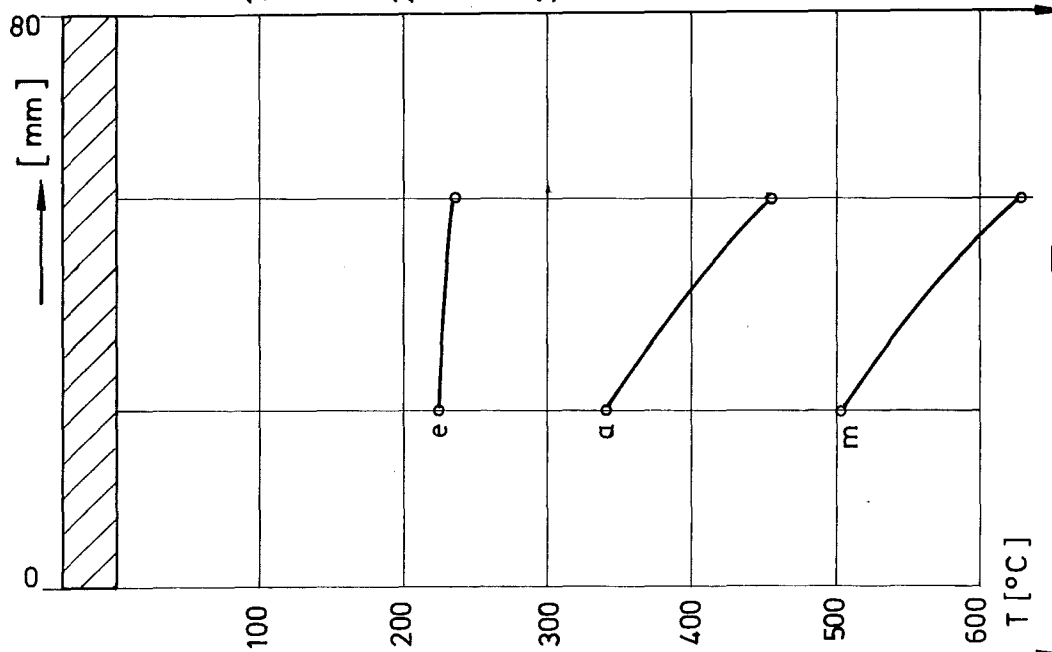
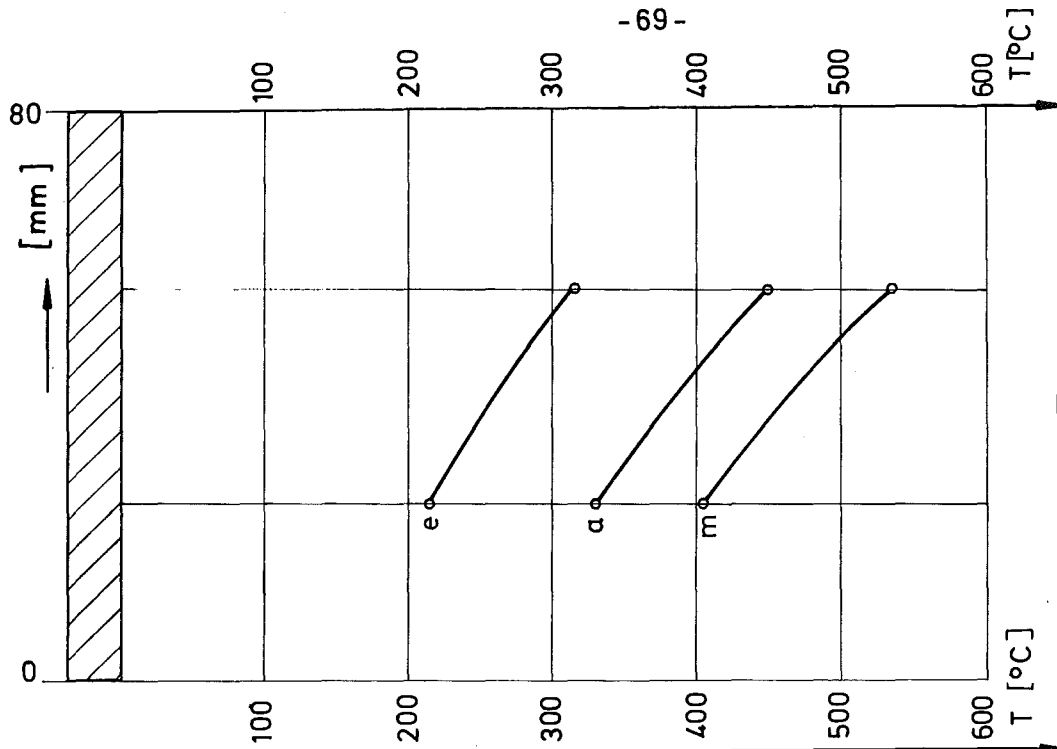
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb.36



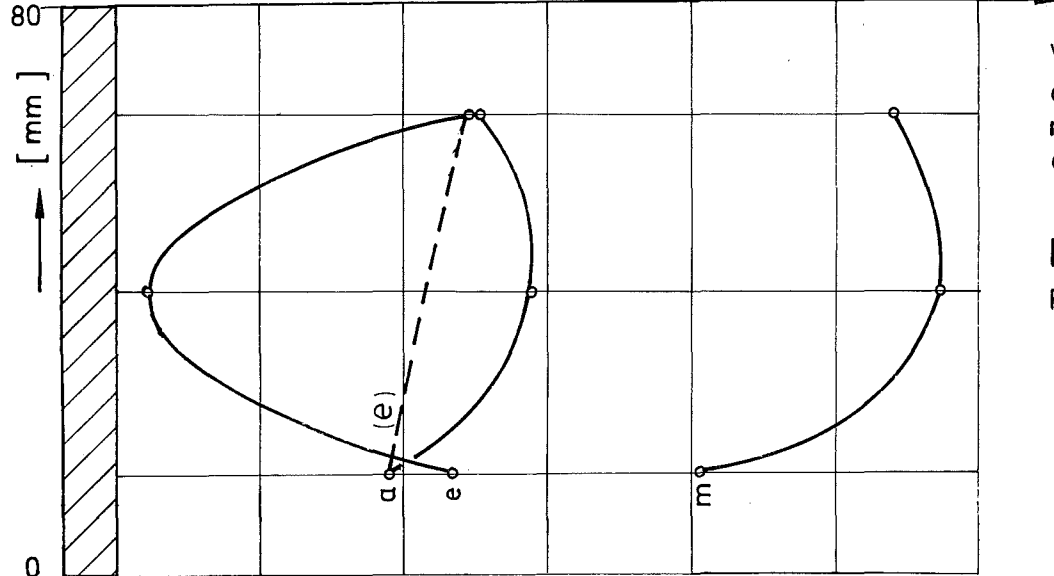
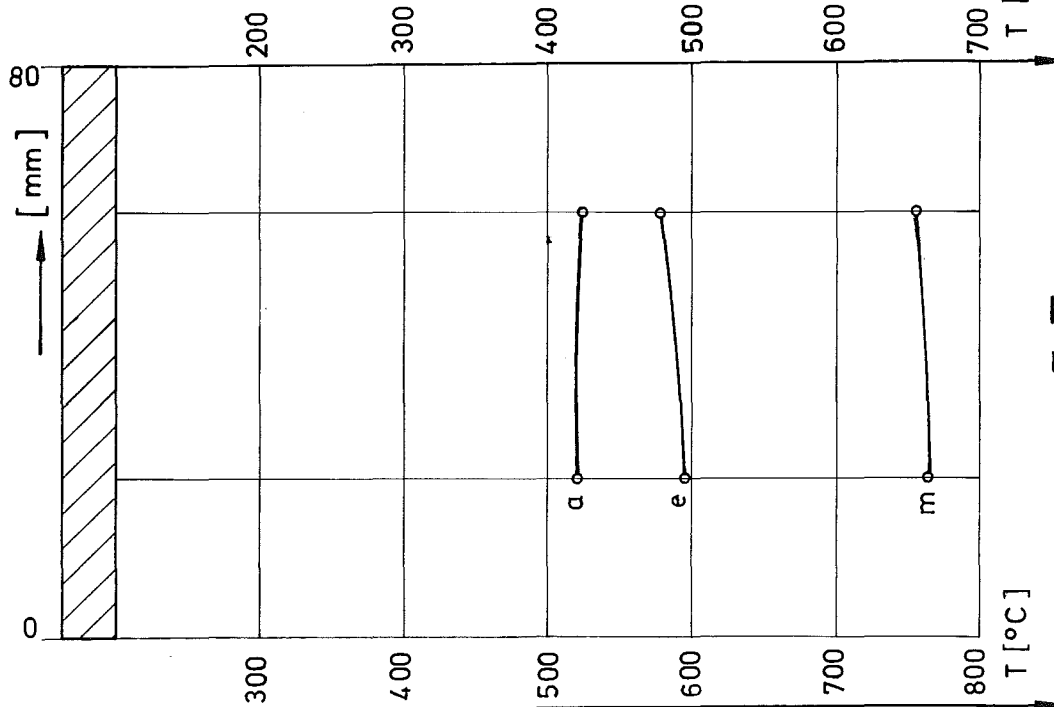
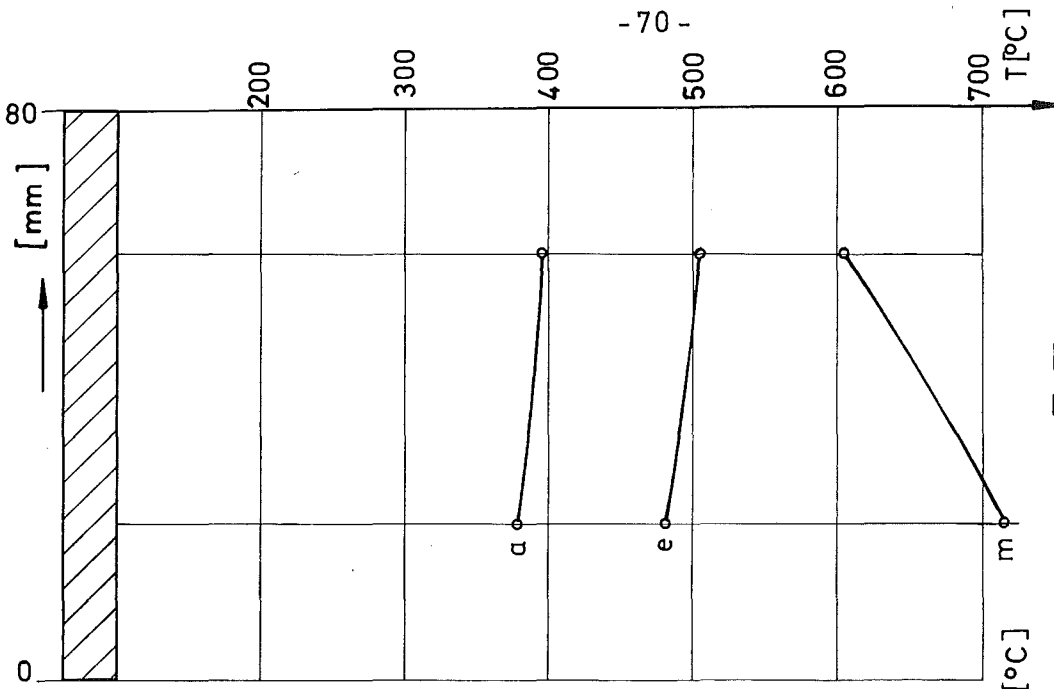
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 37



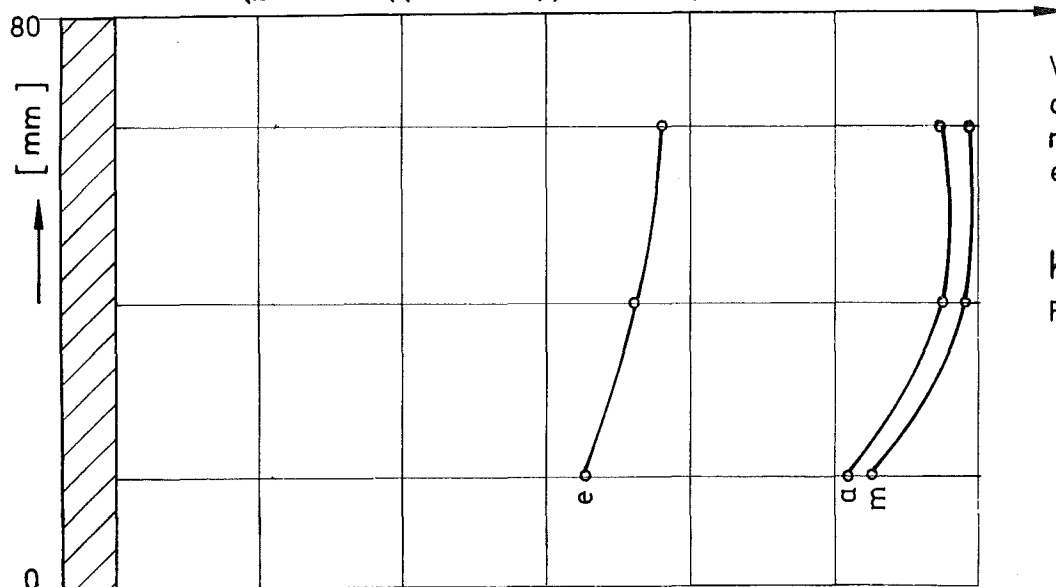
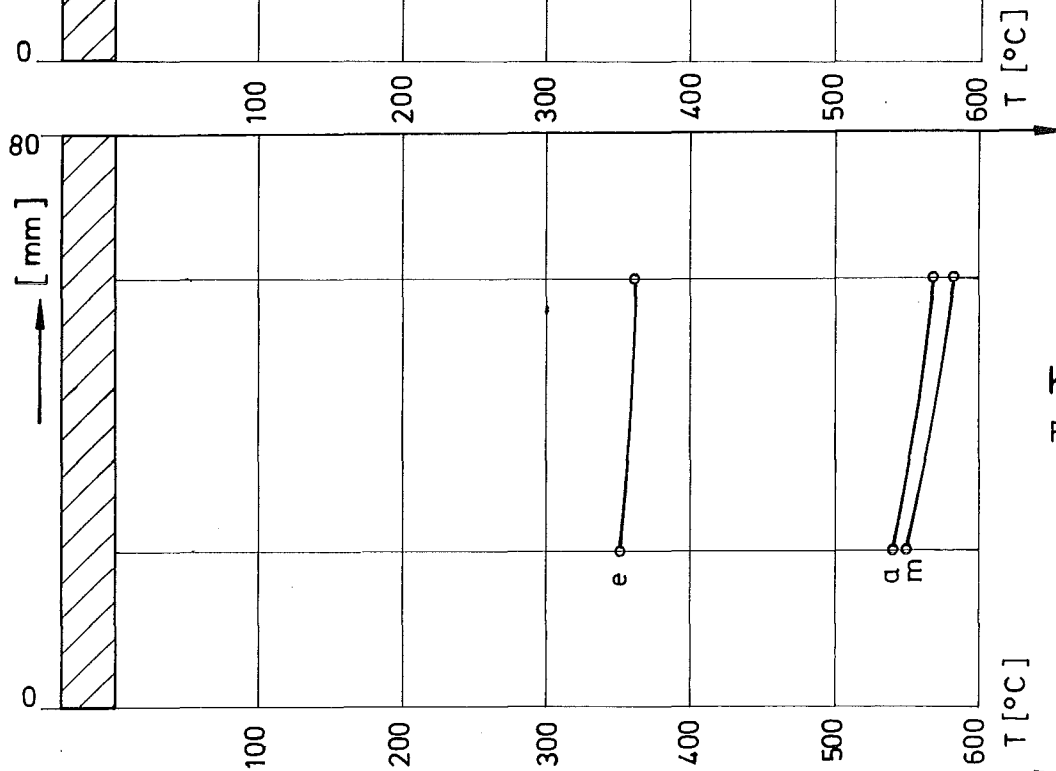
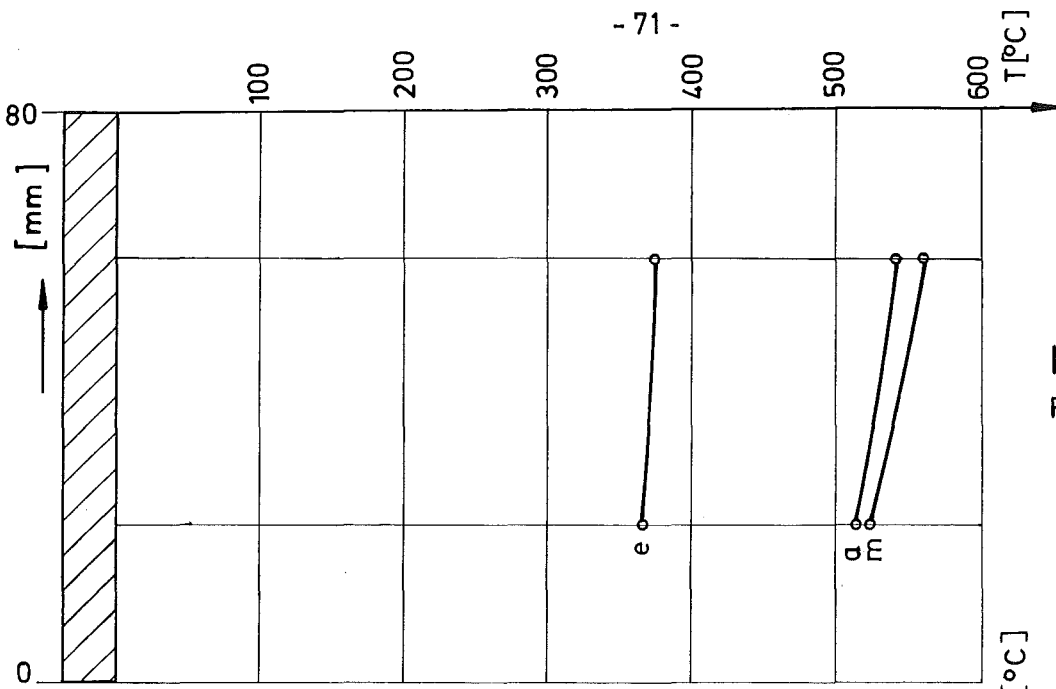
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 38



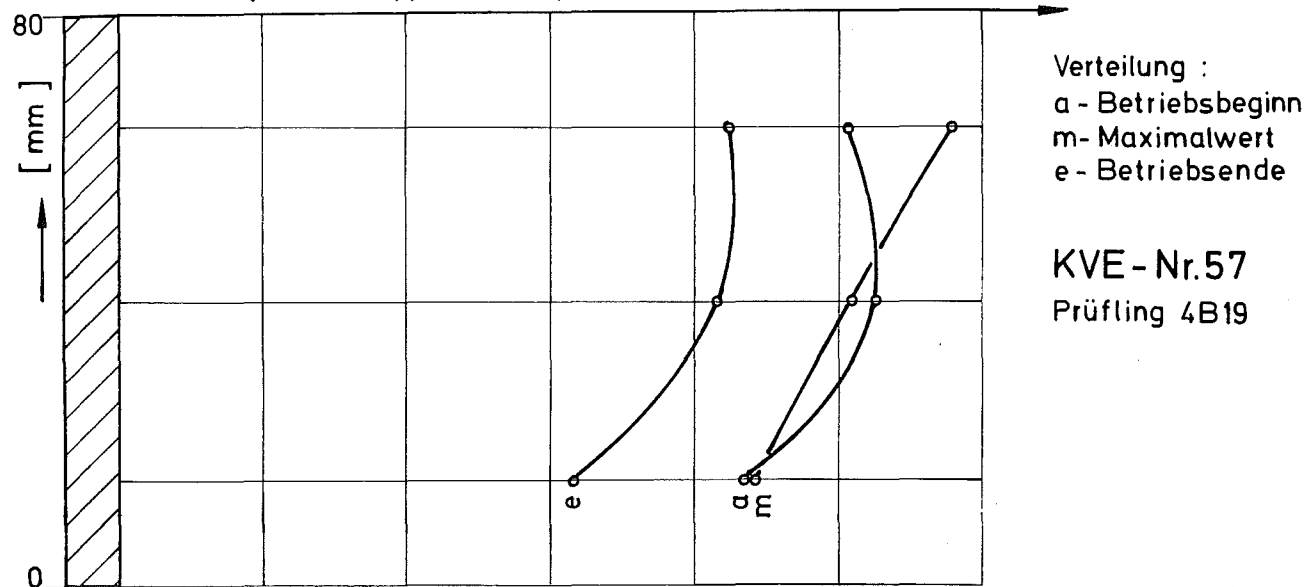
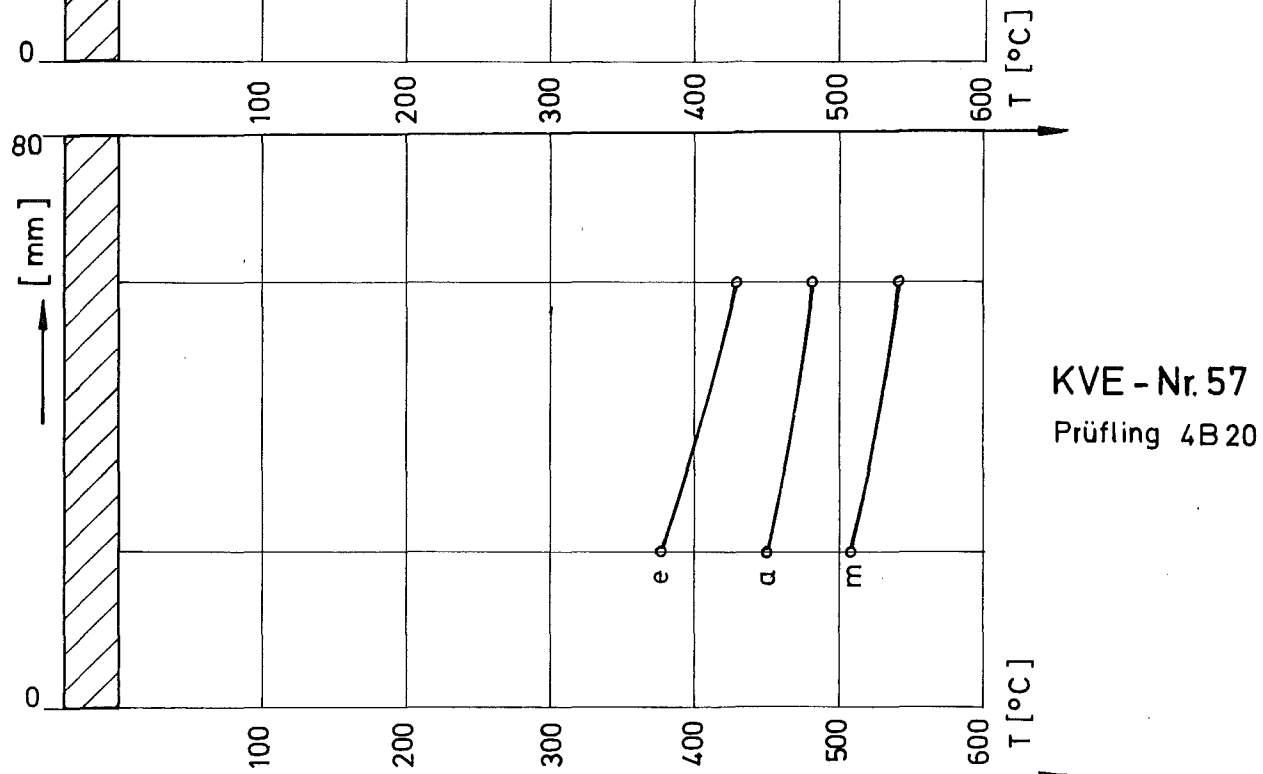
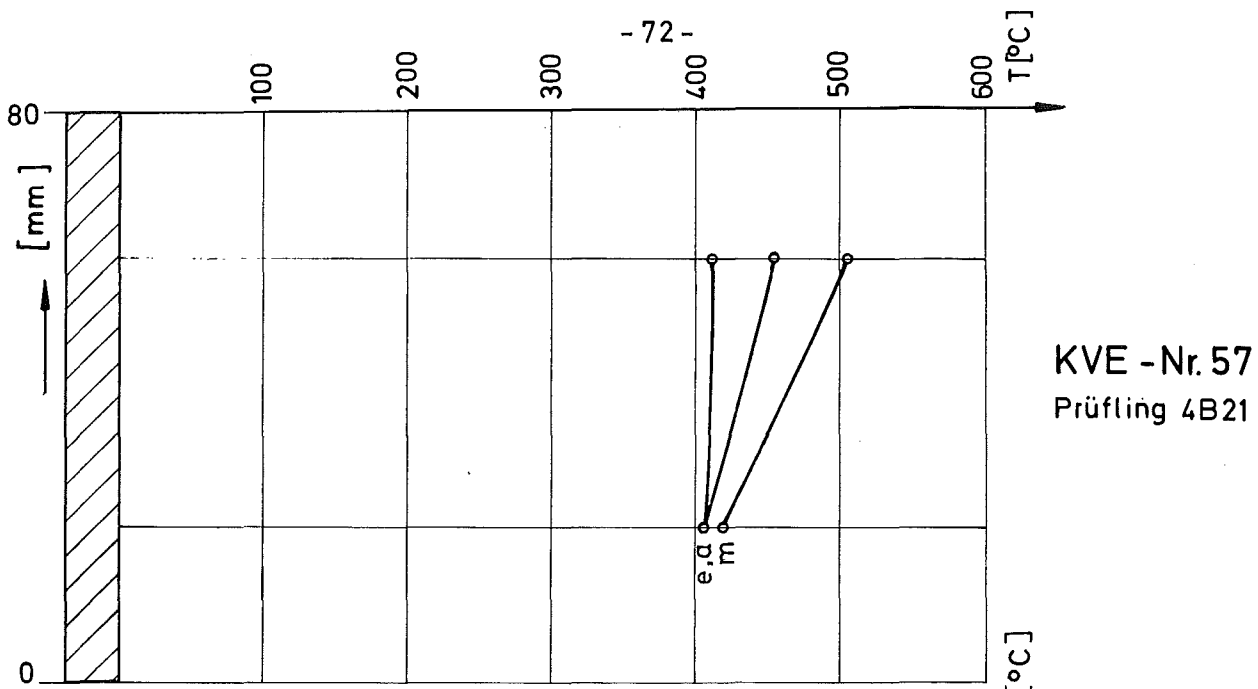
Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 39



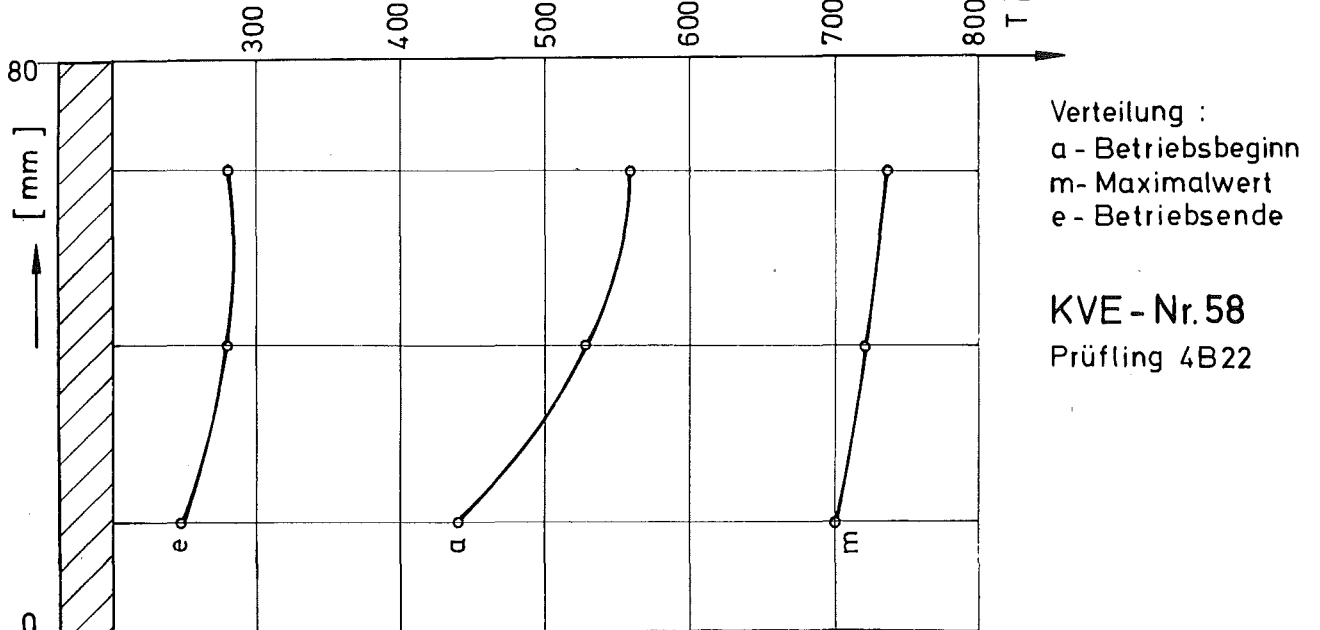
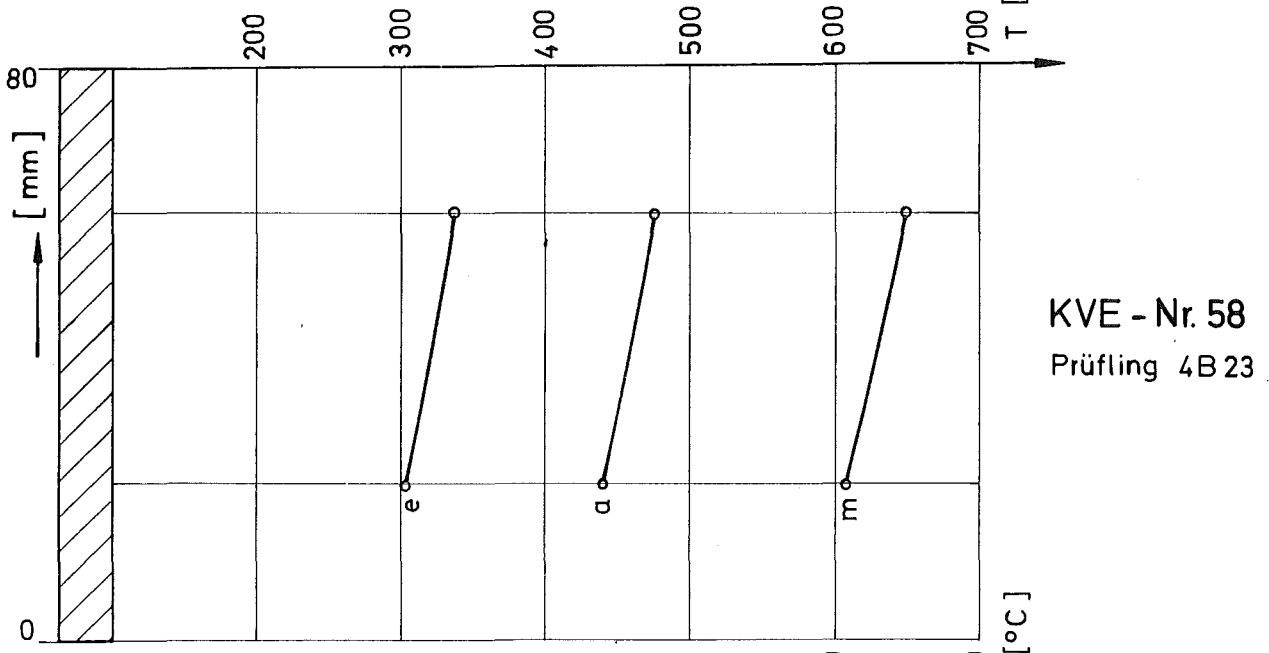
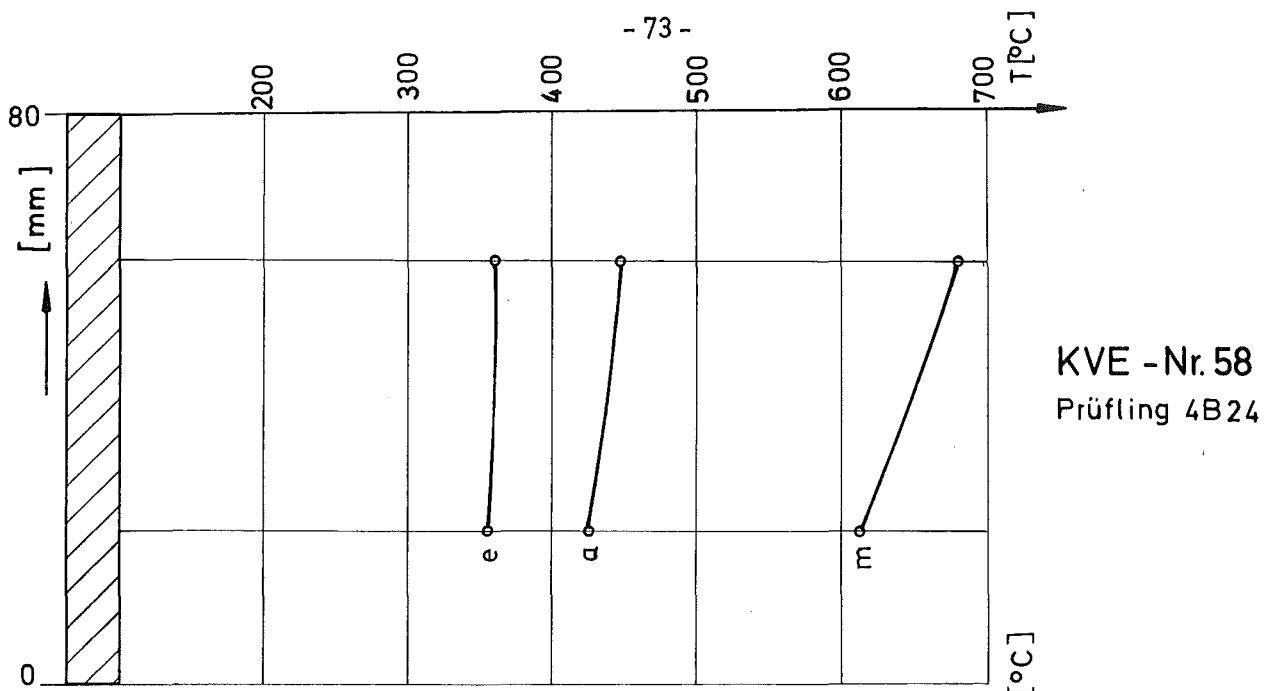
Kapselversuchsgruppe 4 b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 40



Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hülloberfläche)

Abb. 41



Kapselversuchsgruppe 4b
Axiale Temperaturverteilung (Hüelloberfläche)

Abb. 42

Tabelle XVI: Thermische Abbrandwerte der Prüflinge, Kapselversuchsgruppe 4b

K V E Nr.	Prüfling Nr.	Abbrand gemäß TE-Nr. (Mwd/kg M)							Abbrand mittl. Abbrand berechnet
		1	2	3	4	5	6	7	
42	4B/27						23,23		23,23
	4B/26			18,62	21,66	25,71			22,00
	4B/25	17,91	25,24						21,57
43	4B/34						10,26		10,26
	4B/32			8,08	10,10	11,43			9,87
	4B/30	7,48	11,90						9,69
44	4B/35						25,08		25,08
	4B/33			22,33	25,55	28,21			25,36
	4B/31	20,81	26,69						23,75
45	4B/24	11,08	12,85						11,97
	4B/29						17,12		17,12
	4B/28			14,74	17,10	19,56			17,13
47	4B/4							85,35	85,35
	4B/3					63,69	85,54		74,62
	4B/2			65,07	87,44				76,25
	4B/1	43,92 (79)	43,53 (84)						43,73 (81,5)
48	4B/9							79,09	79,09
	4B/8					68,61	74,30		71,46
	4B/7			69,04	83,79				76,41
	4B/5	59,92	78,32						69,12
49	4B/11							99,98	99,98
	4B/12					15,13 (98)	110,38		62,75 (104,0)
	4B/10			96,79	123,78				110,29
	4B/6	56,23 (95)	48,55 (120)						52,39 (107,5)
55	4B/15						60,11	62,23	61,17
	4B/14				66,76	64,84			65,80
	4B/13	58,39	45,64 (68)	63,59					55,87 (63,3)
56	4B/18						57,97	60,42	59,20
	4B/17				59,76	62,75			61,25
	4B/16	56,24	63,68	64,91					61,61
57	4B/21						77,0	81,78	79,39
	4B/20				78,36	87,81			83,08
	4B/19	72,18	91,24	90,85					84,76
58	4B/24						77,27 (150)	109,47	93,37 (105)
	4B/23				99,24	109,09			104,17
	4B/22	86,58	86,68	85,48					86,25

7. Zerstörungsfreie Nachuntersuchung

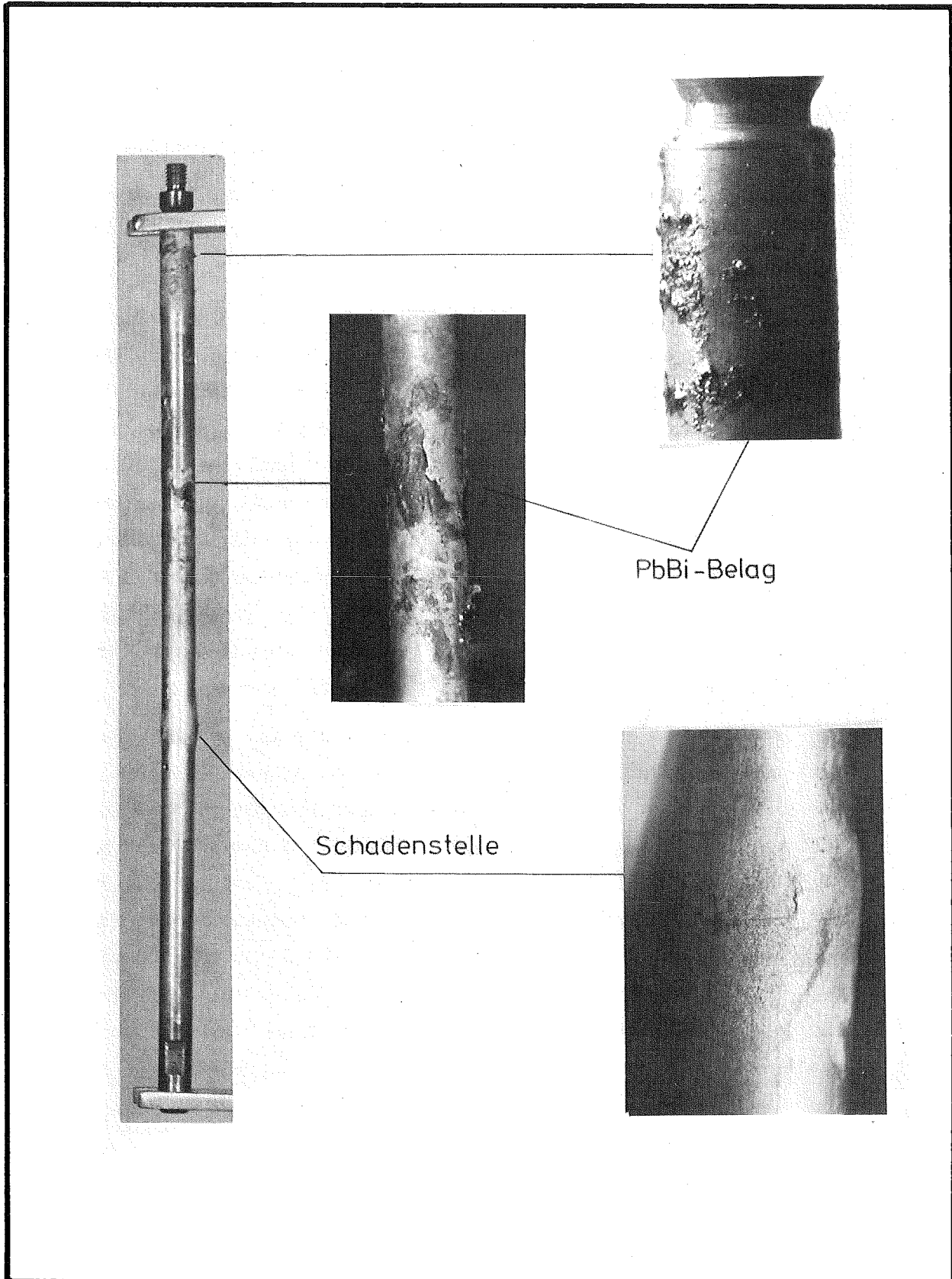
7.1 Äußere Vermessung

An allen Prüflingen wurde vor und nach der Bestrahlung eine Vermessung der äußeren Dimensionen vorgenommen. Sie umfaßte die Bestimmung der Durchmesser entlang der Zylinderachse, die Durchbiegung und die Ermittlung der Länge.

Die Durchmesserbestimmungen wurden auf einer Meßbank mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers als Meßtaster durchgeführt, wobei die Meßwerte kontinuierlich mit einem Makrograph-Formgestalt-Schreiber aufgezeichnet wurden. Der Meßkopf hatte die Form eines Keiles mit abgerundeten Schneiden. Es wurden jeweils vier Mantellinien im Winkelabstand von 90° an jedem Prüfling abgetastet und die einander gegenüberliegenden Meßlinien zur Ermittlung des Durchmessers herangezogen. Daneben wurde an drei Punkten entlang der Stabachse (Anfang- Mitte - Ende) mit der gleichen Meßeinrichtung ein Polardiagramm des Durchmessers geschrieben. Die relativen Messungen wurden durch Eichung mit einem Meisterbolzen in absolute Meßwerte umgewandelt.

Bei der hier beschriebenen Vermessungsmethode ist es für eine genaue Messung unerläßlich, daß der Prüfling genau zentral zwischen zwei Dorne eingespannt wird. Schon geringe Abweichungen von der Ideal-Linie führen zu merklichen Ungenauigkeiten. Außerdem ergibt sich aus der geringen Breite des Schreiberpapiers, das mit 45 mm Gesamtbreite nur geringe Zeigerausschläge aufzuzeichnen gestattet, eine Einschränkung derart, daß die Meßwerte nur um den Faktor 50 vergrößert dargestellt werden können. Die Meßmethode wurde daher schon frühzeitig als ungeeignet angesehen und mit der Entwicklung einer neuen Anlage begonnen.

Die vibrierten Prüflinge (KVE 42, 43, 44, 45) wurden nur zerstörungsfrei untersucht. Die Betatronauswertung hinsichtlich Längenveränderung der Brennstoffsäule ergab (s. 7.2) zum Teil beachtliche Zuwachswerte (+ 12,6 %), was im Nachhinein das Stabversagen erklärt (Hineinwachsen in Wärmedämmung - mangelnde Wärmeabfuhr). Abb. 43 zeigt einen solchen Prüfling mit den Schadensstellen.



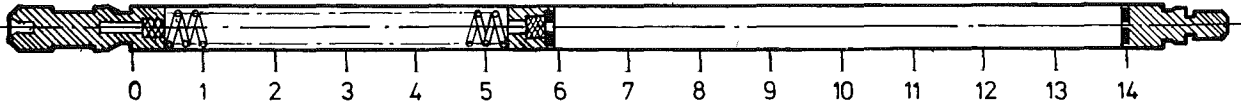
Prüfling 4B/32
nach der Bestrahlung

Abb. 43

Die neue Apparatur wurde ab KVE 47 benutzt und zwar bei den KVE's 47 und 48 für die Nachvermessung der bestrahlten Stäbe und beim KVE 57 für die Vor- und Nachvermessung der Prüflinge.

Eine besondere Schwierigkeit ergab sich beim Vergleich einiger Meßwerte, die nach der Bestrahlung aufgenommen wurden, mit den Vorbestrahlungsdaten. In der Vorvermessung war hier noch ein Meßtaster benutzt worden, der anstelle einer Meßschneide einen Kugelkopf (Durchmesser der Kugel 2,5 mm) enthielt. Bei dieser Art der Vermessung müssen noch größere Anforderungen an ein genau zentrisches Einspannen des Prüflings in der Meßbank gestellt werden, wenn nicht unzulässig hohe Ungenauigkeiten auftreten sollen. Um die Fehler bei den allein interessierenden Durchmesseränderungen klein zu halten, wurde daher hier von einer anderen Art der Vorvermessung ausgegangen. Vor der Bestrahlung war der Durchmesser der Stäbe an mehreren (3 bis 4) Orten entlang der Stabachse mit Hilfe eines Mikrometers zusätzlich bestimmt worden. Nur an diesen Orten wurden die Durchmesser, so wie sie sich aus der Auswertung der Makrograph- bzw. Wendelschriebe bei der Nachuntersuchung ergaben, verglichen. Damit wurden zumindest die Unsicherheiten der Vorvermessung eliminiert. Die KVE 42, 44 und 45 wurden so ausgewertet. KVE 43 wurde nicht vermessen, da die beiden untersten Prüflinge defekt waren. Ab KVE 47 wurden auch bei der Vorvermessung Meßschneiden benutzt. Ab KVE 57 hingegen wurden die Vor- und Nachvermessungen mittels Wendelschrieben ausgeführt. In den Abb. 44 bis 54 werden die Durchmesseränderungen in % über der Prüflingslänge dargestellt. Bei den vibrierten Prüflingen (4B/25 bis 4B/34) zeigt sich eindeutig eine Durchmesserabnahme über die gesamte Prüflingslänge, während die mit Tabletten gefüllten Stäbe (4B/1 bis 4B/24) im Bereich der Brennstoffsäule durchweg Durchmesserzunahmen aufweisen. Die Zunahmen sind für die Prüflinge der KVE 47, 48 und 49 zum Teil recht beachtlich (bis zu 1,75 %), während sie für die KVE 55, 56, 57 und 58 wesentlich geringer ($\sim 0,5$ %) sind. Eine Abbrandabhängigkeit der Durchmesseränderung kann nicht festgestellt werden.

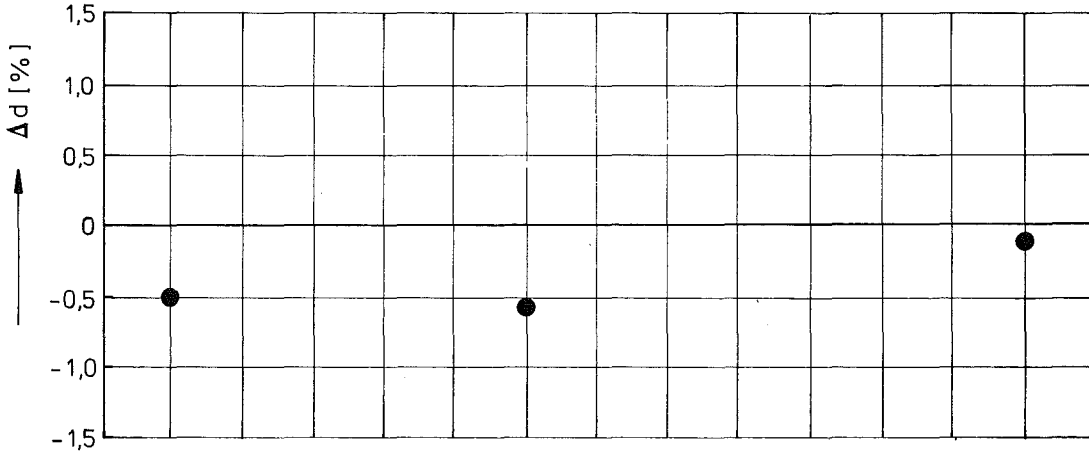
Die zusammen mit dem Durchmesser bestimmten Durchbiegungen der Prüflinge nach der Bestrahlung sind in Tabelle XVII wiedergegeben. Die Meßwerte beziehen sich auf 2 um 90° gegeneinander verdrehten Ebenen. Entsprechend der geringen Stablänge wurden für die Durchbiegung nur kleine Abweichungen von der Geradheit beobachtet.



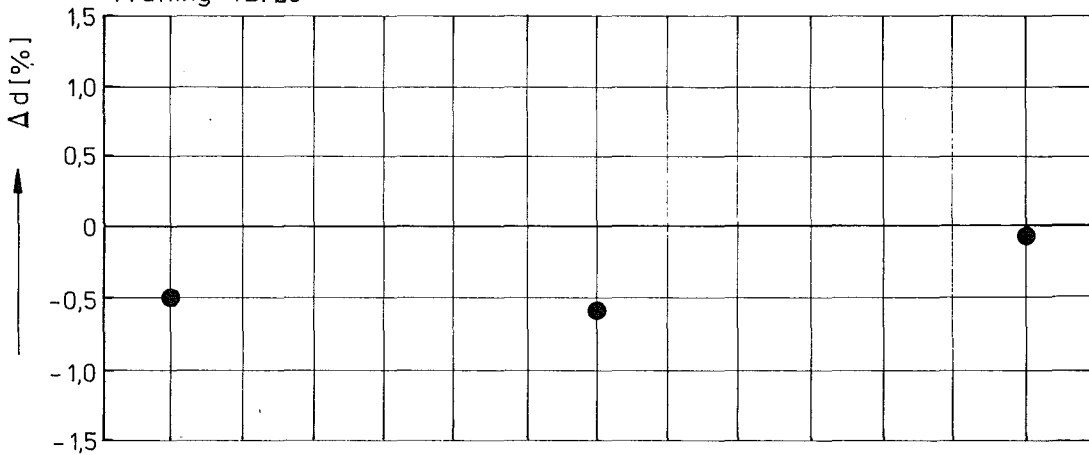
● aus Mikrometermessung

KVE 42

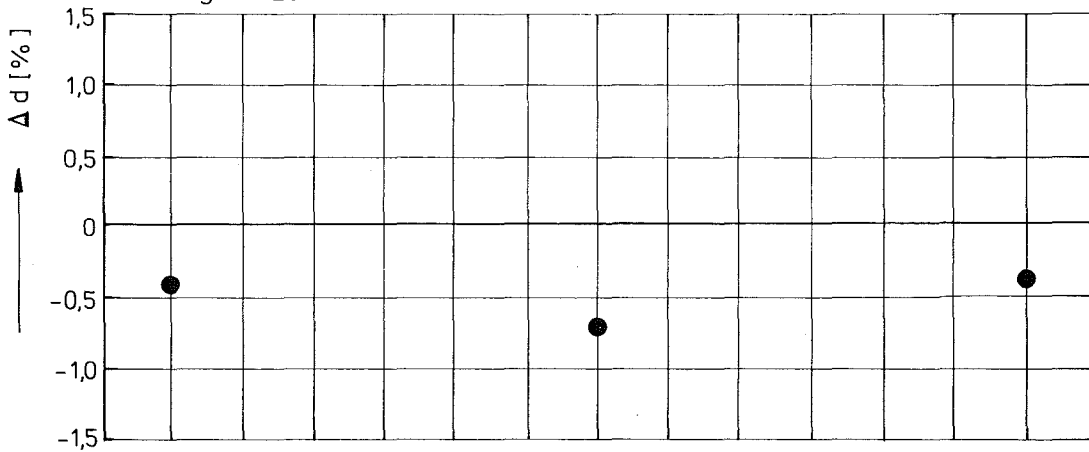
Prüfling 4B/27



Prüfling 4B/26

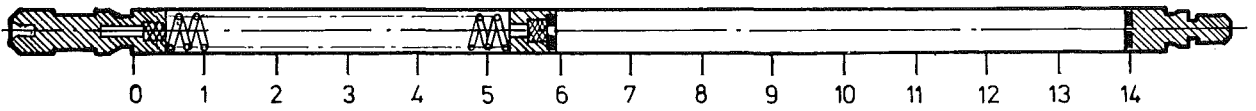


Prüfling 4B/25



Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

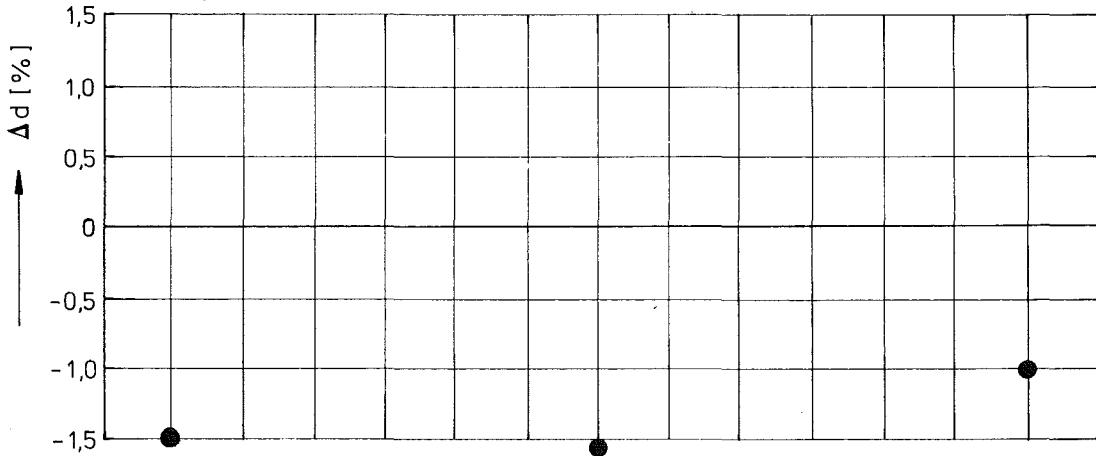
Abb. 44



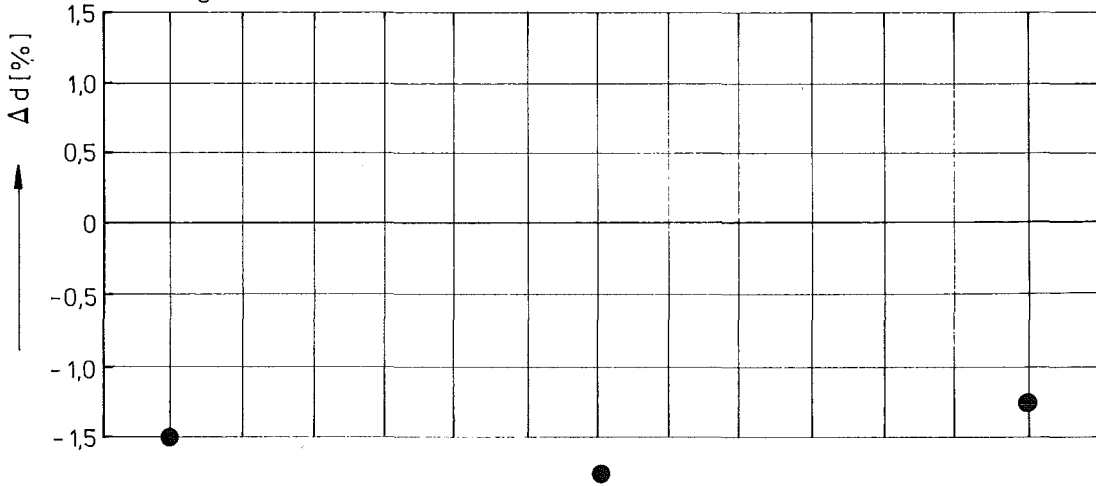
● aus Mikrometermessung

KVE 44

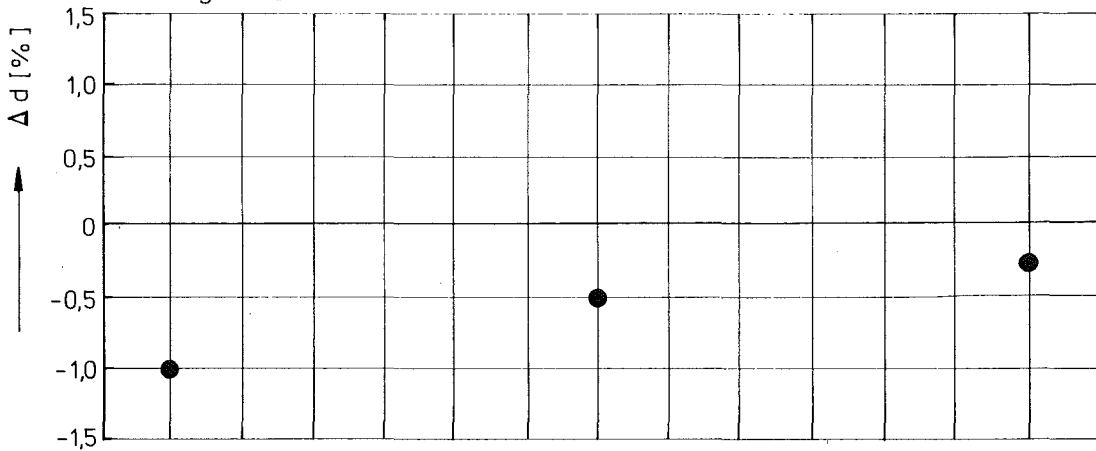
Prüfling 4B/35



Prüfling 4B/33

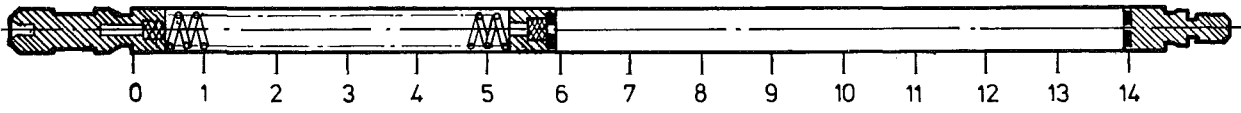


Prüfling 4B/31



Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

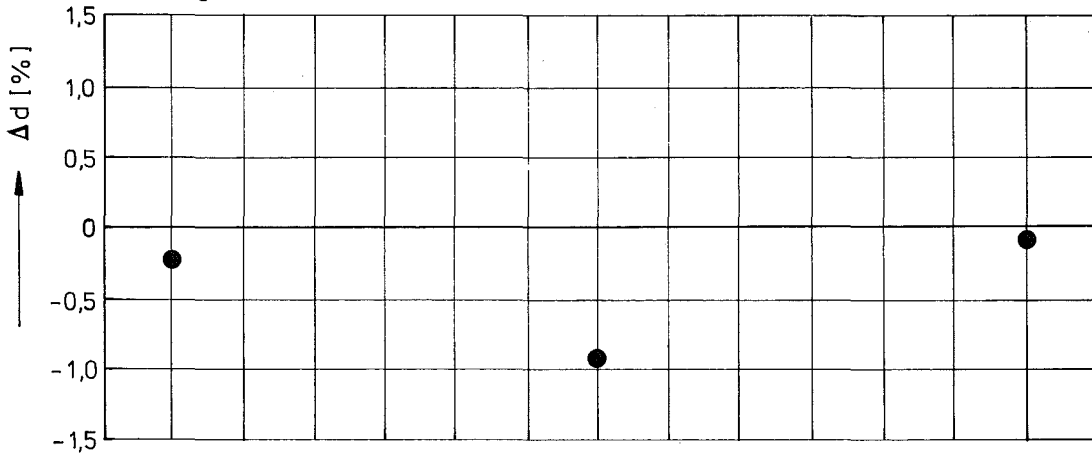
Abb. 45



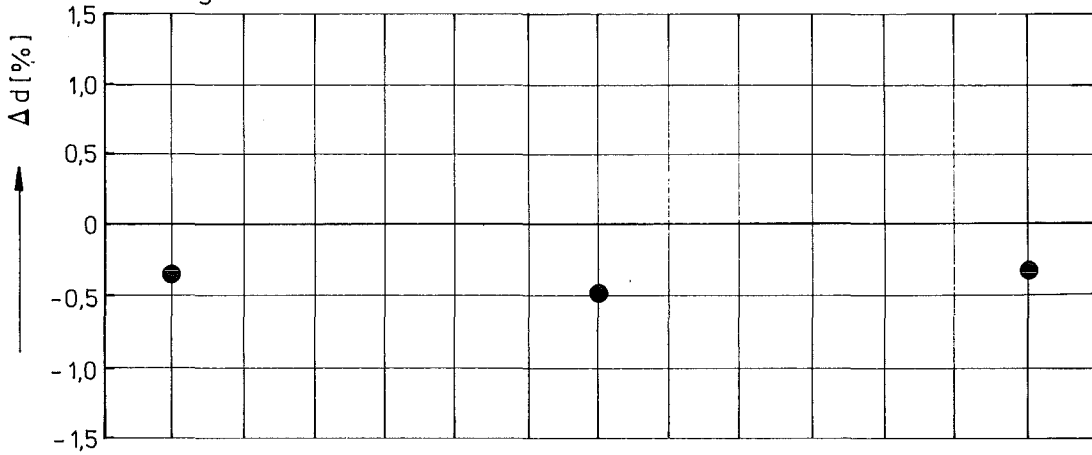
● aus Mikrometermessung

KVE 45

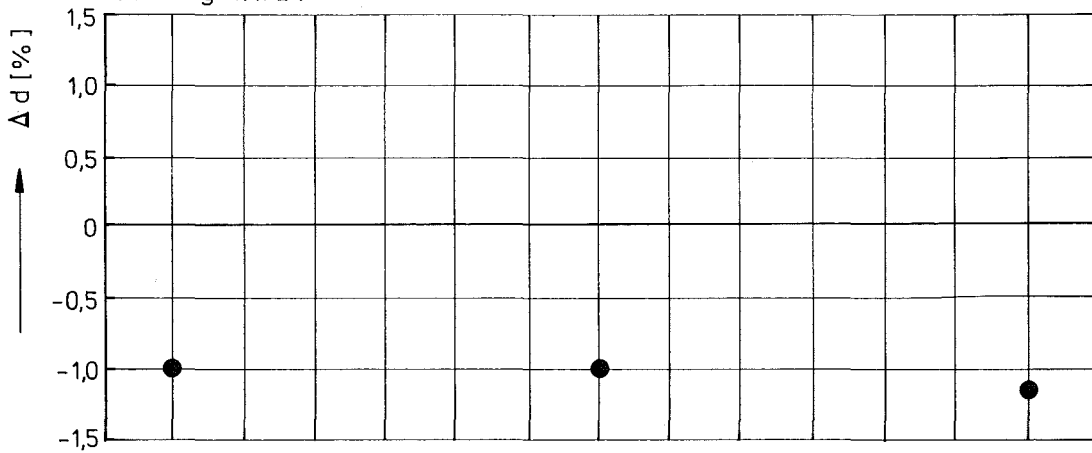
Prüfling 4B/29



Prüfling 4B/28

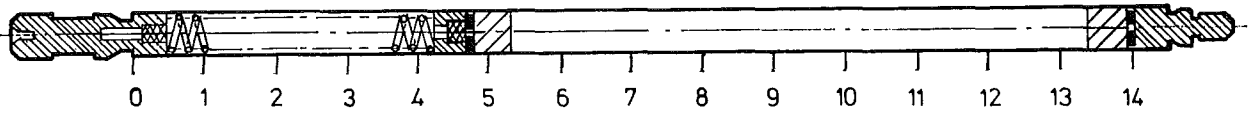


Prüfling 4A/24



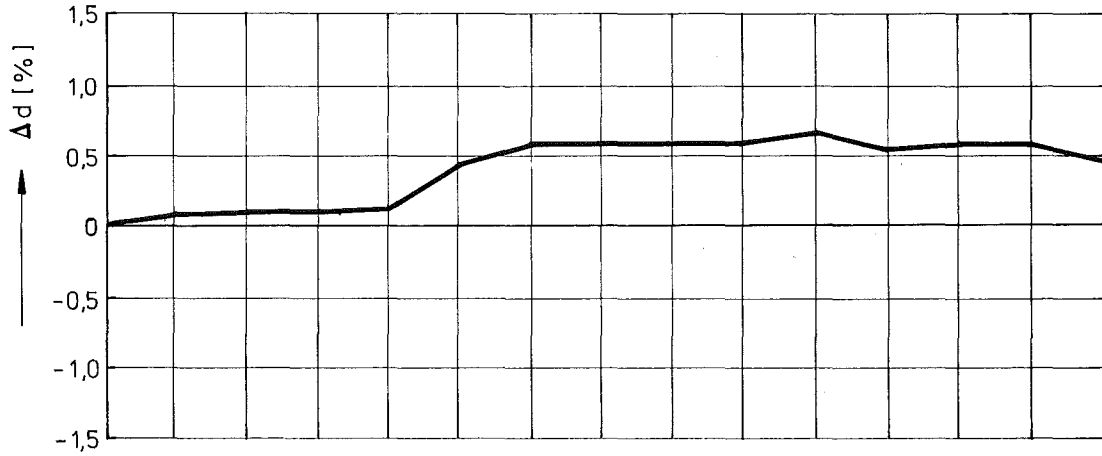
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 46

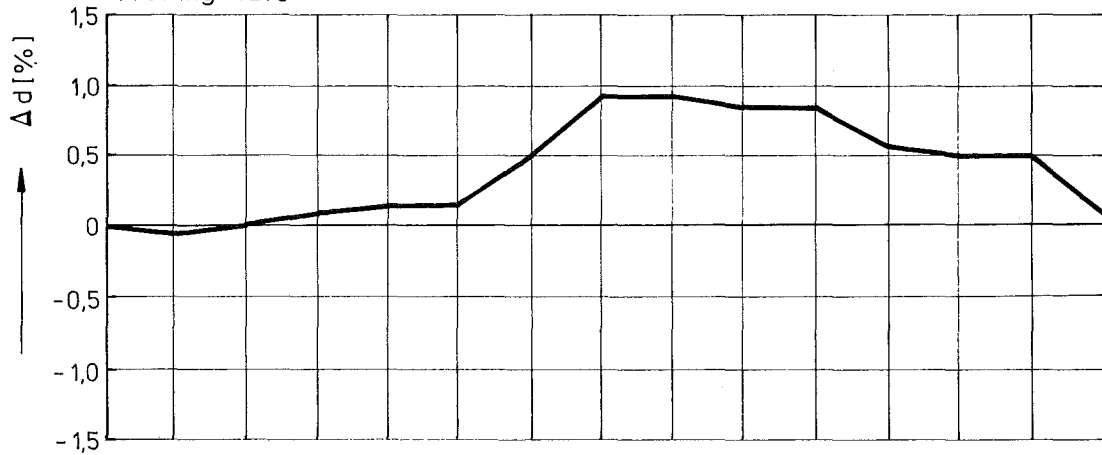


KVE 47

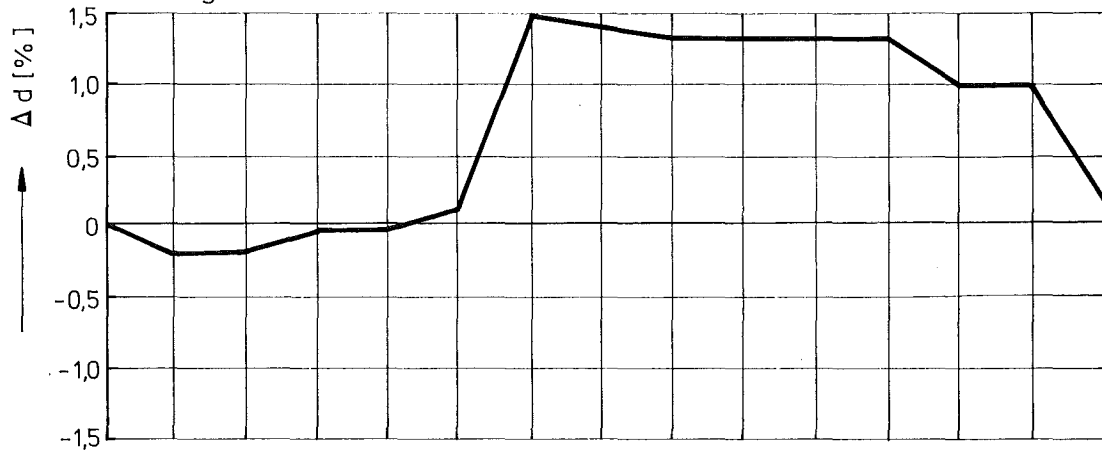
Prüfling 4B/4



Prüfling 4B/3

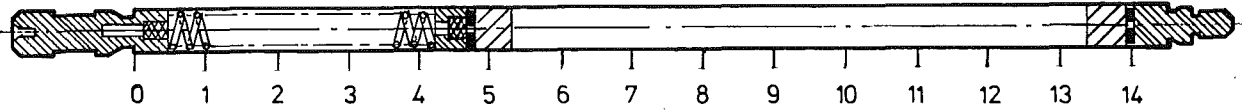


Prüfling 4B/2



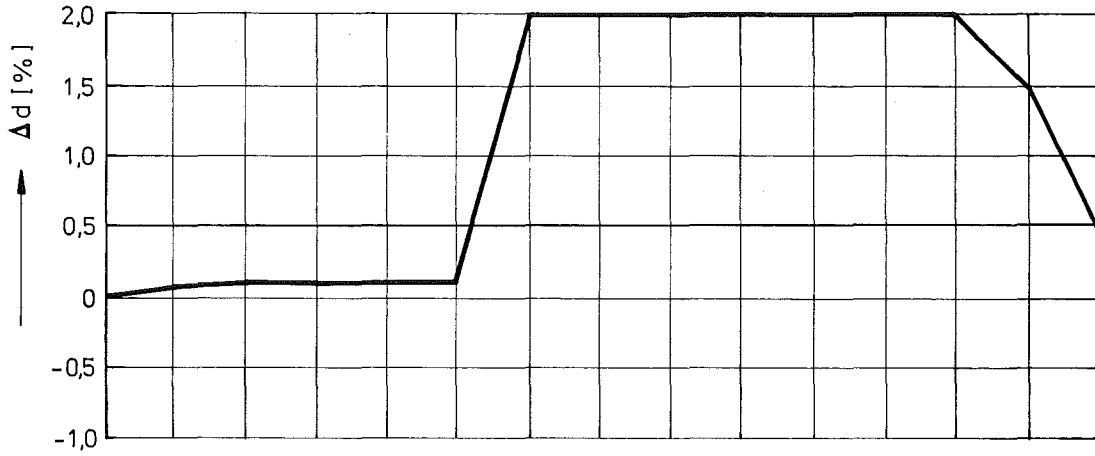
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 47



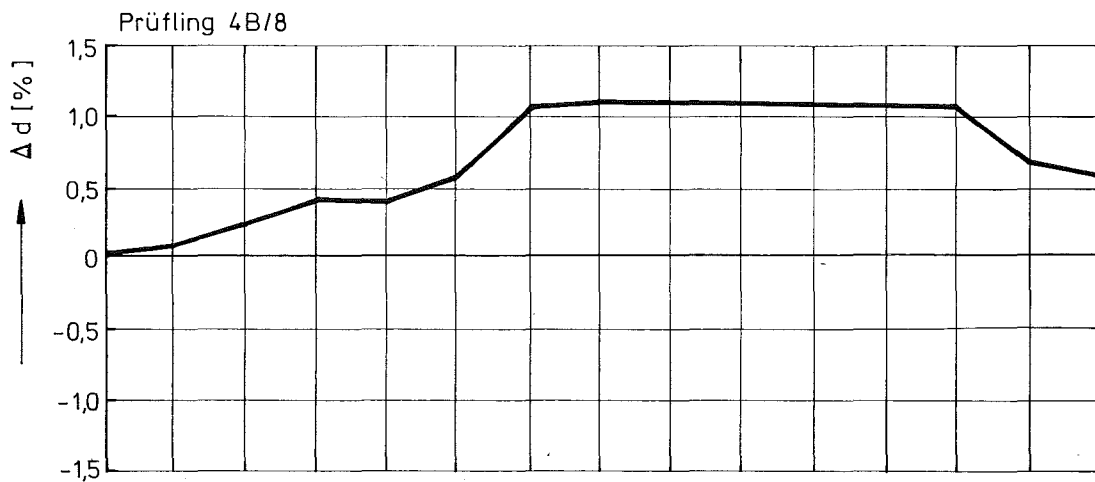
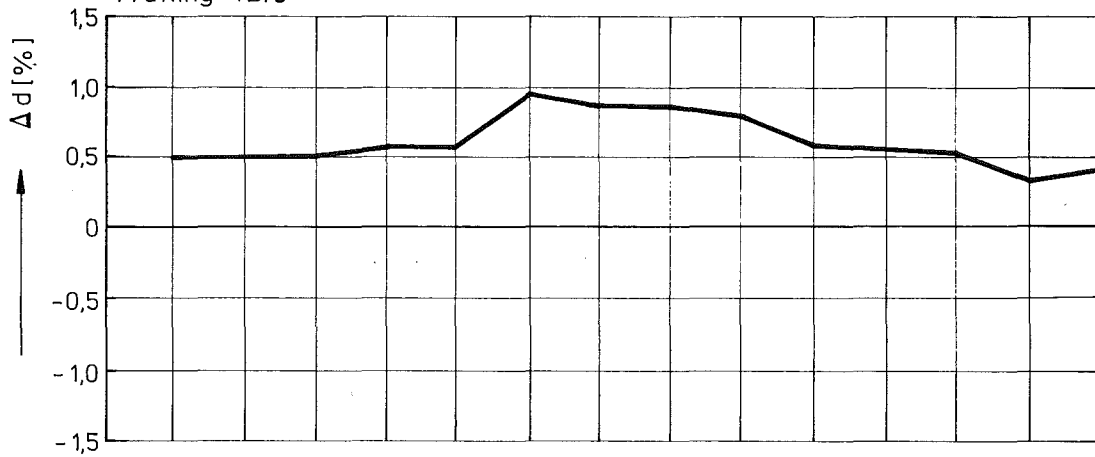
KVE 47

Prüfling 4B/1



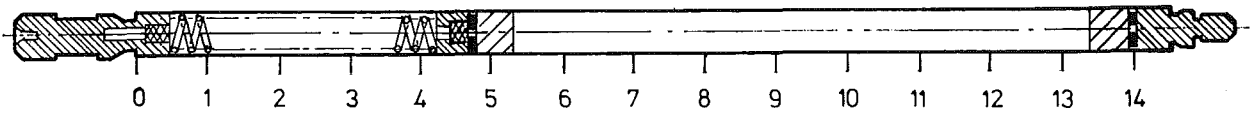
KVE 48

Prüfling 4B/9



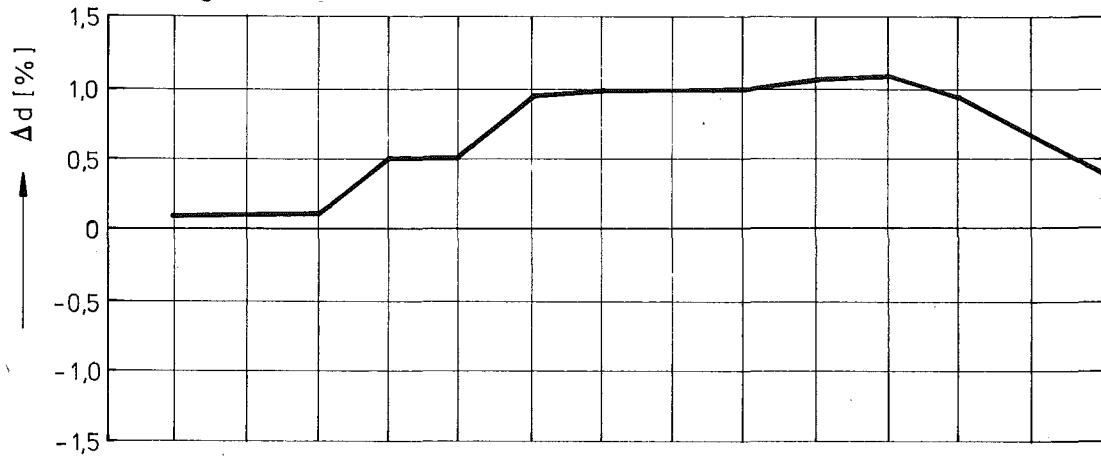
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 48

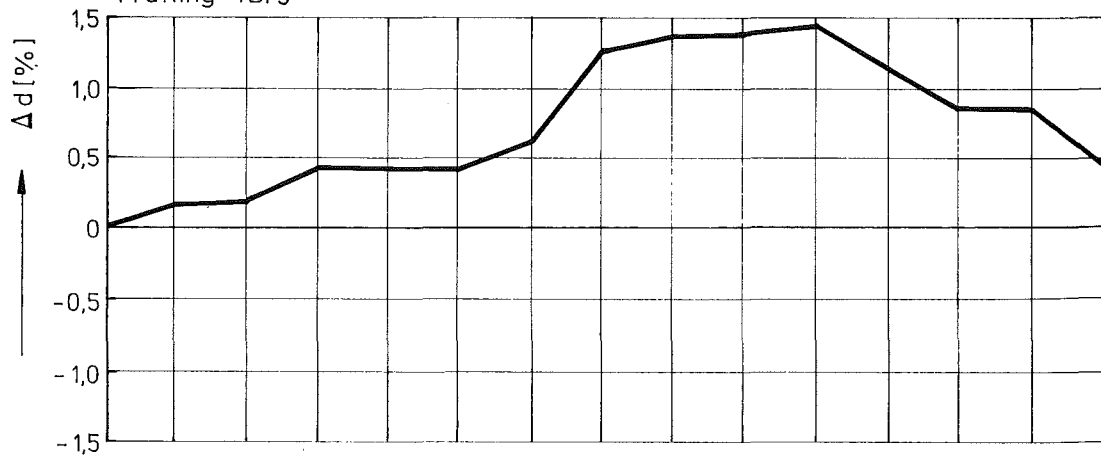


KVE 48

Prüfling 4B/7

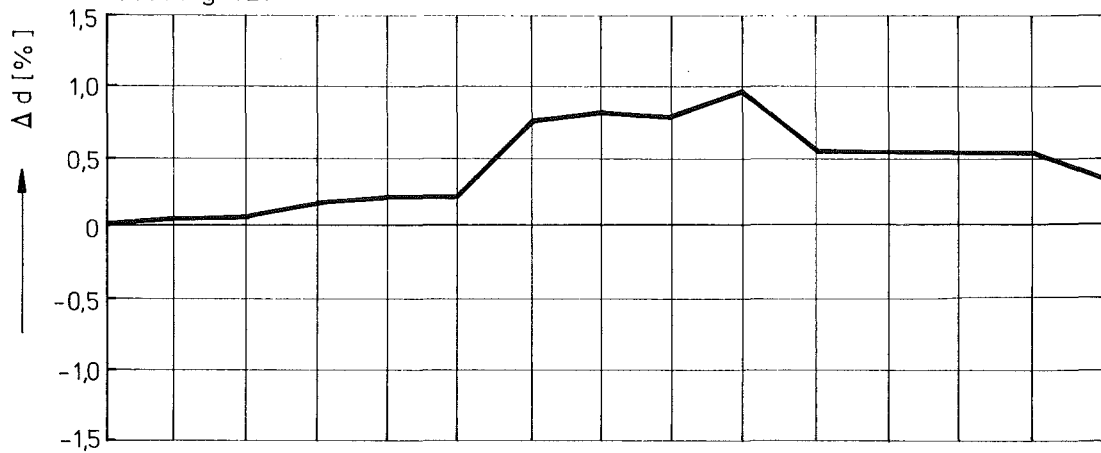


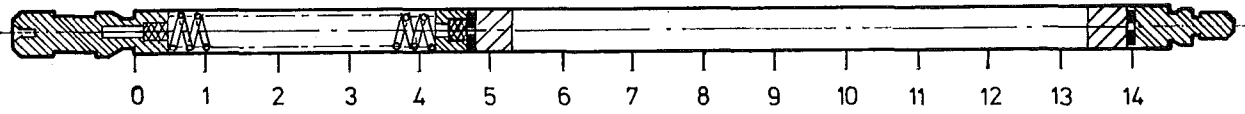
Prüfling 4B/5



KVE 49

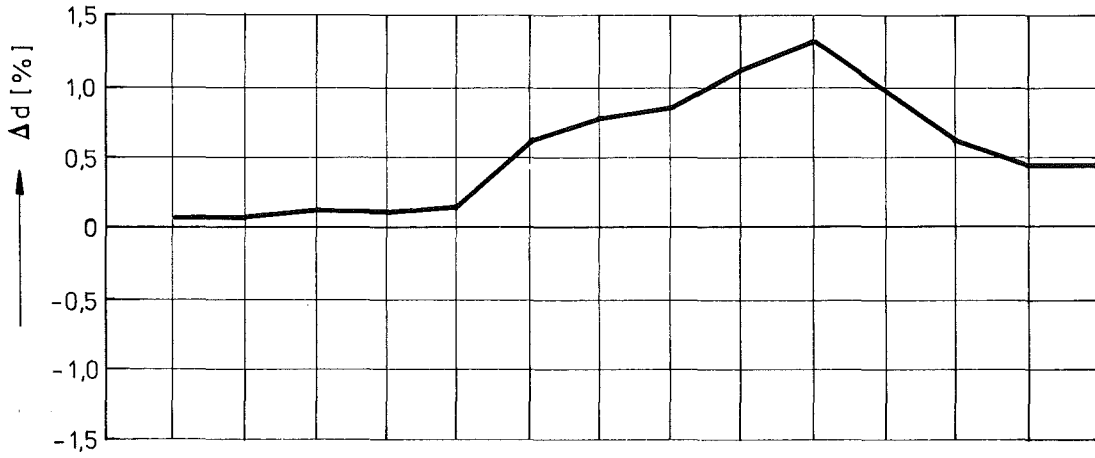
Prüfling 4B/11



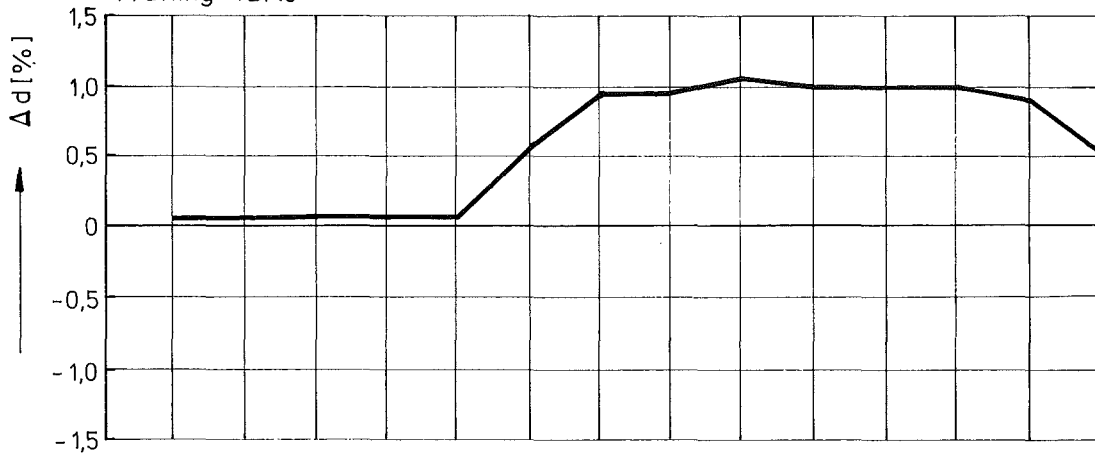


KVE 49

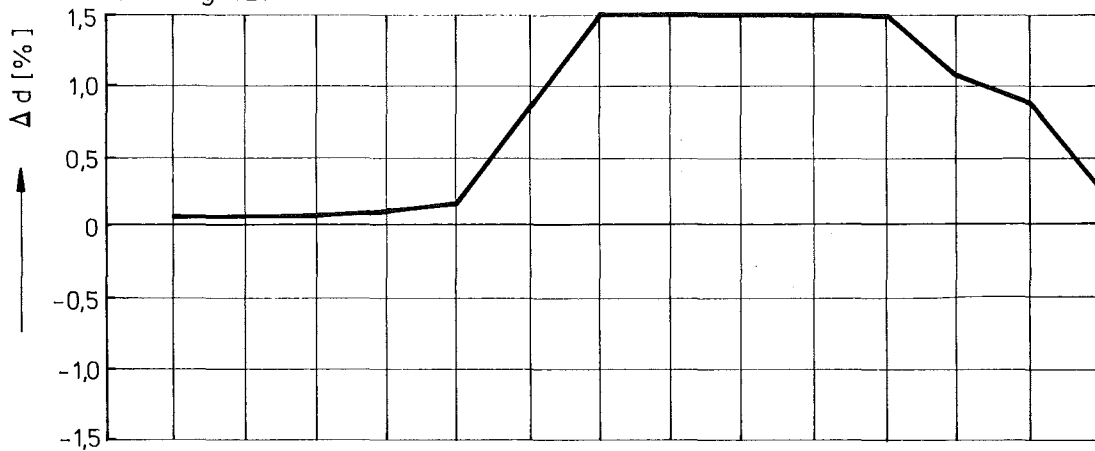
Prüfling 4B/12



Prüfling 4B/10

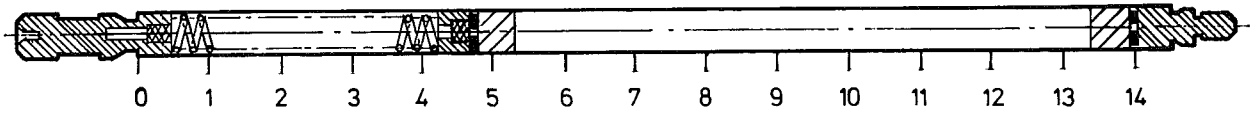


Prüfling 4B/6



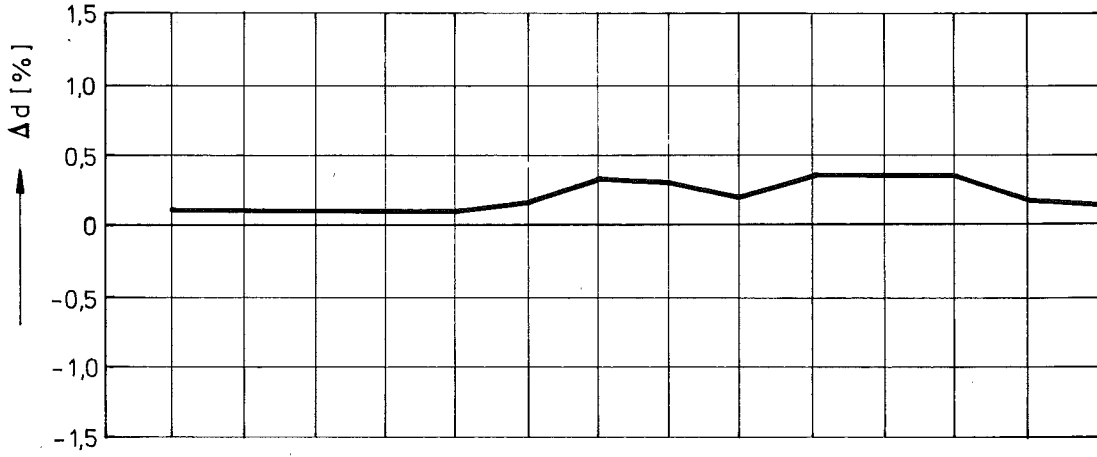
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 50

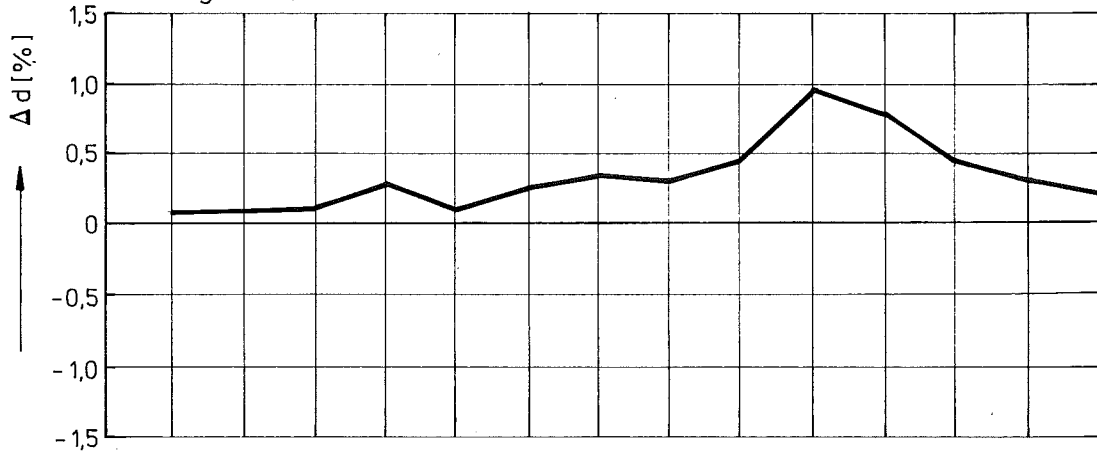


KVE 55

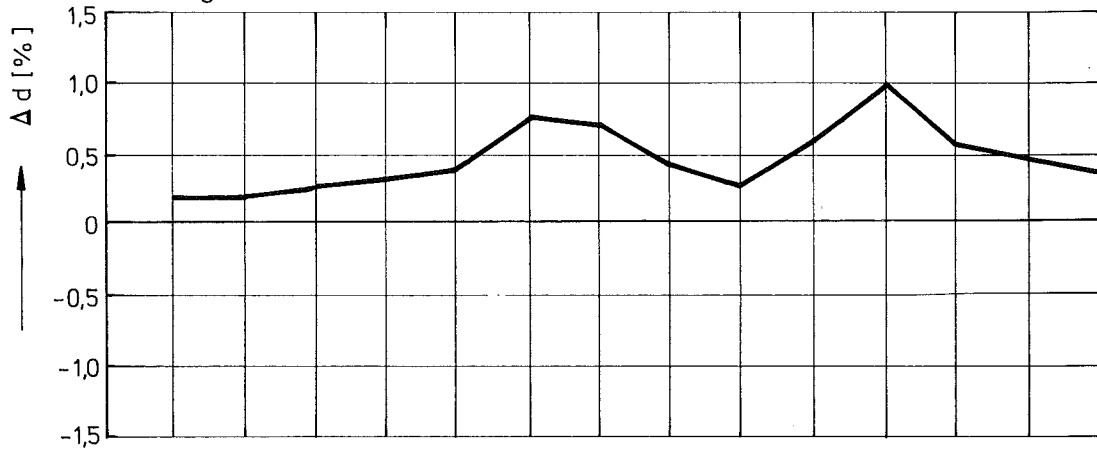
Prüfling 4B/15



Prüfling 4B/14

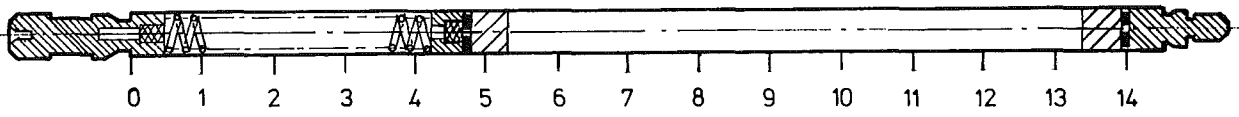


Prüfling 4B/13



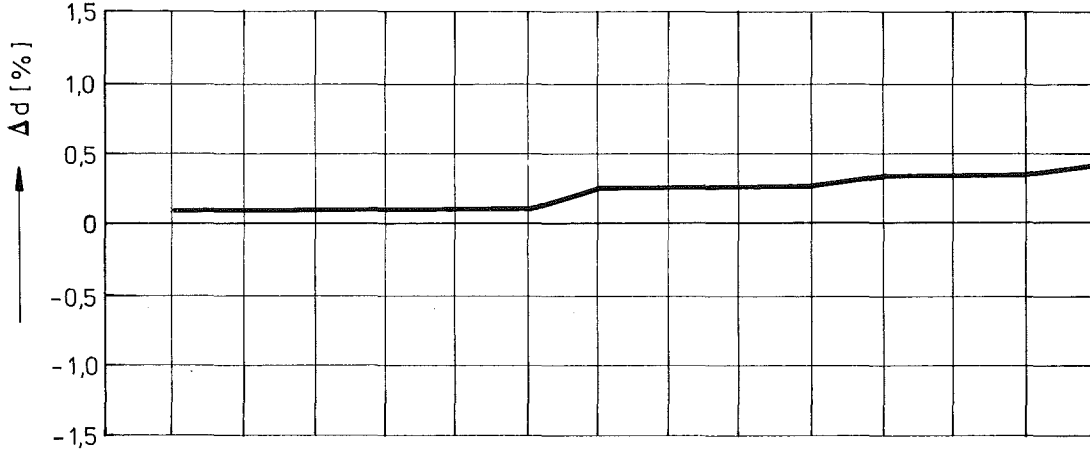
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 51

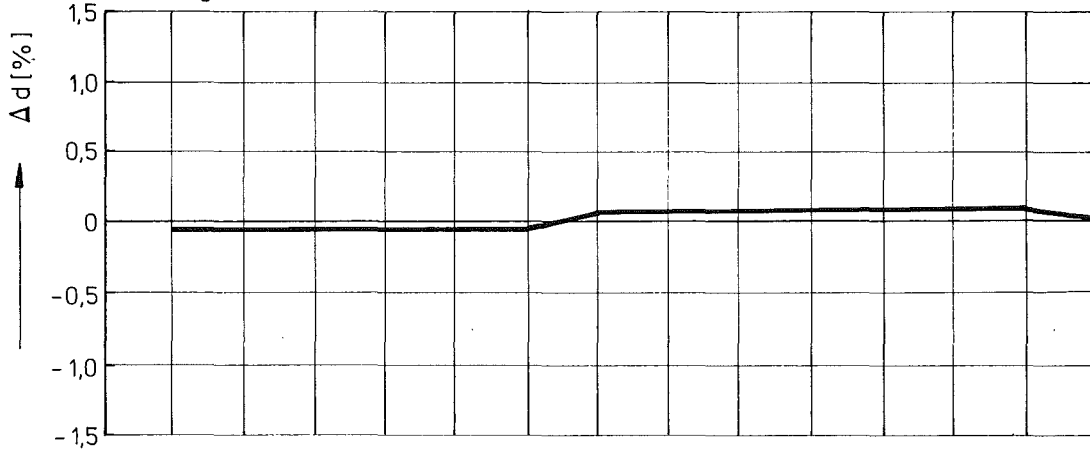


KVE 56

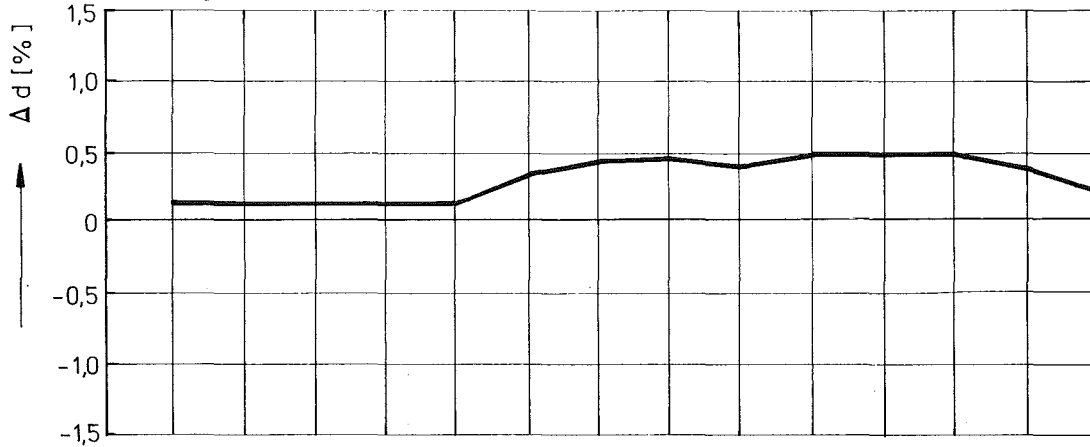
Prüfling 4B/18



Prüfling 4B/17

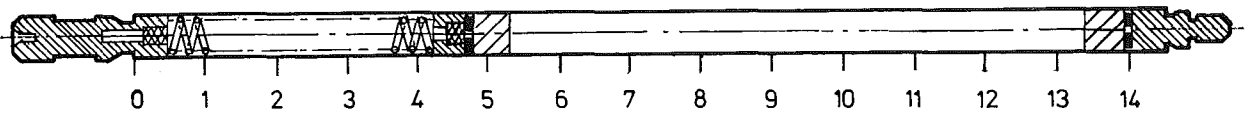


Prüfling 4B/16



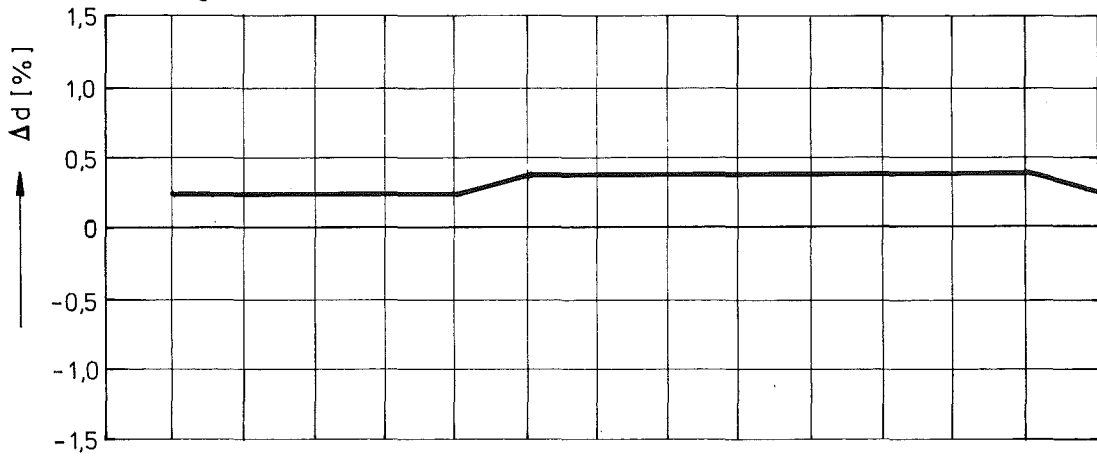
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 52

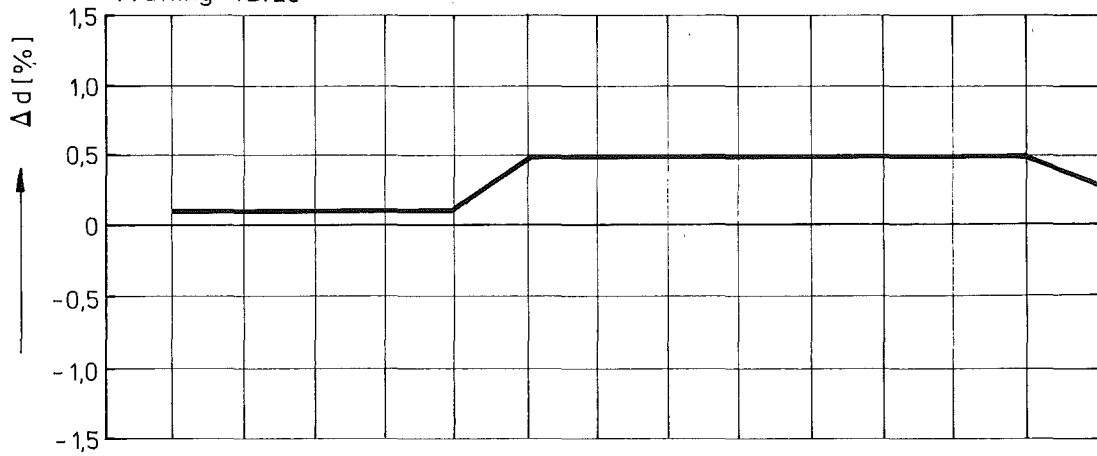


KVE 57

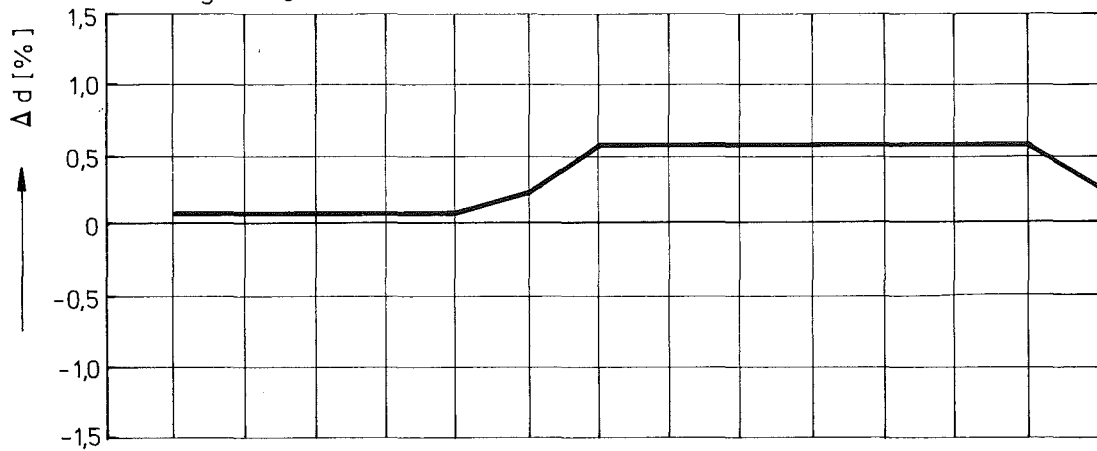
Prüfling 4B/21



Prüfling 4B/20

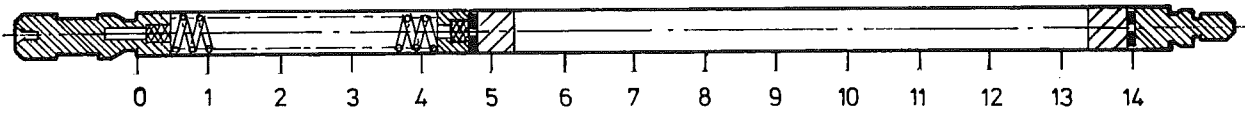


Prüfling 4B/19



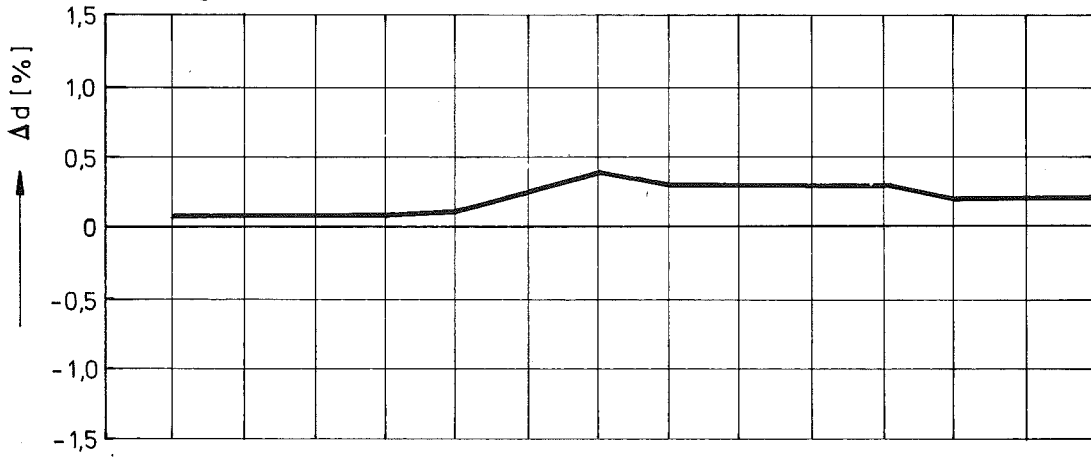
Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 53

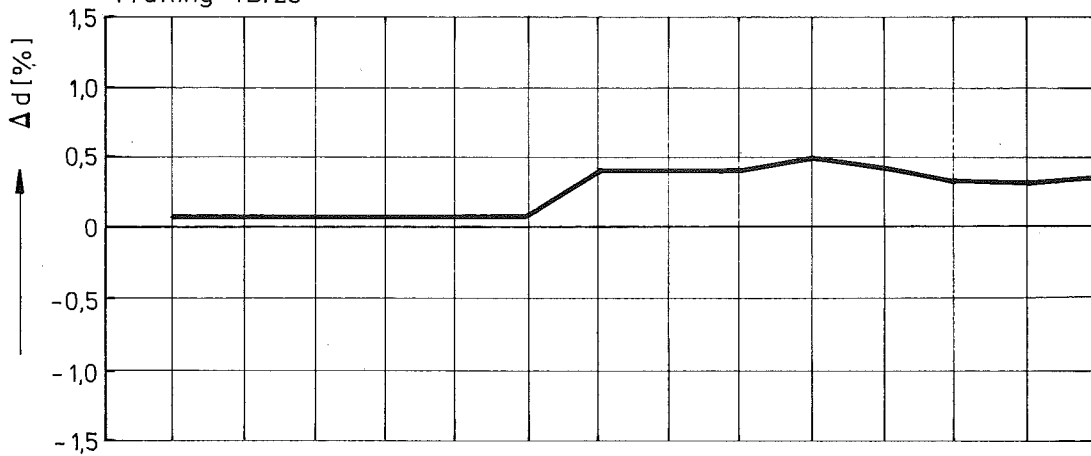


KVE 58

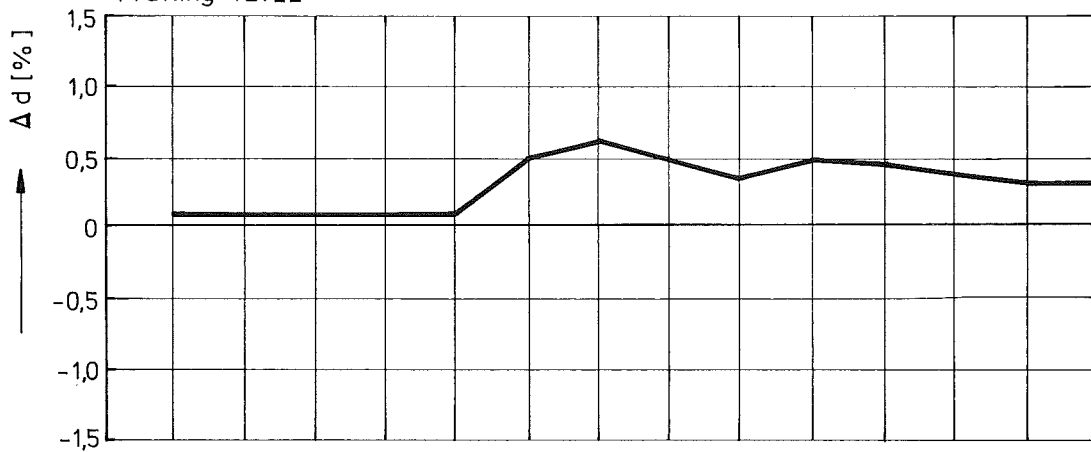
Prüfling 4B/24



Prüfling 4B/23



Prüfling 4B/22



Veränderungen der Stab-Außendurchmesser

Abb. 54

Tabelle XVII: Stabdurchbiegung nach der Bestrahlung

K V E	Prüfling	Durchbiegung in beiden Meßebenen (µm)	M = Makrograph W = Wendelschrieb
42	4B/27	60 / 30	M
	4B/26	60 / 60	M
	4B/25	40 / 30	M
43	4B/34	140 / 100	M
	4B/32	+))	+))
	4B/30	+))	+))
44	4B/35	140 / 170	M
	4B/33	100 / 160	M
	4B/31	20 / 40	M
45	4B/29	270 / 80	M
	4B/28	70 / 0	M
47	4B/4	100 / 10	M, W
	4B/3	330 / 0	M, W
	4B/2	150 / 40	M, W
	4B/1	30 / 20	M, W
48	4B/9	8 / 55	M, W
	4B/8	32 / 0	M, W
	4B/7	85 / 90	M, W
	4B/5	70 / 10	M, W
49	4B/11	bestrahlt f e h l t !	
	4B/12		
	4B/10		
	4B/6		
55	4B/15	unbestrahlt f e h l t !	
	4B/14		
	4B/13		
56	4B/18	unbestrahlt f e h l t !	
	4B/17		
	4B/16		
57	4B/21	18 / 8	W
	4B/20	54 / 1	W
	4B/19	114 / 51	W
58	4B/24	bestrahlt f e h l t !	
	4B/23		
	4B/22		

+) defekter Stab

Ein Vergleich der Stablänge vor und nach der Bestrahlung ergab als Mittelwert der gesamten Versuchsgruppe eine unwesentliche Verlängerung von 0,077 mm, entsprechend 0,046 %. Wie in Tabelle XVIII ersichtlich, ist bei zwei Stäben sogar eine geringfügige Verkürzung gemessen worden. Insgesamt liegen die Veränderungen jedoch so nahe an der erzielbaren Meßgenauigkeit, daß differenzierte Aussagen nicht möglich sind.

7.2 Durchleuchtung

Die innere Geometrie des Brennstoffes wird bei den hier untersuchten Prüflingen aufgrund der hohen Zentraltemperatur während der Bestrahlung stark verändert. So bildet sich zum Beispiel im thermischen Zentrum der Brennstoffsäule ein als Zentralkanal bezeichneter langgestreckter Hohlraum, dessen Ausdehnung und Form Aufschluß über Vorgänge während der Bestrahlung liefert. Daneben wird die Brennstoffsäule beim Abkühlen durch Ribildung bzw. Auseinanderbrechen bestimmter Brennstoff-Formationen verändert.

Für einen gerichteten Einsatz der zerstörenden Nachuntersuchungen, insbesondere der Keramografie, ist es unumgänglich, die innere Geometrie der Brennstoffsäule zu kennen. Eine Durchleuchtung des Prüflings ist zu diesem Zwecke wünschenswert.

Wegen der starken Eigenstrahlung der Brennstoffprüflinge durch die bei der Bestrahlung gebildeten Spaltprodukte ist jedoch eine Röntgendurchleuchtung üblicher Art nicht durchführbar.

In unserem Falle wurde die Durchleuchtung mit einem Betatron vorgenommen, das eine harte γ -Strahlung von maximal 18 MeV aussendet. Für diese hohe γ -Energie ist das Element Eisen weitgehend transparent, so daß die Eigenstrahlung der Prüflinge mit Eisen gegen den Aufnahmeilm abgeschirmt werden kann, ohne die Intensität der Betatron-Strahlenquelle wesentlich zu schwächen. Die Technik dieser Durchleuchtungsmethode sieht noch vor, daß die Außenränder der zylinderförmigen Stäbe durch einen sogenannten Dickenausgleich aus Blei vor einer Überstrahlung geschützt werden. Damit wird eine gleichmäßige Massenbelegung der Bildfläche und eine ausreichende Bildschärfe im Bereich der Randzone erreicht. Daneben wirkt der Dickenausgleich noch als zusätzliche Abschirmung für die Aufnahmeilm.

Tabelle XVIII: Längenmessungen der Prüflinge (vor und nach der Bestrahlung)

KVE Nr.	Prüfling Nr.	Länge (mm) vor der Bestrahlung	Länge (mm) nach der Bestrahlung	Differenz (mm)
42	4B/27	166,96	166,96	0
	4B/26	166,79	166,83	+ 0,04
	4B/25	166,83	166,83	0
43	4B/34	166,96	166,97	+ 0,01
	4B/32	166,95	166,83	- 0,12
	4B/30	166,97	166,78	- 0,19
44	4B/35	166,80	166,82	+ 0,02
	4B/33	166,90	166,90	0
	4B/31	166,98	166,98	0
45	4B/29	166,97	167,04	+ 0,07
	4B/28	166,98	166,99	+ 0,01
47	4B/4	166,92	167,01	+ 0,09
	4B/3	166,93	167,08	+ 0,15
	4B/2	167,00	167,10	+ 0,10
	4B/1	166,92	167,18	+ 0,26
48	4B/9	166,94	167,02	+ 0,08
	4B/8	166,93	167,01	+ 0,08
	4B/7	166,89	167,07	+ 0,18
	4B/5	167,01	167,22	+ 0,21
49	4B/12	166,95	166,98	+ 0,03
	4B/11	166,95	167,01	+ 0,06
	4B/10	166,98	167,06	+ 0,08
	4B/6	166,98	167,17	+ 0,19
55	4B/15	166,99	167,09	+ 0,10
	4B/14	167,01	+))	-
	4B/13	167,02	167,21	+ 0,19
56	4B/18	167,01	167,12	+ 0,11
	4B/17	166,97	167,05	+ 0,08
	4B/16	167,03	167,14	+ 0,11
57	4B/21	167,05	167,11	+ 0,06
	4B/20	167,05	167,15	+ 0,10
	4B/19	167,03	167,17	+ 0,14
58	4B/24	167,13	167,16	+ 0,03
	4B/23	166,97	167,02	+ 0,05
	4B/22	167,01	167,07	+ 0,06
			arithm. Mittel (mm)	+ 0,077
			ΔL (%)	+ 0,046

+) wurde nicht durchgeführt

Auf diese Art wurden bei Durchleuchtungszeiten zwischen 10 und 30 Minuten die in der angefügten Prüflingsdokumentation (Anhang A) wiedergegebenen Durchstrahlungsbilder hergestellt. Die durch die Betatron-Durchleuchtung erzeugten Aufnahmen weisen in den Originalfilmen einen hohen Schwärzungsgrad auf. Sie sind damit nur unter Verlust einiger Details in der Zeichnung auf Fotopapier zu kopieren. Die in der Dokumentation dargestellten Aufnahmen sind daher in ihrer Bildqualität deutlich schlechter als die Original-Filme, die auch zur Beurteilung und Auswertung allein herangezogen wurden. Es wurde mittels dieser Filme die Länge der Brennstoffsäule ermittelt und mit der Original-Brennstoffsäulen-Länge verglichen (Tabelle XIX). Man kann - mit einigen Ausnahmen - eine Säulenverkürzung von ca. 10 % feststellen, wobei die größere axiale Schwindung der niederdichten Pellets zuzuordnen ist. Die starke Verlängerung bei Prüfling 4B/30 ist auf Stabversagen zurückzuführen.

Der Versuch, hierzu ebenfalls die γ -Profile heranzuziehen, wurde aufgegeben, da beim Auftreten von Cs-Anreicherungen zu den Enden eine scheinbare Brennstoff-Säulen-Verlängerung vorgetäuscht wird.

7.3 γ -Profile und γ -Spektren

Zur Charakterisierung der Brennstoffsäulen hinsichtlich der Rißstruktur, des axialen Leistungsverlaufes der Brennstoffverlagerung und der Spaltproduktwanderung wurden die Prüflinge γ -spektrometrisch untersucht. In dieser Untersuchung wurden zum einen die γ -Aktivität entlang der Stabachse als γ -Profil erstellt, zum anderen γ -Spektren von bestimmten Bereichen des Prüflings aufgenommen.

Als Detektor diente hierzu ein Halbleiterkristall (GeLi) mit nachgeschaltetem Multikanal-Analysator. Profile und Spektren wurden mit einem schlitzförmigen Kollimator mit den Maßen 0,5 mm x 20 mm x 700 mm durch die Abschirmwand der Heißen Zellen aufgenommen. Während der Messung rotierten die Prüflinge um ihre Längsachse. Hierdurch wurde erreicht, daß Aktivitätsansammlungen im Bereich der Brennstoffaußenzonen nicht durch eine zufällige ungünstige Orientierung des Prüflings zum Detektor unbeachtet blieben.

Tabelle XIX: Veränderung der Brennstoffsäulenlänge

KVE	Prüfling	Brennstoffsäulenlänge (mm)		Δl		Ausgangs- dichte (% th.D.)
		vor der Bestr.	nach der Bestr. ^{+))}	(mm)	(%)	
42	4E/27	79,0	77,9	+ 0,9	+ 1,14	
	4E/26	78,0	77,8	- 0,2	- 0,26	
	4E/25	78,5	77,2	-1,3	- 1,66	
43	4E/34	80,0	83,0	+ 3,0	+ 3,75	
	4E/32	79,0	-	-	-	
	4E/30	79,5	89,5	+10,0	+12,58	
44	4E/35	79,0	77,8	- 1,2	- 1,52	80
	4E/33	80,0	81,0	+ 1,0	+ 1,25	
	4E/31	78,5	79,2	+ 0,7	+ 0,89	
45	4E/29	79,5	81,0	+ 1,5	+ 1,89	
	4E/28	79,0	81,6	+ 2,6	+ 3,29	
47	4E/4	79,2	72,8	- 6,4	- 8,08	
	4E/3	79,2	72,8	- 6,4	- 8,08	
	4E/2	79,2	72,8	- 6,4	- 8,08	
	4E/1	79,1	73,4	- 5,7	- 7,21	
48	4E/9	79,3	73,4	- 5,9	- 7,44	90
	4E/8	79,4	72,1	- 7,3	- 9,19	
	4E/7	79,2	72,7	- 6,5	- 8,21	
	4E/5	79,3	74,8	- 4,5	- 5,67	
49	4E/11	79,6	79,9	+ 0,3	+ 0,38	
	4E/12	79,5	79,9	+ 0,4	+ 0,50	
	4E/10	79,3	81,0	+ 1,7	+ 2,14	
	4E/6	79,3	80,4	+ 1,1	+ 1,39	
55	4E/15	79,9	71,6	- 8,3	-10,39	
	4E/14	79,8	71,0	- 8,8	-11,03	
	4E/13	80,1	73,0	- 7,1	- 8,86	
56	4E/18	80,0	71,4	- 8,6	-10,75	84
	4E/17	79,9	71,4	- 8,5	-10,64	
	4E/16	79,8	72,0	- 7,8	- 9,77	
57	4E/21	80,3	71,4	- 8,9	-11,08	
	4E/20	80,2	72,0	- 8,2	-10,22	
	4E/19	79,7	71,4	- 8,3	-10,41	
58	4E/24	79,7	79,5	- 0,2	- 0,25	-
	4E/23	79,8	79,5	- 0,3	- 0,38	
	4E/22	80,2	81,5	+ 1,3	+ 1,62	

+) aus Betatron-Aufnahmen ermittelt.

Die Standard-Untersuchung wurde mit den Aufnahmen eines typischen γ -Spektrums begonnen. Dazu wurde ein Brennstoffsäulenbereich ausgewählt, der eine möglichst geringe Konzentrationsänderung an Spaltprodukten erwarten ließ. Gewöhnlich war dies etwa die Mitte der Brennstoffsäule. An Hand des γ -Spektrums wurden dann die besonderen Energiebereiche für bestimmte γ -Profile ausgewählt. Unabhängig von γ -Spektren wurde von jedem Prüfling ein integrales Profil aufgenommen, das die γ -Linien im weiten Bereich zwischen 400 keV und 1700 keV umfaßte. Aus meßtechnischen Gründen mußte bei einer Anzahl von Prüflingen die obere Energiegrenze beim integralen Profil auf die Hälfte herabgesetzt werden. Dennoch kann man auch hier noch von einem integralen Profil sprechen, da die intensivsten γ -Strahler unter den Spaltnukliden in diesem Energiegebiet Quanten emittieren.

Zu den Profilen, die an allen Prüflingen gemessen wurden, zählte auch das Zr/Nb-95-Profil. Vom Spalt-Zirkon ist bekannt, daß es sich in Oxidbrennstoff unter den hier betrachteten Bestrahlungsbedingungen nicht an- oder abreichert. Somit kann das Zr/Nb-95-Profil in besonderem Maße als Brennstoff-Indikator zur Ermittlung von Brennstoffverlagerungen herangezogen werden. Bei kurzen Bestrahlungszeiten ist dem Profil auch der axiale Stableistungsverlauf zu entnehmen.

Je nach Abklingdauer wurden weitere Nuklid-Profile zur Bestimmung der Spaltproduktwanderung vermessen. Es waren dies insbesondere Profile für Cs/Ba-137 und Ru-106.

Zur Vervollständigung der Nuklidprofile in Bezug auf die Spaltproduktwanderung wurden, verteilt über die gesamte Prüflingslänge, zusätzliche Spektren aufgenommen, wo immer die Profile einen Hinweis auf anomale Spaltproduktverteilungen brachten. Im Mittel waren etwa 6 Spektren für die Charakterisierung der Spaltproduktwanderung ausreichend. In Einzelfällen wurde die Zahl noch erhöht. In Anhang A sind für jeden Prüfling zwei der wichtigsten γ -Profile wiedergegeben.

Abb. 55 und 56 zeigen das integrale bzw. Zr/Nb-Profil der nur störungsfrei untersuchten Prüflinge 4B/30 und 4B/34.

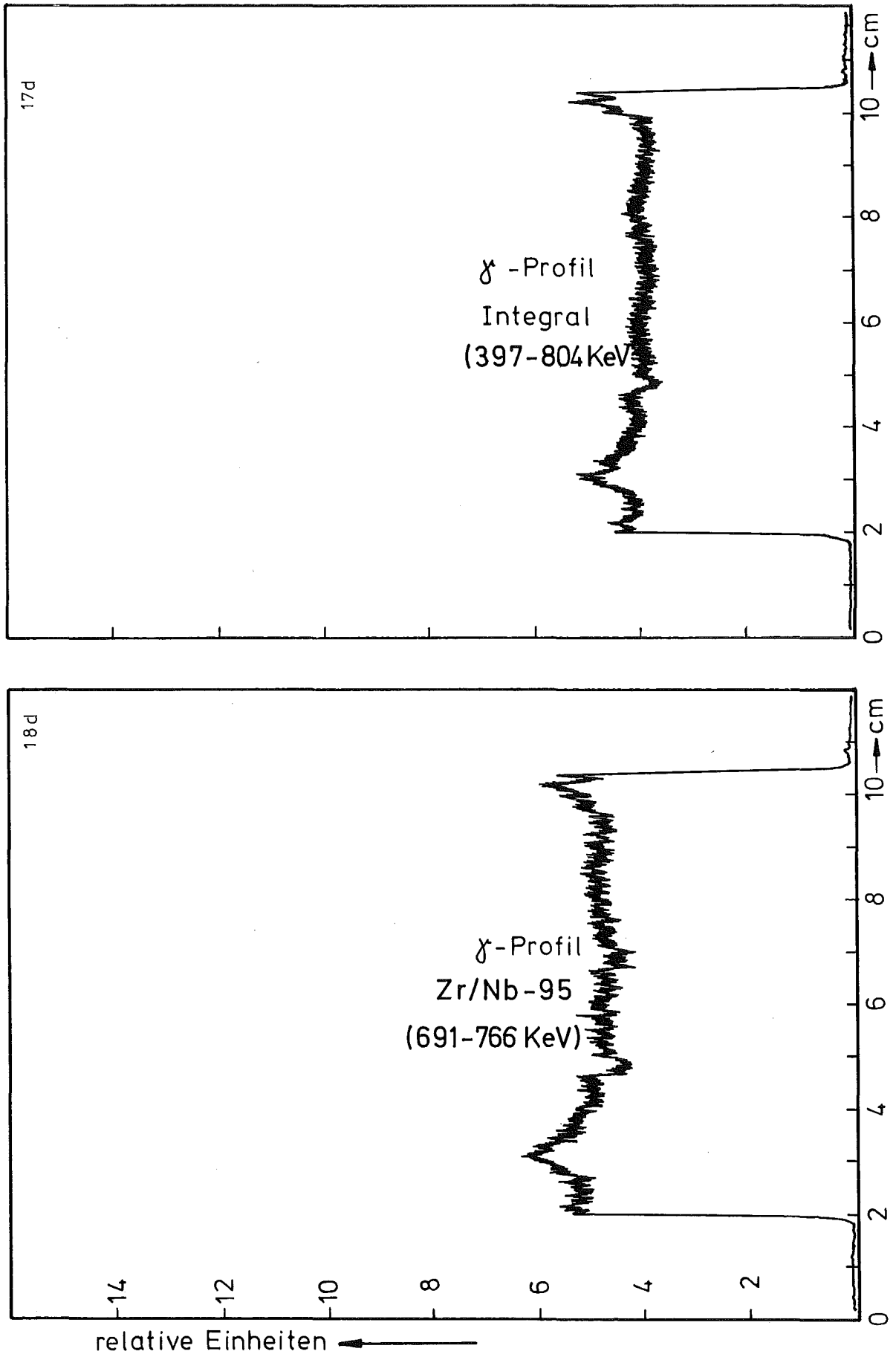


Abb.55 γ -Profil von Prüfling 4b/34

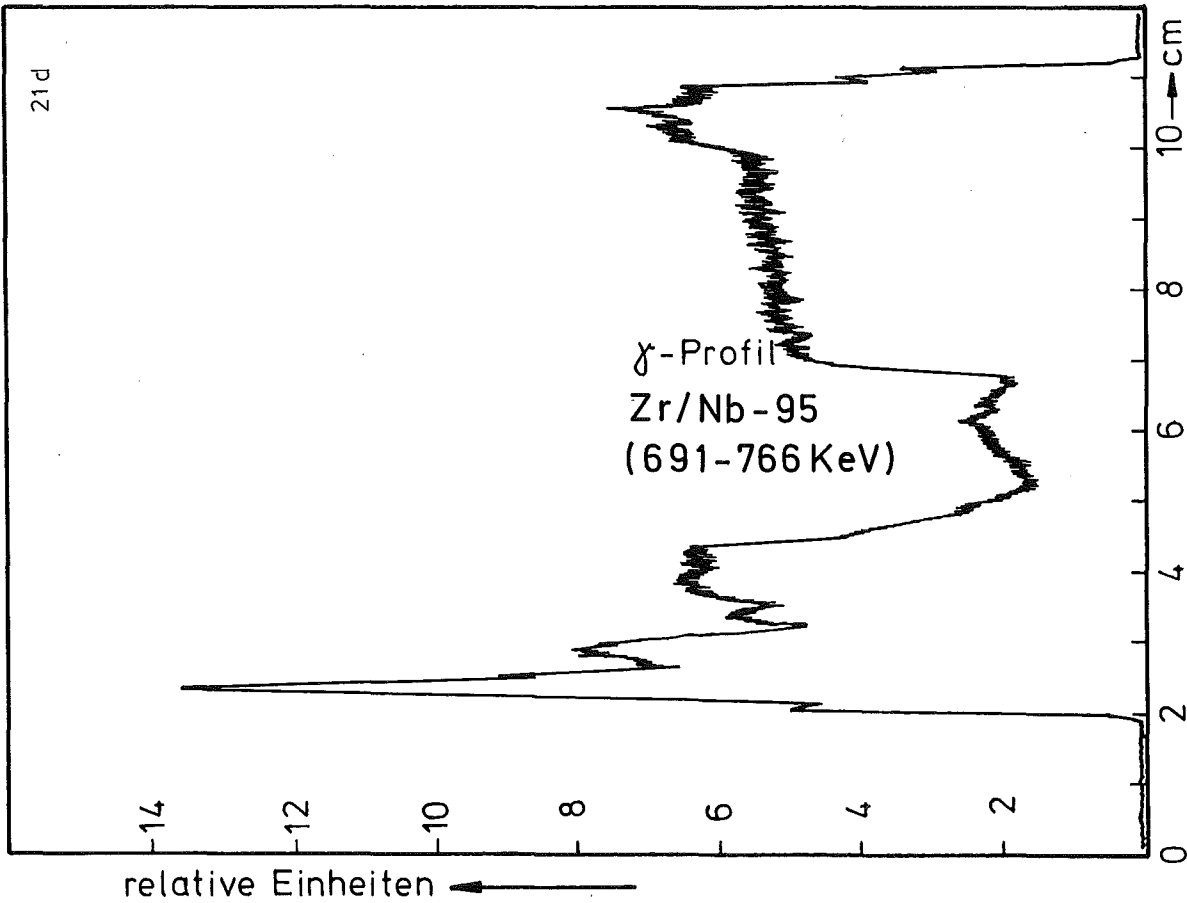
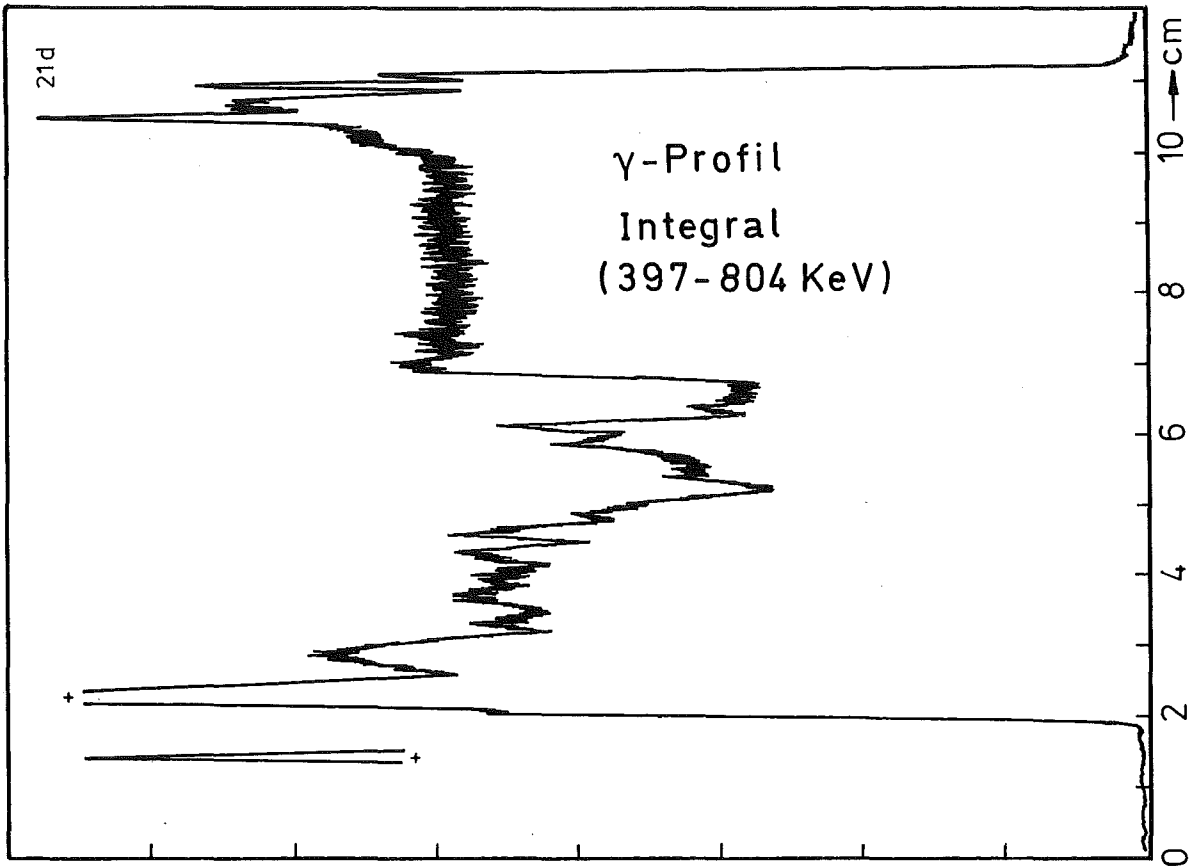


Abb.56 γ-Profil von Prüfling 4b/30

8. Zerstörende Nachuntersuchung

8.1 Spaltgasbestimmungen

Bei den experimentellen Spaltgasuntersuchungen an den bestrahlten Prüflingen werden Messungen durchgeführt [14] zur Bestimmung

- der freien Spaltgasmenge V_F
- des freien Volumens innerhalb der Hülle
- der Spaltgasmenge in geschlossenen Poren V_P
- der im Brennstoff gelösten Spaltgasmenge V_G

Zu diesem Zweck wird der Prüfling zuerst an der Stirnseite des oberen Stopfens abgebohrt und das freie Spaltgas abgezogen mit anschließender Helium-Spülung. Die Zusammensetzung des Spaltgases wird radio-gaschromatografisch ermittelt, wobei die Menge an Xe, Kr quantitativ bestimmt wird. Hierauf folgt eine manometrische Messung des freien Volumens (Hohlräume, offene Poren) innerhalb der Brennstabhülle.

Für die weiteren Spaltgasbestimmungen (Anteile in geschlossener Porosität bzw. im Brennstoffgitter gelöst) werden bei der Aufteilung des Prüflings zwei Brennstoffproben von insgesamt etwa 3 g Gewicht bereitgestellt. Jede Probe wird zuerst in einer gasdichten Kugelmühle aus Edelstahl ca. 2 Stunden gemahlen, wobei eine Partikelgröße von weniger als 1 μm erreicht wird. Das hierbei freigesetzte "Porensplaltgas" umfaßt alles Gas, das sich in geschlossener Porosität mit Porengrößen $\leq 1 \mu\text{m}$ befand. Nach der gaschromatischen Bestimmung dieses Anteils wird die gemahlene Brennstoffprobe schließlich in HNO_3 aufgelöst. Dabei wird sowohl der im Brennstoff gelöste Anteil, das "Gittersplaltgas", und der in den kleinen Poren ($< 1 \mu\text{m}$) enthaltene Anteil bestimmt.

Die für eine weitere Auswertung wichtigen Ergebnisse sind zusammenfassend in einigen Tabellen dargestellt. Tabelle XX bringt für alle Prüflinge die gemessenen Mengen an freiem Spaltgas sowie den Spaltgasdruck bei einer (angenommenen) mittleren Betriebstemperatur von 500 °C. Die Gasmengenangaben in mm^3 beziehen sich auf 20°C und 760 Torr.

In Tabelle XXI sind alle gemessenen Werte für das im Brennstoff gebundene Spaltgas (wieder aufgetrennt nach Krypton und Xenon) enthalten. Die Messungen wurden hierbei an kleinen Brennstoffproben

Tabelle XX: Freies Spaltgas- Spaltgasdruck

KVE	Prüfl.	Abbrand ⁺) A (MWd/kg M)	Freies Spaltgas V _F (mm ³)			Xe/Kr- Verhält- nis	Freies Volumen (mm ³)	Spaltgas- druck bei 500°C (atm)
			Krypton	Xenon	Gesamt			
42	4B/27	23,2	403	4570	4973	11,3	982,3	13,36
	4B/26	25,7	263	2930	3193	11,3	1290	6,53
	4B/25	25,2	1030	17800	18830	17,3	1416	35,08
43	4B/34	10,3	-	-	-	-	-	-
	4B/32	11,4	-	-	-	-	-	-
	4B/30	11,9	-	-	-	-	-	-
44	4B/35	25,1	770	16700	17470	21,7	1003	45,95
	4B/33	28,2	908	16050	16958	17,7	1118	40,02
	4B/31	26,7	1367	19700	21067	14,4	1137	48,88
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	812,3	-
	4B/28	19,6	340	6430	6770	18,9	1164	15,34
	4A/24	- siehe Versuchsgruppe 4a -						
47	4B/4	85,4	1490	27500	28990	18,4	654	116,95
	4B/3	85,5	1590	29500	31090	18,0	637	128,76
	4B/2	87,4	1440	24100	25540	16,7	592	113,82
	4B/1	81,5	1570	25500	26070	16,2	709	97,01
48	4B/9	79,1	1390	24900	26290	17,9	784	88,45
	4B/8	74,3	1600	27700	29300	17,3	586	131,91
	4B/7	83,3	1710	30500	32210	17,8	683	124,42
	4B/5	78,3	1720	30100	31820	17,5	569	147,53
49	4B/11	100,00	2050	34000	36050	16,6	856	111,0
	4B/12	110,4	2480	36600	39080	14,8	706	146,0
	4B/10	123,8	2370	36000	38370	15,2	831	122,0
	4B/6	120,0	2340	37300	39640	15,9	942	111,0
55	4B/15	62,2	950	17300	18250	18,2	936	51,44
	4B/14	66,8	1190	22000	23190	18,5	746	82,01
	4B/13	63,3 ⁺⁺)	1160	21100	22260	18,2	902	65,11
56	4B/18	60,4	585	10100	15685	17,3	837	49,44
	4B/17	62,8	656	11850	12506	18,0	826	39,94
	4B/16	64,9	670	11950	12620	17,8	879	37,88
57	4B/21	81,8	1725	28800	46050	17,0	775	156,76
	4B/20	87,8	2020	34900	55100	17,3	826	175,99
	4B/19	91,2	1810	32600	50700	18,0	676	197,87
58	4B/24	109,5	1860	34900	36760	18,75	781	124,18
	4B/23	109,1	1910	35600	37510	18,65	804	123,08
	4B/22	86,7	1835	34100	36935	18,60	723	131,13

+) maximale Abbrände aus Tab.XVI; ++) korrigierte Werte

Tabelle XXI: Gebundenes Spaltgas

KVE	Prüfl.	Abbrand ⁺) (Mwd/kg M)	Porensplattgas (mm ³)			Gittersplattgas (mm ³)			Xe/Kr- Verhältnis	
			Krypton	Xenon	Gesamt	Krypton	Xenon	Gesamt	Poren	Gitter
42	4B/27	23,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/26	25,7	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/25	25,2	-	-	-	-	-	-	-	-
43	4B/34	10,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/32	11,4	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/30	11,9	-	-	-	-	-	-	-	-
44	4B/35	25,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/33	28,2	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/31	26,7	-	-	-	-	-	-	-	-
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/28	19,6	-	-	-	-	-	-	-	-
	4A/24	-	- siehe Versuchsgruppe 4a			-	-	-	-	-
47	4B/4	85,4	591	6732	7323	50	1239	1289	11,39	24,78
	4B/3	85,5	511	8441	8952	57	1453	1510	16,51	25,49
	4B/2	87,4	528	7324	7852	103	2522	2625	13,87	24,49
	4B/1	81,5 ^o)	675	11204	11879	137	3314	3451	16,60	24,19
48	4B/9	79,1	478	7672	8140	79	1769	1848	16,05	22,39
	4B/8	74,3	339	5375	5714	80	1809	1889	15,86	22,61
	4B/7	83,8	381	5642	6023	66	1668	1734	14,81	25,27
	4B/5	78,3	404	6125	6529	96	1948	2044	15,16	20,29
49	4B/11	100,0	755	13365	14120	165	3162	3327	17,70	19,16
	4B/12	110,4	730	16102	16832	181	3346	3527	22,06	18,49
	4B/10	123,8	897	14670	15567	169	3663	3832	16,35	21,67
	4B/6	120,0 ^o)	577	9814	10391	248	4890	5138	17,00	19,72
55	4B/15	62,2	250	2505	2755	95	2881	2976	10,02	30,32
	4B/14	66,8 ^o)	340	5473	5813	86	2228	2314	16,10	25,91
	4B/13	63,3 ^o)	320	4729	5049	77	2454	2531	14,78	31,87
56	4B/18	60,4	771	11942	12713	119	3153	3272	15,49	26,50
	4B/17	62,8	735	11833	12568	130	2840	2970	16,10	21,85
	4B/16	64,9	633	10059	10692	136	2924	3060	15,89	21,50
57	4B/21	81,8	398	6041	6439	69	1850	1919	15,18	26,81
	4B/20	87,8	335	5434	5769	76	1742	1818	16,22	22,92
	4B/19	91,2	363	5659	6022	92	2200	2292	15,59	23,91
58	4B/24	109,5	691	11471	12162	153	3639	3792	16,90	23,78
	4B/23	109,1	690	11359	12049	86	2615	2701	16,46	30,41
	4B/22	86,7	834	13832	14660	81	2071	2152	16,59	25,57

+) maximale Abbrände aus Tab.XVI; - wurde nicht gemessen. o) korrigierte Werte

($\sim 1/8$ vom Brennstoff) durchgeführt und die Meßergebnisse auf die in einem Prüfling enthaltene Gesamtmenge an Brennstoff umgerechnet. In Tabelle XXII werden die spezifischen Spaltgasausbeuten angegeben.

In Tabelle XXIII schließlich wird für jeden Prüfling die Spaltgasbilanz aufgestellt. Interessant ist hier die Spalte "Gesamtspaltgas", wo das gemessene Spaltgas mit einem berechneten Wert verglichen wird. Wie man sieht, überschreitet die gemessene Spaltgasmenge in einigen Fällen (4 von 24) die theoretische Menge um mehr als 30 %. Nachfolgend soll versucht werden, diese Diskrepanz zu diskutieren: Die theoretische Spaltgasmenge wurde hier berechnet nach der Formel

$$V_g = A \cdot B \cdot C ,$$

wobei A = Abbrand

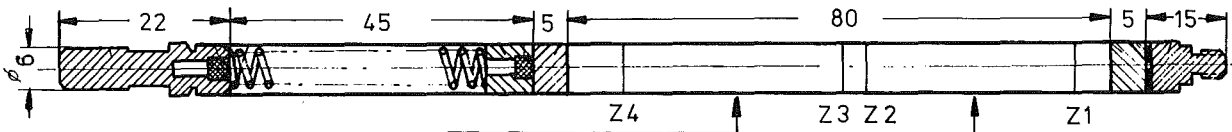
B = Brennstoffgewicht bzw. -Volumen

C = theoretisch erzeugte (Xe + Kr)-Menge (spezifisch je Gewicht bzw. Volumen)

In Tabelle XXIII wurde mit dem kalorimetrisch ermittelten Abbrand gerechnet. Derselbe liegt erfahrungsgemäß (s. Abbrandvergleich S. 114) ca. 14 % unter dem radiochemisch bestimmten Wert. Da dieser Wert ebenfalls mit einer Unsicherheit von ± 3 % behaftet ist, kann man die Unsicherheit in A mit 0,17 ansetzen. Der Wert B ist exakt bestimmbar. Der Wert C besitzt ebenfalls eine Unsicherheit von ca. 13 % (konservative Annahme 0,26 langlebige Gasatome/Spaltung, neuerer Wert 0,30 Gasatome /Spaltung), so daß die Gesamtunsicherheit in der theoretischen Spaltgasmenge ca. 0,30 bzw. 30 % beträgt. Hierdurch sind die Abweichungen von den Meßwerten in den meisten Fällen abgedeckt.

In Tabelle XXIV werden sowohl die partiellen als auch Gesamt-Xe/Kr-Verhältnisse wiedergegeben. Der Mittelwert für das Gesamtspaltgas beträgt 17,3. In der Literatur findet man für die theoretische Spaltung von Pu-239 einen Xe/Kr-Wert von 13,3 [15]. Hierbei muß allerdings auch die mit wachsendem Abbrand zunehmende Pu-241-Spaltung berücksichtigt werden. Hierdurch verschiebt sich das Xe/Kr-Verhältnis zu höheren Werten. Bei den partiellen Werten liegen die Werte noch stärker verschoben, was z.T. sich über Diffusion bzw. Blasenwanderung [4] erklären läßt.

Tabelle XXII: Spezifische Poren- und Gitterspaltgasausbeute V' (mm^3/g)



KVE	Prüf- ling	Z_3-Z_4	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt	Z_1-Z_2	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt
42	4B/27	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/26	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/25	-	-	-	-	-	-	-	-
43	4B/34	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/32	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/30	-	-	-	-	-	-	-	-
44	4B/35	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/33	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/31	-	-	-	-	-	-	-	-
45	4B/29	-	-	-	-	-	-	-	-
	4B/28	-	-	-	-	-	-	-	-
	4A/24	- siehe Versuchsgruppe 4a -							-
47	4B/4	68/78	364	103	468	4/13	555	59	614
	4B/3	61/71	485	89	574	13/23	642	101	743
	4B/2	62/71	439	189	628	13/23	548	141	689
	4B/1	62/71	733	190	923	13/23	765	245	1010
48	4B/9	62/71	330	81	411	12/22	683	149	832
	4B/8	61/71	245	99	344	12/22	465	136	601
	4B/7	62/71	276	116	392	13/23	476	101	577
	4B/5	62/71	363	131	494	13/23	457	125	582
49	4B/11	40/48	1004	251	1255	30/38	757	153	910
	4B/12	46/55	1355	246	1601	10/20	712	188	900
	4B/10	40/49	109	160	269	30/38	1022	318	1340
	4B/6	56/64	649	322	971	30/38	-	-	-
55	4B/13	47/57	69	-	69	24/31	294	195	489
	4B/14	50/59	427	155	582	20/30	339	149	488
	4B/13	25/33	341	133	474	15/23	324	131	455
56	4B/18	49/58	900	188	1088	19/29	763	241	1004
	4B/17	49/58	885	167	1052	19/29	763	222	985
	4B/16	49/58	714	217	931	19/29	697	187	884
57	4B/21	30/39	-	-	-	19/29	419	124	543
	4B/20	49/58	-	-	-	19/29	376	118	494
	4B/19	50/59	-	-	-	19/29	396	151	547
58	4B/24	48/58	725	322	1047	19/28	873	176	1049
	4B/23	40/48	717	167	884	30/39	862	187	1049
	4B/22	48/55	799	162	961	10/19	1112	118	1230

Bemerkung: Die Z_1 bedeuten den Abstand (bz. die Länge) der zur Bestimmung des Spaltgases aus der Brennstoffsäule herausgeschnittenen Probe in mm vom unteren Brennstoffsäulenende

Tabelle XXIII: Spaltgasbilanz

KVE	Prüfl.	Abbrand ^{+) A_{max} (MWd/kg M)}	Freies Spaltgas V _F		Porenspaltgas V _P		Gitterspaltgas V _G		Gesamtspaltgas (mm ³)	
			(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	(mm ³)	(%)	gem.	theor.
42	4B/27	23,2	4973	-	-	-	-	-	-	9761
	4B/26	25,7	3193	-	-	-	-	-	-	10813
	4B/25	25,2	18830	-	-	-	-	-	-	10603
43	4B/34	10,3	-	-	-	-	-	-	-	4334
	4B/32	11,4	-	-	-	-	-	-	-	4796
	4B/30	11,9	-	-	-	-	-	-	-	5007
44	4B/35	25,1	17470	-	-	-	-	-	-	10560
	4B/33	28,2	16958	-	-	-	-	-	-	11822
	4B/31	26,7	21067	-	-	-	-	-	-	11234
45	4B/29	17,1	-	-	-	-	-	-	-	7195
	4B/28	19,6	6770	-	-	-	-	-	-	8246
	4A/24		- s. Versuchsgruppe 4a -							
47	4B/4	85,4	28990	77,1	7323	19,5	1289	3,4	37602	37339
	4B/3	85,5	31090	74,8	8952	21,5	1510	3,7	41552	37384
	4B/2	87,4	25540	70,9	7852	21,8	2625	7,3	36017	38214
	4B/1	81,5 ^{o)}	26070	63,0	11879	28,7	3451	8,3	41400	35600
48	4B/9	79,1	26290	72,5	8140	22,4	1848	5,1	36278	35000
	4B/8	74,3	29300	79,4	5714	15,5	1889	5,1	36903	32895
	4B/7	83,8	32210	80,6	6023	15,1	1734	4,3	39967	36871
	4B/5	78,3	31820	78,8	6529	16,2	2044	5,0	40393	34450
49	4B/11	100,0	36050	66,6	14120	26,1	3327	6,3	54097	44548
	4B/12	110,4	39080	65,8	16832	28,3	3527	5,9	59439	49485
	4B/10	123,8	38370	66,4	15567	26,9	3832	6,7	57769	54470
	4B/6	120,0 ^{o)}	39640	72,0	10391	18,9	5138	9,1	55169	52400
55	4B/15	62,2	18250	76,1	2755	11,5	2976	12,4	23981	25657
	4B/14	66,8	23190	74,0	5813	18,6	2314	7,4	31317	27921
	4B/13	63,3 ^{o)}	22260	74,6	5049	16,9	2531	8,5	29840	26458
56	4B/18	60,4	15685	49,5	12713	40,1	3272	10,4	31670	25412
	4B/17	62,8	12506	44,6	12568	44,8	2970	10,6	28044	26422
	4B/16	64,9	12620	47,8	10692	40,5	3060	11,7	26372	27127
57	4B/21	81,8	46050	84,6	6439	11,8	1919	3,6	54408	34641
	4B/20	87,8	55100	87,9	5769	9,2	1818	2,9	62687	37181
	4B/19	91,2	50700	85,9	6022	10,2	2292	3,9	59014	38120
58	4B/24	109,5	36760	69,7	12162	23,1	3792	7,2	52714	45769
	4B/23	109,1	37510	71,8	12049	23,1	2701	5,1	52260	45902
	4B/22	86,7	35935	68,1	14660	27,8	2152	4,1	52747	36477

+) max. Abbrände s.Tab.XVI^{o)} korrigierter Wert; () unsicherer Wert

Tabelle XXIV: Xe/Kr-Verhältnis, partiell und gesamt

KVE	Prüfl.	Abbrand ⁺ (MWd/kg M)	Freies Spaltgas	Poren- Spaltgas	Gitter- Spaltgas	Gesamt- Spaltgas
42	4B/27	23,2	11,3	-	-	-
	4B/26	25,7	11,3	-	-	-
	4B/25	25,2	17,3	-	-	-
43	4B/34	10,3	-	-	-	-
	4B/32	11,4	-	-	-	-
	4B/30	11,9	-	-	-	-
44	4B/35	25,1	21,7	-	-	-
	4B/33	28,2	17,7	-	-	-
	4B/31	26,7	14,4	-	-	-
45	4B/29	17,1	-	-	-	-
	4B/28	19,6	18,9	-	-	-
	4A/24		- s. Versuchsgruppe 4a -			
47	4B/4	85,4	18,4	11,4	24,8	16,6
	4B/3	85,5	18,0	16,5	25,5	18,3
	4B/2	87,4	16,7	13,9	24,5	16,4
	4B/1	81,5 ^{o)}	16,2	16,6	24,2	16,8
48	4B/9	79,1	17,9	16,1	22,4	17,6
	4B/8	74,3	17,3	15,9	21,6	17,3
	4B/7	83,8	17,8	14,8	25,3	17,5
	4B/5	78,3	17,5	15,2	20,3	17,2
49	4B/11	100,0	16,6	17,7	19,2	17,0
	4B/12	110,4	14,8	22,1	18,5	16,5
	4B/10	123,8 ^{o)}	15,2	16,4	22,7	15,8
	4B/6	120,0	15,9	17,0	19,7	16,4
55	4B/15	62,2	18,2	10,0	30,3	17,5
	4B/14	66,8	18,5	16,1	25,9	18,4
	4B/13	63,3 ^{o)}	18,2	14,8	31,9	18,2
56	4B/18	60,4	17,3	15,5	26,5	17,1
	4B/17	62,8	18,0	16,1	21,9	17,4
	4B/16	64,9	17,8	15,9	21,5	17,3
57	4B/21	81,8	17,0	15,2	26,8	16,7
	4B/20	87,8	17,3	16,2	22,9	17,3
	4B/19	91,2	18,0	15,6	23,9	17,7
58	4B/24	109,5	18,8	16,6	23,8	18,5
	4B/23	109,1	18,7	16,5	30,4	18,5
	4B/22	86,7	18,6	16,6	25,6	18,2
Mittelwerte			17,28	15,66	23,82	17,26

+) max. Abbrand aus Tab. XVI; o) korrigierte Werte

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die Unstimmigkeiten in der Spaltgasbilanz beruhen auf

- Schwierigkeiten bei der meßtechnischen Erfassung der Spaltgasanteile,
- Unsicherheiten in der Bestimmung des wahren Abbrandes (sowohl radiochemisch als auch kalorimetrisch),
- Unsicherheit in der Erzeugungsrate der langlebigen Gasatome.

8.2 Keramografie

Die Keramografie nimmt unter den Untersuchungsmethoden für die hier besprochenen Brennstab-Prüflinge eine wichtige Stellung ein. Sie beginnt mit dem Festlegen der zu untersuchenden Bereiche, wobei im wesentlichen Schnitte durch die Brennstoffsäule untersucht werden. Folgende Gesichtspunkte sind bei der Auswahl berücksichtigt worden:

- 1.) Brennstabdaten
(Stabaufbau, Brennstoffspezifikationen)
- 2.) Bestrahlungsdaten
(Stableistungsverlauf entlang der Stabachse)
- 3.) Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchung
 - Durchleuchtung (Zentralkanal und Rißkonfiguration)
 - γ -Spektrometrie (Brennstoff und Spaltprodukt-Verlagerungen)

Das Ziel der Keramografie war, einerseits eine typische Verhaltensweise für bestimmte Parameterkombinationen aufzuzeigen, andererseits Besonderheiten im Stabverhalten darzulegen. Für das erstere Ziel wurden in jedem Stab Schnittebenen ausgesucht, die in möglichst ungestörten, regelmäßigen Bereichen, meist in Stabmitte lagen. Untypische Brennstoffstrukturen wurden besonders häufig an den Säulenenden beobachtet und untersucht. Eine vergleichende Auswertung, bei der die Zentralkanalgröße, der Brennstoff/Hüll-Spalt und die konzentrischen Strukturzonen im Brennstoff vermessen wurden, ist praktisch nur an Querschliffen möglich, weshalb die als typisch angesehenen Brennstoffabschnitte als Querschliffe ausgeführt wurden. Für die Beobach-

tung spezieller Verhaltensweisen erwiesen sich Längsschliffe als besonders brauchbar. Sie erlauben den Verlauf eines Phänomens entlang der Stabachse bis zu einer Länge von 20 mm zu verfolgen.

Für die Dokumentation einer Schliffebene wurde bei den meisten Prüflingen folgendes Schema angewandt:

Aufnahmetyp	Vergrößerung	Verarbeitung der Untersuchungsfläche
1. Totalaufnahme	15 x	a) poliert b) geätzt
2. α - und β -Autoradiografie	15 x	poliert
3. Mittelvergrößerung	25 x	a) poliert b) geätzt
4. Panorama-Aufnahme über den Säulenradius	100 x	a) poliert b) geätzt
5. Detailaufnahmen	100 x 200 x 500 x	a) poliert b) geätzt

Darüber hinaus wurden an den Quer- und Längsschliffen folgende Daten am Mikroskop ermittelt:

- 1. Radius des Zentralkanals
- 2. Radius der Säulenkristallzone (kleine Kristalle) = Kornwachstum
- 3. Radius der Säulenkristallzone (große Kristalle)
- 4. Spalt zwischen Brennstoff und Hülle

Soweit vorhanden wurden auch andere abgrenzbare Strukturzonen in ihrer Ausdehnung bestimmt.

In den Abb. 57 bis 60 sind die wichtigsten Daten dieser Auswertung numerisch und graphisch wiedergegeben. Die aufgeführten Radien beziehen sich auf die äußere Abgrenzung der Strukturzonen. Beim radialen Spalt ist der Mittelwert aus vier Einzelmessungen angegeben, die bei Querschliffen um 90° versetzt, bei Längsschliffen jeweils in Zweiergruppen einander gegenüber bestimmt wurden.








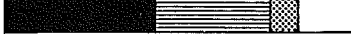













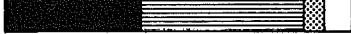
KVE	Prüfl.	Probe Quer-o. Längs	Zentralkanalradius r [mm]	Säulenkristzone klein r [mm]	Säulenkristzone groß r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK  Komwachst  Säulenkrist  Brennstoff unverän.  ← Brennstoffradius → 
42	B 25	1 L	1,00	2,00	2,15	12	
		2 Q	0,70	1,80	2,00	12	
	B 26	1 L	1,10	1,95	2,15	0	
		2 Q	0,70	1,80	1,95	0	
	B 27	1 L	1,30	2,05	2,20	0	
		2 Q	0,65	1,70	1,90	0	
43	B 32	2 Q	0,50	1,80	2,05	0	
44	B 35	1 L	0,88	1,85	2,00	0	
		2 Q	0,68	1,70	1,90	0	
	B 33	1 L	1,25	1,95	2,20	0	
		2 Q	0,92	2,00	2,20	20	
	B 31	1 L	1,25	2,30	-	0	
		2 Q	0,82	1,95	2,20	0	
45	B 29	1 L	1,10	2,00	2,20	0	
		2 Q	0,85	2,10	2,30	10	
	B 28	1 L	1,15	2,10	2,25	0	
		2 Q	1,00	2,20	2,35	0	

Abb. 57

Brennstoffstruktur





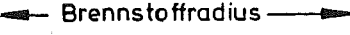
KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone klein r [mm]	Säulenkrist- zone groß r [mm]	rad. Spalt [μm]	ZK  Kornwachst.  Säulenkrist.  Brennstoff unverän.  ← Brennstoffradius → 	
47	B 4	1 Q	0,52	1,60	2,10	0		
		2 L	0,50	1,70	2,10	0		
	B 3	1 Q	0,75	1,90	2,40	0		
		2 L	0,75	1,80	2,50	0		
	B 2	1 Q	0,80	2,20	2,40	0		
		2 L	0,80	2,10	2,30	0		
	B 1	1 Q	0,85	1,90	2,40	0		
		2 L	0,70	1,80	2,10	0		
	48	B 9	1 Q	0,68	1,70	2,00	0	
			2 L	0,64	-	-	0	
		B 8	1 Q	0,70	-	2,10	0	
			2 L	0,65	-	-	0	
B 7		1 Q	0,70	1,60	1,80	0		
		2 L	0,76	1,60	1,90	0		
B 5		1 Q	0,76	1,75	2,10	0		
		2 L	0,75	-	1,70	0		

Abb. 58 Brennstoffstruktur






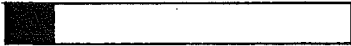











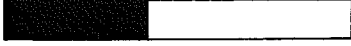
KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone klein r [mm]	Säulenkrist- zone groß r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK  Kornwachst  Säulenkrist.  Brennstoff unverän.  ← Brennstoffradius →	
49	B 11	1 Q	0,51	1,80	2,20	0		
		2 L	0,35	-	-	0		
	B 12	1 Q	0,56	1,70	2,20	0		
		2 L	0,47	1,60	2,10	0		
	B 10	1 Q	0,71	1,90	2,30	0		
		2 L	0,65	1,80	2,20	0		
	B 8	1 Q	0,79	1,90	2,40	0		
		3 L	0,67	1,80	2,20	0		
	55	B 15	1 Q	0,75	1,90	2,30	0	
			2 L	0,94	1,80	2,30	0	
B 14		1 Q	1,05	2,00	2,40	0		
		2 L	0,75	1,90	2,30	0		
B 13		1 Q	1,35	2,50	-	0		
		2 L	1,05	-	-	0		

Abb. 59 Brennstoffsstruktur








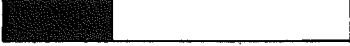

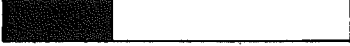

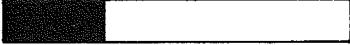



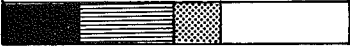






KVE	Prüfl.	Probe Quer- o. Längs	Zentralka- nalradius r [mm]	Säulenkrist- zone klein r [mm]	Säulenkrist- zone groß r [mm]	rad. Spalt [µm]	ZK  Kornwachst. 	
							Säulenkrist.  Brennstoff unverän. 	 Brennstoffradius 
56	B 18	1 Q	0,76	1,70	1,90	0		
		2 L	0,80	-	-	0		
	B 17	1 Q	0,78	1,60	2,00	0		
		2 L	0,80	-	-	0		
	B 16	1 Q	0,85	1,80	2,10	0		
		2 L	0,75	-	-	0		
57	B 21	1 Q	0,53	1,50	1,80	0		
		2 L	0,75	1,50	1,80	0		
	B 20	1 Q	0,70	1,35	1,60	0		
		2 L	0,55	1,25	1,60	0		
	B 19	1 Q	0,86	1,60	1,85	0		
	58	B 24	1 Q	0,75	1,80	2,10	0	
2 L			0,72	1,75	2,05	0		
B 23		1 Q	0,66	1,80	2,10	0		
B 22		1 Q	0,80	1,80	2,10	0		
		2 L	0,77	1,75	2,05	0		

Abb. 60 Brennstoffstruktur

8.3 Radiochemische Abbrandbestimmungen

Aus den Temperaturanzeigen der Thermoelemente in den Kapselversuchseinsätzen wurde für jeden Prüfling die Stableistung und, integriert über die Bestrahlungszeit, der Abbrand errechnet.

Zur Stützung dieser Ergebnisse wurden zusätzlich die Abbrände durch radiochemische Isolierung und quantitative Analyse bestimmter Spaltprodukte ermittelt.

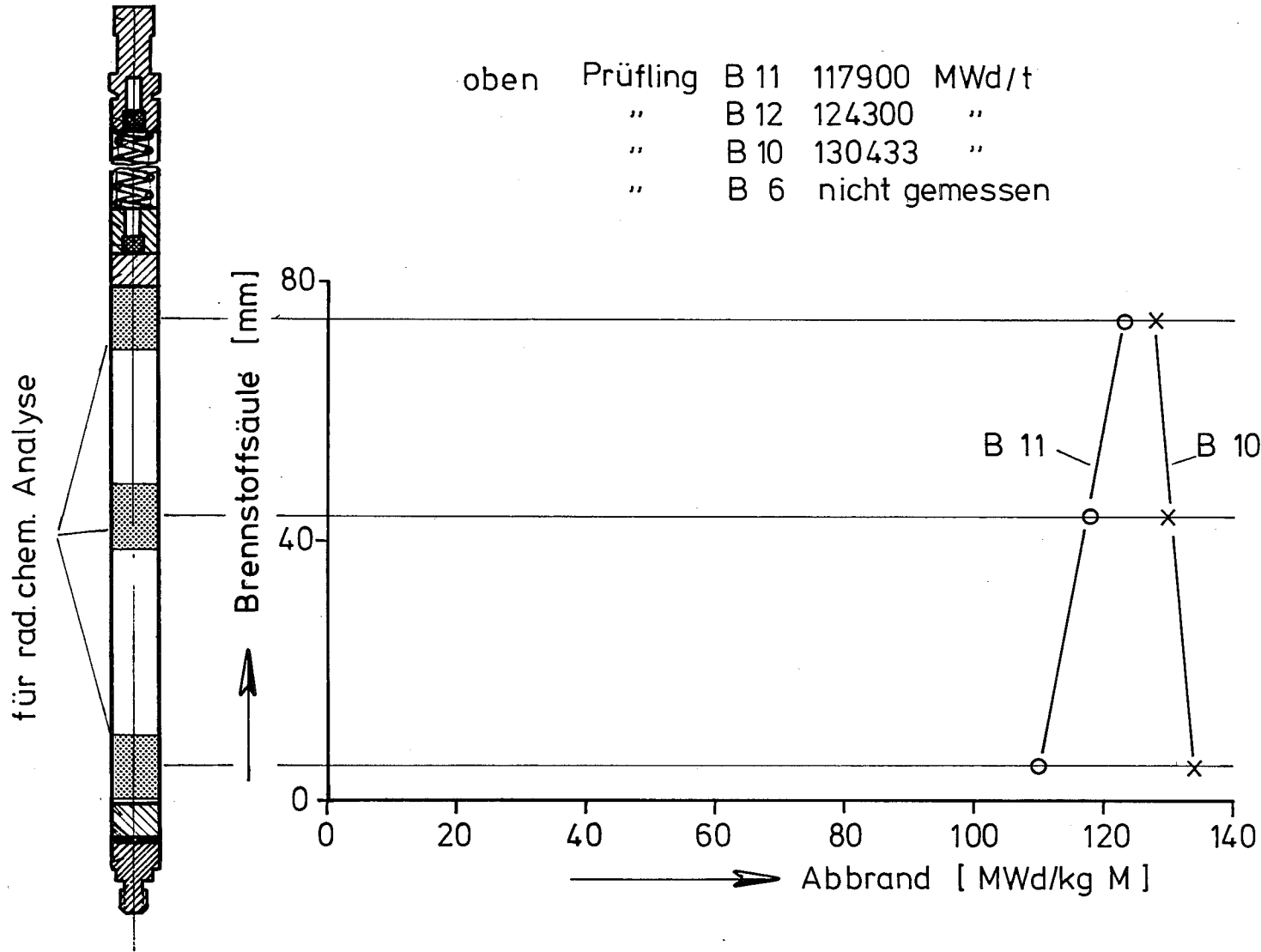
Hierzu wurden aus dem Bereich der Brennstoffsäule 8 bis 10 mm lang Abschnitte herausgetrennt. Sie enthielten gewöhnlich etwa 2 g Brennstoff. Die Proben entstammten aus der Brennstoffsäulenmitte und bei den KVE 55, 56, 57 und 58 15 mm oberhalb der Prüflingsmitte (Einbauzustand). Bei den KVE 49 (Prüfling 4B/10 und 4B/11) und KVE 57 (Prüfling 4B/19 und 4B/21) wurden drei Abbrandproben entnommen (s. Profile in Abb. 61 und 62). Als Abbrandindikator wurden sowohl die Pu-Abreicherung als auch die Spaltprodukte Ce-144 und Nd-148 benutzt. Aus den Einzelwerten wurde über eine Wichtung (Pu:Ce:Nd = 1:2:3) ein mittlerer Abbrandwert errechnet. Bei einem typischen Brennstoffprüfling lagen die Anteile der einzelnen Spaltquellen und Spaltausbeuten (\bar{Y}), gemittelt über die Bestrahlungszeit, etwa wie folgt [16]:

	Spaltquellen	\bar{Y} Ce-144 (%)	\bar{Y} Nd-148 (%)
U-238	schnelle Spaltung 0,5 %	4,30	1,90
U-235	thermische " 2,5 %	5,42	1,69
Pu-239	" " 93,0 %	3,78	1,70
Pu-241	" " 4,0 %	4,13	1,89

8.4 Vergleich der radiochemischen und berechneten Abbrandwerte

Als Ergebnis der radiochemischen Abbrandbestimmung ergab sich der Abbrand in Prozent der ursprünglich vorhandenen schweren Atome (FIMA). Zum Vergleich mit den berechneten Abbränden wurden dieselben in MWd/t umgerechnet. Hierzu wurden 10 000 MWd/t = 1,02 % FIMA gleichgesetzt.

oben	Prüfling	B 11	117900	MWd/t
	"	B 12	124300	"
	"	B 10	130433	"
	"	B 6	nicht gemessen	

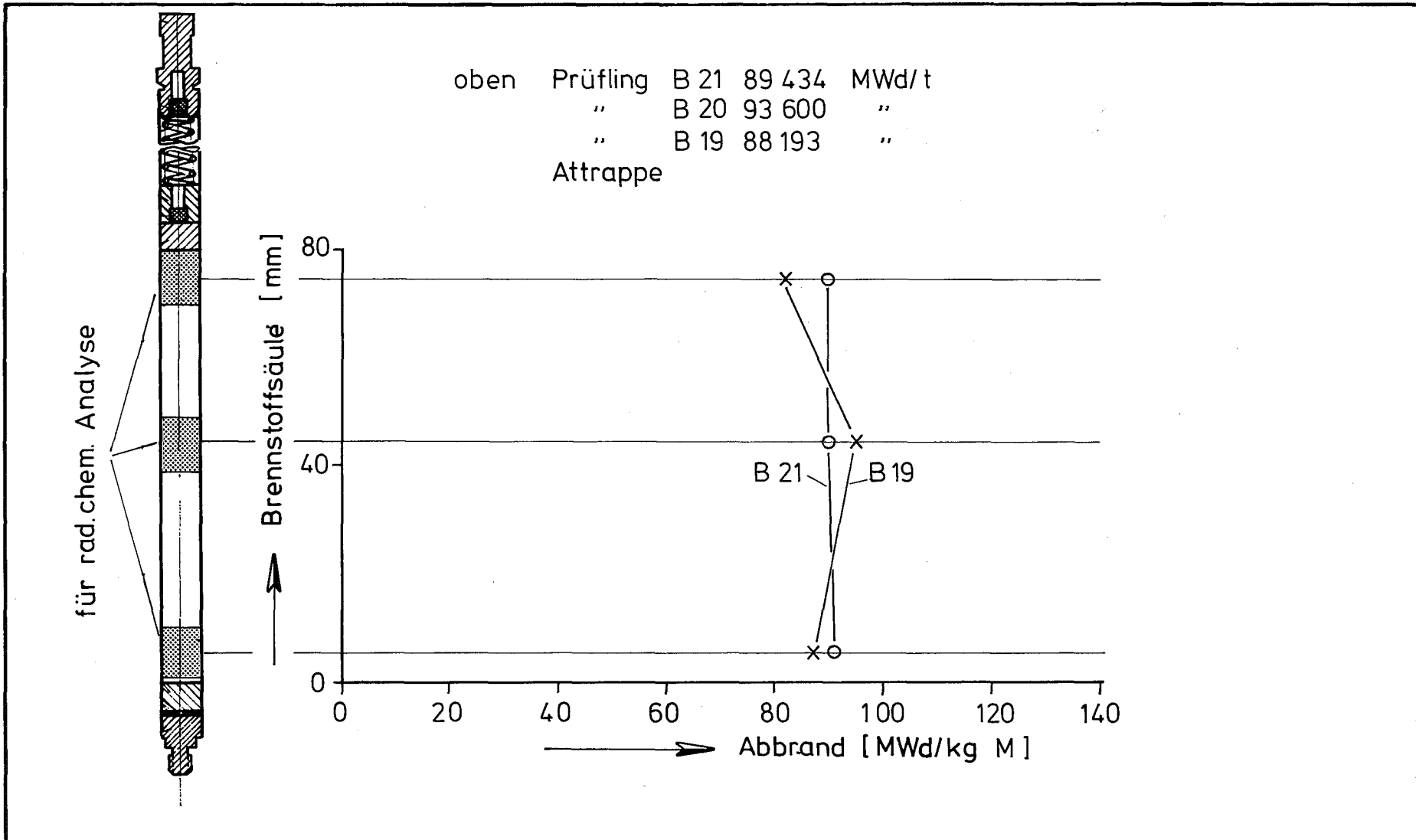


GfK Karlsruhe

IMF/III

Abbrandverteilung über Brennstofflänge
KVE 49

Abb. 61



GfK Karlsruhe
IMF/III

Abbrandverteilung über Brennstofflänge
KVE 57

Abb. 62

In Tabelle XXV sind die Wertepaare für sämtliche Prüflinge enthalten. Abb. 63 gibt die Abweichung der gerechneten von den radiochemisch bestimmten Werten wieder. Es ergibt sich eine Abweichung der gerechneten von - 14,1 % gegenüber den radiochemisch bestimmten Werten, d.h. die berechneten Werte liegen um ca. 14 % unter den analytisch bestimmten. Vergleicht man diesen Sachverhalt mit dem Ergebnis der Versuchsgruppe 4a (15 % Pu), so stellt man fest, daß bei Versuchsgruppe 4a ein Streuband von $\pm 9,5$ % auftrat, welches beidseitig durch Werte von Prüflingen mit Pu-Entmischung durchbrochen wurde. Das vorliegende Ergebnis ist voll befriedigend, wenn man beachtet, mit welcher großen Unsicherheiten die rein kalorimetrische Abbrandbestimmung behaftet ist. Auch stimmt hier die generelle Tendenz der negativen Abweichung, da die Hüll-Thermoelemente im besten Falle exakt die Hüllaußentemperaturen, meist aber etwas niedrigere Werte anzeigen. Letzteres rechtfertigt auch die Vorgehensweise, bei der Berechnung der theoretischen Spaltgasmenge von maximalen Abbränden auszugehen, um die Unsicherheit bei den Anteilen der Spaltgase je Spaltung zu kompensieren.

9. Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung

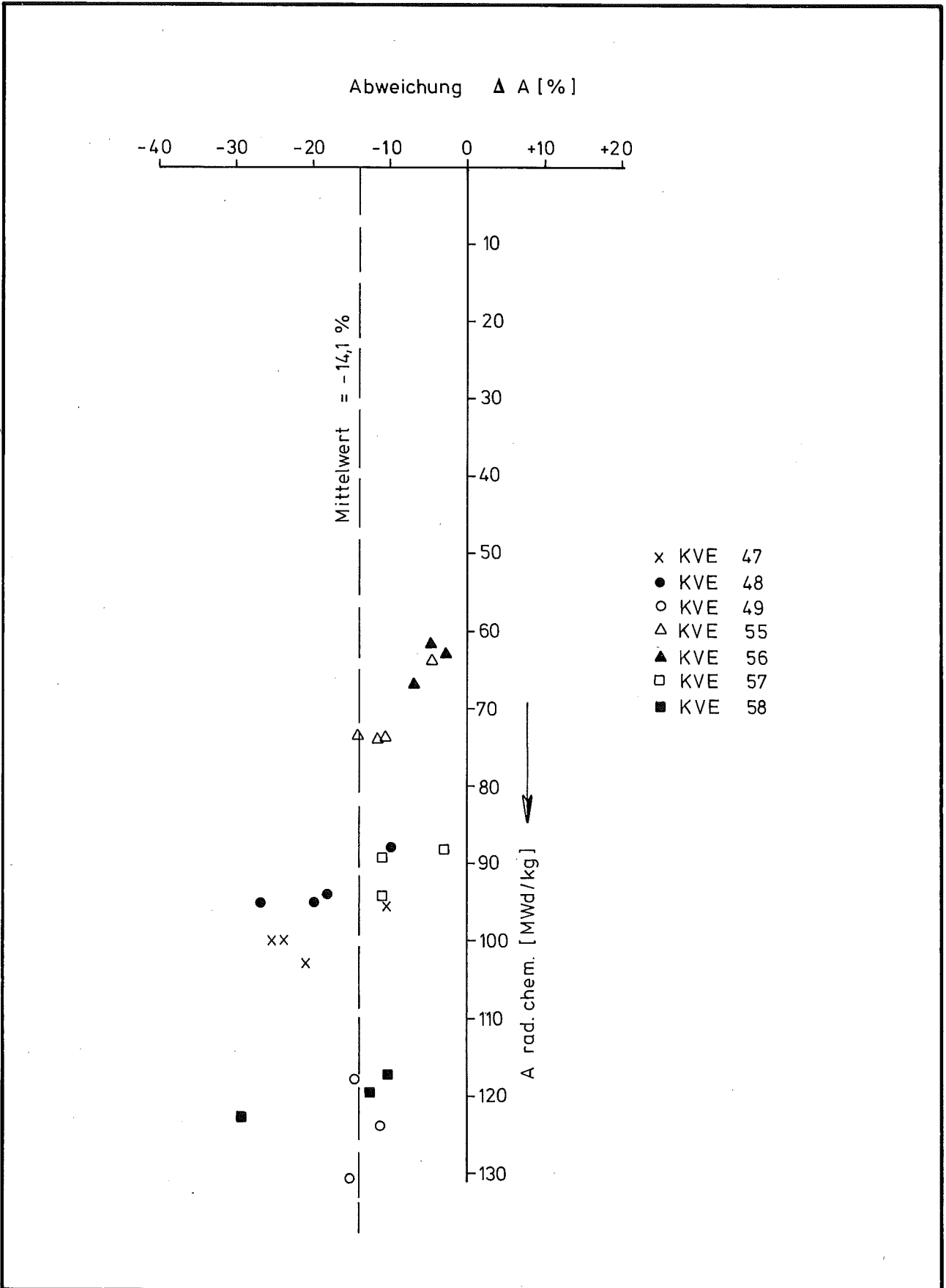
Im folgenden Abschnitt wird eine umfassende Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden Nachuntersuchung gegeben, welche eine Auswahl der wichtigsten Ereignisse für jeden der 35 Prüflinge enthält. Die Ergebnisse sind auf einem dreiseitigen Faltblatt zusammengestellt, welches folgende Aufteilung aufweist (von links nach rechts):

- Gamma-Profile des bestrahlten Prüflings:
 - a) integrales γ -Profil (Energiebereich 400 - 1700 keV),
 - b) differentielles γ -Profil für Teilenergiebereiche (isotopspezifisch, z.B. für Zr/Nb-95 700 bis 790 keV, Cs/Ba-137 640 bis 680 keV).

Tabelle XXV: Vergleich der radiochemisch bestimmten und berechneten Abbrände
(1 % A = 979,6 MWd/t)

KVE	Prüfl.	(1) A radioch. (MWd/kg)	(2) A berechnet (MWd/kg)	(2) - (1) ΔA (MWd/kg)	ΔA (%) (A radioch. = 100)	Symbole in Abb. 63
47	4B/4	95,3	85,3	- 10,0	- 10,4	X
	4B/3	100,0	74,6	- 25,4	- 25,4	
	4B/2	100,0	76,3	- 23,7	- 23,7	
	4B/1	103,0	81,5 ^{o)}	- 21,5	- 20,9 +)	
48	4B/9	88,0	79,1	- 8,9	- 10,1	●
	4B/8	95,1	71,5	- 19,5	- 20,5	
	4B/7	93,8	76,4	- 17,4	- 18,6	
	4B/5	95,1	69,1	- 26,0	- 27,3	
49	4B/11	117,9	99,9	- 18,0	- 15,3	○
	4B/12	124,3	110,0	- 14,3	- 11,5	
	4B/10	130,4	110,3	- 20,1	- 15,4	
	4B/6	-	120,0 ^{o)}	-	-	
55	4B/15	64,1	61,2	- 2,9	- 4,5	△
	4B/14	74,3	65,8	- 8,5	- 11,5	
	4B/13 ⁺)	73,7	63,3 ^{o)}	- 10,4	- 14,1	
56	4B/18	62,3	59,2	- 3,1	- 5,0	▲
	4B/17	63,3	61,3	- 2,0	- 3,1	
	4B/16	66,8	61,6	- 5,2	- 7,7	
57	4B/21	89,43	79,4	- 10,0	- 11,2	□
	4B/20	93,8	83,1	- 10,7	- 11,4	
	4B/19	88,2	84,8	- 3,4	- 3,8	
58	4B/24	117,1	105,0	- 12,1	- 10,3	■
	4B/23 ⁺)	119,5	104,2	- 15,3	- 12,8	
	4B/22 ⁺)	122,6	86,2	- 36,4	- 29,7	

+) Probe mit zentralem Brennstoffschmelzen, ^{o)} korrigierte Werte



GfK Karlsruhe
IMF/III

Abweichung der gerechneten gegenüber den
radiochemisch-bestimmten Abbrand-Werten

Abb. 63

- Keramografische Übersicht:

- a) technische Zeichnung des Prüflings (Maßstab 1:1) mit Markierung der Schnittebenen,
- b) keramografische Übersichtsaufnahmen entsprechend der Schnittzahl,
- c) α -Autoradiografie zur Darstellung der Pu-Verteilung nach Ablauf der Bestrahlung,
- d) γ -Autoradiografien zur Charakterisierung der Spaltproduktverteilung,
- e) Betatron-Durchleuchtung des Prüflings,
- f) schematische Darstellung des Prüflings mit Hervorhebung des Zentralkanalverlaufes.

- Titelblatt:

Kurze Zusammenfassung der Material- und Bestrahlungsdaten des Brennstabprüflings.

Auf weiteren Einzelblättern werden weiterhin signifikante Details wie beispielsweise axiale und radiale Materialversetzungen oder -entmischung des Brennstoffes, Nachweise für Hüllinnenkorrosion etc. in höheren Vergrößerungen gezeigt.

Abschließend sei an dieser Stelle vermerkt, daß es sich bei den angeführten Beispielen um eine nicht detailspezifische Auswahl aus einer großen Anzahl von keramografischen Aufnahmen handelt.

10. Schlußbetrachtung

Nach Abschluß der Nachuntersuchung der Kapselversuchsgruppe 4b, die der Erprobung von 35 Brennstabprüflingen mit Mischoxid als Brennstoff unter simulierten Schnellbrüterbedingungen im thermischen Fluß diente, kann folgende Bilanz gezogen werden:

1. Die spezifikationsgemäß angestrebte Stableistung von 500 W/cm und eine maximale Hüllwandtemperatur (außen) von max. 680 °C wurden erreicht.
2. Der angestrebte mittlere Abbrand von 80.000 MWd/t M wurde für die mit Tabletten gefüllten Prüflinge erreicht bzw. überschritten.

Bei den mit vibriertem Brennstoff gefüllten Prüflingen traten wegen kapselspezifischer Schwierigkeiten Hüllschäden auf, worauf die Bestrahlung abgebrochen wurde.

3. Alle Prüflinge blieben intakt.
4. Die tablettengefüllten Stäbe zeigten eine Durchmesserzunahme von maximal 2 %, die vibrierten zeigten teilweise eine Durchmesserabnahme im Brennstoffbereich.
5. In den Prüflingen treten die durch Temperatur, Stableistung und Abbrand bewirkten Strukturänderungen wie Zentralkanal und Ausbildung von Strukturzonen (Stengelkorn, gerichtetes Kornwachstum) auf. Bei 2 tablettengefüllten Prüflingen wurde zentrales Brennstoffschmelzen beobachtet.
6. Bedingt durch die hohen Brennstofftemperaturen hat in den meisten Prüflingen eine axiale Umverteilung bestimmter Spaltprodukte stattgefunden. Typisch für die Änderungen sind Anreicherungen von Cs-137 am oberen, dem Spaltgasraum zugewandten Ende der Brennstoffsäule.
7. Stärkere Hüllangriffe durch Reaktionen mit dem Brennstoff treten erst ab Hülltemperaturen von 600 °C auf.
8. Für die Spaltgasfreisetzung und -verteilung im Brennstoff ergibt sich der schon in Versuchsgruppe 4a beobachtete Sachverhalt: Mit zunehmendem Abbrand erhöht sich der Anteil des freigesetzten Spaltgases auf bis zu 80 %. Das im Brennstoff verbliebene Rest-Spaltgas findet sich bei niedrigem Abbrand noch zu einem erheblichen Teil im Gitter, bei hohem Abbrand ist es dagegen vornehmlich in den Poren zu finden.

Literatur:

- [1] D. Freund:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der Oxidbrennstab-
proben im FR 2, KFK 1376, Mai 1972
- [2] D. Freund, Th. Dippel, D. Geithoff, P. Weimar:
Auslegung, Bestrahlung und Nachuntersuchung der UO_2/PuO_2 -Brennstab-
Bestrahlungsexperimente der FR 2-Kapsel-Versuchsgruppe 4a, KFK 1523,
April 1973
- [3] H. Huber, H. Kleykamp:
Nachbestrahlungsuntersuchungen mit der Mikrosonde an UO_2 - und $(U,Pu)O_2$ -
Brennstäben der Versuchsgruppen 3 und 4a der FR 2-Kapselbestrahlungen,
KFK 1324, Februar 1972
- [4] W. Dienst, O. Götzmann, H. Kleykamp, G. Ondracek, B. Schulz, H. Zimmermann:
Auswertung der Untersuchungsergebnisse an den bestrahlten UO_2 - PuO_2 -
Brennstäben der Versuchsgruppe FR 2-4a, KFK 1727, Januar 1973
- [5] G. Karsten, A. Gerken:
Spezifikation des Brennstabes für die FR 2-Kapselversuchsgruppe 4b,
unveröffentlicht
- [6] A. Gerken: persönliche Mitteilung
- [7] Th. Dippel, K. Kummerer, K.H. Triemer:
Herstellung Pu-haltiger Prüflinge für Versuchsgruppe 4b der FR 2-
Kapselbestrahlungen, unveröffentlicht
- [8] H.E. Häfner:
Bestrahlung von Brennstäben in instrumentierten Natrium-Blei-Wismut-
Doppelkapseln, Kerntechnik 12, Heft 5/6, 1970
- [9] H.E. Häfner:
persönliche Mitteilung

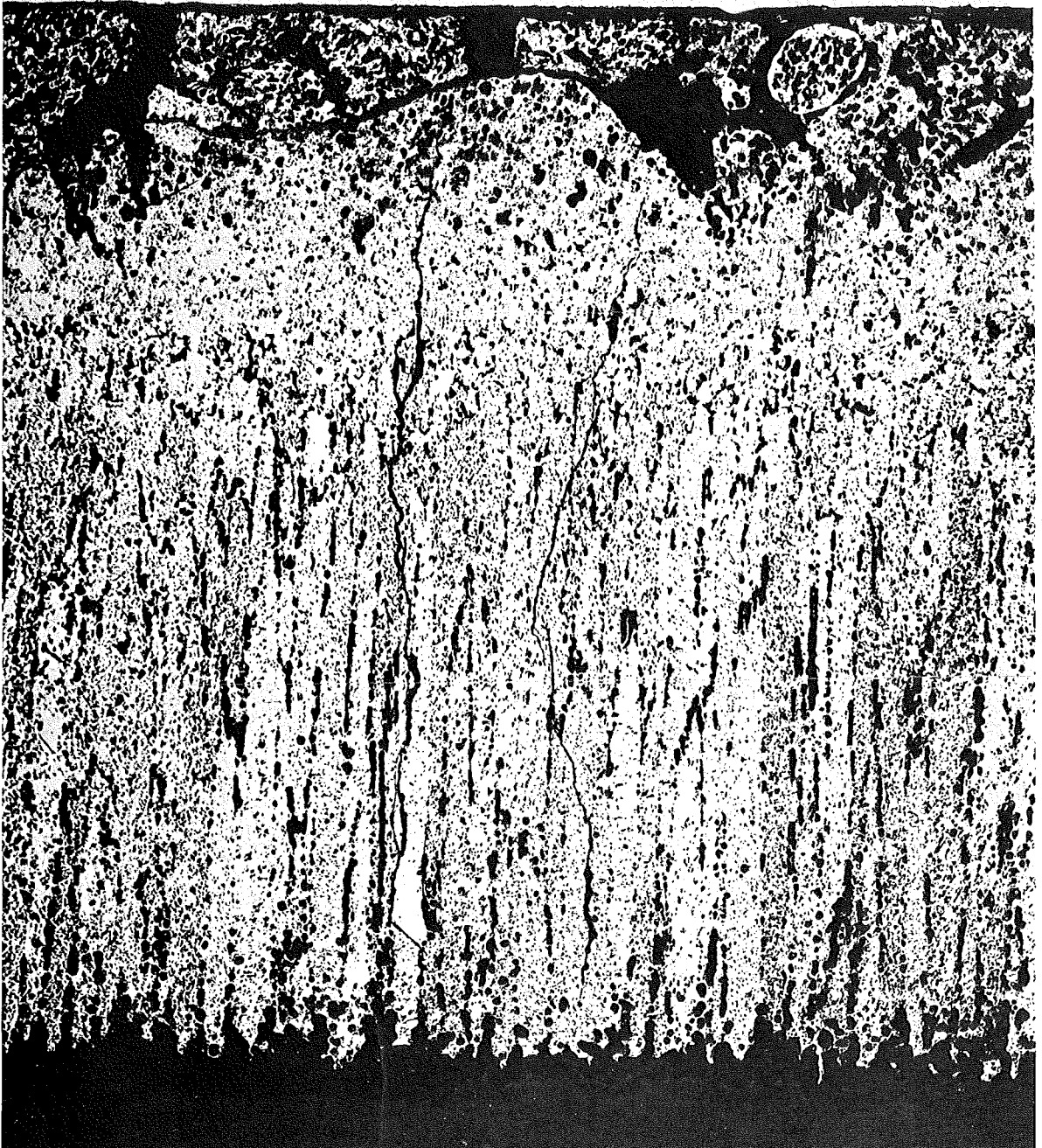
- [10] H.E. Häfner:
Übersicht über die im FR 2 bestrahlten Brennstoff-Bestrahlungskapseln, unveröffentlicht
- [11] Untersuchungsberichte Heiße Zellen GfK, unveröffentlicht
- [12] S. Hagen, H. Malauschek:
Messungen des thermischen Flusses in den Isotopenkanälen des FR 2, unveröffentlicht
- [13] M.J. Roth et al.:
The Preparation of Input Data for WIMS, Winfrith, Report AEEW-R 538, August 1967
- [14] H. Gräbner:
Spaltgasmessungen, Jahresbericht der Heißen Zellen, unveröffentlicht
- [15] K. Varteressian, L. Burris:
Fission Product Spectra from Fast and Thermal Fission of U-235 and Pu-239, ANL 7678, 1970
- [16] H. Wertebach:
persönliche Mitteilung

A n h a n g I

Dokumentation der zerstörungsfreien und zerstörenden
Nachuntersuchung

-1/3-
zu Prüfling 4B/27
A1

3-42-4B/27-1/11 100 x geätzt

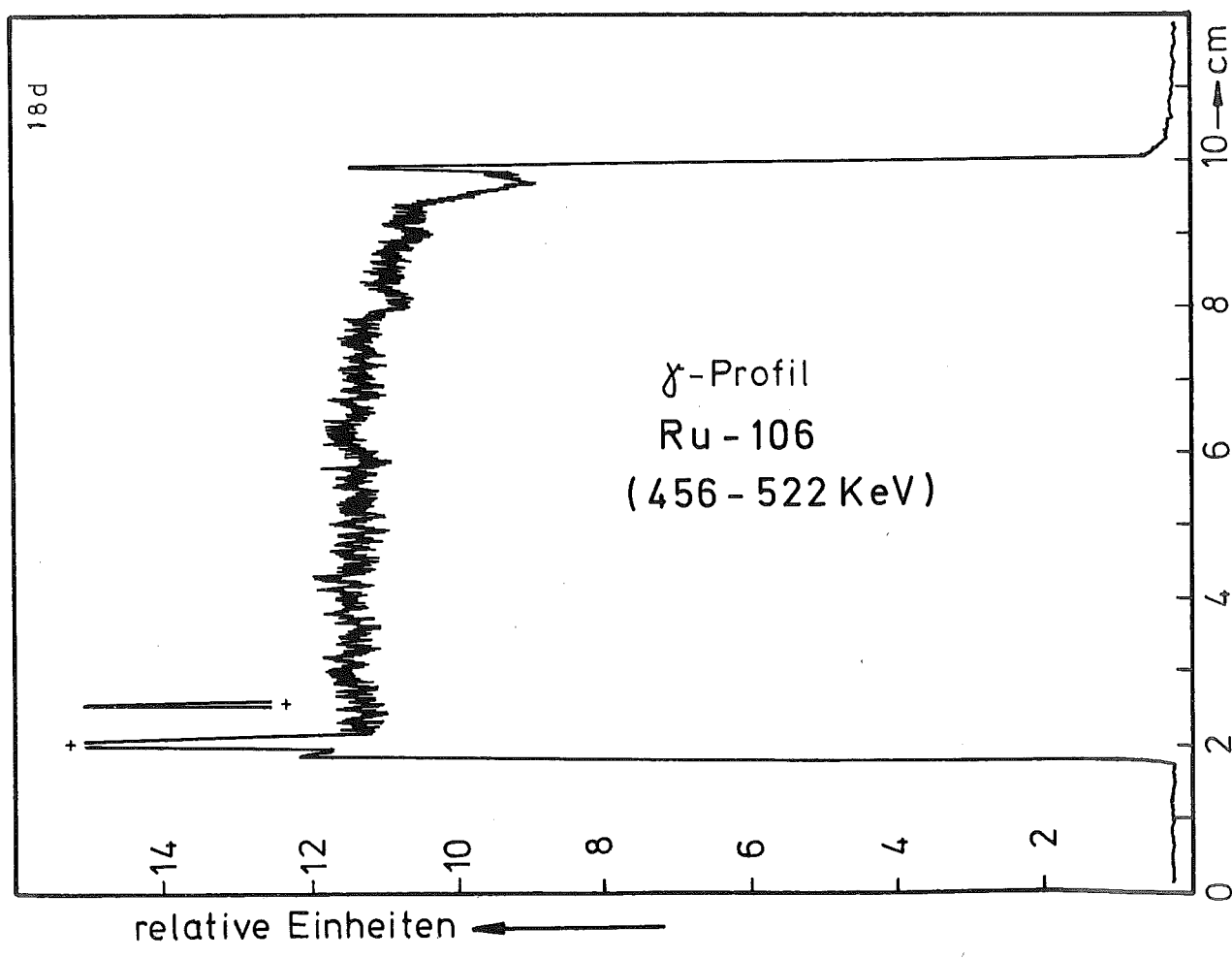
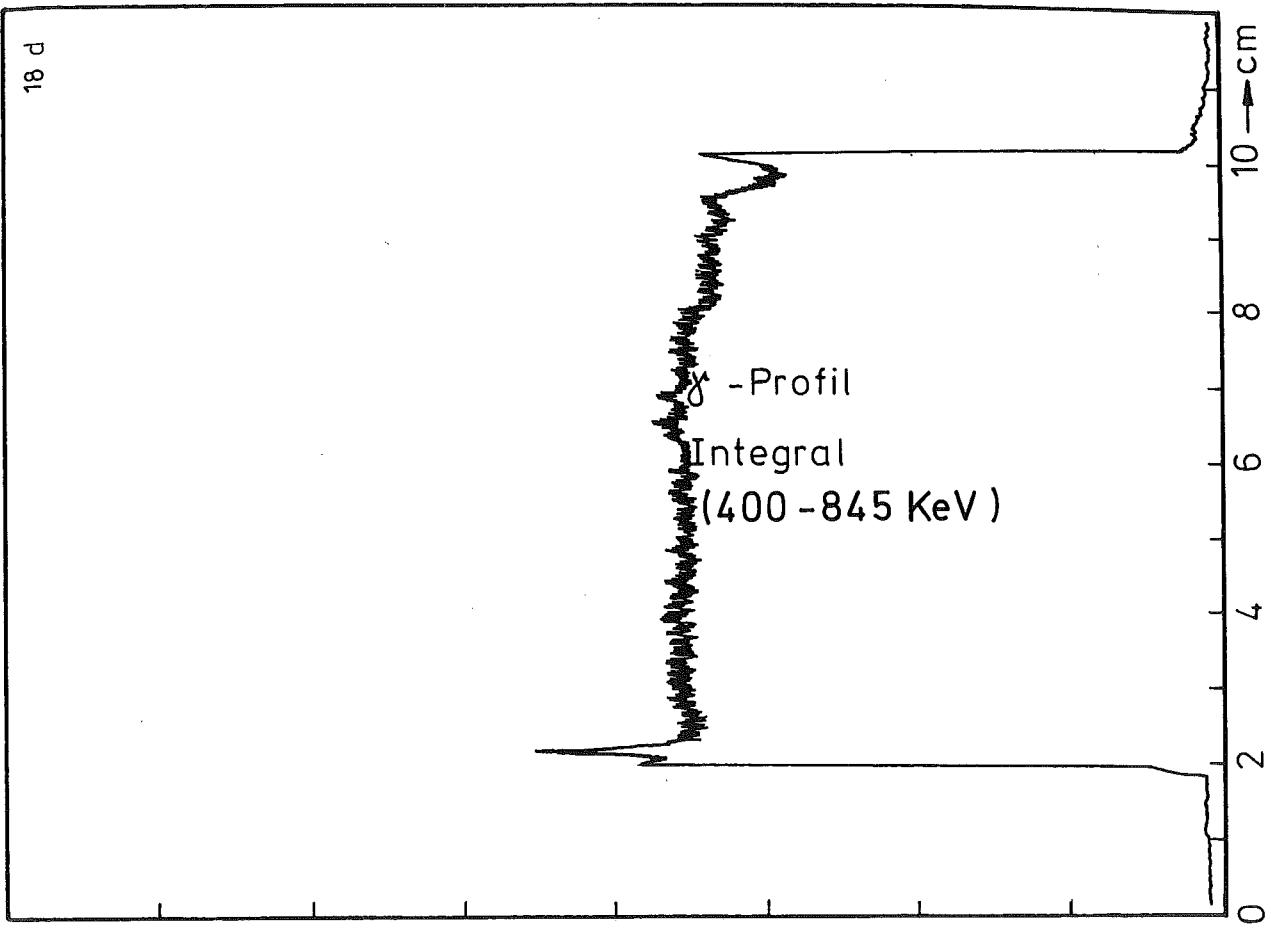


—|—
0,1 mm

-1/4 -
zu Prüfling 4B/27
A2



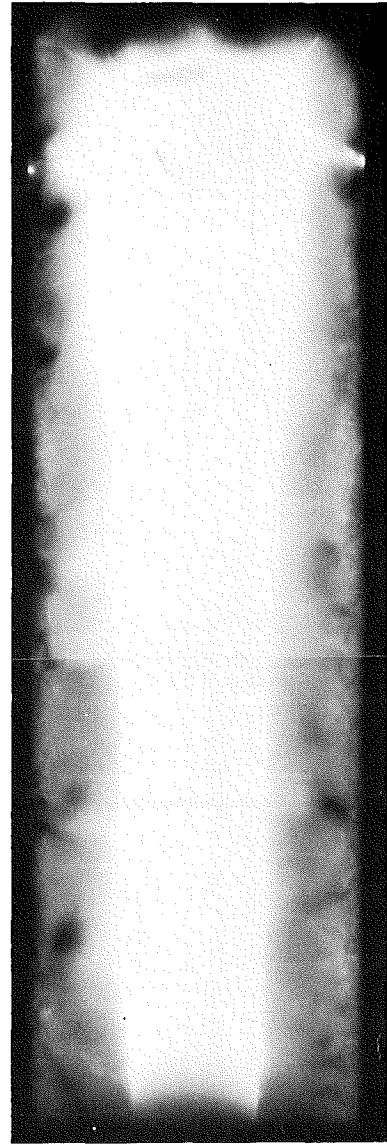
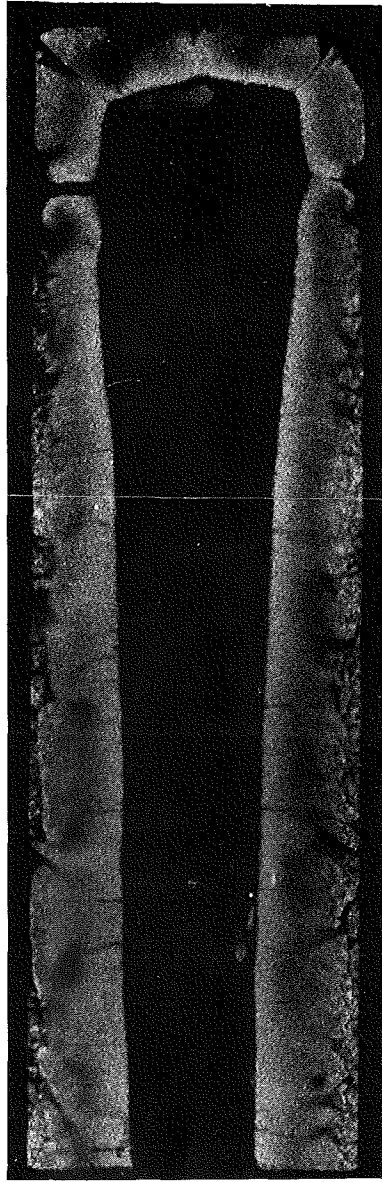
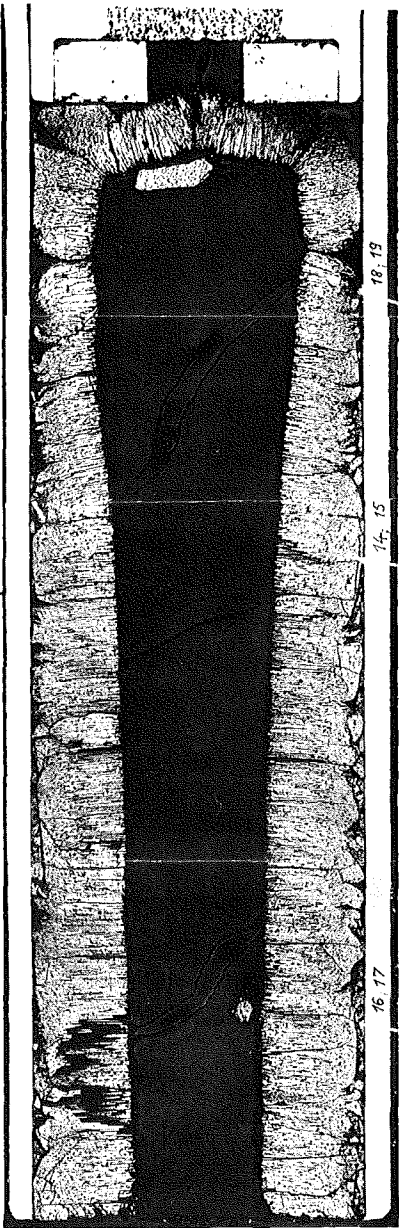
0,1mm



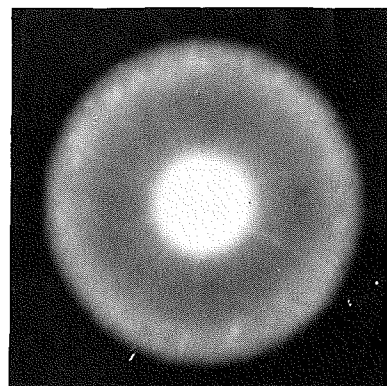
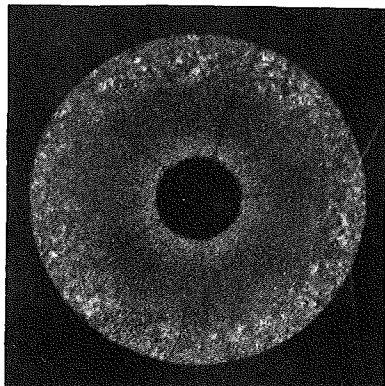
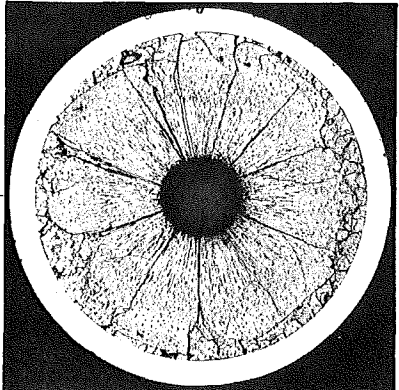
A

B

C

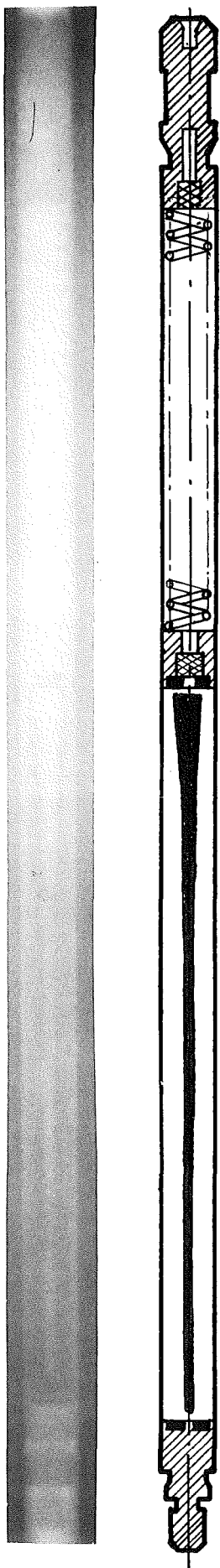


1



2

1mm



Prüfling 4B-27

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : ———

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : ———

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

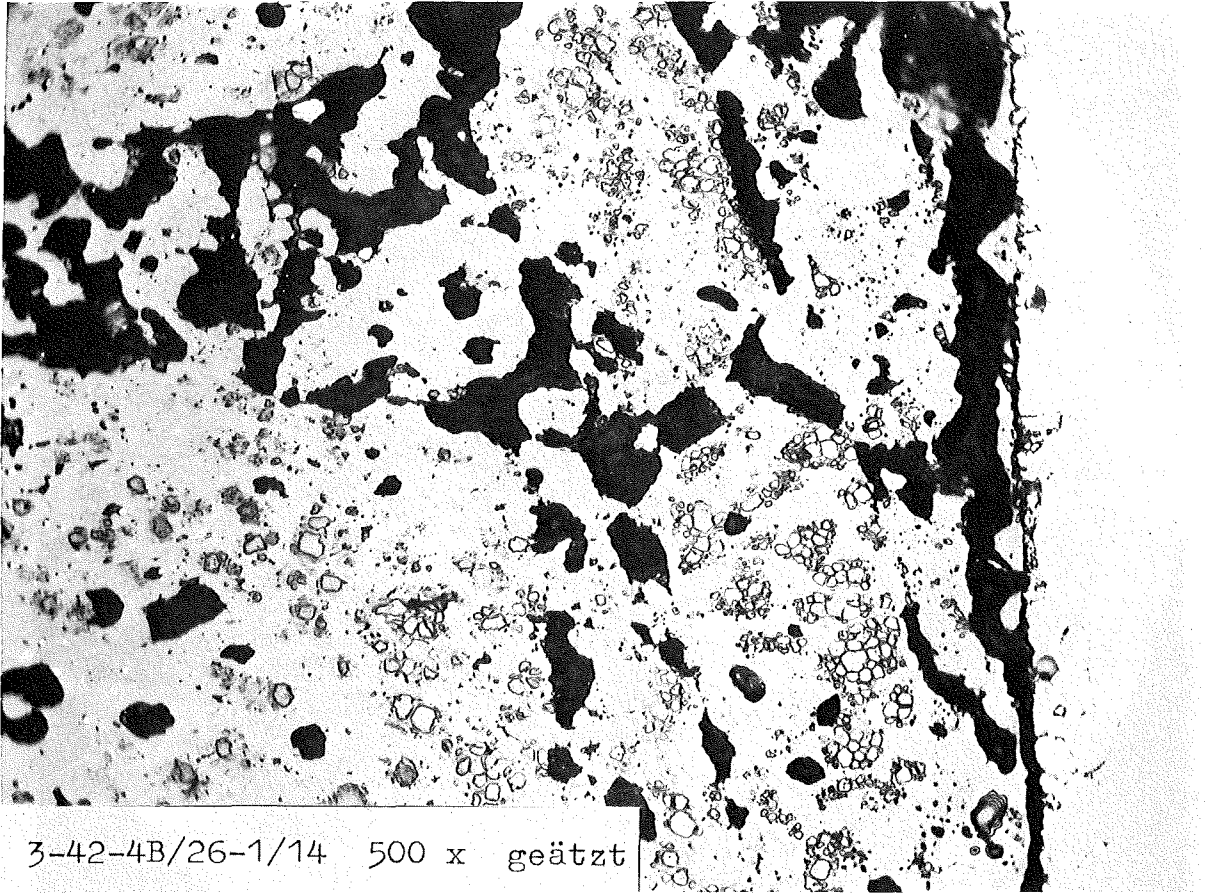
Dauer : 99,6 Vollasttage

Ende : 13. 1. 69

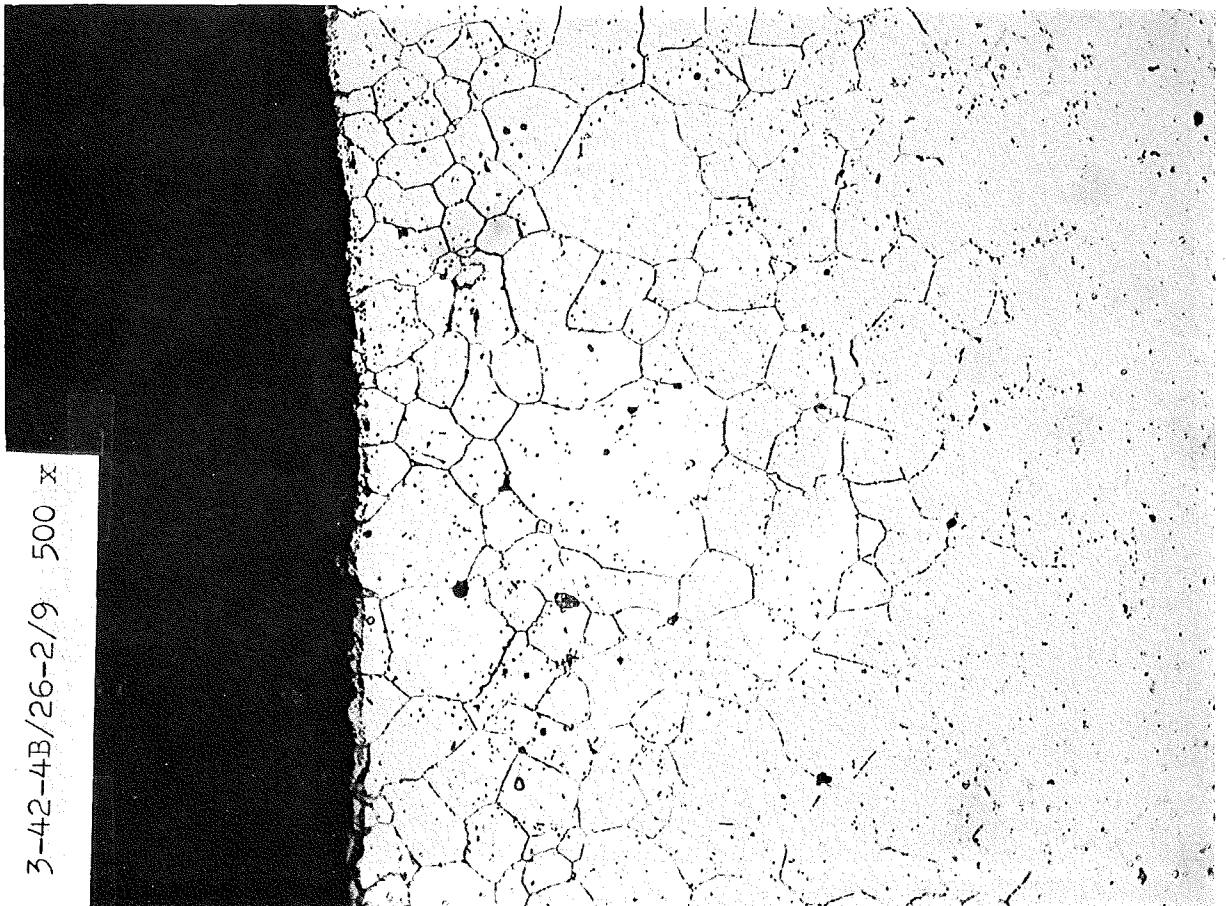
Rechn. Abbrand mittl. : 23,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 457 / 398 W/cm

- I/7 -
zu Prüfling 4B/26
A1

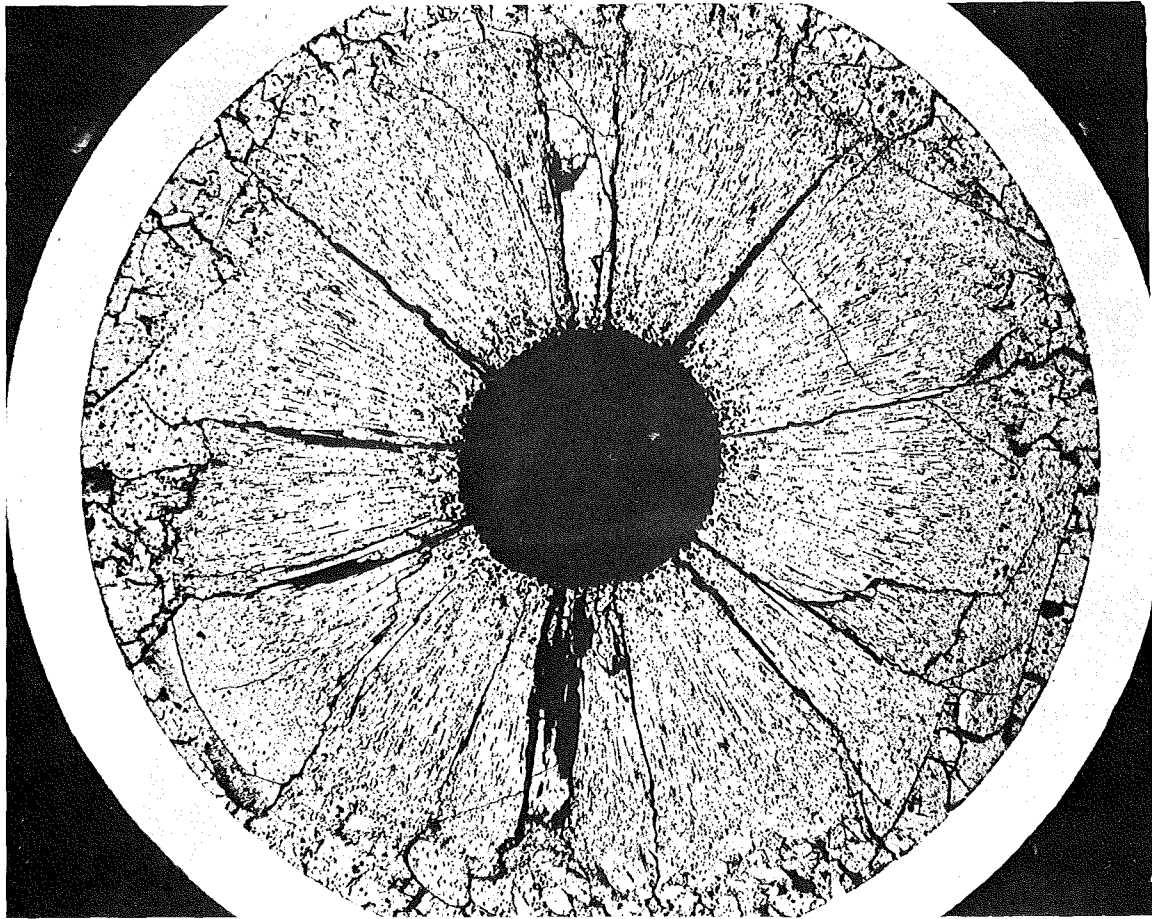


A2



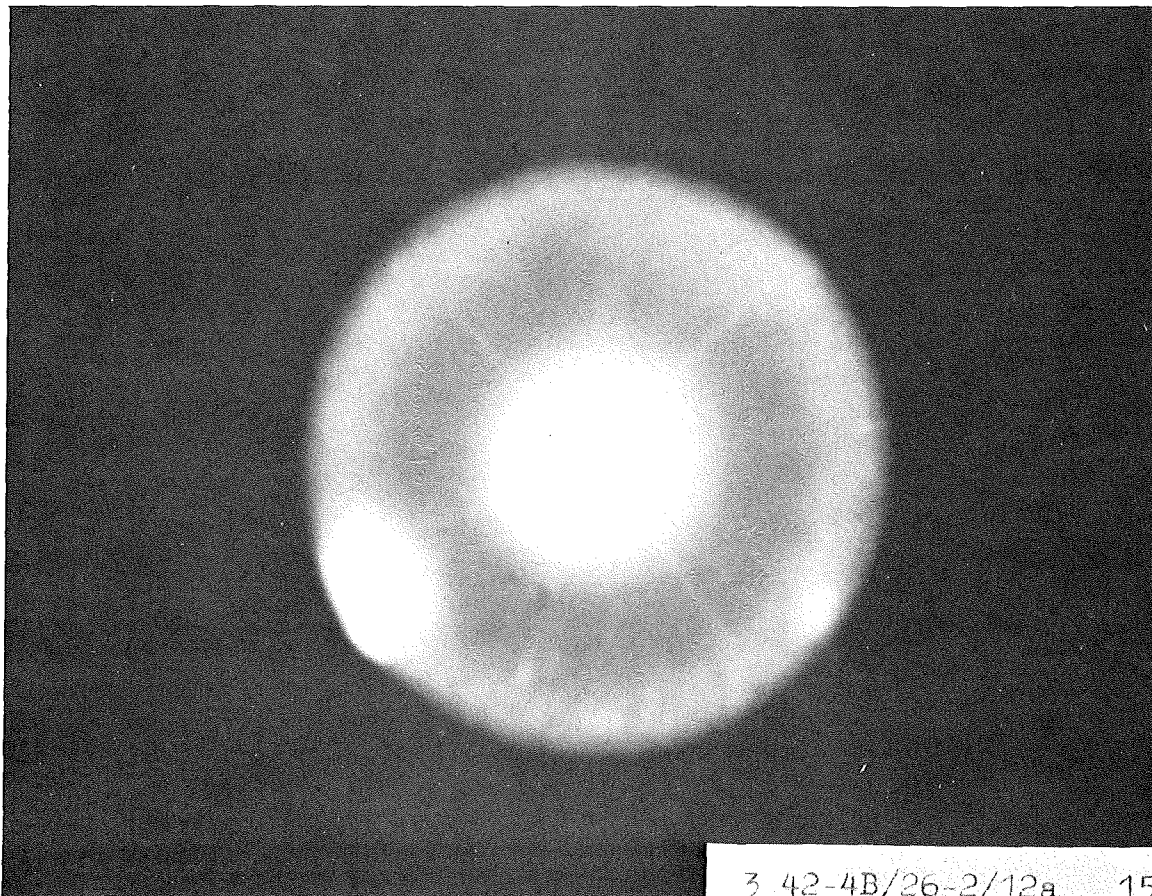
0,04 mm

-1/8-
zu Prüfling 4B/26
A2



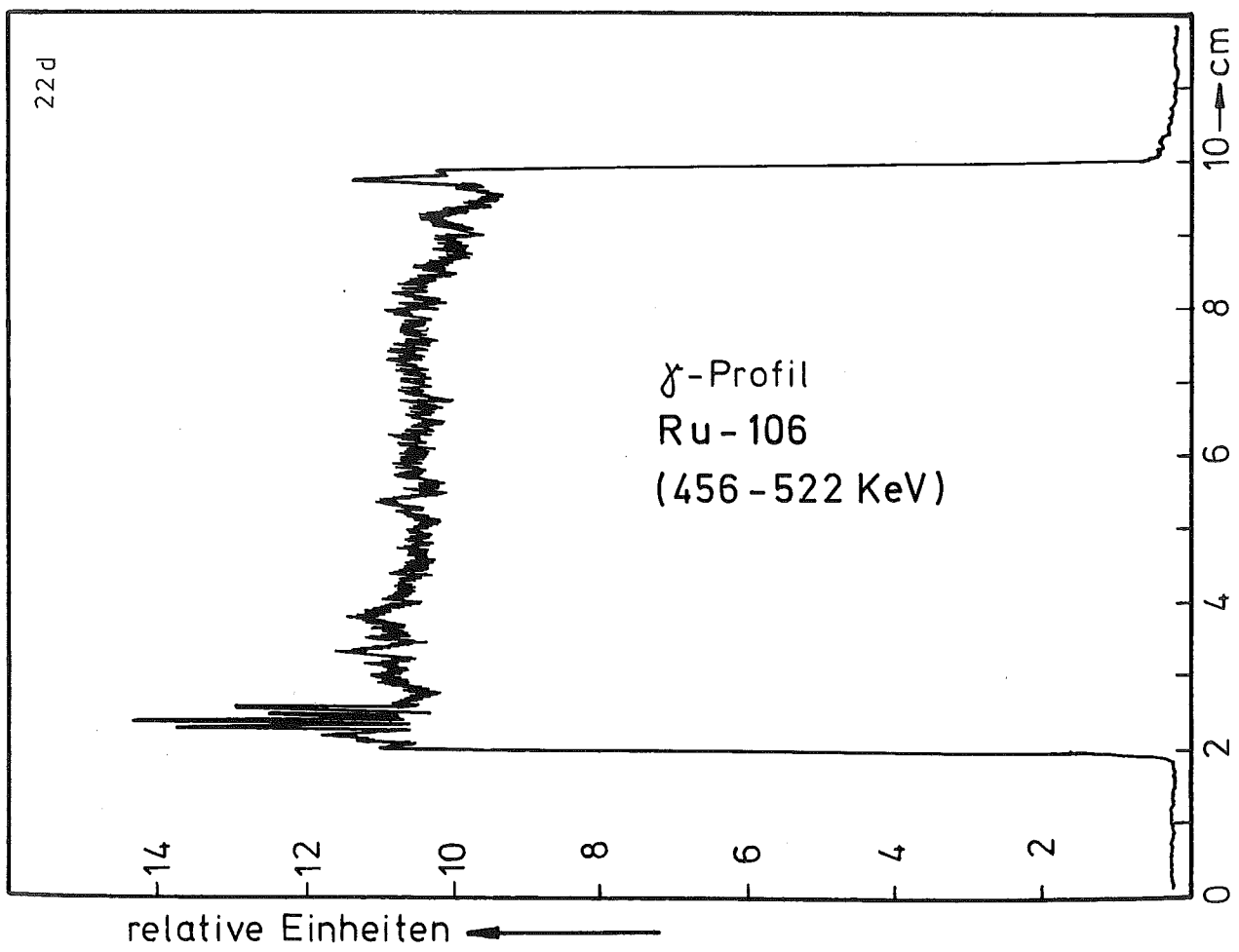
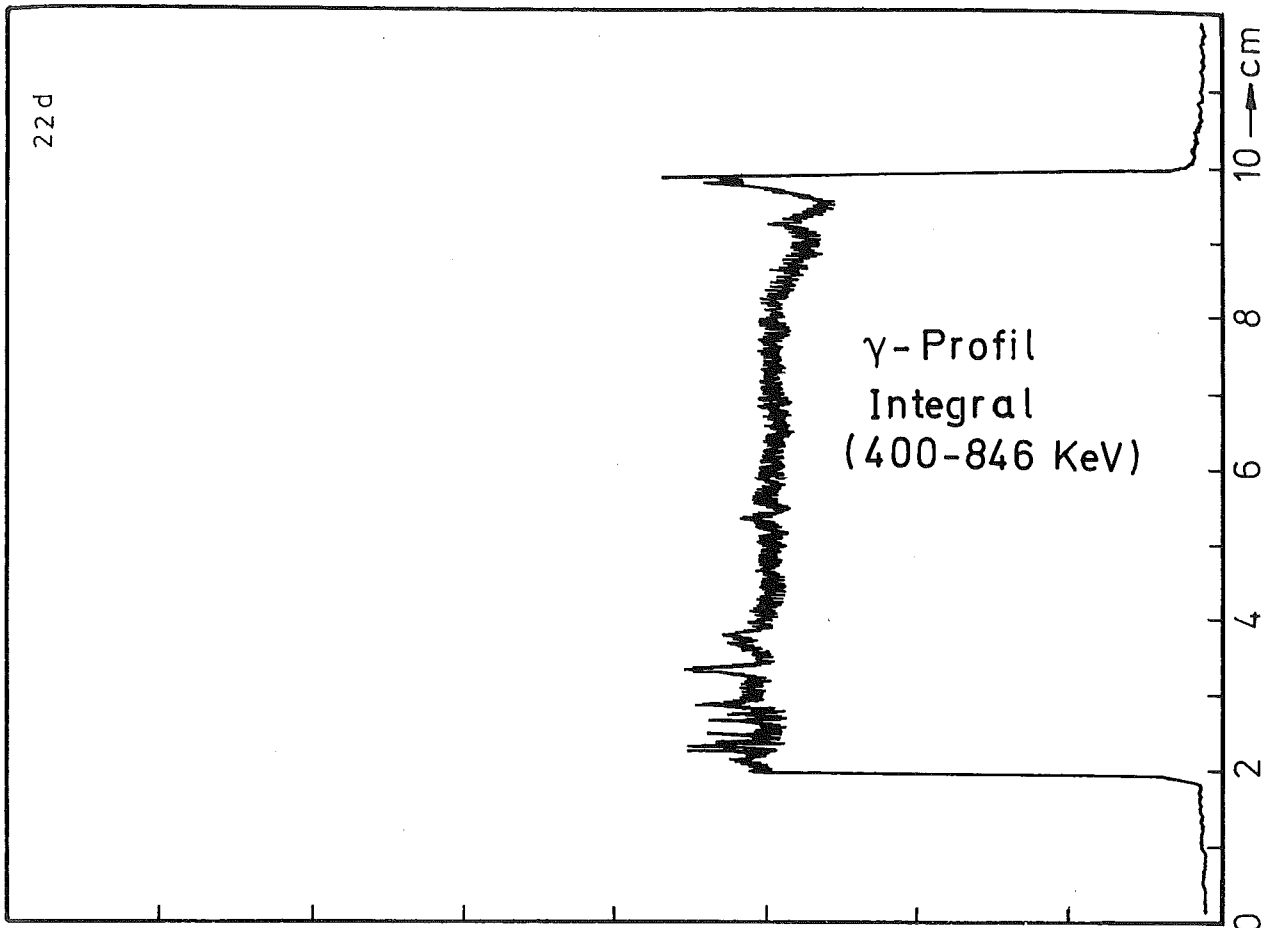
C2

1 mm



3 42-4B/26-2/12a 15

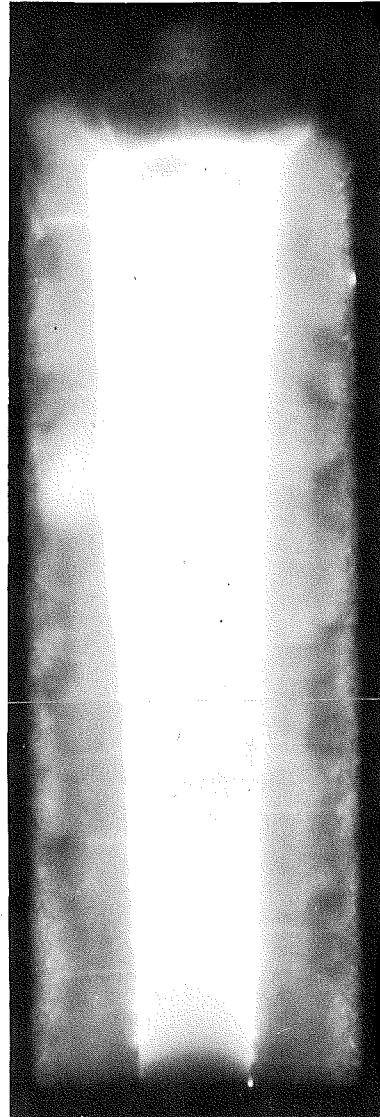
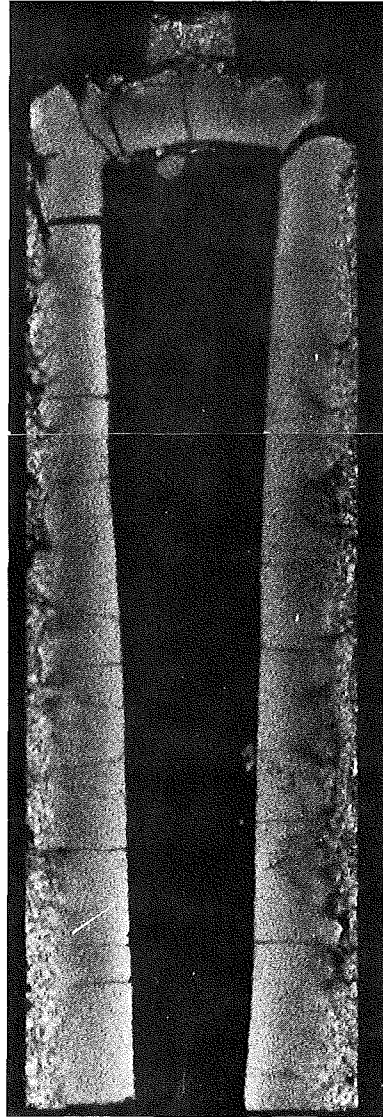
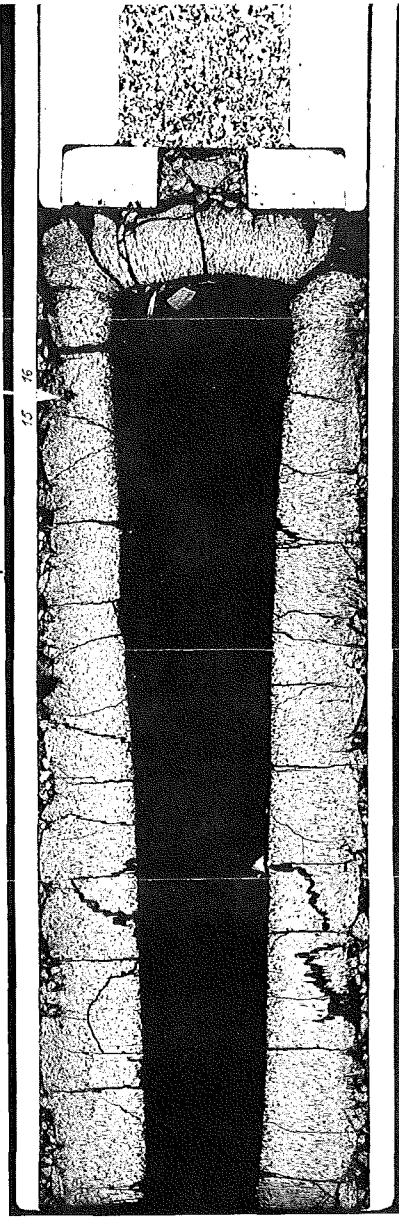
1 mm



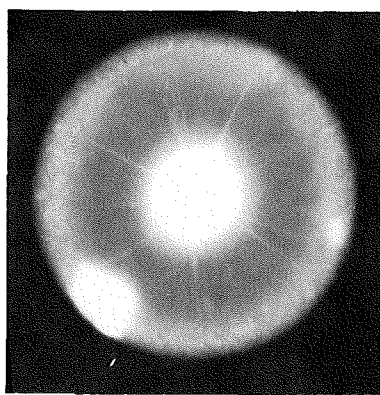
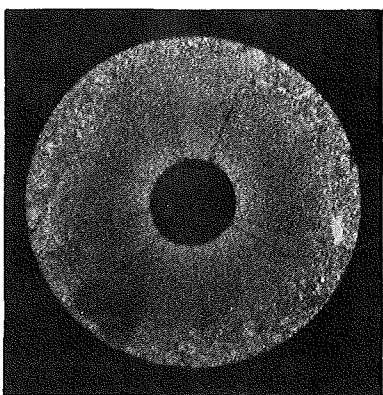
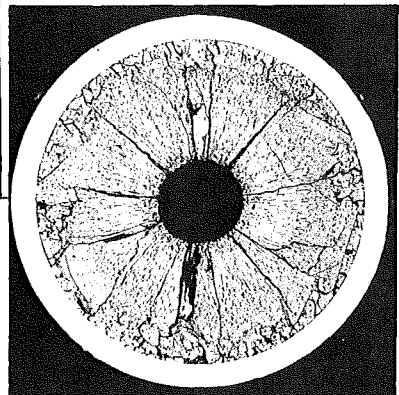
A

B

C

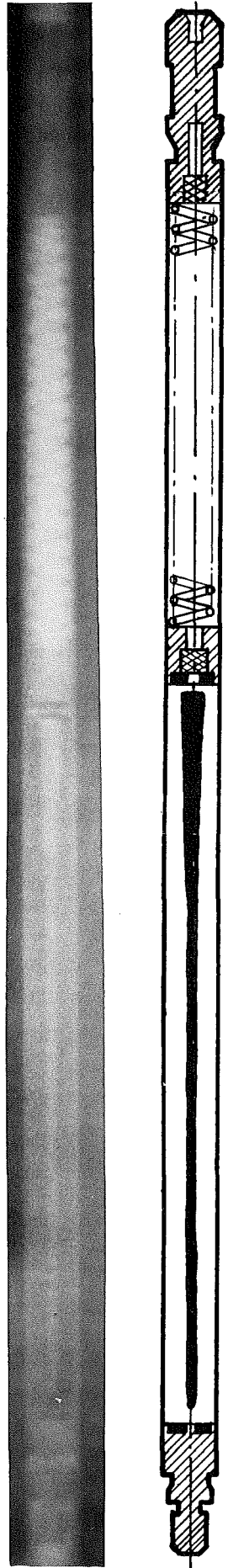


1



2

1mm



Prüfling 4B-26

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : $UO_2 - PuO_2$

Tablettendichte : ———

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : ———

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

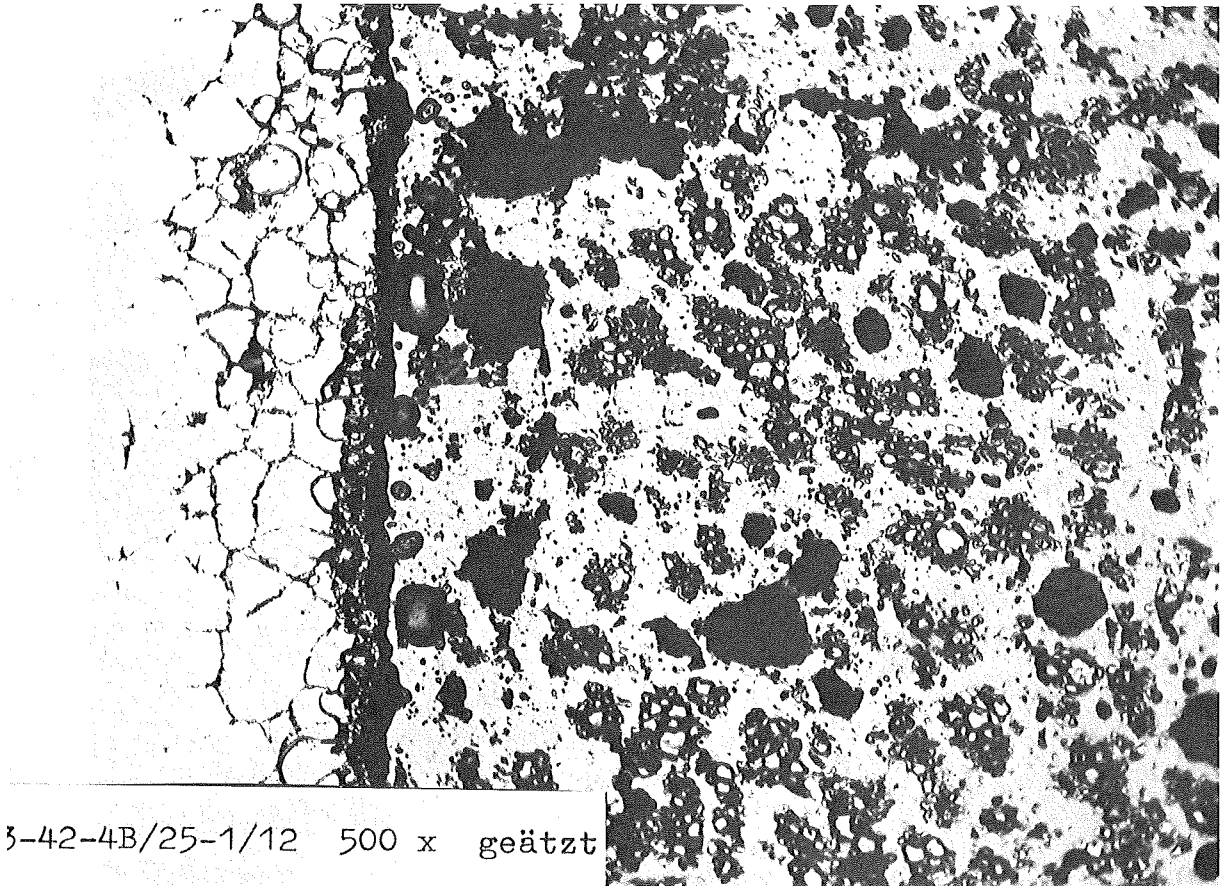
Dauer : 99,6 Vollasttage

Ende : 13. 1. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 22,0 MWd/kg Metall

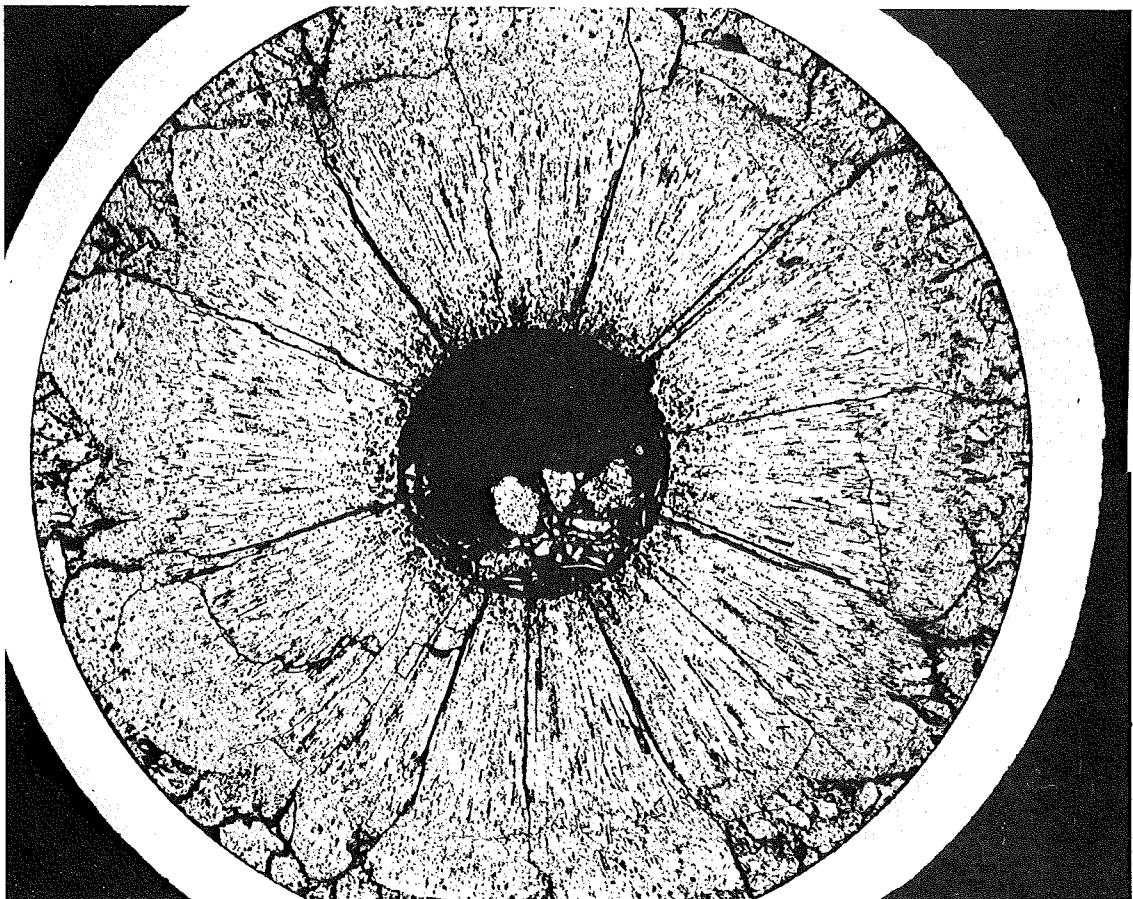
Stableistung max./mittl. : 534/382 W/cm

- I/11 -
zu Prüfling 4B/25
A1



0,04 mm

A2

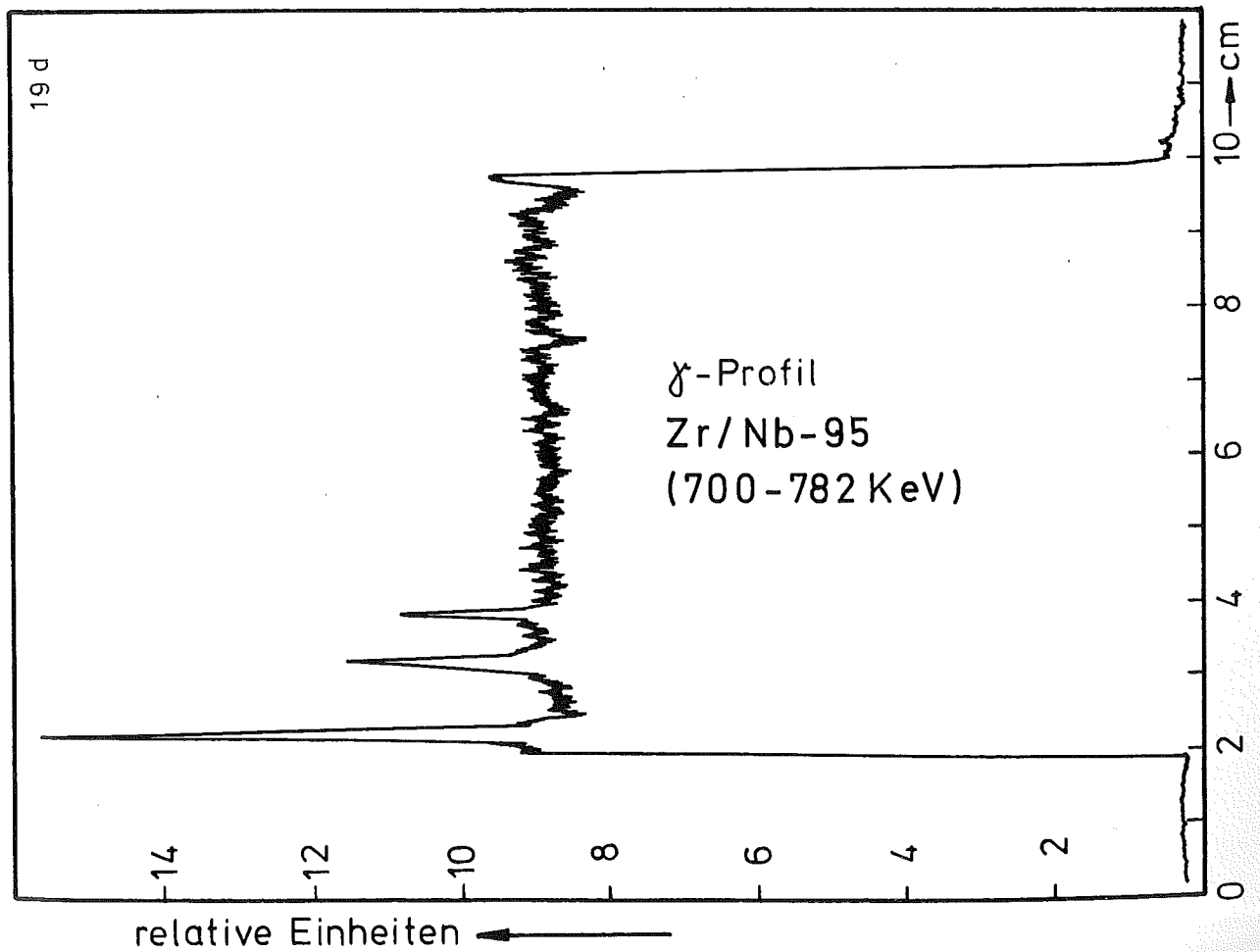
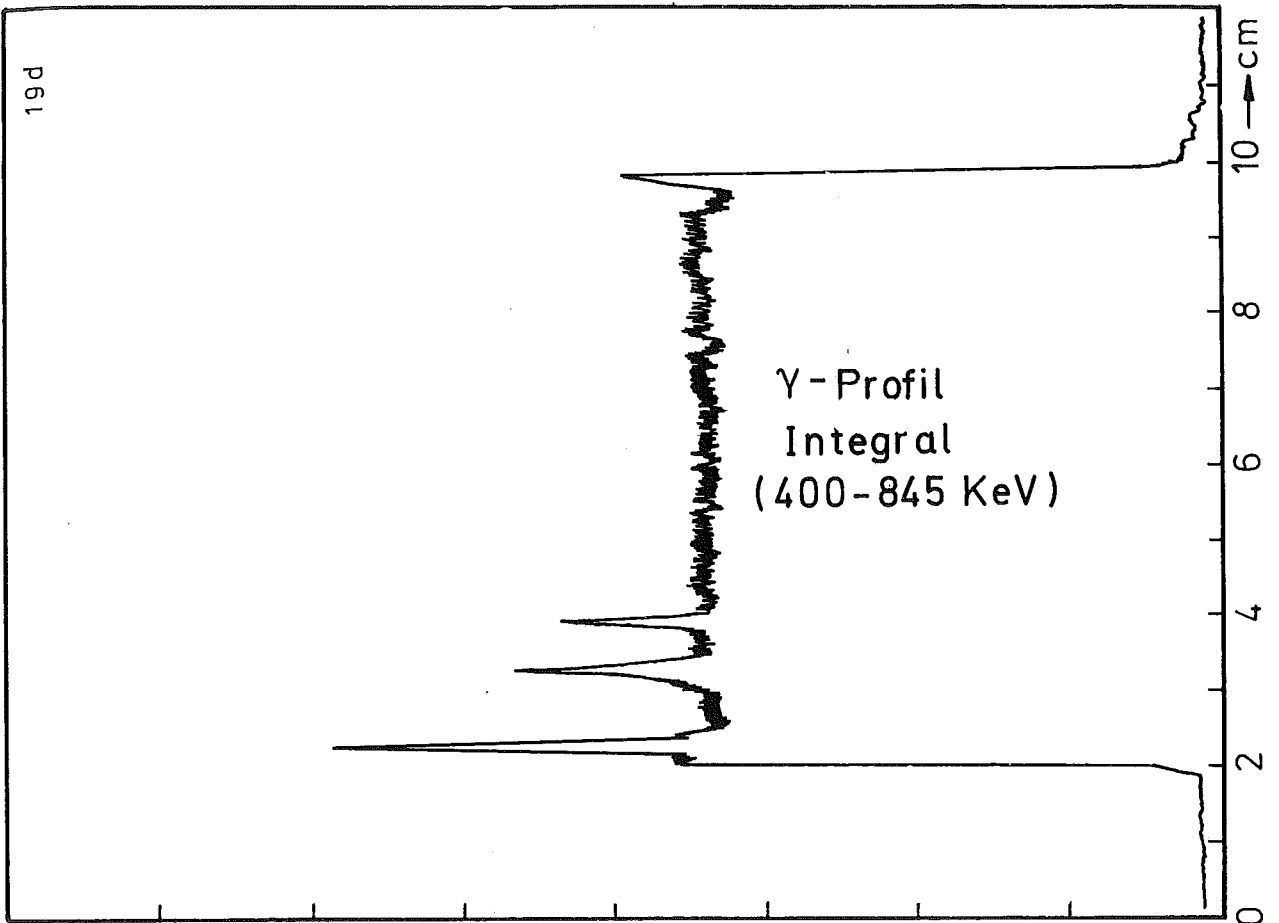


1mm

-1/12-
zu Prüfling 4B/25
A2



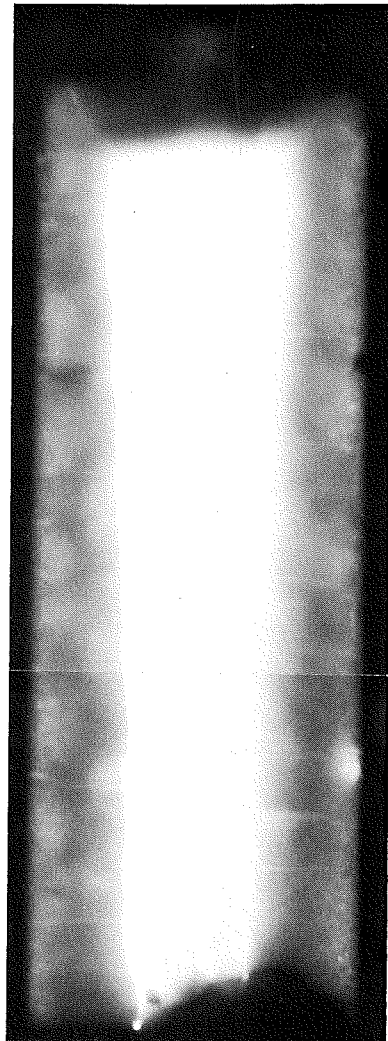
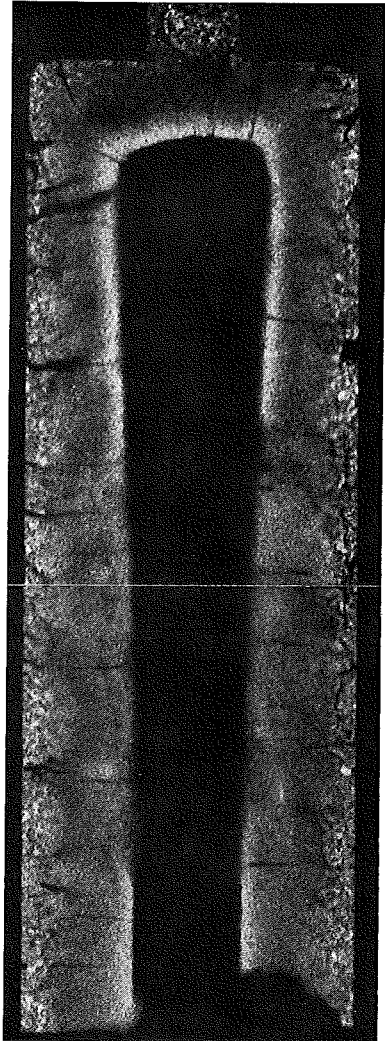
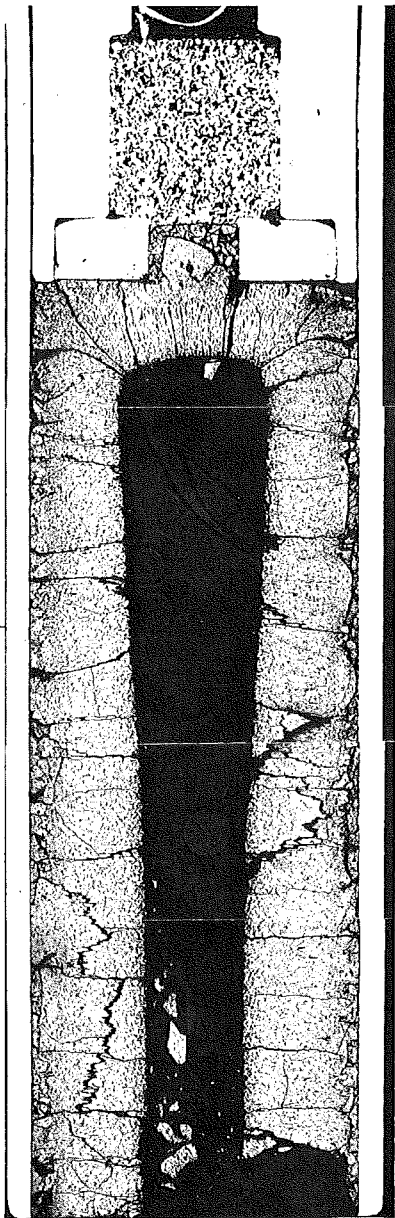
—|—
0,1 mm



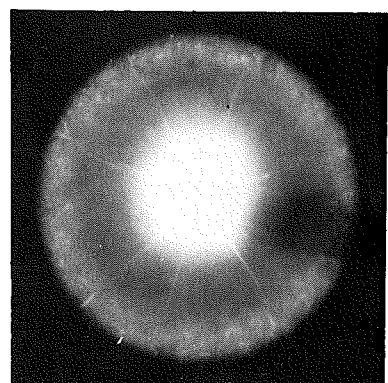
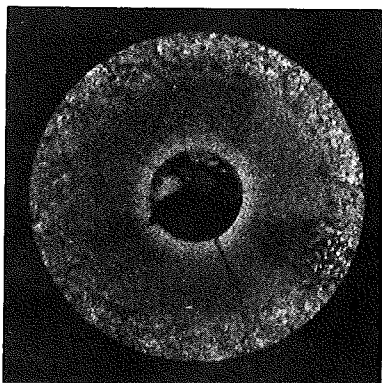
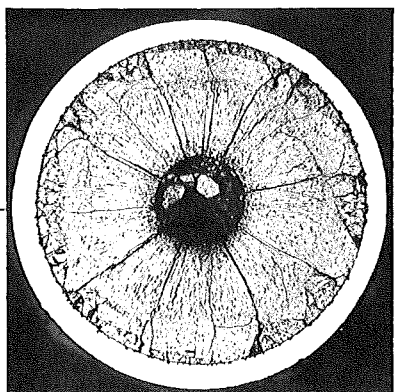
A

B

C

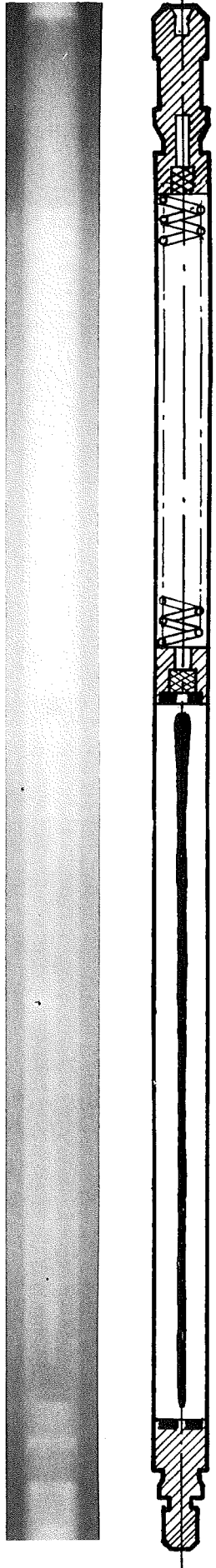


1



2

1mm



Prüfling 4B-25

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : ———

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : ———

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

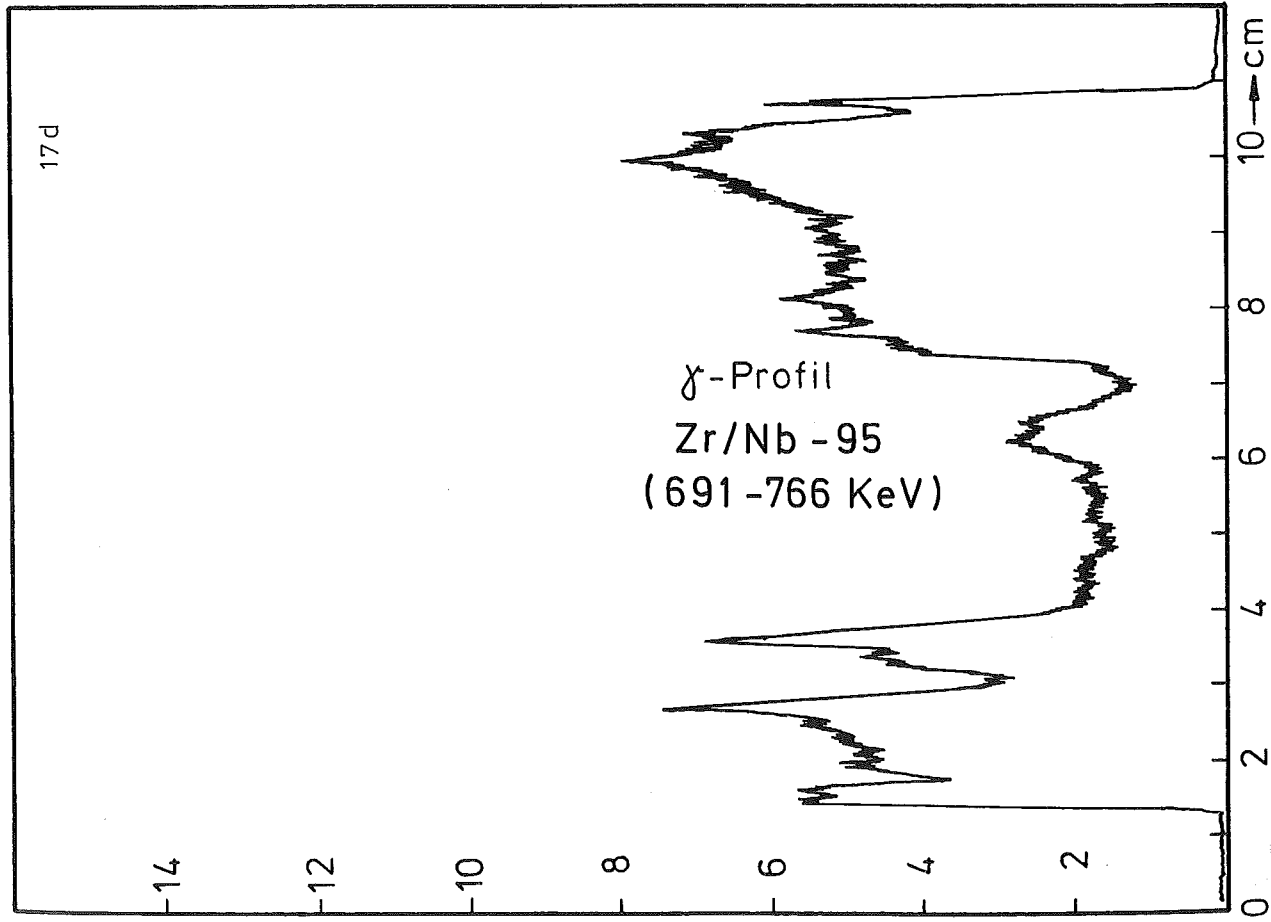
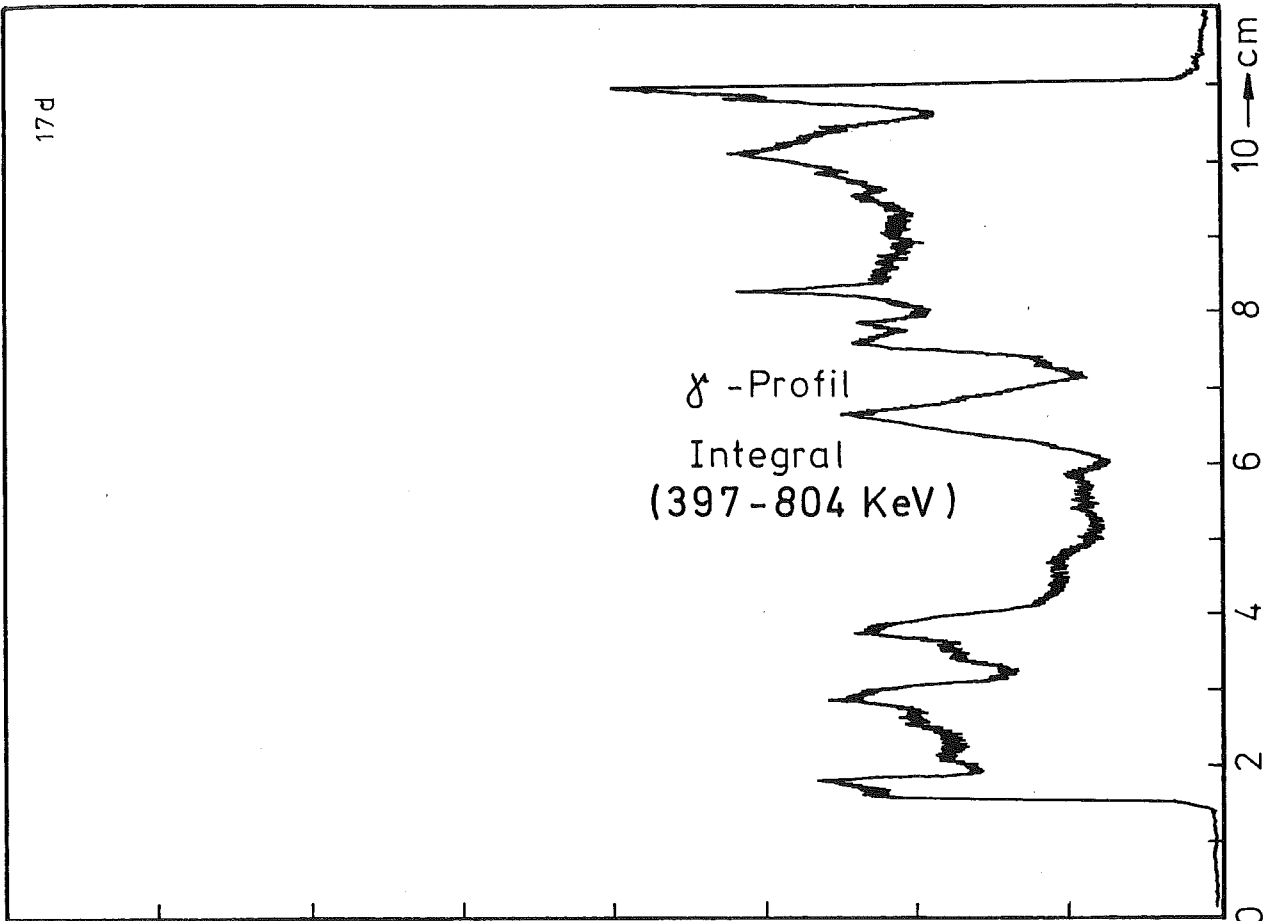
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a

Dauer : 99,6 Volllasttage

Ende : 13. 1. 69

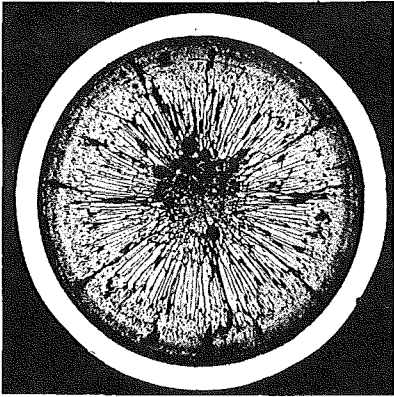
Rechn. Abbrand mittl. : 21,6 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 523/371 W/cm

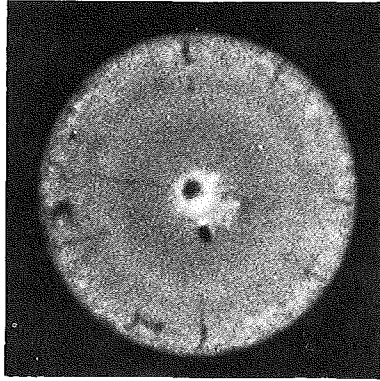


relative Einheiten \uparrow

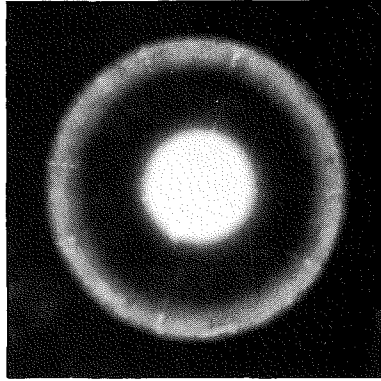
A



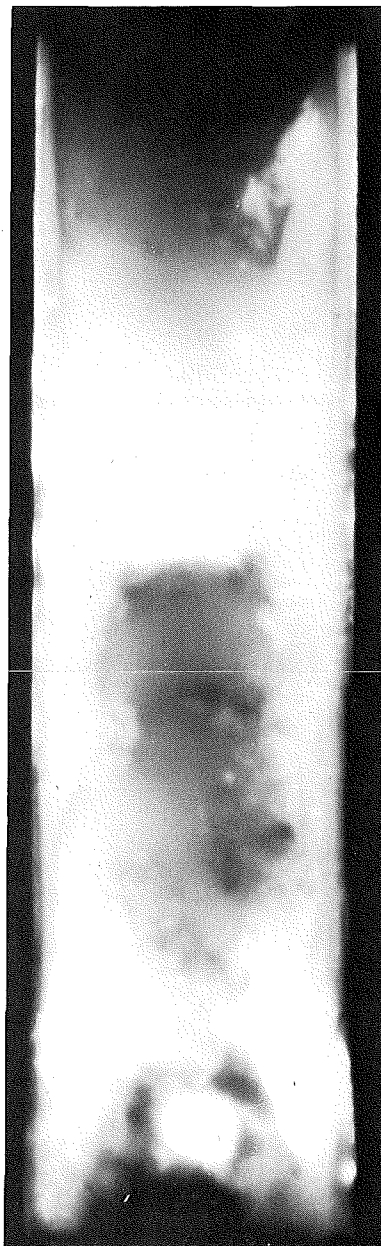
B



C



1



2

1mm



Prüfling 4B-32

Brennstoff :

Form : Pulver
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : ———

Hülle :

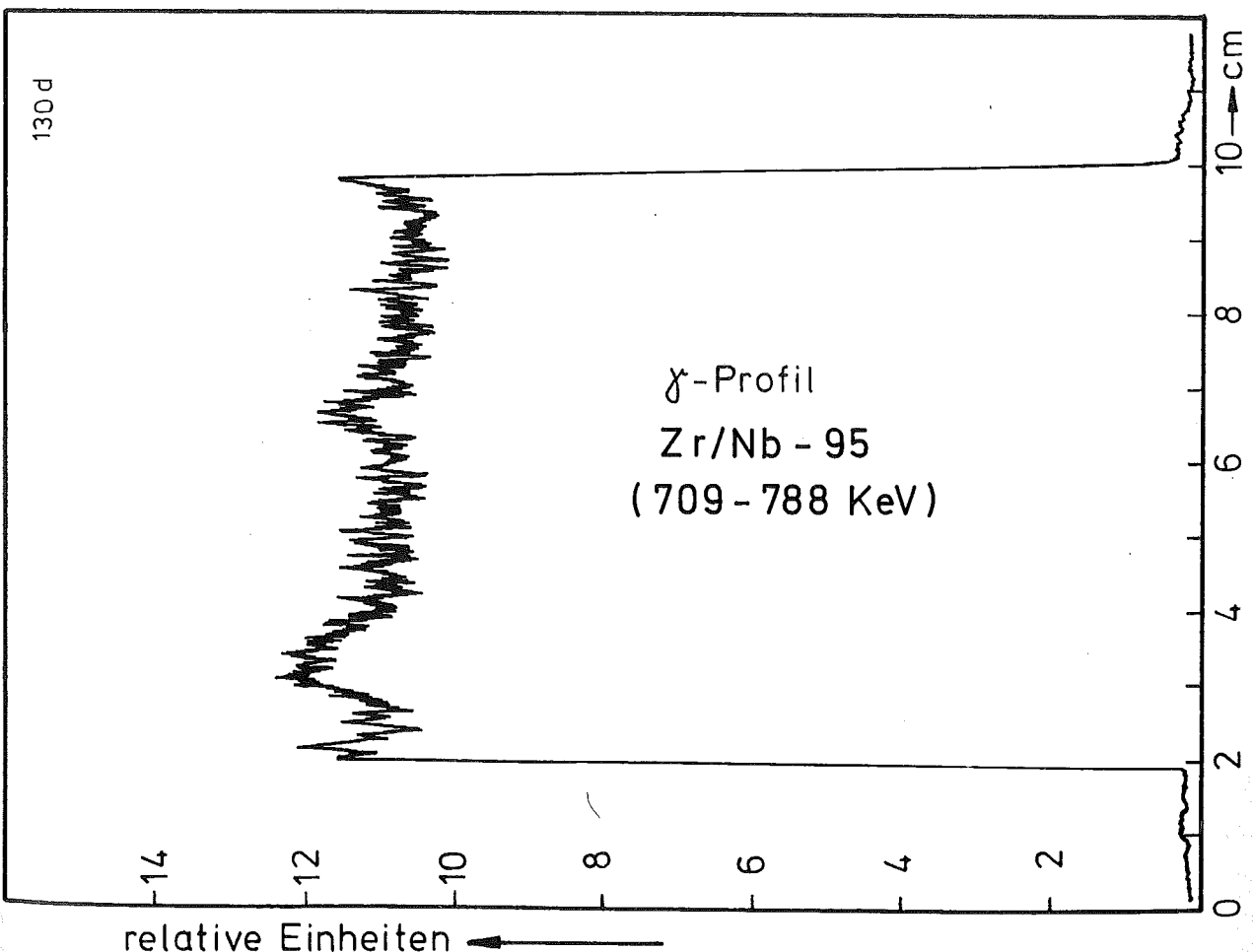
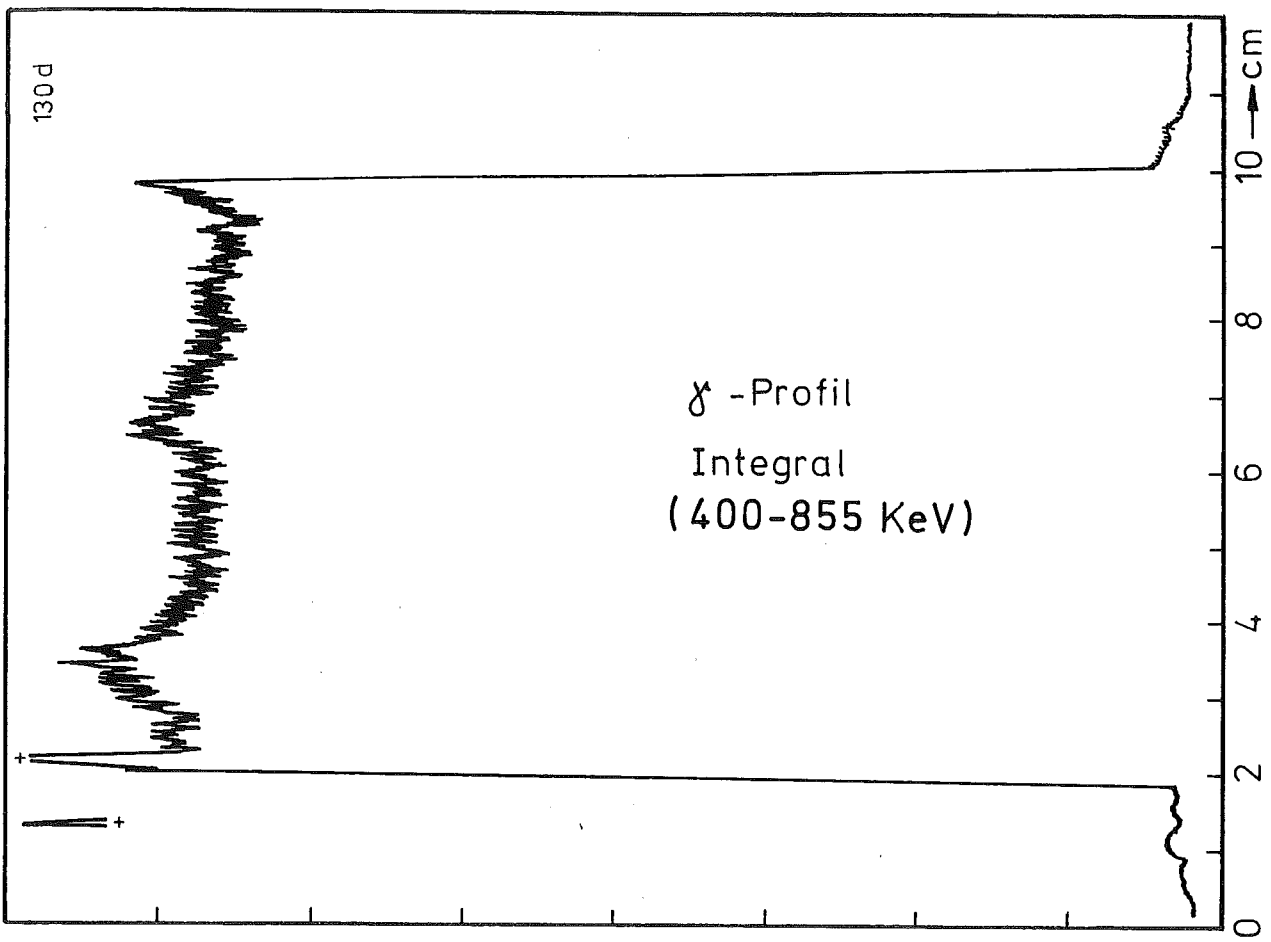
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,0 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : ———
Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 46,2 Vollasttage
Ende : 16. 12. 68
Rechn. Abbrand : 9,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 773 / 364 W/cm

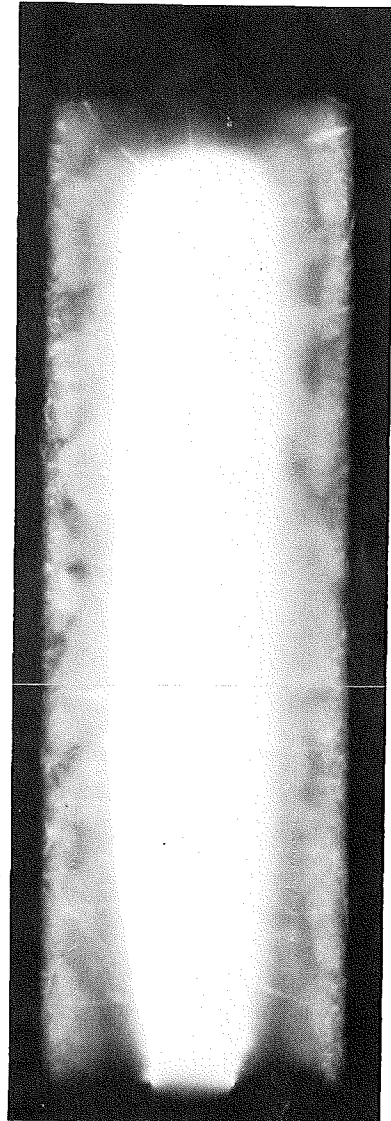
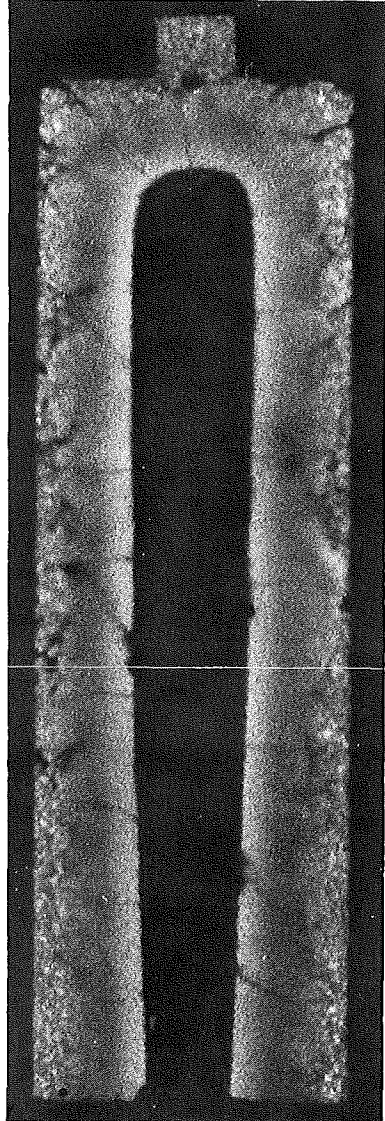
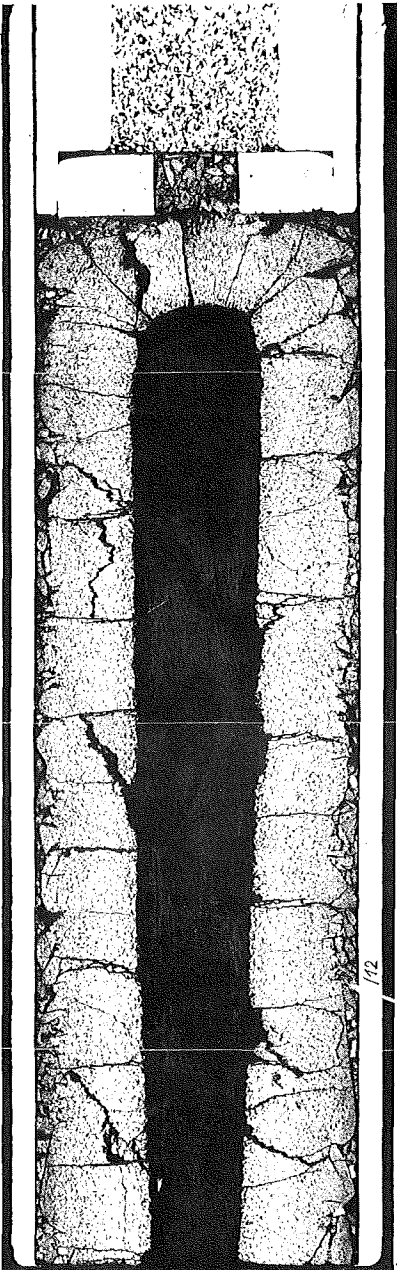


relative Einheiten \uparrow

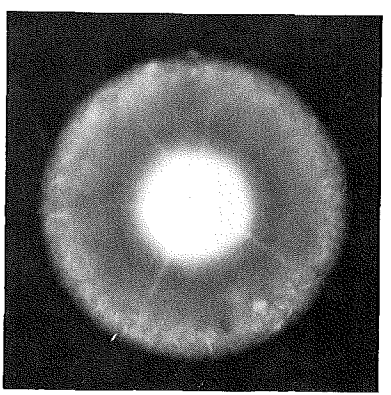
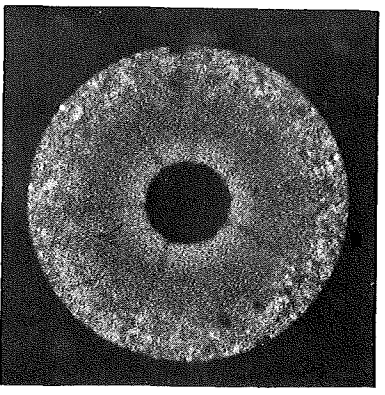
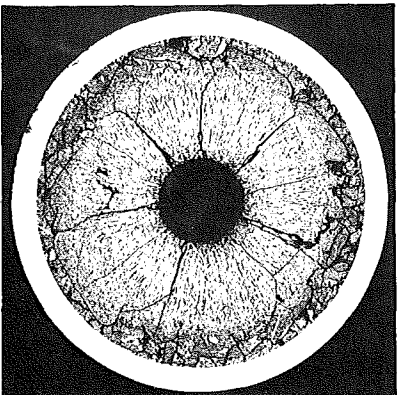
A

B

C

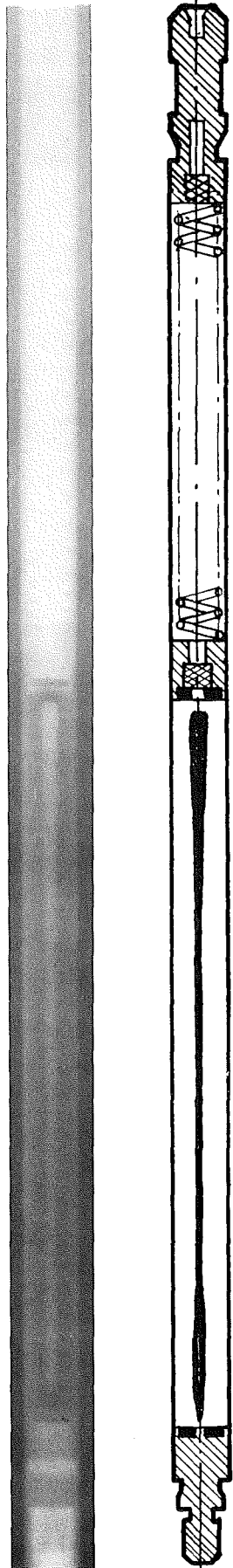


1



2

1mm



Prüfling 4B-35

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : ———

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : ———

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

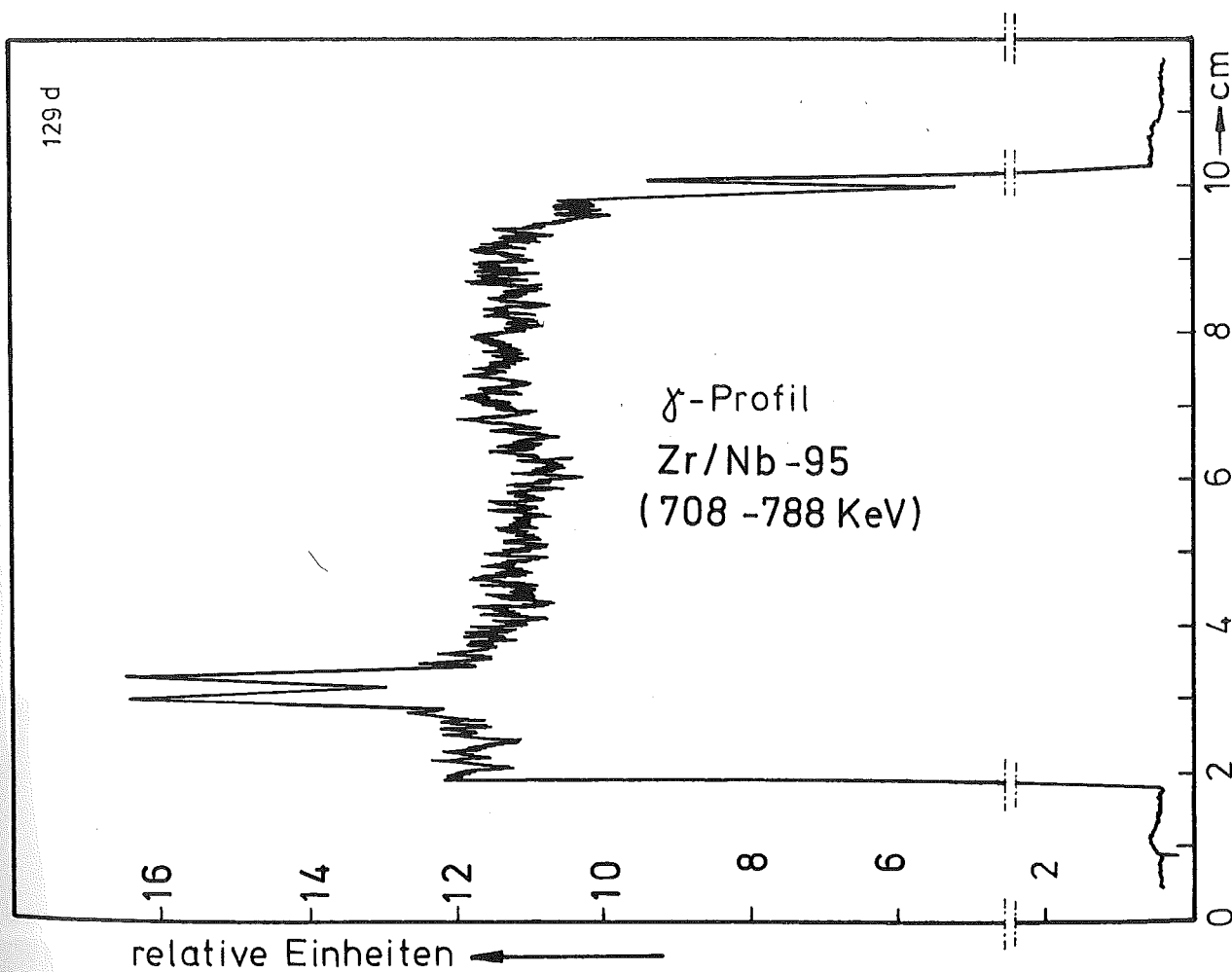
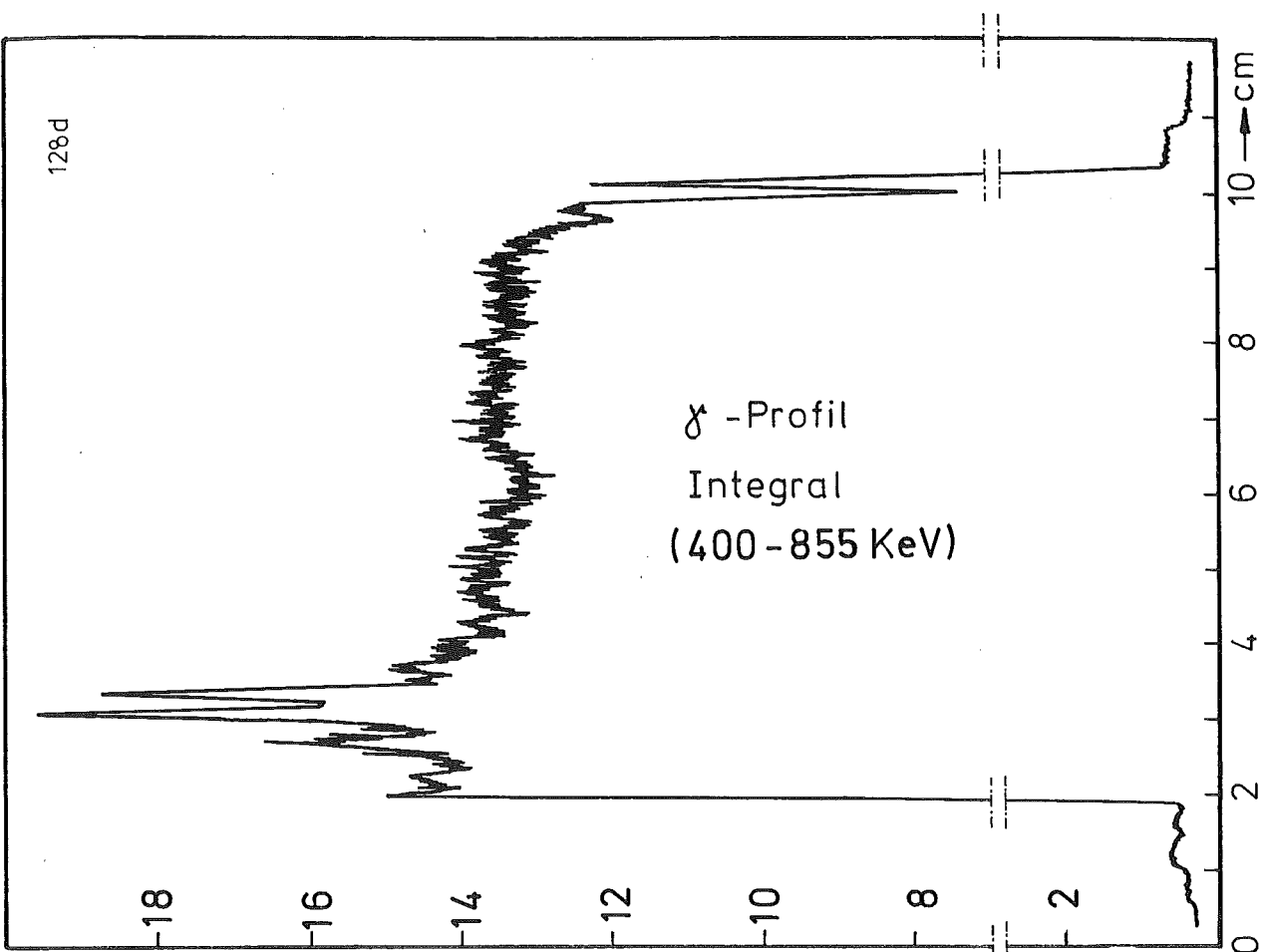
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

Dauer : 127,2 Volllasttage

Ende : 17. 3. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 25,1 MWd/kg Metall

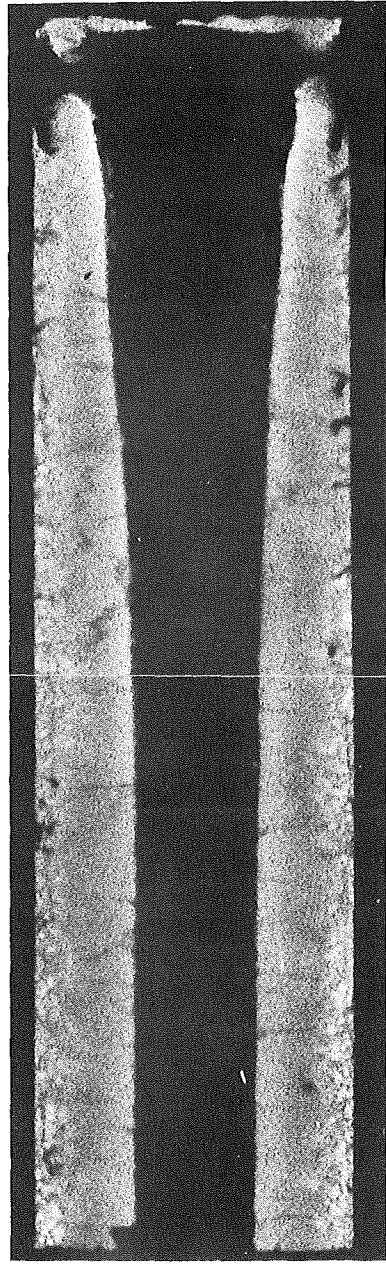
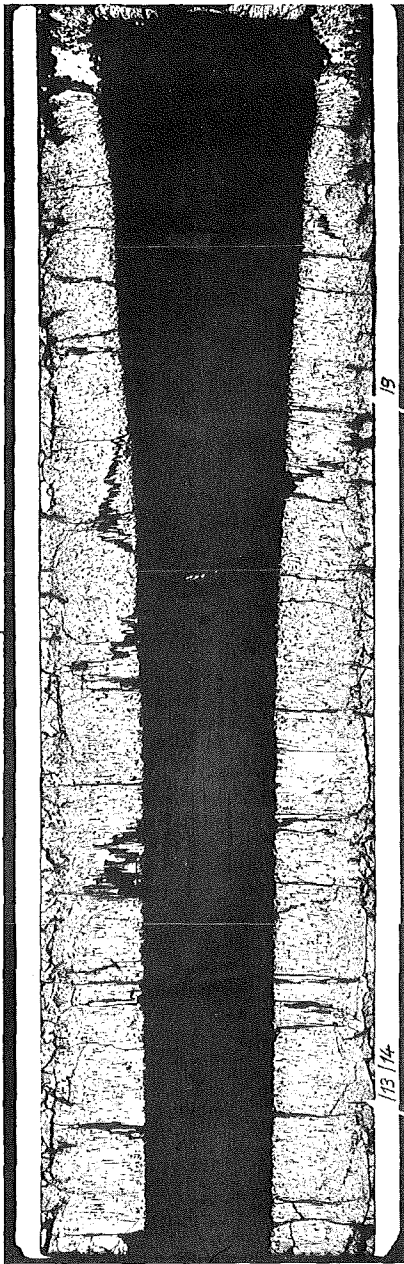
Stableistung max./mittl. : 371 / 336 W/cm



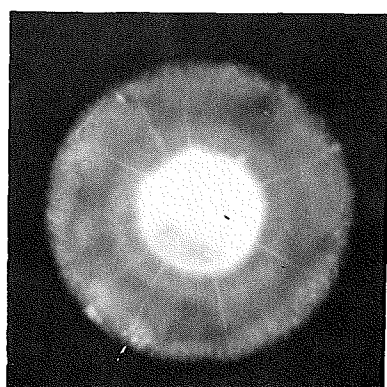
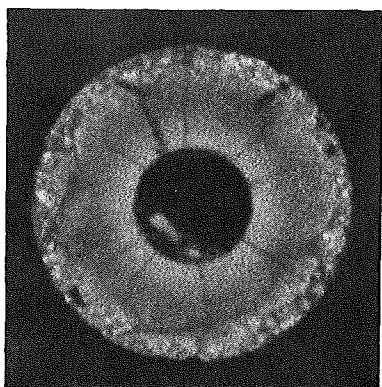
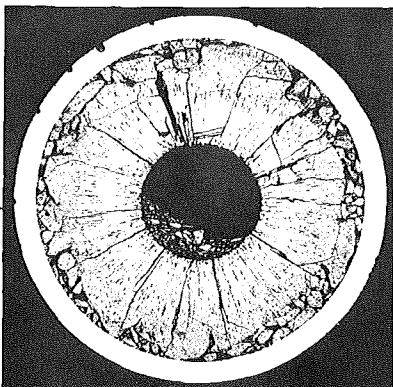
A

B

C

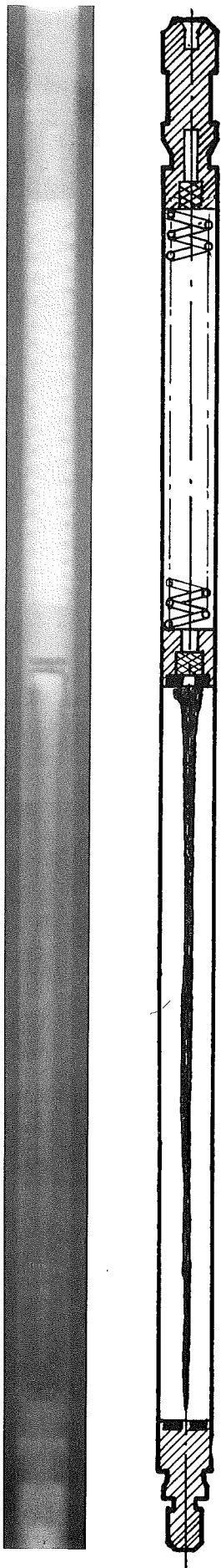


1



2

1mm



Prüfling 4B-33

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : —

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : —

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

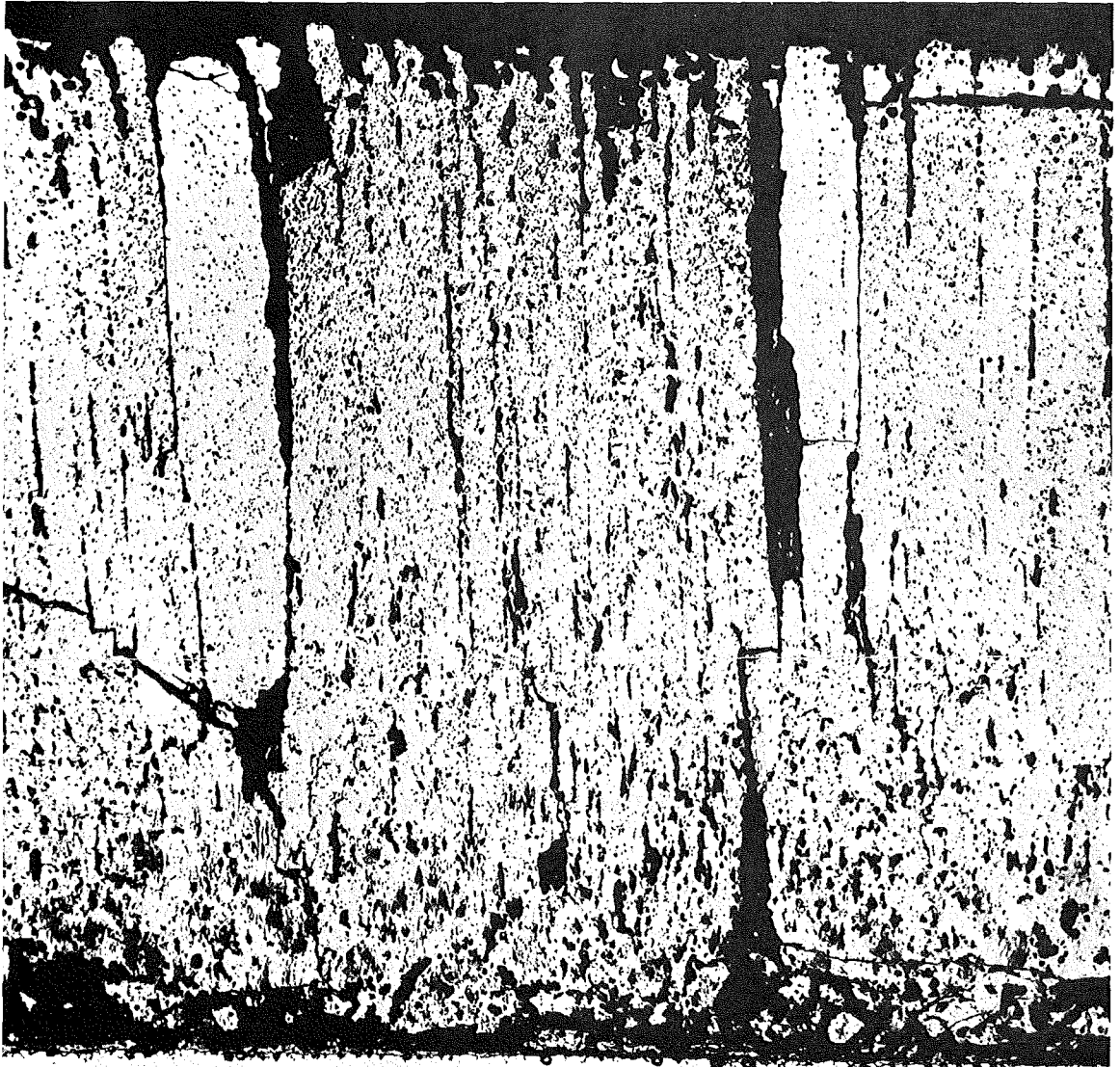
Dauer : 127,2 Vollasttage

Ende : 17. 3. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 25,4 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 466 / 336 W/cm

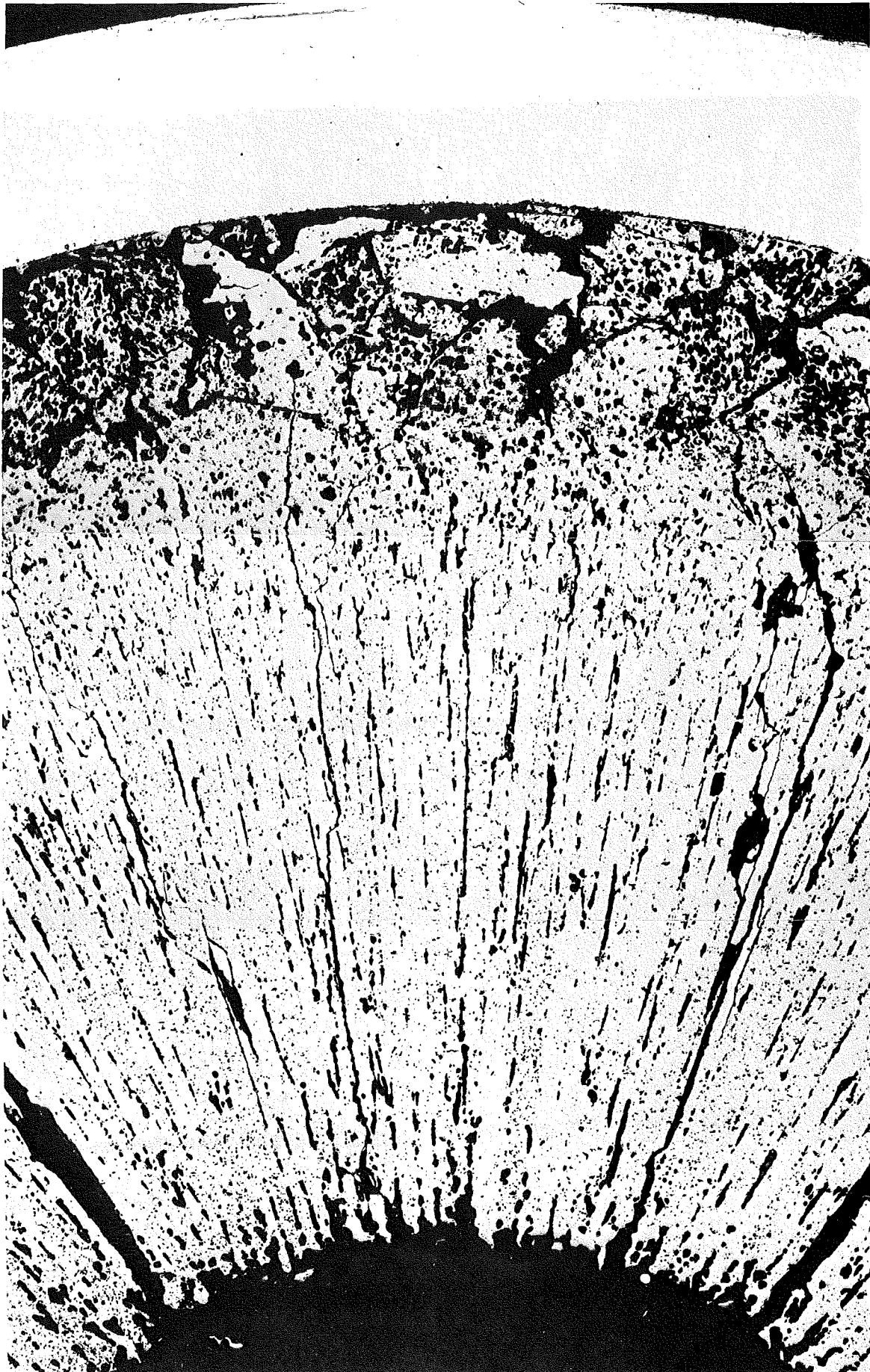
- 1/21-
zu Prüfling 4B/31
A1



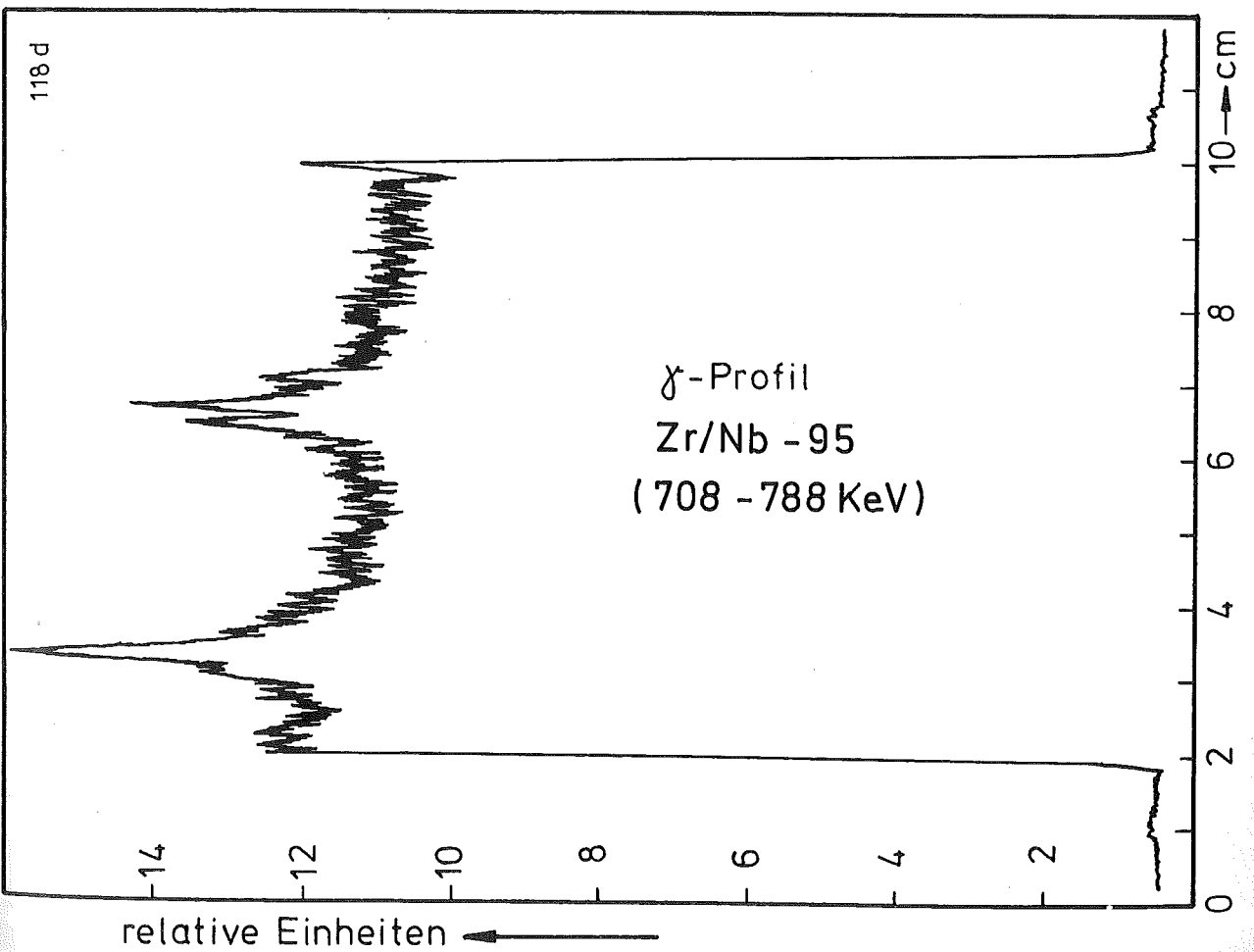
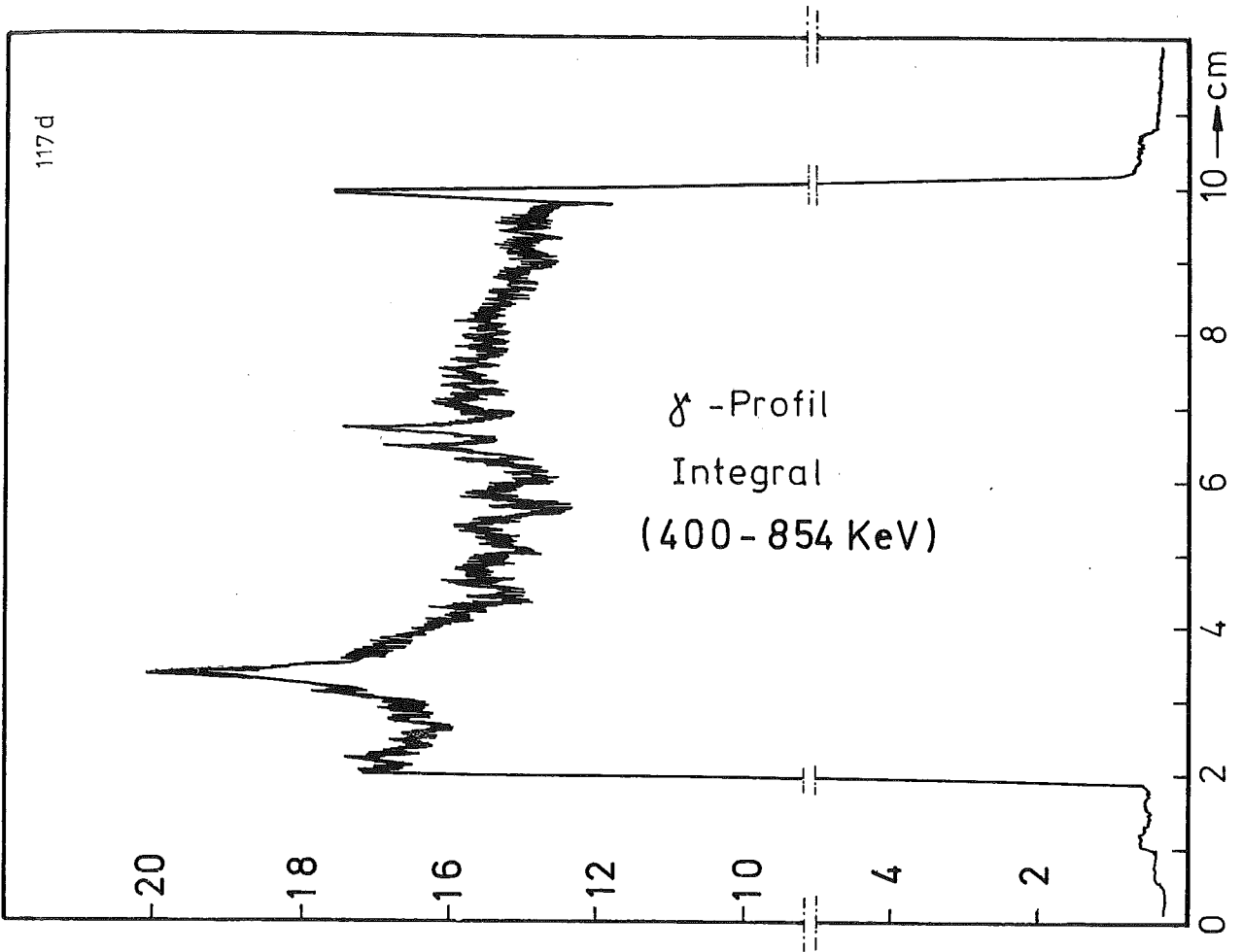
01-44-4B/31-1/10 100 x geätzt

—|—
0,1 mm

-I/22-
zu Prüfling 4B/31
A2



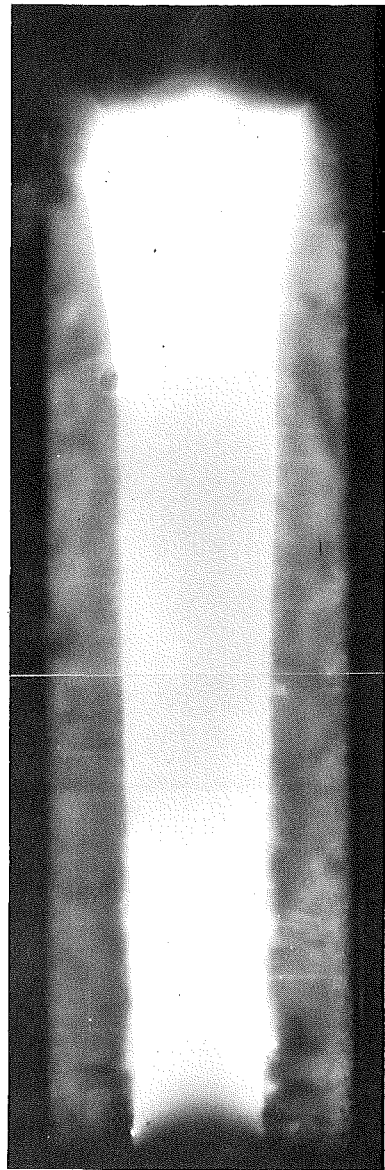
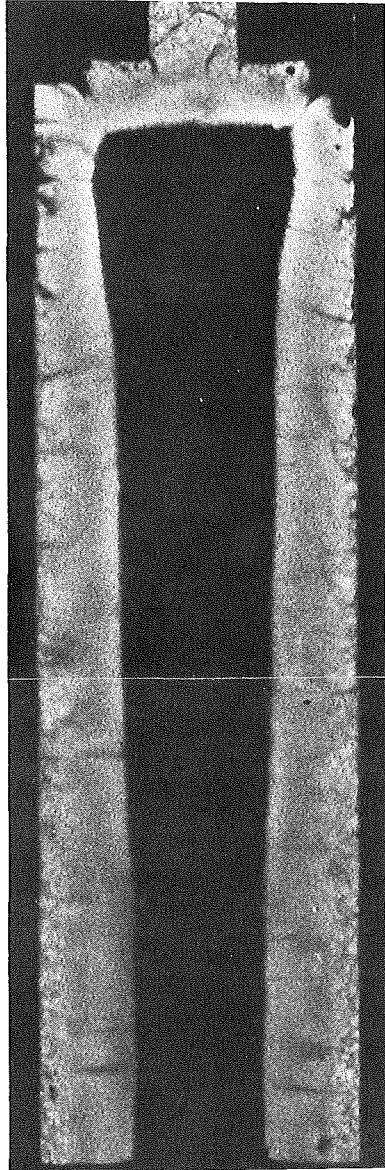
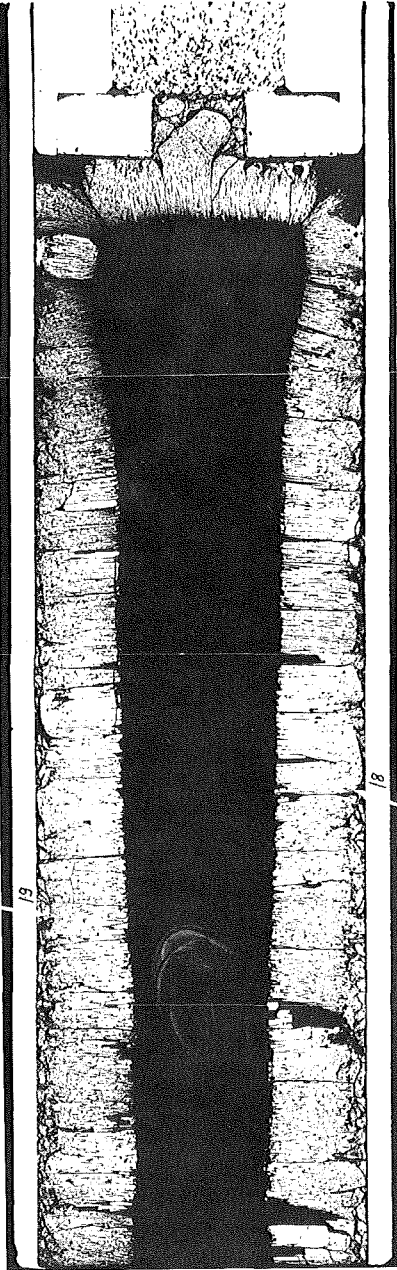
0,1 mm



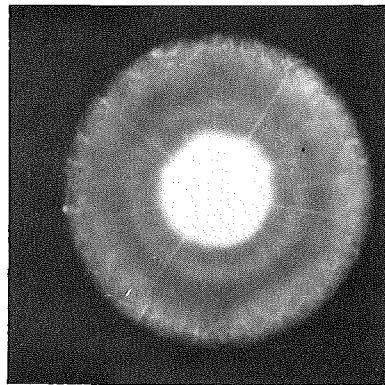
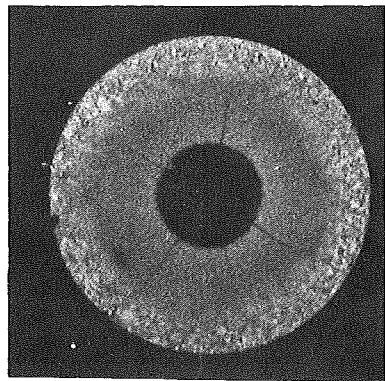
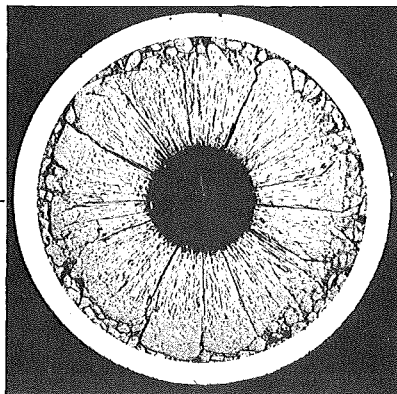
A

B

C

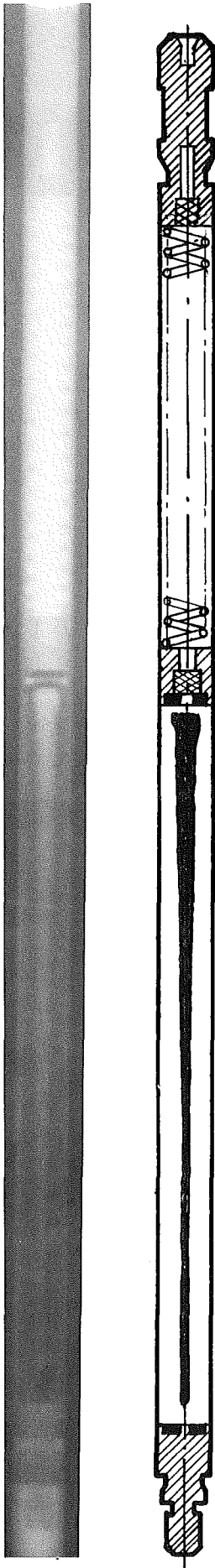


1



2

1 mm



Prüfling 4B-31

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : ———

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : ———

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

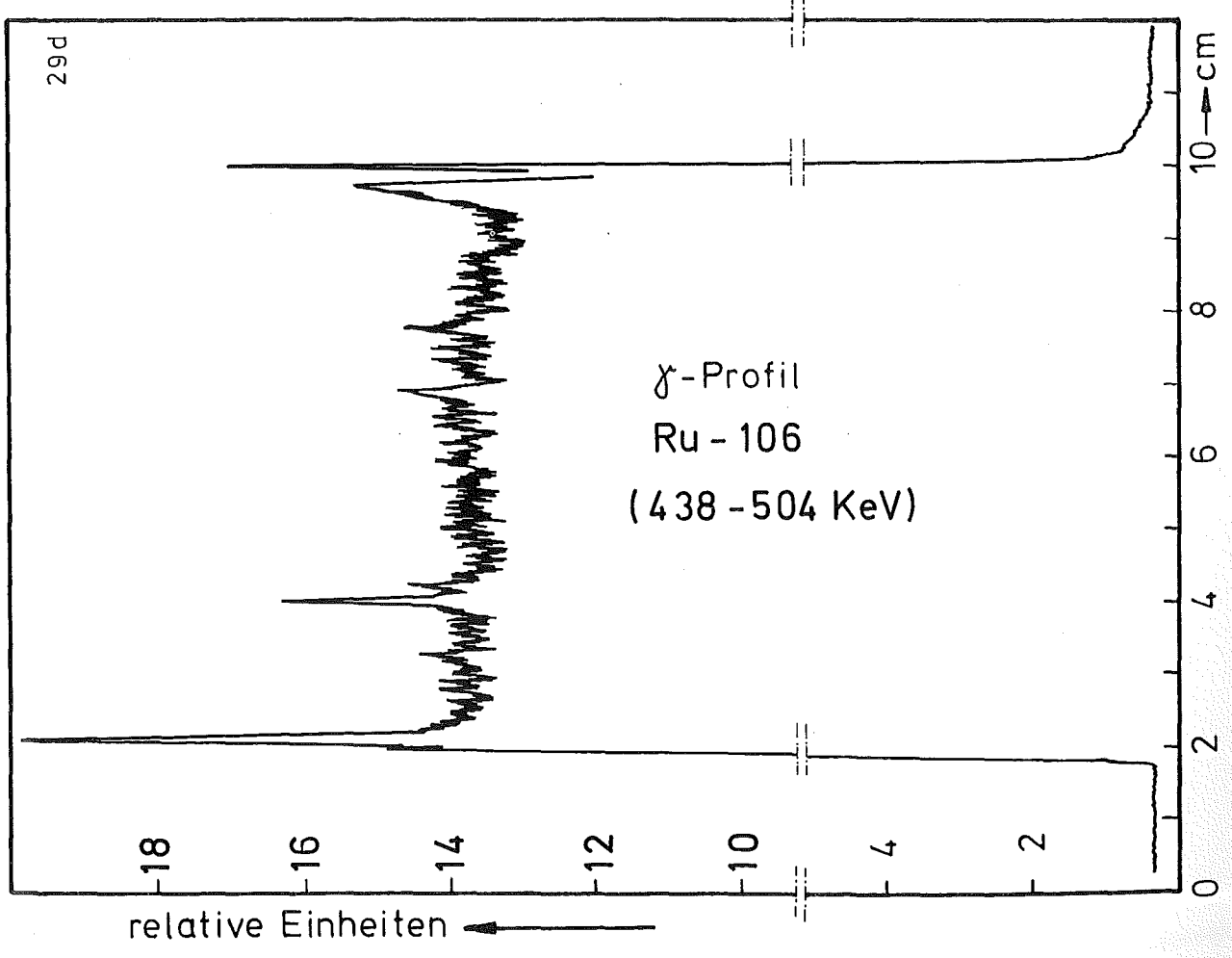
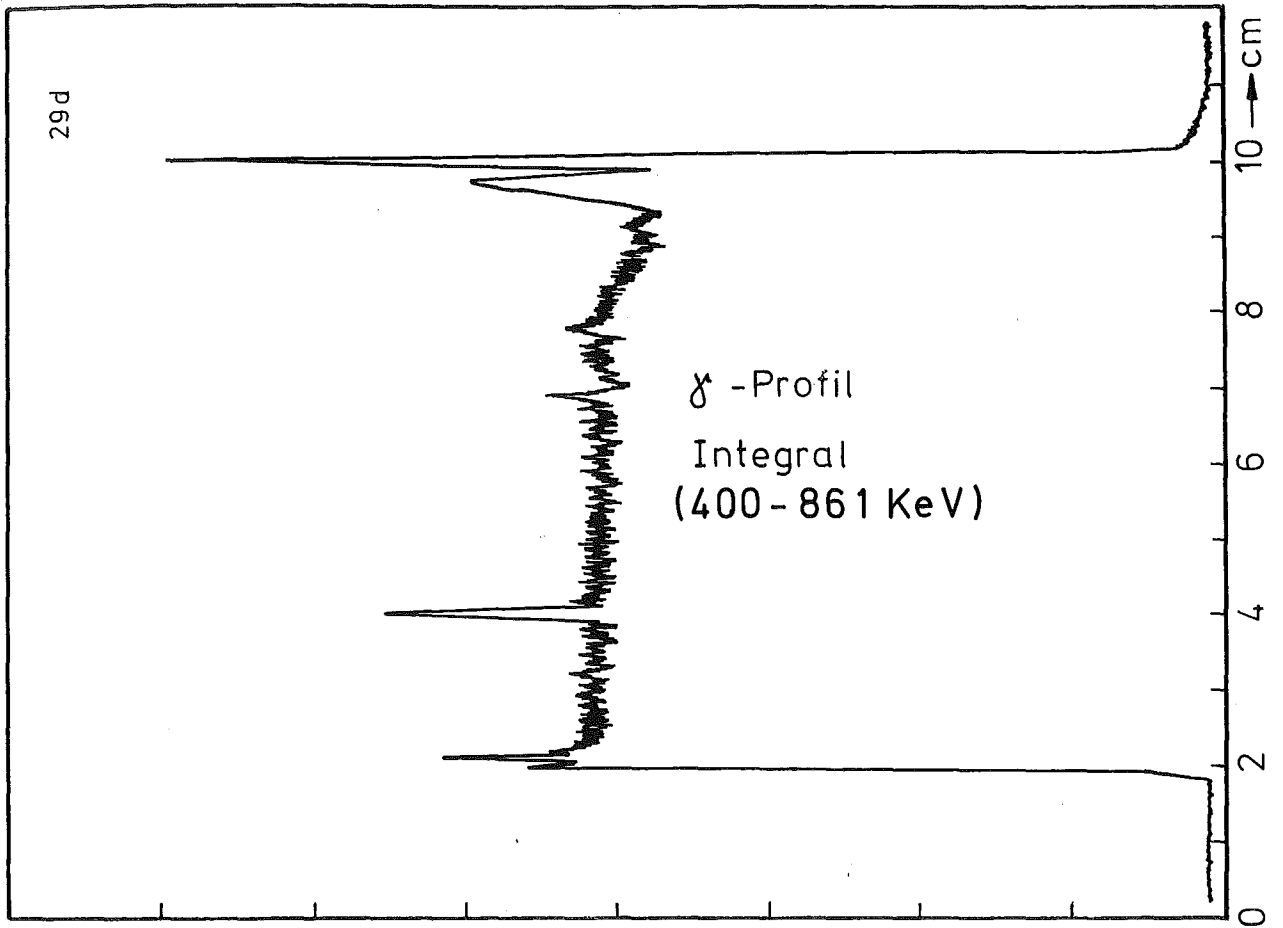
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a

Dauer : 127,2 Volllasttage

Ende : 17. 3. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 23,8 MWd/kg Metall

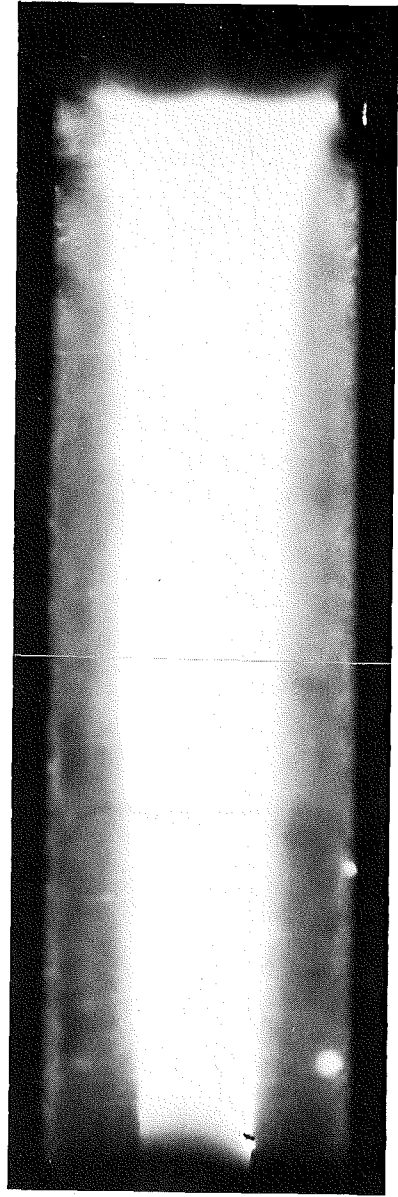
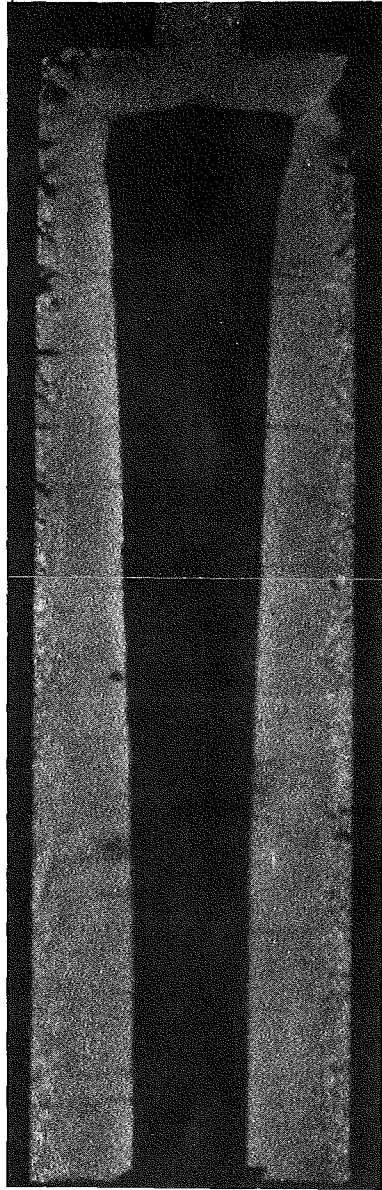
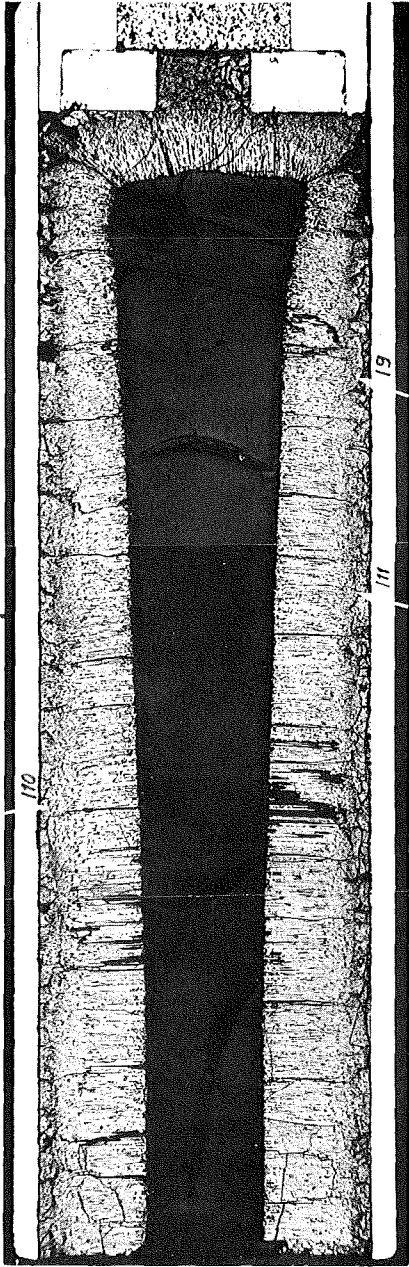
Stableistung max./mittl. : 433 / 320 W/cm



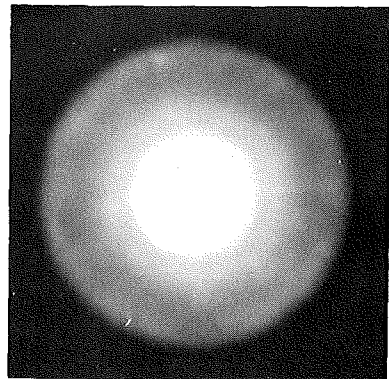
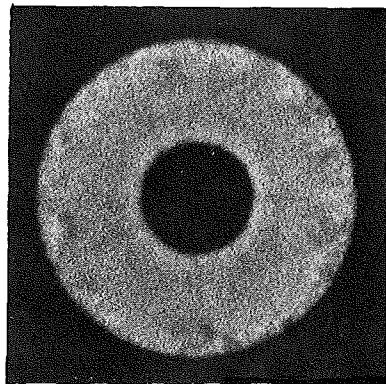
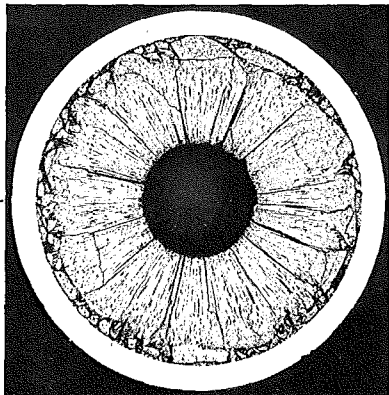
A

B

C

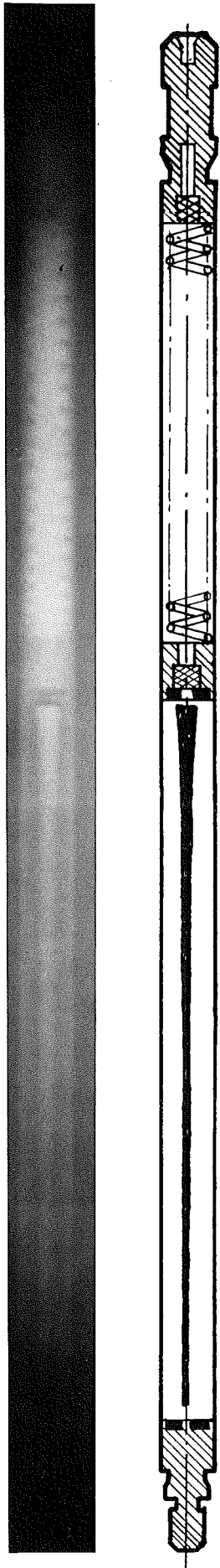


1



2

1mm



Prüfling 4B-29

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : —

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : —

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

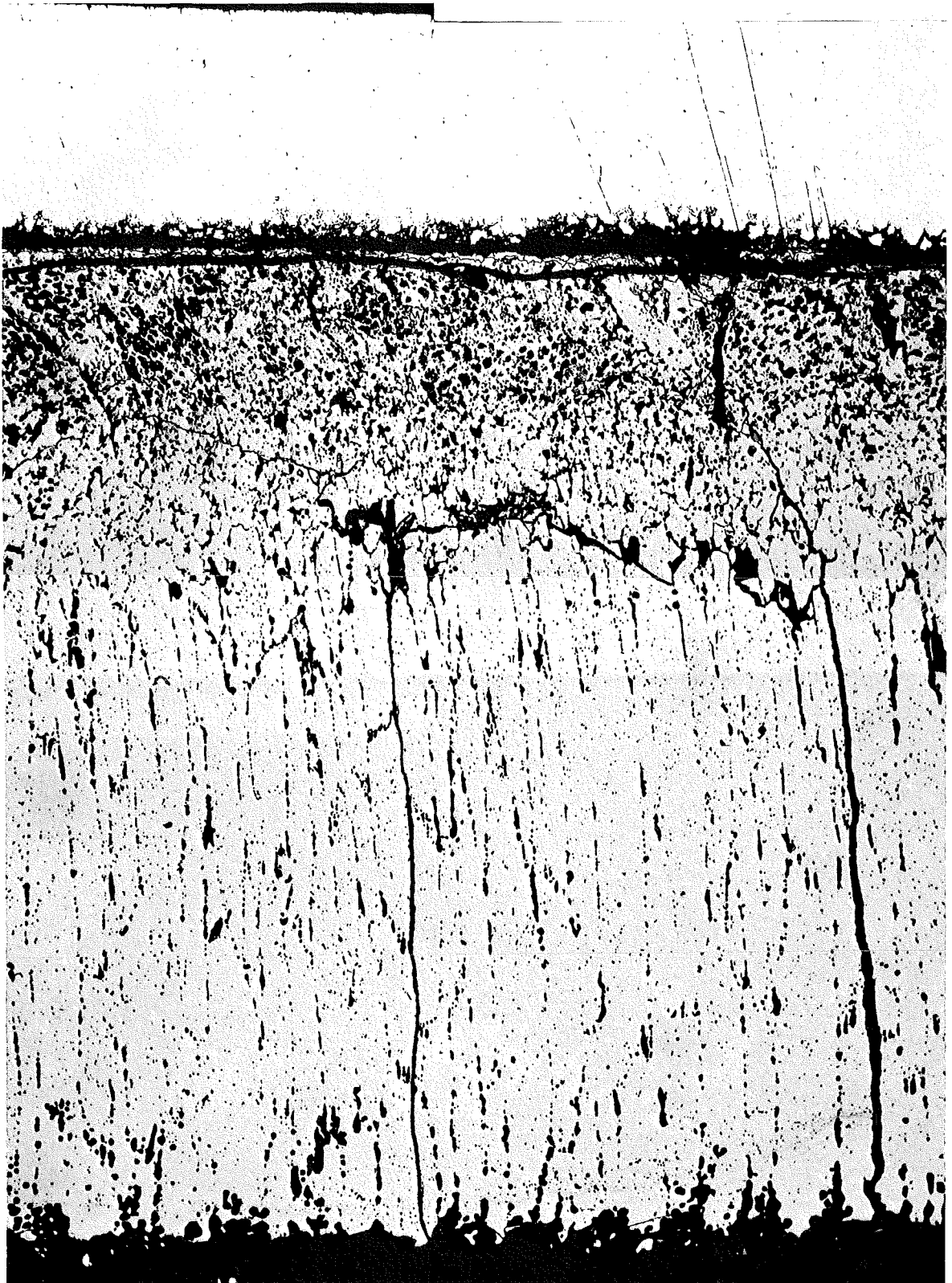
Dauer : 67,4 Vollasttage

Ende : 12. 2. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 17,1 MWd/kg Metall

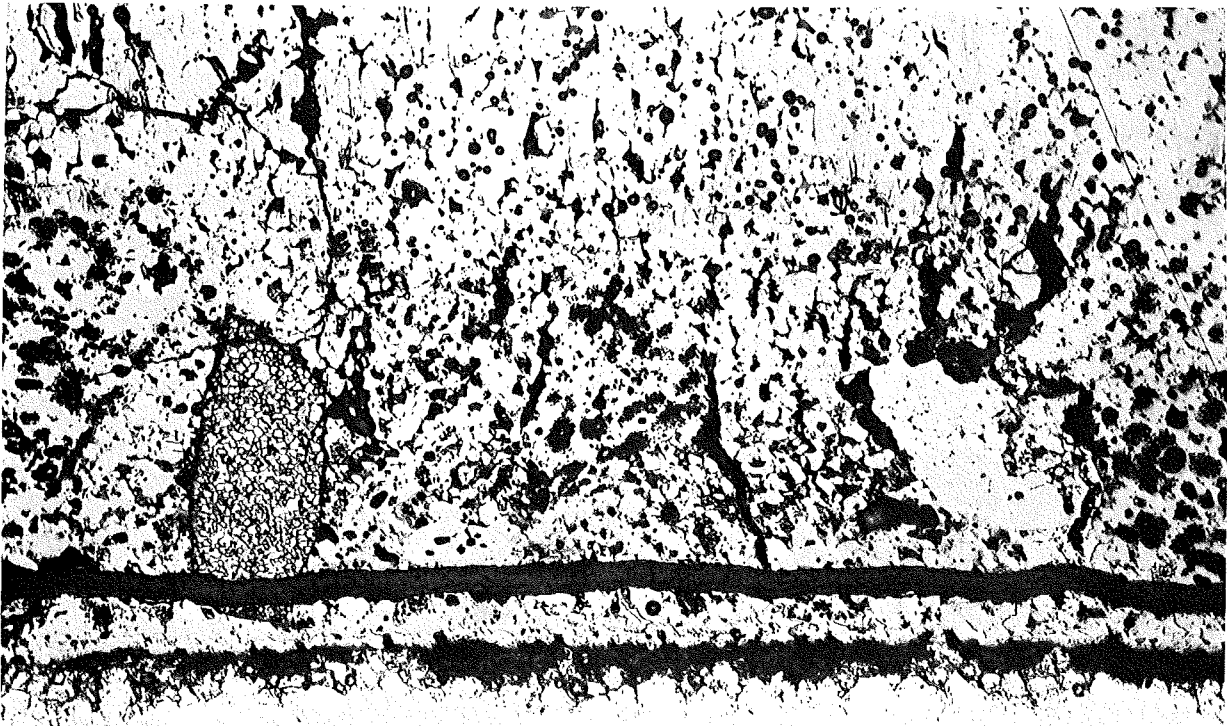
Stableistung max./mittl. : 544 / 430 W/cm

-I/27-
zu Prüfling 4B/28
A1

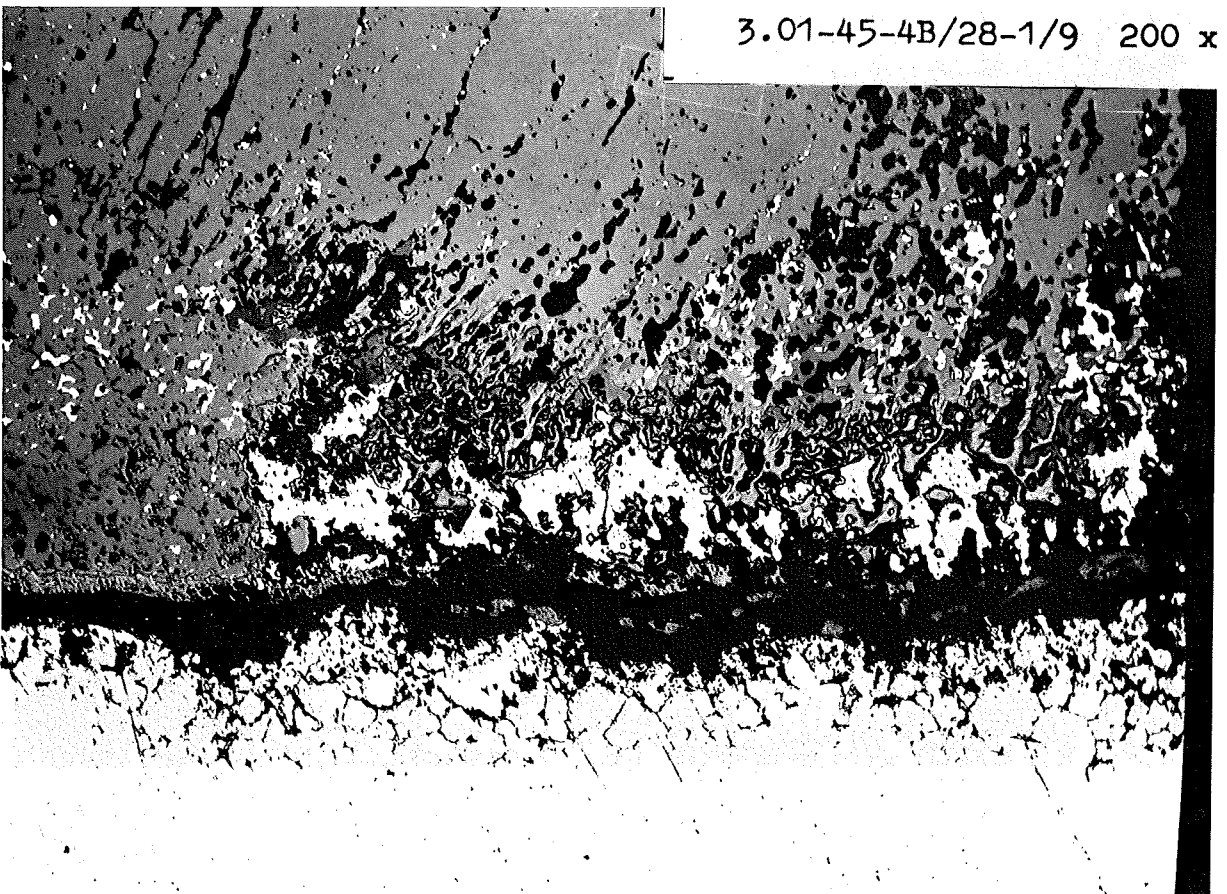


—|—
0,1mm

- 1/28 -
zu Prüfling 4B/28
A1

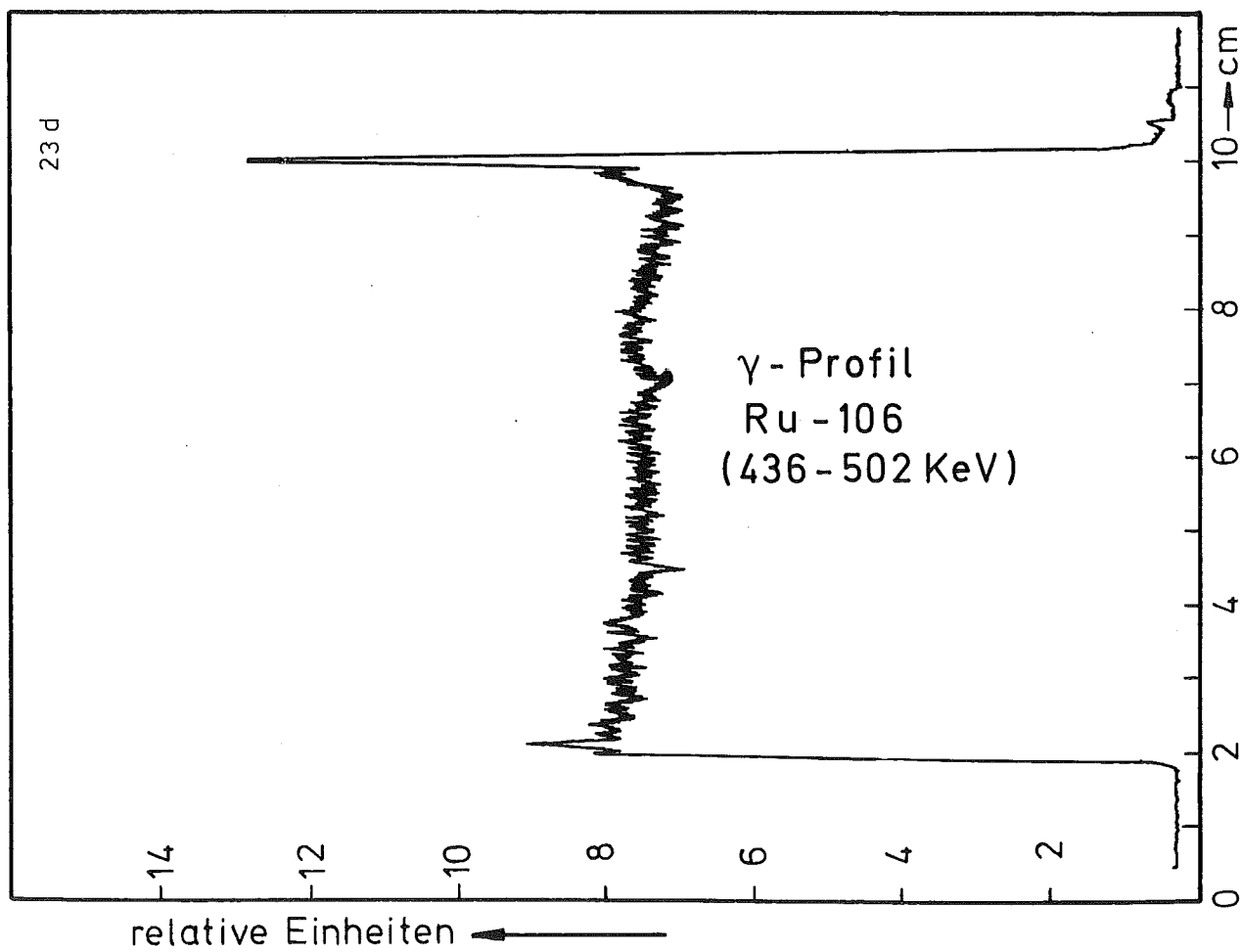
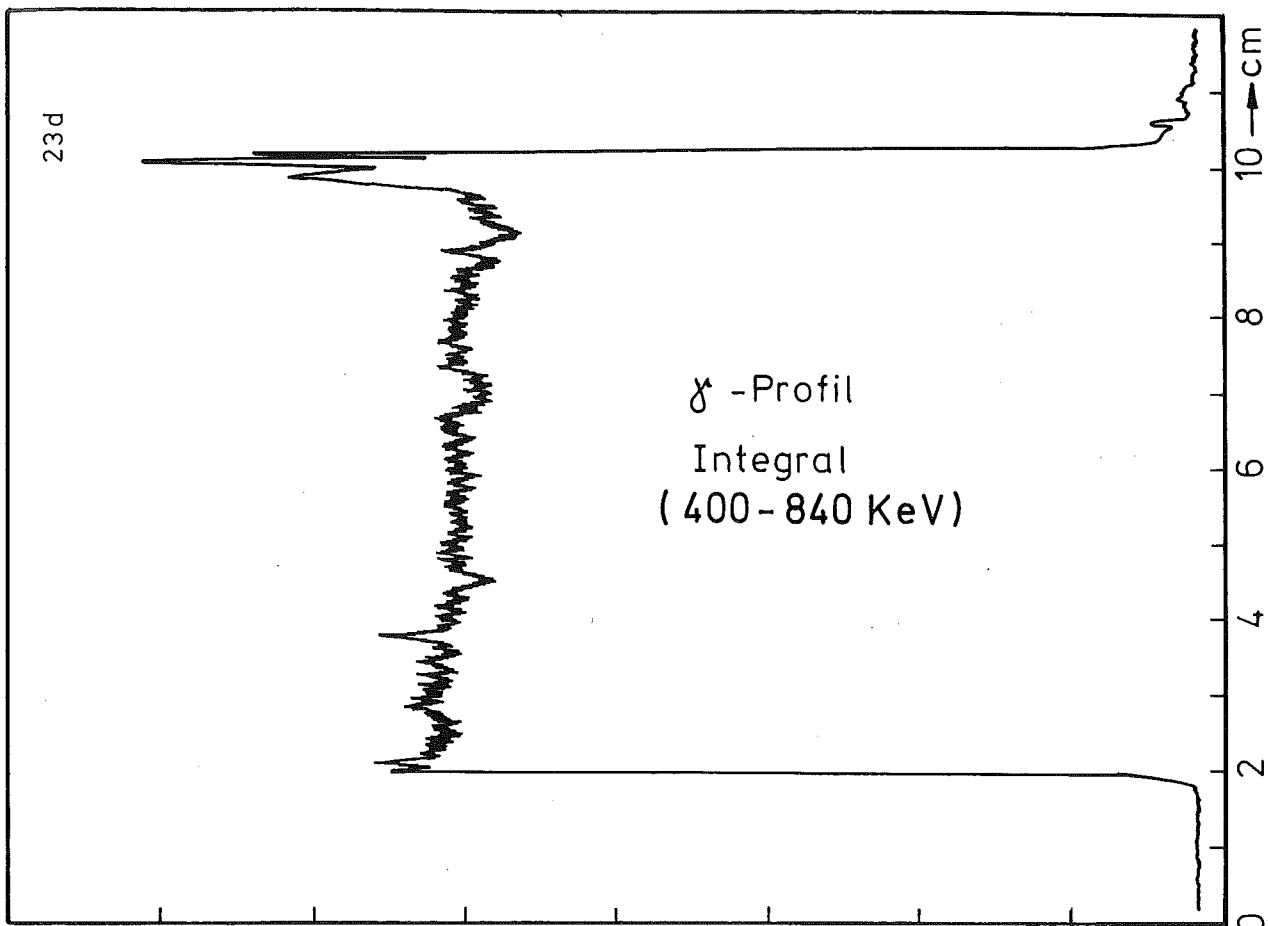


3.01-45-4B/28-1/19 200 x



3.01-45-4B/28-1/9 200 x

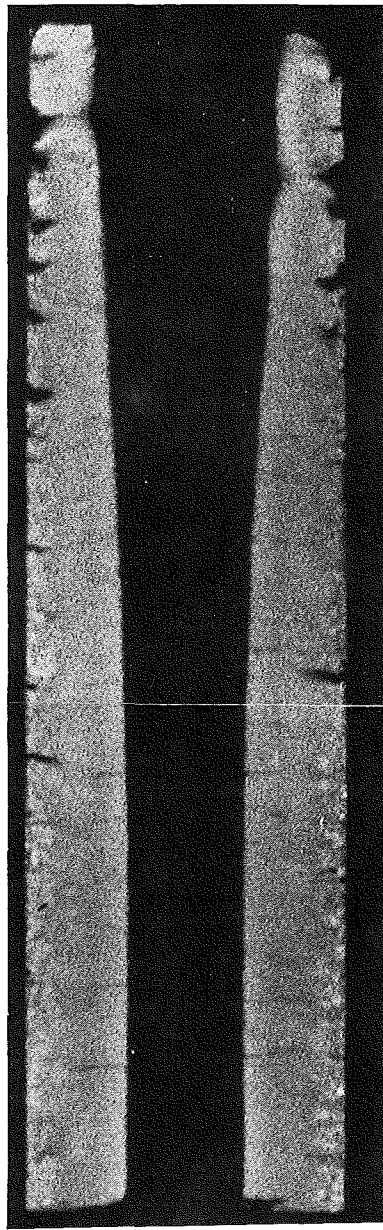
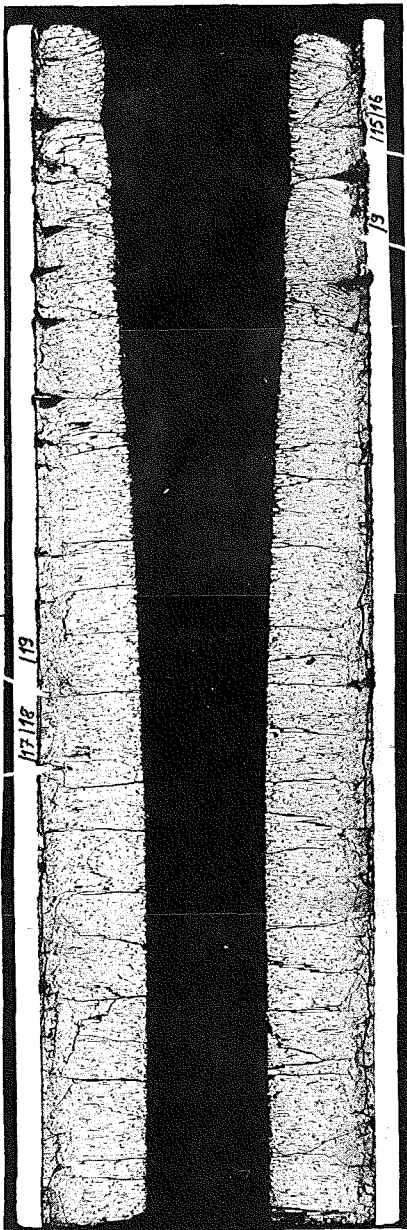
0,1 mm



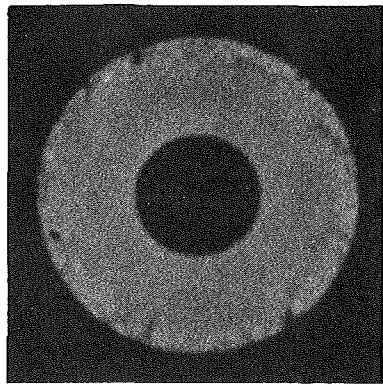
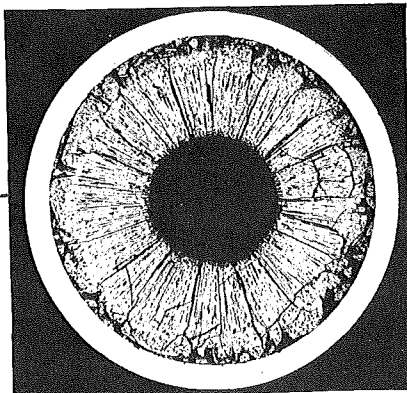
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-28

Brennstoff :

Form : Pulver

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : —

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,0 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : —

Schmierdichte : 80% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a

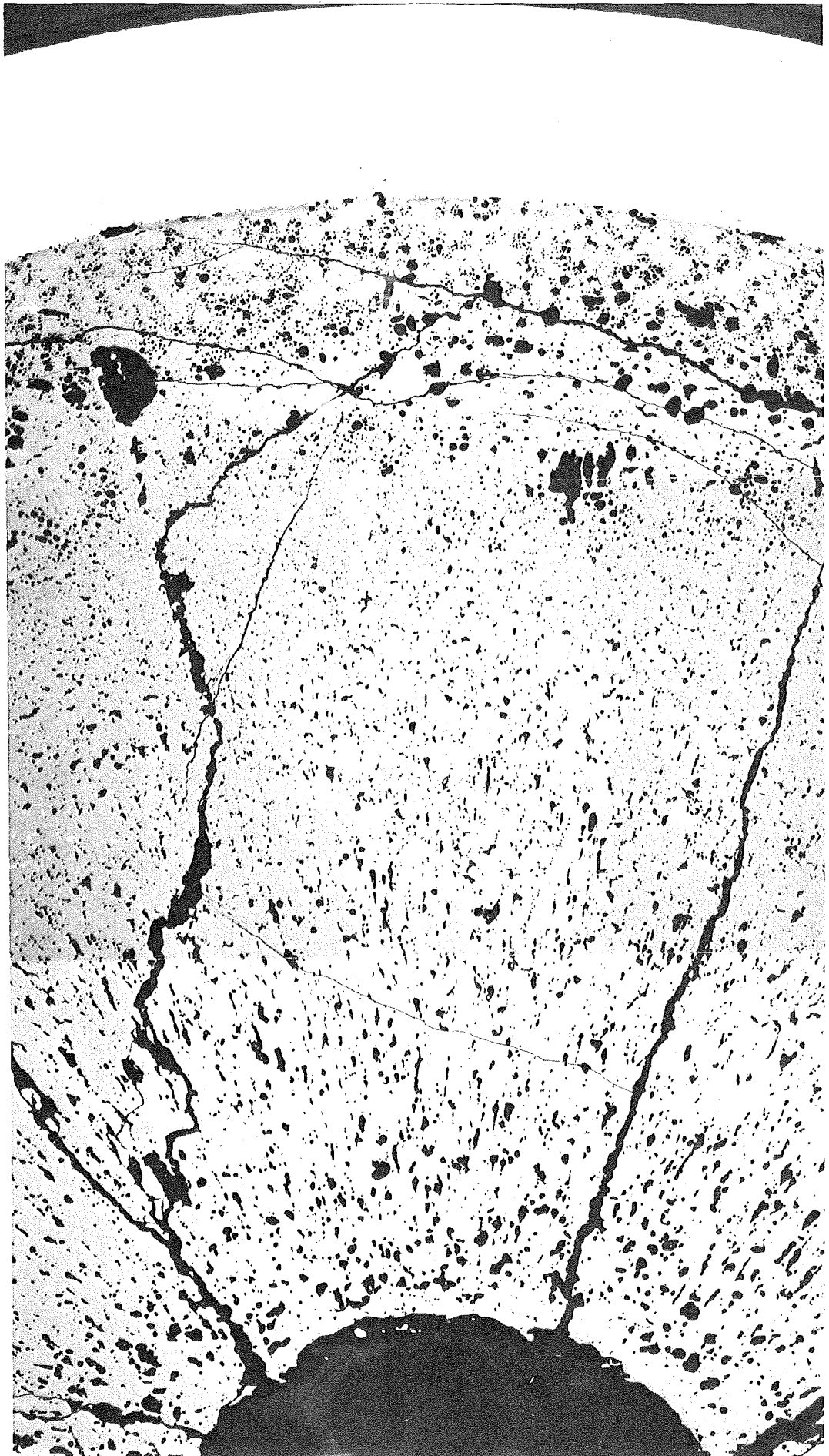
Dauer : 67,4 Volllasttage

Ende : 12. 2. 69

Rechn. Abbrand mittl. : 17,1 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 1102 / 433 W/cm

-I/31-
zu Prüfling 4B /4
A1

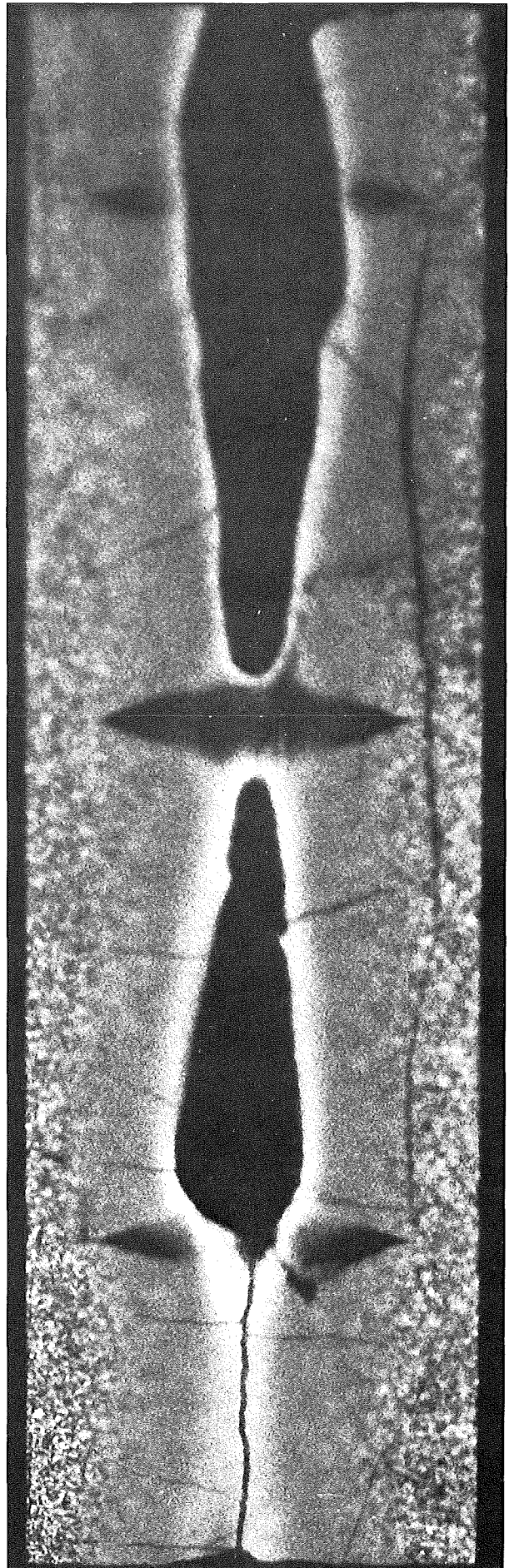
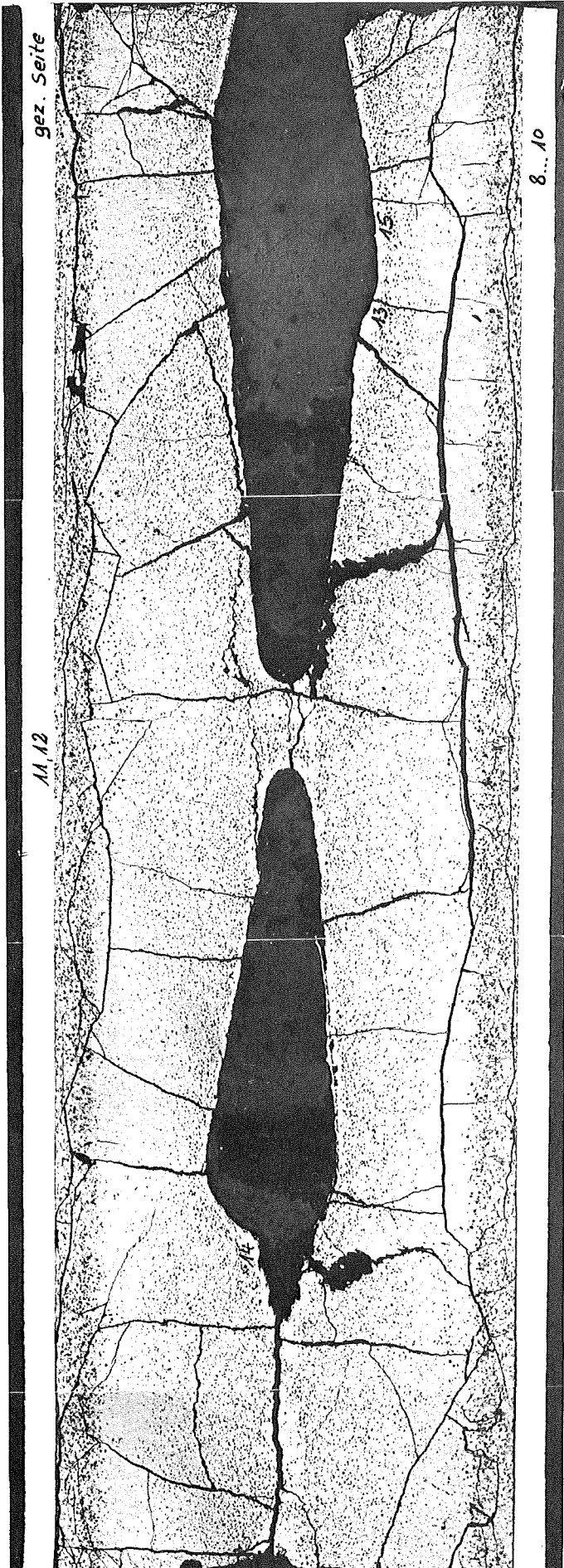


4...6

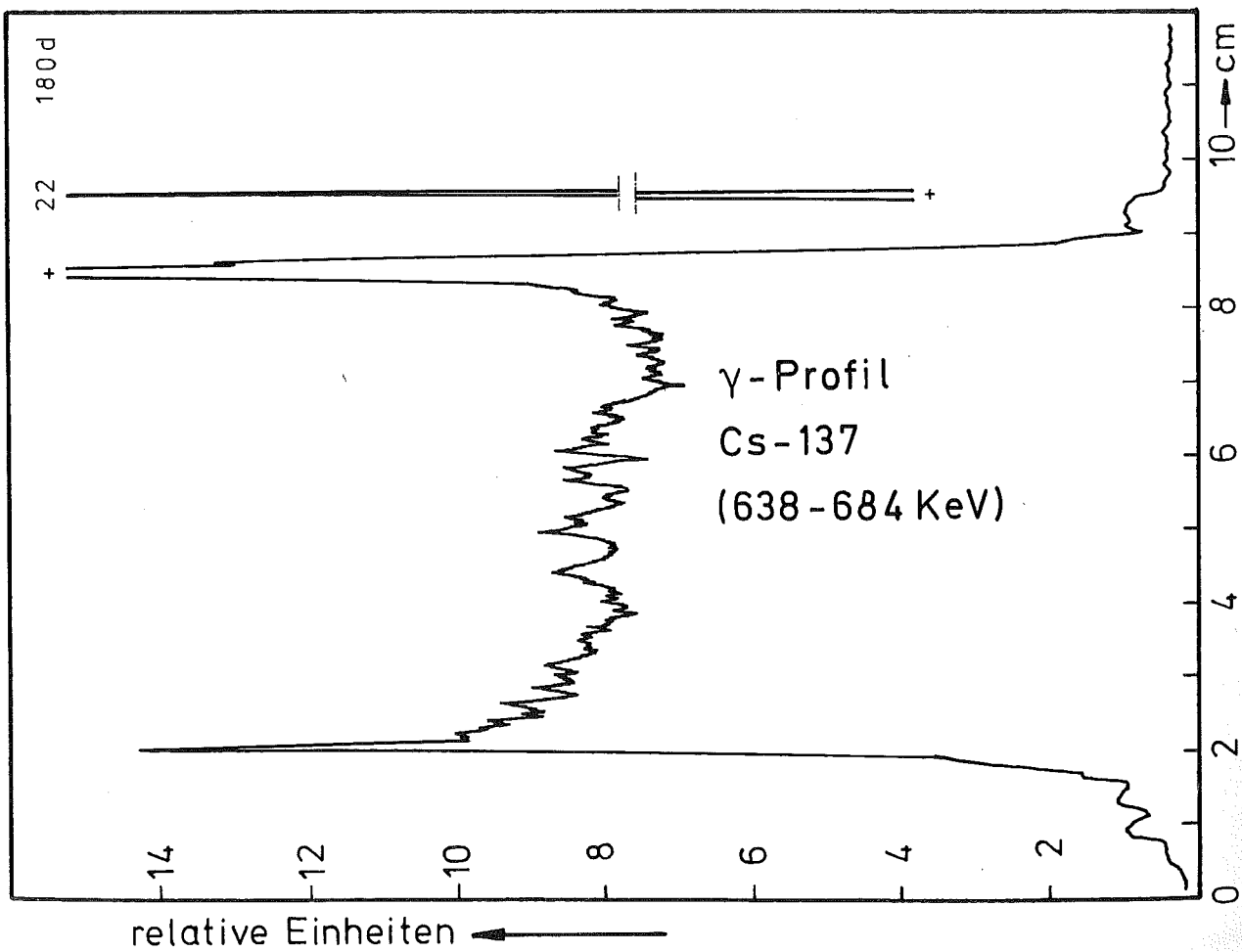
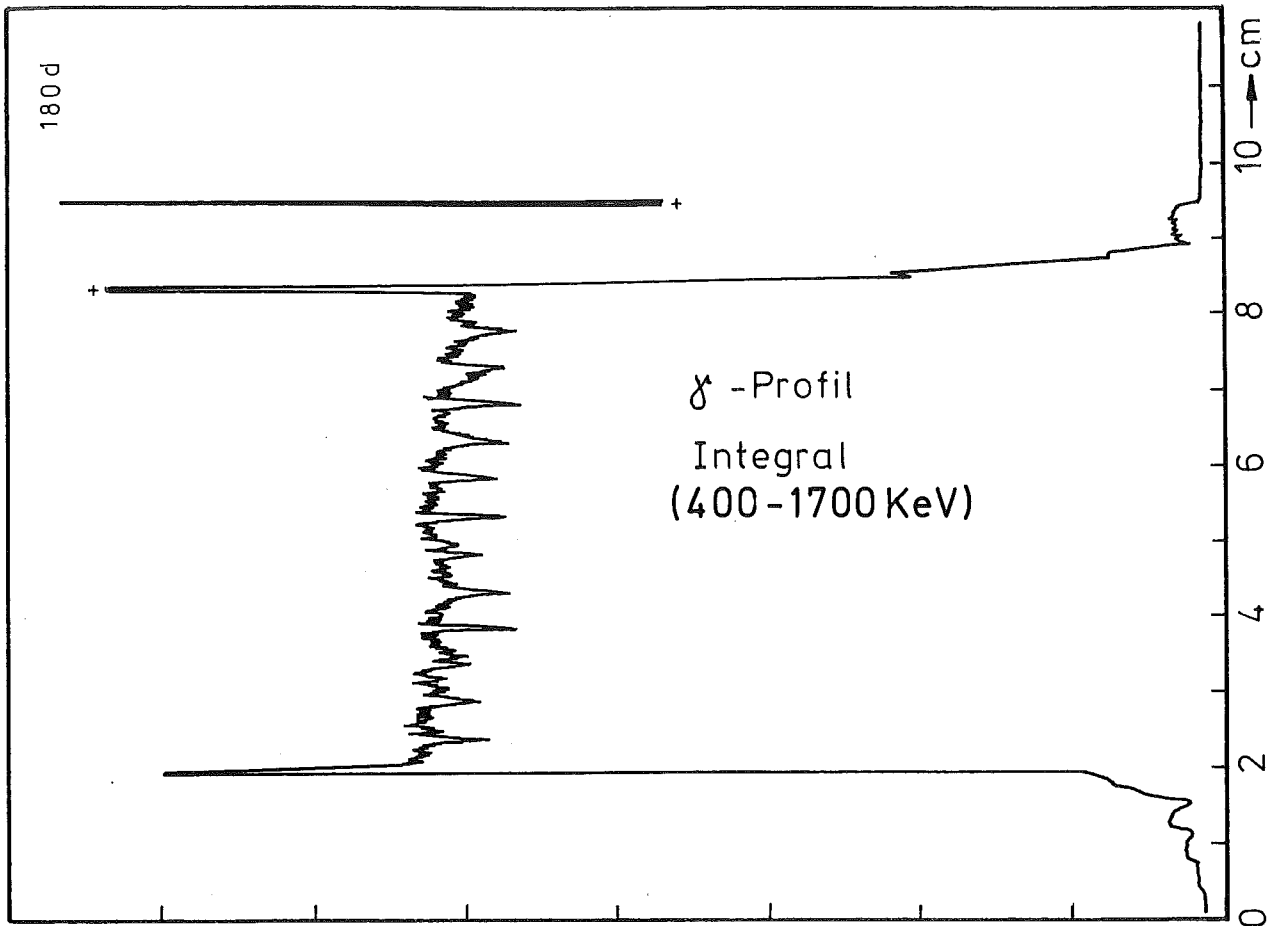
0,1 mm

A3

B3



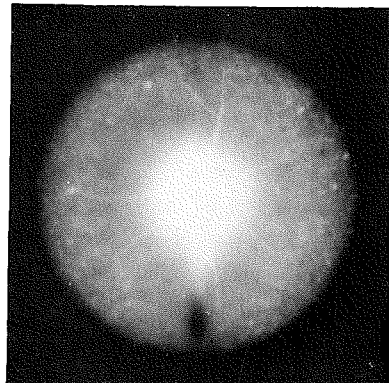
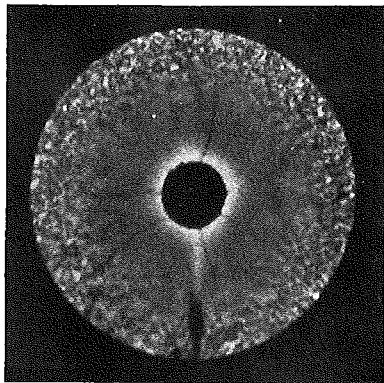
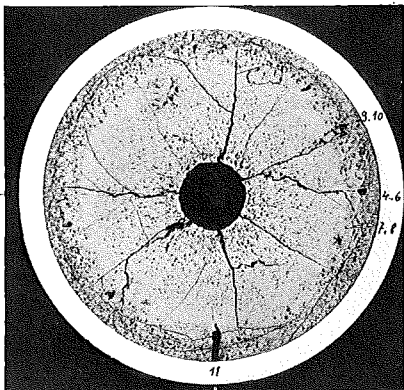
1 mm



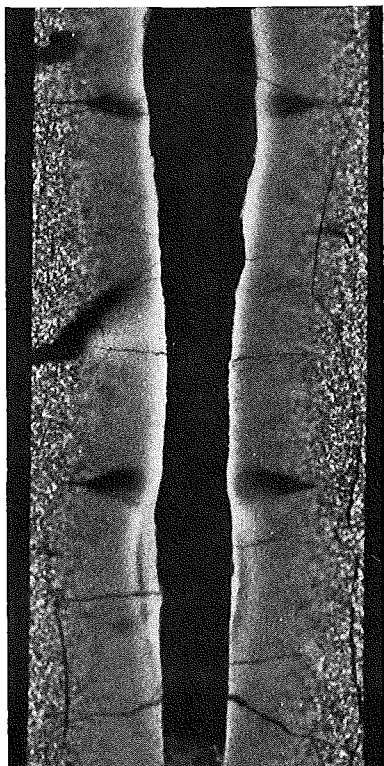
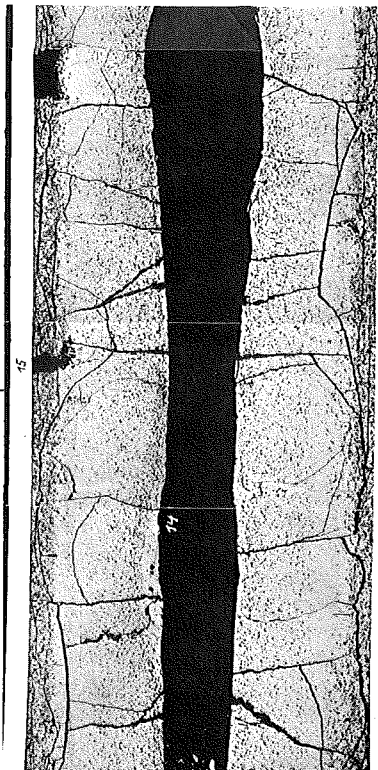
A

B

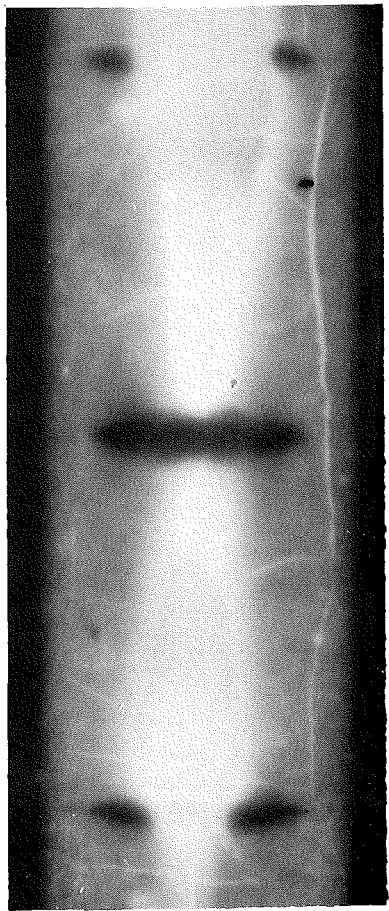
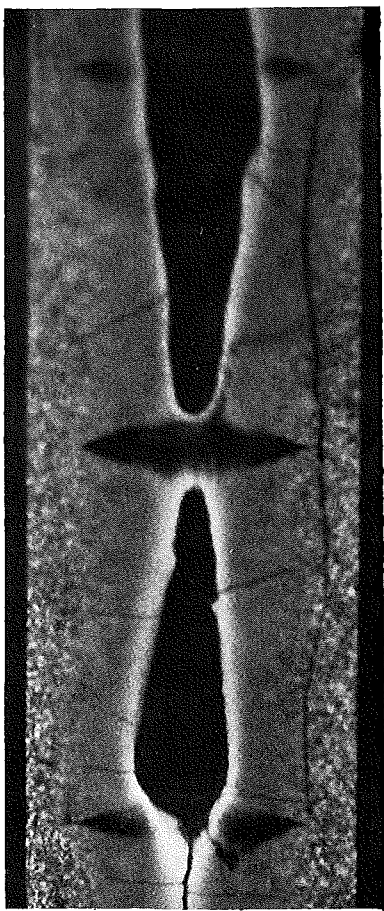
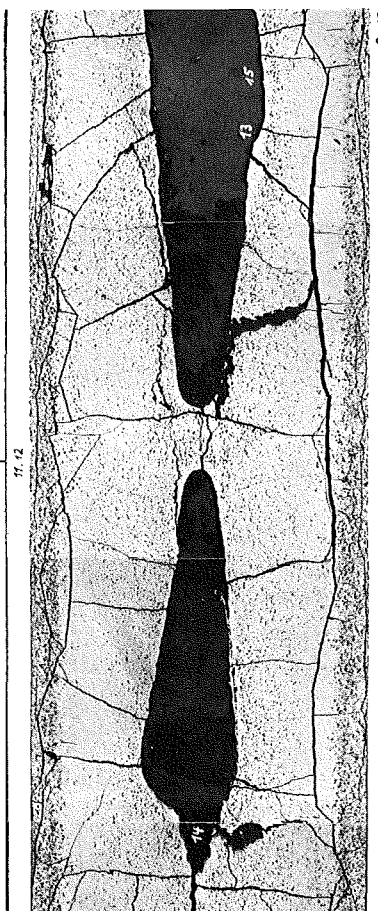
C



1



2



3



mm



Prüfling 4B-4

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a

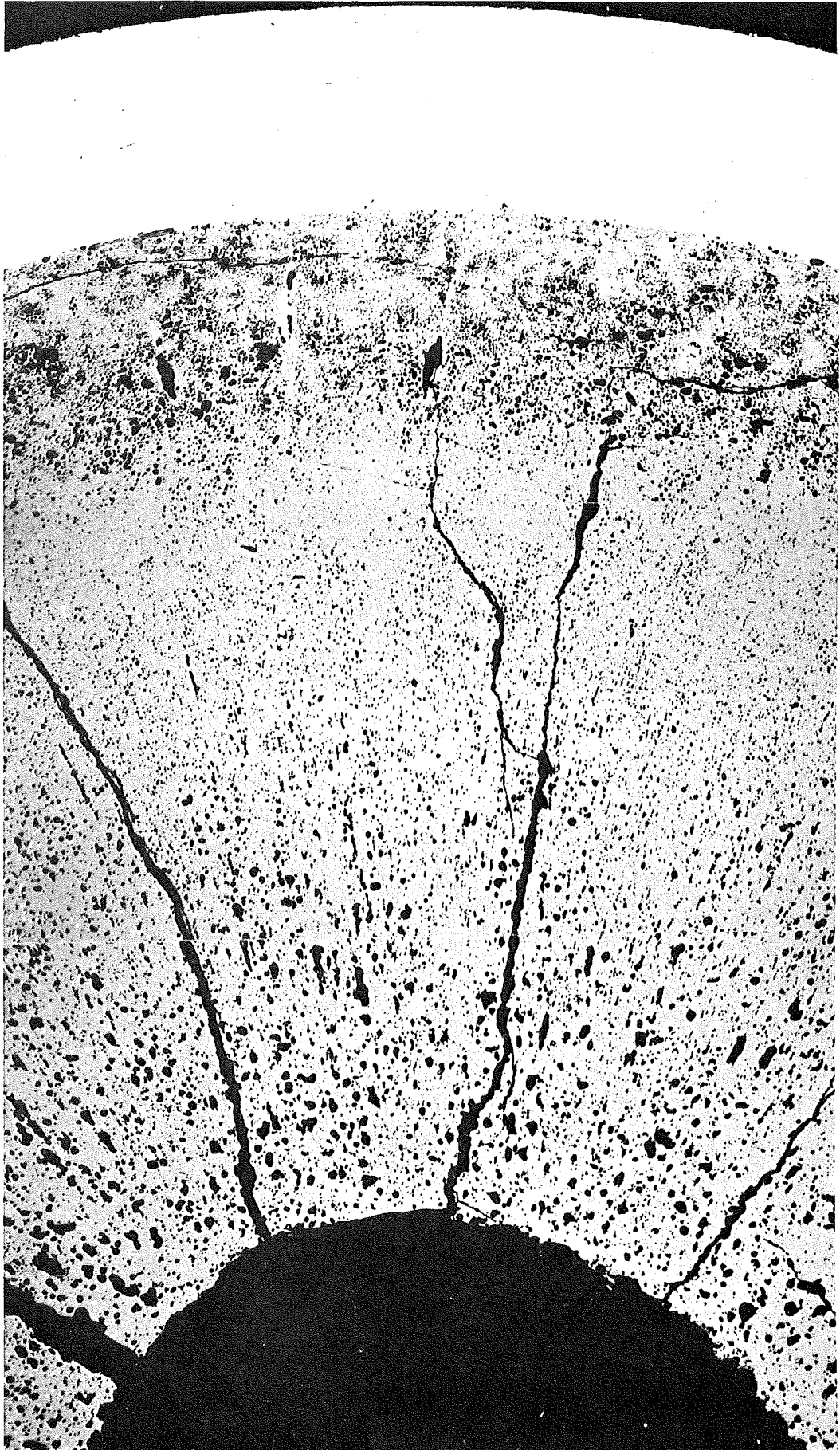
Dauer : 484,3 Vollasttage

Ende : 21. 9. 70

Rechn. Abbrand mittl. : 85,3 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 444 / 313 W/cm

-I/35 -
zu Prüfling 4B/3
A1



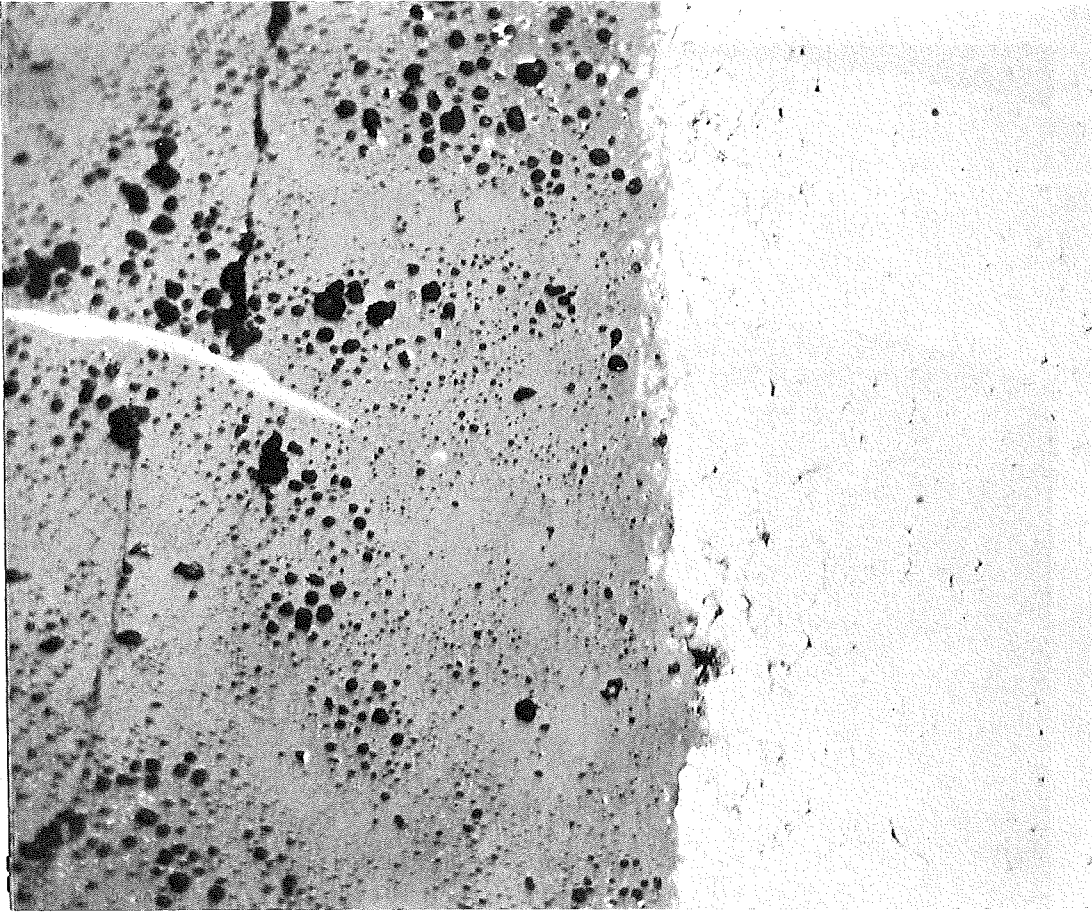
4...6

—|—
0,1mm

- I/36 -
zu Prüfling 4B/3
A1

HZ-3a-47-4B3-1/8

500x

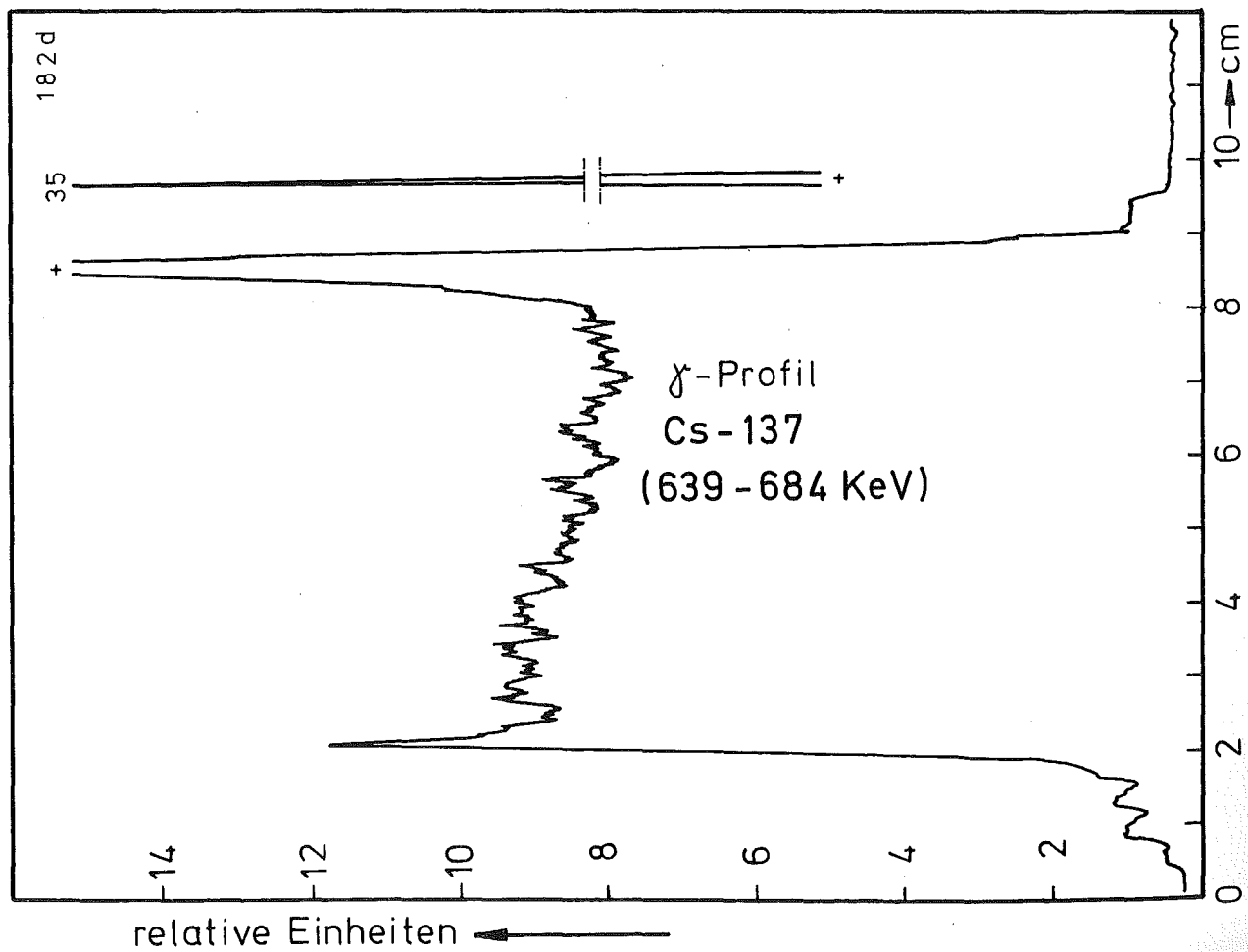
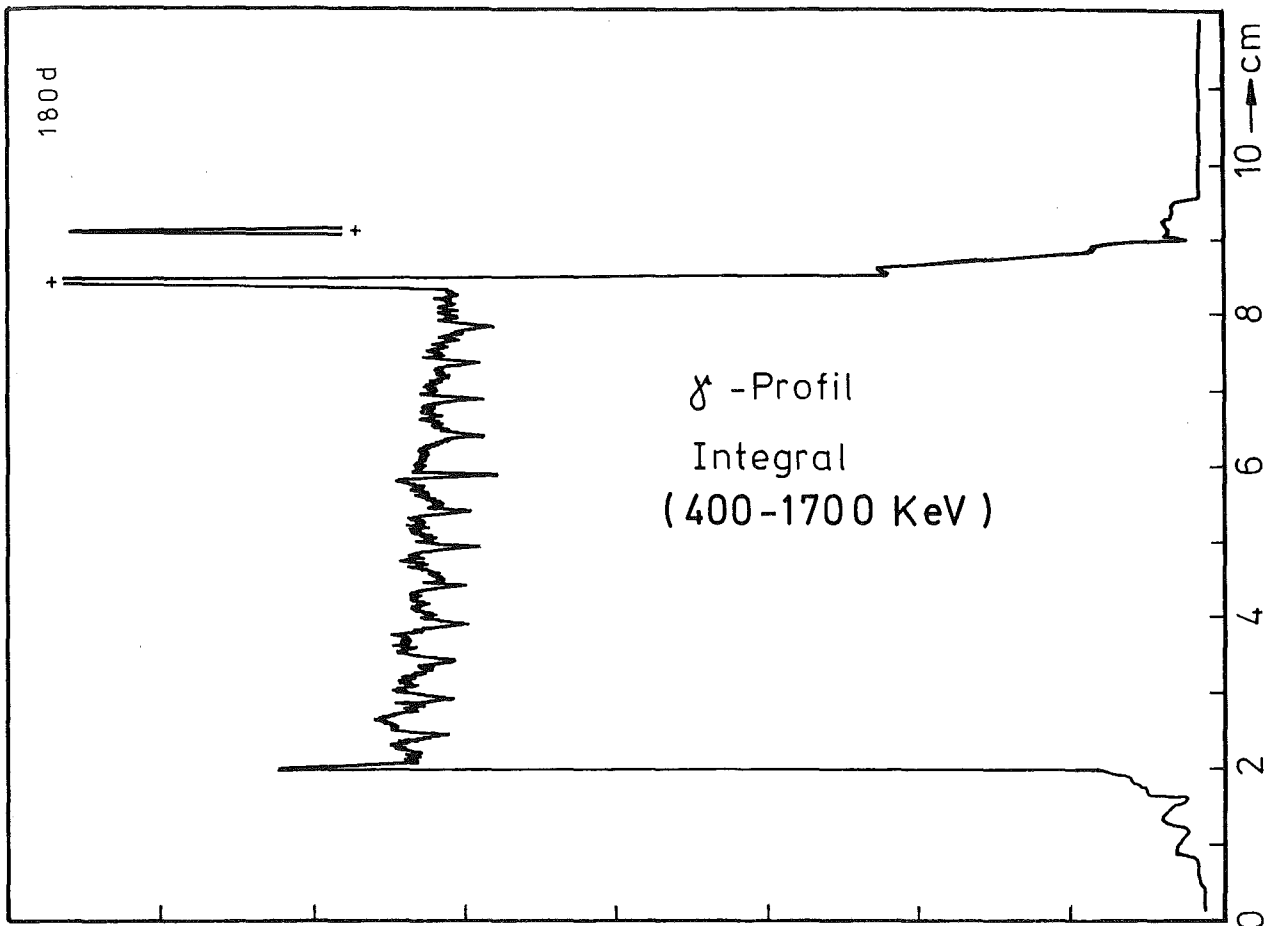


0,04 mm



0,1 mm

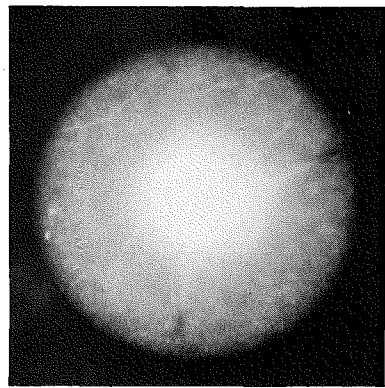
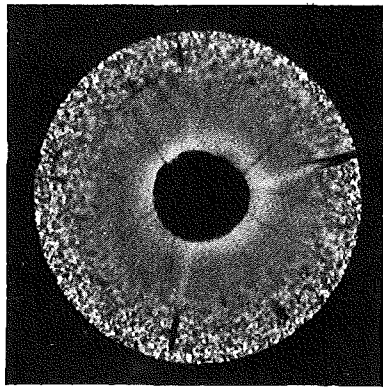
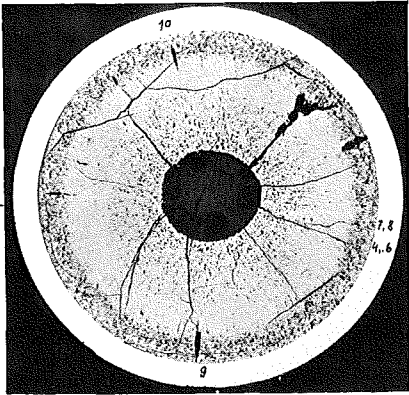
HZ-3a-47-4B3-1/10 200x



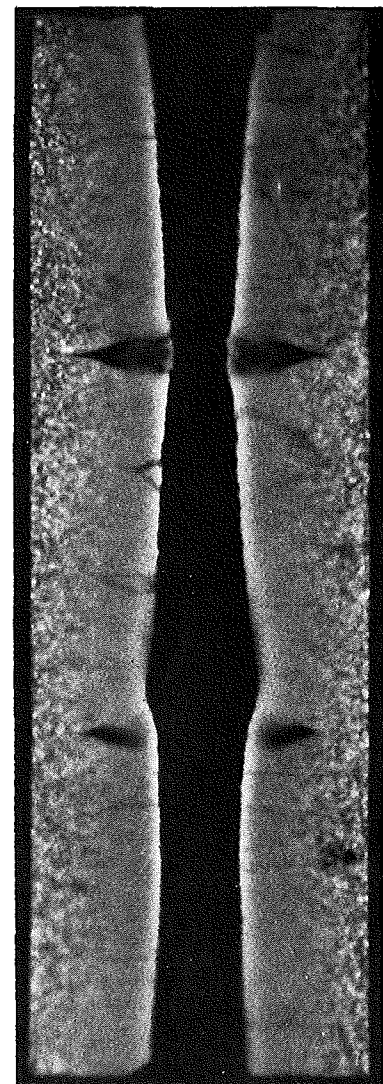
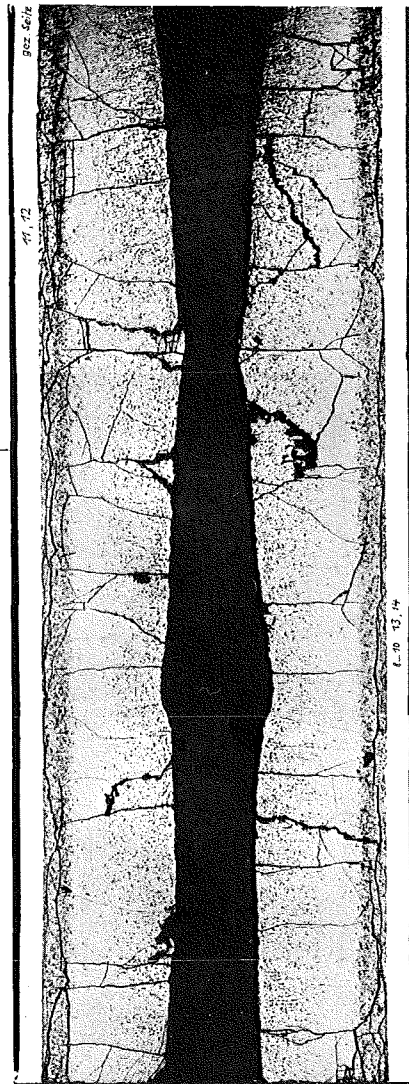
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-3

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

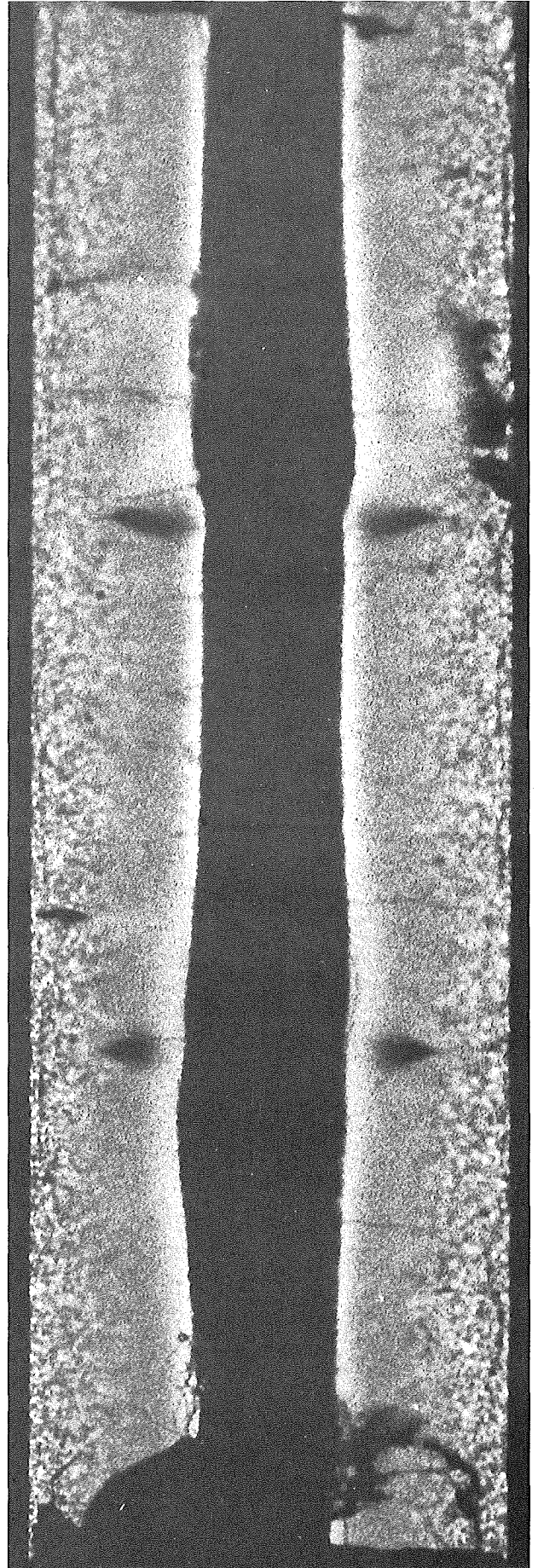
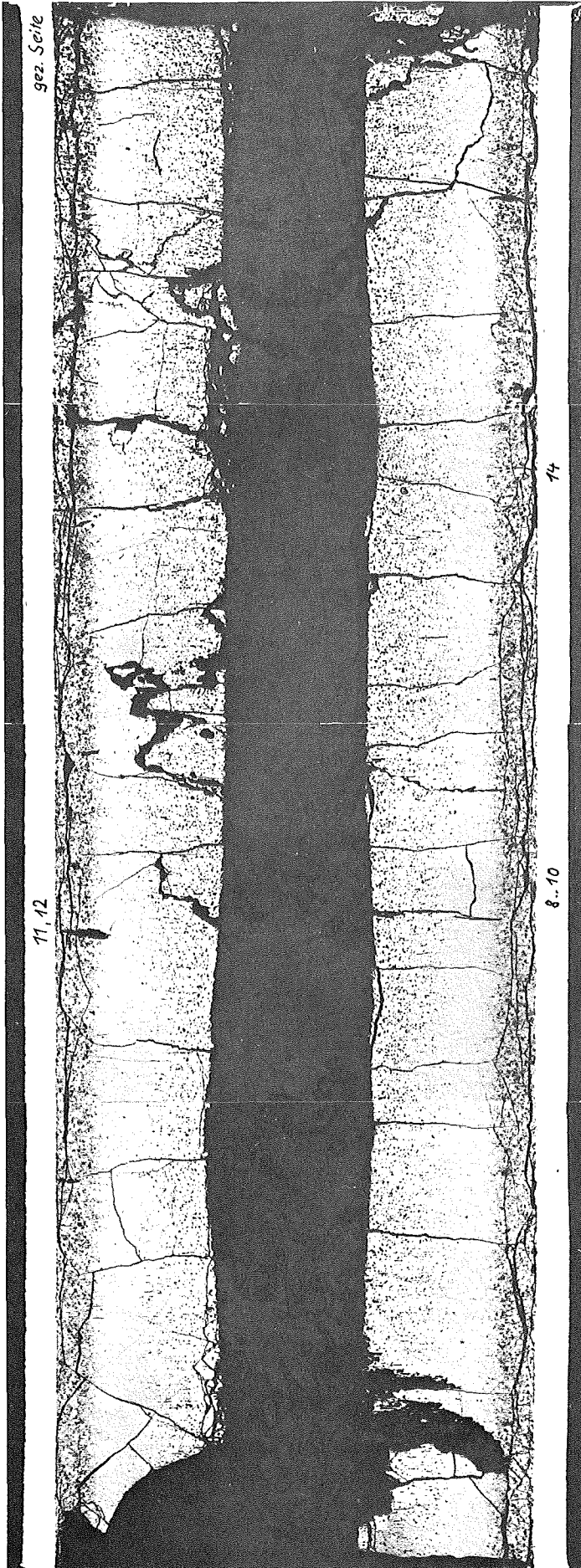
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Volllasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 74,6 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 444 / 273 W/cm

A 2

B 2



1mm

-I/40 -
zu Prüfling 4B/2
A2



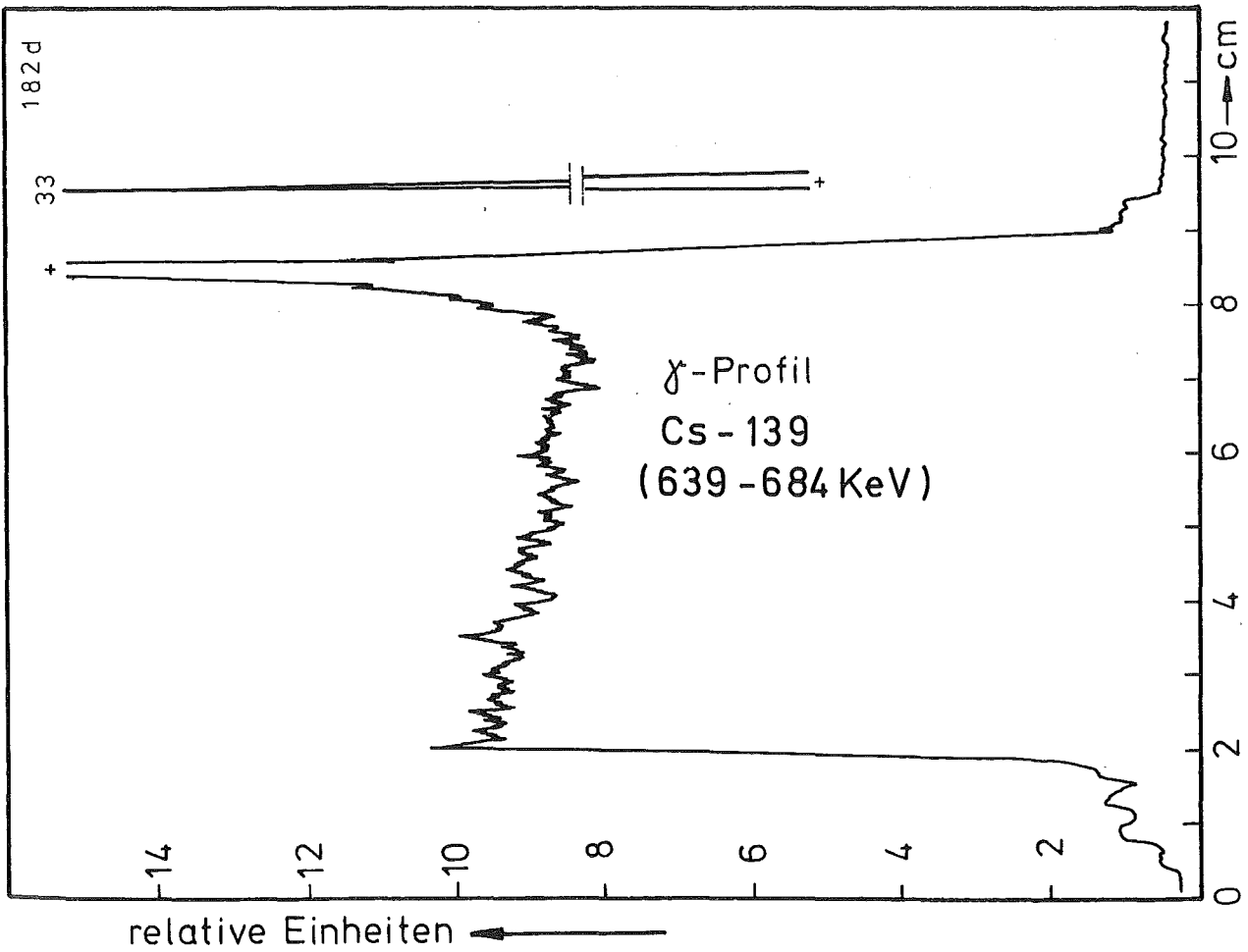
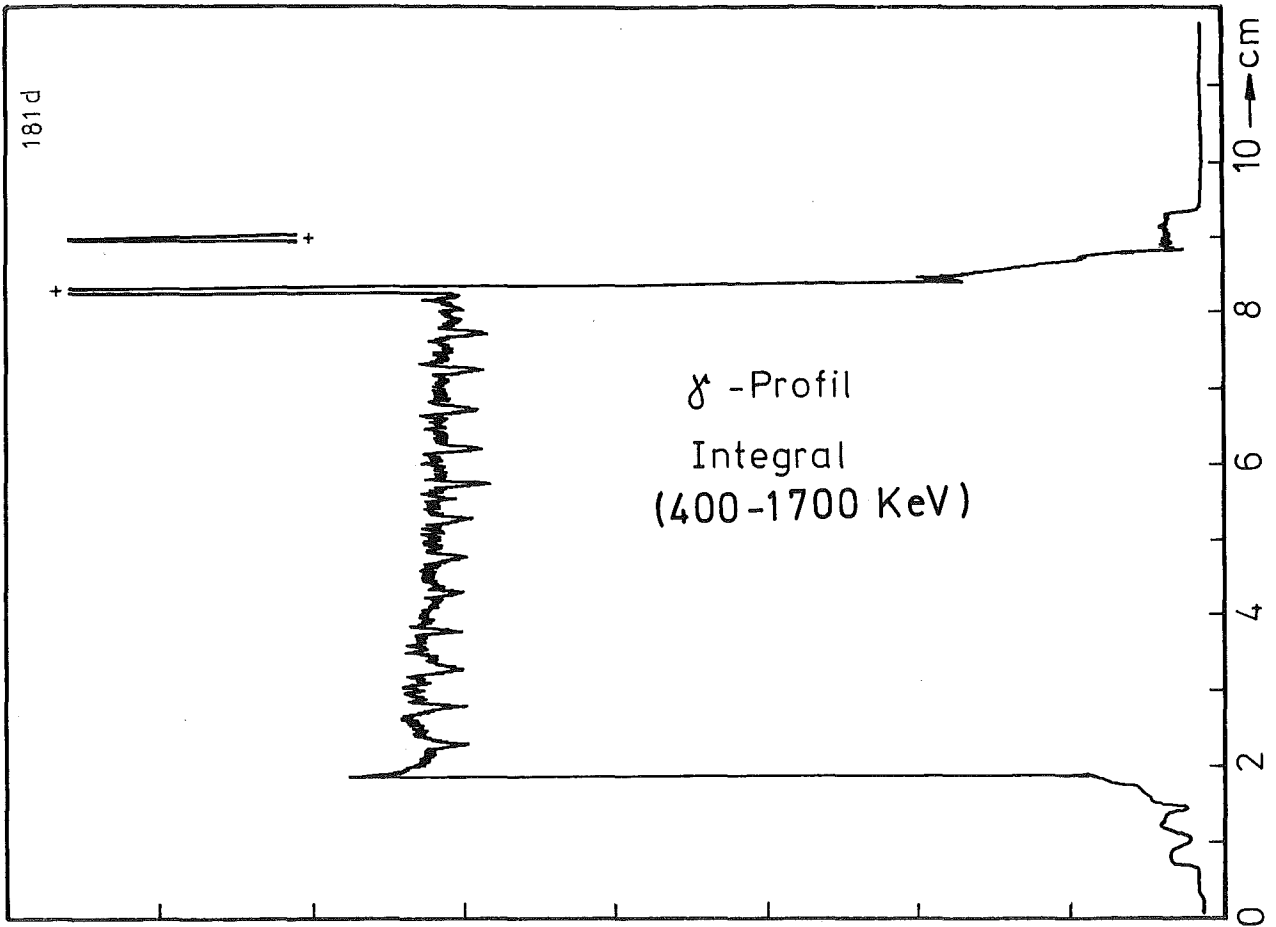
HZ-3a-47-4B2-2/13 200x

0,1 mm



HZ-3a-47-4B2-2/14 500x

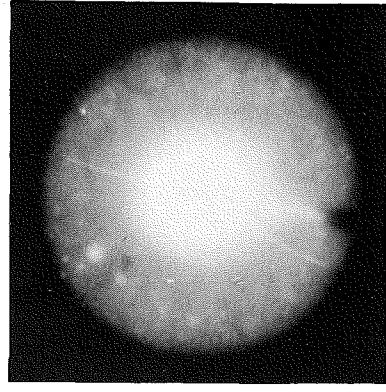
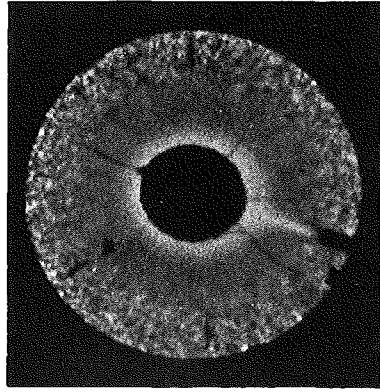
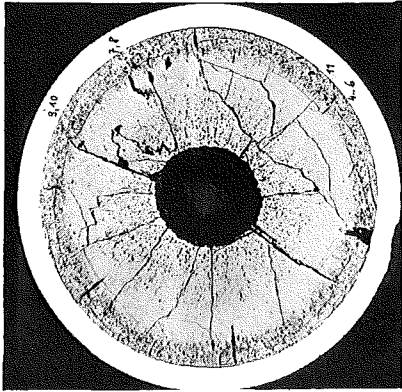
0,04 mm



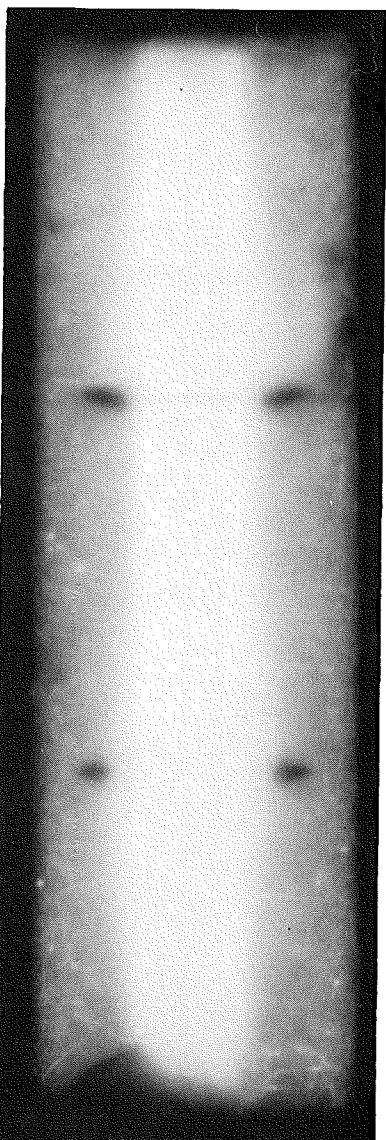
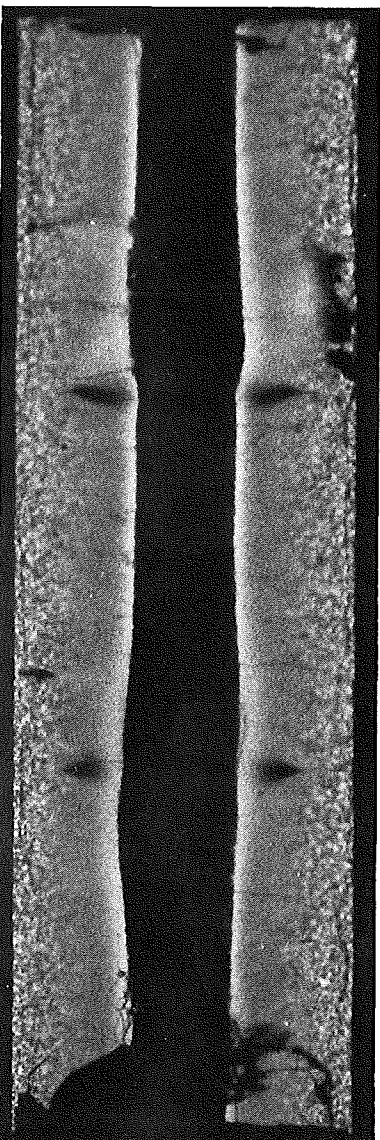
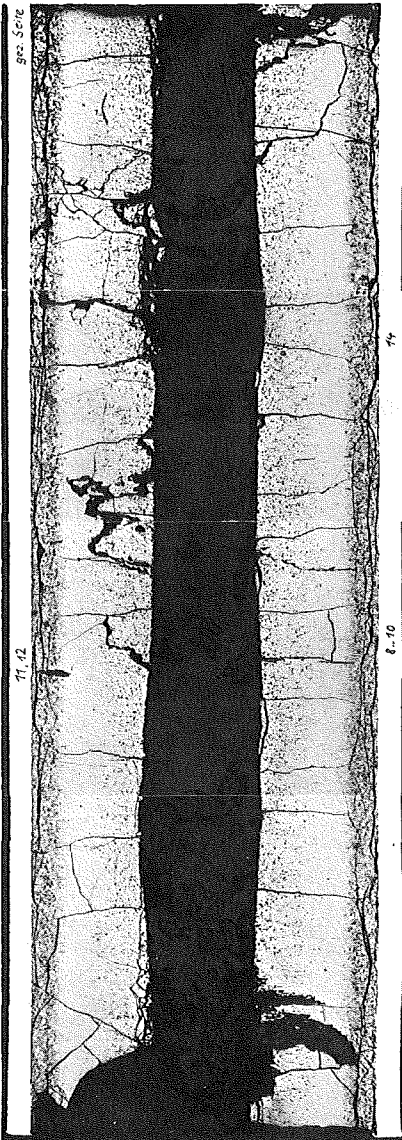
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-2

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

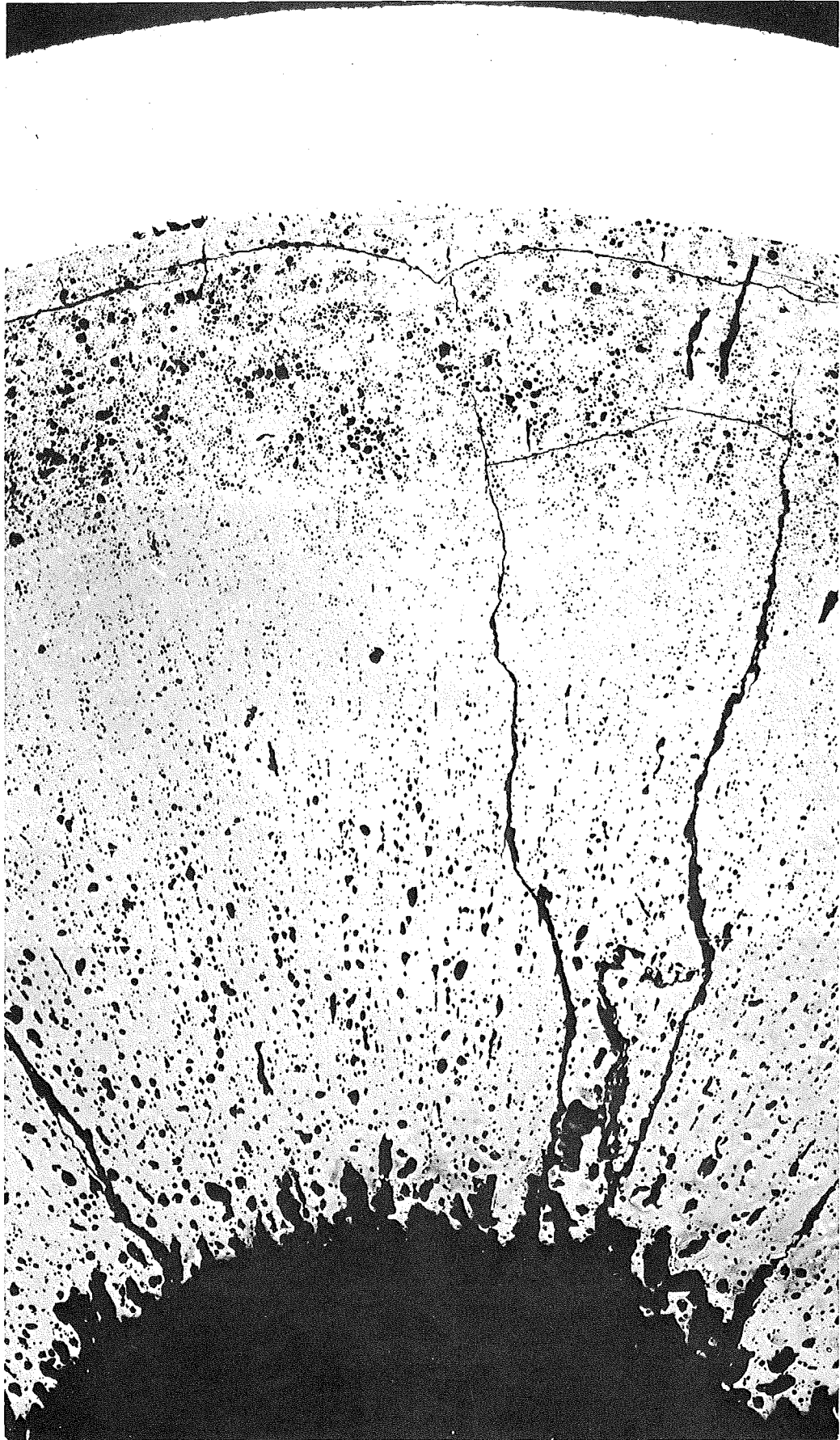
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 484,3 Vollasttage
Ende : 21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 76,3 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 496 / 279 W/cm

-1/43-
zu Prüfling 4B/1

A1



4...6

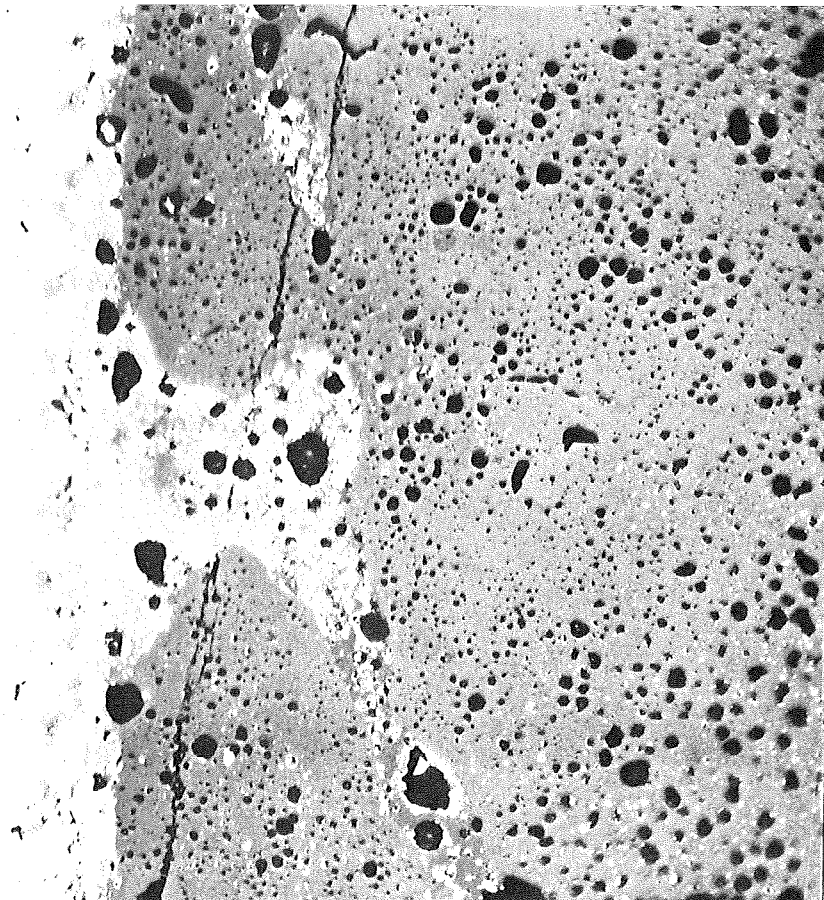
—|—
0,1 mm

-I/44 -
zu Prüfling 4B/1
A1



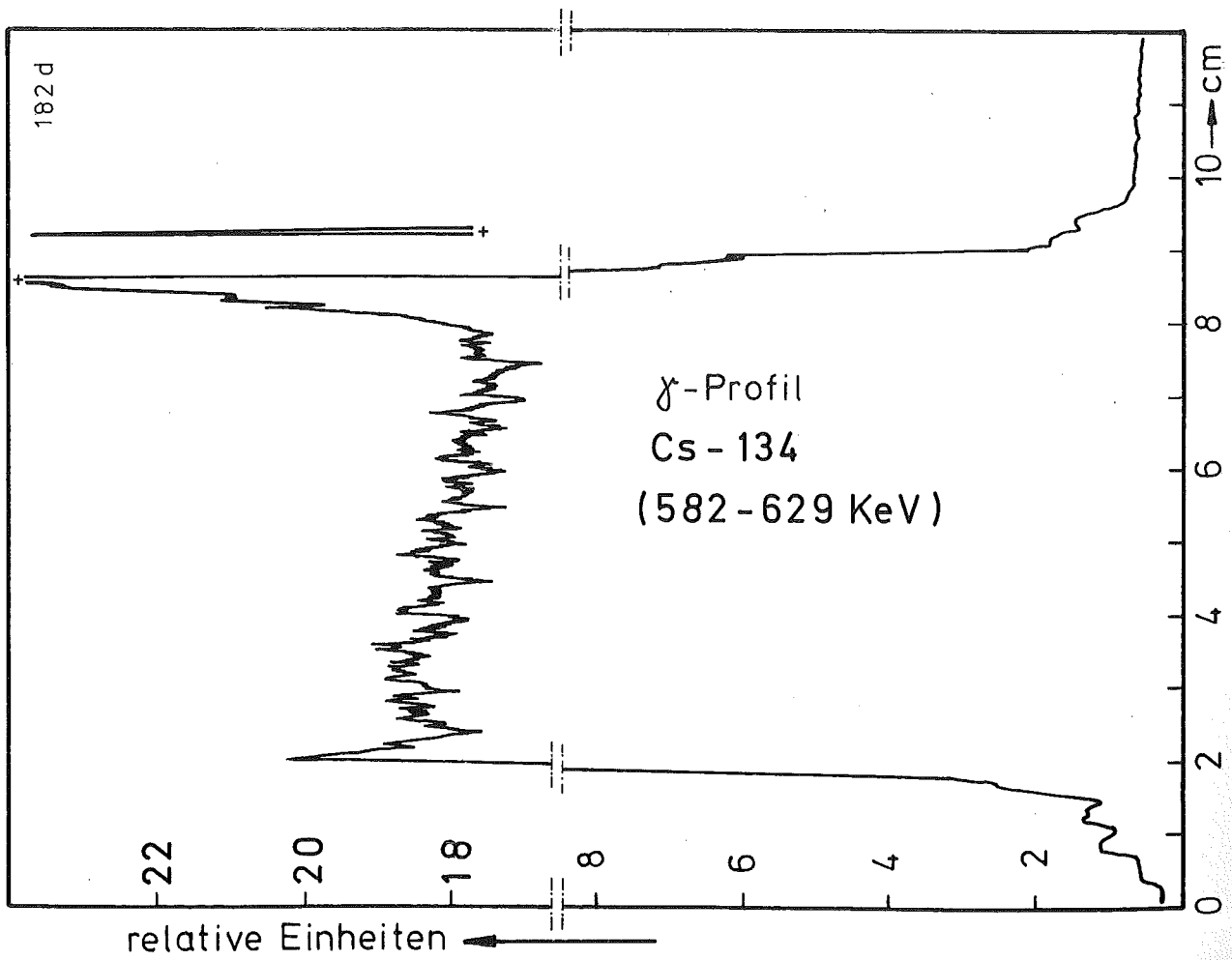
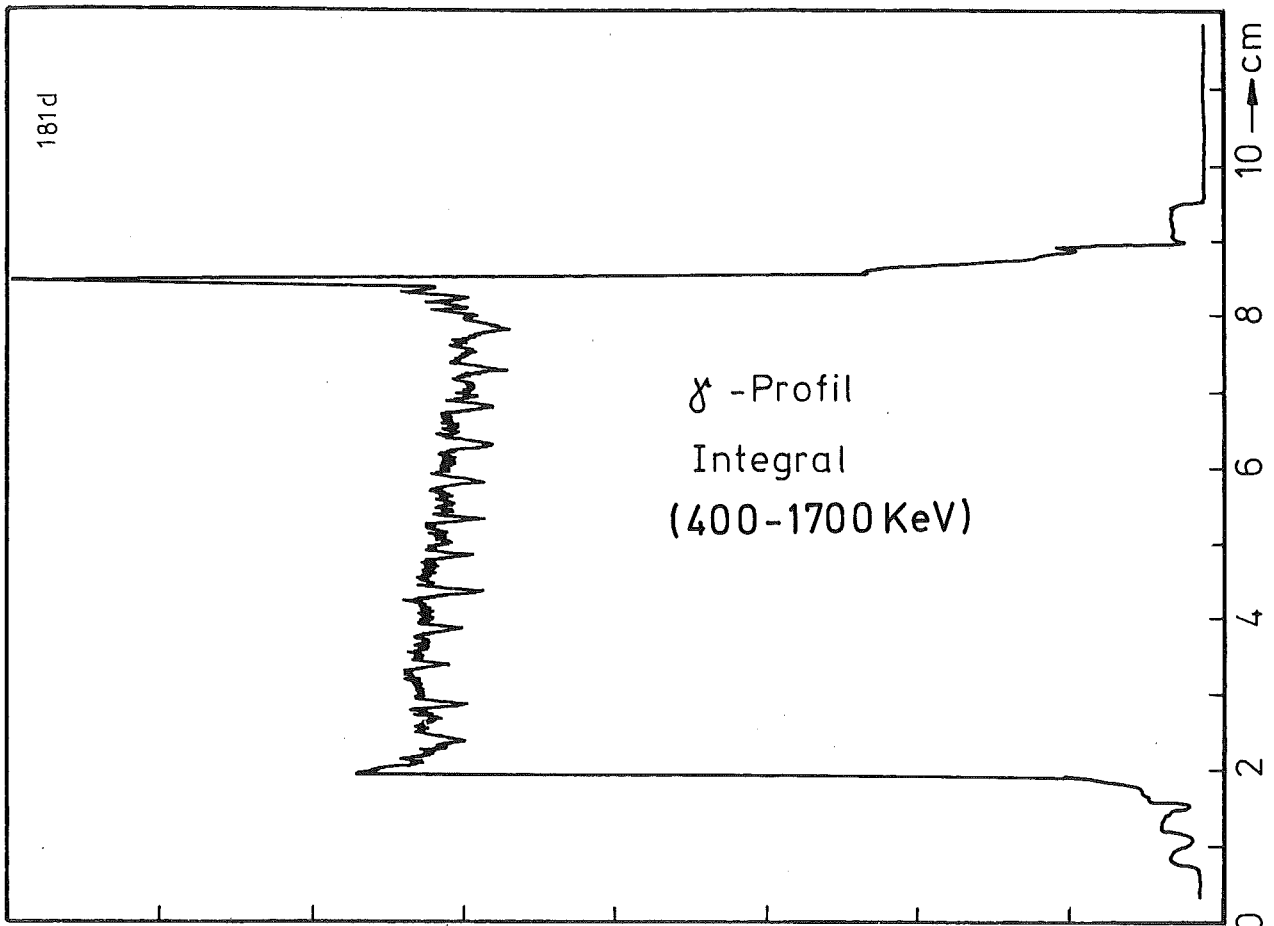
HZ-3a-47-4B1-1/7 200x

0,1 mm



HZ-3a-47-4B1-1/8 500x

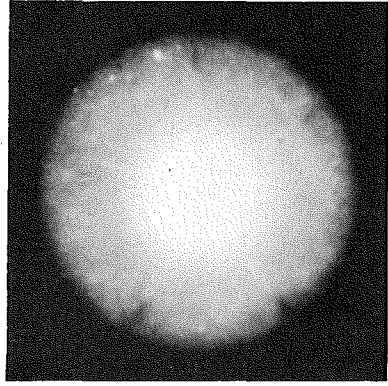
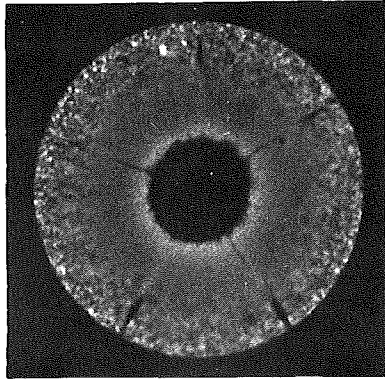
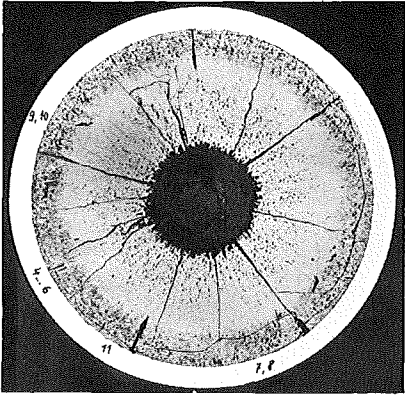
0,04 mm



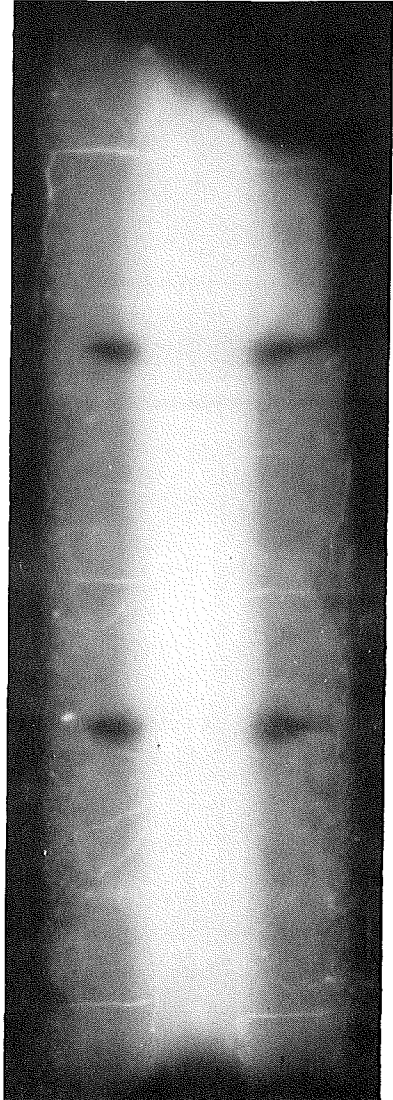
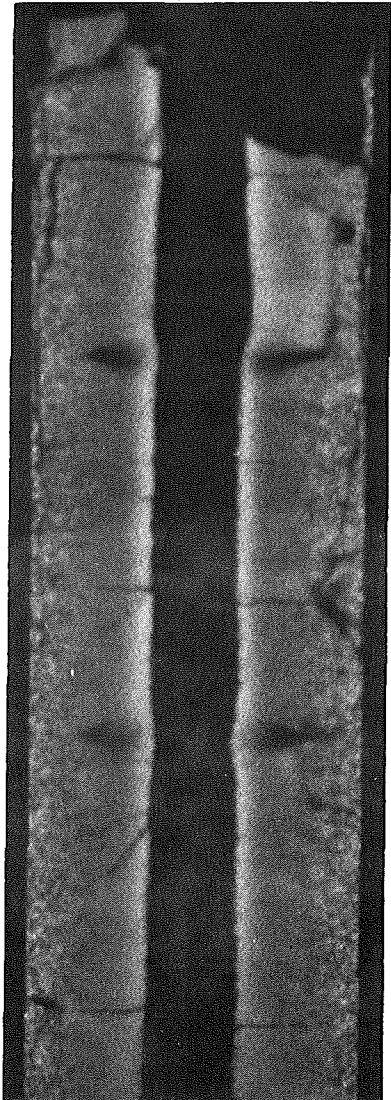
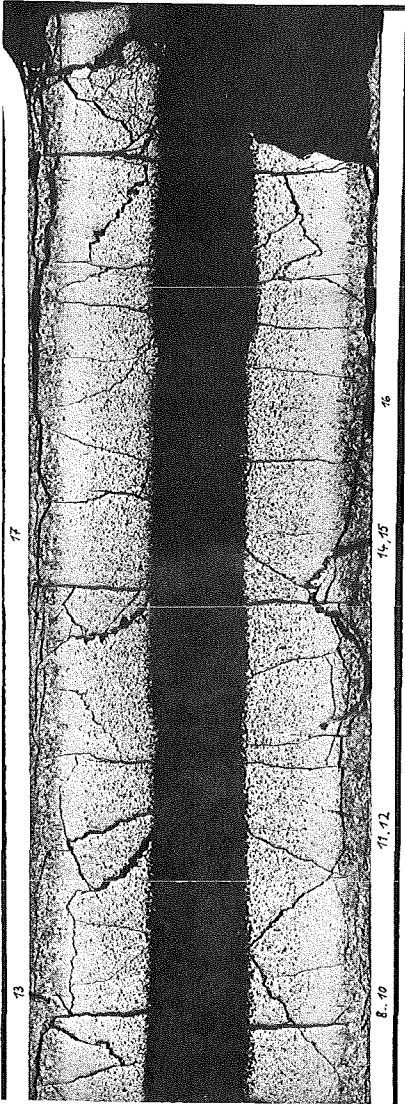
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-1

Brennstoff :

Form	:	Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung	:	UO ₂ -PuO ₂
Tablettendichte	:	90% th.D.

Hülle :

Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	6,0 mm
Wandstärke	:	0,38 mm

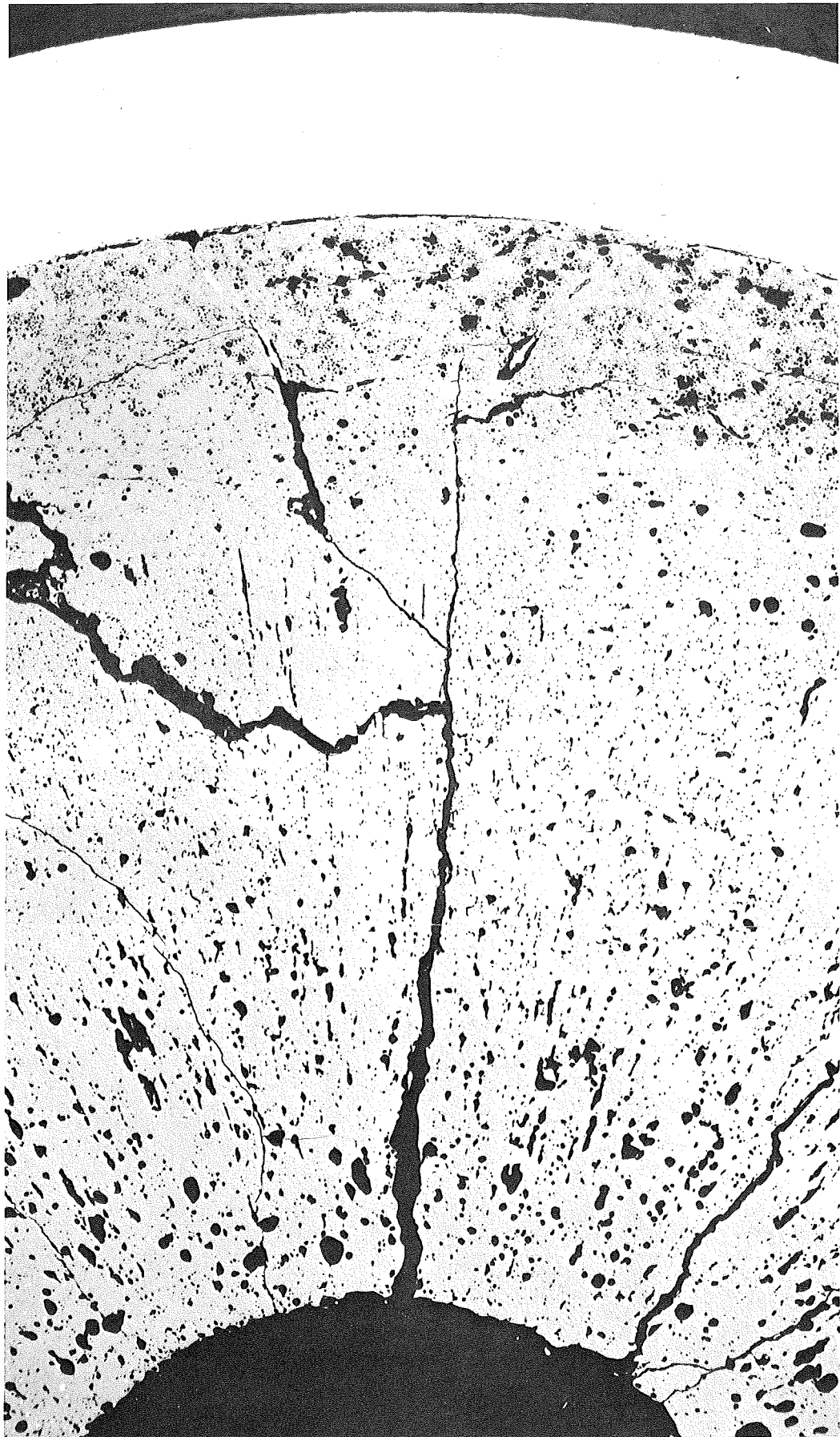
Geometrie :

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	0,070 mm
Schmierdichte	:	85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung	:	NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer	:	484,3 Volllasttage
Ende	:	21. 9. 70
Rechn. Abbrand mittl.	:	43,7 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl.	:	529 / 160 W/cm

-1/47 -
zu Prüfling 4B/9
A1



1/4

0,1 mm

-1/48-
zu Prüfling 4B/9
A2



200x

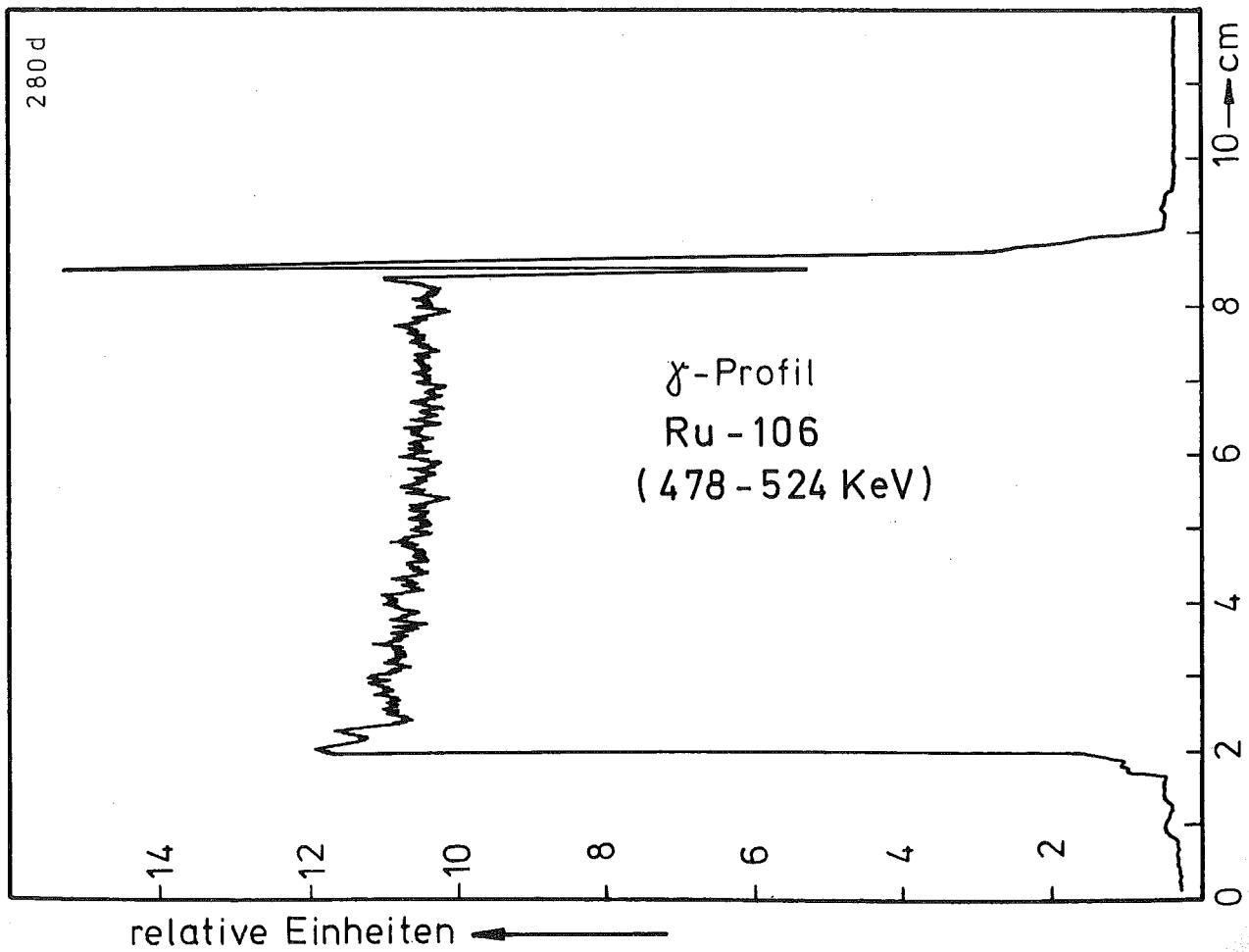
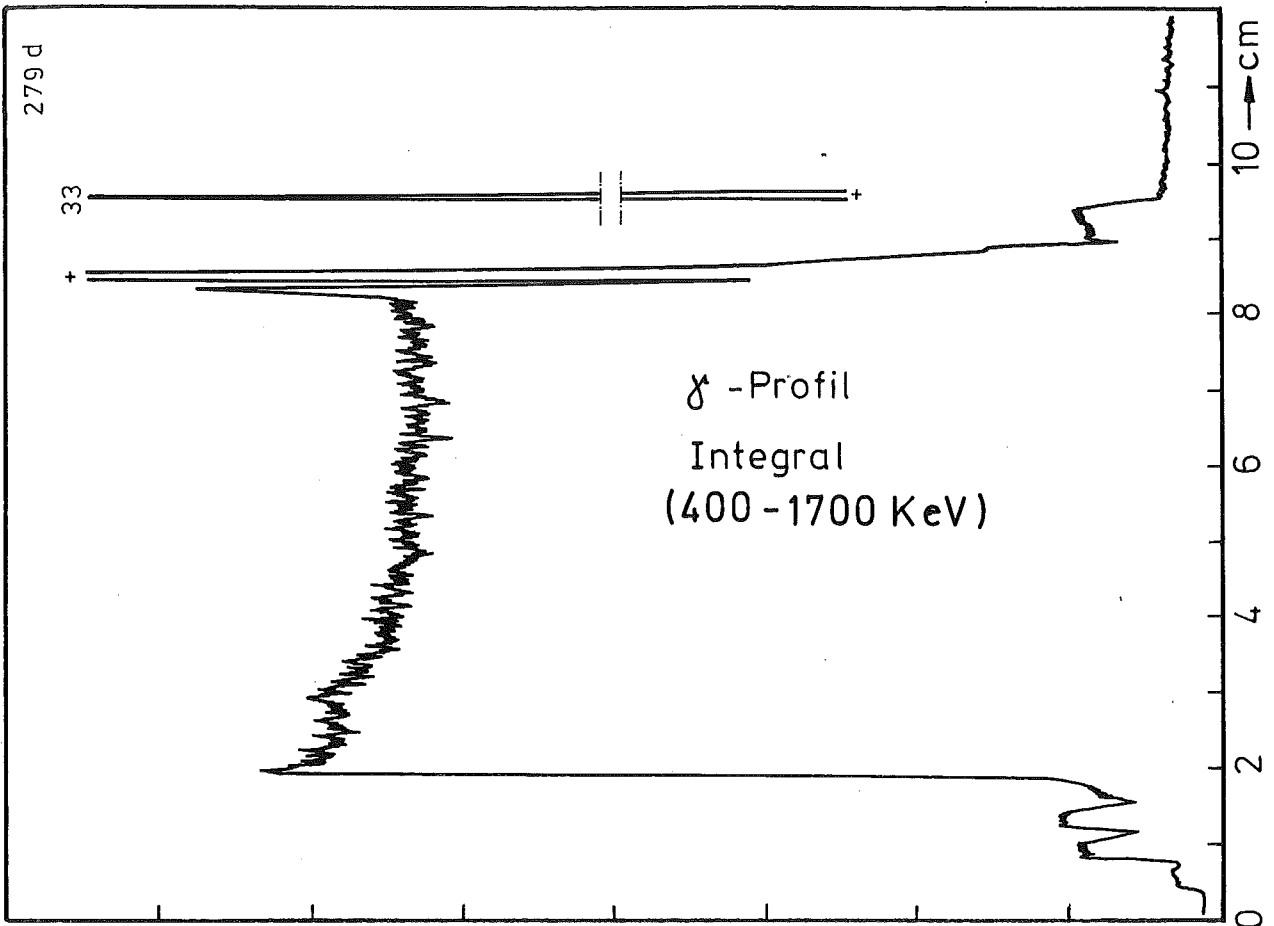
HZ-3a-48-4B/9-2/10



200x

HZ-3a-48-4B/9-2/12

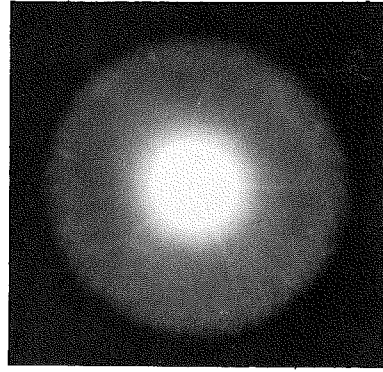
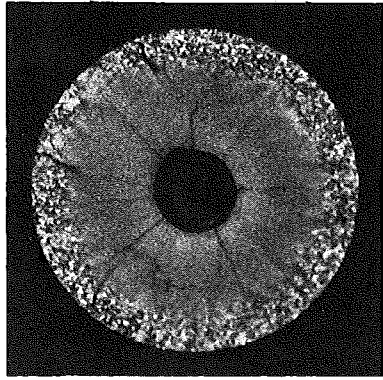
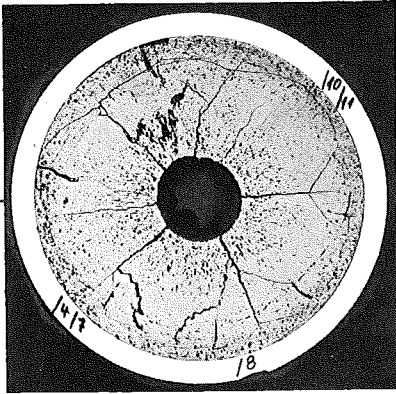
0,1 mm



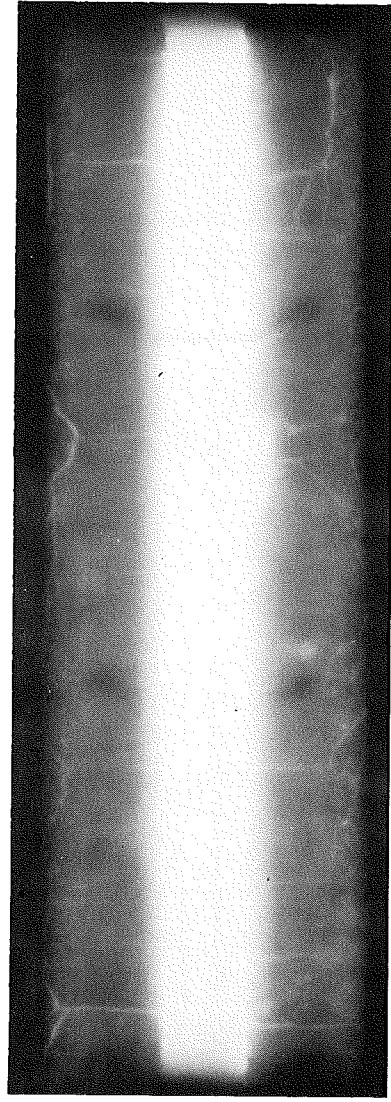
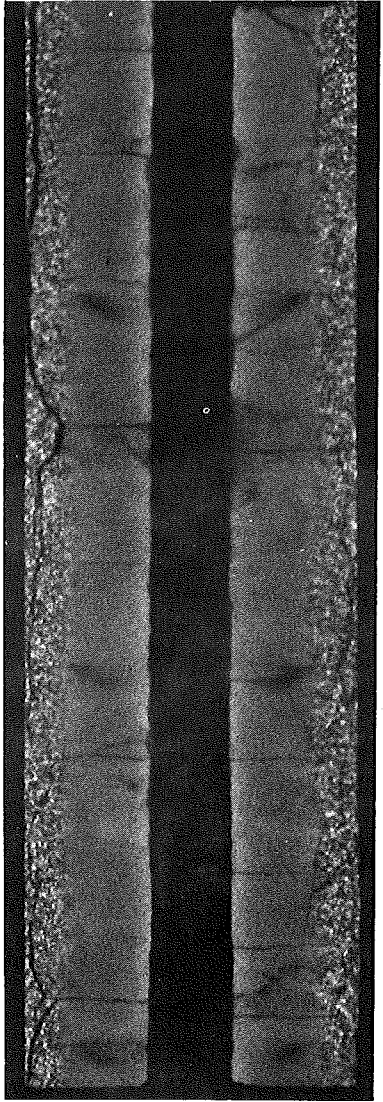
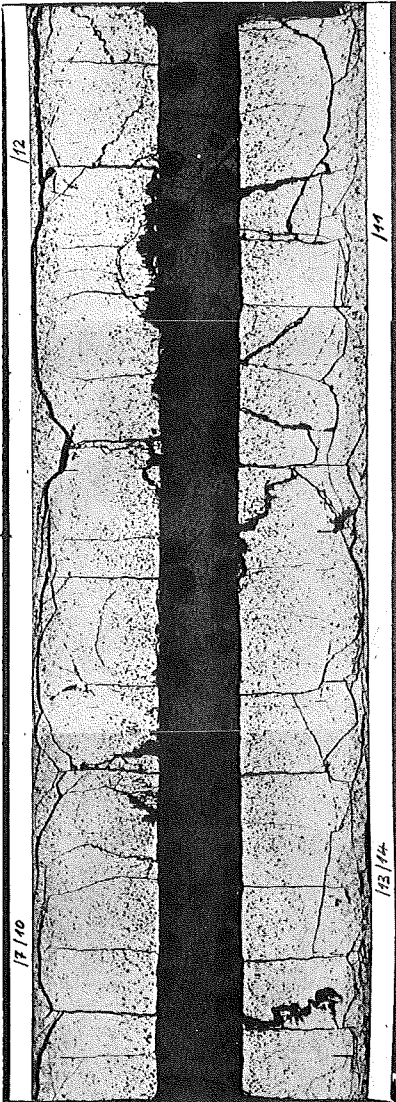
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-9

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

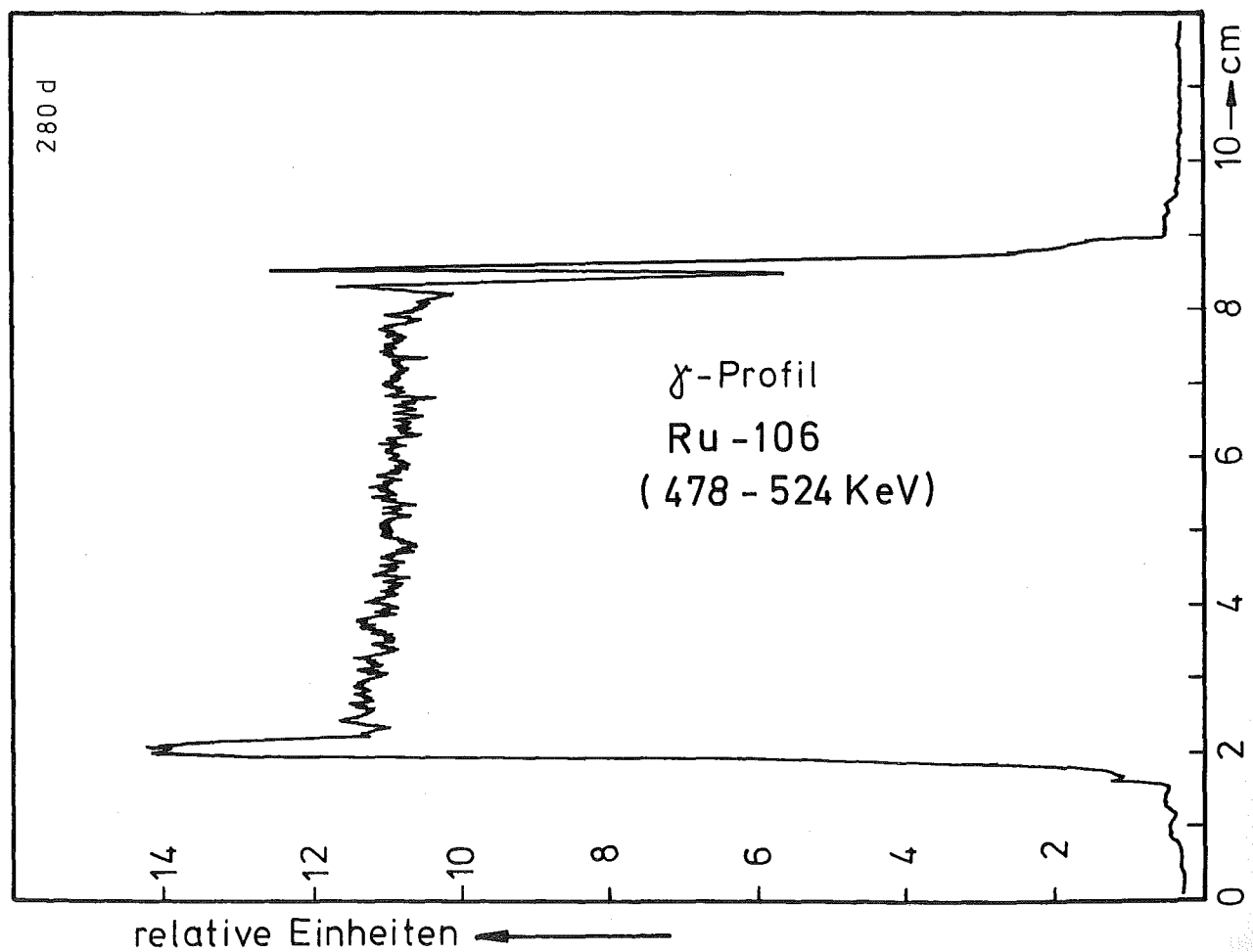
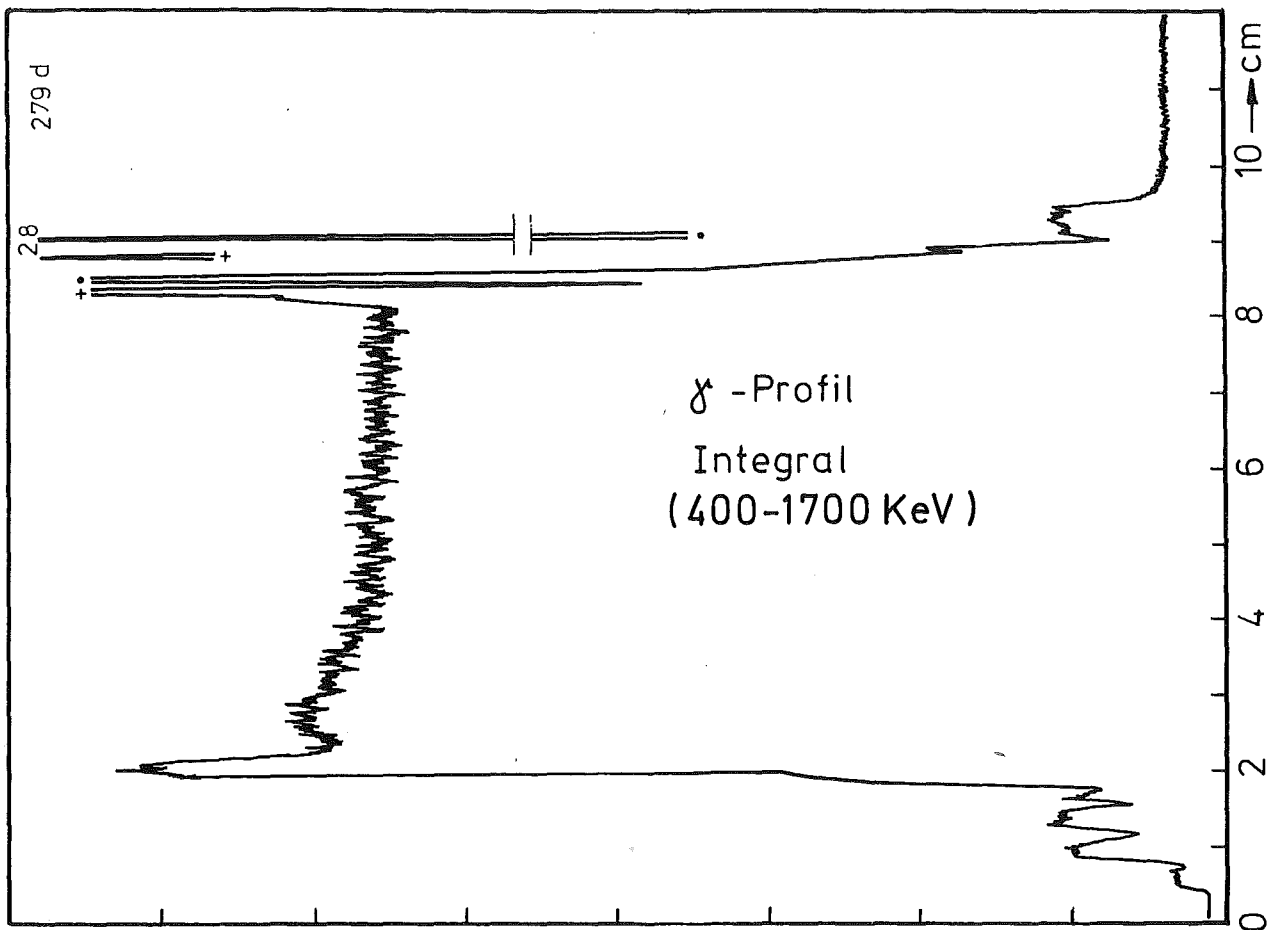
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

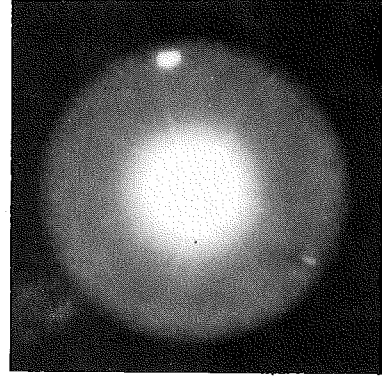
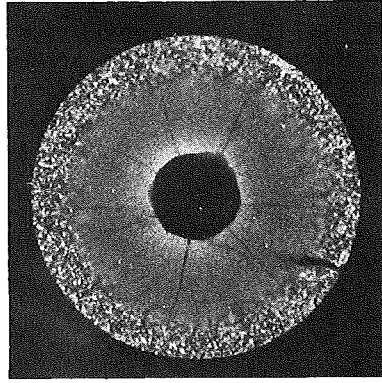
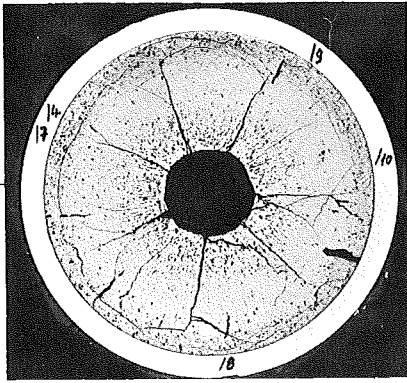
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 79,1 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 424 / 333 W/cm



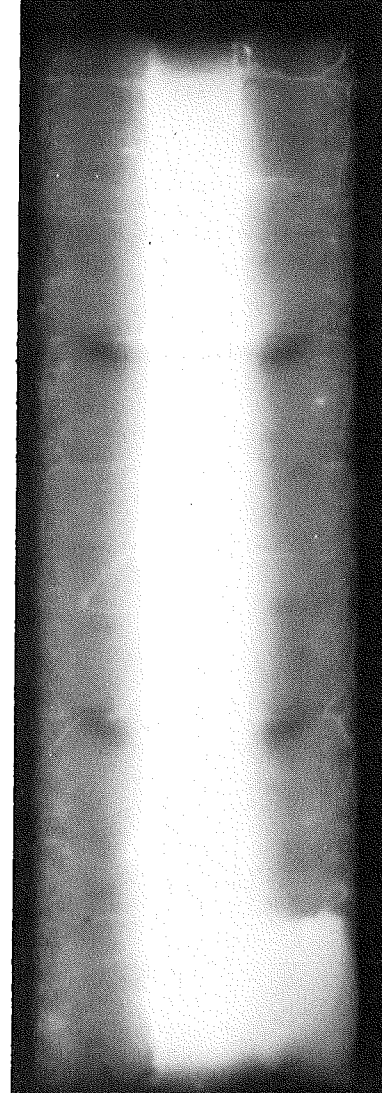
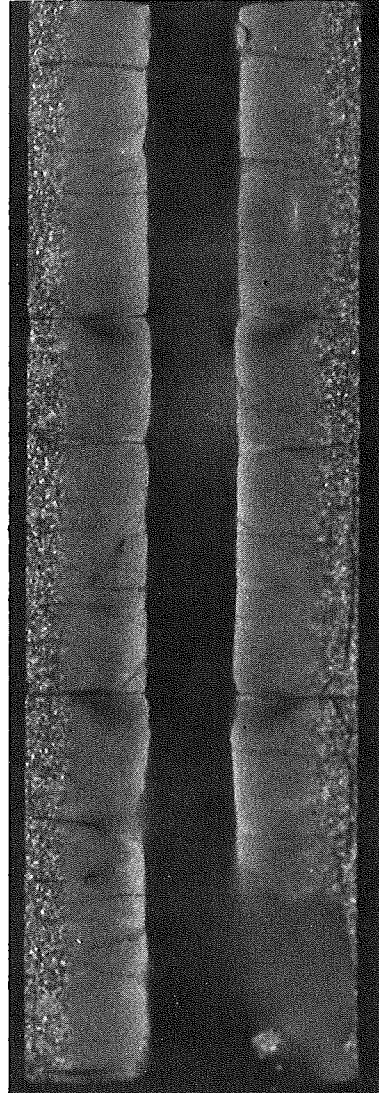
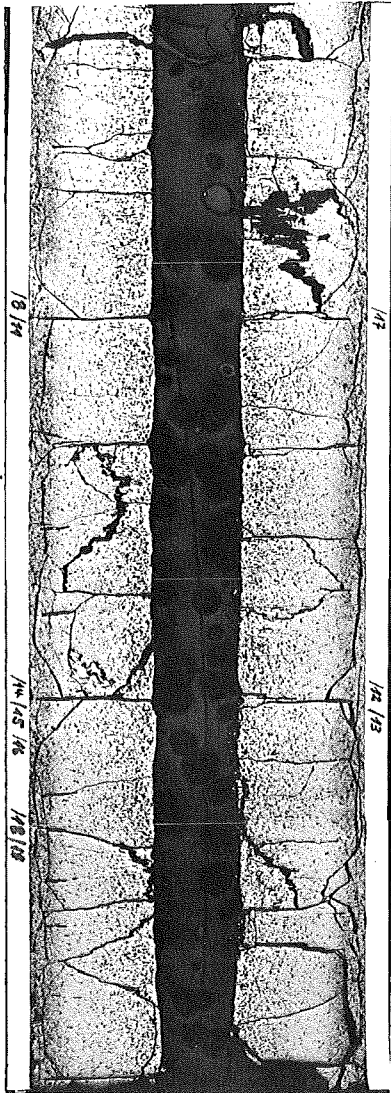
A

B

C

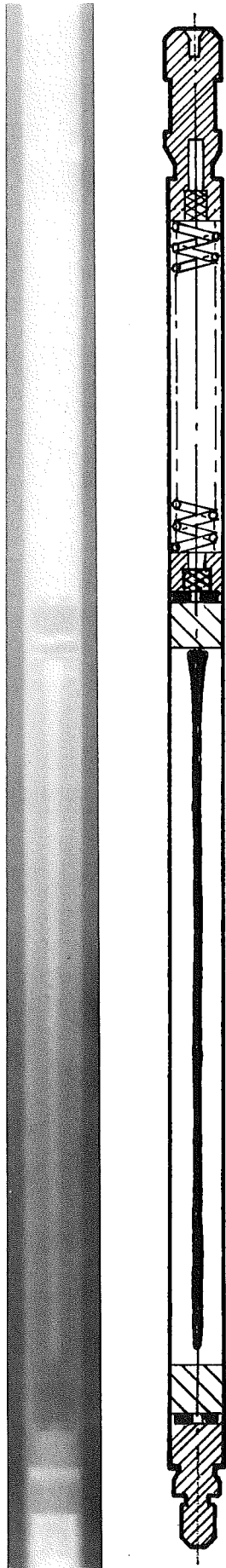


1



2

1mm



Prüfling 4B-8

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

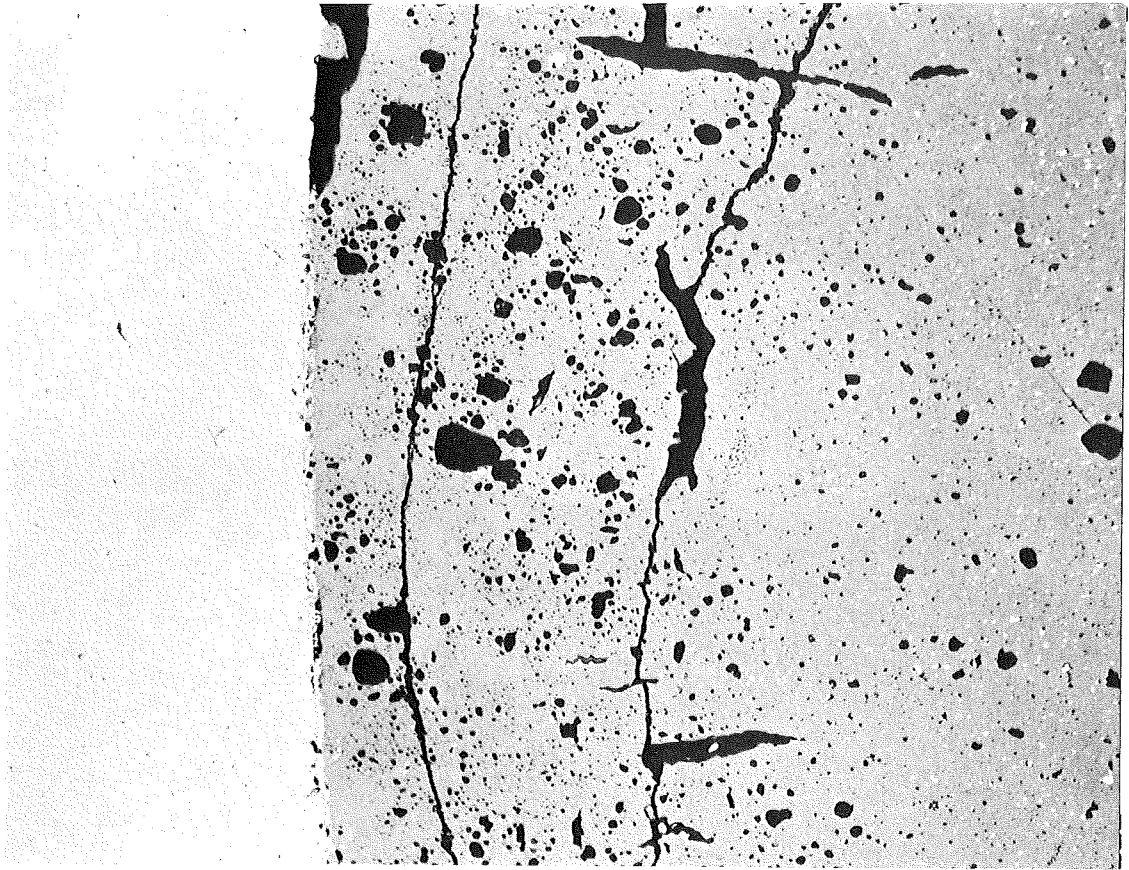
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

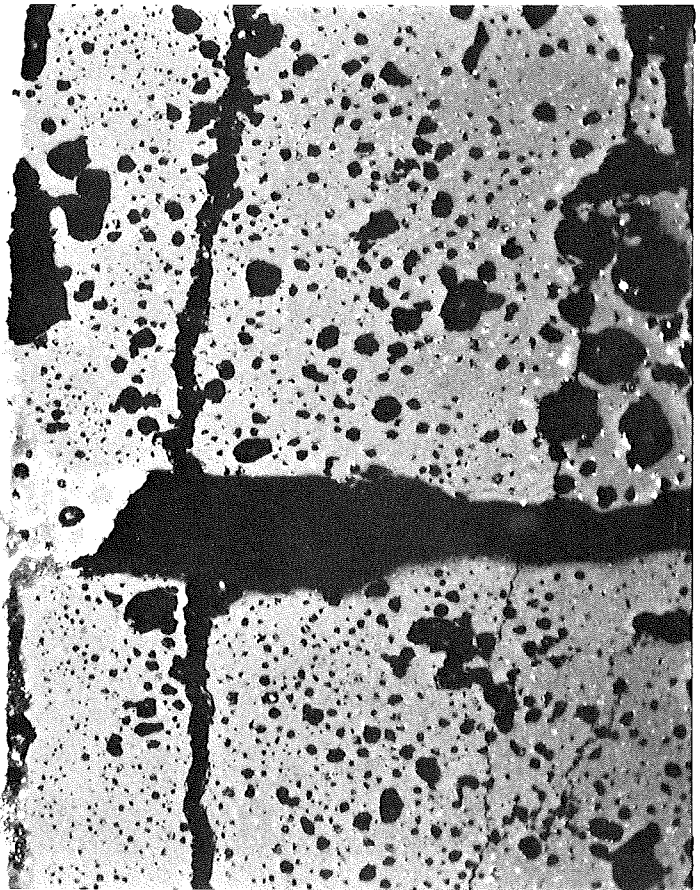
Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Volllasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 71,5 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 424 / 301 W/cm



HZ-3a-48-4B/7-1/7 200x

0,1 mm



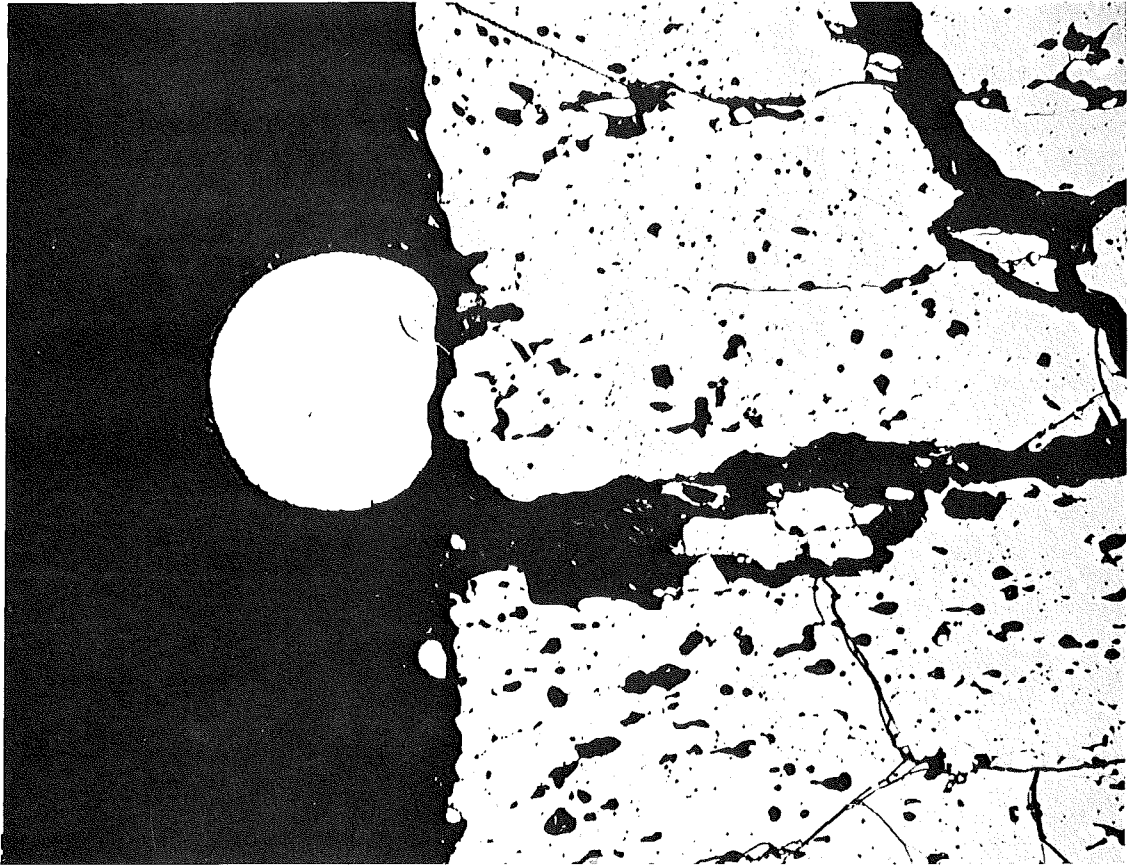
HZ-3a-48-4B/7-1/9 500x

0,04 mm

- I/54 -
zu Prüfling 4B/7
A2

HZ-3a-48-4B/7-2/12

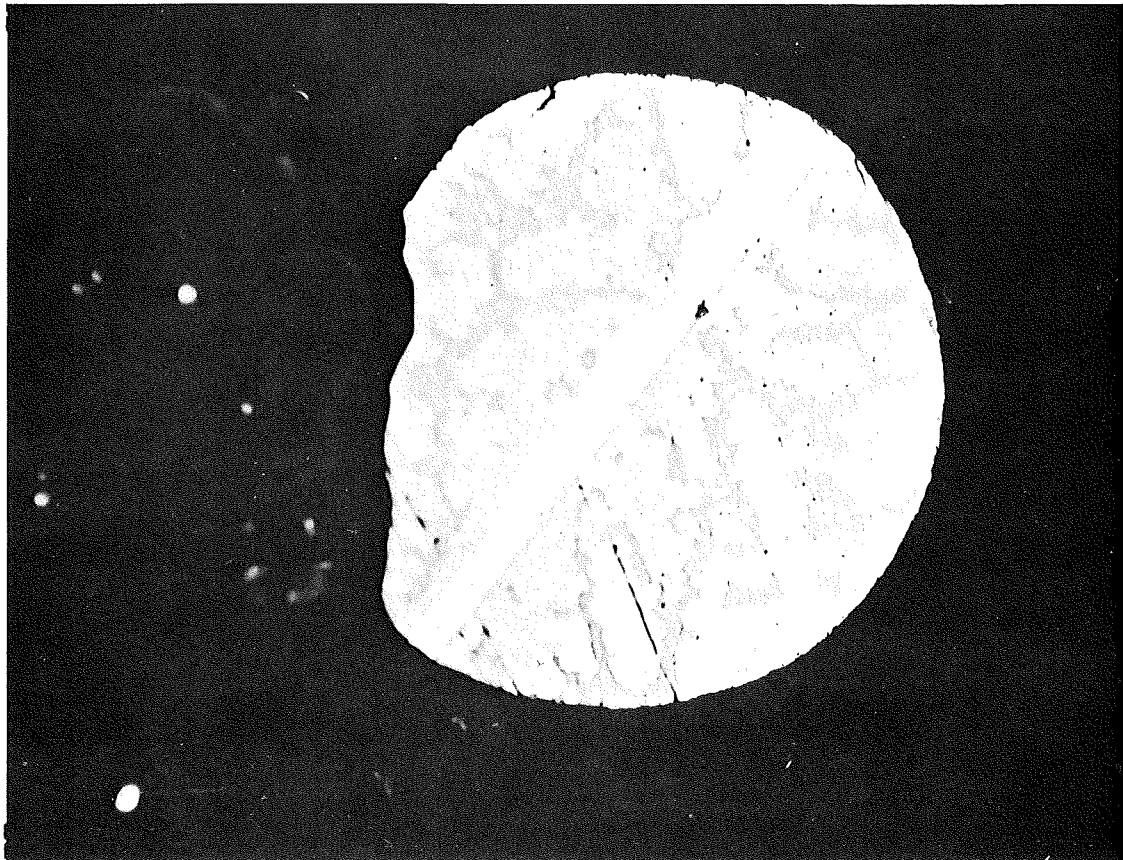
200x



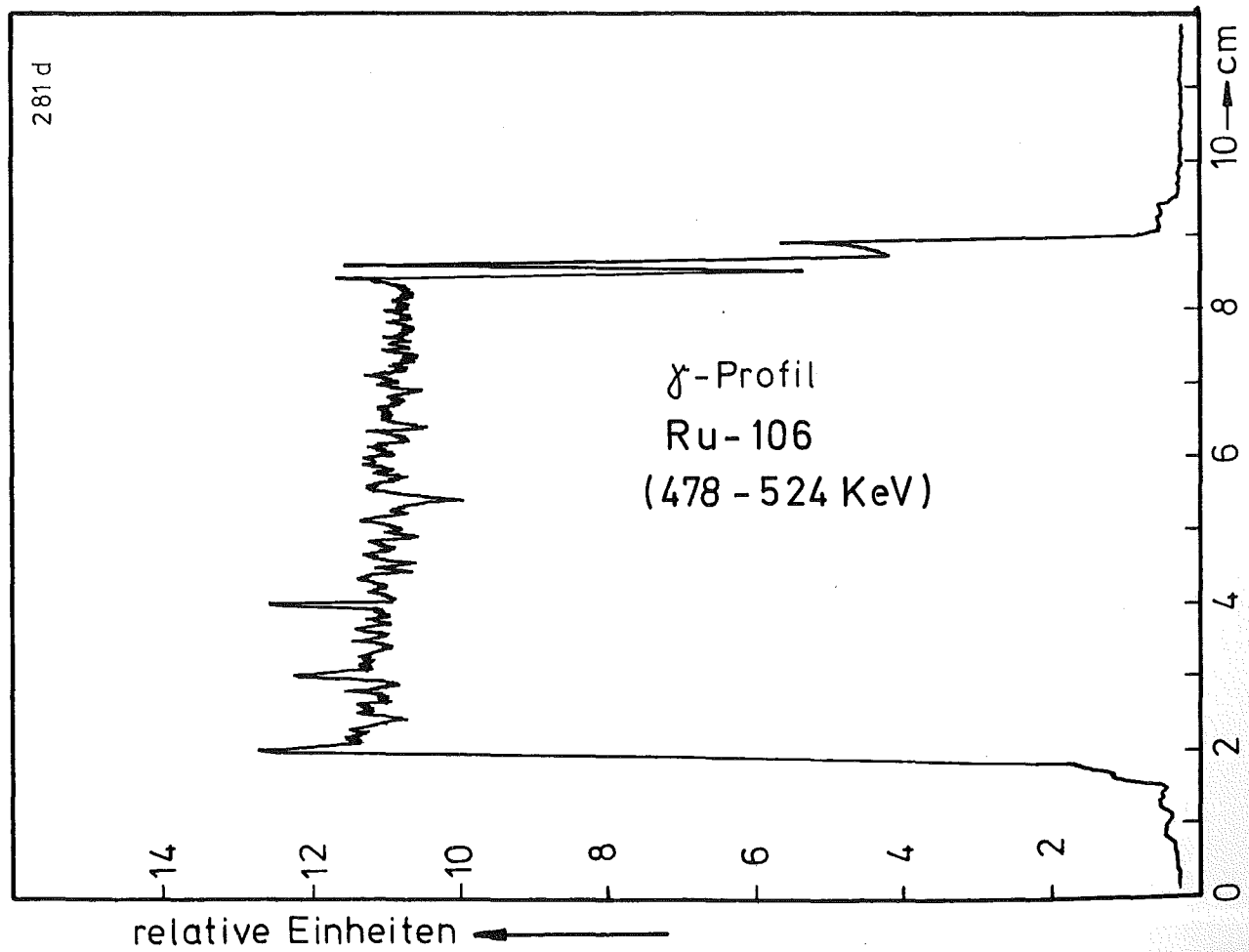
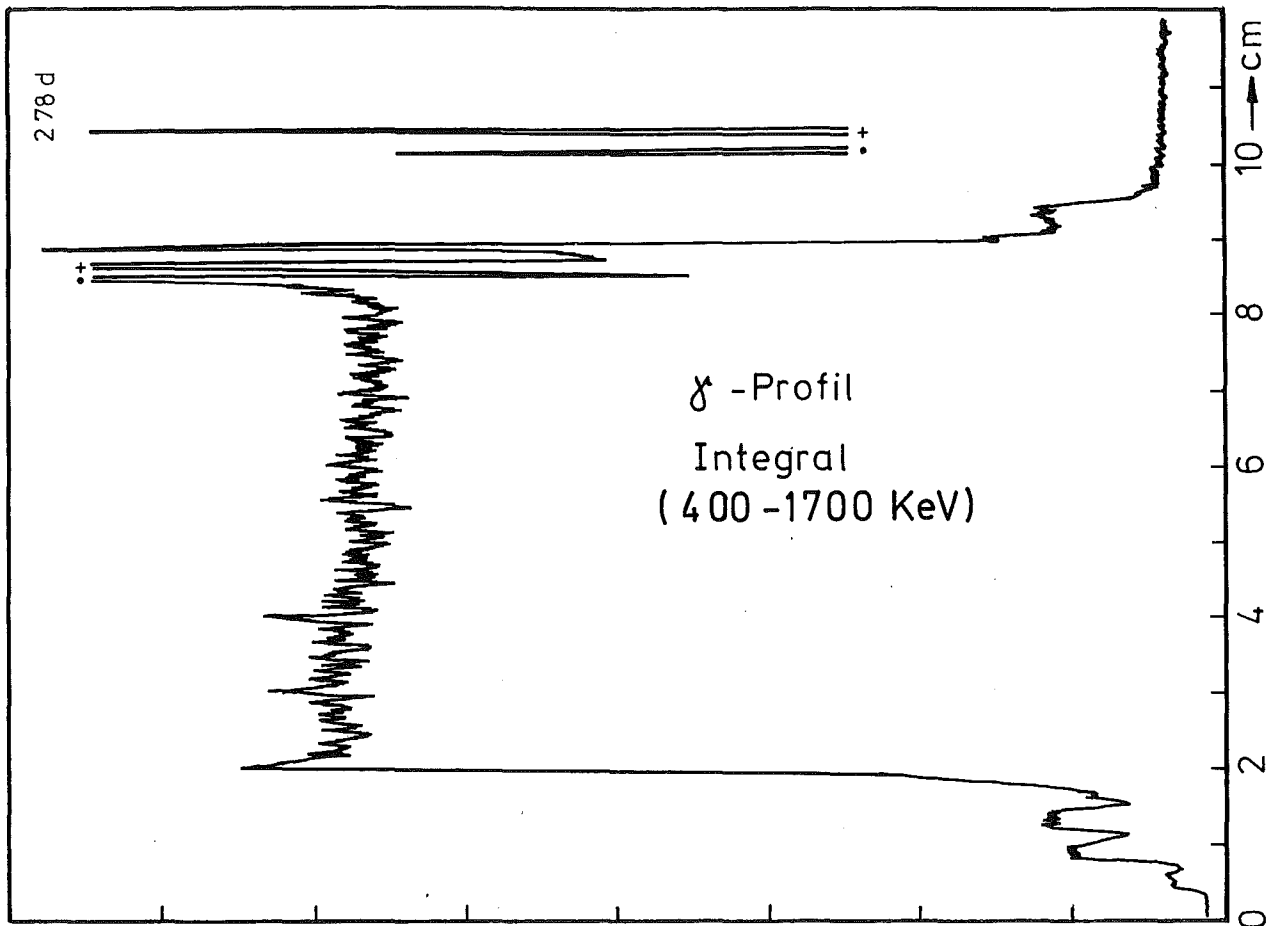
0,1 mm

HZ-3a-48-4B/7-2/13

500x



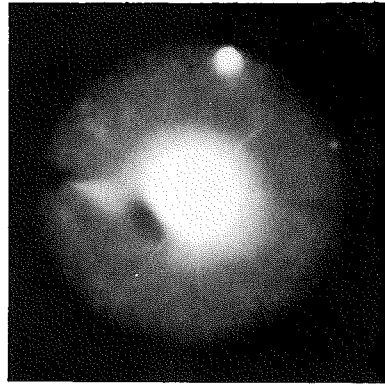
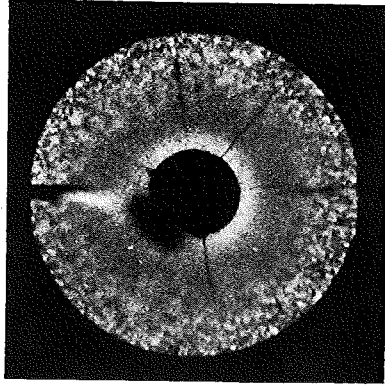
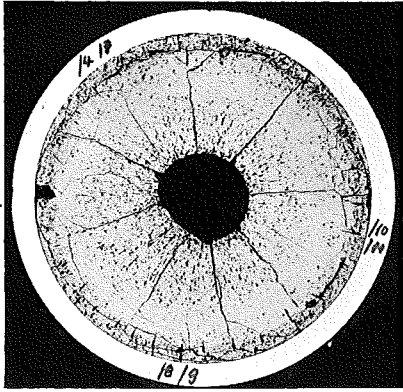
0,04 mm



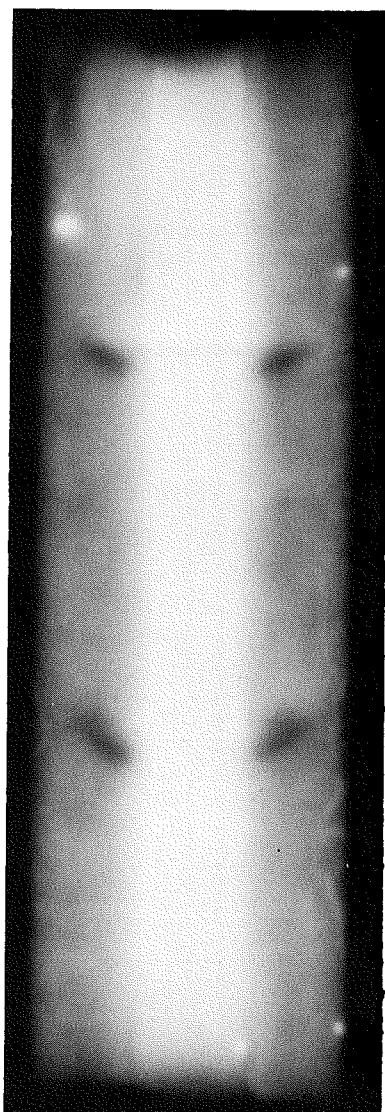
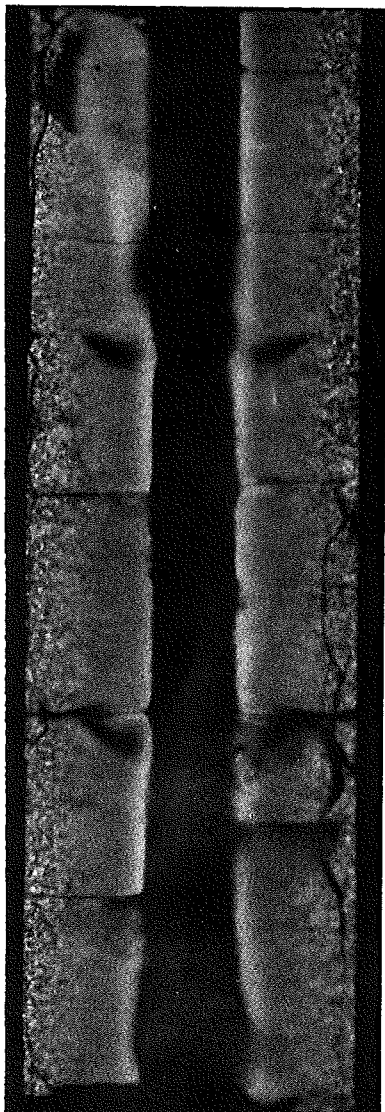
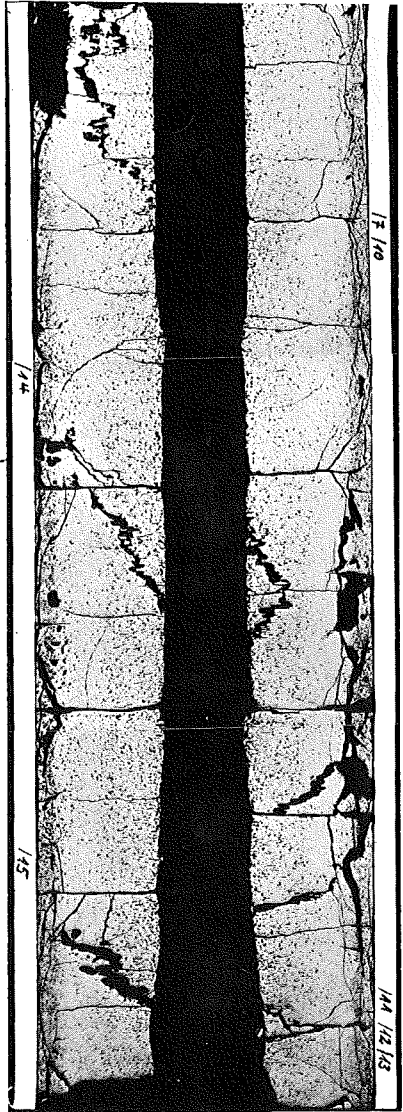
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-7

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

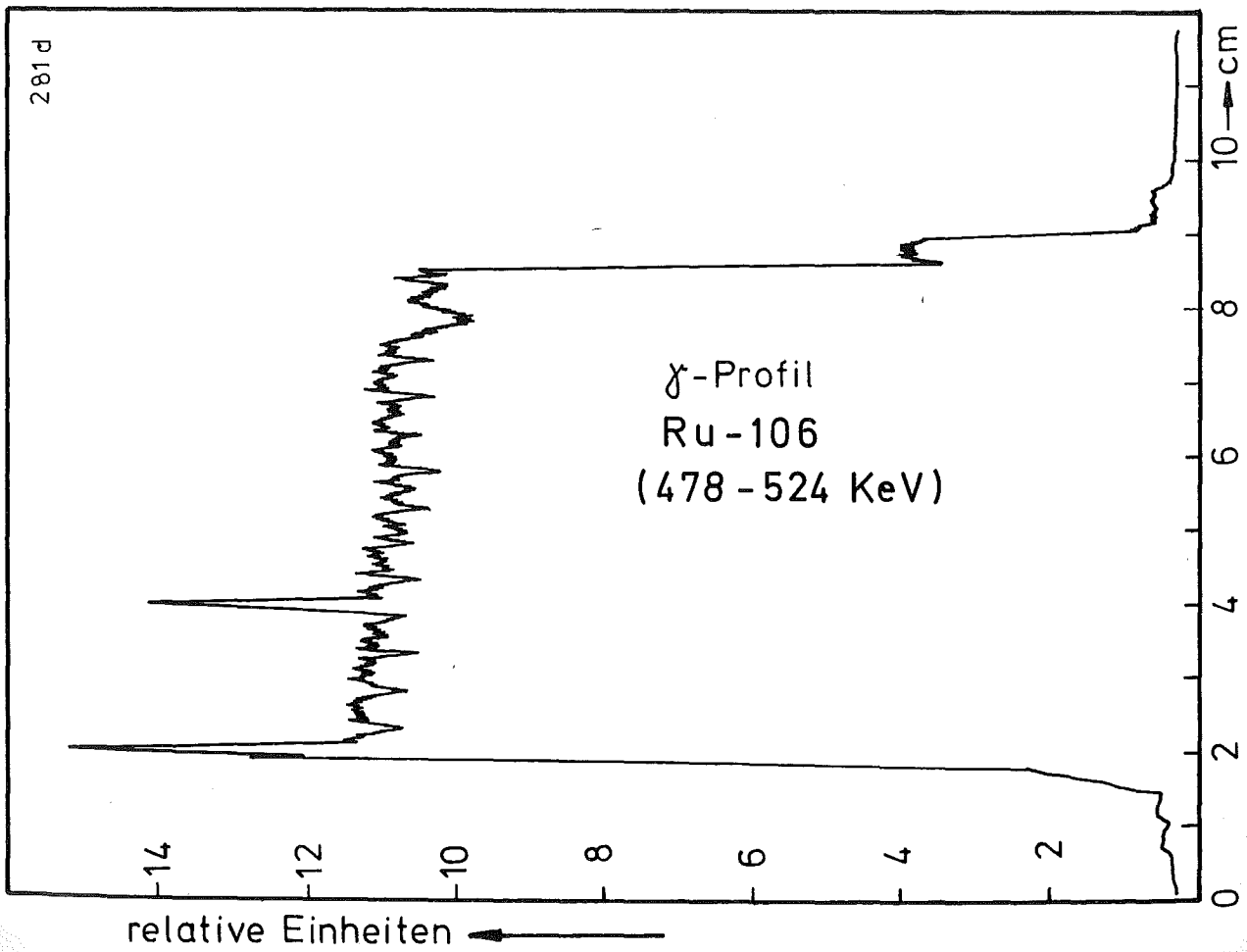
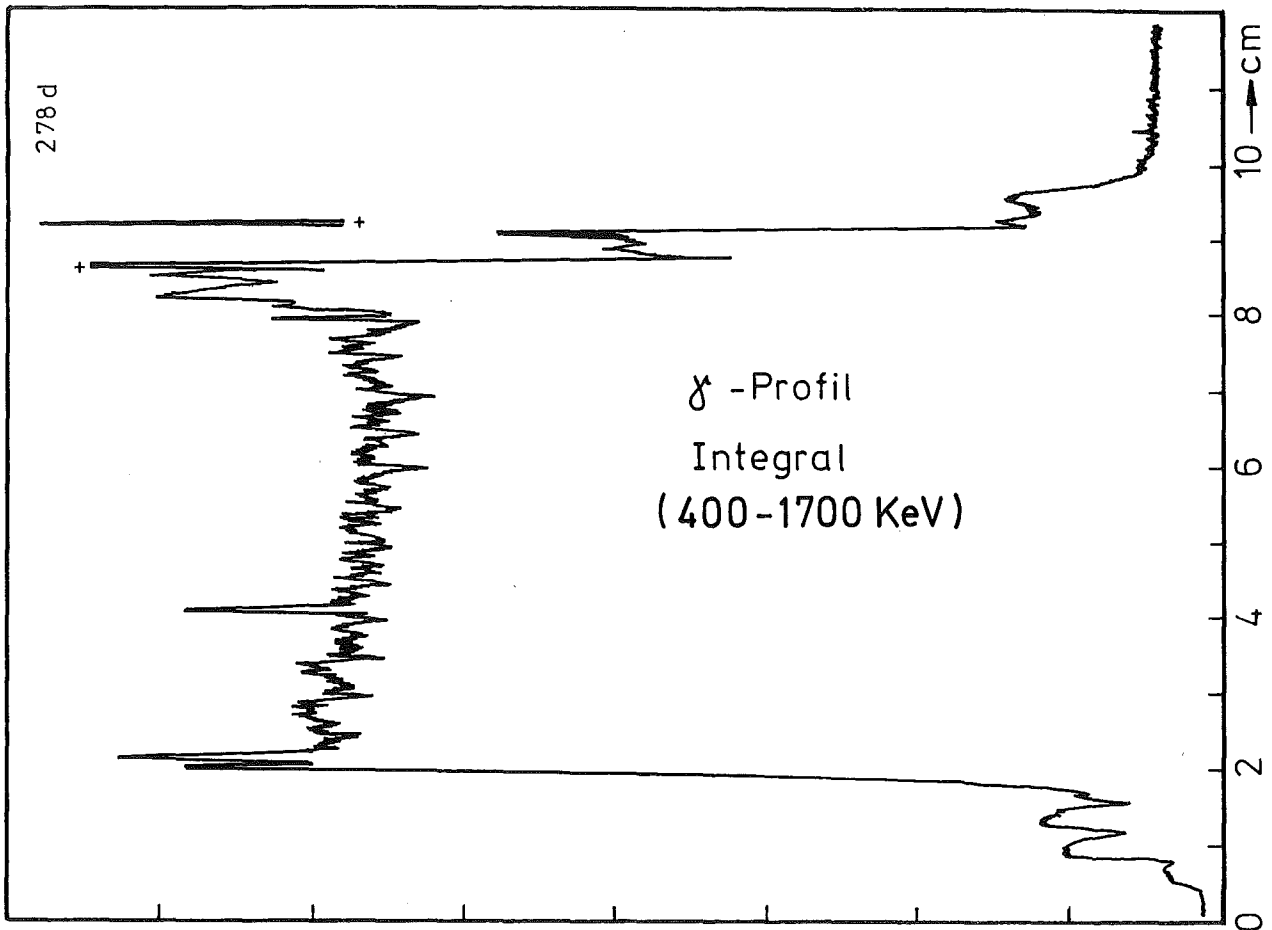
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

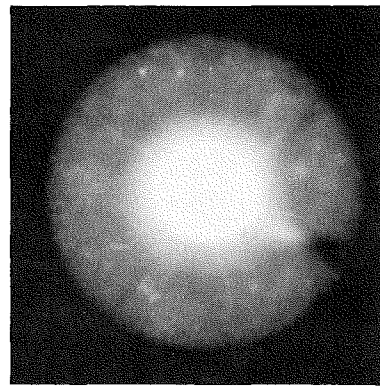
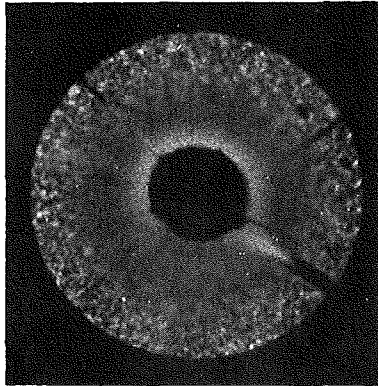
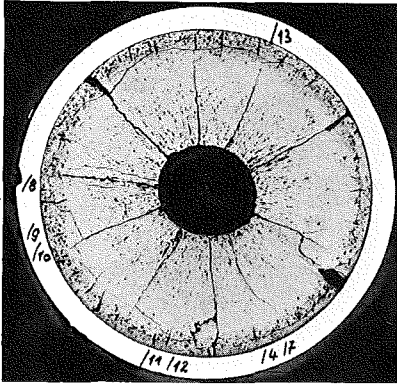
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 76,4 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 450 / 321 W/cm



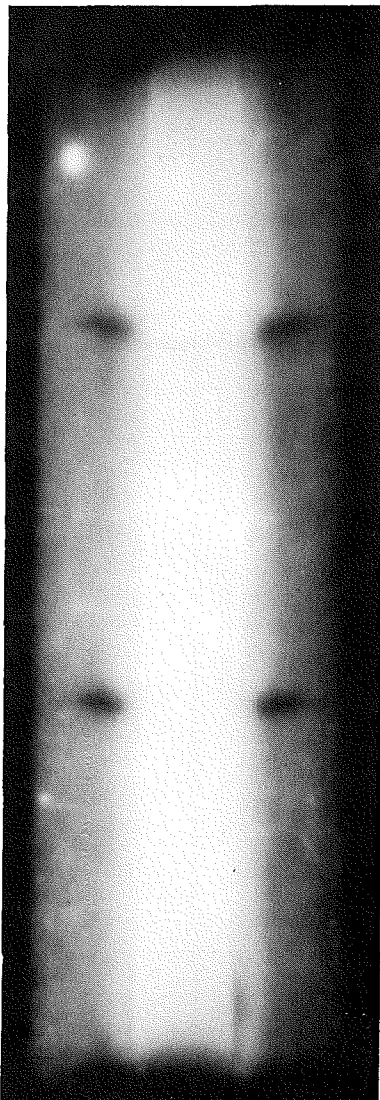
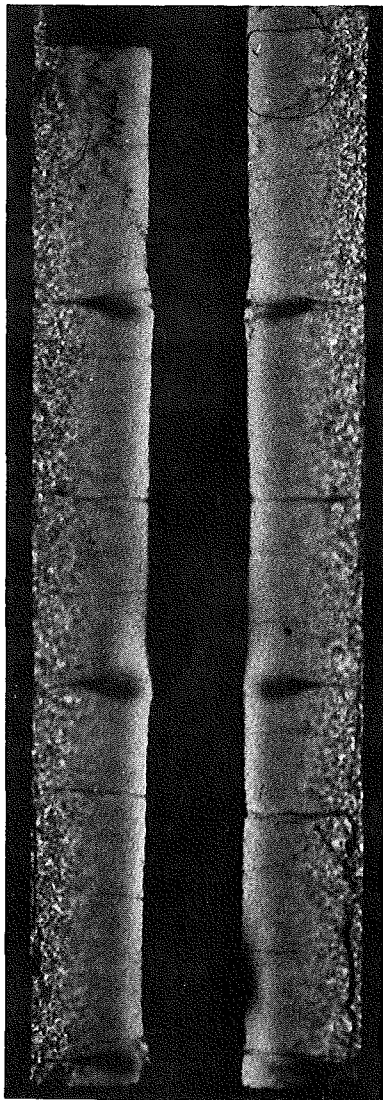
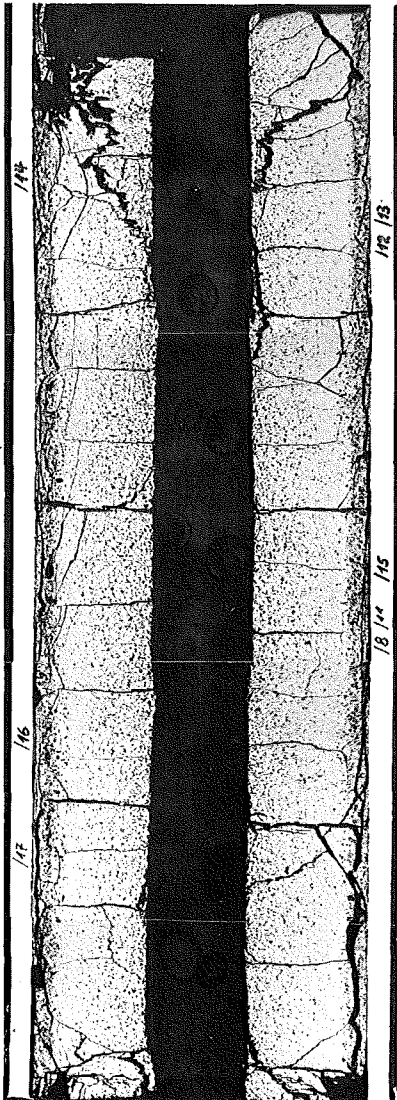
A

B

C



1



2

1 mm



Prüfling 4B-5

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

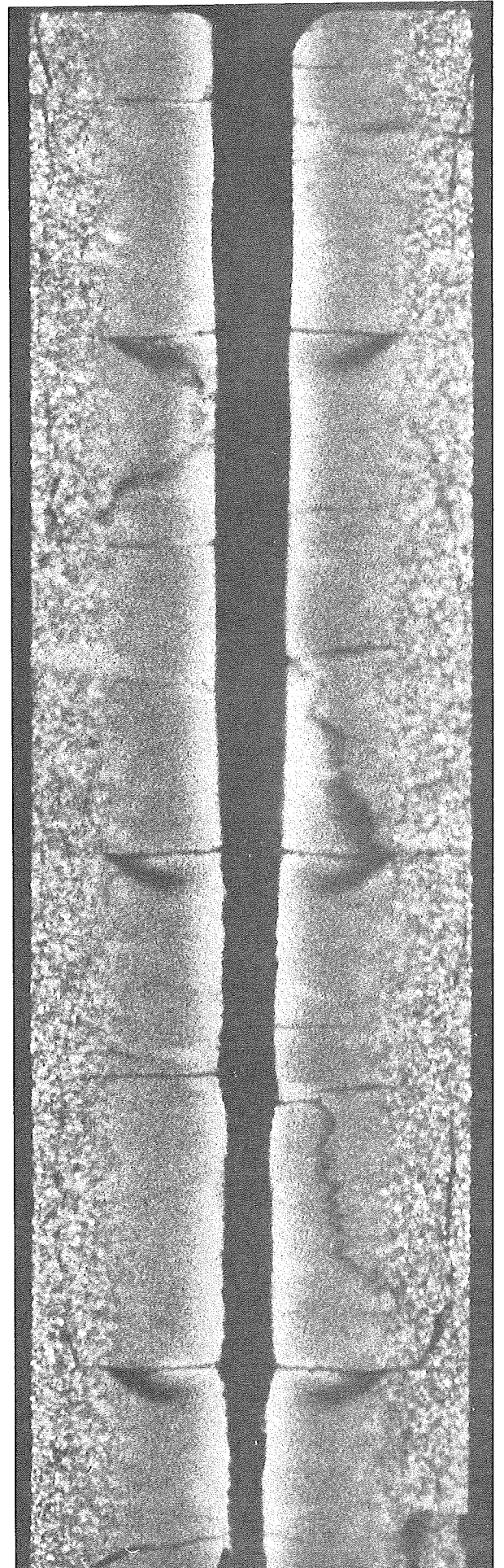
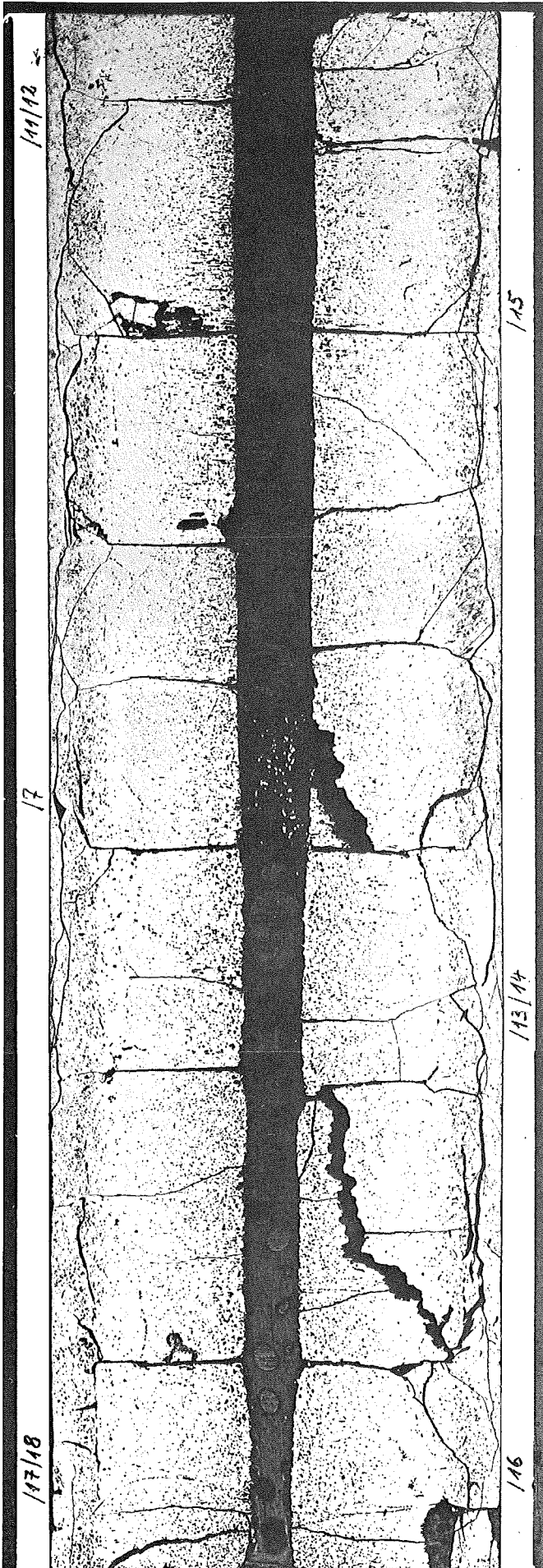
Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 425,3 Vollasttage
Ende : 13. 7. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 69,1 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 466 / 288 W/cm

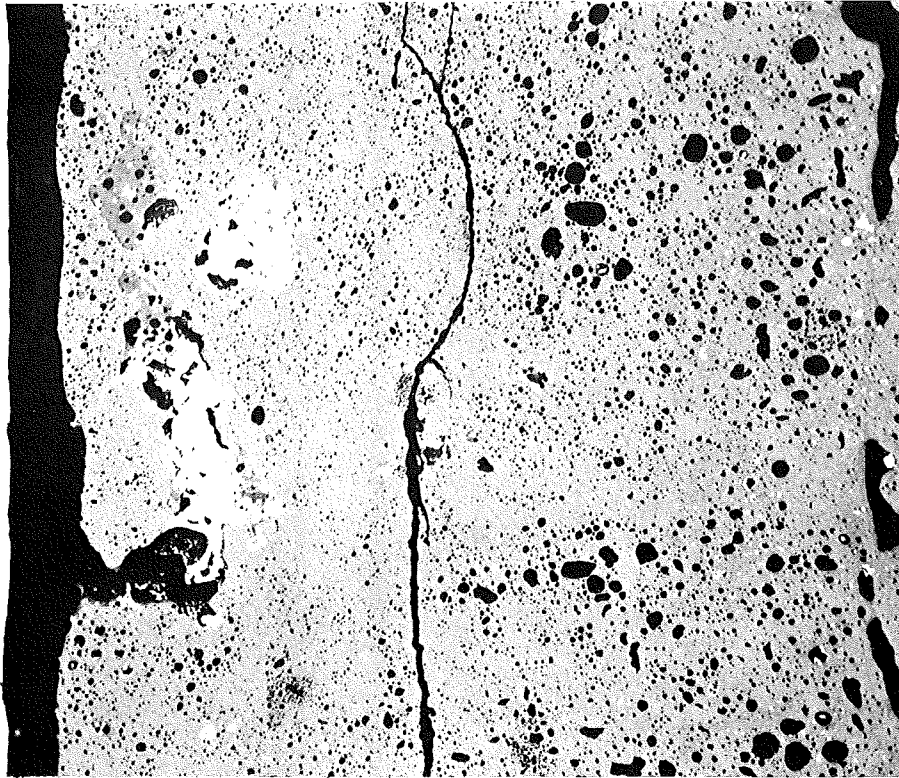
A2

B2



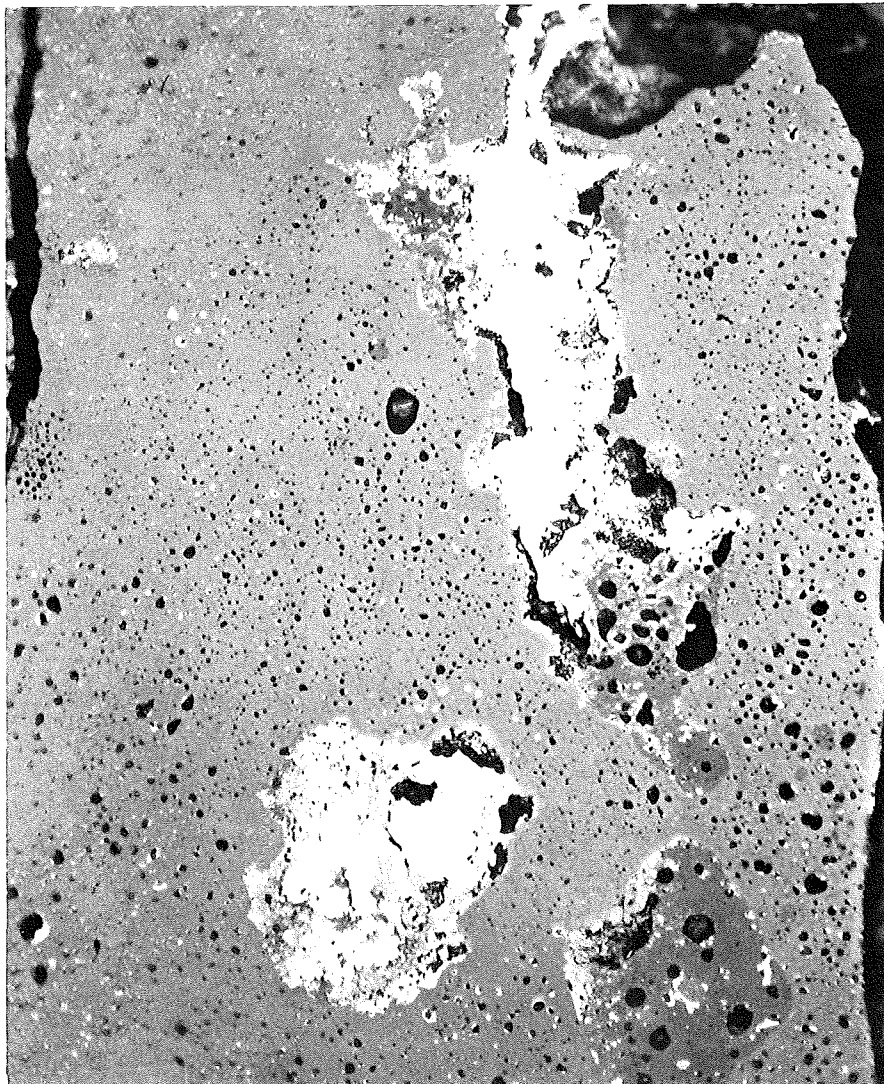
1 mm

-1/60-
zu Prüfling 4B/11
A2



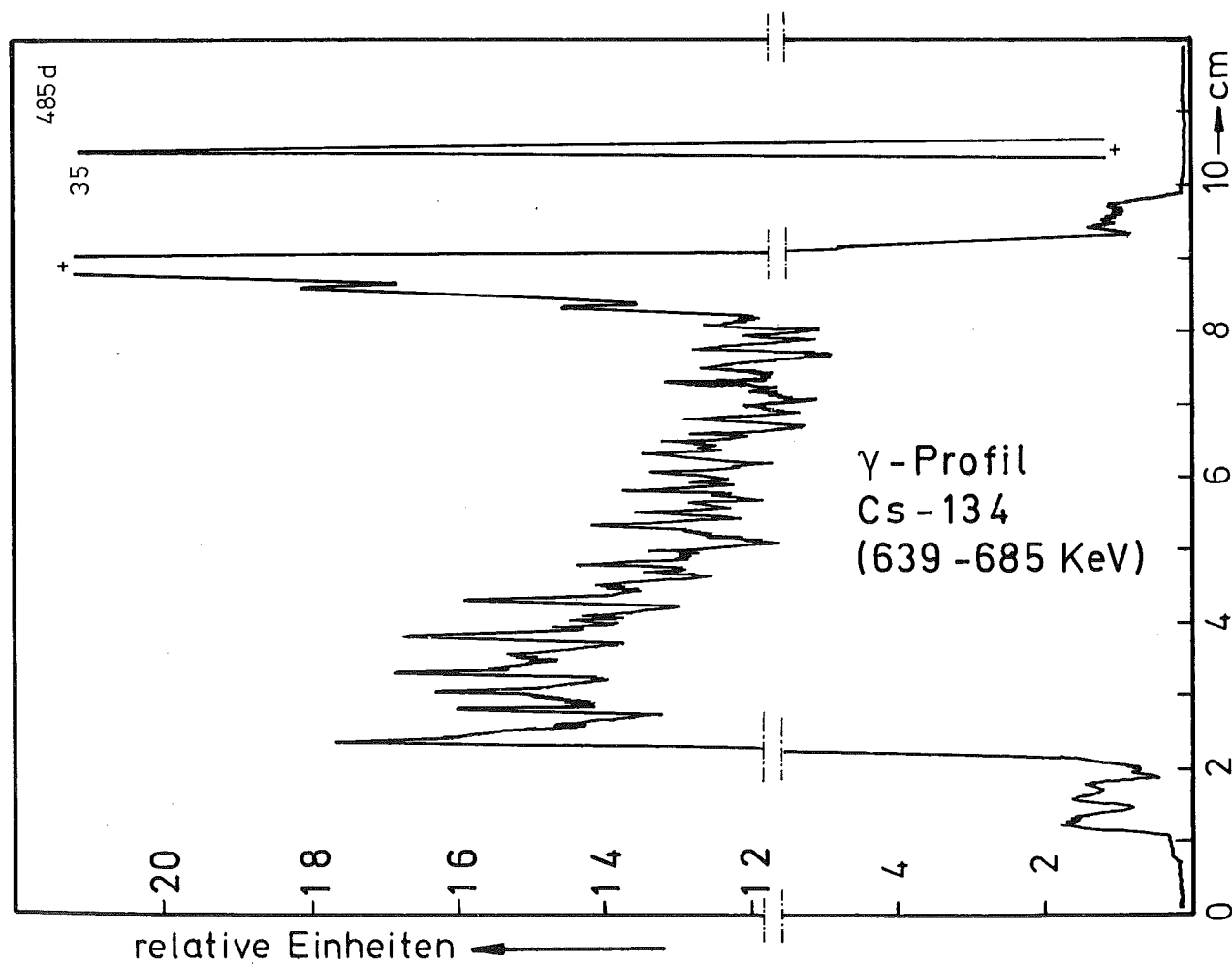
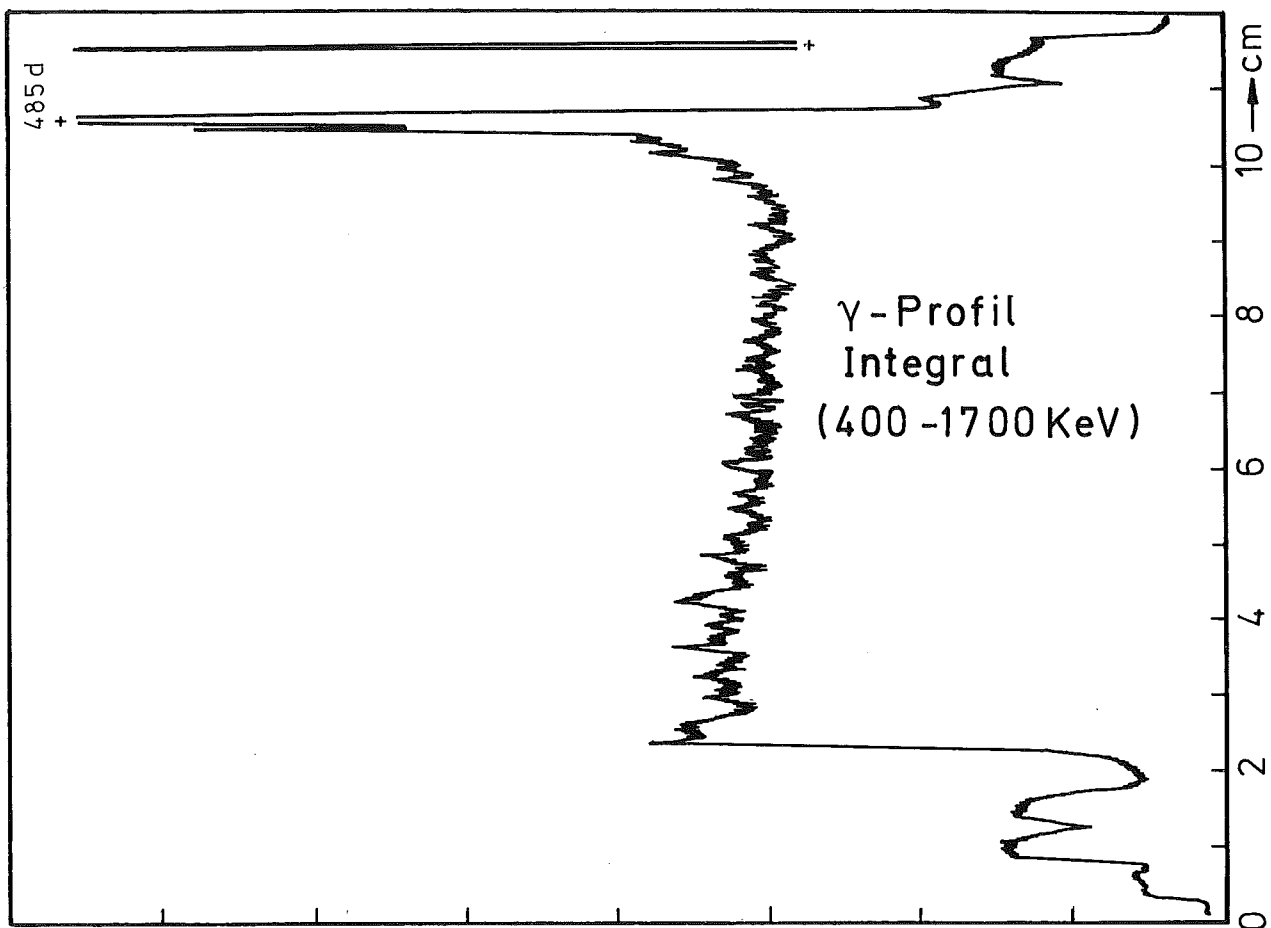
HZ-3a-49-4B/11-2/17 200x

0,1mm



0,04 mm

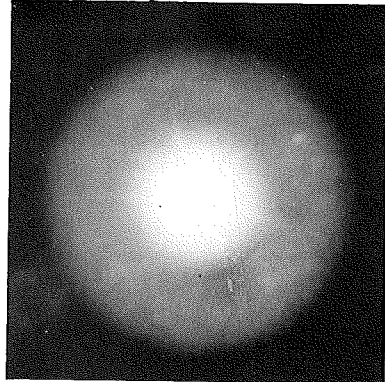
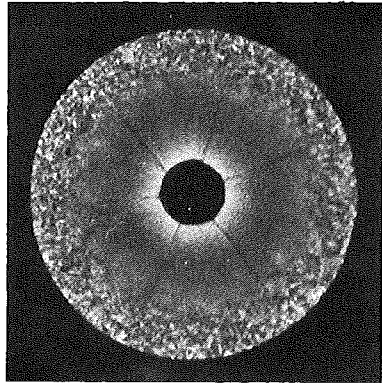
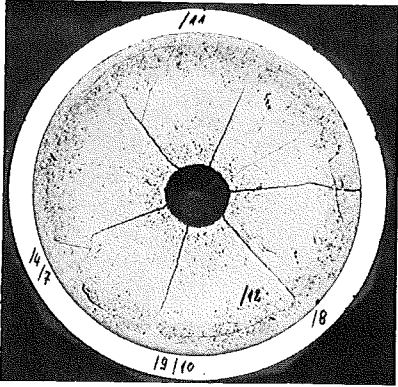
HZ-3a-49-4B/11-2/18 500x



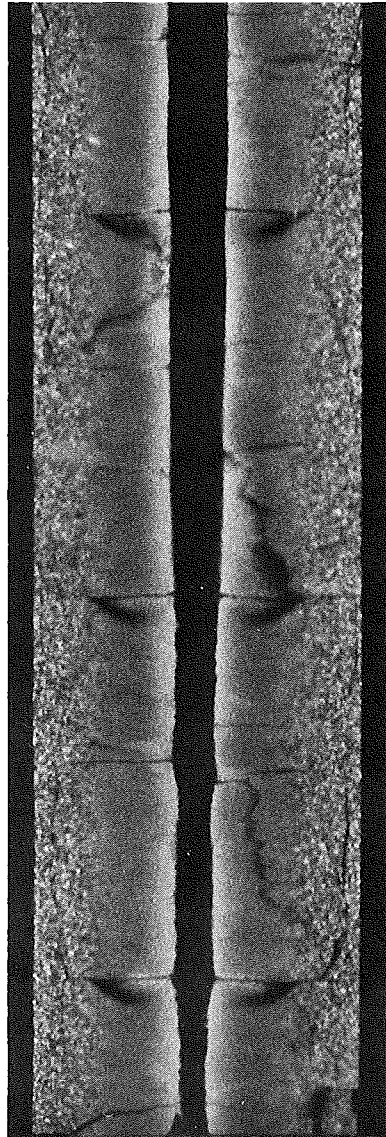
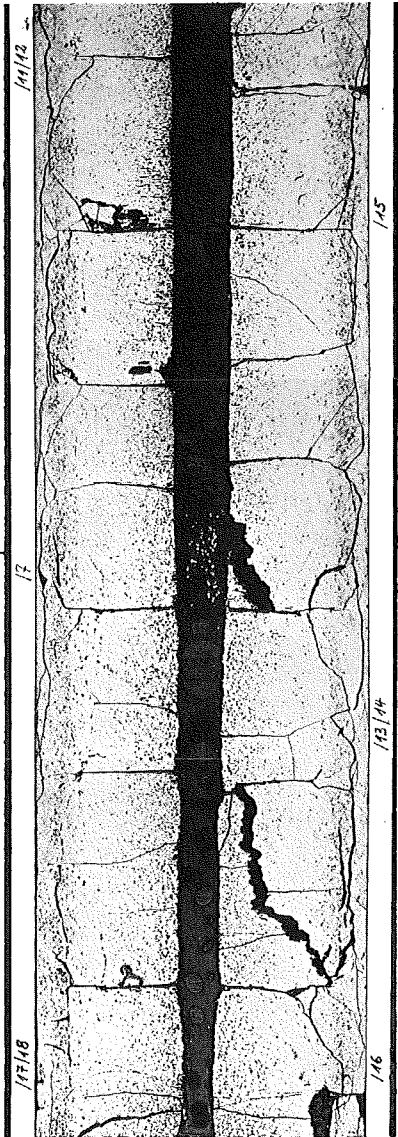
A

B

C



1



2

1 mm



Prüfling 4B-11

Brennstoff :

Form	: Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung	: UO_2 - PuO_2
Tablettendichte	: 90% th.D.

Hülle :

Material	: 1.4988
Aussendurchmesser	: 6,00 mm
Wandstärke	: 0,38 mm

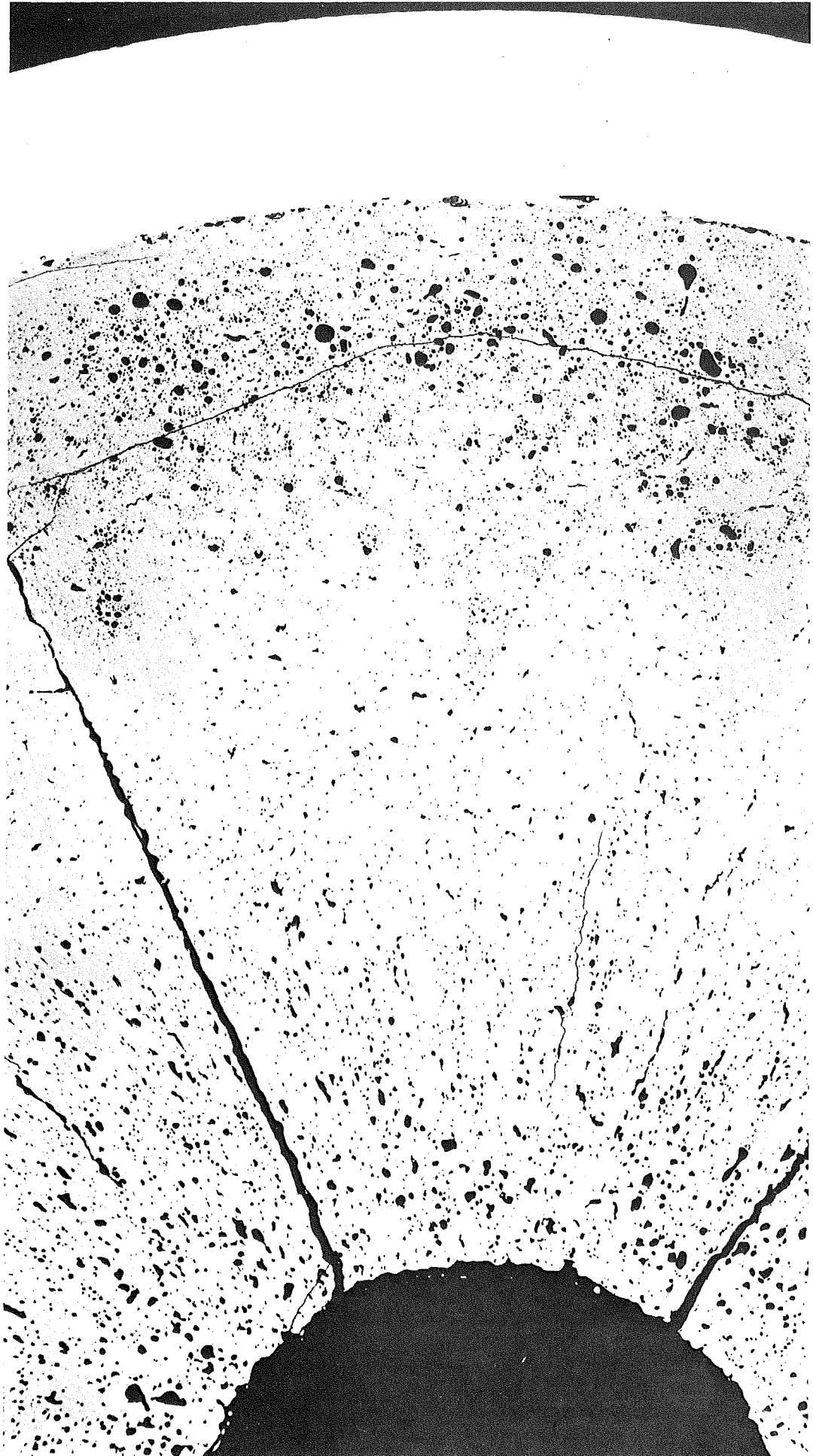
Geometrie :

Länge des Prüflings	: 172 mm
Länge der Brennstoffsäule	: 80 mm
Radiale Spaltweite	: 0,070 mm
Schmierdichte	: 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung	: NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer	: 637,1 Volllasttage
Ende	: 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl.	: 99,9 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl.	: 536 / 281 W/cm

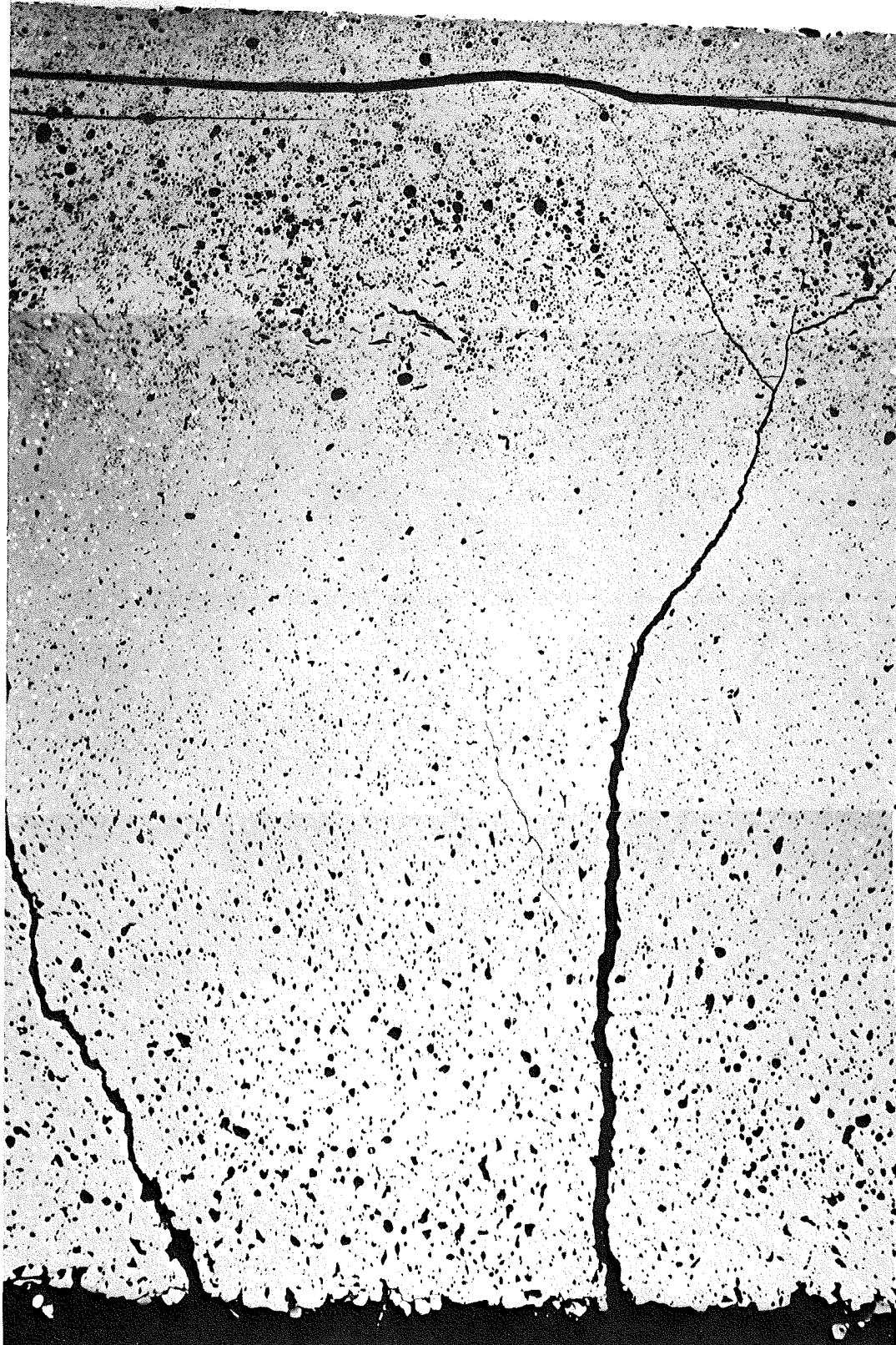
-I/63-
zu Prüfling 4B/12
A1



14

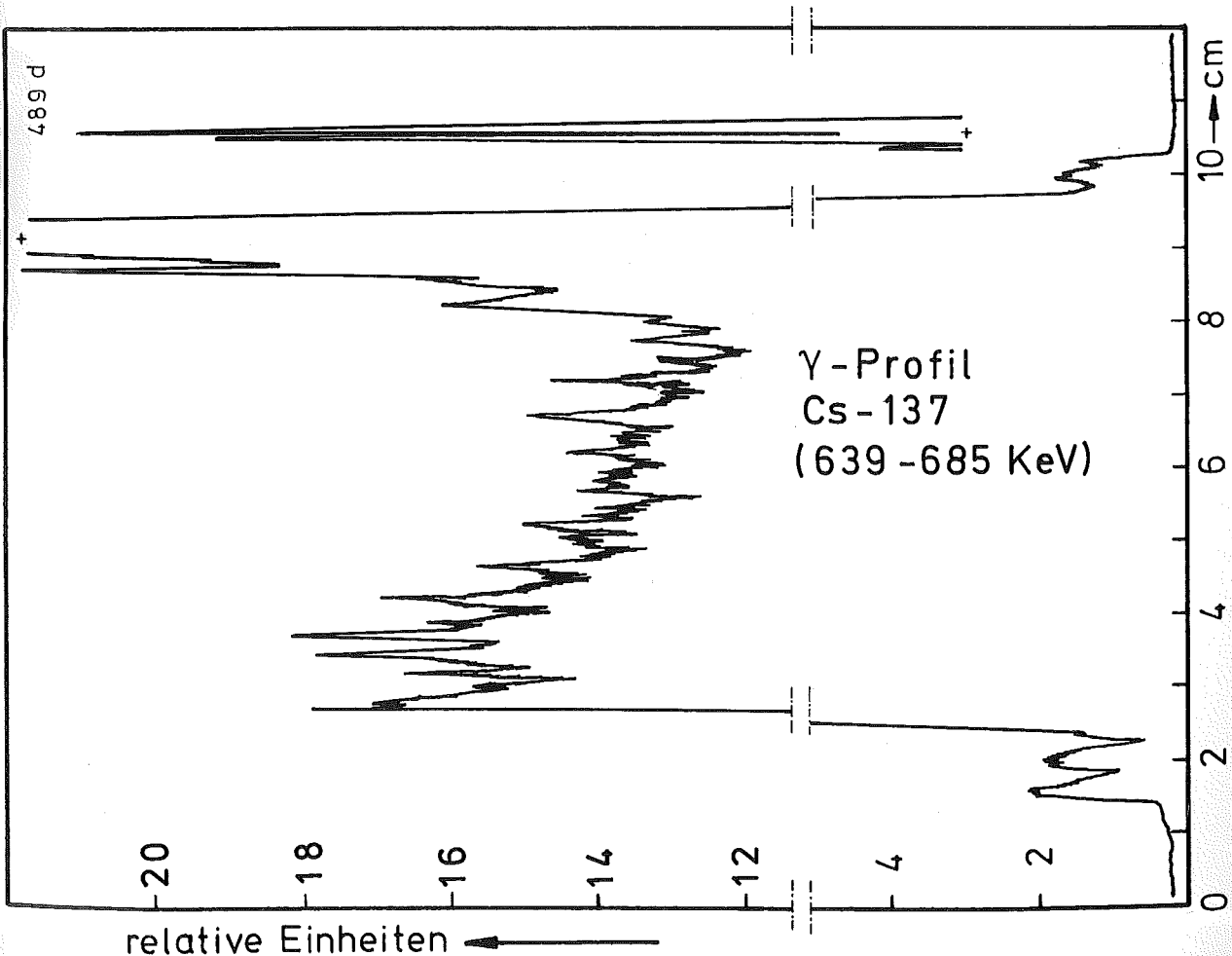
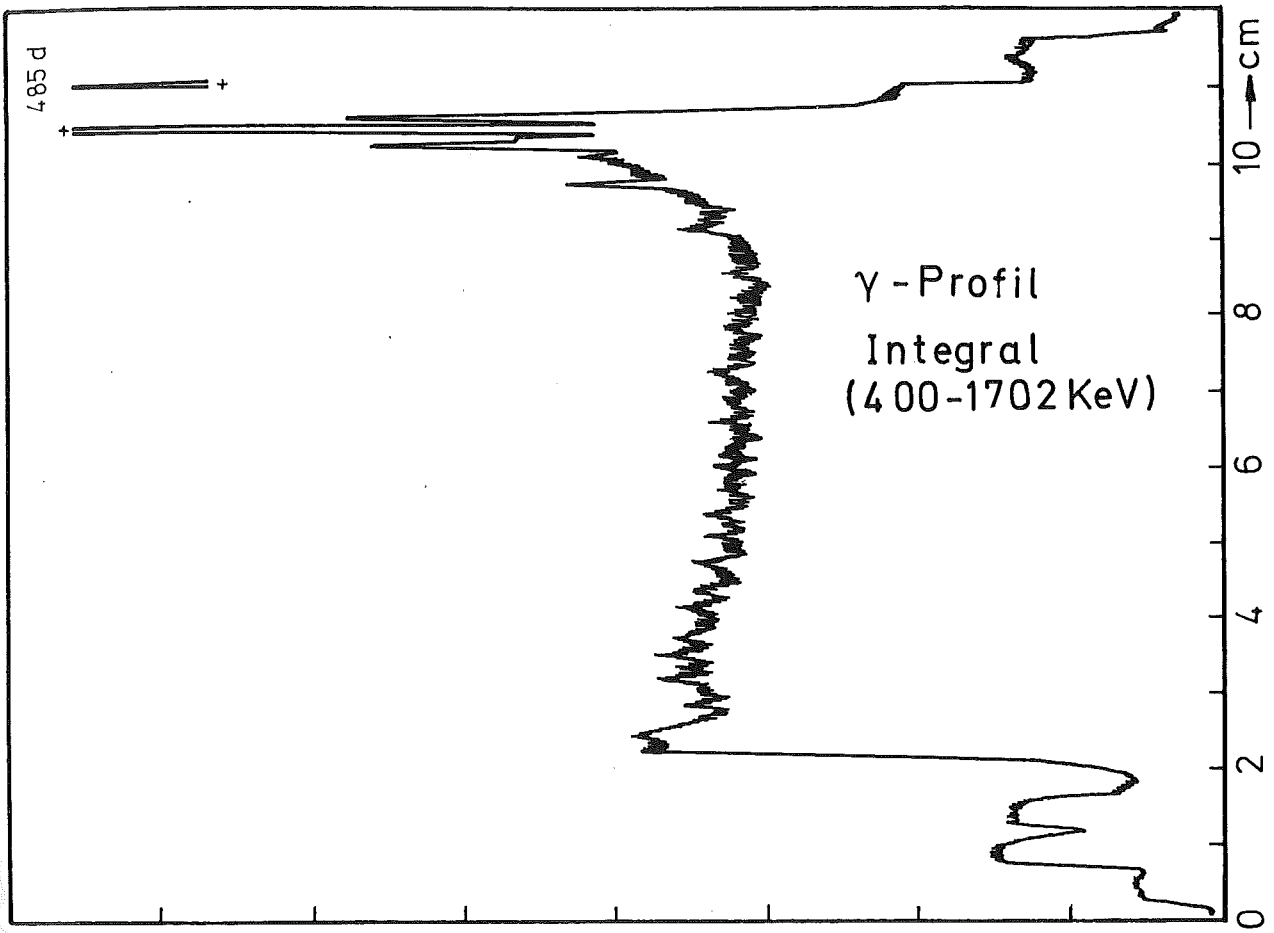
0,1mm

-I/64-
zu Prüfling 4B/12
A2



17

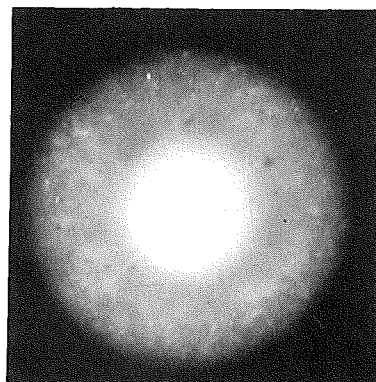
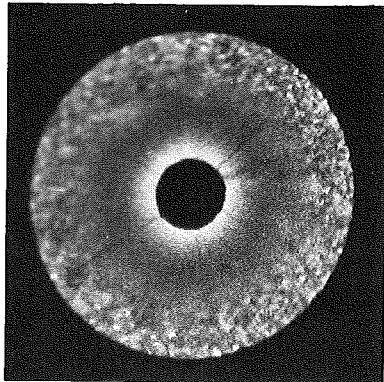
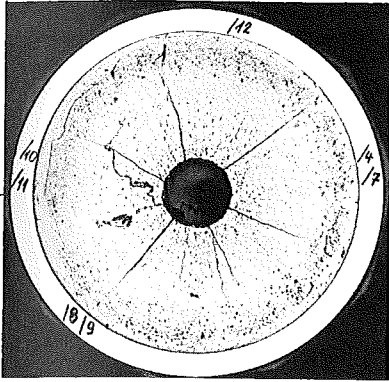
0,1 mm



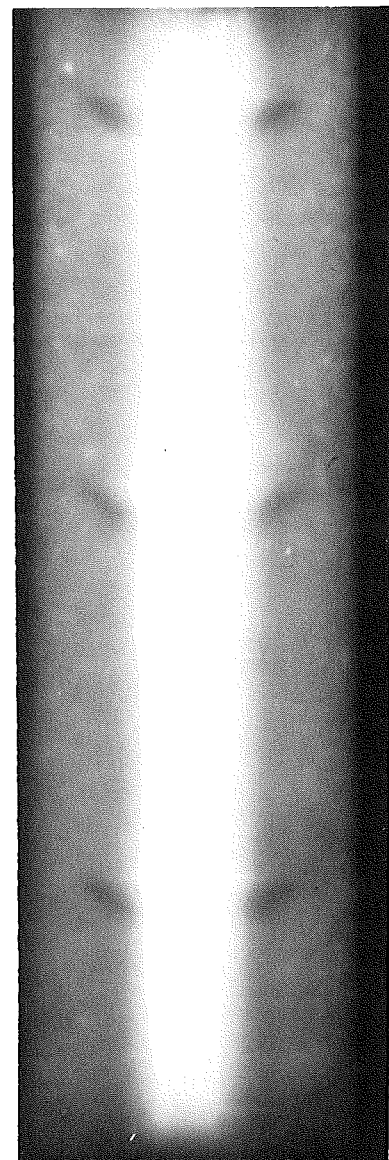
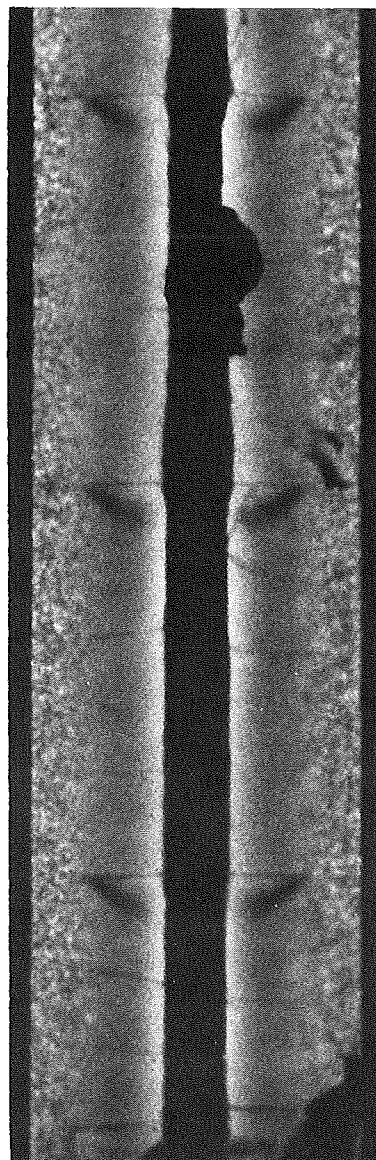
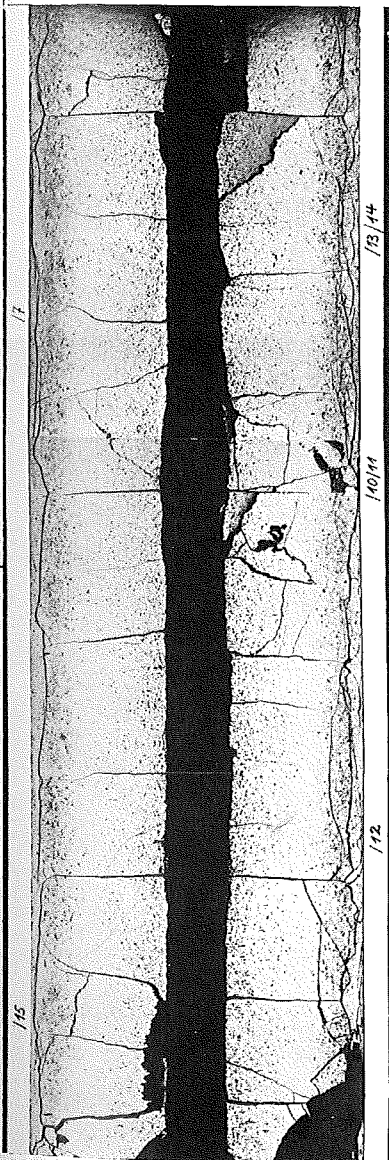
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-12

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

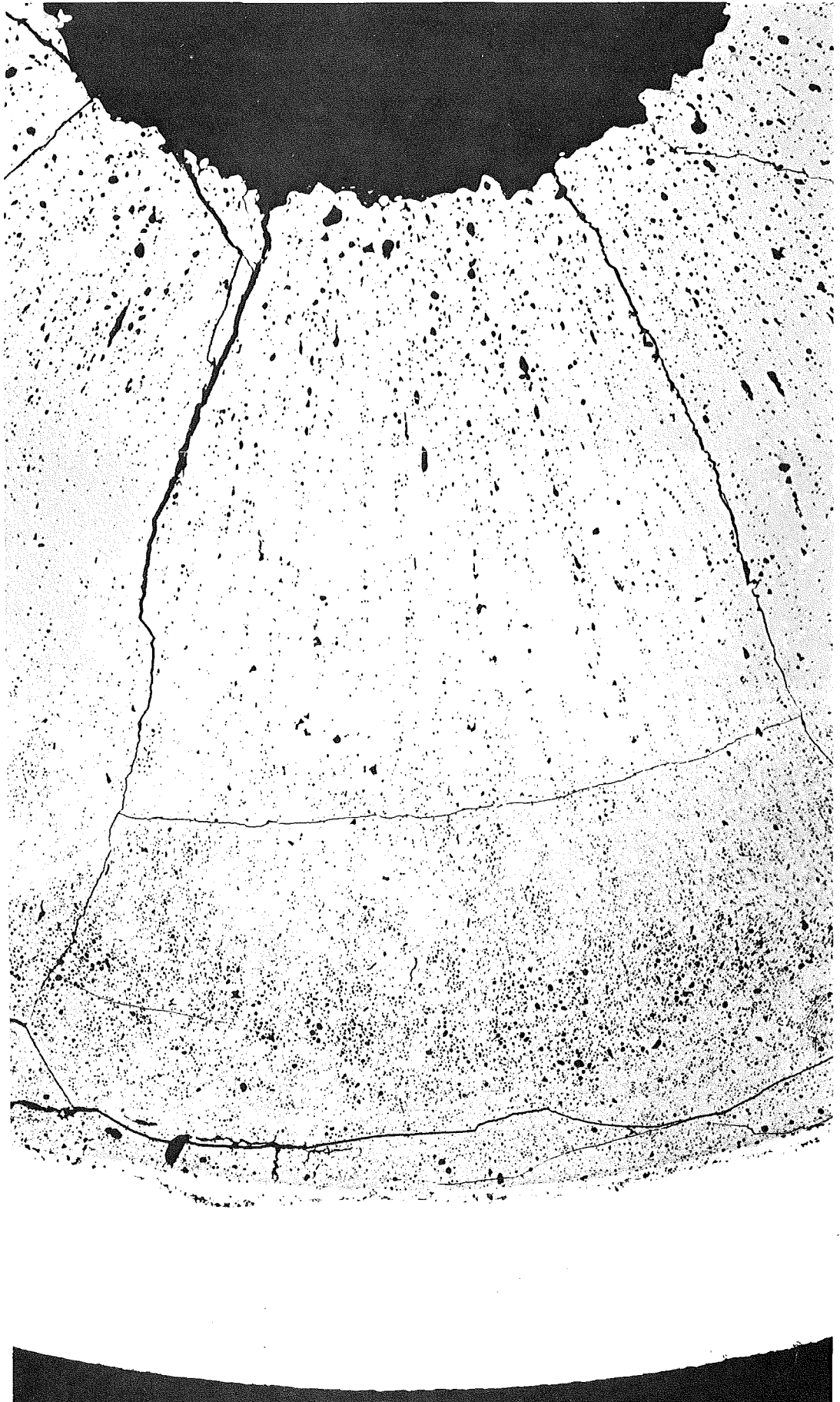
Dauer : 637,1 Volllasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 62,8 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 477 / 188 W/cm

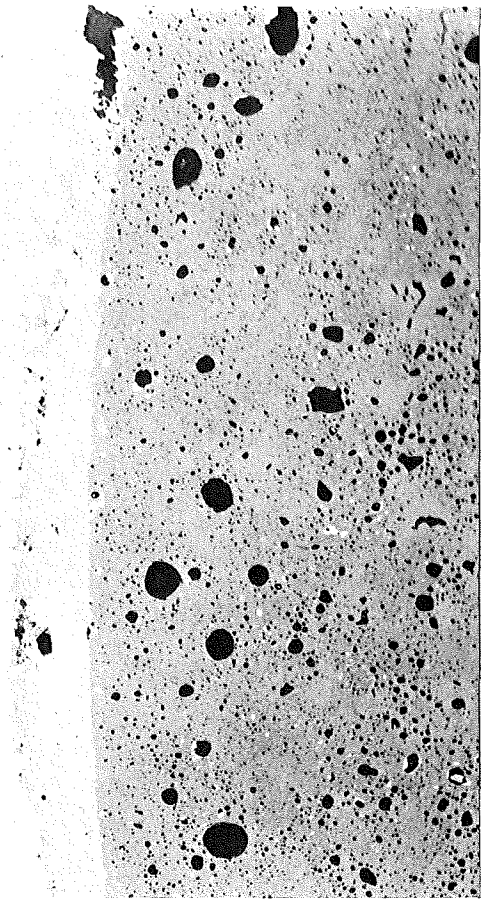
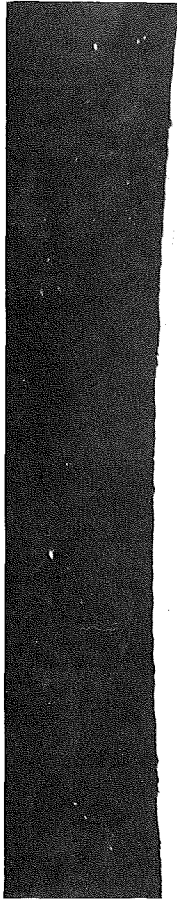
-I/67-
zu Prüfling 4B/10
A1



14

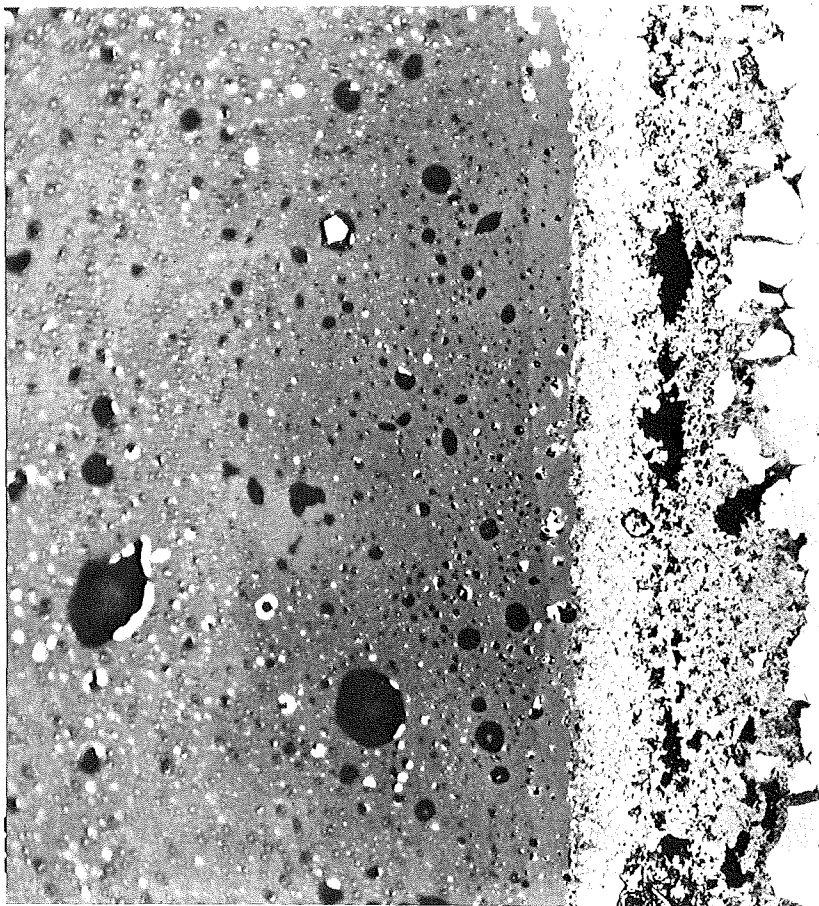
0,1mm

-I/68-
zu Prüfling 4B/10
A1



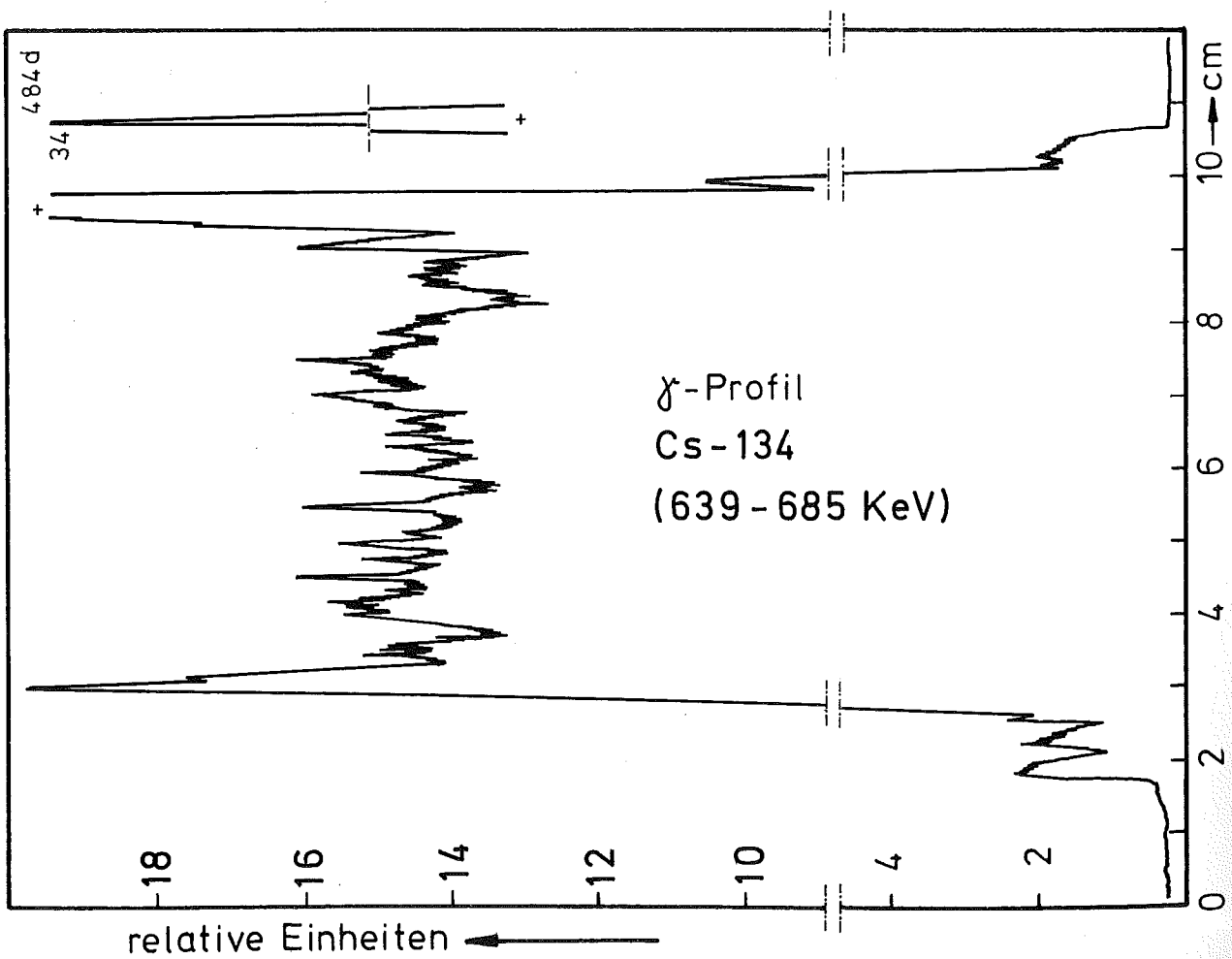
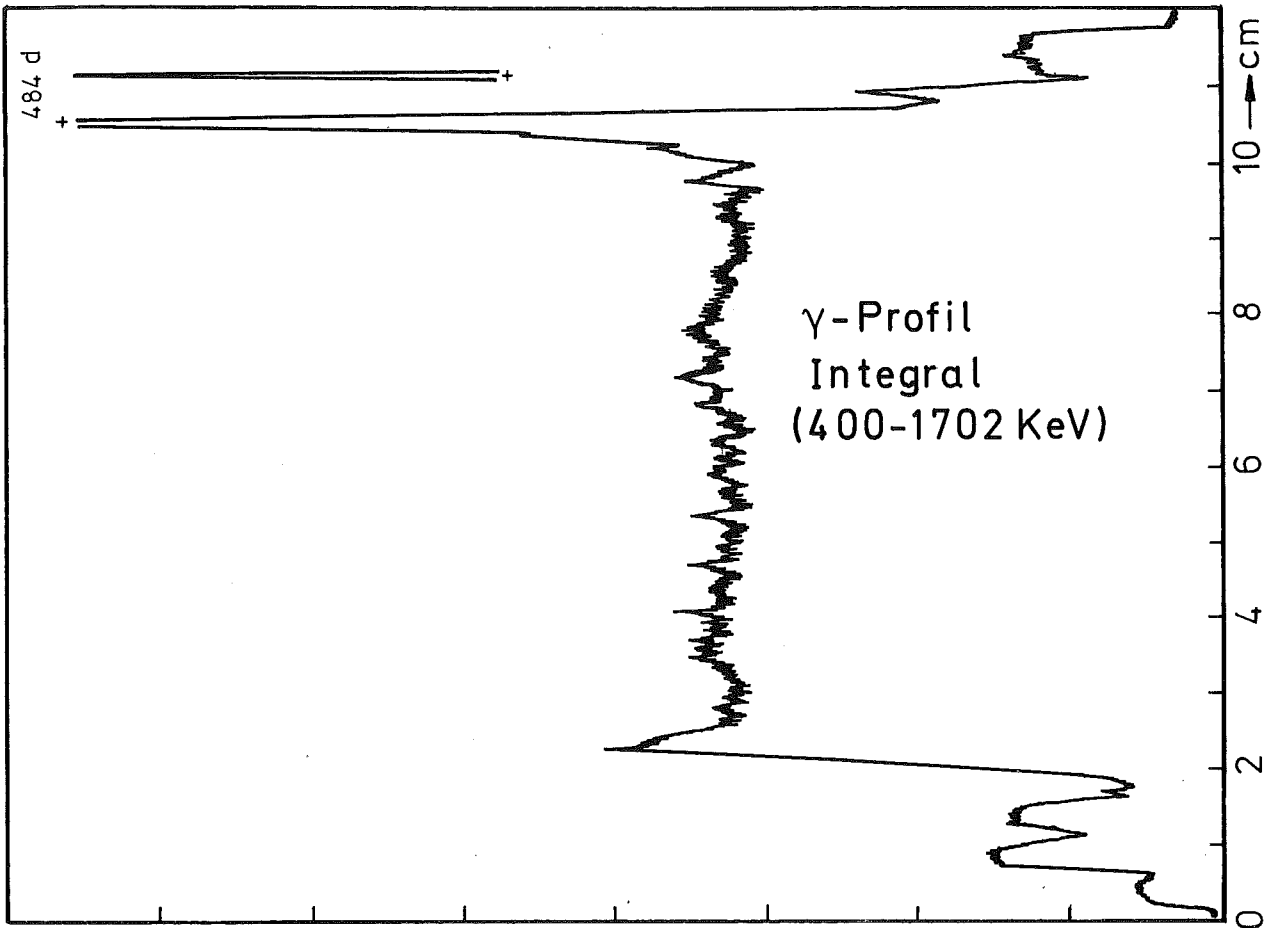
HZ-3a-49-4B/10-1/9 200x

0,1 mm



HZ-3a-49-4B/10-1/12 500x

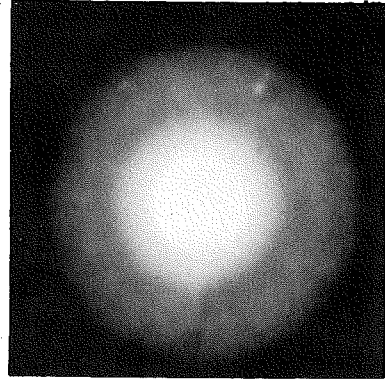
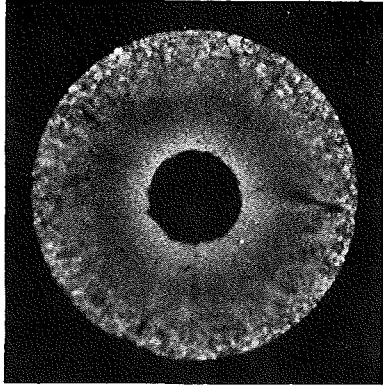
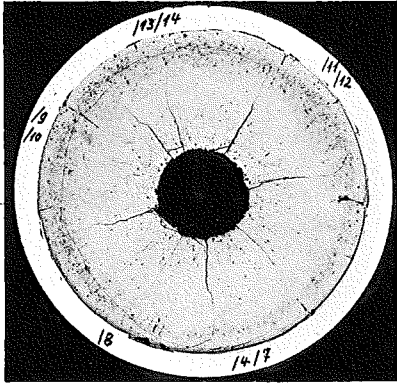
0,04 mm



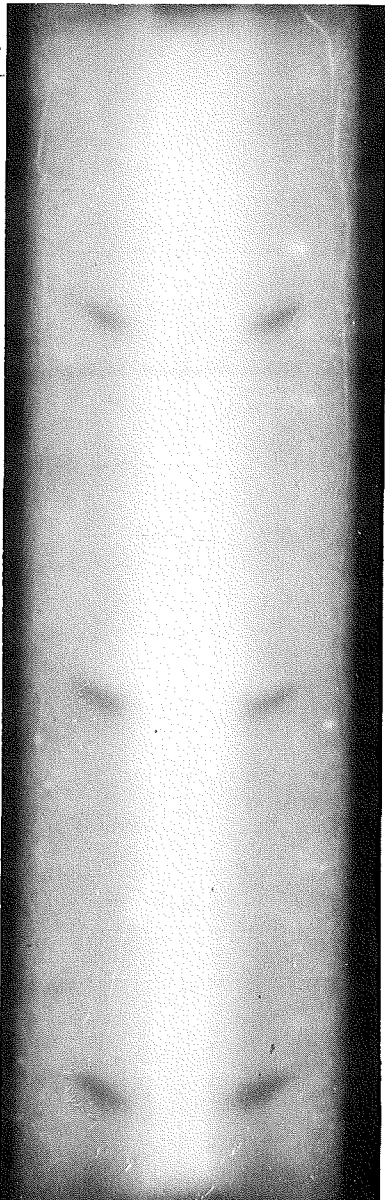
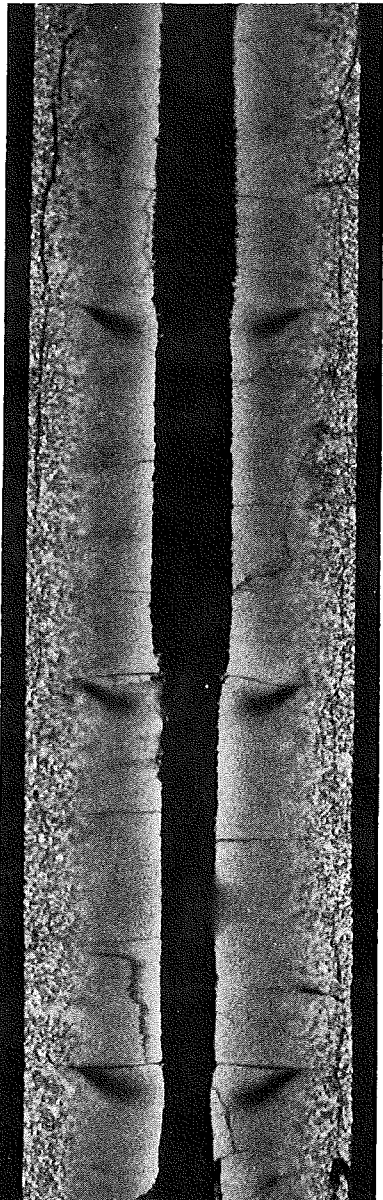
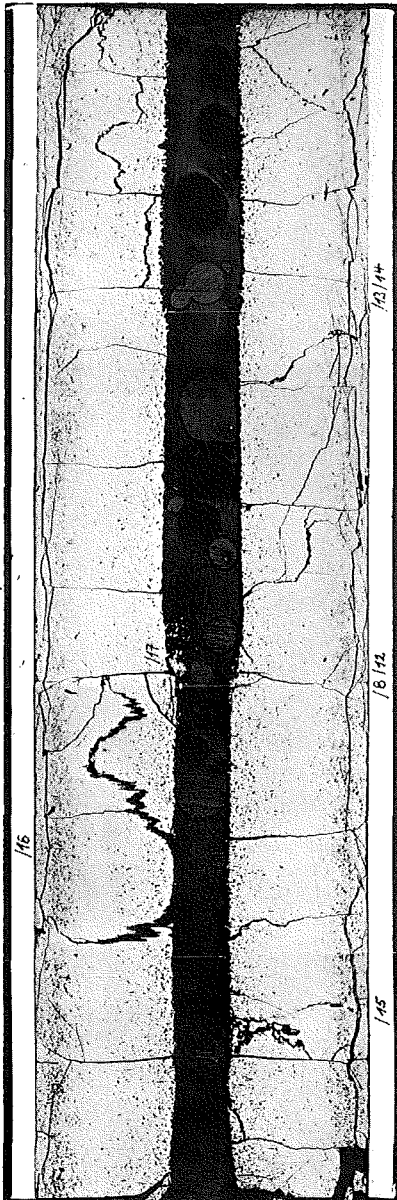
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-10

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 90% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

Dauer : 637,1 Vollasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 110,3 MWd/kg Metall

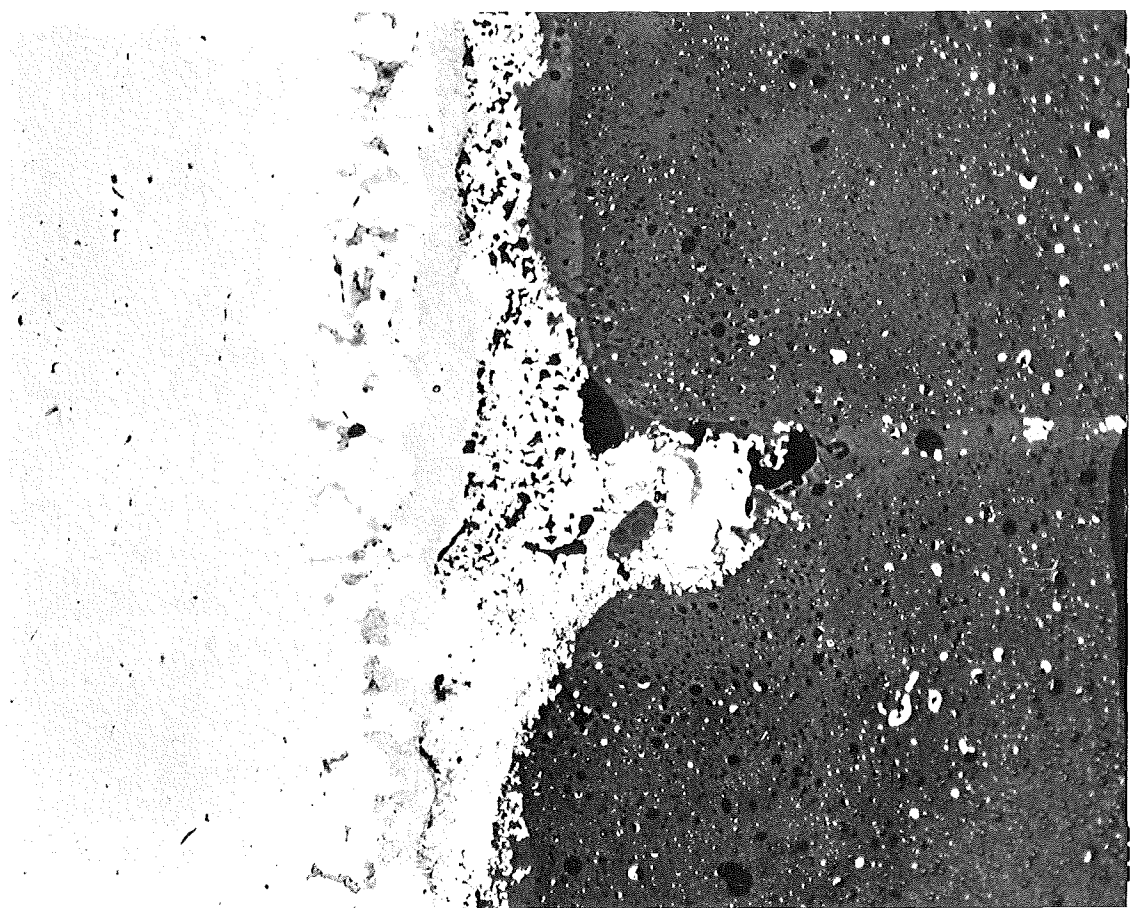
Stableistung max./mittl. : 545 / 309 W/cm

-I/71-
zu Prüfling 4B/6
A1



HZ-3a-49-4B/6-2/10 100x

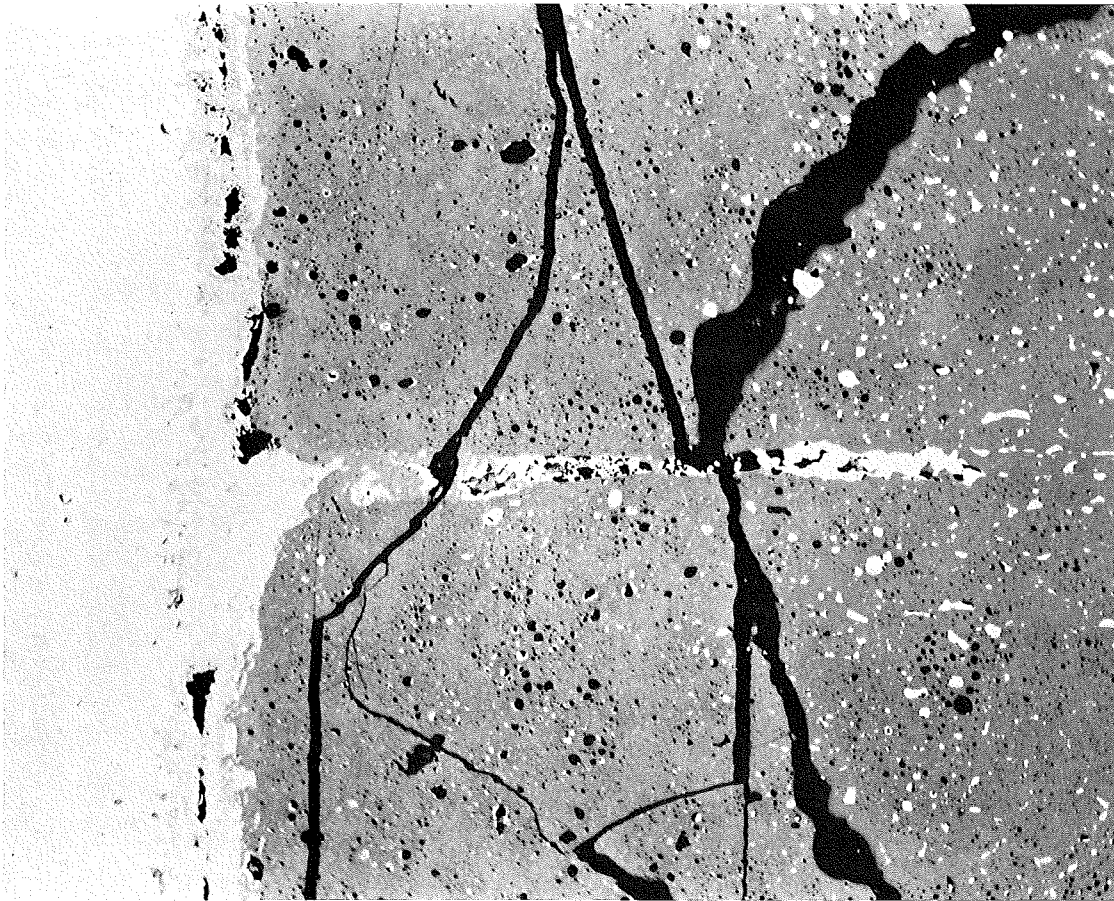
0,1 mm



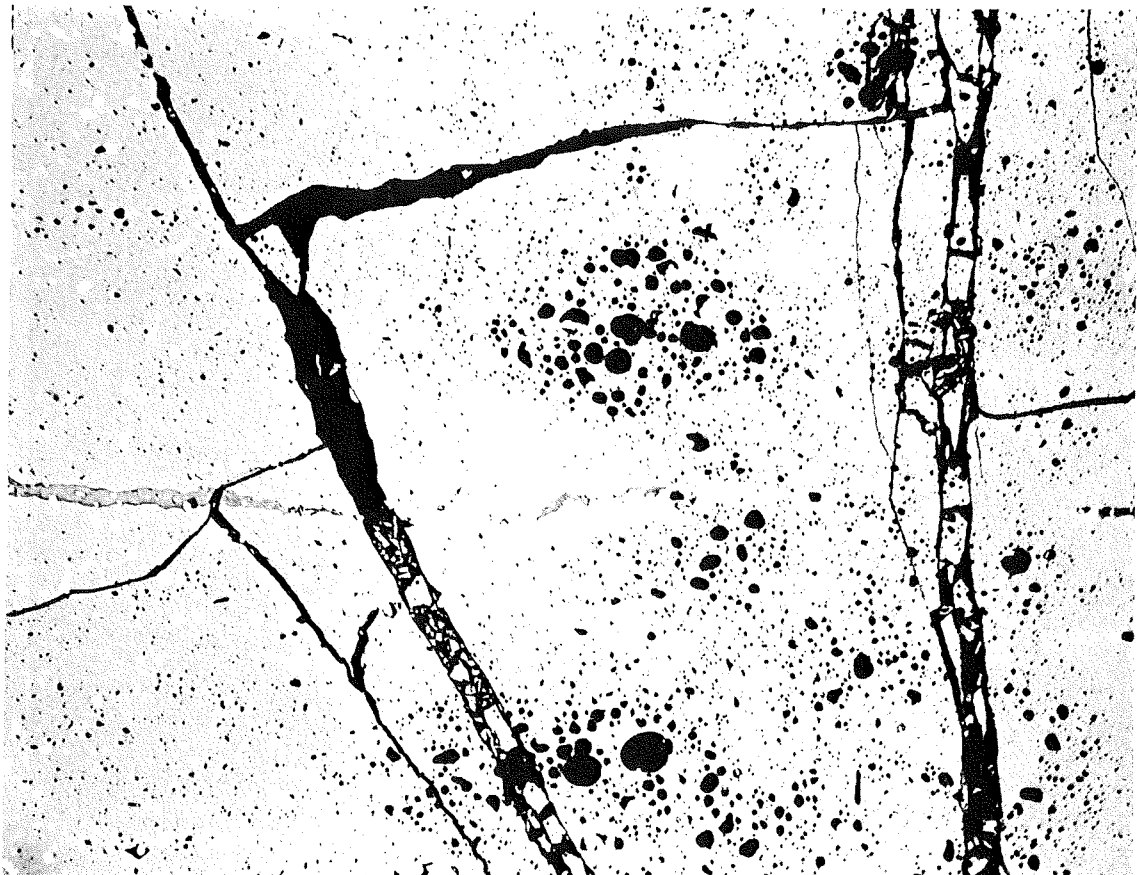
HZ-3a-49-4B/6-2/11 500x

0,04 mm

-I/72-
zu Prüfling 4B/6
A1



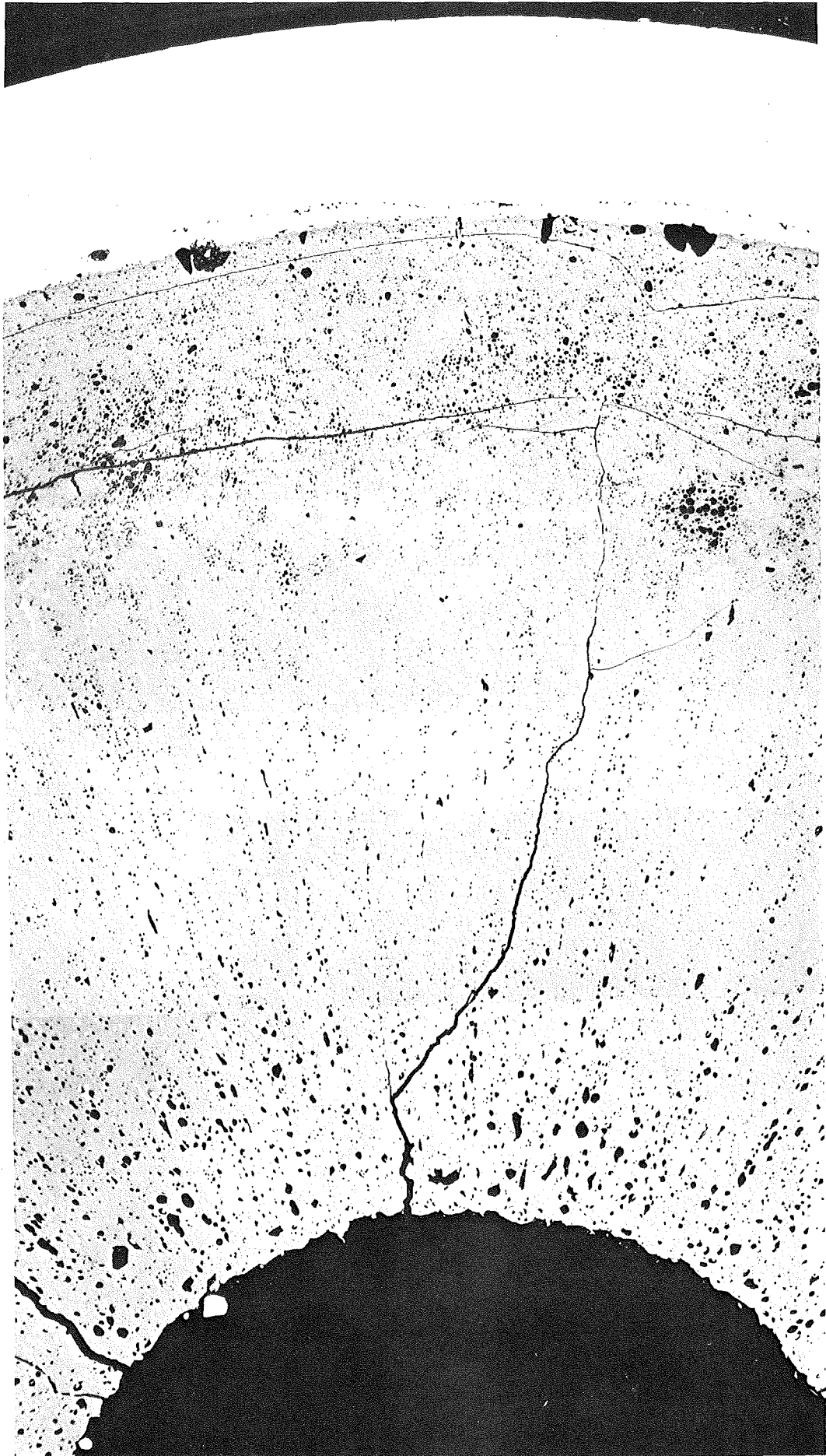
HZ-3a-49-4B/6-2/13 200x



HZ-3a-49-4B/6-2/18 200x

0,1mm

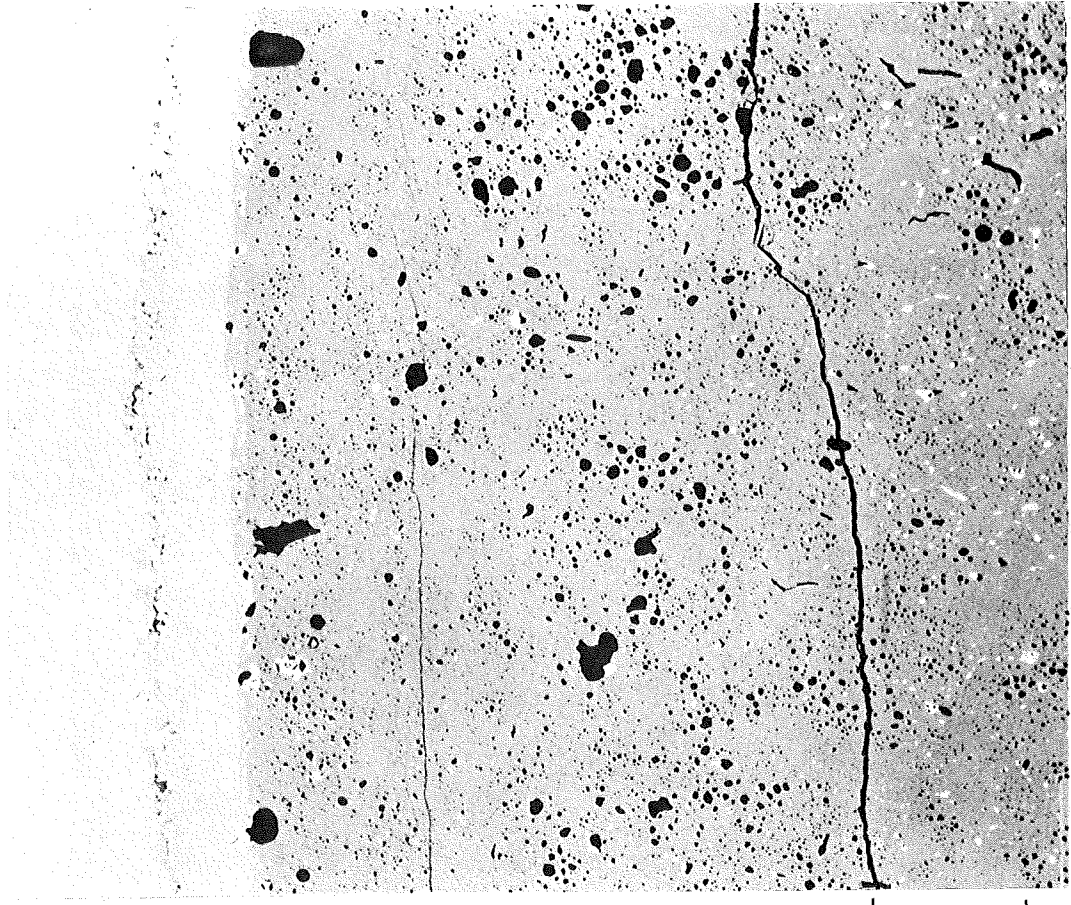
-I/73-
zu Prüfling 4B/6
A2



14

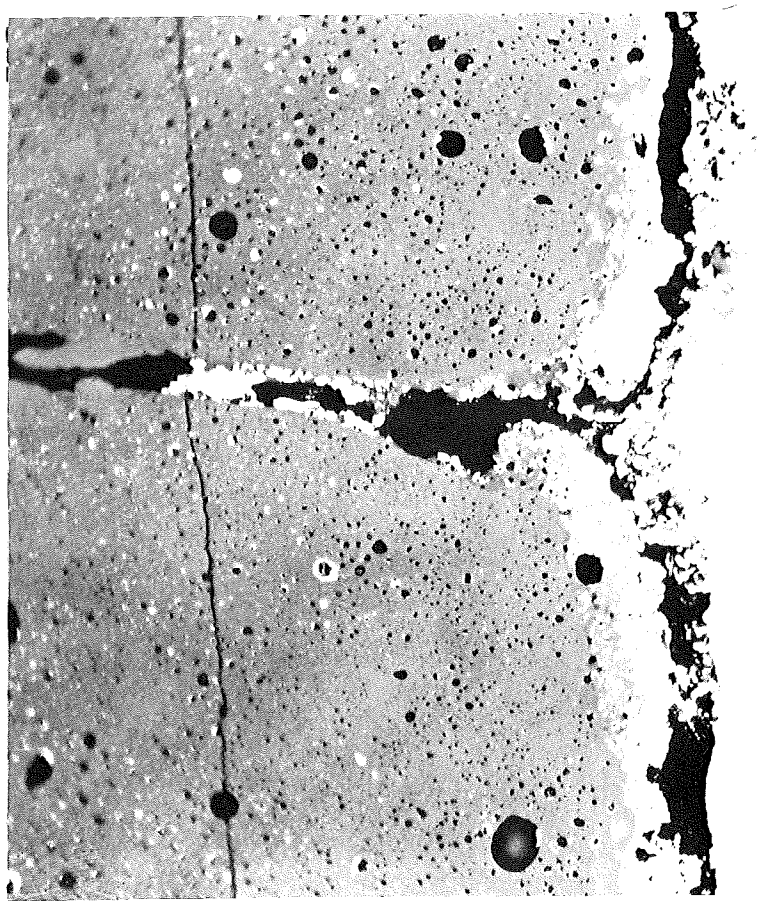
0,1mm

-1/74-
zu Prüfling 4B/6
A2



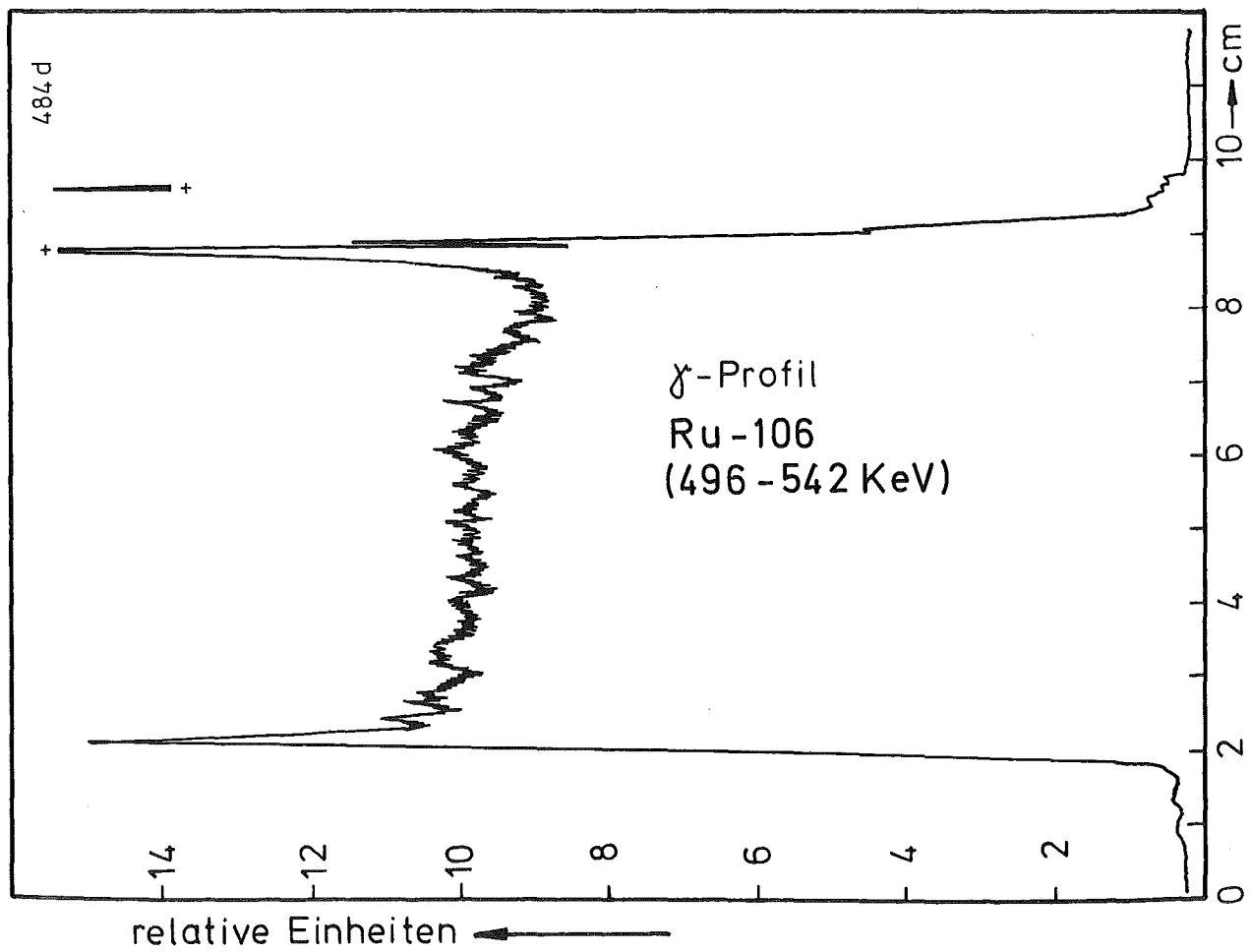
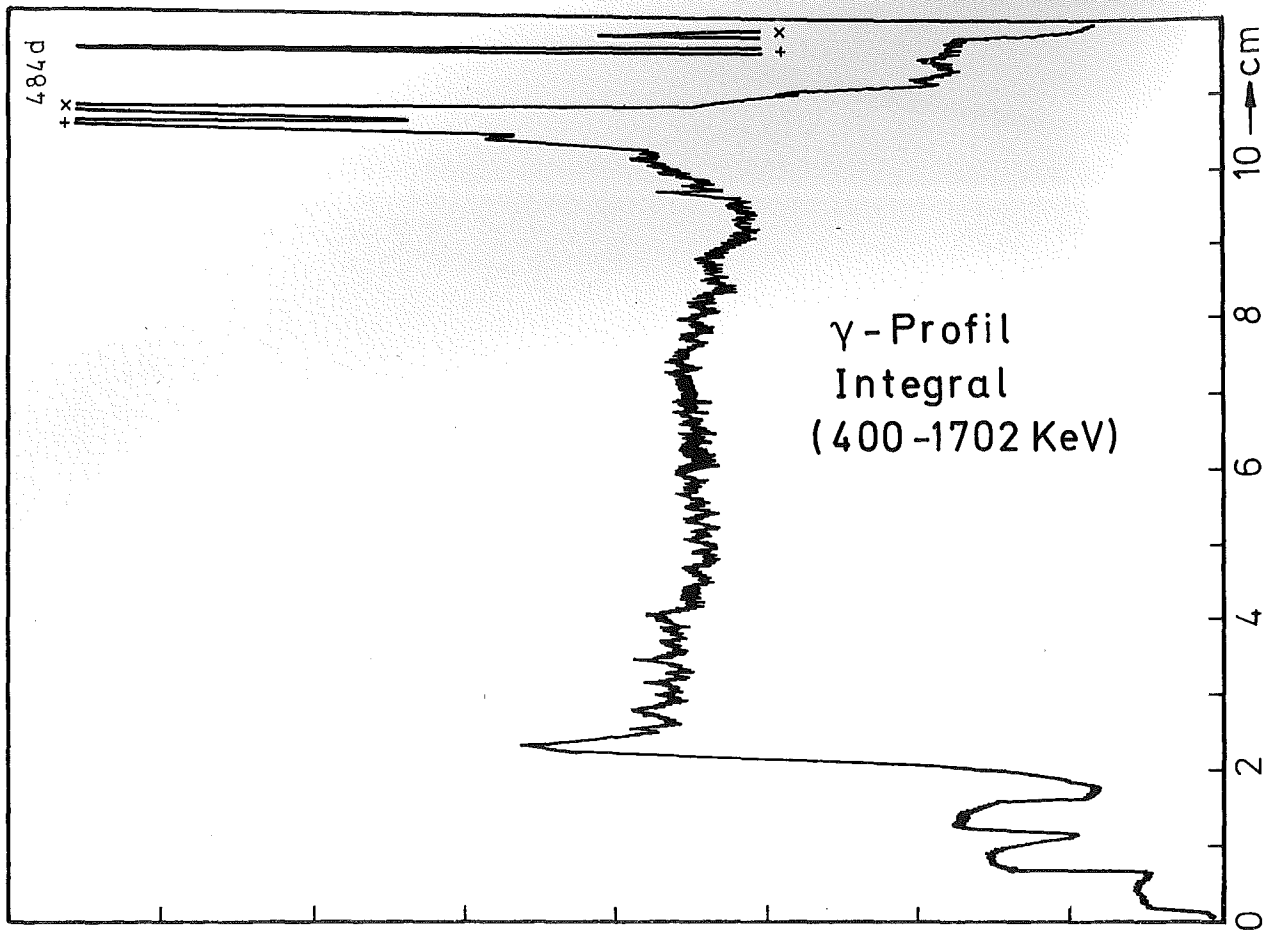
HZ-3a-49-4B/6-1/9 200x

0,1 mm



HZ-3a-49-4B/6-1/14 500x

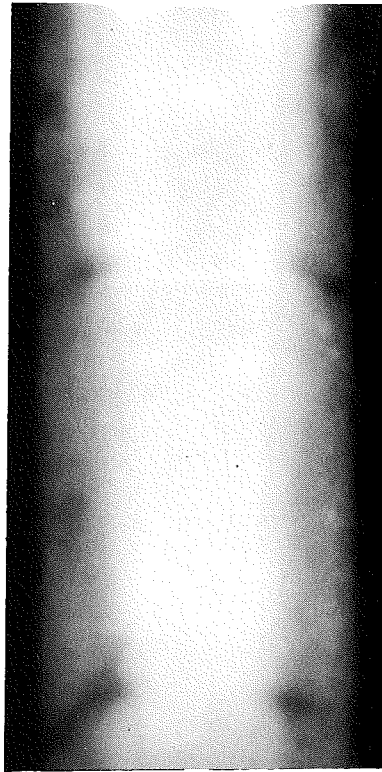
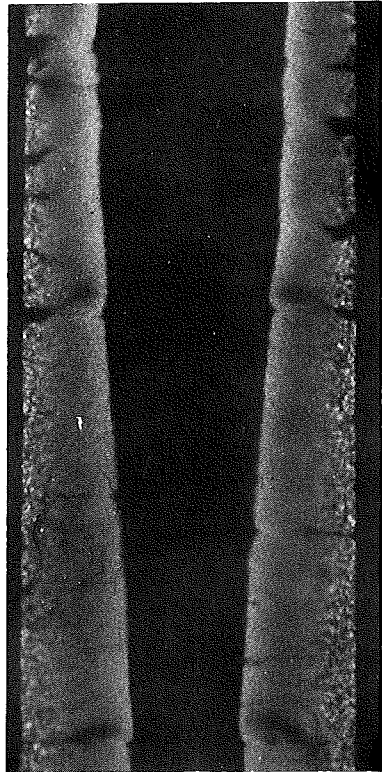
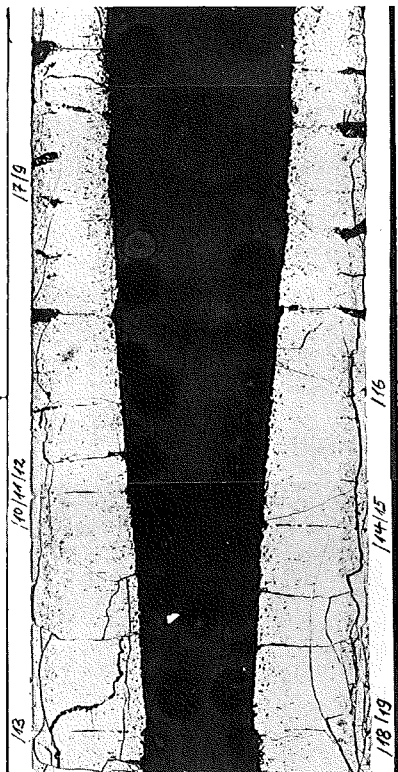
0,04 mm



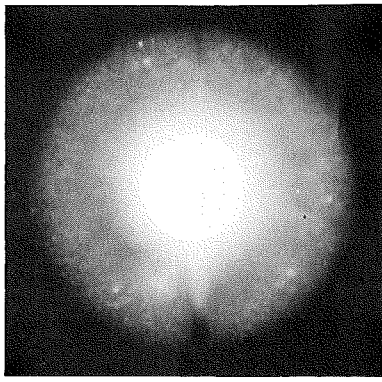
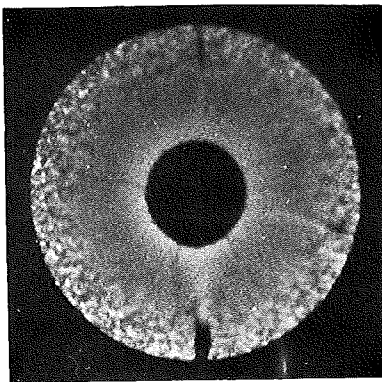
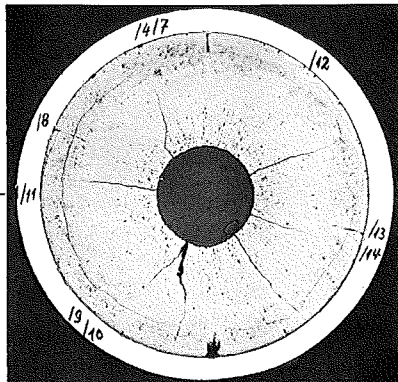
A

B

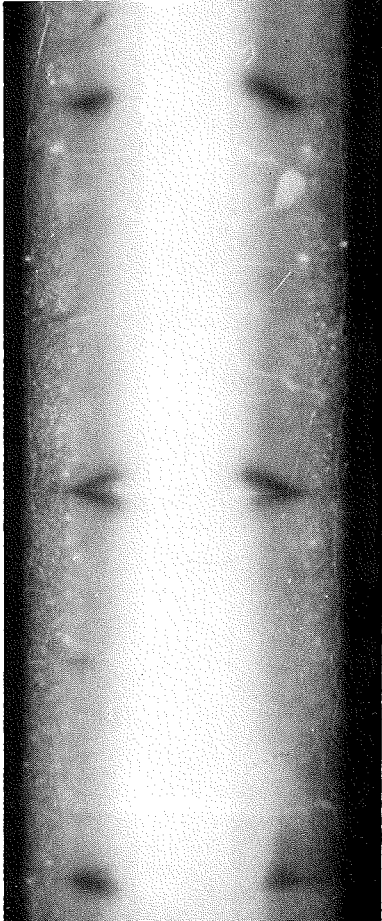
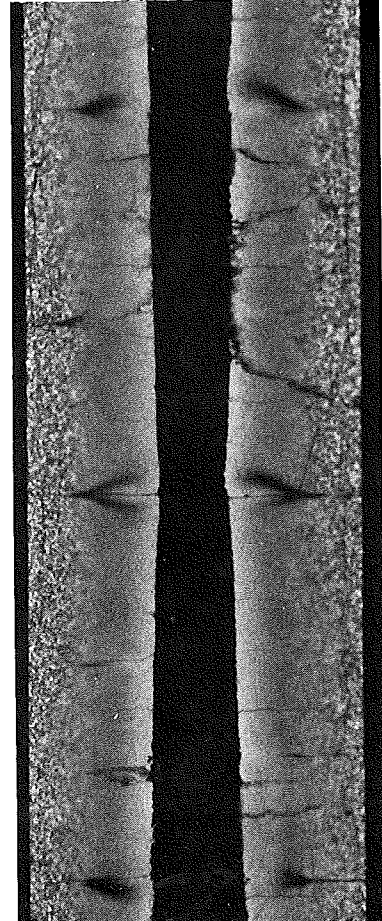
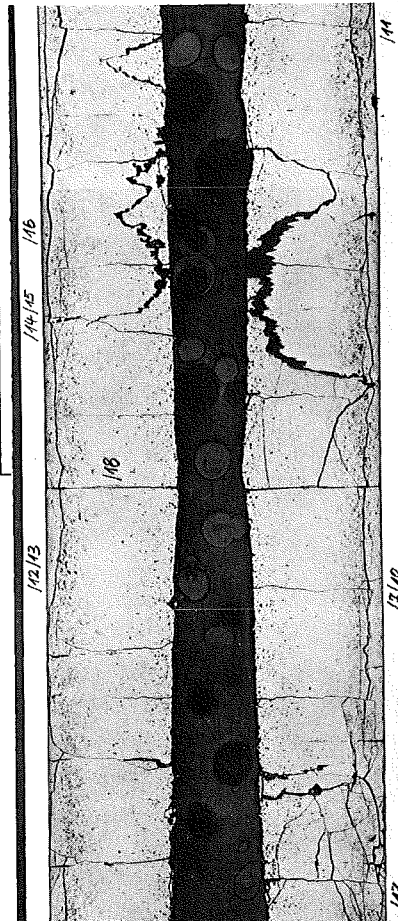
C



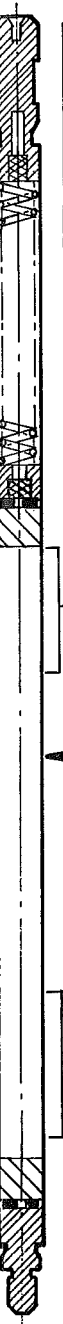
1



2



3



1mm



Prüfling 4B-6

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 90% th. D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 85,3% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a

Dauer : 637,1 Volllasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 52,4 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 527 / 146 W/cm

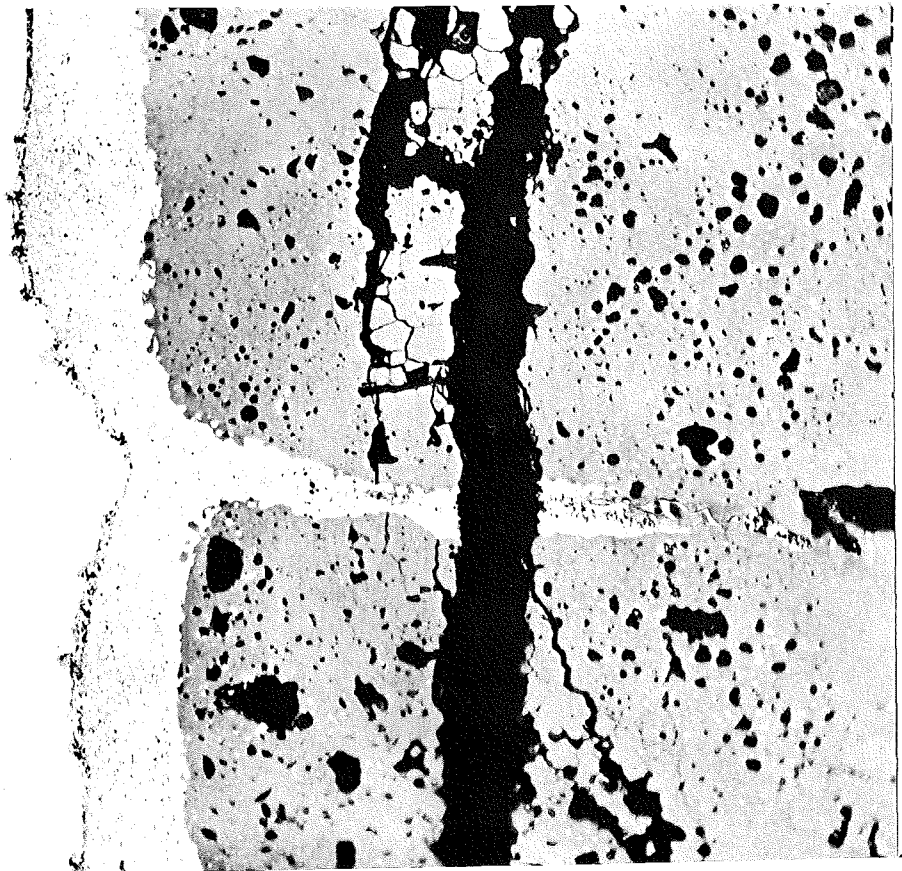
-1/77-
zu Prüfling 4B/15
A1

HZ-3a-55-4B/15-2/14

200x



0,1 mm



500x

HZ-3a-55-4B/15-2/10

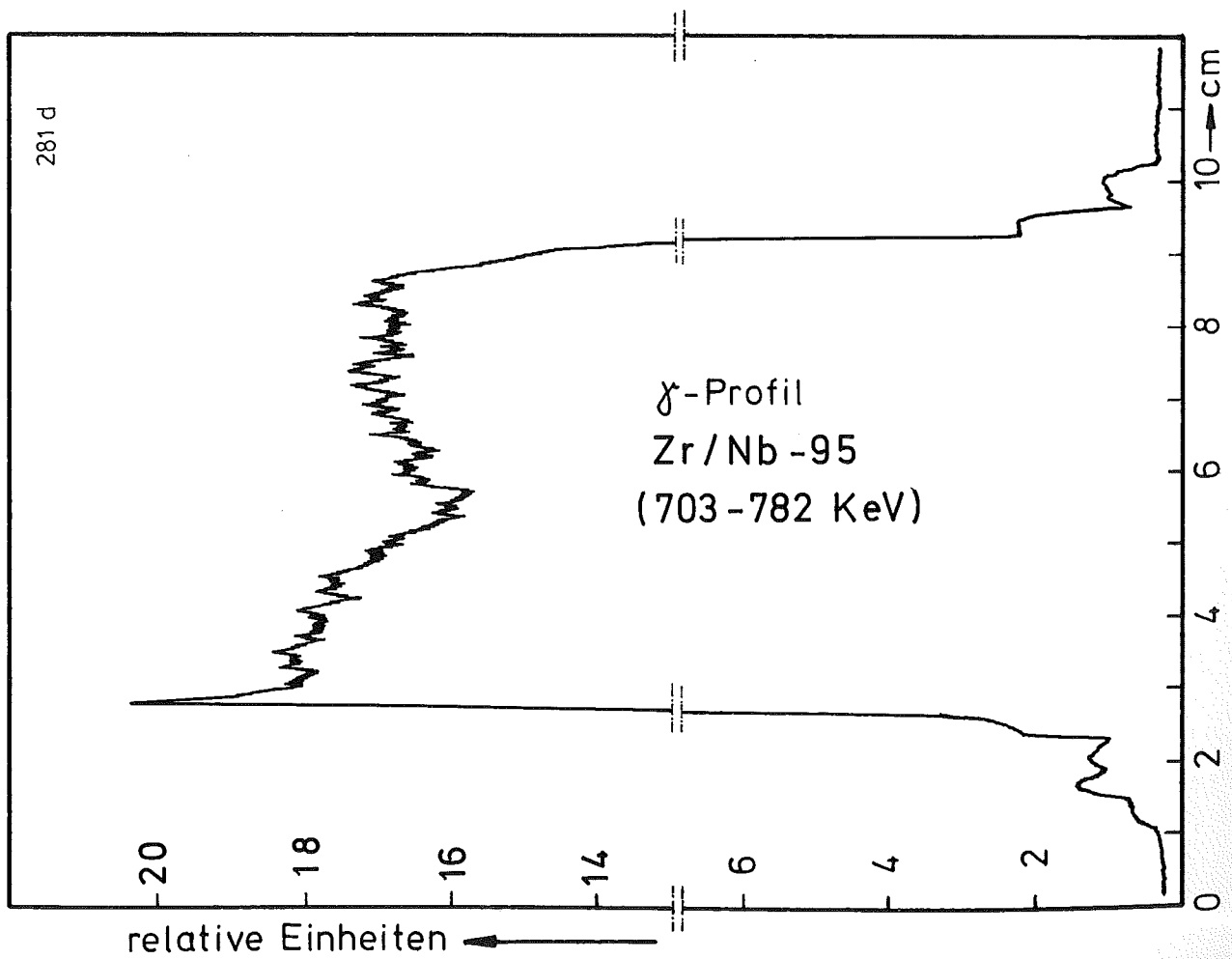
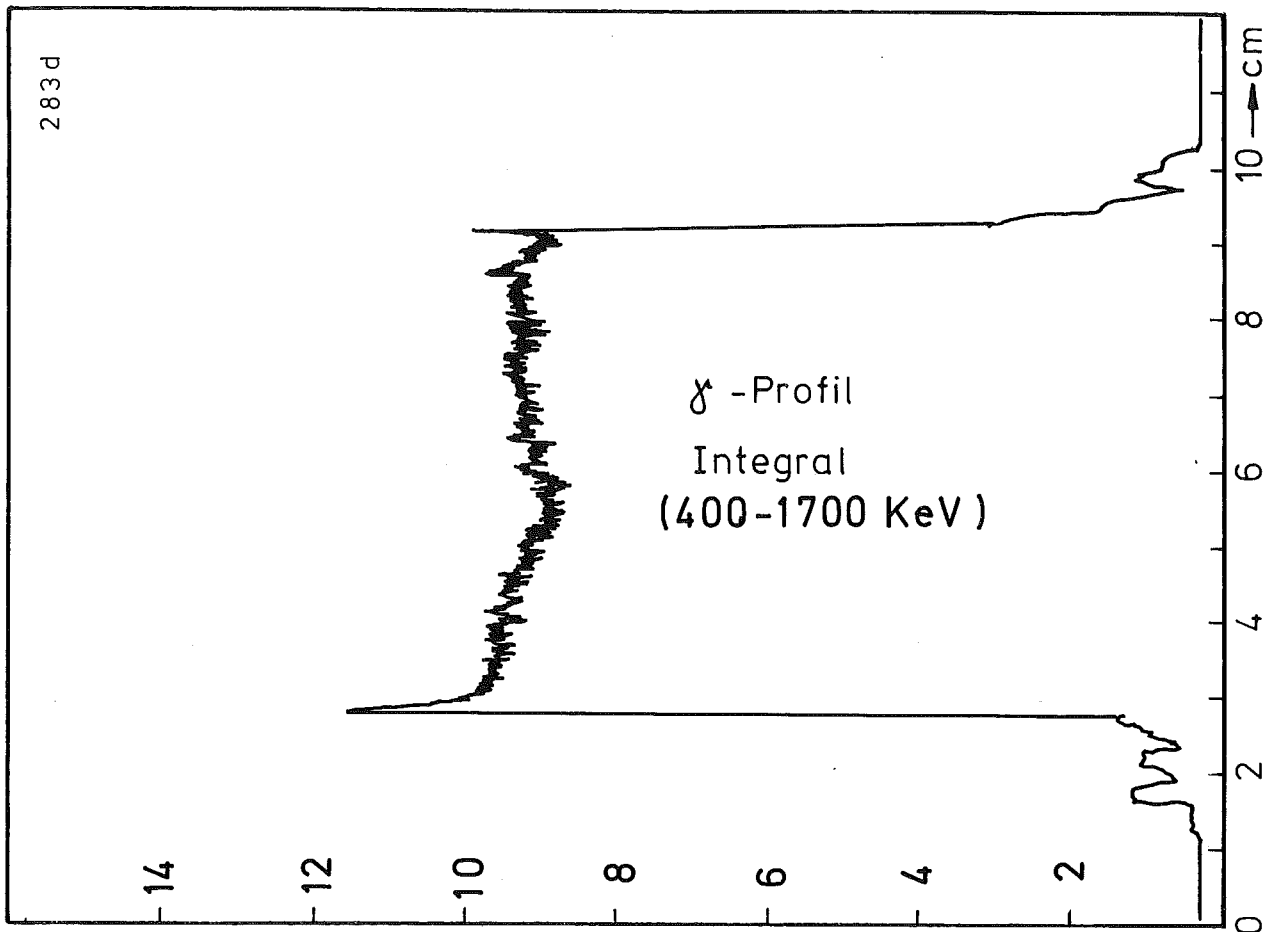
0,04 mm

-I/78-
zu Prüfling 4B/15
A2



14

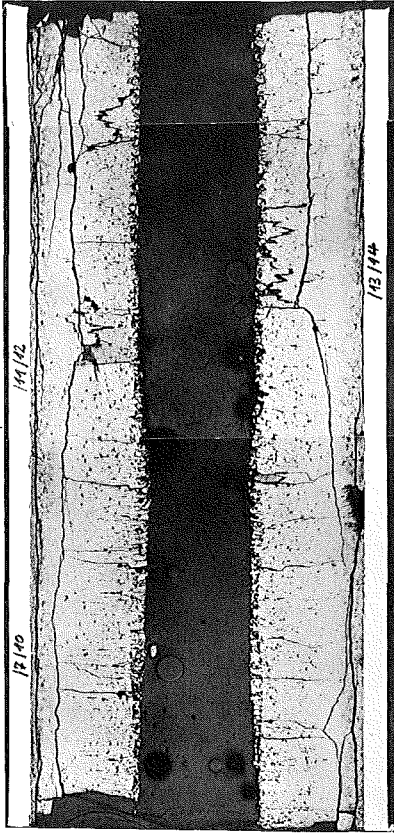
0,1 mm



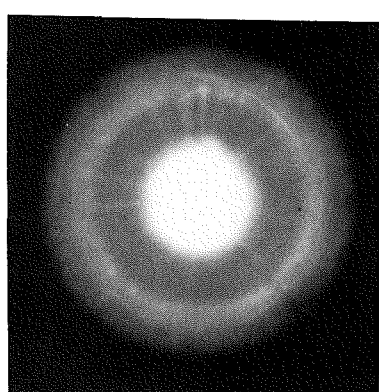
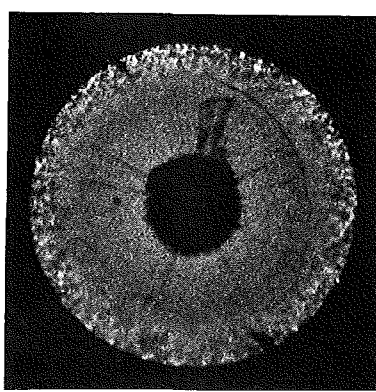
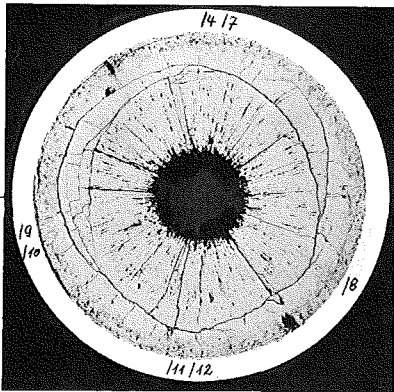
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-15

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

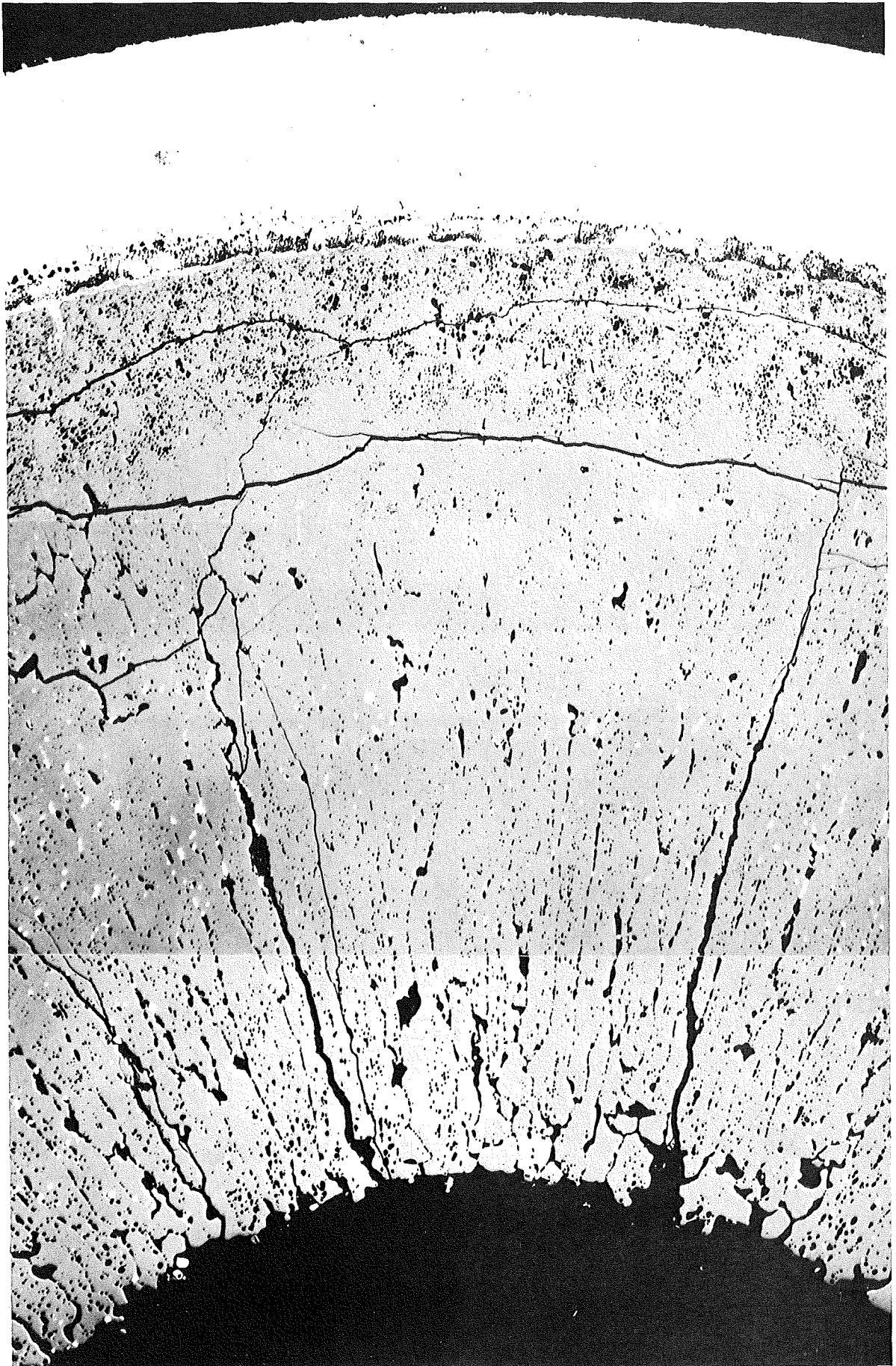
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 247 Vollasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 61,2 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 579 / 416 W/cm

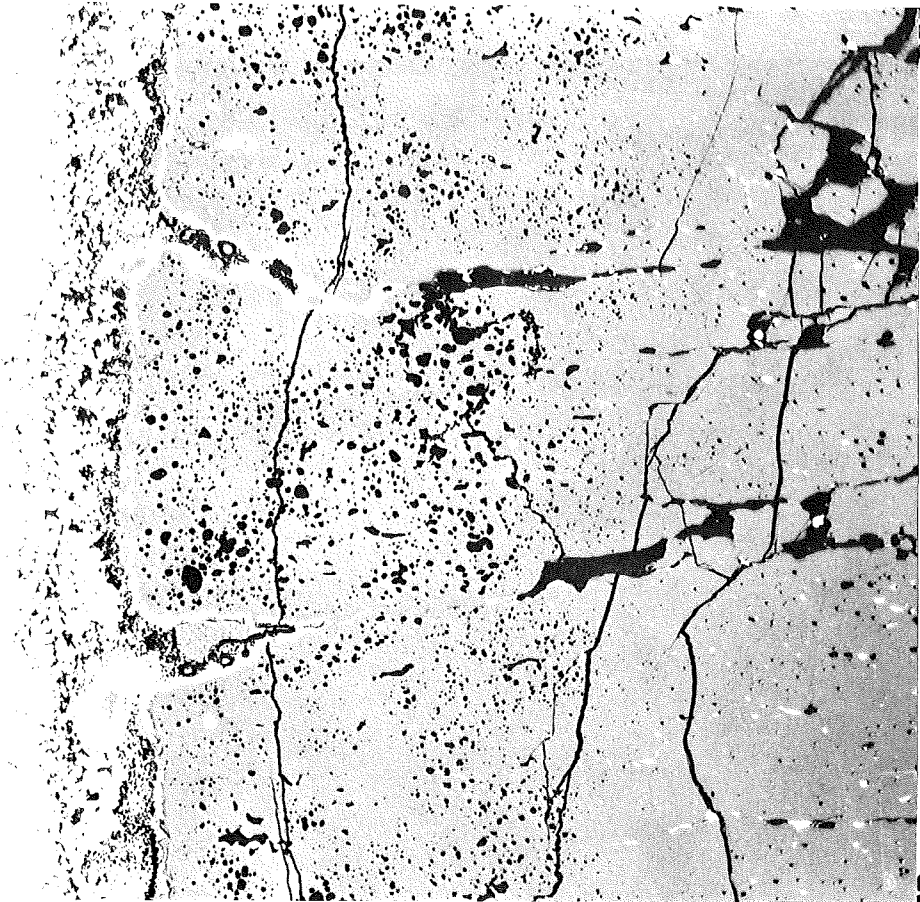
-1/81-
zu Prüfling 4B/14
A1



14

0,1mm

-I/82-
zu Prüfling 4B/14
A1

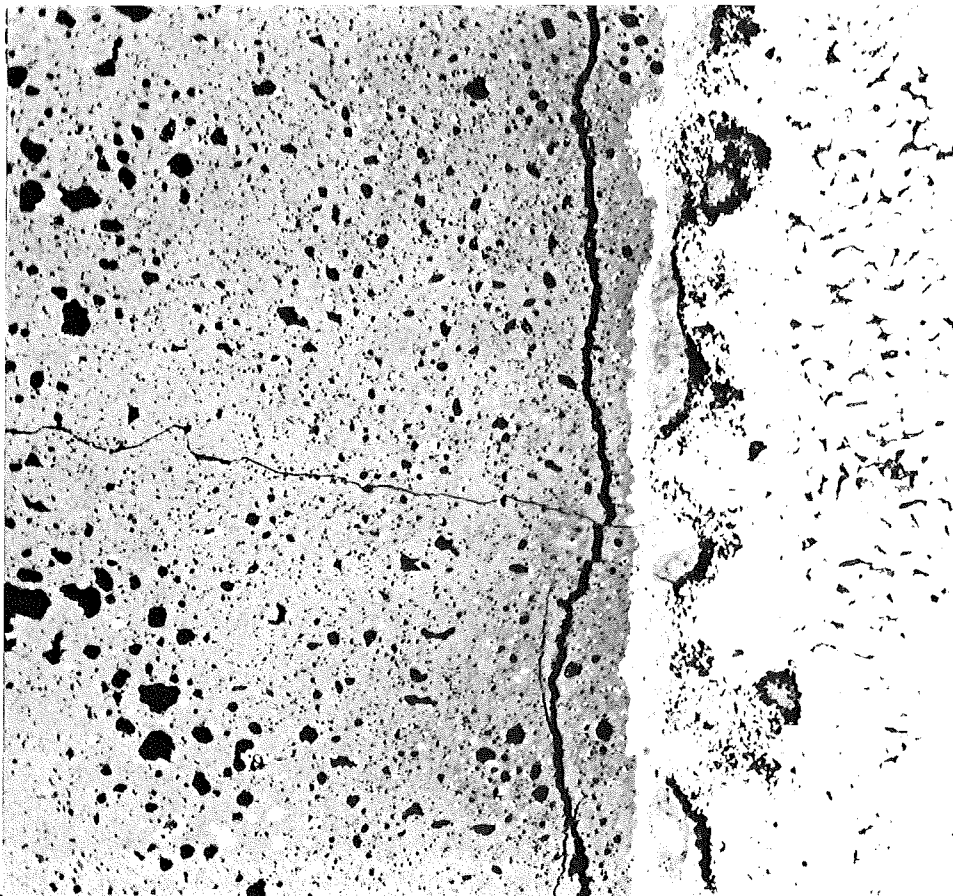


200x

HZ-3a-55-4B/14-1/8

0,1 mm

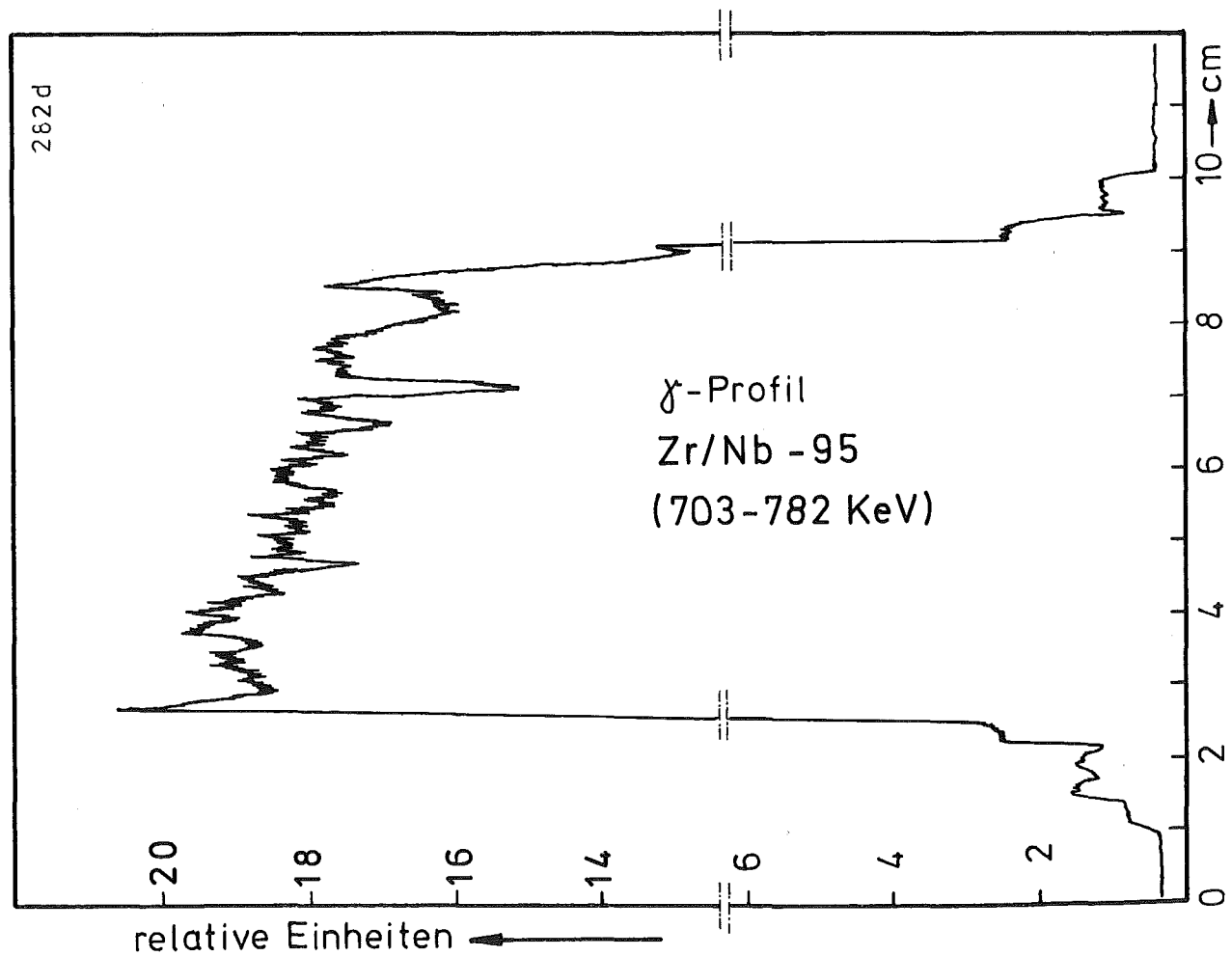
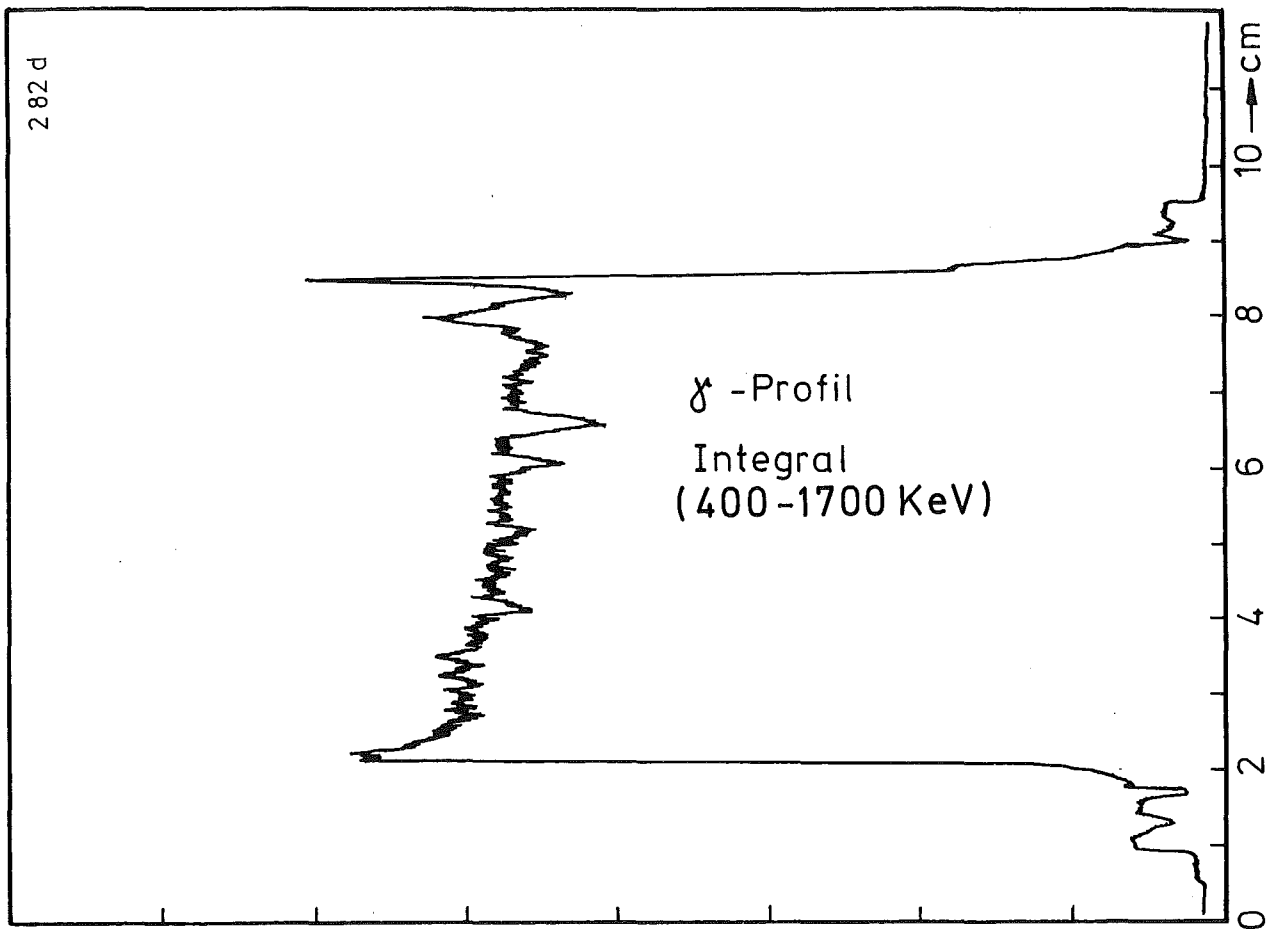
A2



HZ-3a-355-4B/14-2/16

500x

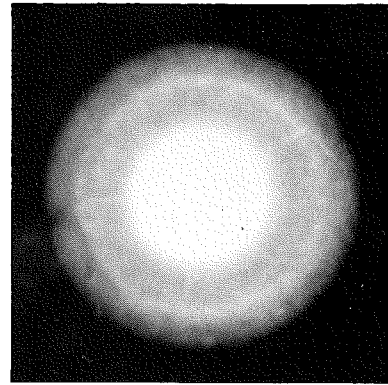
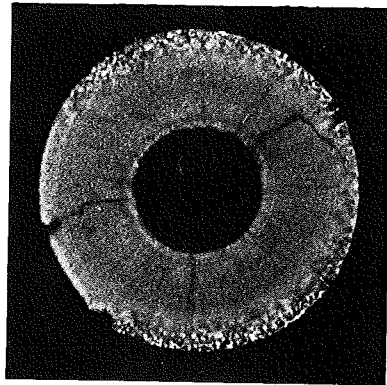
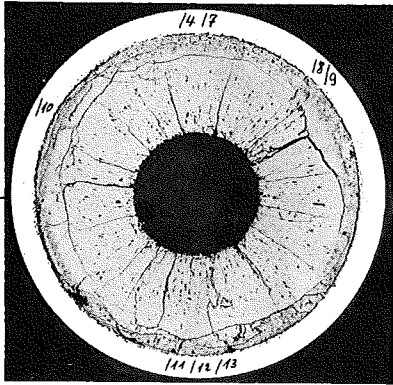
0,04 mm



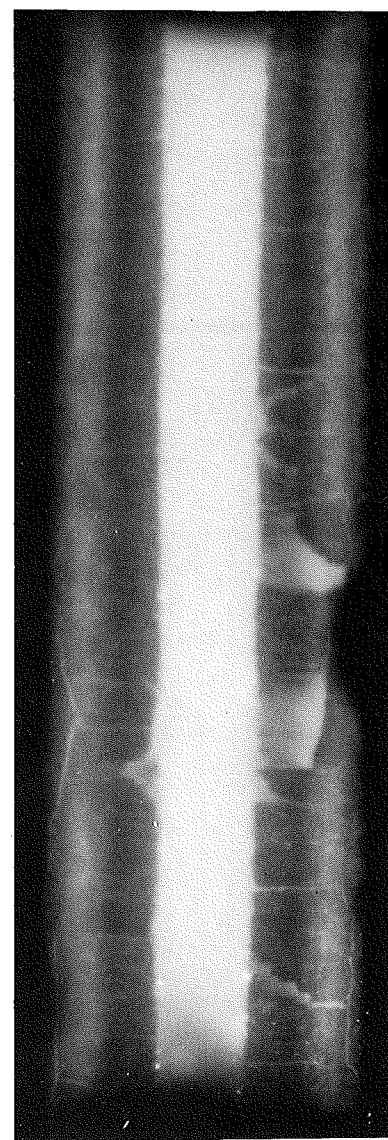
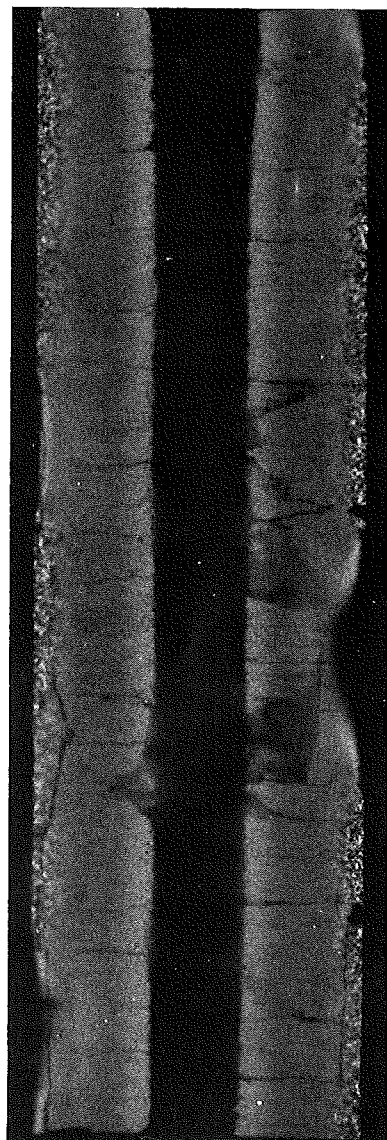
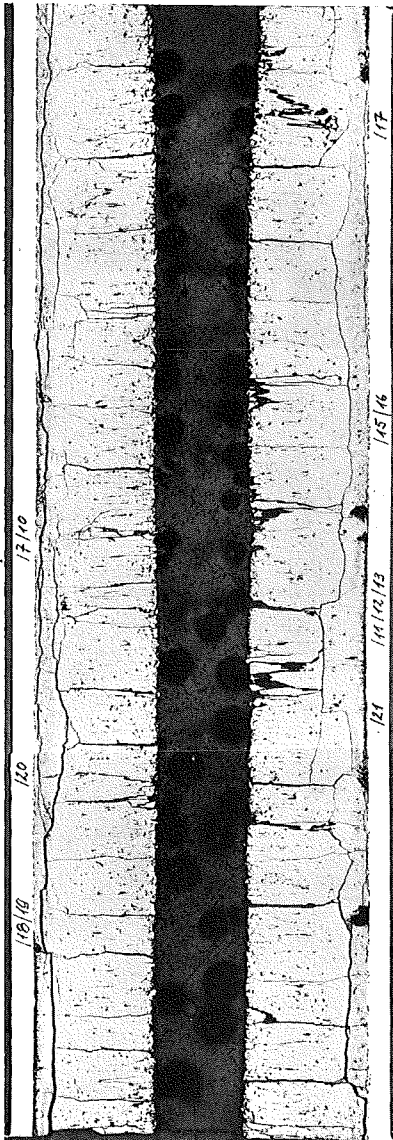
A

B

C

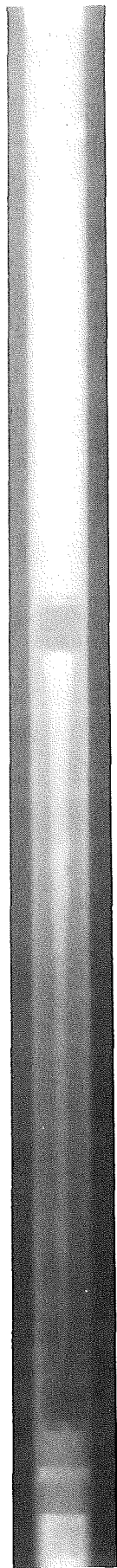


1



2

1mm



Prüfling 4B-14

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

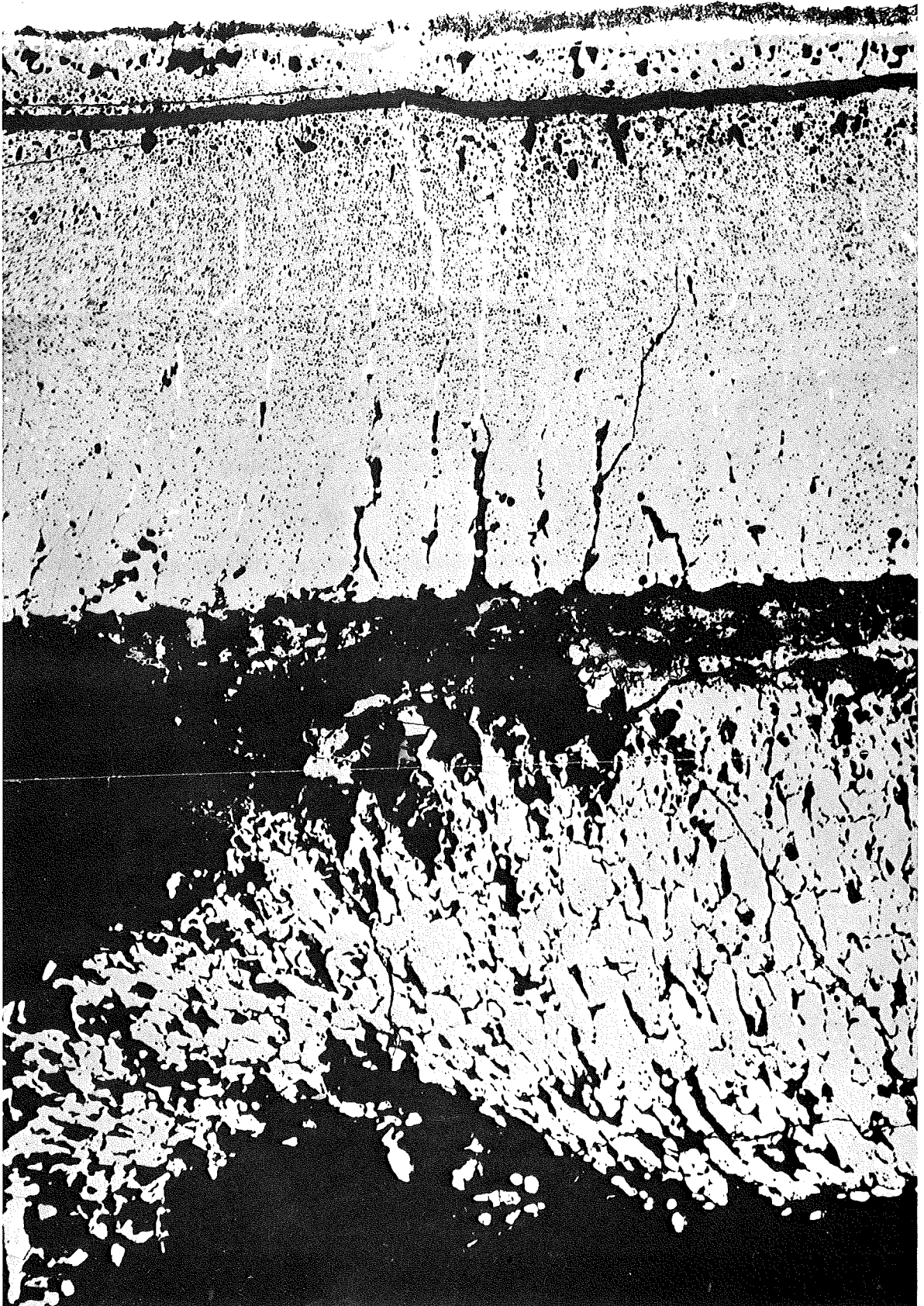
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 247 Vollasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 65,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 563 / 446 W/cm

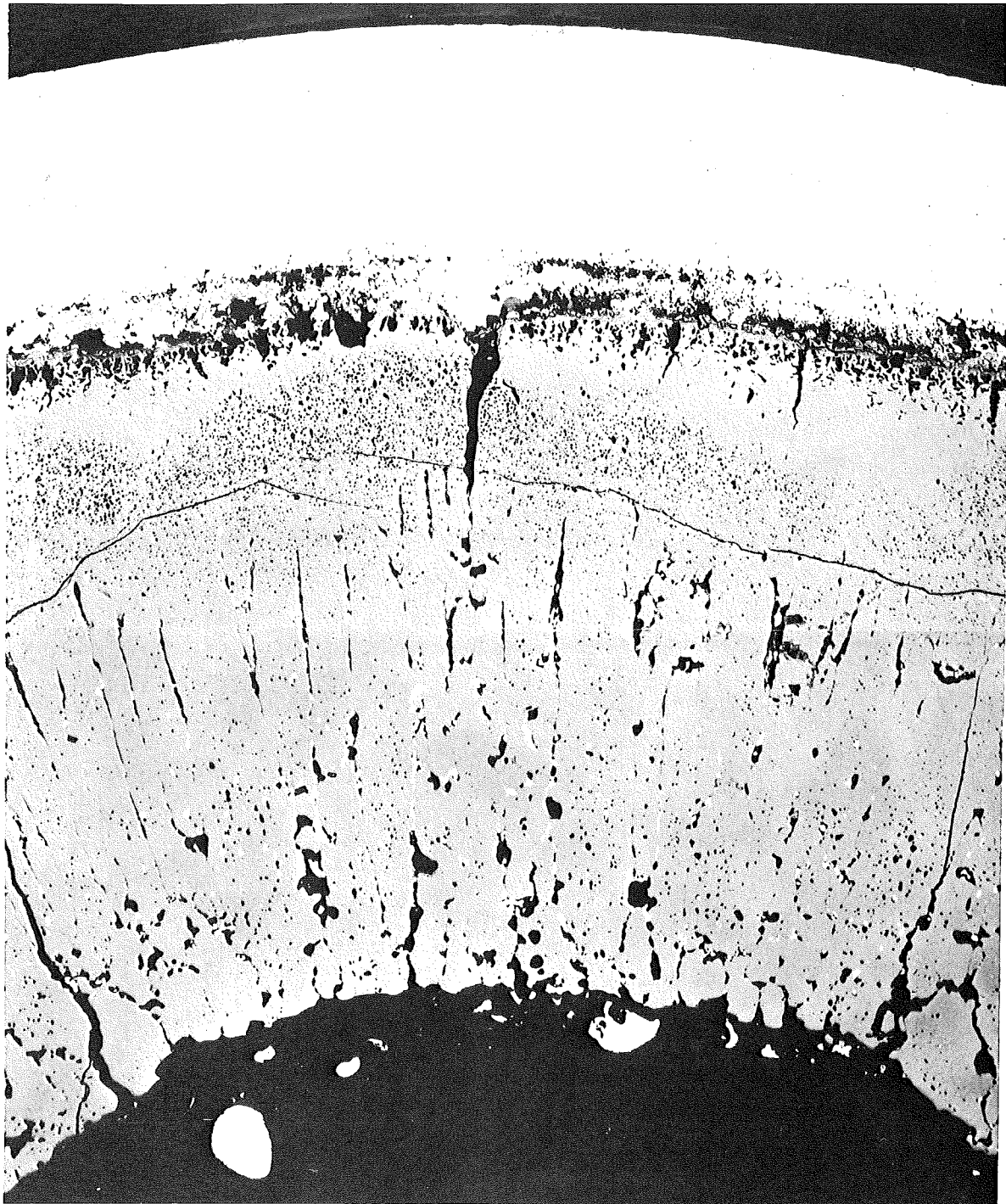
-I/85-
zu Prüfling 4B/13
A1



/11

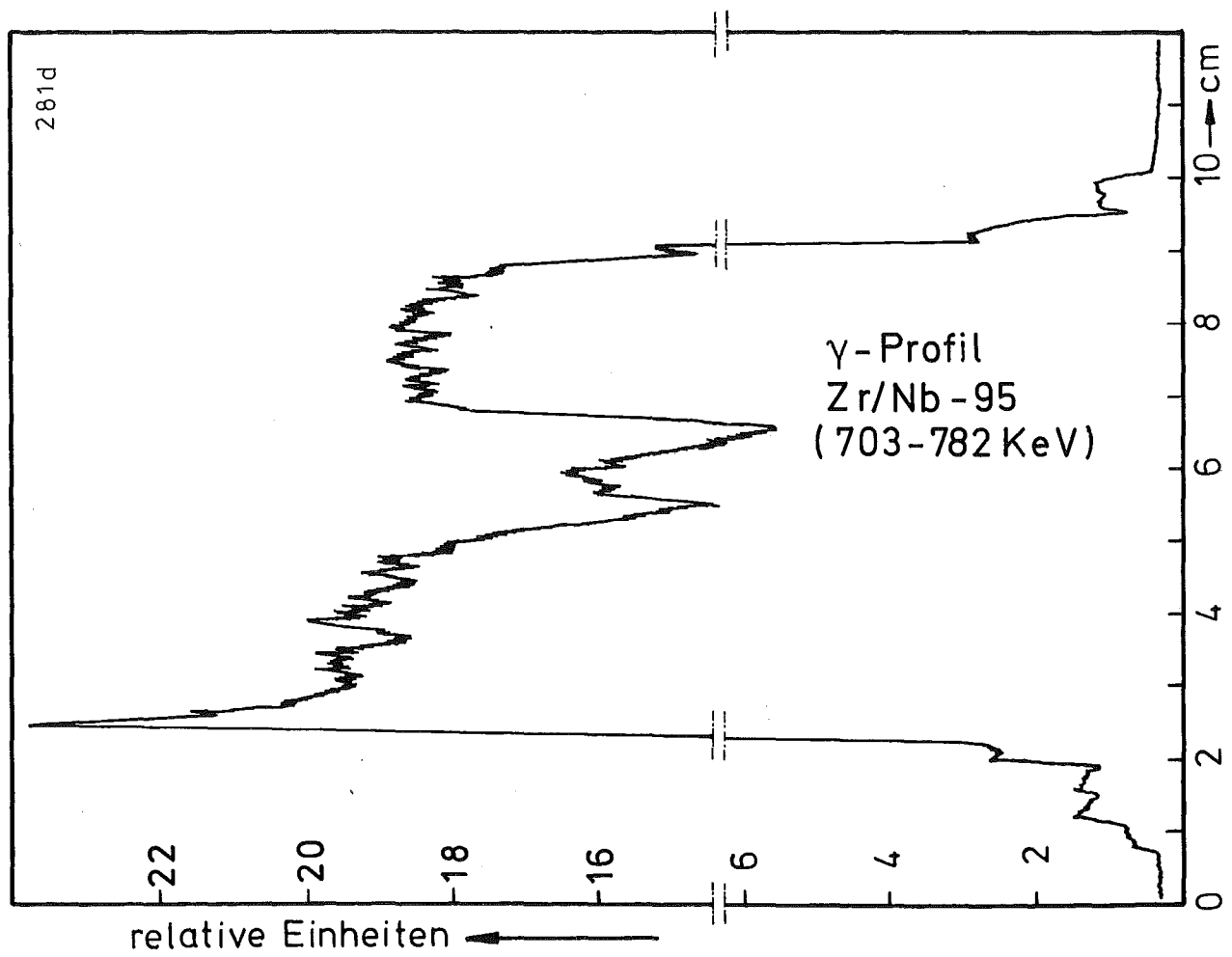
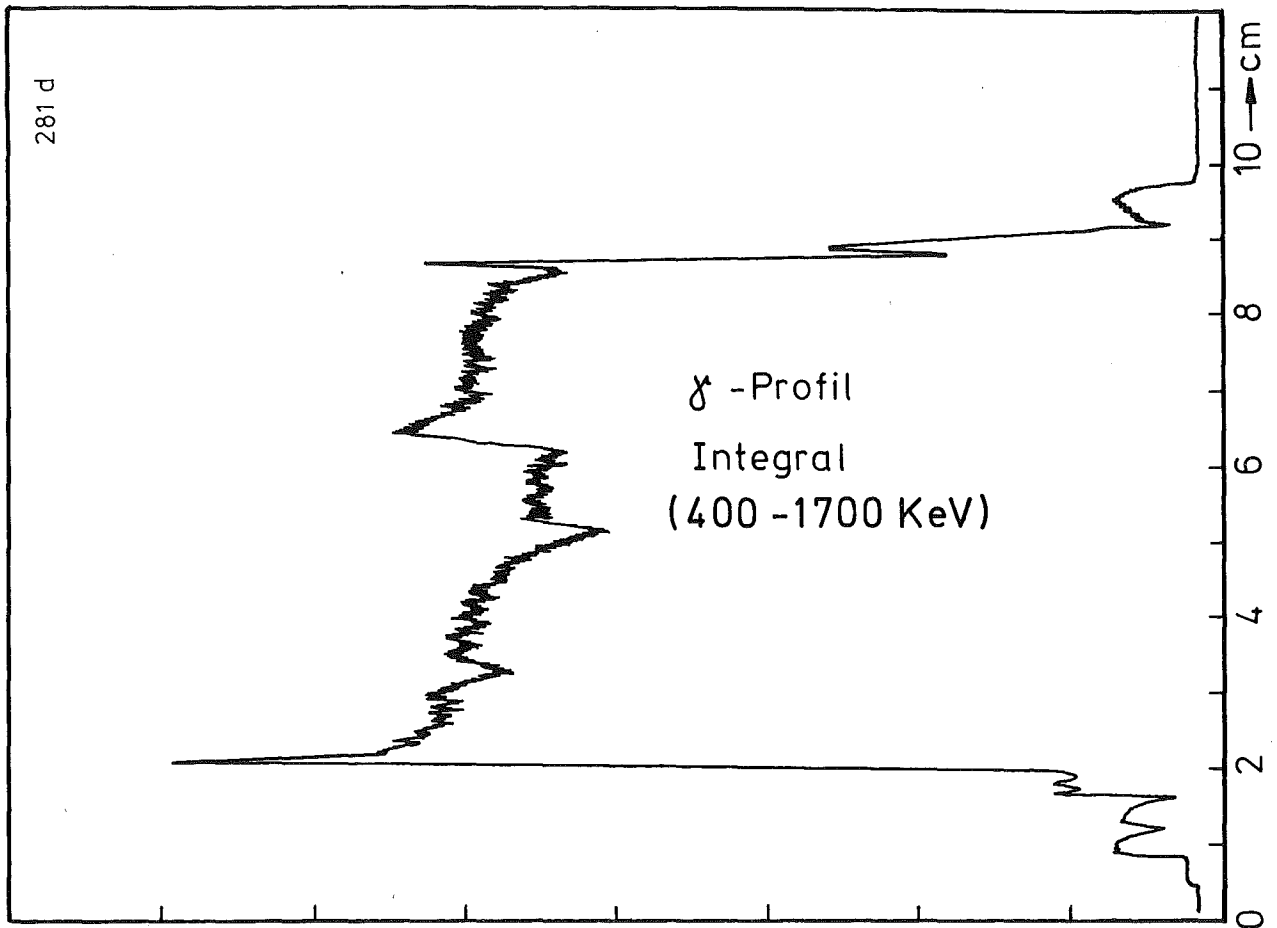
0,1 mm

-I/86-
zu Prüfling 4B/13
A2



14

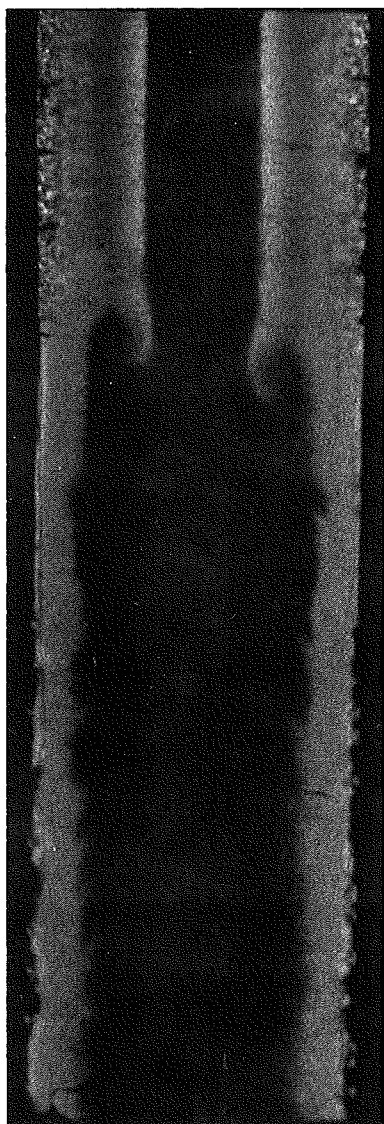
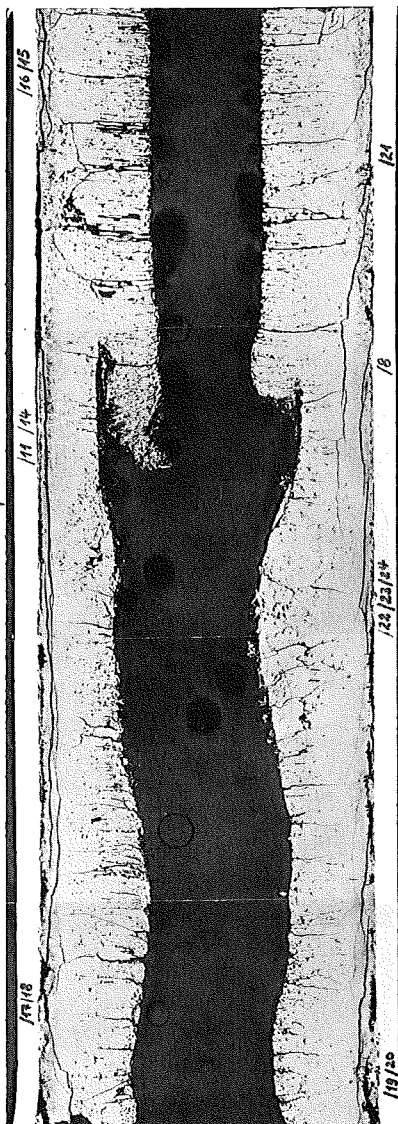
—|—
0,1mm



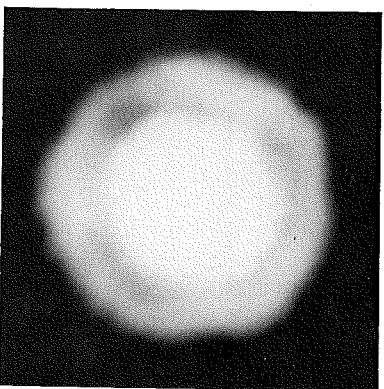
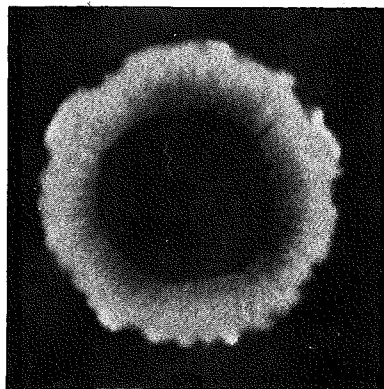
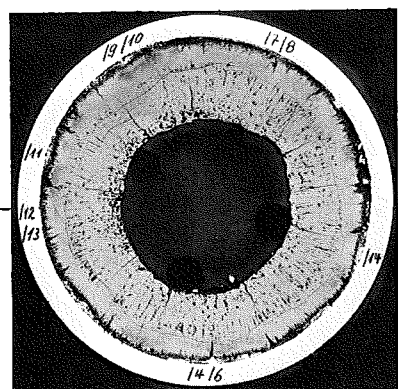
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-13

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

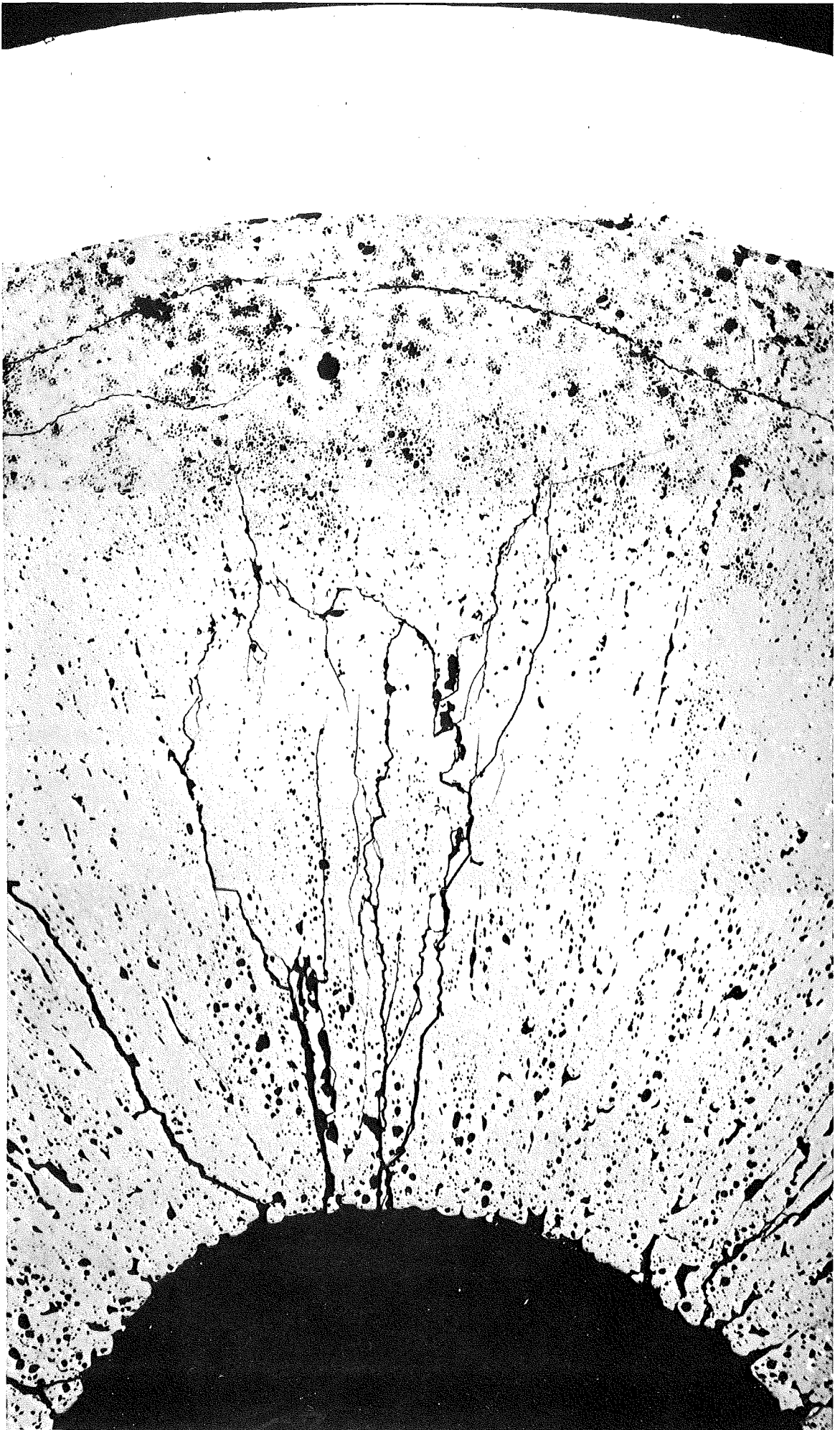
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

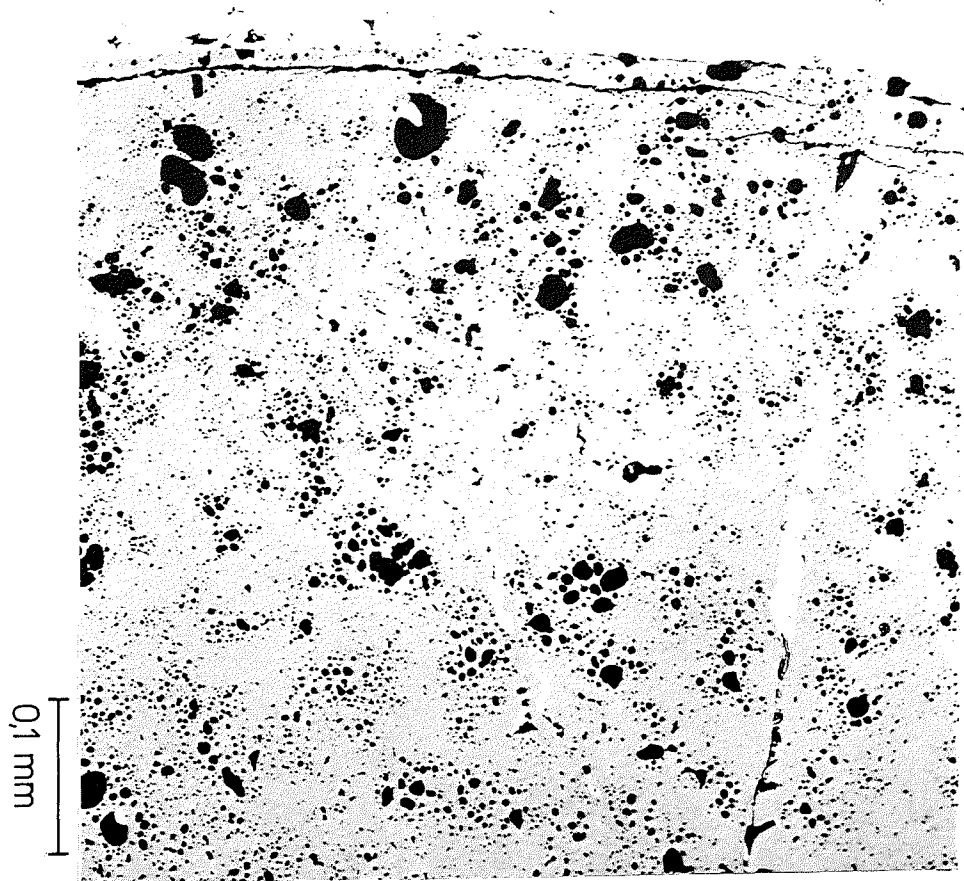
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 247 Vollasttage
Ende : 1. 6. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 55,9 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 627 / 378 W/cm

-1/89-
zu Prüfling 4B/18
A1

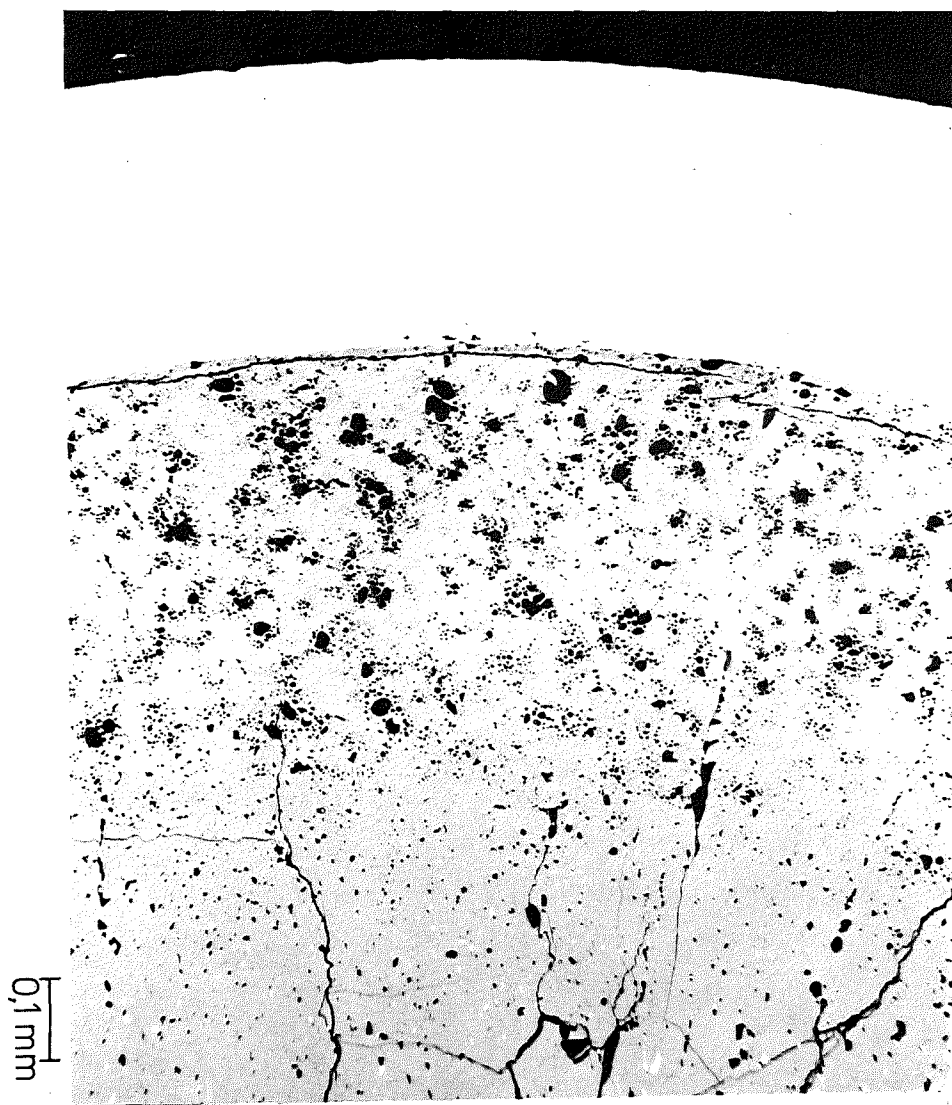


14

0,1 mm

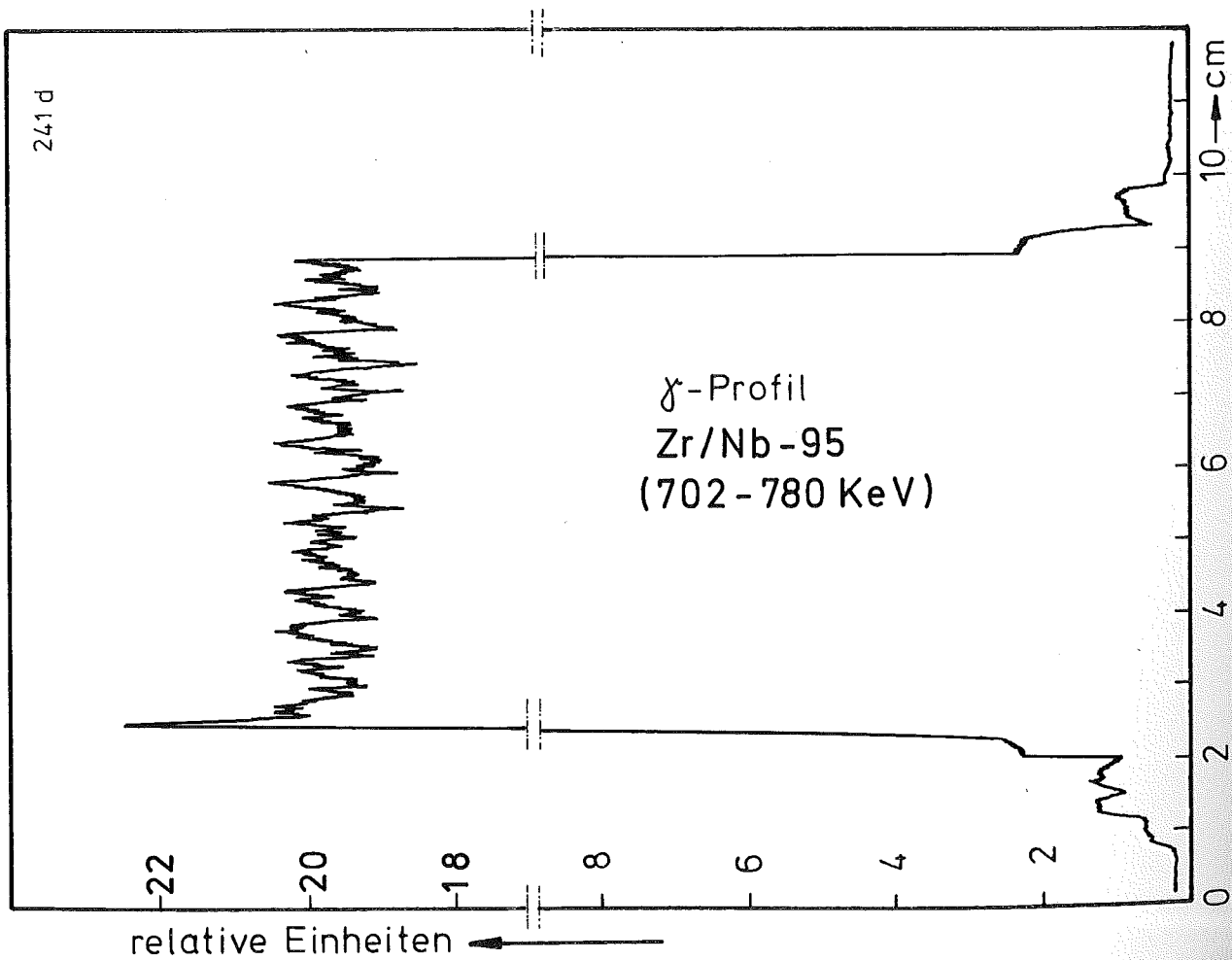
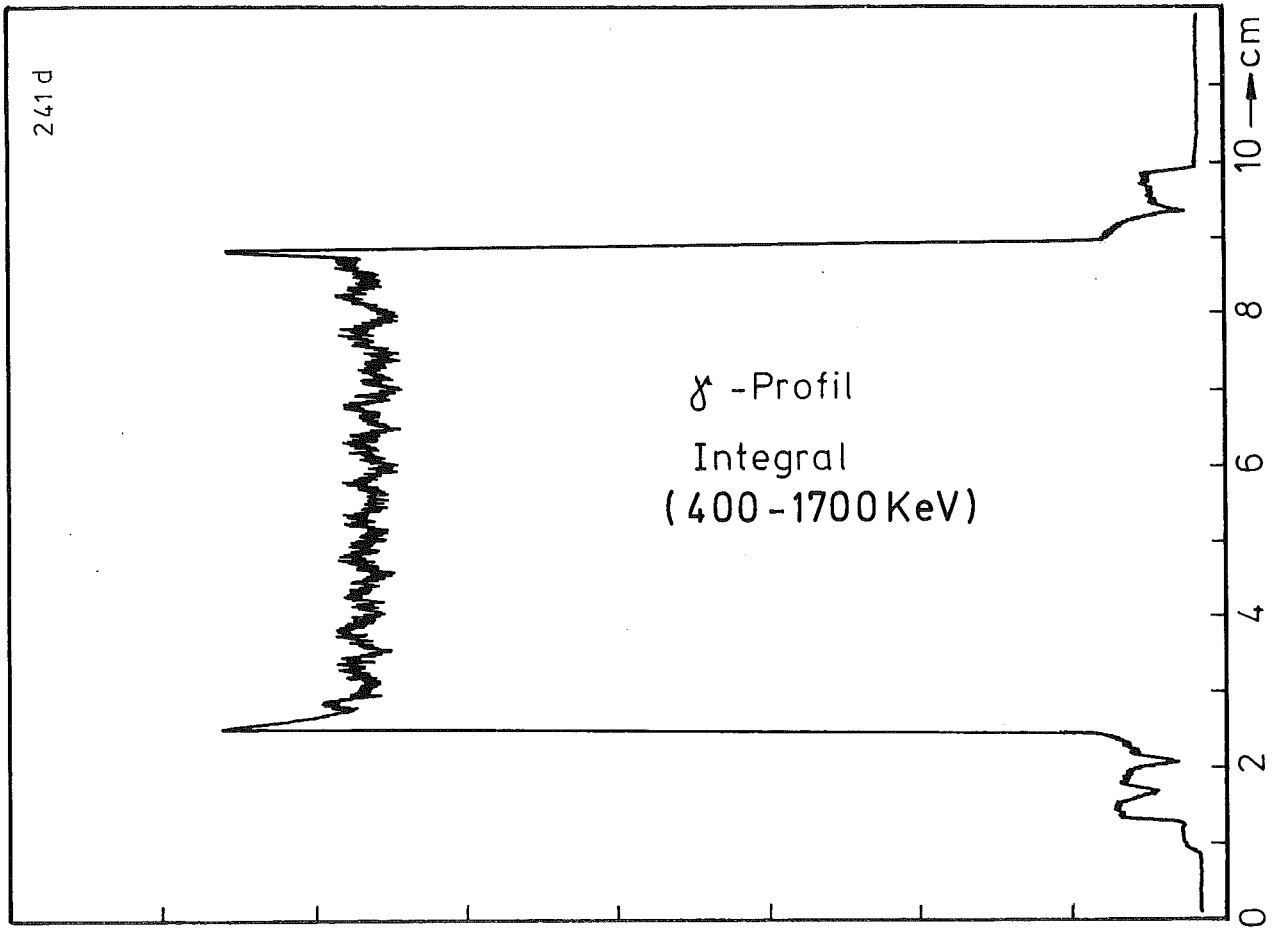


HZ-3a-56-4B/18-1/11 200x



HZ-3a-56-4B/18-1/10 100x

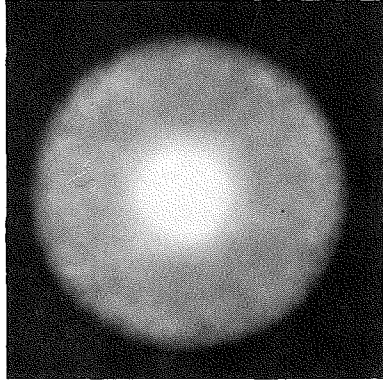
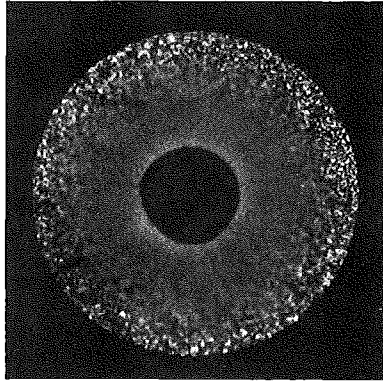
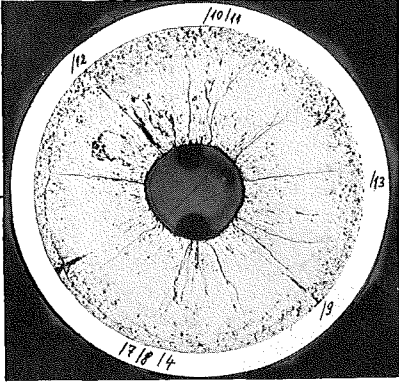
-1/90 -
zu Prüfung 4B/18
A1



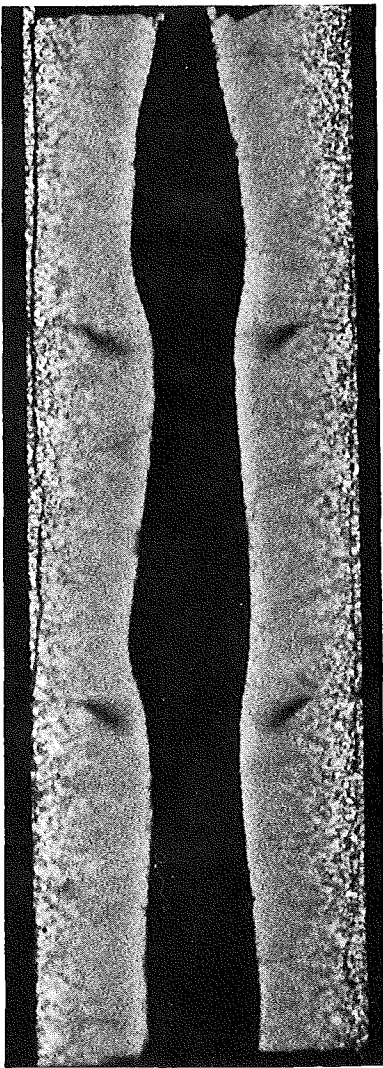
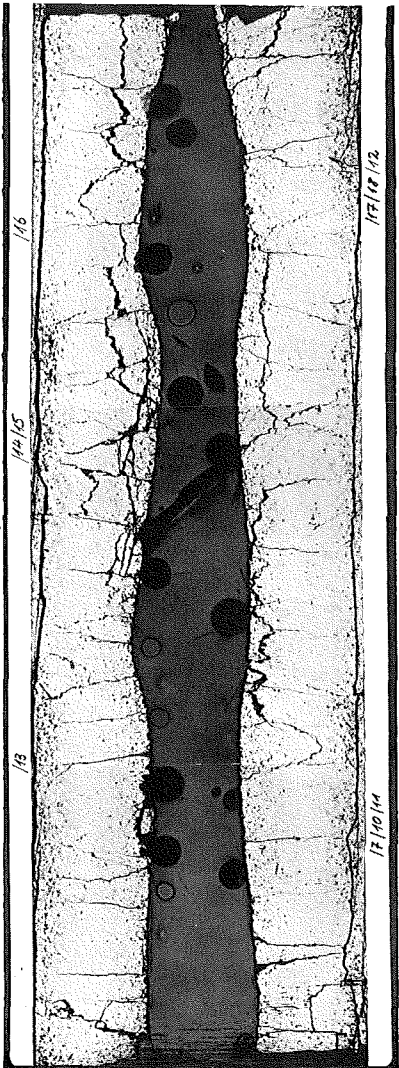
A

B

C

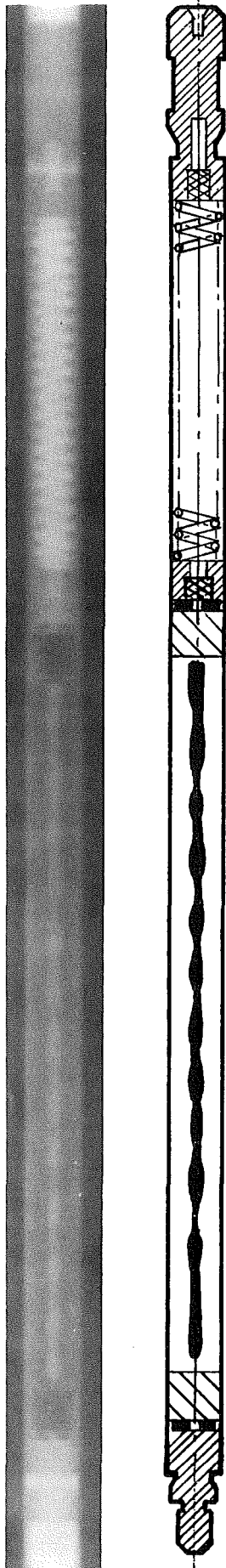


1



2

1mm



Prüfling 4B-18

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

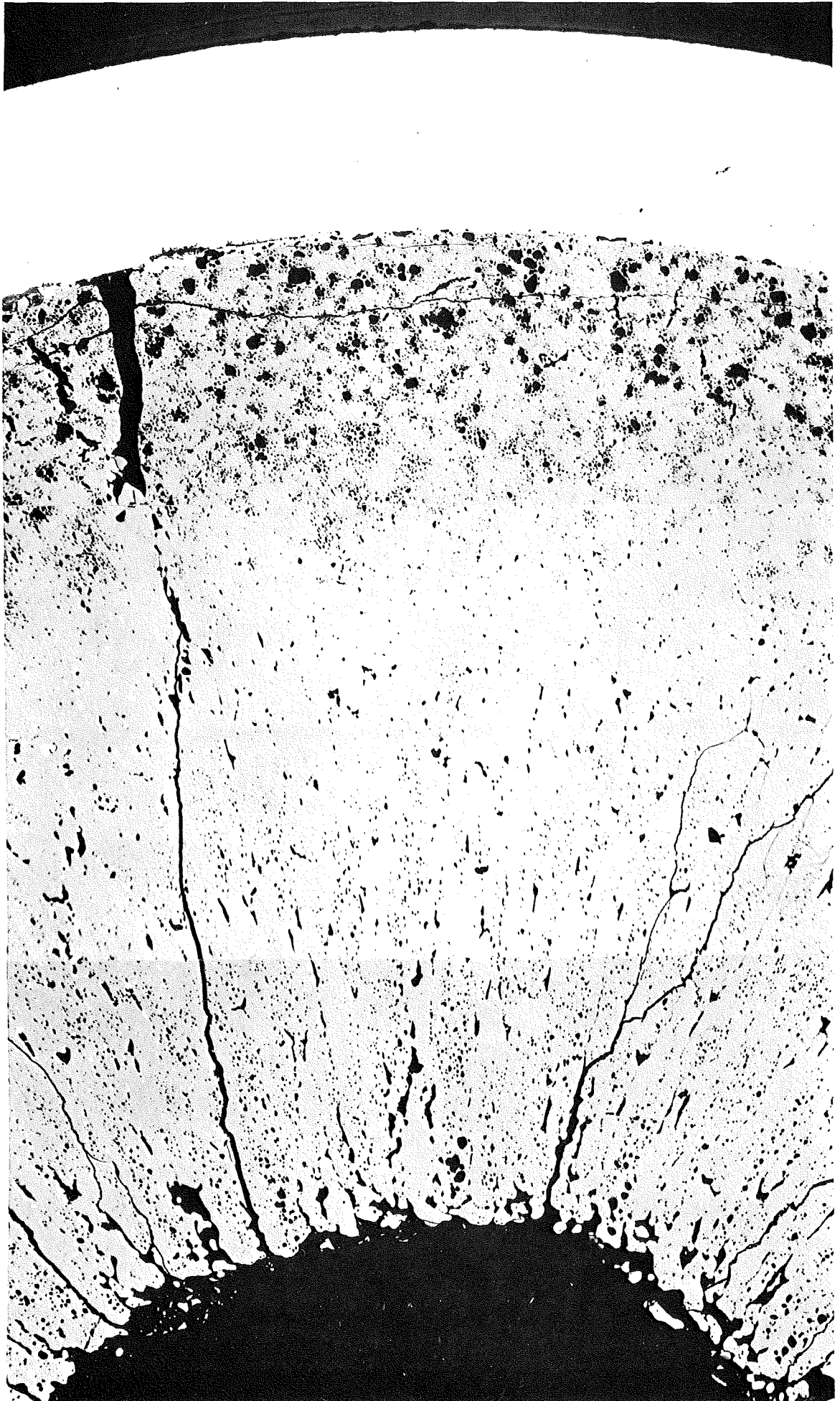
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 305,5 Volllasttage
Ende : 17. 8. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 59,2 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 442 / 326 W/cm

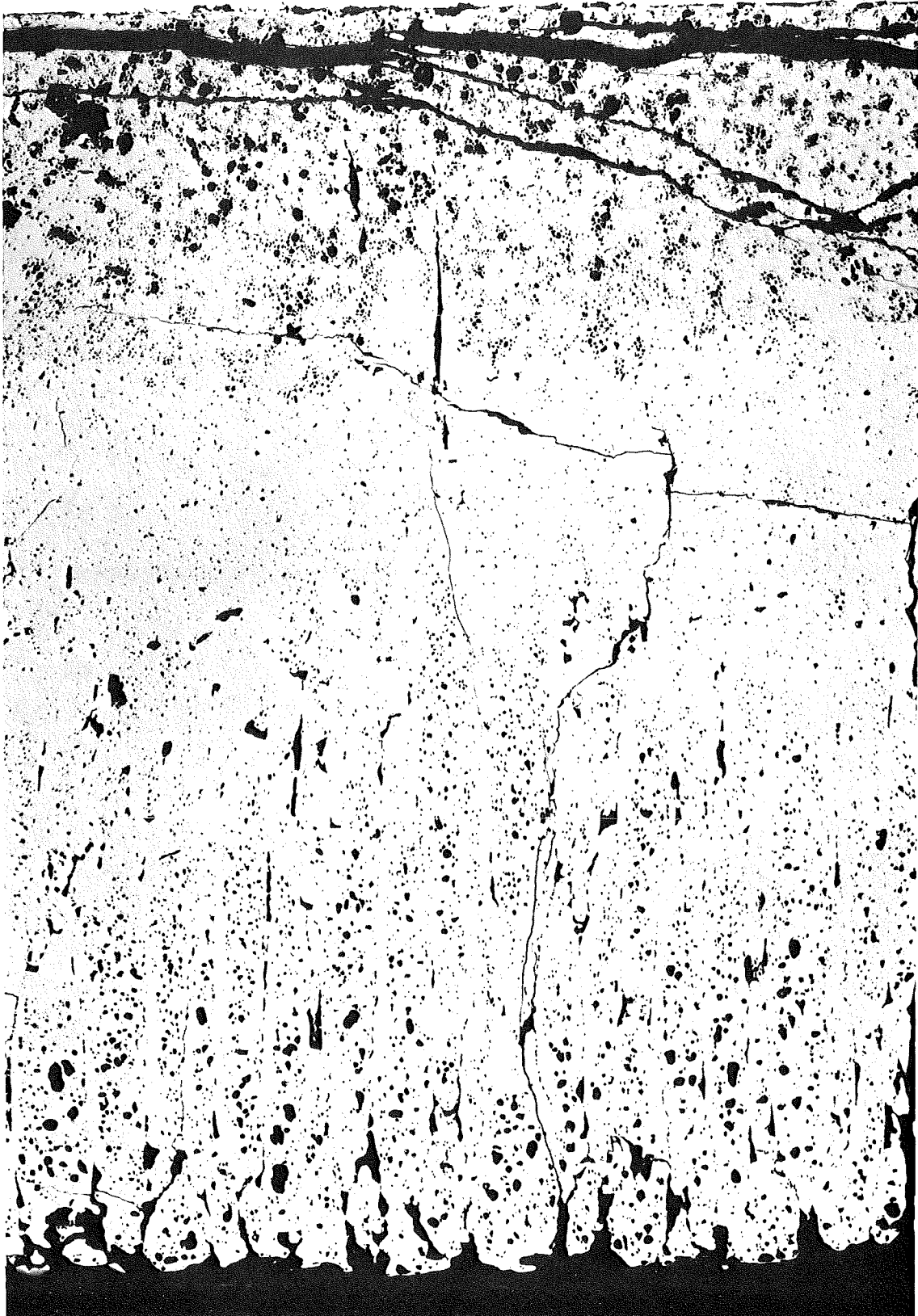
-I/93-
zu Prüfling 4B/16
A1

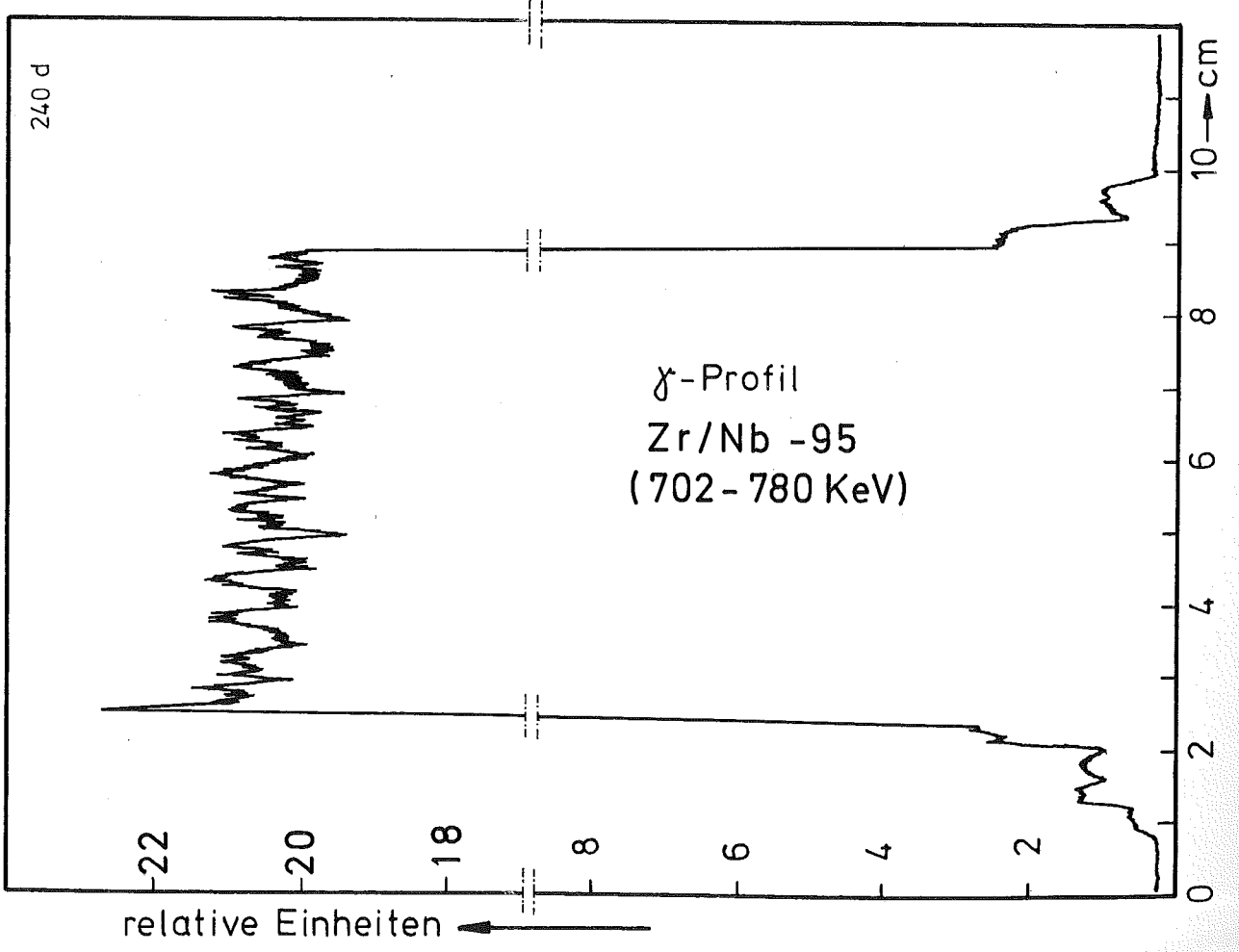
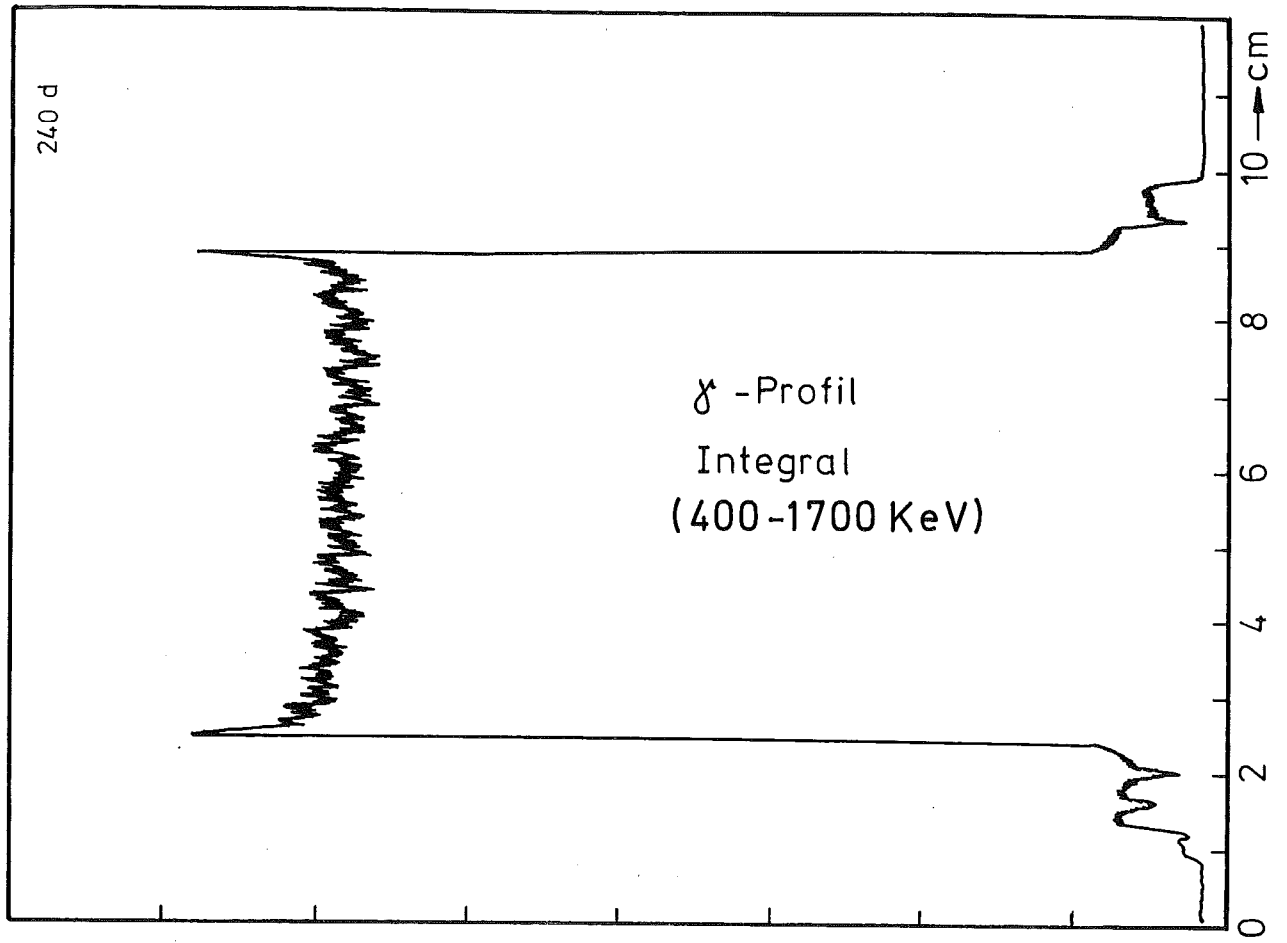


14

0,1mm

-1/94-
zu Prüfling 4B/16
A2

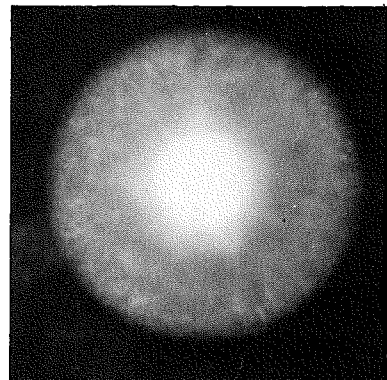
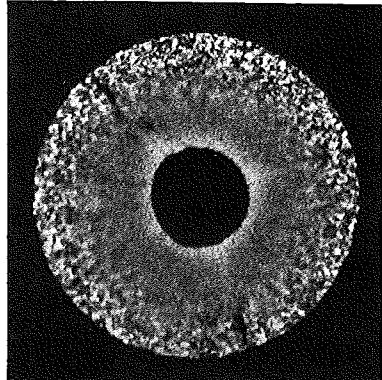
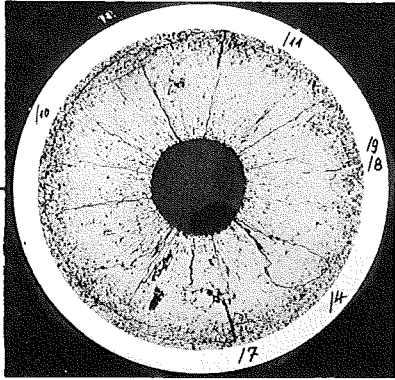




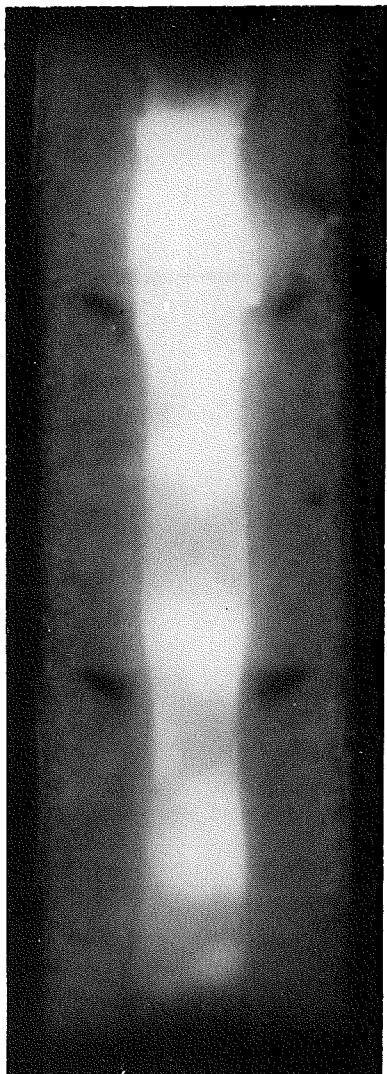
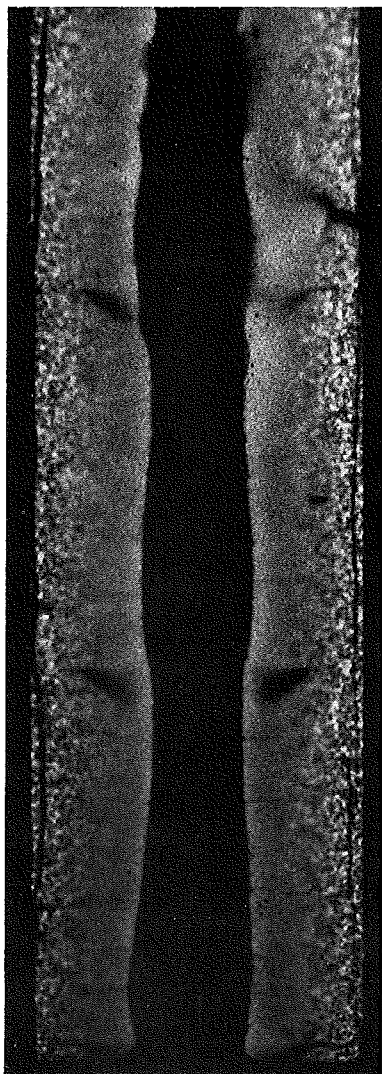
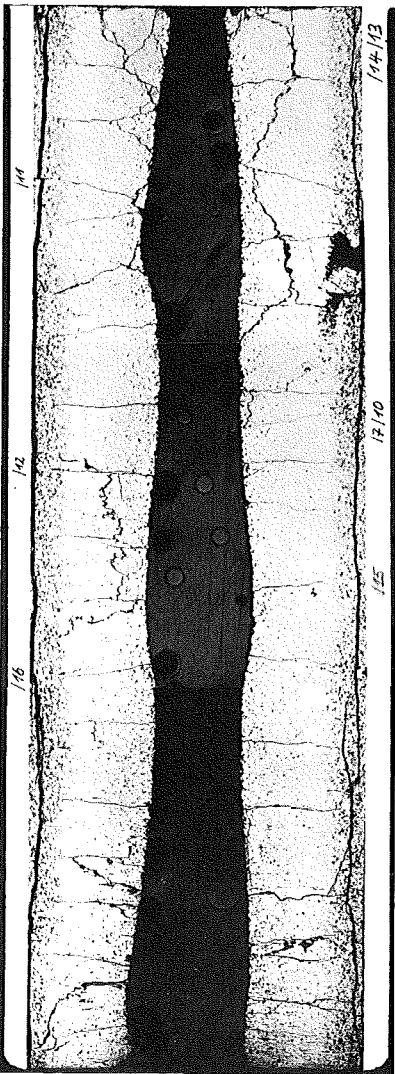
A

B

C

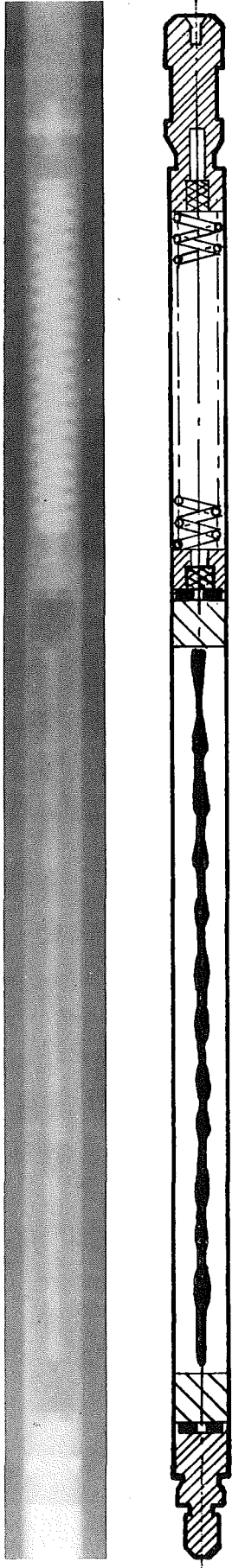


1



2

1mm



Prüfling 4B-17

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

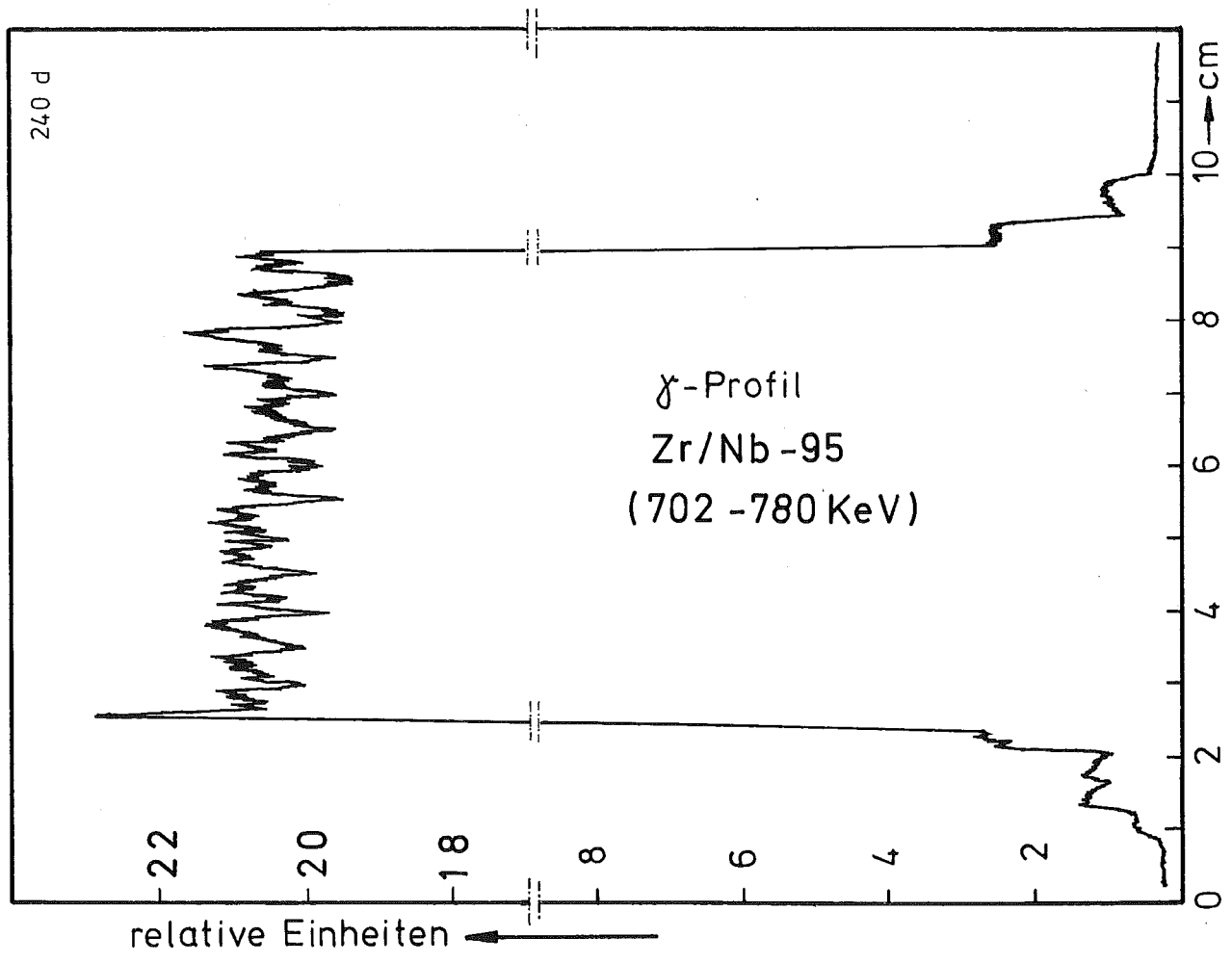
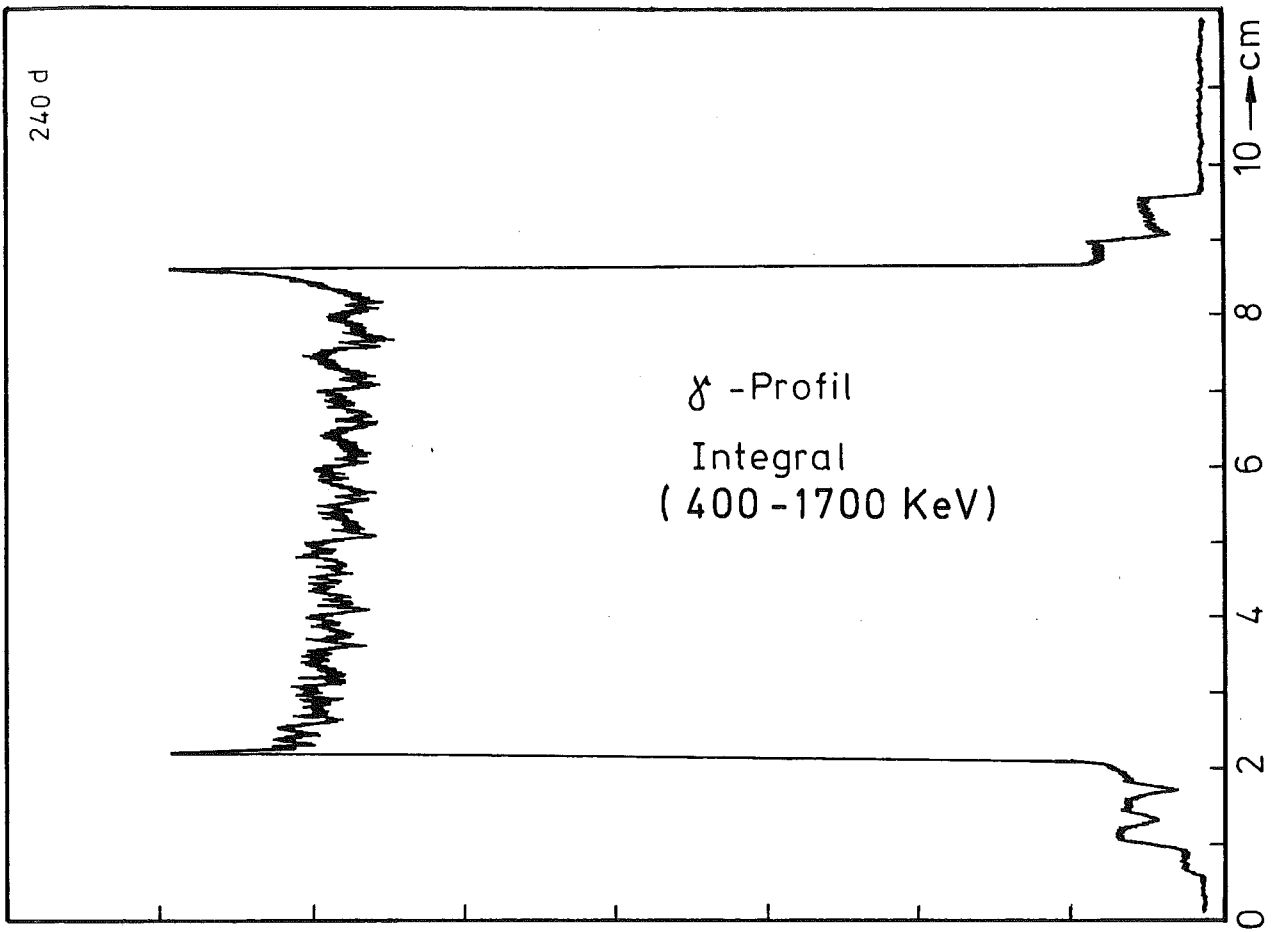
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

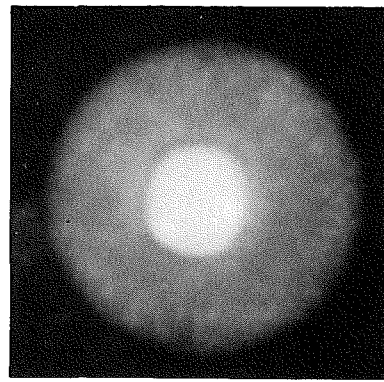
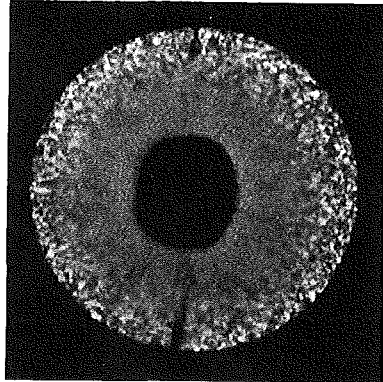
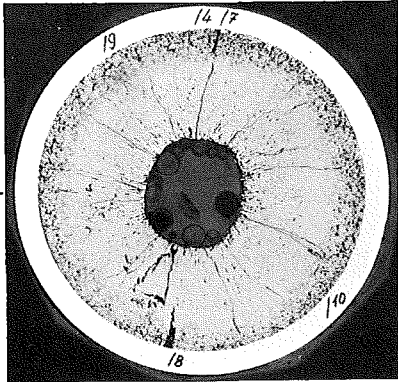
Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 305,5 Vollasttage
Ende : 17. 8. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 61,3 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 463 / 338 W/cm



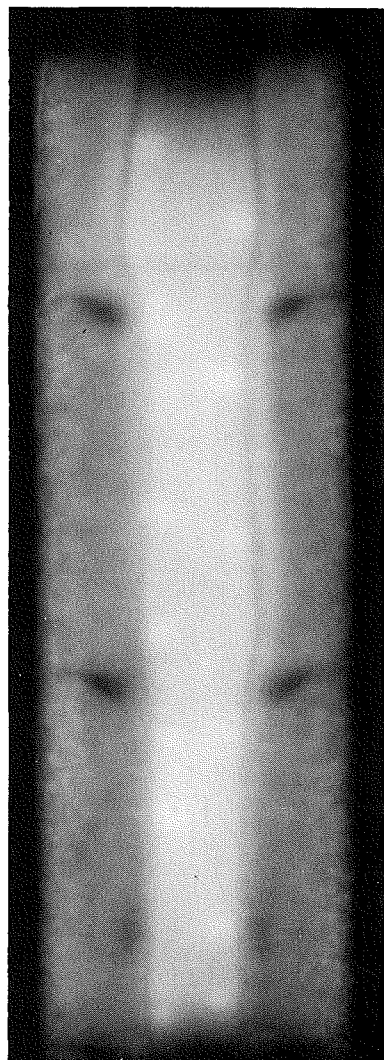
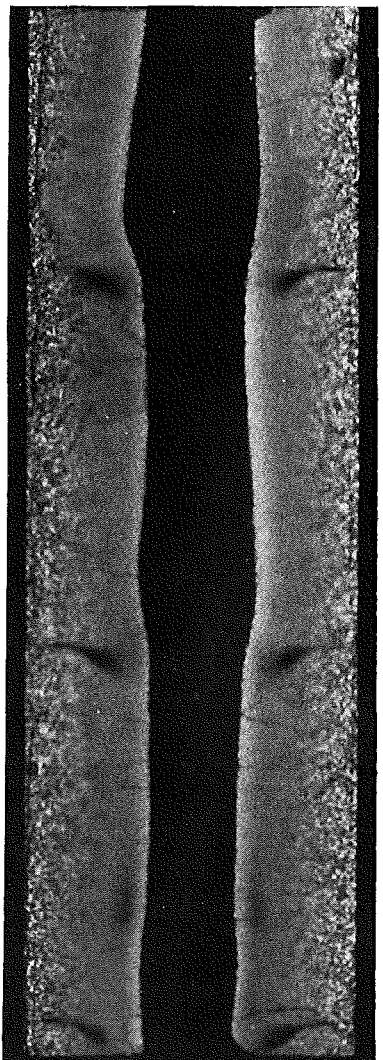
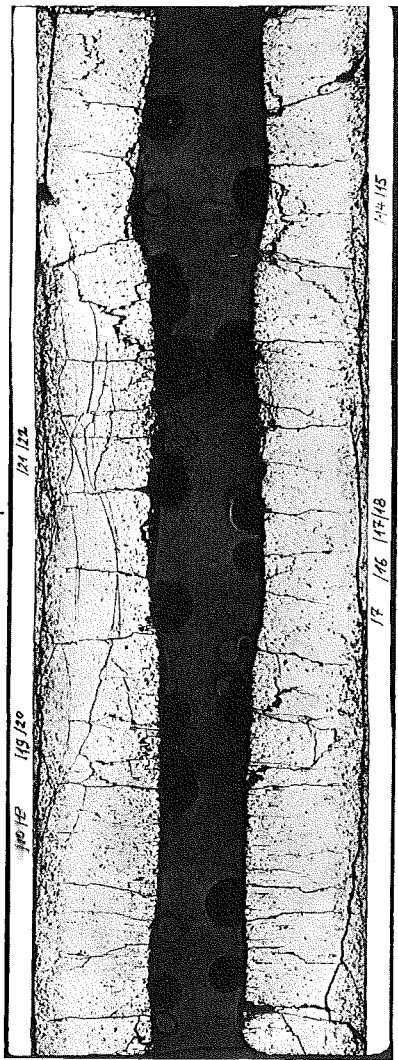
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-16

Brennstoff :

Form : Tabletten einseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

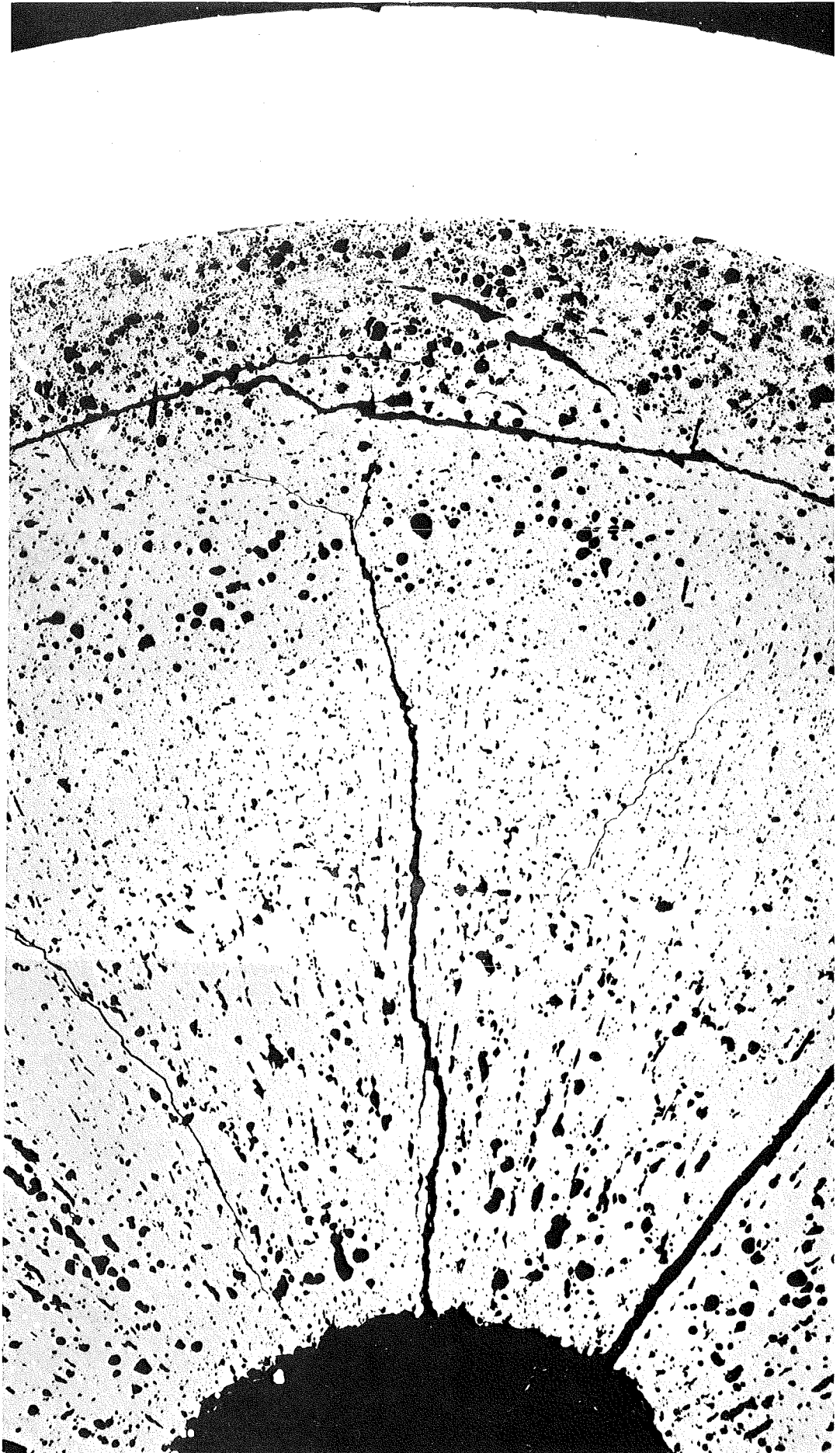
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 305,5 Vollasttage
Ende : 17. 8. 70
Rechn. Abbrand mittl. : 61,6 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 471 / 338 W/cm

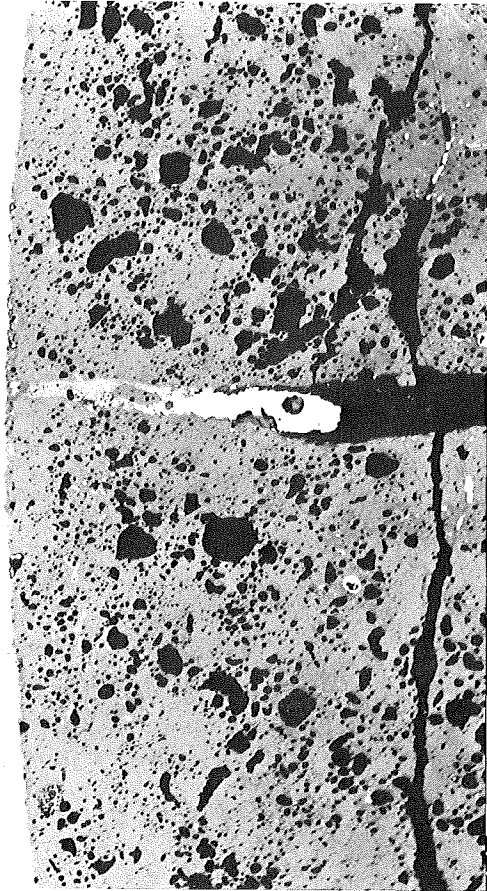
-1/99-
zu Prüfling 4B/21
A1



14

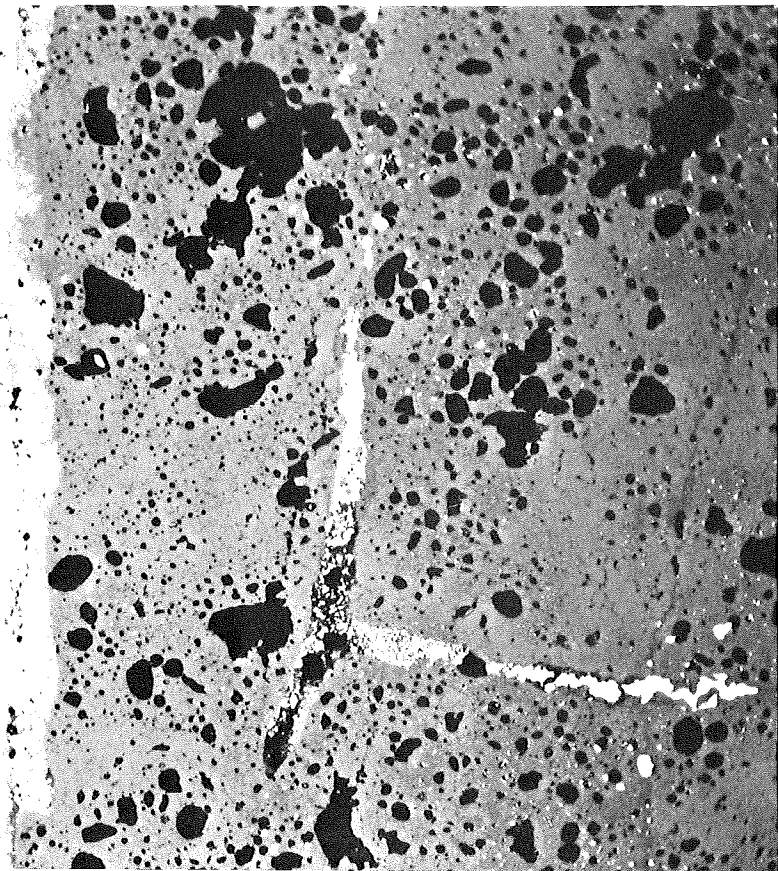
0,1mm

-1/100-
zu Prüfling 4B/21
A1



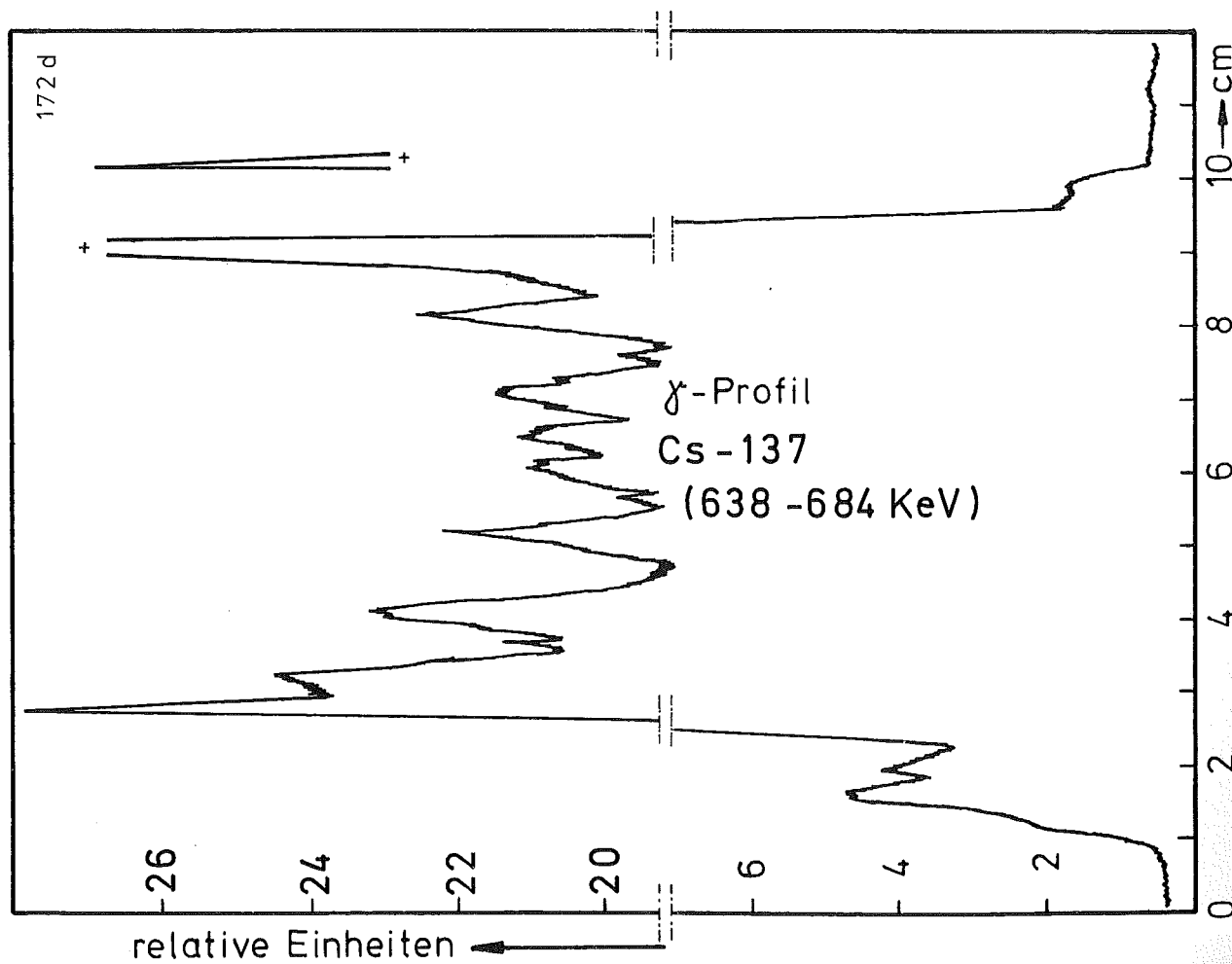
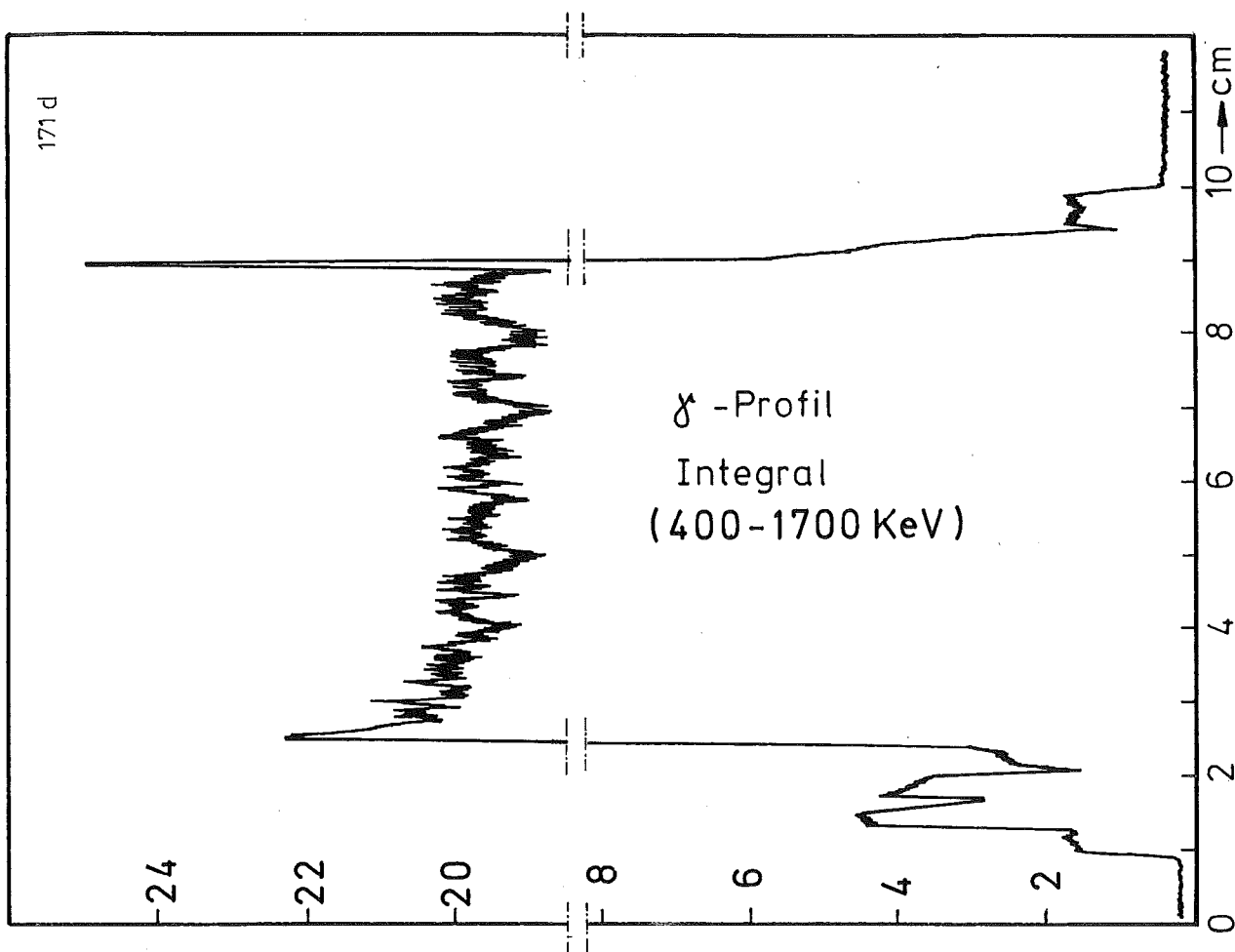
HZ-3a-57-4B/21-1/10 200 x

0,1mm



HZ-3a-57-4B/21-1/9 500 x

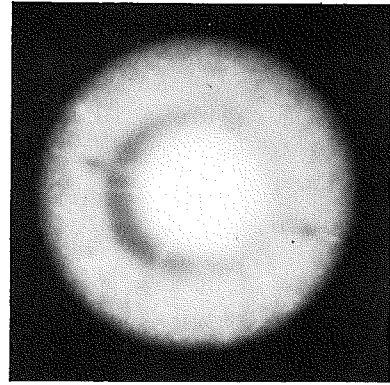
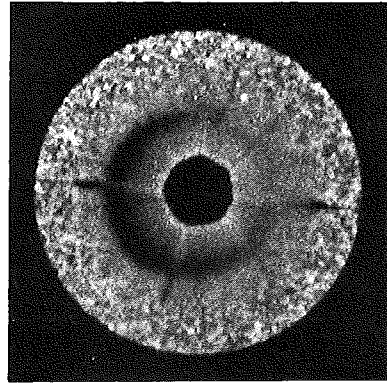
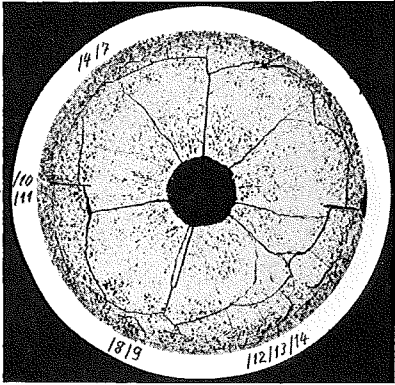
0,04 mm



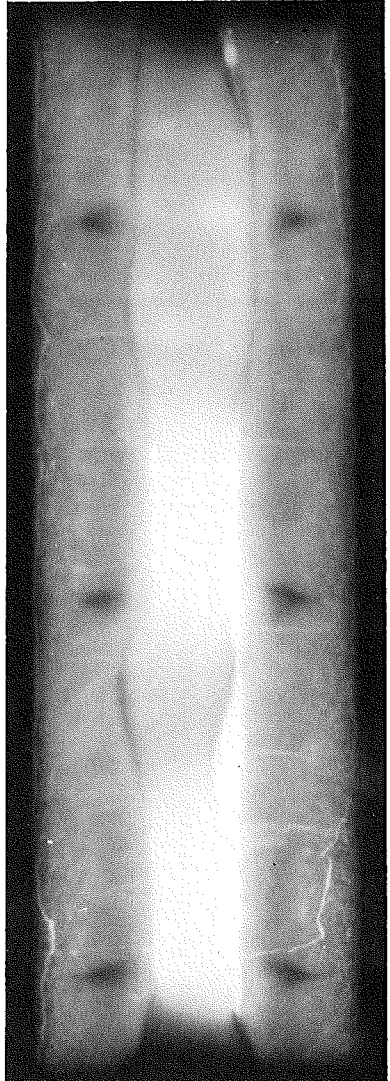
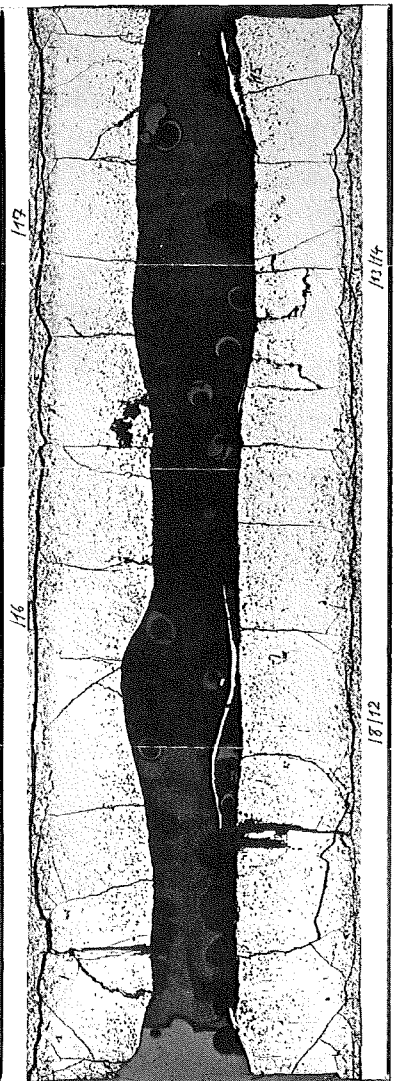
A

B

C

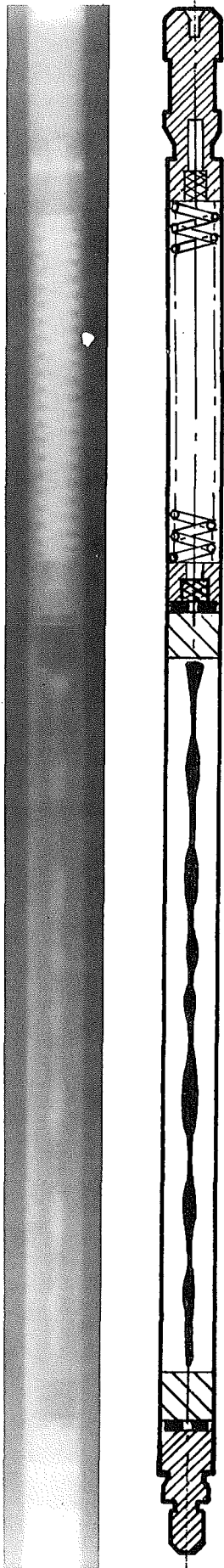


1



2

1mm



Prüfling 4B-21

Brennstoff:

Form	:	Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung	:	UO ₂ -PuO ₂
Tablettendichte	:	84% th.D.

Hülle:

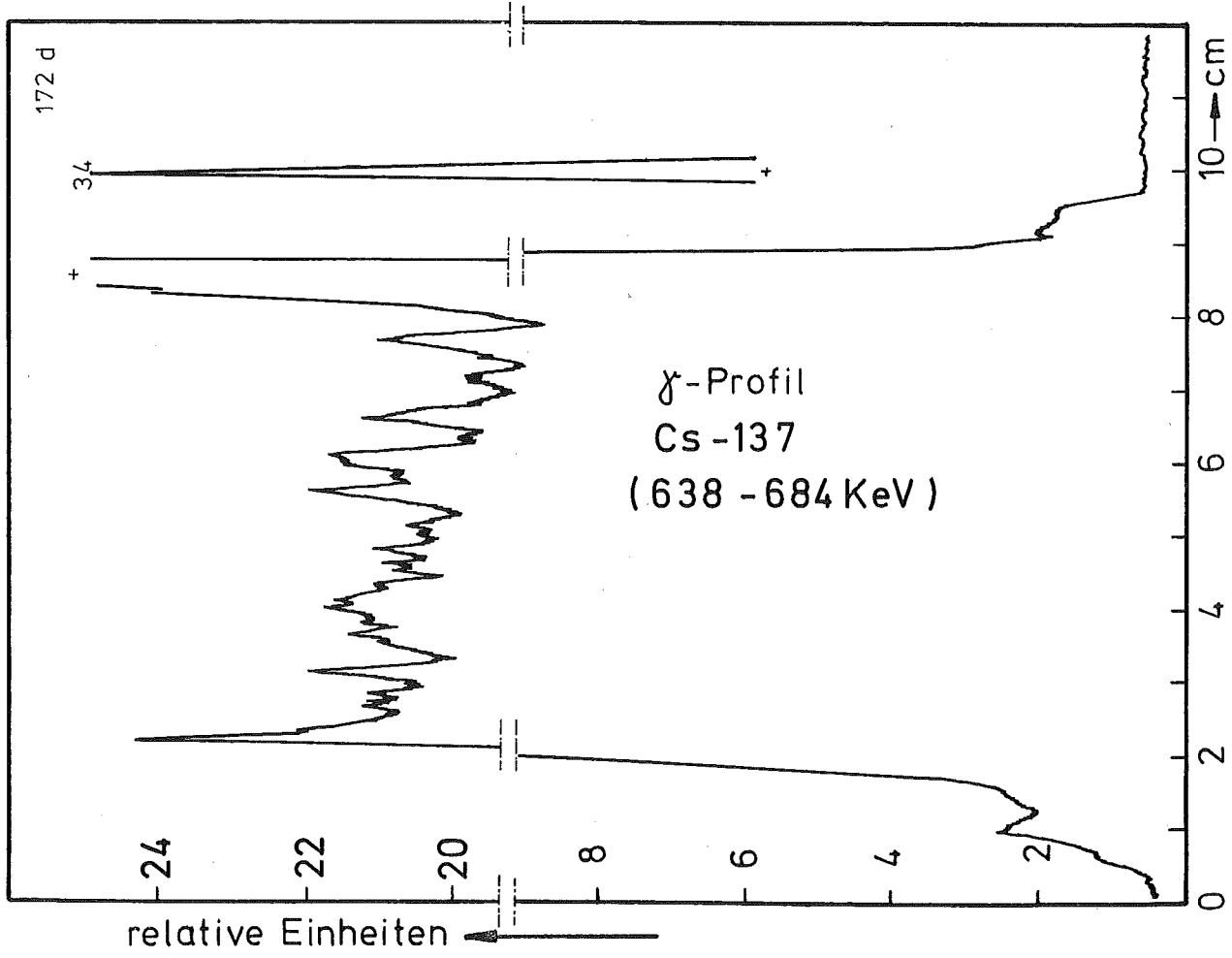
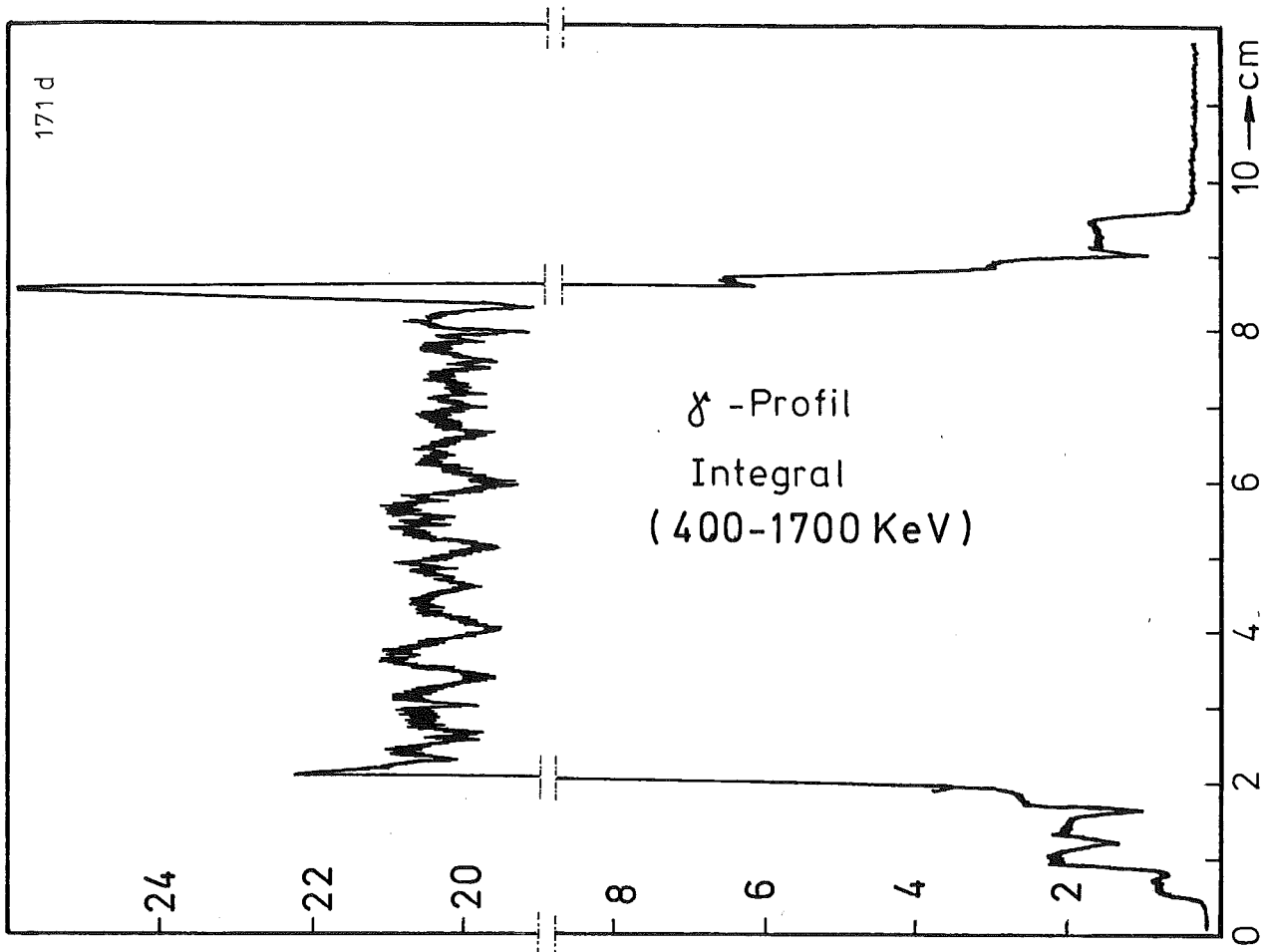
Material	:	1.4988
Aussendurchmesser	:	6,00 mm
Wandstärke	:	0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings	:	172 mm
Länge der Brennstoffsäule	:	80 mm
Radiale Spaltweite	:	0,070 mm
Schmierdichte	:	79,6% th.D.

Bestrahlung:

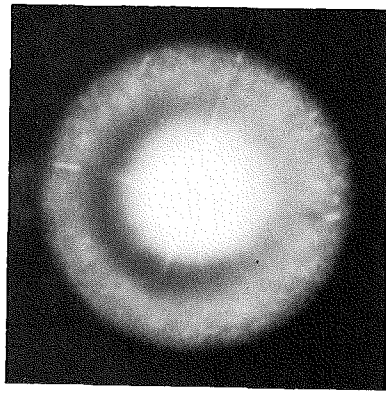
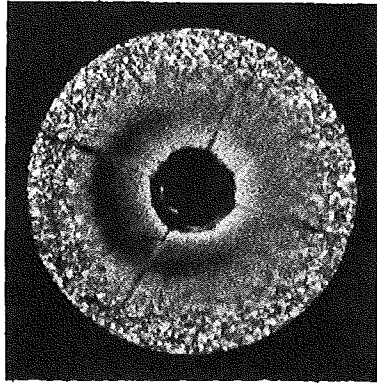
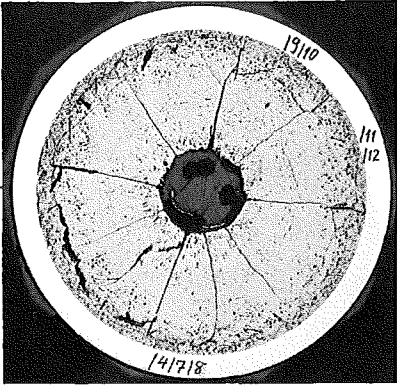
Einrichtung	:	NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer	:	460,4 Vollasttage
Ende	:	29. 3. 71
Rechn. Abbrand mittl.	:	79,4 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl.	:	450 / 291 W/cm



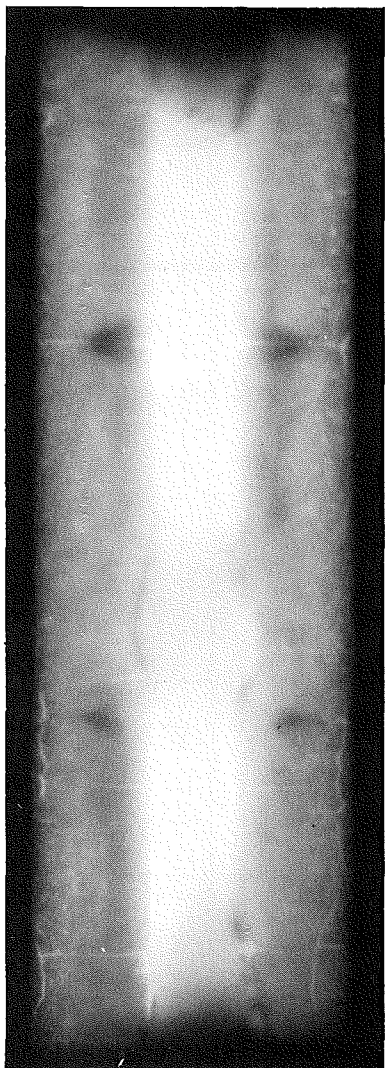
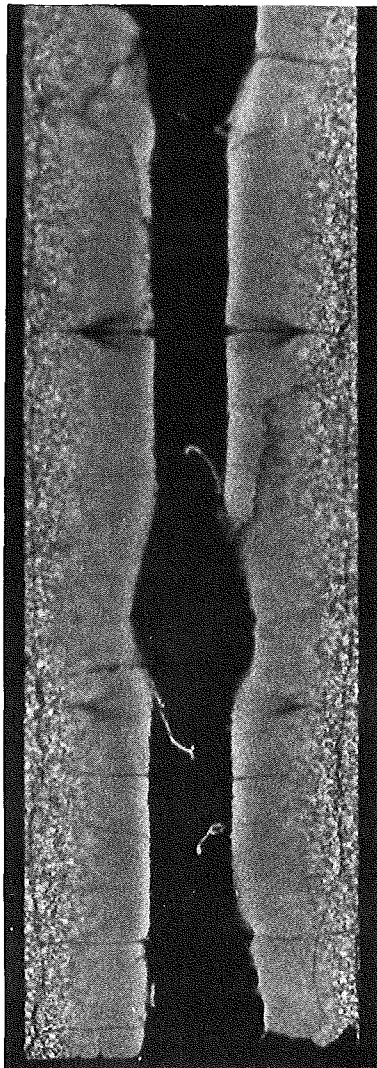
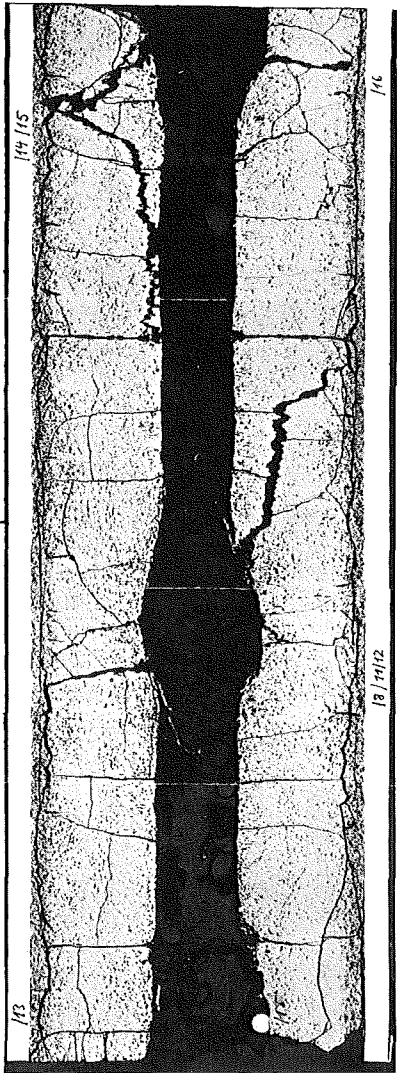
A

B

C

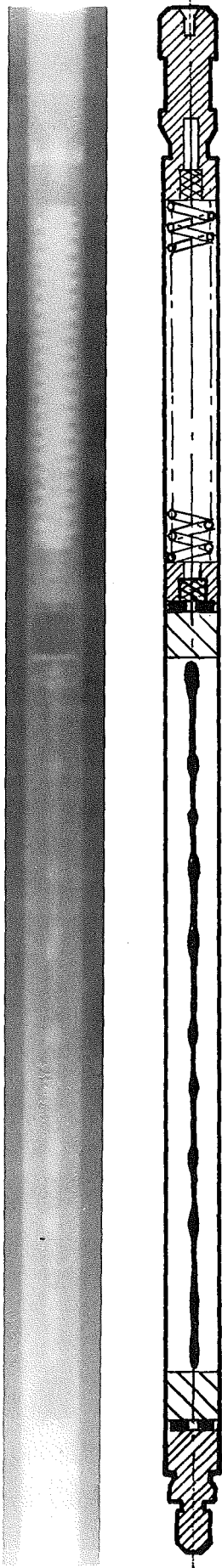


1



2

1mm



Prüfling 4B-20

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

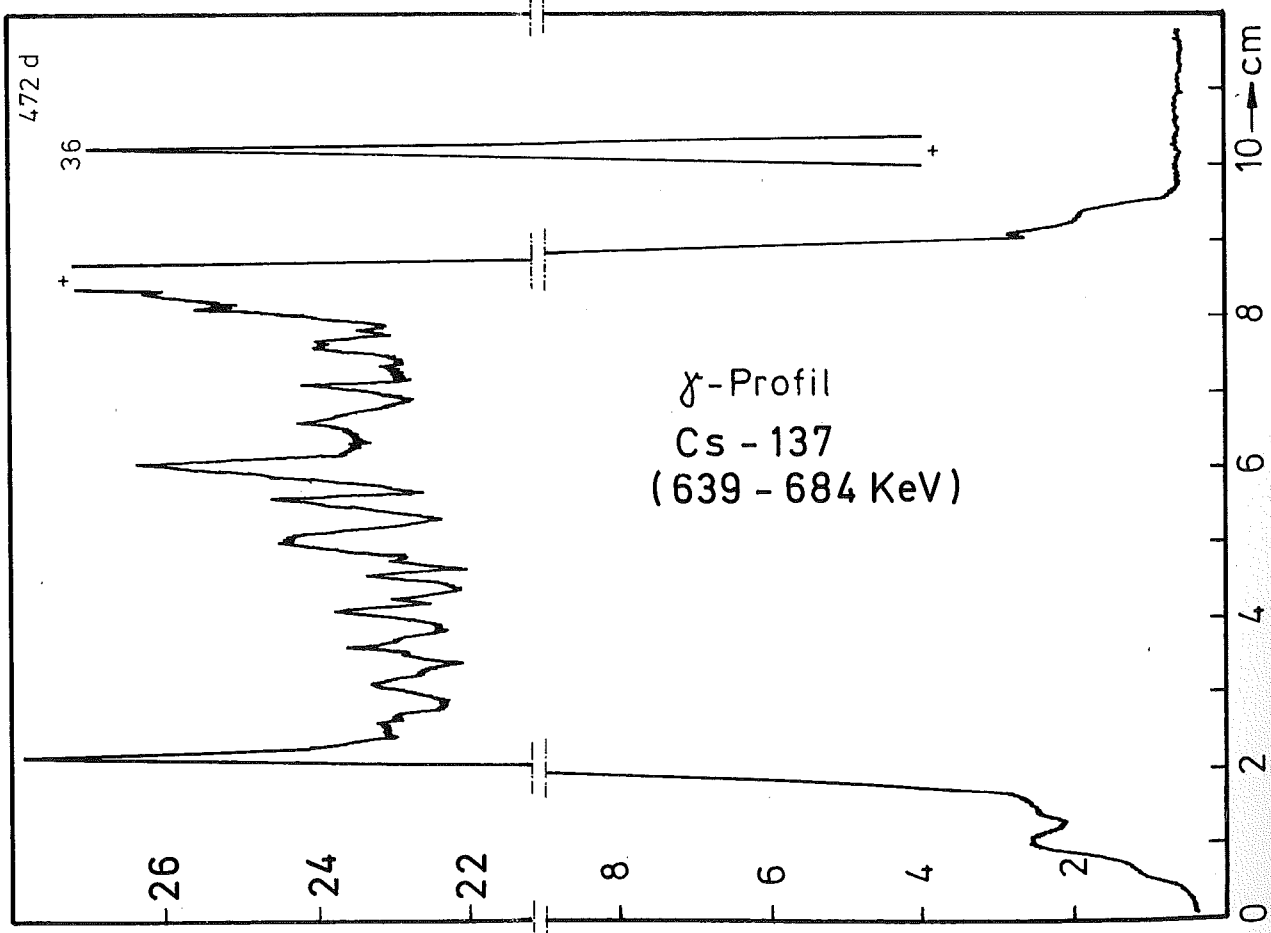
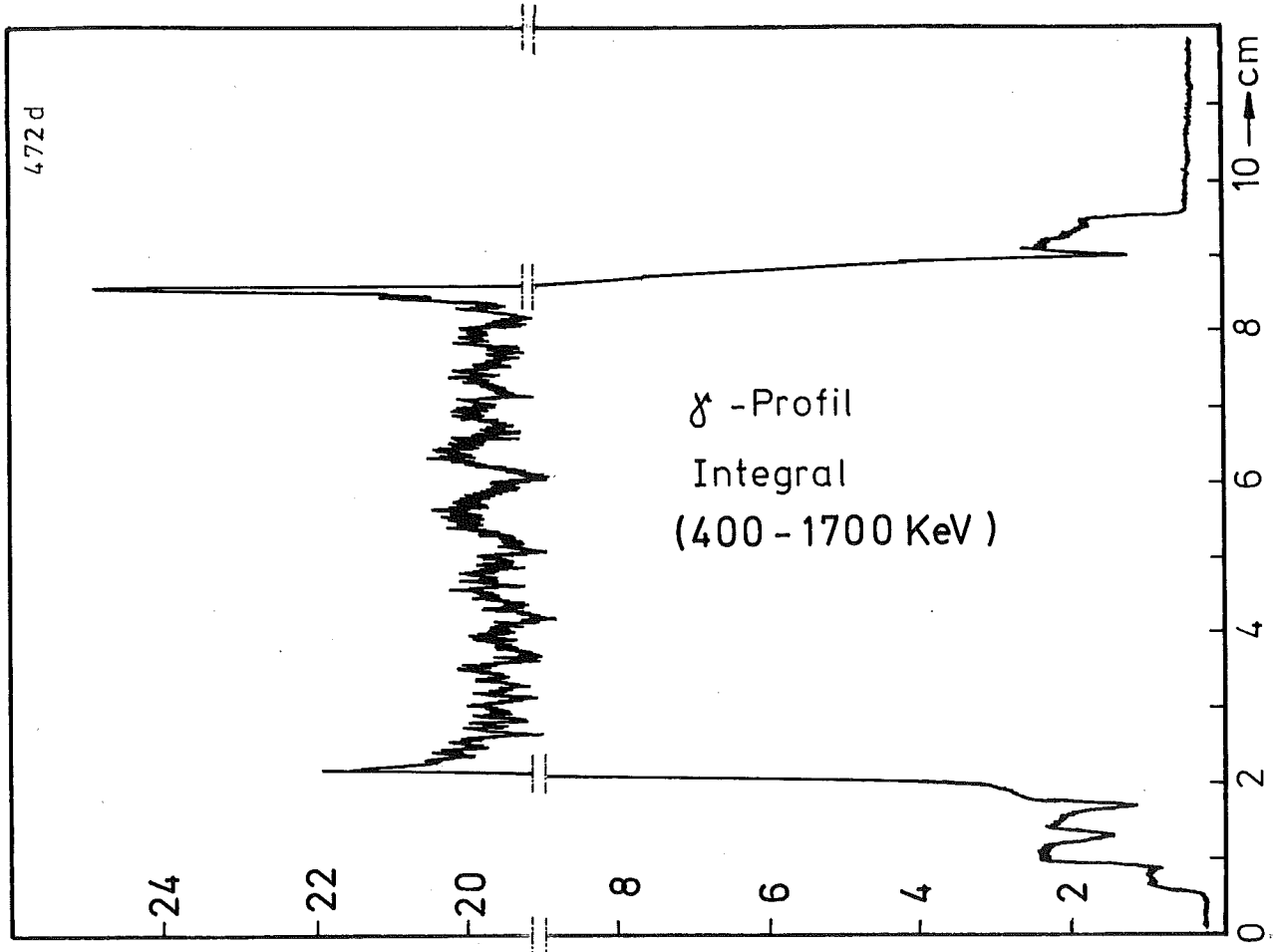
Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 460,4 Vollasttage
Ende : 29. 3. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 83,1 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 445 / 305 W/cm



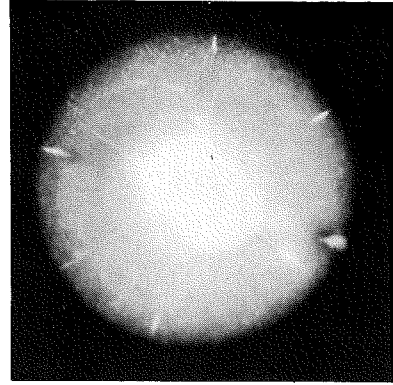
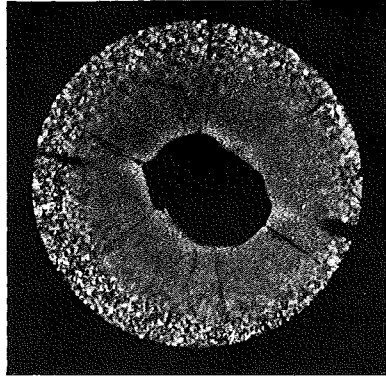
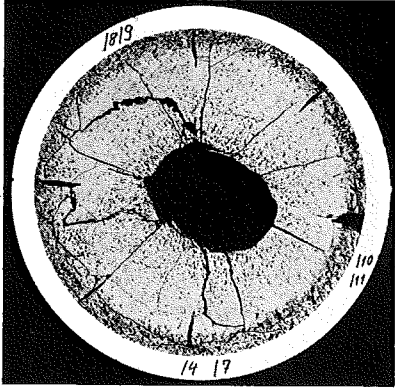
relative Einheiten



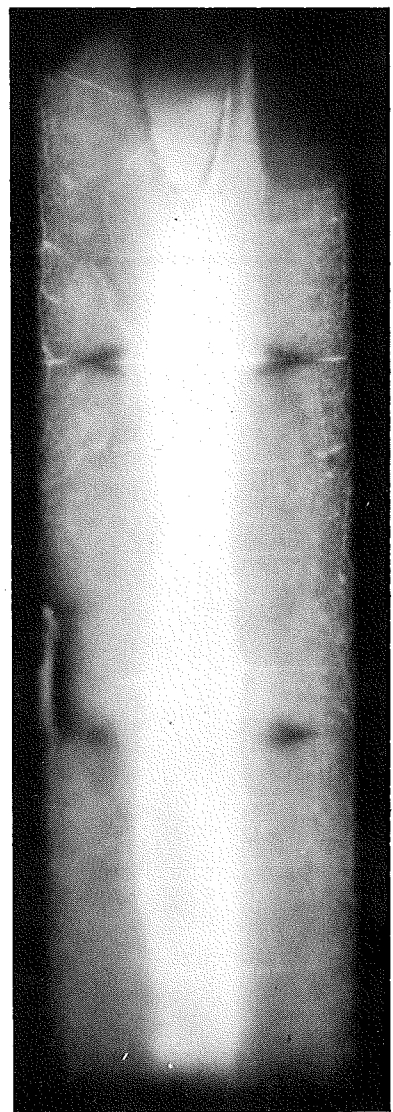
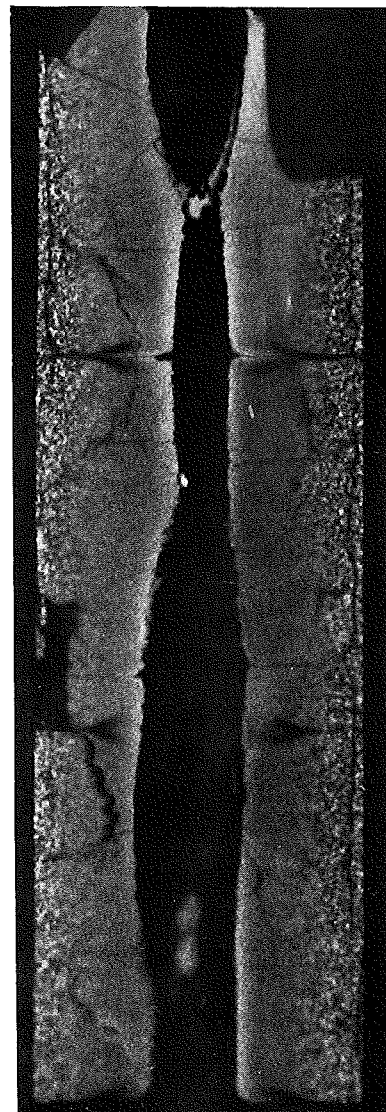
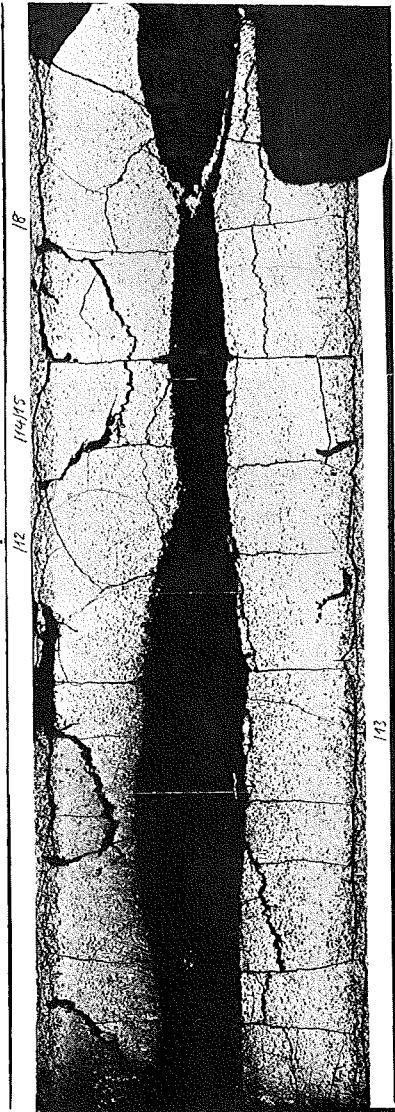
A

B

C



1



2

1 mm



Prüfling 4B-19

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

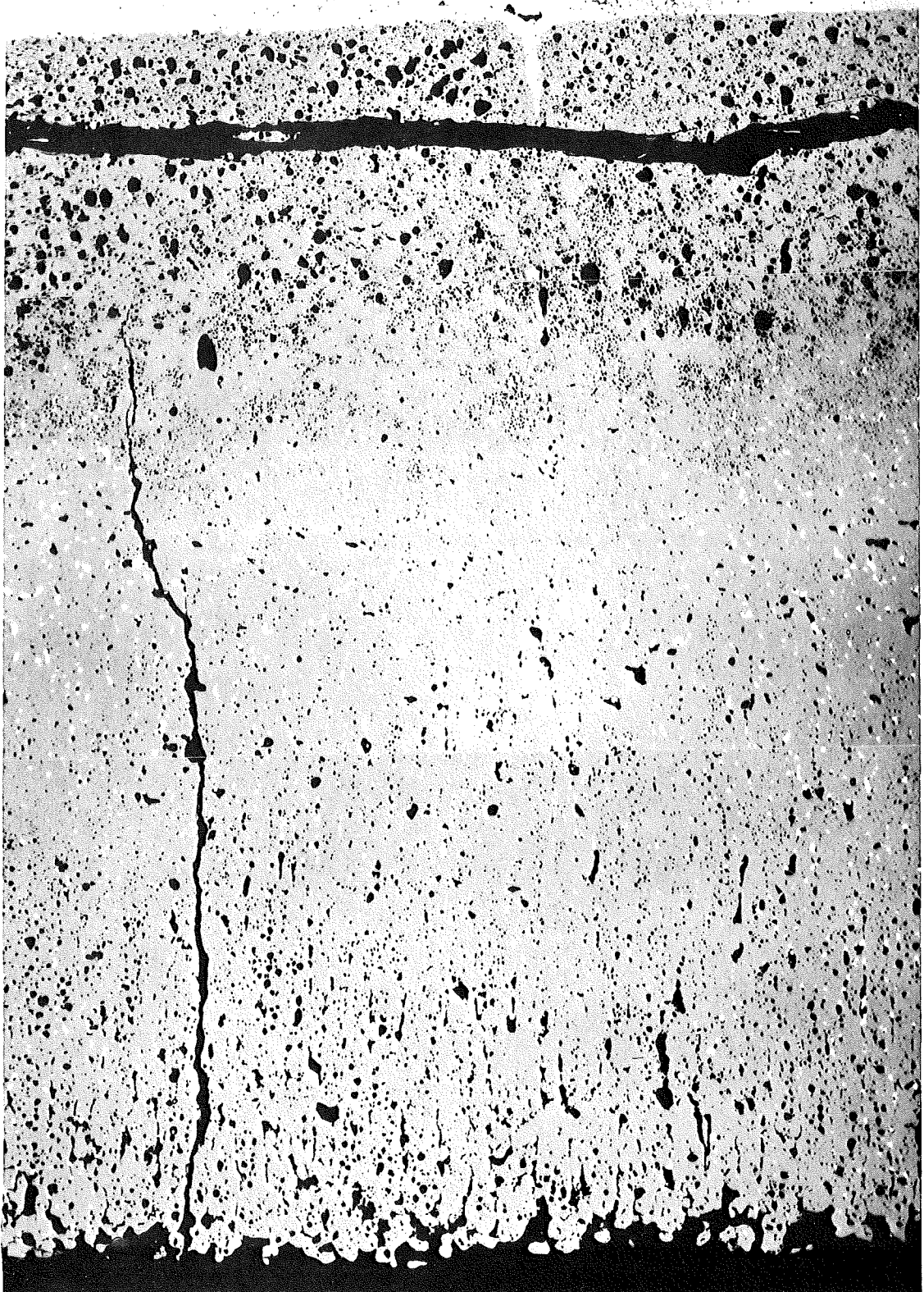
Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer : 460,4 Vollasttage
Ende : 29. 3. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 84,8 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 461 / 310 W/cm

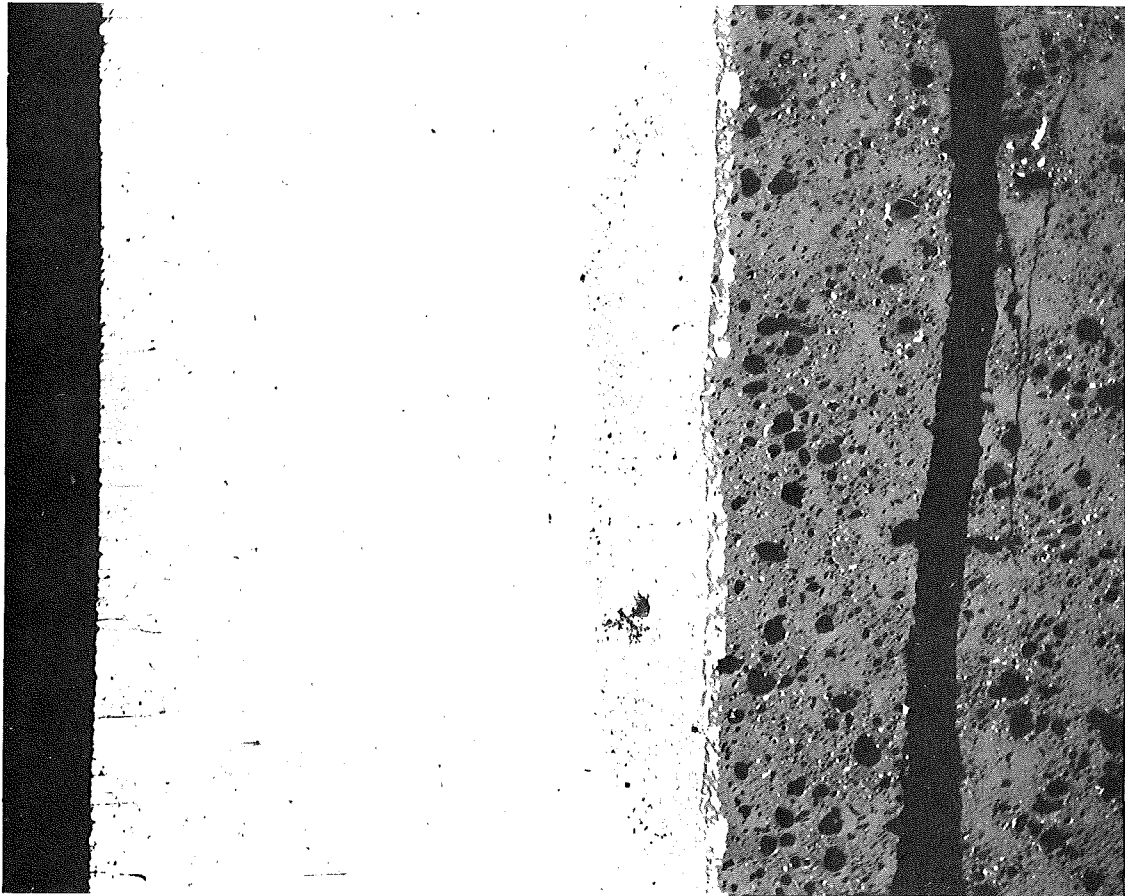
-I/107-
zu Prüfling 4B/24
A2



/12

0,1 mm

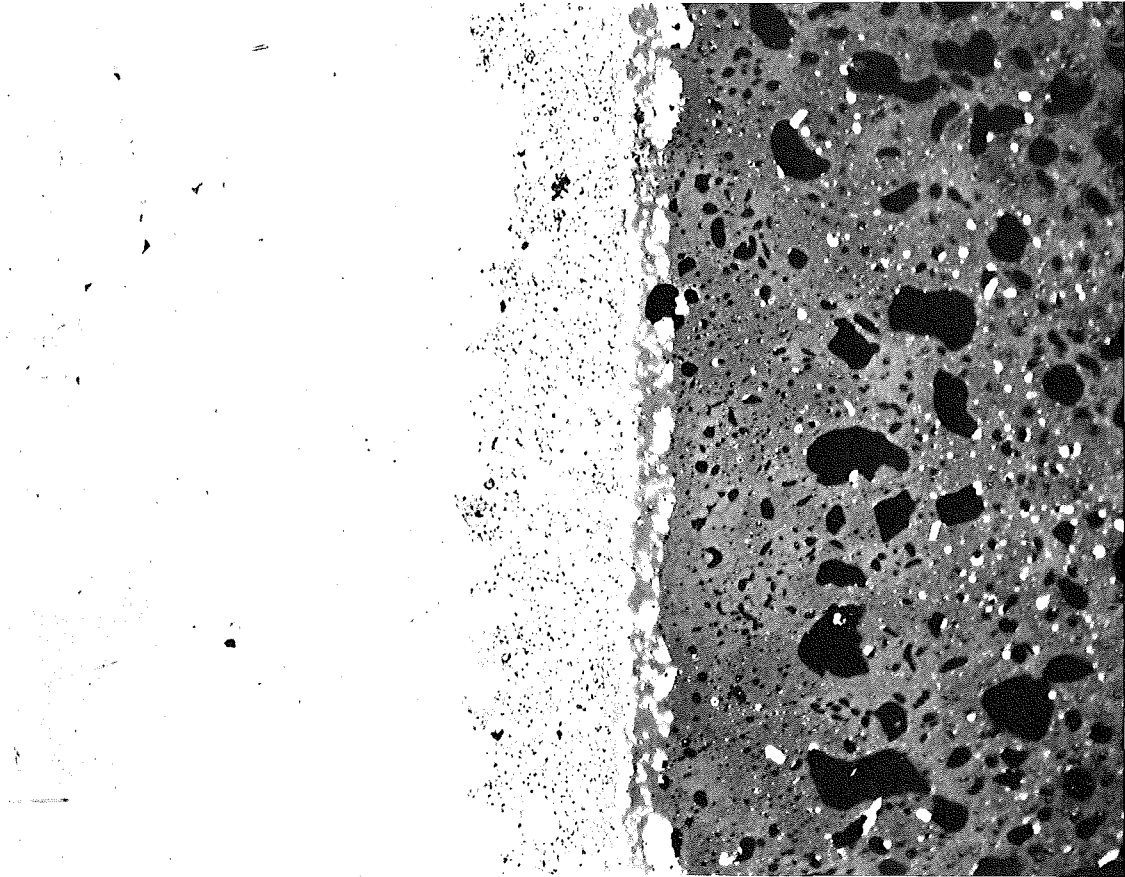
-I/108 -
zu Prüfling 4B/24
A2



0,1 mm

200x

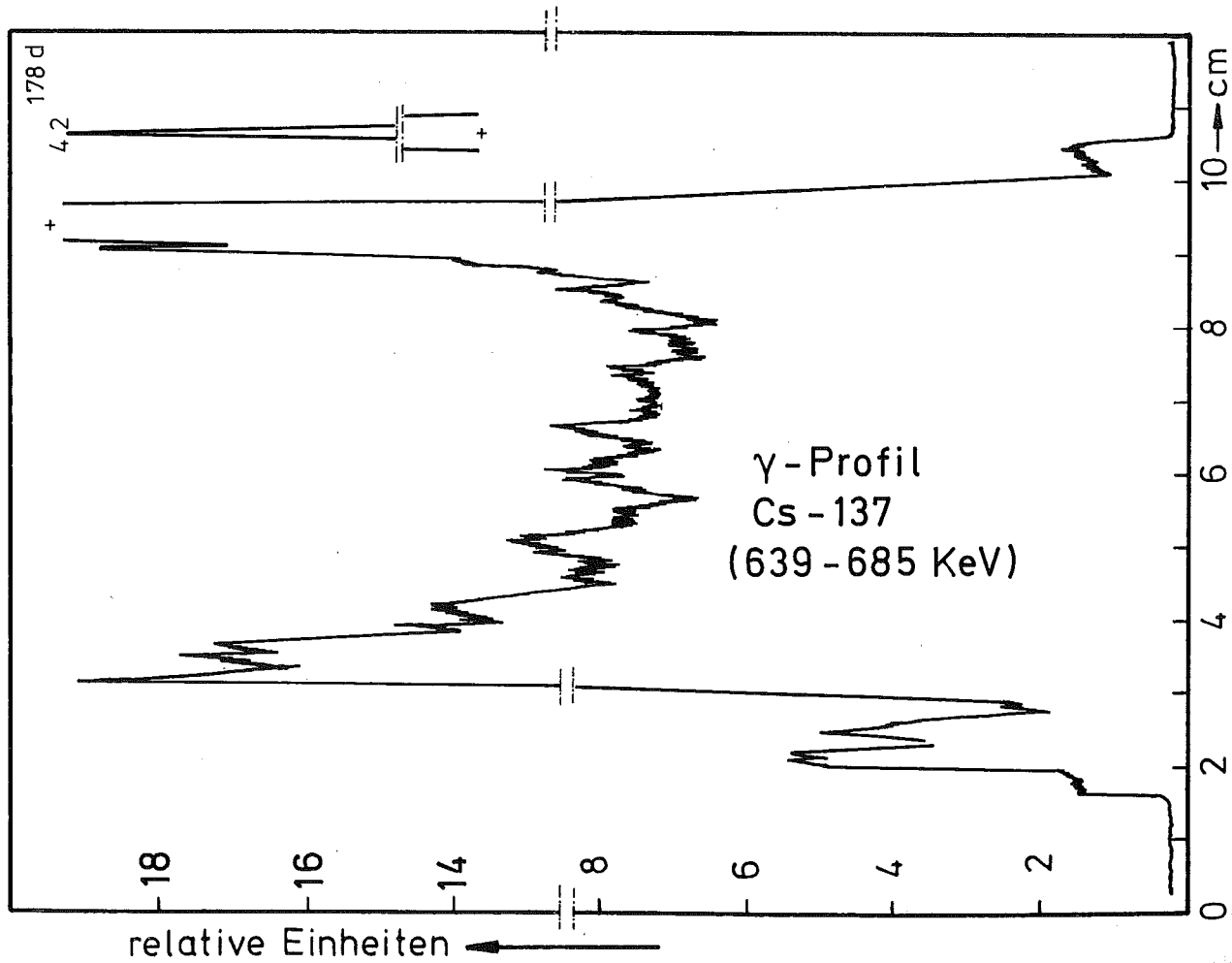
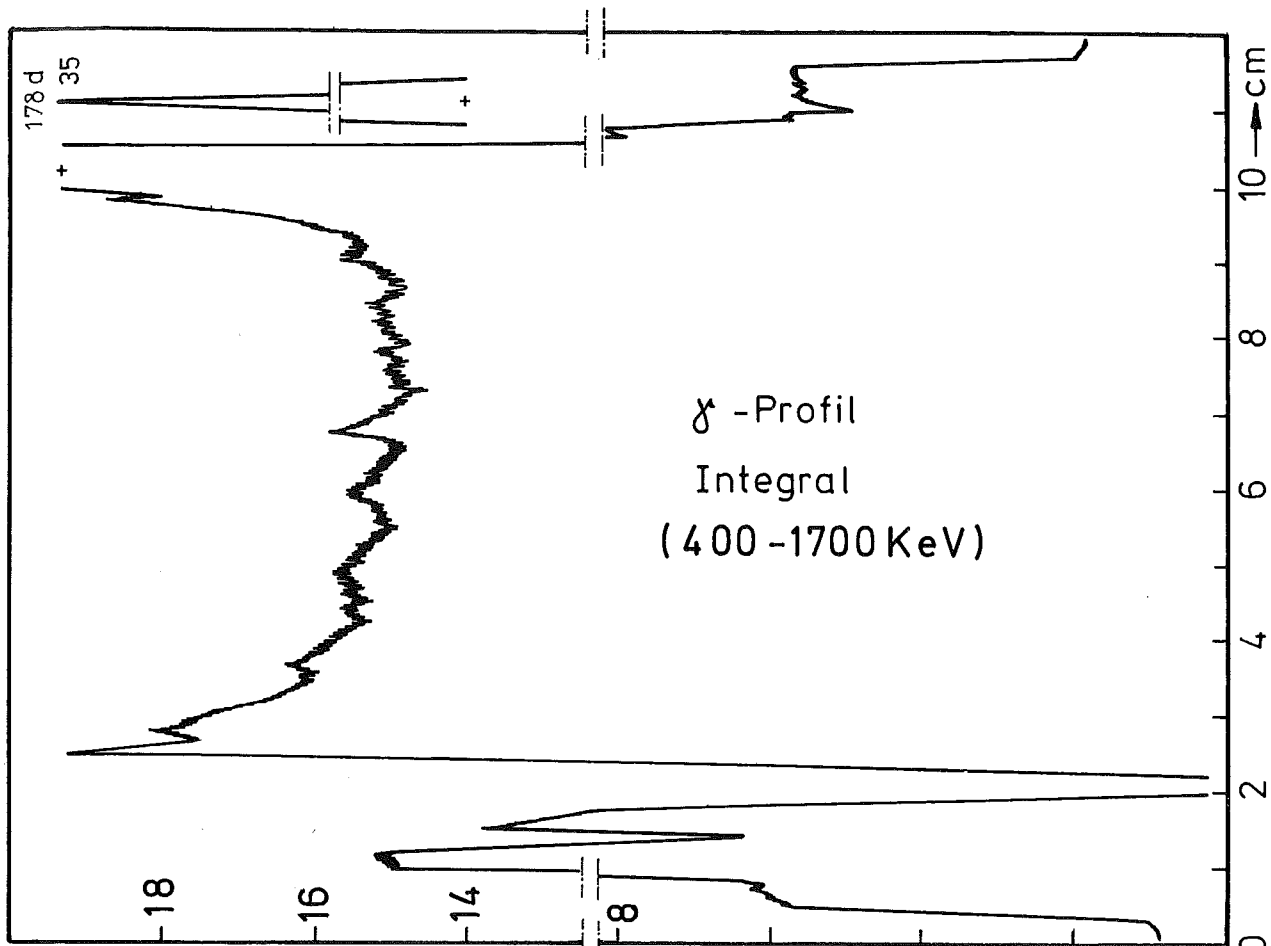
HZ-3a-58-4B/24-2/13



0,04 mm

500x

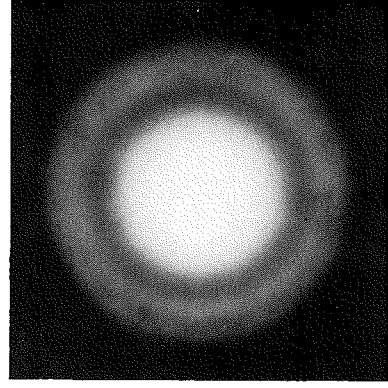
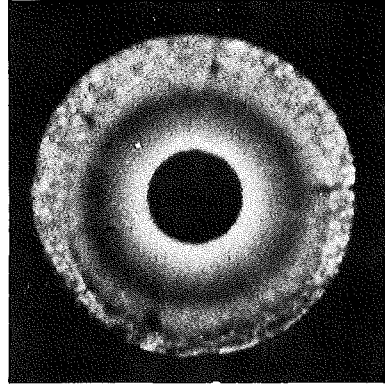
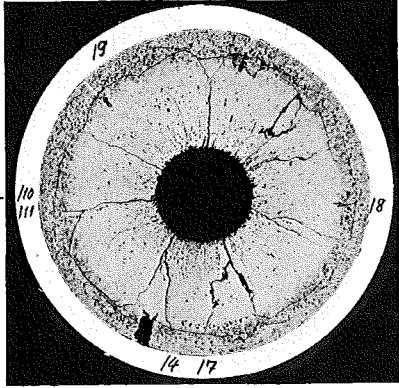
HZ-3a-58-4B/24-2/12



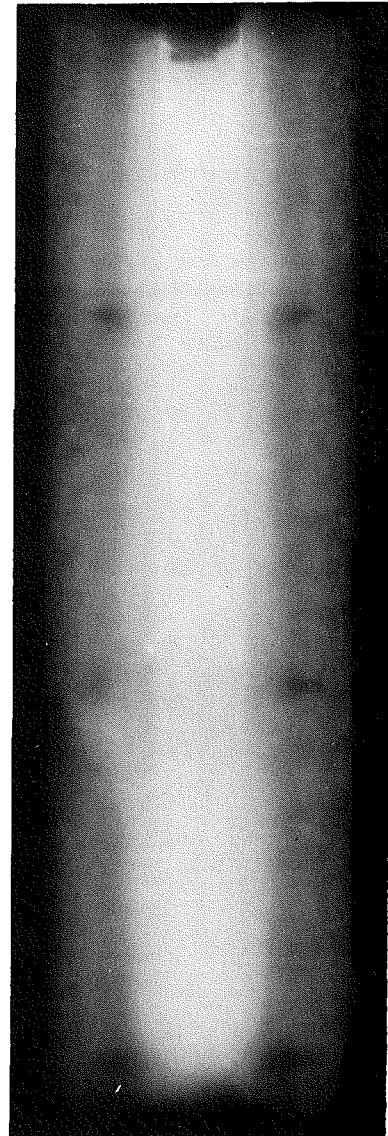
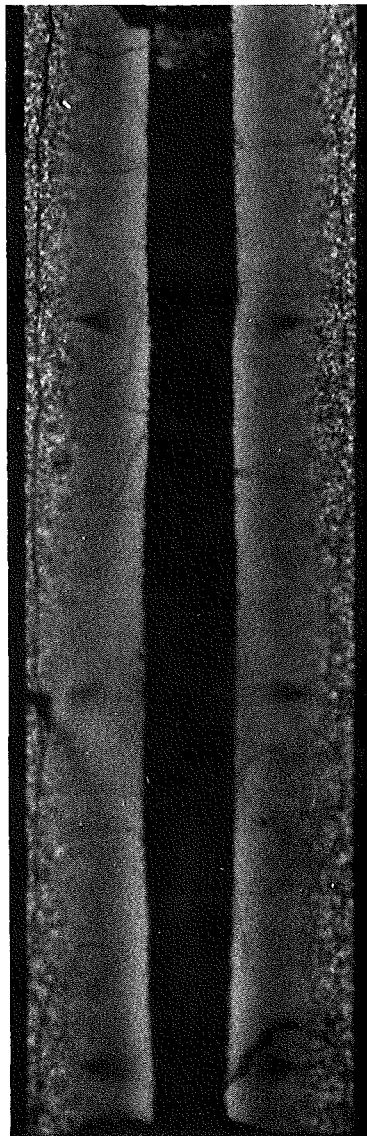
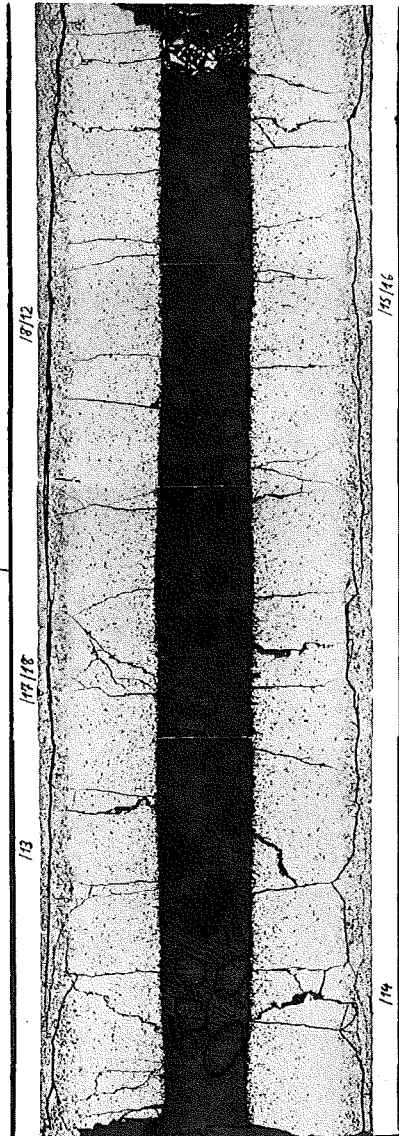
A

B

C

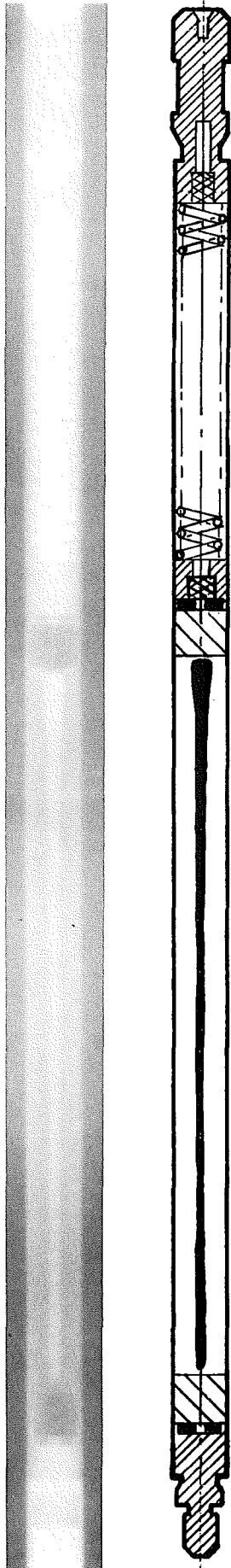


1



2

1mm



Prüfling 4B-24

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2
Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988
Aussendurchmesser : 6,00 mm
Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm
Länge der Brennstoffsäule : 80 mm
Radiale Spaltweite : 0,070 mm
Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppelkapsel Typ 4a
Dauer : 517,5 Volllasttage
Ende : 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl. : 93,3 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl. : 549 / 304 W/cm

-I/111-
zu Prüfling 4B/23
A1



18

—|—
0,1 mm

HZ-3a-58-4B/23-2/12

100x



100x

HZ-3a-58-4B/23-2/14

0,1 mm

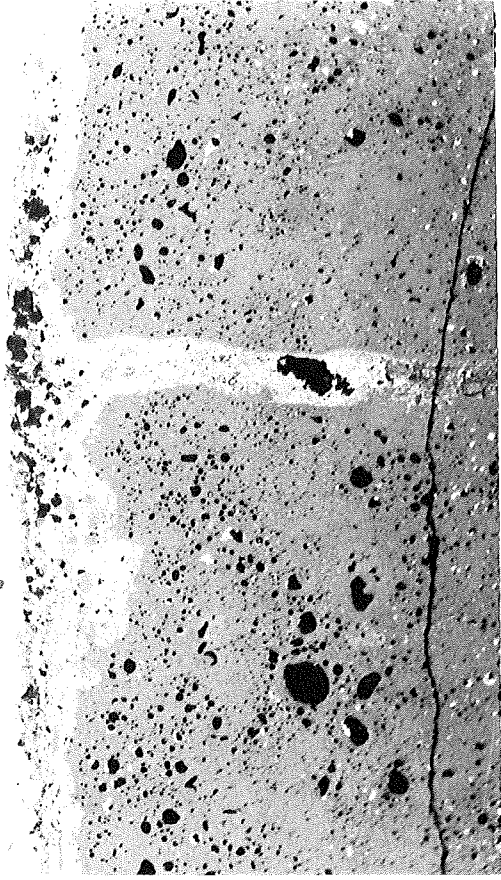
-I/113-
zu Prüfling 4B/23
A2



14

0,1 mm

- I/114 -
zu Prüfling 4B/23
A2

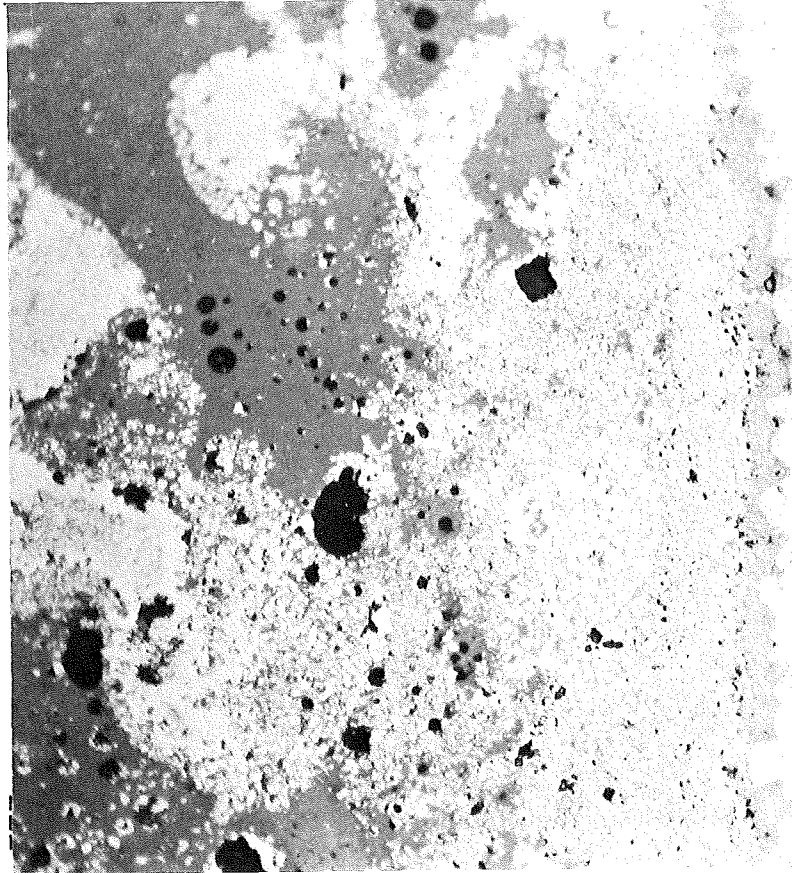


HZ-3a-58-4B/23-1/10 200x

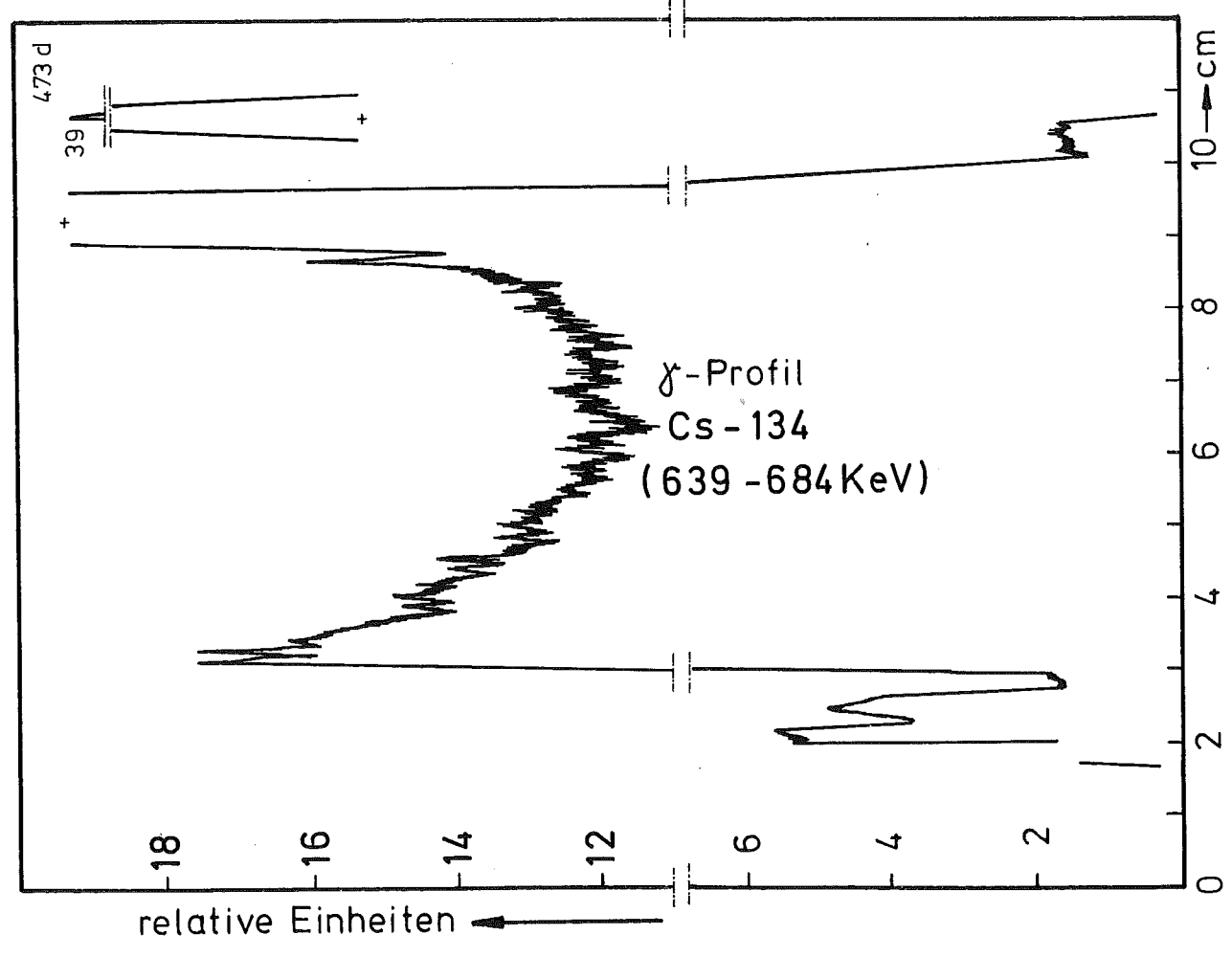
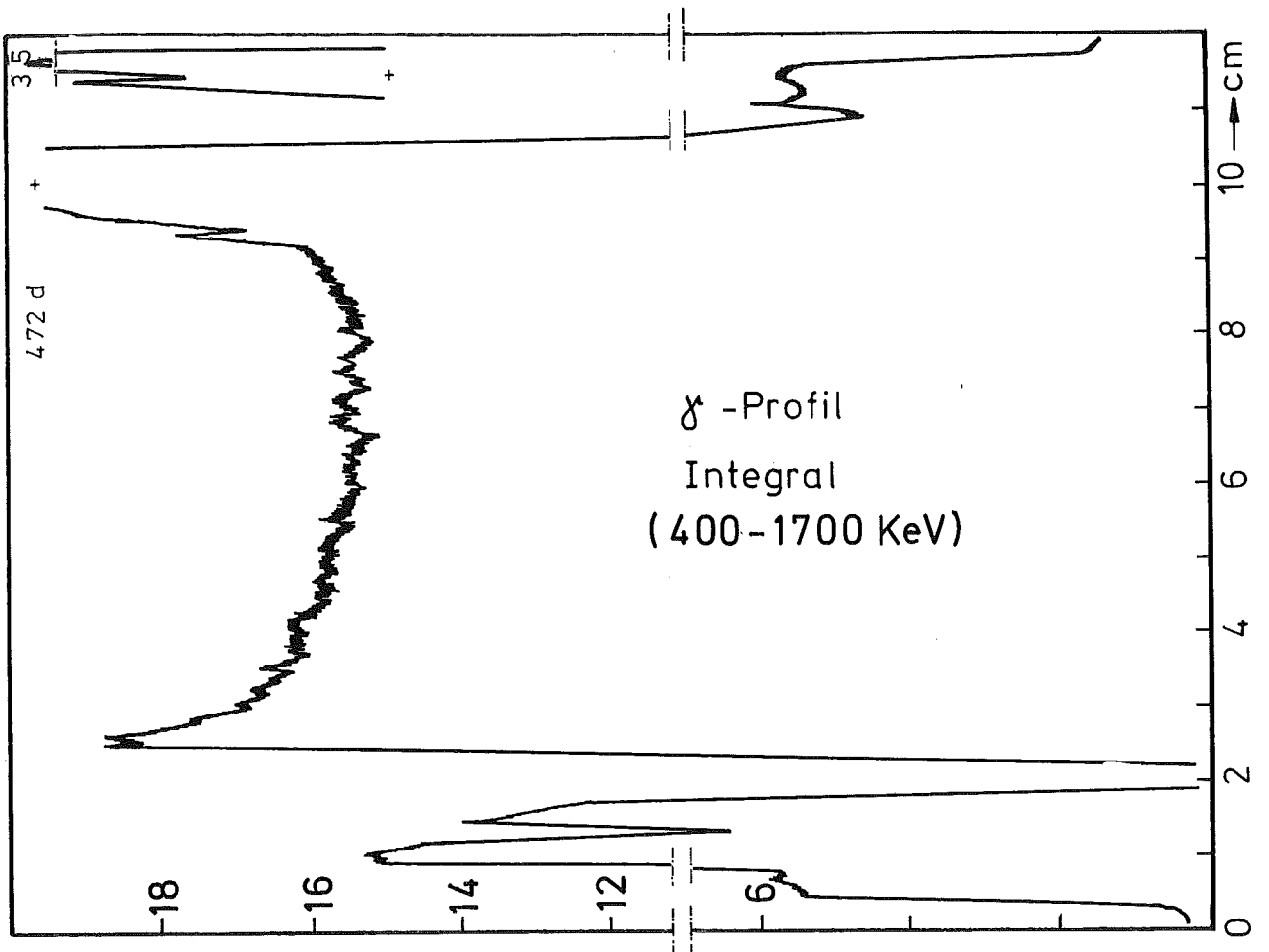
0,1 mm

HZ-3a-58-4B/23-1/8

500x



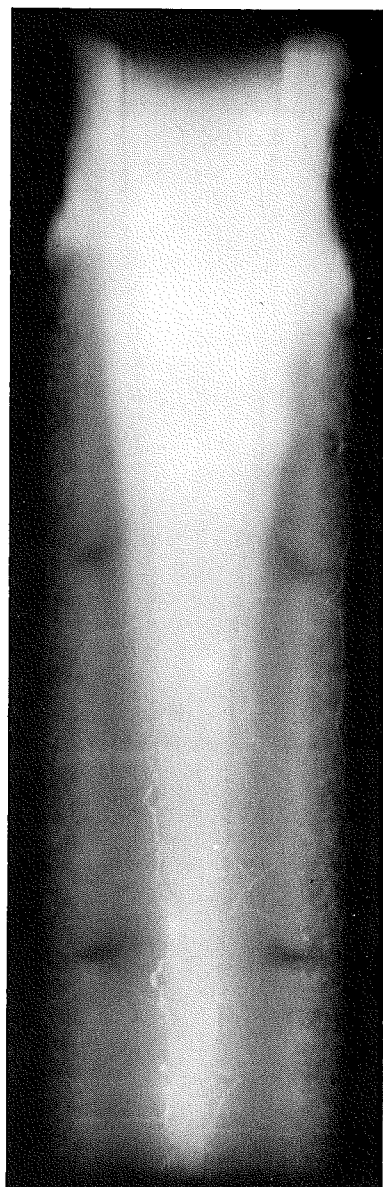
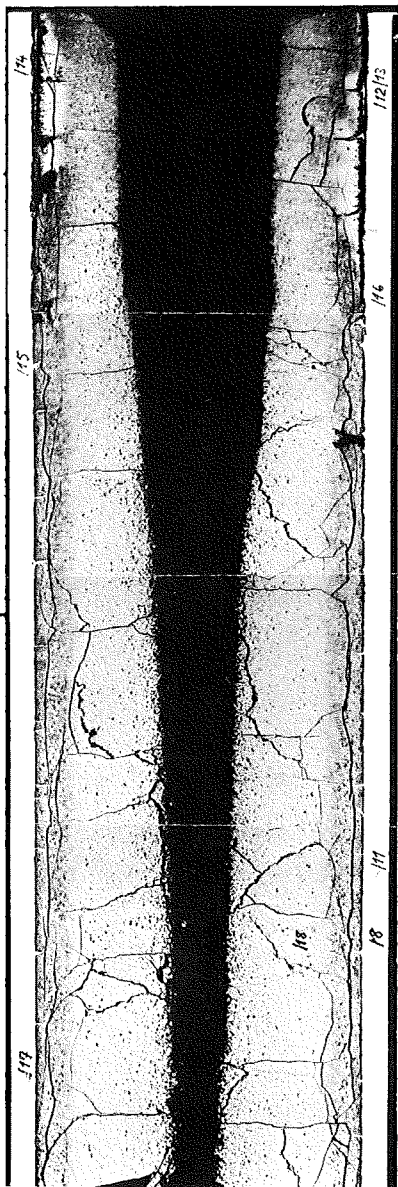
0,04 mm



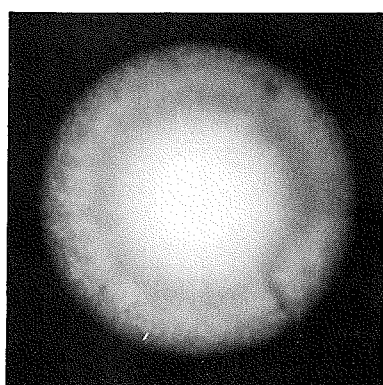
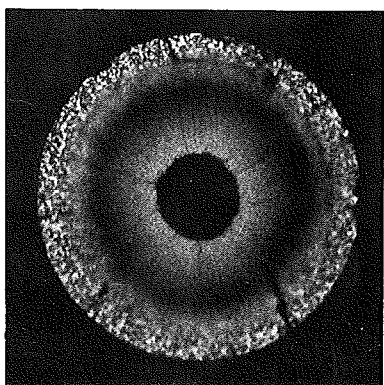
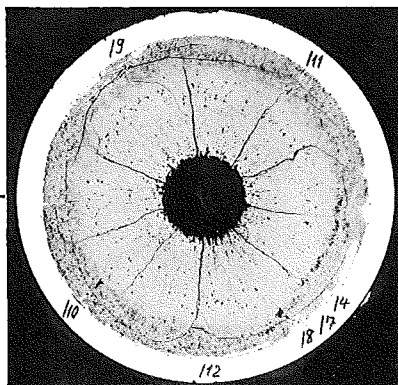
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-23

Brennstoff :

Form : Tabletten beidseitige
Einsenkung

Zusammensetzung : UO_2 - PuO_2

Tablettendichte : 84% th.D.

Hülle :

Material : 1.4988

Aussendurchmesser : 6,00 mm

Wandstärke : 0,38 mm

Geometrie :

Länge des Prüflings : 172 mm

Länge der Brennstoffsäule : 80 mm

Radiale Spaltweite : 0,070 mm

Schmierdichte : 79,6% th.D.

Bestrahlung :

Einrichtung : NaK/PbBi-Doppel-
Kapsel Typ 4a

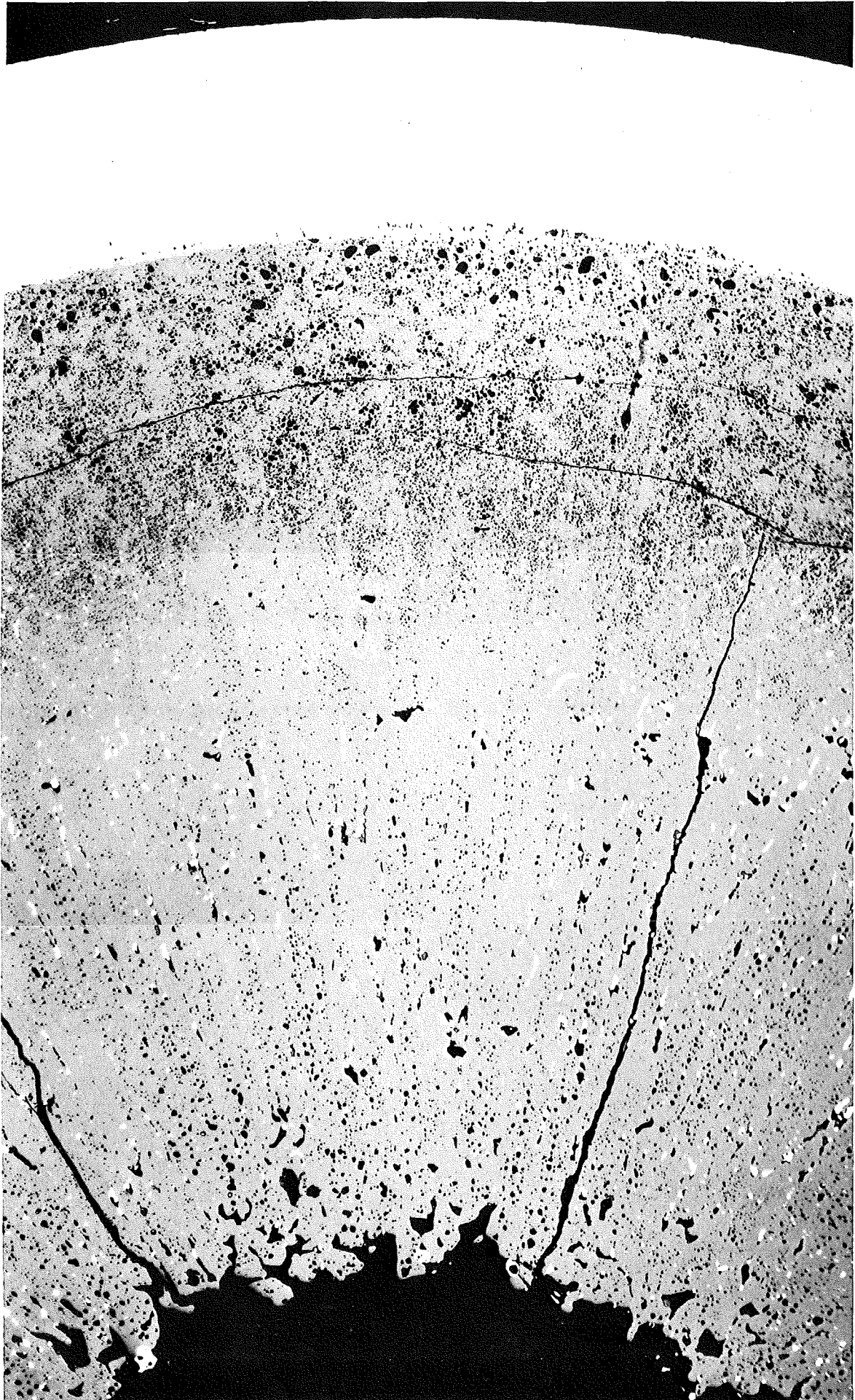
Dauer : 517,5 Vollasttage

Ende : 14. 6. 71

Rechn. Abbrand mittl. : 104,2 MWd/kg Metall

Stableistung max./mittl. : 549 / 339 W/cm

-I/117-
zu Prüfling 4B/22
A1



/4

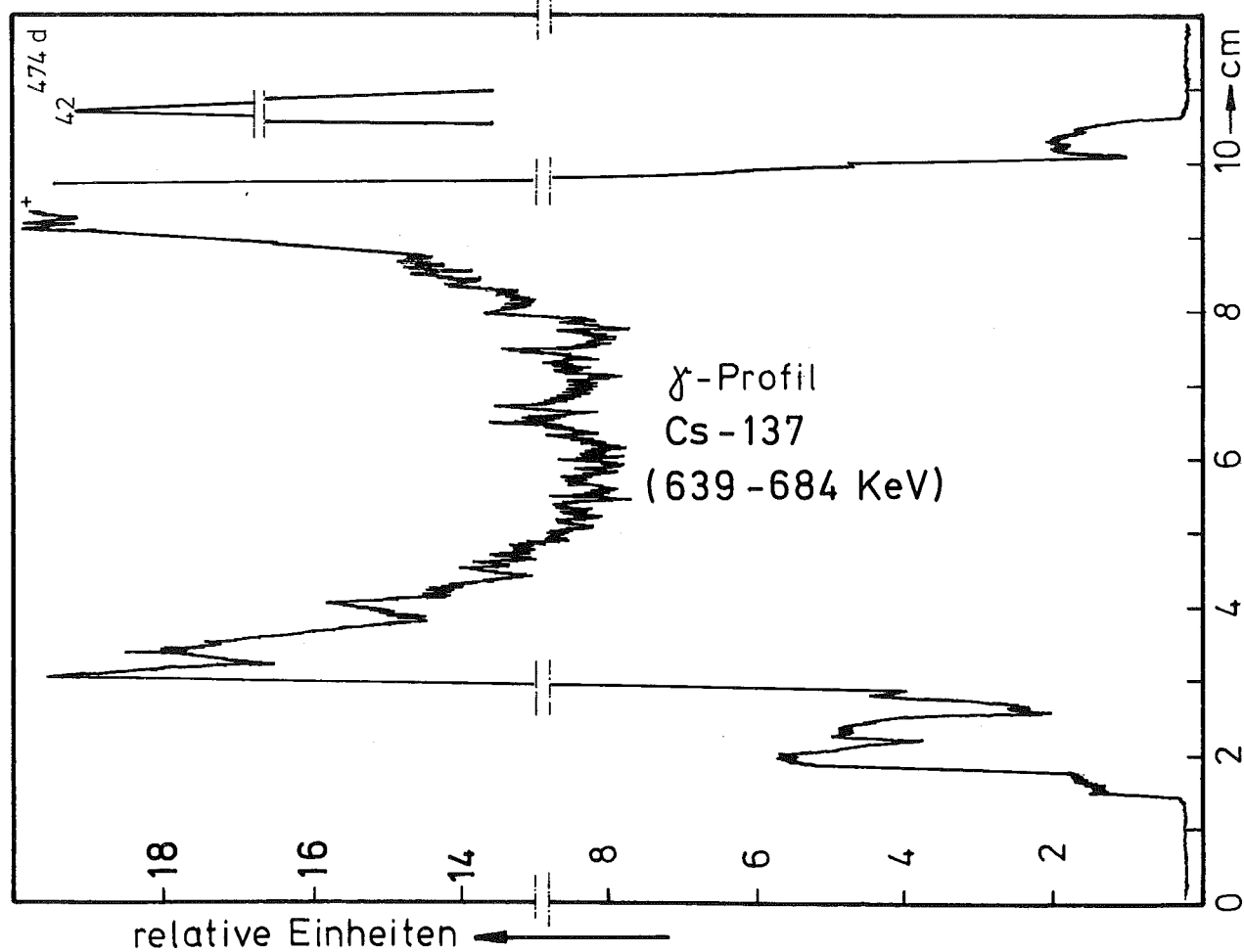
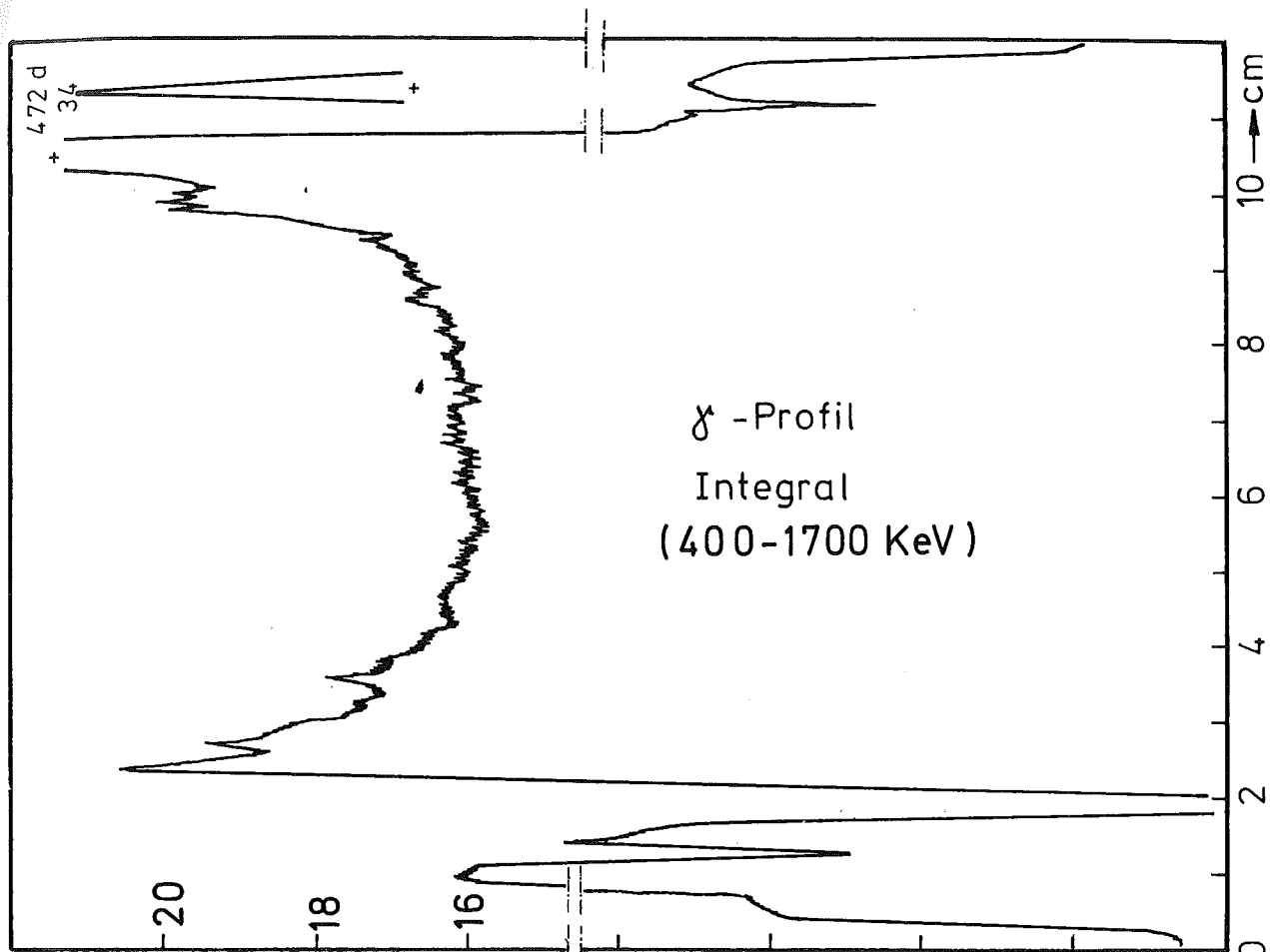
0,1mm

-I/118 -
zu Prüfling 4B/22
A2



/11

—|—
0,1mm

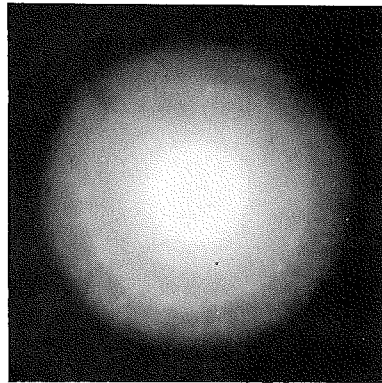
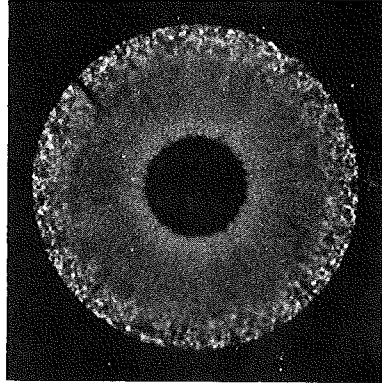
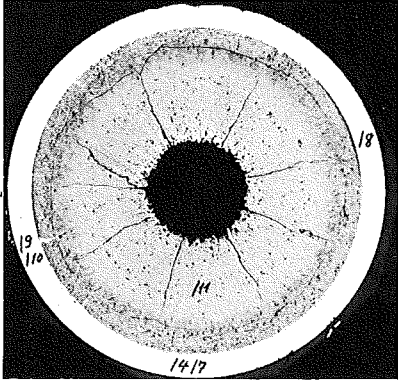


relative Einheiten \uparrow

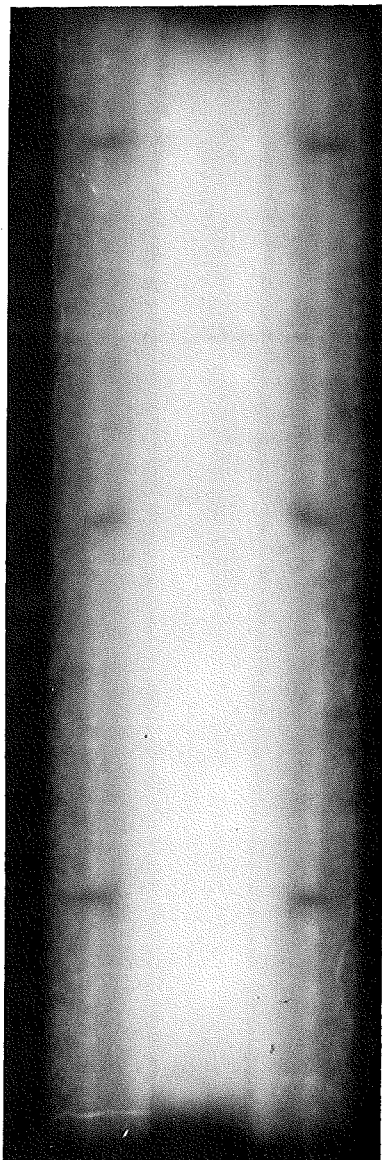
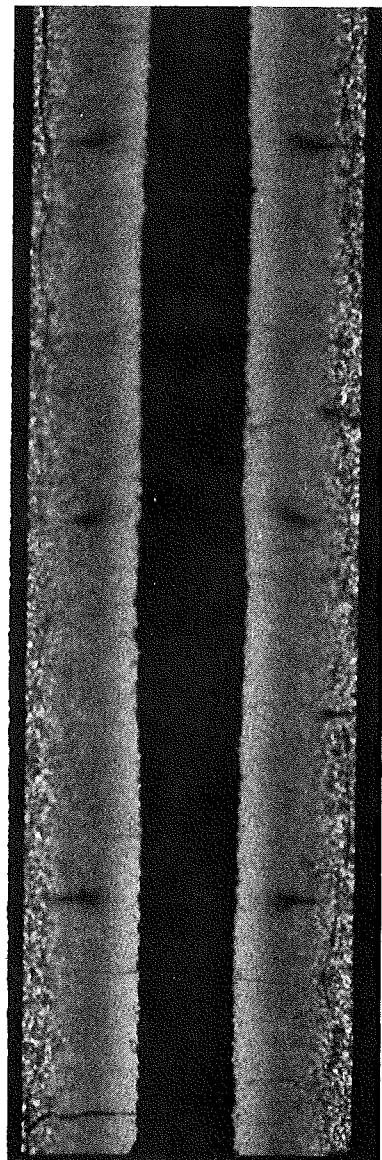
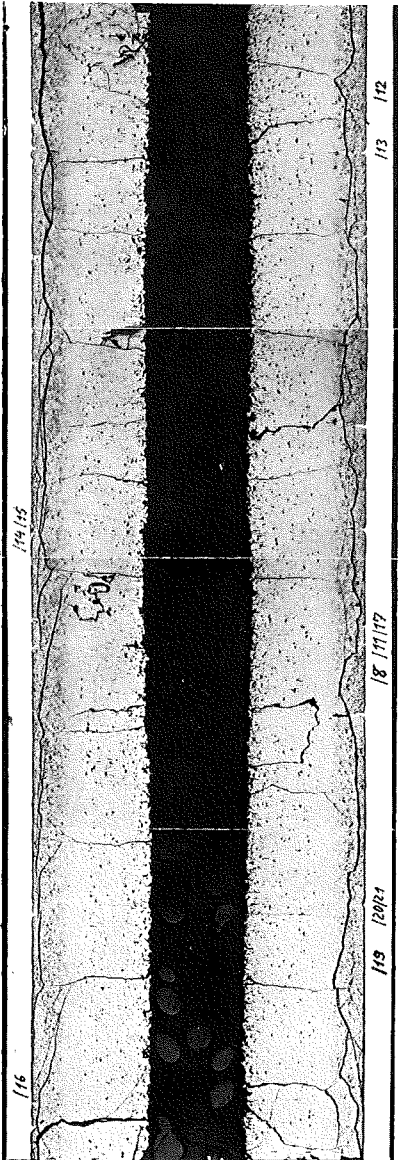
A

B

C



1



2

1mm



Prüfling 4B-22

Brennstoff:

Form	: Tabletten beidseitige Einsenkung
Zusammensetzung	: UO_2 - PuO_2
Tablettendichte	: 84% th.D.

Hülle:

Material	: 1.4988
Aussendurchmesser	: 6,00 mm
Wandstärke	: 0,38 mm

Geometrie:

Länge des Prüflings	: 172 mm
Länge der Brennstoffsäule	: 80 mm
Radiale Spaltweite	: 0,070 mm
Schmierdichte	: 79,6% th.D.

Bestrahlung:

Einrichtung	: NaK/PbBi-Doppel-Kapsel Typ 4a
Dauer	: 517,5 Vollasttage
Ende	: 14. 6. 71
Rechn. Abbrand mittl.	: 86,2 MWd/kg Metall
Stableistung max./mittl.	: 595 / 281 W/cm