



KfK 3099

Juli 1981

# **In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall**

**Bericht über die Versuchsserie G 2 / 3**

L. Sepold, E. H. Karb, M. Prüßmann  
Hauptabteilung Ingenieurtechnik  
Projekt Nukleare Sicherheit

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK  
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3099

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten  
beim Kühlmittelverluststörfall

Bericht über die Versuchsserie G 2/3

---

L. Sepold  
E.H. Karb.  
M. Prüßmann

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH., Karlsruhe

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
ISSN 0303-4003

## Kurzfassung

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse der Versuchsserie G2/3 des F+E-Vorhabens In-pile-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten. Mit den In-pile-Versuchen soll der Einfluß nuklearer Kenngrößen auf die Mechanismen des Brennstabversagens unter LOCA-Bedingungen untersucht werden. Die Versuche wurden sowohl mit unbestrahlten als auch mit vorbestrahlten Einzelstäben durchgeführt, die bezüglich der radialen Abmessungen LWR-Brennstäben entsprechen. Hauptparameter des Versuchsprogramms war der Abbrand, der von 2500 bis 35000 MWd/t variiert wurde.

Die Ergebnisse aus der Versuchsserie G2/3 (35000 MWd/t) lassen bezüglich der Berstdaten, wie Bersttemperatur, Berstdruck und Berstdehnung keinen Unterschied zu den Versuchen mit unbestrahlten Prüflingen erkennen.

.....  
In-pile Experiments on Fuel Rod Behavior During a LOCA.  
Test Results Report on the Test Series G2/3

## Abstract

This report describes the results of the Test Series G2/3 within the in-pile experimental program for the investigation of LWR fuel rod behavior. The results were obtained with single rods of a PWR design in the DK loop of the FR2 reactor at the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). The in-pile tests with the objective of investigating the influence of a nuclear environment on the mechanisms of fuel rod failure were being performed with irradiated and unirradiated rods. The main parameter of the test program is the burnup, ranging from 2500 to 35000 MWd/t.

The results of test series G2/3 (35000 MWd/t) with respect to the burst data, i.e. burst temperature, burst pressure, and burst strain, do not indicate major differences from the in-pile tests with unirradiated test specimens.

## Zusammenfassung

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse der Versuchsserie G2/3 innerhalb der In-pile-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten. Die In-pile-Versuche sind Bestandteil des LWR-Brennstabverhaltens-Programms des Projektes Nukleare Sicherheit (PNS). Die Experimente wurden im DK-Kreislauf des FR2-Reaktors im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) durchgeführt.

Mit den In-pile-Versuchen, in denen die 2. Aufheizphase eines Kühlmittelverlust-Störfalls simuliert wurde, sollte der Einfluß nuklearer Kenngrößen auf die Mechanismen des Brennstabversagens unter LOCA- (Loss-of-Coolant Accident) Bedingungen untersucht werden.

Als Versuchsstäbe wurden Prüflinge mit einer aktiven Brennstofflänge von 50 cm und radialen Abmessungen verwendet, die denen von Stäben kommerzieller Druckwasserreaktoren (DWR) entsprechen. Es wurden Versuche sowohl mit unbestrahlten als auch mit vorbestrahlten Prüflingen durchgeführt. Hauptparameter des Versuchsprogramms war der Abbrand, der von 2500 bis 35000 MWd/t variiert wurde. Die Stäbe wurden in den Versuchen mit Innendrücker beaufschlagt, die typisch für DWR-Brennstäbe sind.

Die Versuchsreihe G2/3 bestand aus fünf Einzelstab-Versuchen, die mit vorbestrahlten Prüflingen vom 14.11. bis 28.11.1978 durchgeführt wurden. Der Nominalabbrand der Stäbe betrug 35000 MWd/t. Als Ausgangswerte für die Transienten wurden Innendrücker von 61 bis 126 bar (warm) eingestellt. Die fünf Einzelstäbe barsten während der Aufheizphase, die Berstdrücker betragen 37, 66, 33, 57 bzw. 111 bar, die Bersttemperaturen 869, 846, 900, 838 bzw. 750°C (in der Reihenfolge der Versuche G 2.1, G 2.2, G 3.1, G 3.2 und G 3.3). Die größten Umfangsdehnungen betragen 32, 28, 46, 41 und 32 %.

Im Unterschied zu den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen zeigten die G2/3-Versuchsstäbe, wie auch die Stäbe der Serien F /9/ und G1 /10/, nach dem Bersten eine Schüttung von zerteilten Brennstofftabletten im Bereich der Hüllrohraufweitung: Der durch das Aufblähen der Hülle zusätzlich entstandene Raum für den Brennstoff füllte sich mit Bruchstücken der während der Vorbestrahlung schon zersprungenen Pellets. Durch Nachrutschen von Brennstoff entstanden so z.T. ausgeprägte Verkürzungen der Pelletsäule.

Hinsichtlich der Berstdaten lassen sich bei den G2/3-Versuchen keine Besonderheiten gegenüber den Versuchen mit unbestrahlten Prüflingen erkennen.

Dieser Bericht dokumentiert die Nominal- und die gemessenen Daten der Prüflinge, die wichtigsten Meßwerte der Transientenversuche einschließlich des jeweils vorangegangenen Stationärbetriebs sowie die Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchungen. Über die metallografische Nachuntersuchung der Prüflinge wird vom Institut für Material- und Festkörperforschung berichtet.

In-pile Experiments on Fuel Rod Behavior During a LOCA.  
Test Results Report on the Test Series G2/3

---

Summary

This report describes the results of the Test Series G2/3, Tests G 2.1 through G 3.3, within the in-pile experimental program for the investigation of LWR fuel rod behavior. The results were obtained with single rods in the DK loop of the FR2 reactor at the Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK). The research is part of the Nuclear Safety Project's (PNS) fuel behavior program. The main objective of the FR2-LOCA tests is to provide information about the effects of a nuclear environment on the mechanisms of fuel rod failure in the second heatup phase of a LOCA (Loss-of-Coolant Accident).

The test rods have a heated length of 50 cm, and their radial dimensions are identical with those of a commercial German PWR (Pressurized Water Reactor). The tests are performed with unirradiated as well as with previously irradiated rods. The main parameter of the FR2 In-pile Test Program is the burnup, ranging from 2500 to 35000 MWd/t. The test rods are filled with helium to internal pressures representing the range of PWR rod pressures.

The G2/3 tests were performed from November 14, 1978 to Nov. 28, 1978. The nominal burnup of the test rods was 35000 MWd/t. The test rods were pressurized with helium to hot internal pressures between 61 and 126 bar and were subjected to rod powers between 37 and 54 W/cm (derived from heatup rates at 650 °C).

The test rods burst during the heatup phase at pressures of 37, 66, 33, 57 and 111 bar, respectively. The burst temperatures were determined to be 869, 846, 900, 838 and 750 °C for tests



G 2.1 through G 3.3. The maximum total circumferential elongations amount to 32, 28, 46, 41 and 32 %, respectively.

The G2/3 tests - like the previous tests with irradiated specimens /9/, /10/ - showed cracked fuel after the irradiation (prior to the transients) and a fragmentation of fuel pellets after the transient tests due to cladding ballooning. The posttest results indicated a reduction of the pellet stack length of the test rods caused by a redistribution of the fuel in the sections of major deformation.

The burst data of the G2/3 tests did not reveal any difference between tests with unirradiated fuel rods and the irradiated fuel rods of this test series.

This report documents the nominal and actual data of the test rods, the data recorded during the transient and steady-state operation, and the results of the non-destructive posttest examinations.

Results of the destructive posttest examinations (metallography) will be reported by the Institut für Material- und Festkörperforschung (IMF, Institute for Materials and Solid State Research) at KfK.

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	<u>Seite</u>
1. Einführung	1
1.1 Berichtsziel	1
1.2 Versuchsziele	1
1.3 Versuchsprogramm	2
2. Versuchsvorbereitung	4
2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge	4
2.2 Stabmontage	6
2.3 Neutronenradiografie	7
3. Prüflingsdaten	8
3.1 Allgemeine Daten	8
3.2 Daten der Prüflinge für die G2/3-Versuchsserie	10
4. Versuchsablauf	12
5. Versuchsdaten	13
5.1 Messung der Versuchsdaten	19
5.2 Kühlmitteldaten	21
5.3 Prüflingsleistung	21
5.4 Prüflingsinnendruck	25
5.5 Hüllrohrtemperaturen	25
5.6 Temperaturanstieg der Hülle	28
6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen	29
6.1 Durchstrahlungen der Stäbe	29
6.2 Fotodokumentation	31
6.3 Vermessung der Prüflinge	31
7. Brennstoffzustand und -verhalten	41
8. Literatur	44
Abbildungen	45
Anhang: Meßwerte vor Auslösung der Transienten	153

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>		<u>Seite</u>
1.	Vorbestrahlungseinsatz, vereinfacht	45
2.	Axiale Abbrandverteilung im Brennstab G 3.6	46
3.	Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung, Bündel G2/3	47
4.	Zur Messung des Stabinnendrucks	48
5.	Nuklearprüfling vereinfacht	49
6.1 - 6.5	Durchmesserabmaße und Einfüllspiel, Versuche G 2.1 bis G 3.3	50 - 54
7.	DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislauf- schema	55
8.	Versuchsablauf, Schema	56
9.	Cladding Thermocouple (Schematic)	57
10.1 - 10.5	Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil Versuche G 2.1 bis G 3.3	58 - 62
11.	In-pile-Versuche, G2/3, Prüflingsleistungen Na und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente	63
12.1 - 12.5	Nominierte Axialprofile am Prüfling, Versuche G 2.1 bis G 3.3	64 - 68
13.1 - 13.5	Druck im Prüflingsplenum, Versuche G 2.1 bis G 3.3	69 - 73
14.1 - 14.5	Axiales Temperaturprofil, Versuche G 2.1 bis G 3.3	74 - 78
15.1 - 15.5	Hüllrohrtemperaturen T 131 bis T 136 im Versuch G 2.1 bis G 3.3	79 - 83
16.	Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt), Versuch G 3.2	84
17.	Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck	85
18.	Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900 °C (Transiente)	86

	<u>Seite</u>
19. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Burst Temperature vs. Burst Pressure	87
20. Neutronenradiografie G 3.3 vor Versuch	88
21.1- Neutronenradiografie und Winkellagen G2.1 21.3 nach Versuch	89 - 91
22.1- Neutronenradiografie und Winkellagen G 2.2 22.3 nach Versuch	92 - 94
23.1- Neutronenradiografie und Winkellagen G 3.1 23.3 nach Versuch	95 - 97
24.1- Neutronenradiografie und Winkellagen G 3.2 24.3 nach Versuch	98 - 100
25.1- Neutronenradiografie und Winkellagen G 3.3 25.3 nach Versuch	101 - 103
26.1 View and X-Ray Photograph, Test G 2.1	104
26.2 Oxidation of Zry Cladding, Test G 2.1	105
27. View and X-Ray Photograph, Test G 2.2	106
28. View and X-Ray Photograph, Test G 3.1	107
29. View and X-Ray Photograph, Test G 3.2	108
30. View and X-Ray Photograph, Test G 3.3	109
31. Views of the Ruptured Zone, Test G 2.1	110
32. Views of the Ruptured Zone, Test G 2.2	111
33. Views of the Ruptured Zone, Test G 3.1	112
34. Views of the Ruptured Zone, Test G 3.2	113
35. Views of the Ruptured Zone, Test G 3.3	114
36. FR2 In-pile Tests Cladding Length Change vs. Burst Temperature	115
37.1- Circumferential Cladding Thickness Distribution 37.5 (as Received) Presented as Differences from the Nominal 0,725 mm, Test G 2.1 - G 3.3	116 - 120
38. Circumferential Strain and Axial Power Profiles of the G 2.1 through G 3.3 Tests	121

	<u>Seite</u>
39.1- Axial Profile of Circumferential Strain.	
39.5 Tests G 2.1 - G 3.3	122 - 126
40. Typical spiral profile; posttest measured rod diameters of test A 2.2	127
41.1 Versuch G 2.1, Polarmessung 1 (437 mm von UKF)	128
41.2 Versuch G 2.1, Polarmessung 2 (452 mm von UKF)	129
42.1 Versuch G 2.2, Polarmessung 1 (259 mm von UKF)	130
42.2 Versuch G 2.2, Polarmessung 2 (299 mm von UKF)	131
43.1 Versuch G 3.1, Polarmessung 1 (262 mm von UKF)	132
43.2 Versuch G 3.1, Polarmessung 2 (300 mm von UKF)	133
44.1 Versuch G 3.2, Polarmessung 1 (189 mm von UKF)	134
44.2 Versuch G 3.2, Polarmessung 2 (235 mm von UKF)	135
45.1 Versuch G 3.3, Polarmessung 1 (279 mm von UKF)	136
45.2 Versuch G 3.3, Polarmessung 2 (316 mm von UKF)	137
46.1- FR2 In-Pile Tests G 2.1 through G 3.3	
46.5 Cross Section, Max. Circumferential Strain	138 - 142
47. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Max. Circumferential Elongations vs. Burst Temp.	143
48. FR2 In-Pile Tests, Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	144
49. FR2 In-Pile Tests, Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop	145
50.1 Cross Section of the G 3.6 Fuel Rod	146
50.2 Cross Section of the G 2.1 Fuel Rod	147
51.1- View of the Fuel Condition of the G 3.6 Fuel Rod	
51.2	148 - 149
52. Fuel Rod Pellet Fragments from G 3.6 Fuel Rod	150
53.1- FR2 In-Pile Tests, Series G2/3	
53.2 Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses	151 - 152

Verzeichnis der Tabellen

	<u>Seite</u>
1. In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten, Test Matrix	3
2. Nominal Test Fuel-Rod Data	9
3. Gemessene Prüflingsdaten der G2/3-Stäbe	11
4.1 - Daten der Versuche G 2.1 bis G 3.3 4.5	14 - 18
5. Anordnung der Hüll-TE in den Versuchen G 2.1 bis G 3.3	20
6. Kühlmitteldaten der G2/3-Versuche	21
7. Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe G2/3	26
8. Hülltemperaturgradienten an den Beulstellen, Versuche G2.1 bis G 3.3	28
9. Längenänderung der Brennstoffsäule durch die G2/3-Versuche	30
10. Längenänderung und Riblage der G2/3-Stäbe	31
11. Circumferential Strain Data from Rod Diameter Measurement, G2.1 through G 3.3	34
12. Ovalität im Beulbereich der G2/3-Versuchsstäbe	36
13. Umfangsdehnung im Beulbereich der G2/3-Versuchsstäbe	36
14. Exzentrizität der Beule bei den G2/3-Versuchsstäben	37
15. Krümmung der G2/3-Versuchsstäbe	37
16.1 - Tabelle der Meßwerte vor Auslösung der Transienten, 16.5 G 2.1 bis G 3.3 (Anhang)	154-158

## 1. Einführung

### 1.1 Berichtsziel

Neben einer generellen Beschreibung des Versuchsprogramms, der Prüflinge und der Versuchsdurchführung dient der vorliegende Bericht der Dokumentation der Soll- und Ist-Daten der ungebulten Prüflinge der Serie G2/3, der während der Transientenversuche gemessenen Daten und der Ergebnisse der zerstörungsfreien Nachuntersuchung in den heißen Zellen. Aus dem Komplex der zerstörenden Nachuntersuchungen wird lediglich auf die Querschnitte der Stabhülle im Beulbereich zur Bestimmung der Umfangsdehnung eingegangen und mit Bildern des Stabes G 3.6 der Brennstoffzustand nach der Bestrahlung (vor der Transiente) dokumentiert.

Die Ergebnisse der zerstörenden Nachuntersuchung der Prüflinge werden vom Institut für Material- und Festkörperforschung erarbeitet.

### 1.2 Versuchsziele

Zur Untersuchung des Brennstabverhaltens bei Kühlmittelverluststörfällen in Leichtwasserreaktoren werden im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit theoretische und experimentelle Arbeiten durchgeführt. Mit den hier behandelten In-pile-Versuchen im DK-Loop des FR2-Reaktors soll festgestellt werden, ob und wie die in Out-of-pile-Versuchen nicht simulierbaren nuklearen Parameter die Mechanismen des Brennstabversagens beeinflussen /1/ und /2/.

Zu diesem Zweck werden einerseits nuklear beheizte Brennstabprüflinge, andererseits elektrisch beheizte Referenzstäbe durch Kühlungsunterbrechung gezielten Temperaturtransienten unterzogen, in denen die 2. Aufheizphase eines Kühlmittelverluststörfalles simuliert wird.

Mit der hier behandelten Versuchsserie G2/3 sollte das Verhalten von vorbestrahlten Prüflingen untersucht werden. Von den sechs bis zu einem Abbrand von 35.000 MWd/t bestrahlten Stäben G 2.1 bis G 3.6 waren fünf einer Transiente auszusetzen, der Stab G 3.6 für die radiochemische Abbrandbestimmung sowie zur Untersuchung des Brennstoffzustandes nach der Bestrahlung zu verwenden.

### 1.3 Versuchsprogramm

Die Versuche werden mit verkürzten Einzelstäben (DWR-Abmessungen) durchgeführt. Sie erstrecken sich auf den Abschnitt des Kühlmittelverlust-Störfalls, für den Brennstabversagen als am wahrscheinlichsten betrachtet wird: auf die dem Blow-down folgende sog. zweite Aufheizphase.

Da die nuklearen Parameter, deren Einfluß hier untersucht wird, zumeist selbst stark vom Abbrand abhängen, wird dieser als Haupteinflußgröße variiert. Tabelle 1 zeigt die Test-Matrix:

Einer Reihe sog. Kalibrier- und Scoping-Tests (Gruppe A) folgt eine Versuchsreihe mit unbestrahlten Prüflingen, bei der der Innendruck Hauptparameter ist (Gruppe B).

Bei den vorbestrahlten Prüflingen (Versuchsgruppe C bis G) werden Abbrand und Innendruck variiert, wobei die angegebenen Druckbereiche in Anlehnung an (konservative) Berechnungen für deutsche DWR der 1300 MWe-Klasse gewählt wurden.



TABLE 1

## FR2 IN-PILE TESTS ON FUEL BEHAVIOR, TEST MATRIX

Type of Test	Test-Group	Number of Rods Irradiated	Nominal Gap Size $\mu\text{m}$	Number of Tests	Target Burnup $\text{MWd}/t_U$	Range of Internal Pressure at Steady State Temperature bar
I Calibration, Scoping	A	-	190	5	-	25 - 100
Unirradiated Rods						
II (Main Parameter: Internal Pressure)	B1	-	190	7	0	55 - 90
	B3	-	150	2	0	
Irradiated Rods	C	6	190	5	2500	25 - 110
	D	6	190	-	5000	cancelled
III (Main Parameter: Burnup)	E	6	190	5	8000	25 - 120
	F	6	190	5	20000	45 - 85
	G1	6	150	5	35000	50 - 90
	G2	2	190	2	35000	60 - 125
	G3	4	150	3	35000	

## 2. Versuchsvorbereitung

### 2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge

Die Vorbestrahlung der Prüflinge bis zu den gewünschten Abbrandstufen erfolgte in vertikalen Positionen des FR2. Für die Vorbestrahlungseinsätze wurde in Anlehnung an den Aufbau von FR2-Brennelementen eine hexagonale Anordnung gewählt, die es erlaubt, Vorbestrahlungsbündel zu je 6 Stäben (siehe Abb. 1) in Brennelement- bzw. Zwischengitterpositionen einzusetzen, in gleicher Weise wie die Brennelemente zu kühlen und zu überwachen.

Die im Vorbestrahlungseinsatz eingebaute Meßeinrichtung für Kühlmitteldurchsatz und -temperaturen dient der Bestimmung der aktuellen Stableistung und des erzielten Abbrandes.

Die Zielabbrände der einzelnen Stabbündel können aus der Testmatrix ersehen werden. Die Stäbe G2 und G3 wurden in einem Vorbestrahlungsbündel zusammengefaßt und miteinander bestrahlt.

Die Einsätze für die höheren Zielabbrände wurden mit Abnahme des Spaltstoffinventars nach Bedarf auf Reaktorpositionen höherer Neutronenflußdichte umgesetzt, um wieder in einen akzeptablen Leistungsbereich zu kommen.

Die Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung der G2/3-Serie kann Abb. 3 entnommen werden. Als Grundlage der angegebenen Abbrandwerte dienten die kalorimetrisch ermittelten Leistungen des Einsatzes. Als Endabbrand ergab sich daraus ein Wert von 34.000 MWd/t. Der entsprechende Wert aus der radiochemischen Abbrandanalyse des Stabes G 3.6 beträgt als axialer Mittelwert 3,97 at-% /4/, siehe Abb. 2. Das entspricht 36.250 MWd/t ( $1 \text{ at-\%} \cong 9.130 \text{ MWd/t}_U$ ). Dieser Abbrandwert wird als gleich

für alle sechs bestrahlten Stäbe angesehen. Das axiale Abbrandprofil beruht auf sechs axialen Abbrandproben, die radiochemisch untersucht wurden.

Der FR2 hat als Versuchsreaktor zwangsläufig eine andere Betriebsweise und auch andere Betriebsdaten als ein Leistungsreaktor:

- Der Leistungsreaktor wird bis zum Erreichen eines Abbrandes von ca. 35 GWd/t<sub>U</sub> nur zwei- bis dreimal gezielt abgeschaltet. Die Vorbestrahlungsbündel im FR2 erleben dagegen aus verschiedenen Gründen eine ganze Reihe von Abschaltungen, die häufig mit Umladungen von Brennelementen und damit auch mit Leistungsänderungen verbunden sind. Als Beispiel für die Leistungsänderungen dient die Betriebsgeschichte des Bündels G2/3 in Abb.3 Die Gesamtzahl der Abschaltungen beträgt 62.
- Kühlmitteldruck und -temperatur liegen im FR2 niedriger als im DWR (FR2: 2,4 bar und 58 °C, DWR: 155 bar und 315 °C als mittlere Werte zwischen Eintritt und Austritt).
- Die äußere Hüllwandtemperatur des DWR-Stabes liegt um 200 bis 300 K höher als die des FR2-Versuchsstabes.
- Da der Helium-Einfülldruck des FR2-Versuchsstabes zu 3 bar festgelegt wurde (DWR: 22,5 bar bei Raumtemperatur), ist im Gegensatz zum DWR-Stab der Stabinnendruck des FR2-Versuchsstabes während der ganzen Vorbestrahlungszeit geringfügig höher als der Kühlmitteldruck.

## 2.2 Stabmontage

Nach der Bestrahlung wird das Vorbestrahlungsbündel in eine Abschirmposition im Brennelement- (BE)-Lager eingesetzt. Dort wird zunächst eine Abklingzeit von  $\geq 20$  d abgewartet, die nach dem Sicherheitsbericht des Vorhabens notwendig ist, um bei Störfällen während der Montage die Aktivitätsabgabe in den zulässigen Grenzen zu halten.

Die Montage der Versuchsstäbe erfolgt in der Abschirmzelle des FR2. Die Stäbe werden einzeln aus dem Vorbestrahlungseinsatz entnommen. Ein Stab des Bündels wird abgezweigt und einer speziellen Nachuntersuchung zugeführt (z.B. radiochemische Bestimmung des Abbrandes, Messungen zum Abbrandprofil und Analyse der Spaltgase, Feststellungen zum Brennstoffzustand).

Die übrigen fünf Stäbe werden in der Zelle nacheinander mittels fernbedienbarer Vorrichtungen und Werkzeuge mit vorgefertigten Probenträgern gekoppelt. Dabei wird gleichzeitig das Plenum angestochen (s. Abb. 4), ohne daß Spaltgas entweichen kann. Durch das Anstechen wird das Plenum über eine Kapillare mit dem Druckaufnehmer am Kopf des Probenträgers verbunden. Der Plenumsdruck, der sich während der Vorbestrahlung eingestellt hat, wird ermittelt, die Dichtheit der Koppelstelle geprüft.

Die am Probenträger installierten Thermoelemente zur Messung der Hüllrohr-Versuchstemperaturen müssen in der Zelle auf die Stabhülle geschweißt werden. Hierzu wurde eine Spezialeinrichtung erstellt, die eine genaue Positionierung (Abweichung  $\leq 0,5$  mm) sowie ein zuverlässiges, fernbedientes Anpunkten gewährleistet.

Nach Komplettierung mit dem sogenannten inneren Dampfführungsrohr ist der Prüfling (s. Abb. 5) einsatzbereit. Es folgt die neutronenradiografische Dokumentation des Zustandes nach der Vorbestrahlung, vor dem Versuch.

### 2.3 Neutronenradiografie

Zur Anfertigung von Durchstrahlungsaufnahmen steht am FR2 die Neutronenradiografie-Anlage (NERA) zur Verfügung.

Der Nuklearprüfling wird zuerst nach der Montage, dann nach dem Versuch in (axial überlappende) Teilaufnahmen radiografiert. Es wird also der Stab nach der Vorbestrahlung und nach dem Versuch vergleichbar dargestellt. Zwischen diesen Aufnahmen wird der Prüflingseinsatz zwar einige Male umgesetzt, bleibt jedoch stets in vertikaler Lage. Bei der nachfolgenden Handhabung, d.h. beim Transport und während der Nachuntersuchungen in den Heißen Zellen, ist das nicht mehr der Fall. Infolgedessen sind für Aussagen zum Zustand der Brennstoffsäule vor und nach dem Versuch die NERA-Aufnahmen am ehesten geeignet.

An die Bildschärfe darf allerdings kein allzu hoher Maßstab angelegt werden. Hier sind die geometrischen Verhältnisse der Durchstrahlungsanordnung und das Streuverhalten der thermischen Neutronen zu berücksichtigen. Die Darstellung der Zry-Hülle erfolgt nur wenig kontrastreich, da Zirkonium einen geringen Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen hat.

### 3. Prüflingsdaten

#### 3.1 Allgemeine Daten

Die nuklearen Prüflinge entsprechen in ihren radialen Abmessungen den Brennstäben deutscher DWR, die Länge der Prüflinge ist verkürzt auf 500 mm aktive Zone. Abb. 5 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Prüflings in der Teststrecke.

Die wichtigsten Prüflingsdaten sind in Tab. 2 zusammengestellt, es handelt sich hier um die Sollwerte des kalten, unbestrahlten Stabs.

Die Ist-Werte der Hüllrohr- und Pelletabmessungen wurden im Verlauf der Stabfertigung festgehalten: Auf eine Länge von 200 mm in der Mitte der aktiven Zone (150 bis 350 mm von Unterkante Brennstoff) wurden mit Ultraschall-Methoden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle zugehörig gemessen, und zwar alle  $18^\circ$  azimuthal, alle 15 mm axial /3/. Aus den Meßwerten von Außendurchmesser und Wandstärke wurde der Innendurchmesser berechnet.

Auch die Pellets wurden im mittleren Abschnitt der aktiven Zone einzeln vermessen. Aus den Mittelwerten der Hülleninnen- und Pelletaußendurchmesser folgt das Einfüllspiel.

Außerhalb der genau vermessenen 200 mm wurden Außendurchmesser und Wandstärke der Hülle im Wendel-Durchlaufverfahren auf Einhaltung der Toleranzen geprüft. Es zeigte sich, daß die im mittleren Abschnitt gemessenen Absolutwerte und Streubreiten charakteristisch für die gesamte Stablänge sind.

Die Länge des Brennstabplenums wurde anhand von Röntgenaufnahmen der Versuchsstäbe im zusammengebauten Zustand ermittelt.

Table 2: Nominal Test Fuel-Rod Data

---

Cladding	
Material	Zircaloy-4
Outside diameter, mm	10.75
Inside diameter, mm	9.3
Wall thickness, mm	0.725
Fuel pellets	
Material	UO <sub>2</sub>
Diameter (nominal gap), mm	9.11
Diameter (small gap), mm	9.15
Length, mm	11
Enrichment (active zone), %	4.7
Enrichment (end pellets), %	0.3
Height of pellet stack (active zone), mm	500
Density, g/cm <sup>3</sup>	10.35
Density, %T.D.*	94.4
Insulating pellets	
Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diameter, mm	9.15
Length, mm	8
Void Volumes	
Dishing per pellet, mm <sup>3</sup>	16
Gap Volume (nominal gap), cm <sup>3</sup>	1.57
Plenum (excl. spring), cm <sup>3</sup>	15.87
End plug, Capillary tube, and pressure transducer, cm <sup>3</sup>	12.25
Fillgas composition	100 % Helium

---

\*) T.D. = theoretical density

### 3.2 Daten der Prüflinge für die Versuchsserie G 2/3

Die verwendeten sechs Prüflinge haben die folgende Bezeichnung

Stab Nr. 35 → G 2.1  
Stab Nr. 36 → G 2.2  
Stab Nr. 12 → G 3.1  
Stab Nr. 11 → G 3.2  
Stab Nr. 10 → G 3.3  
Stab Nr. 6 → G 3.6 (Abbrandstab: keine Transiente,  
Untersuchung Abbrand usw.)

Die Prüflinge der G2-Serie haben die Spaltweite "1", d.h. einen Nennwert des diametralen Einfüllspiels von 190  $\mu\text{m}$ , bei den Prüflingen der G3-Serie mit der Spaltweite "s" beträgt das Einfüllspiel 150  $\mu\text{m}$ .

Die wichtigsten gemessenen Prüflingsdaten der sechs Stäbe sind in Tabelle 3 zusammengefaßt; zusätzlich zeigen die Abb. 6.1 bis 6.5 die statistische Verteilung der gemessenen Hüllen- und Pelletdurchmesser, deren Mittelwerte sowie das daraus errechnete mittlere Einfüllspiel  $s_E$  für die in den Versuchen G 2.1 bis G 3.3 eingesetzten Stäbe.



Tabelle 3

## GEMESSENE PRÜFLINGSDATEN G 2/3-STÄBE

	G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3	G 3.6	
Brennstablänge (mm)	972,9	972,9	972,9	973,0	972,9	973,0	
Länge der aktiven Zone (mm)	498,2	497,9	499,9	502,8	500,4	499,5	
Länge des Brennstabplenums (mm)	312,5	312,5	311,0	309,0	309,0	311,0	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	16,07	16,04	15,90	15,73	15,77	15,94	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	0,753	0,768	0,755	0,768	0,763	0,760	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) [a]	1,636	1,593	1,197	1,195	1,173	1,279	
Hüllaußendurchmesser (mm)	max.	10,763	10,751	10,751	10,750	10,753	10,752
	mittel	10,756	10,744	10,746	10,742	10,746	10,747
	min.	10,749	10,738	10,741	10,735	10,738	10,741
Hüllinnendurchmesser (mm)	max.	9,318	9,312	9,300	[b] 9,314	9,301	9,312
	mittel	9,308	9,301	9,292	9,284	9,293	9,301
	min.	9,298	9,291	9,287	9,263	9,286	9,292
Wandstärke (mm)	max.	0,756	0,755	0,746	0,733	0,745	0,743
	mittel	0,724	0,722	0,727	0,730	0,726	0,723
	min.	0,691	0,689	0,708	0,726	0,708	0,704
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )	10,45	10,44	10,44	10,45	10,45	10,43	
Tablettendurchmesser (mm)	max.	9,101	9,108	9,152	9,159	9,157	9,151
	mittel	9,109	9,107	9,147	9,156	9,151	9,146
	min.	9,104	9,103	9,142	9,143	9,142	9,142
mittleres diametrales Einfüllspiel (mm) [a]	0,199	0,194	0,145	[b] (0,128)	0,142	0,155	

[a] aus Meßdaten berechnet

[b] abweichender Wert durch Meßfehler

#### 4. Versuchsablauf

Wie bei der Montage der Versuchsstäbe ist auch beim Versuch selbst die Freisetzung von Spaltprodukten unerwünscht und soweit wie möglich zu vermeiden. Im Sicherheitskonzept des Experiments wurde für den Versuch eine Mindest-Abklingzeit nach der Vorbestrahlung von 56 Tagen festgelegt.

Nach dieser Wartezeit wird der Prüfling bei abgeschaltetem Reaktor in das für den Betrieb mit schadhafte Prüflingen ausgelegte Dampf-Kontaminations- (DK)-Loop (siehe Abb. 7) eingebaut.

Der In-pile-Versuch beginnt mit einigen Stunden Stationärbetrieb zur Stabilisierung der Kreislaufeinstellung und der Reaktorleistung. Dabei sind das Absperrventil Ve 108 zwischen Überhitzer und In-pile-Strecke und das Regelventil Ve 111 offen, das Entspannventil Ve 128 ist geschlossen.

Der Kreislauf wird mit folgenden Daten betrieben:

Massenstrom:	100 - 140 kg/h
Druck	60 bar
Dampf­temperatur am Eintritt zur Teststrecke	280 - 340 °C

Während dieses Stationärbetriebes erfolgen u.a. Messungen der Flußdichteprofile in benachbarten Positionen zur sog. reaktorphysikalischen Bestimmung der Prüflingsleistung. Auch der Innendruck wird erst in dieser Phase endgültig eingestellt.

Zur Auslösung der Transiente wird bei konstanter Reaktor- und damit auch Prüflingsleistung das Absperrventil Ve 108 geschlossen und gleichzeitig das Entspannventil Ve 128 geöffnet. Damit wird der Kühldampfstrom unterbrochen - die Temperatur des Prüflings steigt an (siehe Abb. 8). Gleichzeitig sinkt der Druck im Kühlkanal rasch ab, da Enthitzer, Kondensator und Abgas-system weiterarbeiten.

Unabhängig davon, ob der Prüfling im Verlauf der Transiente platzt oder nicht, wird bei einer vorher bestimmten Hülltemperatur ( $\sim 920\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) die Prüflingsleistung durch Reaktorscram praktisch abgeschaltet. Die Hülltemperatur beginnt langsam zu sinken. Nach Erreichen einer weiteren Temperaturmarke ( $\sim 740\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) wird gelegentlich der Kühldampfstrom wieder eingeschaltet; die Hülltemperatur sinkt schnell ab, ähnlich wie beim Abschrecken (Quenching) durch Flutung beim KVS im wirklichen Reaktor. Bei den fünf G 2/3-Versuchen wurde kein Quenching durchgeführt. Die beiden erwähnten Temperaturmarken ergeben sich aus dem nach /1/ angestrebten Referenztemperaturverlauf, dieser selbst in Anlehnung an eine für den heißesten Stab in einem DWR durchgeführte Berechnung.

#### 5. Versuchsdaten

Die Tabellen 4.1 bis 4.5 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßwerte der Versuche G 2.1 bis G 3.3 und einige von den Meßwerten abgeleitete Daten. Die wesentlichen Meßdaten im Stationärbetrieb als Ausgangswerte für die Transiente sind im Anhang (Tab. 16.1 bis 16.5) aufgelistet.

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	29,0	MW
Fluiddichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,012	Abbrand	35.000 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	56,49 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		48,4 bis 54,9 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		41,0 bis 50,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	30,85 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	60,60
Maximum	Der Stab war undicht !	-
beim Temperaturmaximum von T		-
BERSTD RUCK	38,50	36,97 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		419	417	404	448	491	465
bei max. Innendruck nach sec		-	-	-	-	-	-
rel. Maximum nach 38,5 sec		-	-	-	-	-	859
beim Bersten nach 38,5 sec		879	873	860	882	876	859
abs. Maximum nach 49,5 bis 50,5 sec		926	938	931	942	934	886
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 859 + 10 K							869 °C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	44,9 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 132 bei 450 °C nach 4,8 sec	26,8 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	13,6 bis 15,8 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	19,8 bis 24,0 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 134	43,5 sec

DATEN DES VERSUCHS G 2.1 VOM 14.11.1978

TABELLE 4.1

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	27,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,026	Abbrand 35.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	54,35 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		46,0 bis 49,8 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		44,5 bis 50,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	31,46 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	74,95
Maximum	19,70	75,38
beim Temperaturmaximum von T132	31,4	66,28
BERSTDRUCK	31,40	66,28 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		408	426	420	419	419	422
bei max. Innendruck nach 19,7 sec		702	726	720	717	712	693
rel. Maximum nach 31,4 bis 32,4 sec		795	831	-	821	798	799
beim Bersten nach 31,4 sec		795	831	841	819	798	797
abs. Maximum nach 42,5 bis 43,5 sec		811	836	930	874	857	823
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	836 + 10 K						846 °C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	27,7 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 132 bei 455 °C nach 4,8 sec		26,3 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136		12,8 bis 14,1 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136		19,7 bis 22,2 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 133		40,7 sec

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	26,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,026	Abbrand	35.000 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	52,39 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		40,7 bis 45,1 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		41,0 bis 46,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	29,26 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	60,95
Maximum	Der Stab war undicht !	
beim Temperaturmaximum von T		-
<b>BERSTDRUCK</b>	55,00	<b>32,60 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		407	402	414	417	429	412
bei max. Innendruck nach sec		-	-	-	-	-	-
rel. Maximum nach 48,5 bis 55,5 sec		905	894	882	866	880	872
beim Bersten nach 55,0 sec		904	894	880	855	875	872
abs. Maximum nach 53,0 bis 76,0 sec		905	894	882	883	920	897
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	890 + 10 K	900 °C					

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	28,0 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 133 bei 463 °C nach 5,5 sec	24,1 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	11,0 bis 12,5 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	21,5 bis 24,0 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135	65,0 sec

DATEN DES VERSUCHS G 3.1 VOM 21.11.1978

TABELLE 4.3

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	27,5	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,027	Abbrand	35.000 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	51,24 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		49,8 bis 57,1 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		48,5 bis 53,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	32,74 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	73,20
Maximum	16,50	73,55
beim Temperaturmaximum von T 135	31,50	62,70
BERSTD RUCK	33,00	57,00 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C								
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136	
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		406	408	406	432	435	421	
bei max. Innendruck nach 16,5 sec		674	678	657	696	705	683	
rel. Maximum nach 31,5 bis 33,5 sec		830	822	812	817	840	833	
beim Bersten nach 33,0 sec		830	821	808	808	837	833	
abs. Maximum nach 53,5 bis 54,5 sec		-	914	892	902	930	875	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	828 + 10 K						838 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	21,4 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 135 bei 487 °C nach	5,0 sec	25,8 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	14,1 bis 16,6 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	18,6 bis 20,3 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 135	52,0 sec

DATEN DES VERSUCHS G 3.2 VOM 28.11.1978

TABELLE 4:4

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	23,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,023	Abbrand 35.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	54,88 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		32,7 bis 37,9 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		31,7 bis 41,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	26,58 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	125,61
Maximum	14,70	125,78
beim Temperaturmaximum von T 131	28,90	110,73
<b>BERSTDRUCK</b>	28,90	<b>110,73 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		403	--	-	416	-	390
bei max. Innendruck nach 14,7 sec		610	-	-	621	-	581
rel. Maximum nach 28,9 bis 29,9 sec		730	-	-	756	-	690
beim Bersten nach 28,9 sec		730	-	-	745	-	688
abs. Maximum nach 63,3 bis 65,8 sec		874	--	-	937	-	850
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		740 + 10 K				750 °C	

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	29,7 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 131 bei 430 °C nach 5,0 sec	21,5 K/s
bei 650 °C T 131, T 134, T 136	8,2 bis 10,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131, T 134, T 136	23,8 bis 31,0 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 134	59,2 sec

DATEN DES VERSUCHS G 3.3 VOM 24.11.1978

TABELLE 4.5



### 5.1 Messung der Versuchsdaten

Der Stabinnendruck wird am kalten, oberen Ende des Prüflings kontinuierlich gemessen. Die Meßeinrichtung besteht aus einem Mikro-DMS-Druckaufnehmer, der über eine Kapillare von 1,6 mm lichter Weite mit dem Plenum verbunden ist. Der Meßbereich des Druckaufnehmers beträgt 0 - 175 bar Überdruck.

An der Stabhülle wird - am Umfang und über die Stablänge verteilt - an sechs Stellen in der aktiven Zone die Temperatur gemessen. Zur Verwendung kommen Ni/CrNi-Thermoelemente 1 mm  $\emptyset$  mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platinhülle; da die direkte Schweißverbindung Inconel/Zry problematisch ist. Bei den Versuchen G 2/3 wurde die Platinhülle der Thermoelemente ohne überstehenden Teil direkt aufgepunktet (Abb. 9, Version B). Die Anordnung der TE ist in Tabelle 5 angegeben. Der axiale Abstand zwischen zwei Meßstellen beträgt 5 cm.

Von den vielen Größen, die für den Betrieb des Versuchskreislaufs gemessen und verarbeitet werden, interessieren für die Auswertung vor allem Temperaturen, Druck und Massenstrom des Kühlmittels; sie werden zur Bestimmung der sog. thermischen Prüflingsleistung verwendet.

Alle Meßwerte werden digitalisiert, zur zentralen Anlage CALAS \* übertragen und auf Band gespeichert. Die Abfragefrequenz beträgt während der Transiente 2 Datensätze pro Sekunde, während des Stationärbetriebs 2 Datensätze pro Minute.

---

\*) Computer Aided Laboratory Automation System

Tabelle 5

## ANORDNUNG DER HÜLL-THERMOELEMENTE IN DEN VERSUCHEN G 2.1 - G 3.3

TE-Bezeichnung	axiale Lage (a) (Soll-Maße)	axiale Lage (Ist-Maße) und Umfangslage (b)				
		G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3
T 131	200 mm	197/ 62°	197/115°	197/231°	197/188°	198/114°
T 132	250 mm	247/ 2°	248/ 55°	247/171°	247/128°	249/174°
T 133	300 mm	298/302°	298/355°	298/111°	298/ 68°	299/234°
T 134	350 mm	348/242°	348/295°	349/ 51°	349/ 8°	349/ 54°
T 135	400 mm	399/182°	399/235°	400/351°	399/308°	399/354°
T 136	450 mm	449/122°	450/175°	450/291°	450/248°	450/294°

(a) Abstand von Unterkante aktiver Zone (UKF)

(b) Winkel von Nullmarkierung im Uhrzeigersinn bei Ansicht des Stabes von unten.

## 5.2 Kühlmitteldaten

Die Kühlmitteldaten in den Versuchen G 2.1 bis G 3.3 unmittelbar vor Auslösung der Transiente gibt Tabelle 6 wieder. Die Gesamtheit aller gemessenen Daten kurz vor Transientenbeginn ist im Anhang, S. 154 ff., eingetragen.

Tabelle 6      Kühlmitteldaten G 2/3-Versuche

Versuch	G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3
Kühlmittleintrittstemperatur T 115 (°C)	342	345	340	346	336
Kühlmittelaustrittstemperatur T 116 (°C)	373	374	368	374	364
Kühlmitteldruck in der Teststrecke <sup>[a]</sup> (bar)	62	61	61	61	62
Kühlmittelmengenstrom (kg/h)	115	115	115	116	117

[a]  $\frac{1}{2} (P 60 + P 61)$

## 5.3 Prüflingsleistung

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse, vor allem zur Nachrechnung des zeitlichen Temperaturverlaufs ist die Kenntnis der Prüflingsleistung erforderlich. Die Bestimmung der Leistung erfolgt mit mehreren Verfahren:

- Thermische Leistung
- Leistung aus Temperaturanstieg
- Reaktorphysikalische Leistung.

a) "Thermische Leistung NTH": Die Gesamtleistung des Prüflings wird durch Messung der Kühlmittelaufheizung im Stationärbetrieb bestimmt. Gemessen werden der Kühlmittelmassenstrom mittels Blende zwischen Prüfling und Enthitzer, die Kühlmitteltemperaturen T 115 vor und T 116 nach dem Prüfling mit

Thermoelementen. Zur Bestimmung von Dichte  $\rho$  und spezifischer Wärme  $c_p$  des Kühlmittels werden dessen Temperatur und Druck vor und hinter der Teststrecke (T5/P60 und T6/P61) gemessen und gemittelt. Die angegebene "mittlere Thermische Leistung" NTH ist auf die aktive Prüflingslänge von 50 cm bezogen.

Alle zur Leistungsbestimmung erforderlichen Rechenoperationen werden on-line von der EDV-Anlage CALAS ausgeführt.

Die mittlere thermische Leistung ergab sich in den Versuchen G 2.1 bis G 3.3 zu

NTH = 56,5 W/cm (G 2.1), 54,4 W/cm (G 2.2), 52,4 W/cm (G 3.1),  
51,2 W/cm (G 3.2), bzw. 54,9 W/cm (G 3.3).

- b) "Leistung aus Temperaturanstieg NA": Diese Methode erlaubt nach dem Versuch eine Abschätzung der lokalen Stableistung an den Stellen, die mit Thermoelementen bestückt sind. Es wird der während der Transiente gemessene Verlauf der Hülltemperatur verglichen mit den gerechneten Anstiegswerten für verschiedene Stableistungen<sup>(a)</sup> und daraus auf die Stableistung geschlossen. Da die Vergleichsrechnungen für das glatte Hüllrohr erfolgten, muß der Einfluß der Thermoelementkabel nachträglich durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden: Die angeschweißten TE und die an einer Meßstelle vorbeiführenden Kabel der weiter unten angebrachten TE vergrößern die aufzuheizende Masse und die wärmeübertragende Oberfläche des Hüllrohrs so, daß der Temperaturanstieg bei gleicher Leistung langsamer als am glatten Hüllrohr erfolgt. Nach /5/ muß bei idealem metallischen Kontakt die aus dem gemessenen Anstieg bestimmte Leistung um knapp 1 % pro TE-Kabel erhöht werden, beim obersten Thermoelement T 136 insgesamt um 5 % (bei 30 - 50 W/cm). Da diese Zahlen nur mögliche Bereiche darstellen, sind alle NA-Werte in diesem Bericht nicht korrigiert.

Die Leistungen aus dem Temperaturanstieg für die G 2/3-Versuche sind in den Tabellen 4.1 bis 4.5 als Zahlenwertbereiche, in den Abbildungen 10.1 bis 10.5 für die einzelnen Positionen zusammen mit dem relativen Profil aus Abb. 12.1 bis 12.5

---

(a) Rechnungen des IKE Stuttgart mit WALHYD2D (D. Steiner)

angegeben. Die Streuung der aus dem Temperaturanstieg bestimmten Leistungswerte spiegelt die lokalen Unterschiede der Hüllrohrerwärmung azimuthal und des Kontakts zwischen Hülle und vorbeilaufenden TE-Kabeln wieder. Ein axiales Leistungsprofil läßt sich aus den Einzelwerten von NA nicht ableiten.

- c) "Reaktorphysikalische Leistung NKP": Mit der Annahme, daß die Prüflingsleistung proportional der Leistung entsprechender Abschnitte der die Teststrecke umgebenden Reaktorbrennelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brennelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Aufgrund der bei allen G2/3-Versuchen sehr ähnlichen Neutronenflußverhältnisse ergab sich hier die reaktorphysikalisch bestimmte max. Prüflingsleistung NKP als direkt proportional zur Brennelementgesamtleistung NBE:

$$NKP = k \cdot NBE$$

Der Faktor k ist außer von den Flußverhältnissen vor allem vom Abbrand abhängig, d.h. er fällt von Versuchsserie zu Versuchsserie verschieden aus. Für die G2/3-Versuche wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

$$k = 0,19 \text{ [(W/cm)/kW]} \quad (a)$$

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA) liefert einen 50 % höheren k-Wert, nämlich 0,28 (W/cm)/kW. Beide k-Verläufe sind in Abb. 11 eingetragen.

Axialer Leistungsverlauf: Der relative axiale Leistungsverlauf wird vor allem mit reaktorphysikalischen Methoden bestimmt. Dabei wird von der Tatsache ausgegangen, daß die lokale nukleare Leistung proportional der lokalen Spaltstoffkonzentration und der lokalen Flußdichte thermischer Neutronen ist. Da die lokale Flußdichte am Prüfling direkt nicht gemessen werden kann, werden - im Stationärbetrieb - in drei der Teststrecken benachbarten

---

(a)  $k = f \cdot (\varphi_{Pr.,max.} / \bar{\varphi}_{Core}) = f \cdot \varphi$   
abgeschätzt wurde  $f = 0,15$ , gemessen wurde  $\varphi \sim 1,3$

Reaktorpositionen axiale Flußdichteprofile über die ganze Corehöhe aufgenommen und auf jeder Axialkote  $z$  gemittelt. Das so gewonnene mittlere Flußdichteprofil  $\bar{\phi}_{th}$  wird als proportional zum Flußdichteprofil am Prüfling angenommen.

Bei bereits vorbestrahlten Brennstabprüflingen ist neben der Flußdichte auch die Spaltstoffkonzentration axial nicht konstant.

Die beiden Beiträge zum axialen Leistungsprofil,

- a) das während des Versuchs ermittelte Flußdichteprofil und
- b) das Spaltstoffprofil nach erfolgter Bestrahlung

sind als normierte auf den Mittelwert bezogene Kurven zusammen mit dem daraus resultierenden Leistungsprofil (oberste Kurve  $L(z)/\bar{L}$ ) in den Abb. 12.1 bis 12.5 für die Versuche G 2.1 bis G 3.3 dargestellt. Das Spaltstoffprofil darin ist aus den Werten von sechs Einzelproben des Stabes G 3.6 (15, 28, 226, 239, 413 und 474 mm von UKF) ermittelt worden. Es hat sich als linear ergeben. Die Konzentration der U- und Pu-Kerne wurde mit dem Röntgenfluoreszenzverfahren bestimmt, die Anteile der U- und Pu-Isotope massenspektrometrisch ermittelt<sup>(a)</sup>.

Mit den nach den o.g. Methoden bestimmten mittleren Prüflingsleistungen lassen sich die relativen Leistungsprofile in absolute umrechnen. Für die thermische Leistung, zum Beispiel, ist der axiale Verlauf

$$NTH(z) = \overline{NTH} \cdot (L(z)/\bar{L})$$

---

(a) Abbrandanalyse vom Institut für Radiochemie durchgeführt /4/

in den Abb. 10.1 bis 10.5 (Versuche G 2.1 bis G 3.3) zusammen mit den oben erwähnten NA-Werten aufgetragen. Auch der jeweilige axiale Formfaktor, d.h. das Verhältnis von Maximal- zu Mittelwert, ist darin angegeben.

#### 5.4 Prüflingsinnendruck

Die zeitlichen Verläufe des Innendrucks der Prüflinge zeigen Die Abb. 13.1 bis 13.5. Daraus ergeben sich die Berstzeitpunkte zu 38 s, 31 s, 55 s, 33 s und 29 s in der Reihenfolge der Versuche G 2.1 bis G 3.3.

Auf den Übersichtsblättern (Tab. 4) sind jeweils vier Druckwerte angegeben: (1) der bei Transientenbeginn im Prüfling herrschende Druck, der vorher bei Stationärbetrieb - also warm - eingestellt wurde, (2) der höchste gemessene Wert, (3) der Druckwert zur Zeit des Temperaturmaximums und schließlich (4) der Berstdruck. Als Berstdruck wird der Druck definiert, bei dem ein Abfall mit mehr als 10 bar/s beginnt; die zugehörige Zeit seit Transientenbeginn wird gemäß Abb. 17 Berstzeitpunkt genannt.

#### 5.5 Hüllrohrtemperaturen

Die zeitlichen Verläufe der Hüllrohrtemperatur während der Transiente sind in den Abb. 14.1 bis 14.5 und 15.1 bis 15.5 dargestellt. In den Abb. 14 sind die axialen Hülltemperaturverläufe für einige ausgewählte Zeitschritte zusammen mit den Lagen der Ribstellen eingetragen. Die Abbildungen 15 zeigen die Verläufe der sechs Hüllrohrtemperaturen T 131 bis T 136 kontinuierlich über der Zeit:

Bei 0 s unterscheiden sich die Anzeigen der verschiedenen TE eines Prüflings bis zu 90 K. Der kurze Temperaturabfall bei  $t = 2$  s resultiert aus dem kurzfristig zunehmenden Kühlmittelstrom beim Entspannen des Kreislaufs. Die fortschreitende

Deformation zeigt sich meist am verlangsamten Temperaturanstieg. Bei  $t = 38, 31, 55, 33$  und  $29$  (G 2.1 bis G 3.3) platzten die Stäbe (siehe Druckverlauf in den Abb. 13.1 bis 13.5). Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurde die Leistung zurückgenommen.

Der Temperatureinbruch nach dem Bersten der Hülle erklärt sich daraus, daß es beim Platzen der Hülle zu einer Strömung von relativ kaltem Füllgas vom Stabplenum zur Rißstelle kommt und außerdem die starke Vergrößerung des Spalts zwischen Brennstoff und Hülle den thermischen Widerstand verstärkt hat. Für den Versuch G 3.2 sind zusätzlich die Temperatureinbrüche der sechs Temperaturmeßstellen in Abb. 16 vergrößert, d.h. als Ausschnitt aus Abb. 15.3 dargestellt.

Die gemessenen maximalen Temperatureinbrüche der G2/3-Versuche können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7

Maximale Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe G2/3

Versuch	Temp. meßst.	Zeitpunkt (s)	Temp. abfall (K)	Abst. Meßstelle/Rißmitte (mm)	Grad [b]
G 2.1	T 136	39,0	15	5	40
G 2.2	T 132	31,9	27	29	63
G 3.1	T 132	55,0	222	31	69
G 3.2	T 131	33,0	179	12	98
G 3.3 [a]	-	-	-	-	-

[a] Temperaturmeßstelle in Rißnähe ausgefallen

[b] kleinster Winkel



Die axialen Temperaturverläufe (Abb. 14.1 bis 14.5) lassen in der Regel nach dem Bersten den Ort der maximalen Verformung bzw. des Risses erkennen, da der Temperatureinbruch der benachbarten TE dort am größten ist.

Als Bersttemperatur wird die auf die Beulstelle gemäß Abb. 17 extrapolierte Hülltemperatur zum Zeitpunkt des Berstens bezeichnet. Auf den Übersichtsblättern der Tab. 4 ist zu diesem Temperaturwert als einzigem eine "Korrektur" angegeben, alle anderen Temperaturangaben stellen den direkten Meßwert dar. Eine Korrektur ist deswegen erforderlich, weil die Befestigungsart der Thermoelemente zu Meßwerten führt, die niedriger als die wahre Hüllrohrtemperatur sind. Versuche zur Bestimmung des Meßfehlers ergaben die leistungsabhängigen Korrekturwerte von Abb. 18 für die beiden TE-Versionen A und B; benutzt wird die jeweilige mittlere Kurve. Bei der Extrapolation der Bersttemperatur aus den Meßwerten T 131 bis T 136 konnte eine azimutale Temperaturverteilung nicht berücksichtigt werden.

Die bisher ermittelten Bersttemperaturen als Funktion des Berstdrucks sind in Abb. 19 in Relation zu den Ergebnissen der MRBT (Multi Rod Burst Tests) des ORNL <sup>(a)</sup> /6/ mit gleichfalls indirekt beheizter Hülle (hier elektrisch) dargestellt. Bei diesem Diagramm ist zu beachten, daß die Definitionen von Bersttemperatur und -druck bei beiden Versuchsvorhaben (ORNL und KfK) nicht übereinstimmen.

Die Bersttemperatur/Berstdruck-Wertepaare der Versuche G 2.1 und G 3.3 liegen in der Mitte des Bereichs der ORNL-Daten und im Streubereich der KfK-in-pile-Daten.

---

(a) Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA

### 5.6 Temperaturanstieg der Hülle

Da nach den Ergebnissen von Out-of-pile-Versuchen auch die Aufheizraten von Einfluß auf die Mechanismen des Brennstabversagens sind, wurden in den Tab. 4 einige Einzelwerte zum Temperaturanstieg der Hülle bzw. zur Aufheizzeit angegeben. Bei Vergleichen ist darauf zu achten, daß die jeweiligen Referenztemperaturen berücksichtigt werden.

Für die Beulstelle der Versuche G 2.1 bis G 3.3 wurden aus den Messungen der Hüll-TE und aus den relativen Leistungsverläufen die Hülltemperatur-Gradienten abgeschätzt, die in Tabelle 8 angegeben sind.

Tabelle 8

Hülltemperaturgradienten an den Berststellen (bei 650 °C Meßtemperatur)

Versuch	Hülltemperaturgradient (K/s)
G 2.1	13,6
G 2.2	13,0
G 3.1	12,5
G 3.2	15,5
G 3.3	10,0

## 6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen

### 6.1 Durchstrahlungen der Stäbe

Zur Kontrolle des Brennstoffzustandes sowie der Haftung der TE an der Prüflingshülle werden vor dem Versuch Durchstrahlungen des Prüflingseinsatzes in der Neutronenradiografieanlage des FR2 (NERA) vorgenommen. Als Beispiel diene die Abb. 20, die den Prüfling G 3.3 zeigt.

Nach dem Transientenversuch, d.h. nach Ausbau des Prüflingseinsatzes aus dem FR2 werden erneut Durchstrahlungen in der NERA durchgeführt. Es werden mehrere axial überlappende Aufnahmen des Prüflings sowie Aufnahmen unter verschiedenen Einstellwinkeln gemacht. Dabei wird versucht, vor und nach dem Transientenversuch die gleichen Abschnitte unter gleichen Winkeln zu neutrografieren. Die Winkelstellung der Aufnahmen zum Prüfling ist für die einzelnen Versuchsstäbe in den Abb. 21.3, 22.3, 23.3, 24.3 und 25.3 wiedergegeben.

Bei den NERA-Aufnahmen steht der Prüfling noch innerhalb des Dampfführungsrohrs (18 mm Innendurchmesser), das aus Edelstahl ist und daher kontrastreicher abgebildet wird als die weniger neutronenabsorbierende Zry-Hülle.

Aus den Aufnahmen (Abb. 21.1 und 21.2), für G 2.1, bis zu Abb. 25.1 und 25.2 für G 3.3) ist für diese Versuchsserie zu entnehmen:

- Die vorbestrahlten Stäbe zeigen vor dem Transientenversuch deutliche Risse im Brennstoff, die Pelletform ist noch erhalten.
- Nach dem Transientenversuch haben die Pelletbruchstücke den durch Hüllrohrdehnung entstandenen Raum in der Art einer losen Schüttung von Körnern ausgefüllt.

- Im Bereich größerer Dehnung ist aufgrund der Brennstoffbewegungen die ursprüngliche Pelletform nicht mehr zu erkennen.
- Durch Nachrutschen von Brennstoffteilchen in den Beulbereich hat sich die Länge der Brennstoffsäule bei allen Stäben deutlich verkürzt (siehe Tabelle 9).
- Beim Versuch G 2.1 ist der Prüfling weniger stark aufgeweitet als bei übrigen Versuchen der G2/3-Serie.

Tabelle 9

Längenänderung der Brennstoffsäule durch die G1-Versuche

Versuch	Montagemaß [a] (mm)	Länge nach Versuch (mm)	Längendiffe- renz (mm)
G 2.1	498	492	6
G 2.2	498	462	36
G 3.1	500	465	35
G 3.2	503	436	67
G 3.3	500	472	28

[a] wird gleichgesetzt mit dem Maß nach der Bestrahlung

Neben den Radiografien werden in den Heißen Zellen Röntgenaufnahmen der Versuchsstäbe hergestellt (Abb. 26, 27, 28, 29 u. 30). Bei diesen Aufnahmen sind der Brennstoffzustand und die Stabhülle besser zu erkennen, als bei den NERA-Aufnahmen. Beim Vergleich der Röntgen- mit den NERA-Aufnahmen ist festzustellen, daß die Lage der Brennstoffstücke z.T. unterschiedlich ist. Dies ist auf den Transport und die nachfolgende Handhabung in den Zellen zurückzuführen.

## 6.2 Fotodokumentation

In Gegenüberstellung mit den Röntgenaufnahmen ist auf den Abb. 26, 27, 28, 29 und 30 ein Stab-Abschnitt mit der entsprechenden Ansicht der Ribstelle zu sehen. Zusätzlich zur Ansicht des Stabes G 2.1 in Abb. 26.1 ist in Abb. 26.2 die Oxidation der Hüllrohroberfläche vergrößert (10, 40 und 5000-fach) dargestellt. Das Aussehen dieses Stabes ist nicht typisch. Das unterstreicht auch der Dehnverlauf (siehe Abb. 39.1). Auf den weiteren Abb. 31, 32, 33, 34 und 35 sind Detailaufnahmen der Beul- bzw. Ribstellen gezeigt.

## 6.3 Vermessung der Prüflinge

Die Längenänderungen der G2/3-Versuchsstäbe sowie die Riblagen sind in Tabelle 10 aufgelistet. Evtl. Abweichungen der Stablänge durch die Stabkrümmung sind in den Daten vernachlässigt. Die Winkellagen der Tabelle 10 wie auch an anderer Stelle in diesem Bericht sind von der Nullmarkierung (Kerbe am Prüfling) aus im Uhrzeigersinn bei der Stabansicht von unten zu verstehen. Die axiale Riblage wurde mit Hilfe eines Maßstabes bestimmt.

Tabelle 10      Längenänderung und Riblage G2/3-Stäbe

	G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3
Gesamtlänge vor der Transiente (mm)	974,2	974,3	974,3	974,6	974,4
nach der Transiente (mm)	977,1	974,9	979,6	- *	974,0
Bleibende Längung des Stabes (mm)	2,9	0,6	5,3	-	0,4
Rib-Anfang (mm von UKF)	442,0	262,5	267,0	192,5	284,0
Rib-Ende (mm von UKF)	447,5	299,5	296,0	231,0	311,0
Rib-Länge (mm)	5,5	33,0	29,0	38,5	27,0
Rib-Breite max. (mm)	1,5	10,9	7,2	9,7	11,0
Rib-Winkellage zur Kerbe	82 <sup>0</sup>	352 <sup>0</sup>	240 <sup>0</sup>	90 <sup>0</sup>	6 <sup>0</sup>

\*) nicht meßbar

In Abb. 36 sind die bisher ermittelten Stablängsdehnungen als Funktion der Bersttemperatur aufgetragen. Die Versuchspunkte der In-pile-Versuche sind mit der ORNL-Kurve, die aus out-of-pile durchgeführten Einzelstabversuchen ermittelt wurde /7/, verglichen. Alle KfK-In-pile-Versuchspunkte liegen oberhalb der ORNL-Kurve.

Die azimutalen Rißlagen sind in den Abb. 37.1 bis 37.5 in die Diagramme der vor der Bestrahlung bestimmten Wandstärkenverteilung über dem Umfang eingezeichnet. Die Wandstärke ist darin  $18^{\circ}$ -weise als Abweichung vom Sollwert in ( $\mu\text{m}$ ) angegeben. Die angegebene Wandstärkeverteilung gilt für die Rißebeane, ist aber auch für den gesamten vermessenen Bereich von 200 mm in Stabmitte repräsentativ, da sich auf dieser Länge die Wandstärke axial unwesentlich verändert.

Die azimutalen Rißlagen sind in Bezug auf die Ausgangs-Wandstärken nicht systematisch. Die Rißlage wird generell nicht als Folge des azimutalen Wandstärkeprofils, sondern als Folge der azimutalen Temperaturverteilung angesehen.

#### Durchmesseränderung und Umfangsdehnung

Die Ergebnisse der Durchmesseränderungen und Umfangsdehnungen der G2/3-Stabhüllen sind in den Abb. 38 und 39.1 bis 39.5 dargestellt. Dabei sind die Dehnprofile aus den Versuchen G 2.1 bis G 3.3 zusammen in Abb. 38, die Einzelkurven der G2/3-Stäbe in den Abb. 39 wiedergegeben.

Die bleibende Durchmesserzunahme erstreckt sich über dem gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs. Oberhalb bzw. in der Nähe der Brennstabmitte haben sich die Beulen ausgebildet. Als Ursache für deren Lage wird das axiale Leistungsprofil (s. Abb. 12) angesehen.

An den TE-Befestigungsstellen sind Einschnürungen von 1 - 3 %  $\Delta d/d_0$ , in einem Fall möglicherweise sogar bis zu 7 % (1 mm), entstanden. Dies deutet darauf hin, daß die zusätzliche wärmeabführende Oberfläche und wärmespeichernde Masse der TE lokal zu geringeren Hüllrohrtemperaturen führt. Besonders deutlich ist der Einfluß der Thermoelemente am Versuchsstab G 3.2 zu erkennen.

Die bleibenden Durchmesserzunahmen sind in der Tabelle 11 aufgelistet. Die Durchmesserangaben wurden aus dem Wendelschrieb entnommen, für die Rißzone wurden zusätzlich Querschnittsfotos ausgewertet.

Zur Ermittlung der Umfangsdehnung mit Hilfe der Wendelschriebe (Durchmesserwerte) kann jeder der Stäbe in drei Bereiche eingeteilt werden:

- 1) Bereiche außerhalb des Risses, in denen der Stabquerschnitt kreisförmig ist (Ovalität  $< 50 \mu\text{m}$ ),
- 2) Bereiche nahe dem Riß, die eine deutliche Ovalität aufweisen,
- 3) der Rißbereich.

Die drei Bereiche sind in Abb. 40 verdeutlicht. Sie zeigen einen typischen Wendelschrieb eines Versuchsstabes (hier Versuch A2.2).

Im Beulbereich kleiner Ovalität ist die Umfangsdehnung gleich den Durchmesserzunahmen. Im Bereich der deutlichen Ovalität wird der Stabquerschnitt als Ellipse angenommen und deren Umfang mit Hilfe des maximalen und minimalen Durchmesserwertes bestimmt. Im Rißbereich wird der Umfang mittels Querschliffbildern ermittelt.

Die Ovalität  $D_{\text{max}} - D_{\text{min}}$  wird Polarschrieben (Wendelschriebe ohne Längsvorschub des Stabes) entnommen. Die Polarschriebe erfassen die Ovalität möglichst nahe der Rißstelle. Die Abbildungen 41.1 und 41.2 bis 45.1 und 45.2 zeigen die Polarschriebe der G2/3-Stäbe im Beulbereich, Tabelle 12 gibt einige Zahlenwerte daraus wieder.

Da die Umfangsdehnung im Rißbereich nicht kontinuierlich gemessen werden kann, wird sie in diesem Bereich an mindestens drei Stellen aus Schliffbildern bestimmt. Die Ergebnisse der Umfangsmessung

FR2 IN-PILE TESTS G 2.1 THROUGH G 3.3  
CIRCUMFERENTIAL STRAIN DATA FROM ROD DIAMETER MEASUREMENTS

KfK  
IT 1980

Test G 2.1		Test G 2.2		Test G 3.1		Test G 3.2		Test G 3.3	
mm from UKF [a]	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$ [b]	mm from UKF	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$	mm from UKF	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$	mm from UKF	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$	mm from UKF	$\frac{\Delta U}{U_0}(\%)$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180	5	80	5	40	5	40	5	85	5
430	10	165	10	100	10	80	10	170	10
438	15	215	15	190	15	120	15	230	15
442	c) (19)	240	20	242	20	150	20	257	20
448	(32)	262,5	(23)	260	25	160	25	275	25
450	30	295	(27)	267	(32)	180	30	284	(32)
452	25	298	25	296	(40)	193	(32)	311	(28)
455	20	347	20	315	35	230	(41)	325	25
458	15	400	15	338	30	234	40	342	20
462	10	465	10	348	25	240	35	390	15
475	5	480	5	395	20	265	35	445	10
500	0	500	0	422	15	290	35	475	5
				470	10	318	35	500	0
				490	5	335	35		
				500	0	348	30		
						397	25		
						420	20		
						445	15		
						465	10		
						485	5		
						500	0		
max.at 448	32 %	max.at 280	28 %	max.at 285	46 %	max.at 223	41 %	max.at 299	32 %
[a] UKF = bottom of fuel stack									
[b] $U_0 = \pi \cdot d_0$ , where $d_0 = 10,75$ mm									
[c] rupture opening between the two elevations in parentheses									



und der prozentualen Umfangszunahme  $\Delta U/U_0$  sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die maximal ermittelten Umfangszunahmen der Stäbe G 2.1 bis G 3.3 sind demnach: 32 %, 28 %, 46 %, 41 % und 32 %. Sie sind außerdem in den Abbildungen 46.1 bis 46.5 veranschaulicht.

Die größten Umfangszunahmen der Hülle sind in Abb. 47 zusammen mit den anderen Versuchspunkten dieses Versuchsprogramms eingetragen und mit den von BMI<sup>(a)</sup> in /8/ angegebenen Umfangsdehnungen als Funktion der Temperatur verglichen. Die BMI-Daten sind aus Versuchen mit bestrahlten Hüllrohren gewonnen worden. Die Versuchspunkte der G2/3-Reihe liegen im Streubereich der Punkte aus den übrigen Versuchen des hier beschriebenen Vorhabens.

#### Exzentrizität der Beule und Krümmung des Stabes

Zur Feststellung der Beulenlage in Bezug auf die Stablängsachse wurden die Mantelschriebe der verformten Stäbe an drei Umfangswinkelpaaren ( $0^0/180^0$ ,  $60^0/240^0$ ,  $120^0/300^0$ ) verwendet. Die daraus ermittelten Stabachsen im Beulbereich wurden mit den Stabachsen außerhalb der Beulbereiche verglichen. Die Differenz der beiden jeweiligen Werte wird als Exzentrizität der Beule angegeben. Für die Versuche der G2/3-Reihe sind die Werte in Tabelle 14 aufgelistet. Die Exzentrizität der Beule liegt meist etwa an der Krümmungsaußenseite, während die Rißstelle gegenüber, also an der Innenseite liegt (siehe Schema).

Ebenfalls aus den Mantelschrieben wird die Stabkrümmung abgeleitet. Sie wird als Auslenkung der Stablängsachse von der geraden Verbindungslinie ihrer Endpunkte verstanden (s.a.Schema). Die Maximalwerte liegen bei 190 bis 470 mm von UK aktiver Zone, d.h. am oberen Ende der Brennstoffsäule. Die Auslenkung beträgt 1,3 bis 2,4 mm (siehe Tabelle 15).

---

(a) Battelle-Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, USA

Tabelle 12

Ovalität im Beulbereich G2/3-Versuchsstäbe

Versuch		G 2.1		G 2.2		G 3.1		G 3.3		G 3.3	
Stab Nr.		35		36		12		11		10	
Polarschrieb	Nr.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Abstand von UKF	mm	437	452	259	299	262	300	189	235	279	316
$D_{\min}$	mm	12,1	13,3	12,9	13,0	13,0	13,5	13,3	13,9	13,1	13,1
$D_{\max}$	mm	12,3	13,6	13,6	13,7	14,2	15,3	14,9	16,1	13,9	14,2
Ovalität	mm	0,22	0,28	0,66	0,68	1,26	1,84	1,64	2,24	0,80	1,12

Tabelle 13

Umfangsdehnung im Beulbereich G2/3-Versuchsstäbe

Versuch			G 2.1		G 2.2		G 3.1		G 3.2		G 3.3	
Stab	Nr.		35		36		12		11		10	
unteres Rißende	U	mm	42,6	41,6	44,7	44,6	44,5					
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	26,1	23,1	32,4	32,2	31,8					
Mitte Riß	U	mm	42,6	43,3	49,2	47,7	44,6					
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	26,1	28,3	45,7	41,4	32,1					
oberes Rißende	U	mm	44,5	42,9	45,2	47,3	44,6					
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	31,7	27,1	33,9	40,1	32,1					

Tabelle 14

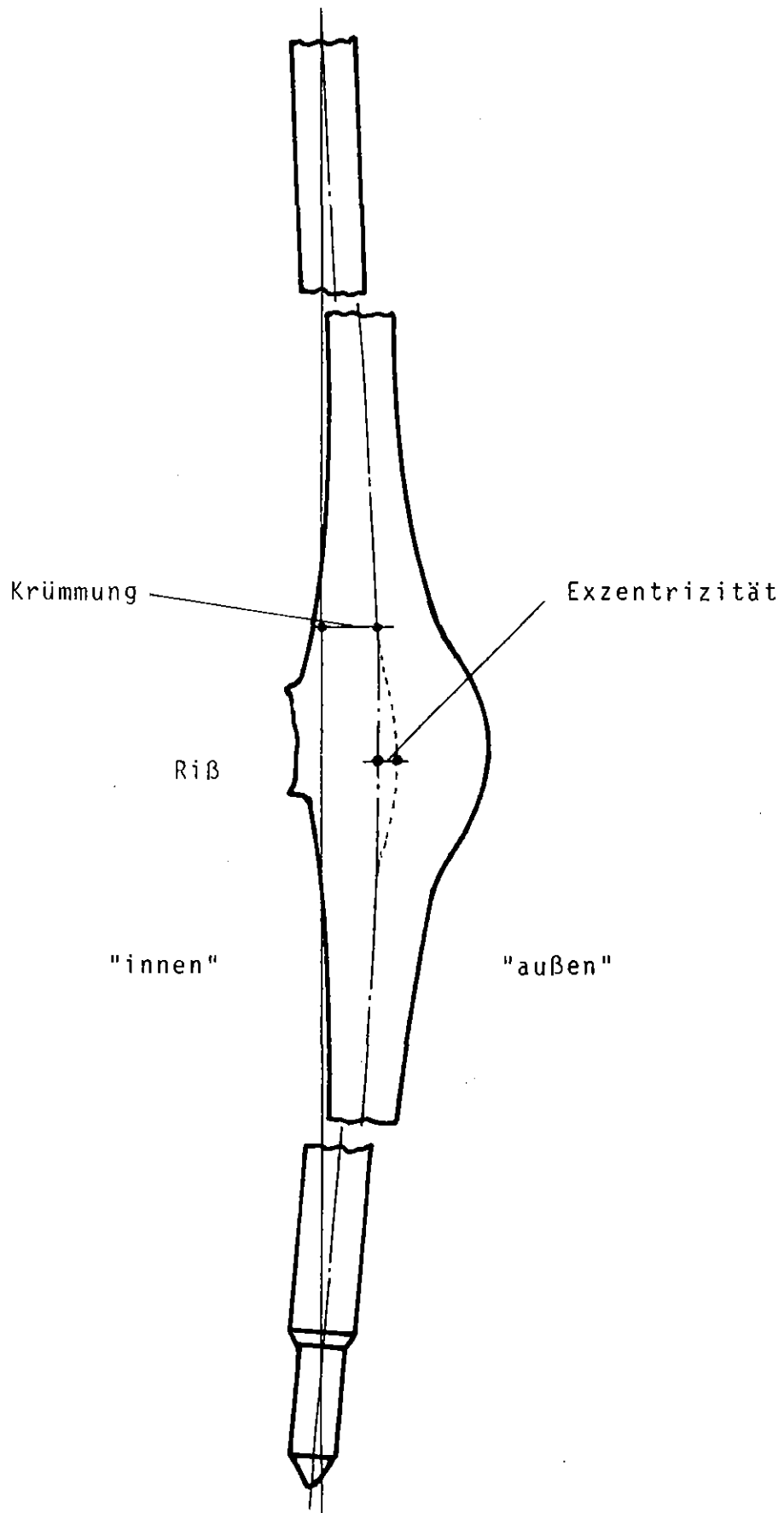
Exzentrizität der Beule bei G2/3-Versuchsstäben

Versuch		G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3
Stab	Nr.	35	36	12	11	10
Abstand von UKF	mm	445	279	281	212	298
Lage zum Riß	Grad	127	152	180	180	154
zur Nullmarke	Grad	315	200	60	270	160
Exzentrizität	mm	0,2	0,2	0,6	0,3	0,6

Tabelle 15

Krümmung der G2/3-Versuchsstäbe

Versuch		G 2.1	G 2.2	G 3.1	G 3.2	G 3.3
Stab	Nr.	35	36	12	11	10
max. Krümmung	mm	1,7	1,3	1,8	1,7	2,4
Abstand von UKF	mm	470	220	260	190	270
Lage zur Nullmarke	Grad	290	170	50	280	170
Krümmung im Beulbereich	mm	1,6	1,1	1,3	1,4	2,0
Abstand von UKF	mm	445	280	280	215	300
Lage zum Riß	Grad	150	160	160	170	160



SCHEMA

Im Beulbereich zeigen die G2/3-Stäbe etwa die gleichen Auslenkungen der Stablängsachse. Die azimutale Lage der Krümmung zum Riß ist so wie bei der Exzentrizität der Beule beschrieben: die Krümmungsinenseite liegt am Riß ( $\sim 180^\circ$  zwischen Riß und Auslenkung des Stabs durch Krümmung). Die Umfangslage der Ausbeulung und der Stabkrümmung sind also etwa gleich.

#### Volumenzunahme des gebeulsten Stabes

Um die Volumenvergrößerung der verformten Versuchsstäbe zu erfassen, wurden die Volumina aus den Wendelschrieben ermittelt. Dabei wurden die Stäbe in genügend kleine Abschnitte eingeteilt und die Volumina der Abschnitte aus den Außendurchmessern berechnet. Für das Volumen von Hüllwand und Brennstoff wurden dabei die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelvolumina stellt das vergrößerte Volumen  $V_1$  dar. Der relative Volumenzuwachs ergibt sich dann zu

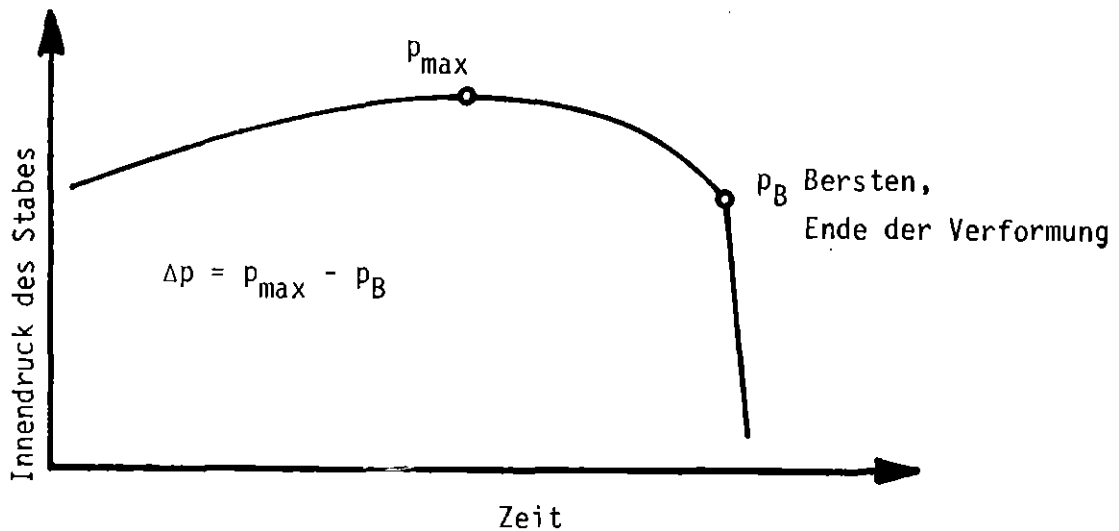
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} - 1$$

wobei  $V_1$  = Leervolumen des Stabes nach dem Versuch

$V_0$  = Leervolumen des Stabes vor dem Versuch.

In Abb. 48 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche G 2.1 bis G 3.3 wie auch für andere bestrahlte und unbestrahlte Stäbe aufgetragen. Es zeigt sich, daß die Versuchspunkte recht gut einer Geraden folgen. Das bedeutet einen linearen Zusammenhang zwischen Volumenzuwachs bzw. Gesamtverformung des Stabes und der maximal bestimmten Umfangszunahme. Eine Ausnahme bildet Versuch A 1.1, er wurde im Gegensatz zu den übrigen Versuchen nicht mit einem flachen, sondern mit einem steilen Leistungsprofil (axialer Formfaktor 1,4) durchgeführt.

In Abb. 49 wurde die relative Volumenzunahme in Abhängigkeit von der Innendruckänderung während der Verformung dargestellt. Die Innendruckveränderung  $(p_{\max} - p_B) / p_{\max}$  während der Deformation der Hülle ist im nachfolgenden Schema veranschaulicht:



### Schema

Innendruckverlauf während der Hüllverformung

Der durch die Versuchspunkte gegebene Zusammenhang zwischen der Volumenvergrößerung des Stabes und der Innendruckabnahme läßt sich approximieren durch die Beziehung

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 3,05 \frac{\frac{\Delta p}{p_{\max}}}{1 - \frac{\Delta p}{p_{\max}}}$$

Eine Funktion dieser Form läßt sich unter vereinfachten Annahmen auch analytisch herleiten bei Berücksichtigung der Erwärmung des während der Stabdeformation vom Plenum in die aktive Zone einströmenden Gases.

## 7. Brennstoffzustand und -verhalten

Zur Beurteilung des Brennstoffzustandes nach der Vorbestrahlung und möglicher Veränderungen des Brennstoffzustandes beim Transientenversuch wurde von den sechs vorbestrahlten Versuchsstäben der Serie G2/3 der Stab G 3.6 keinem Transientenversuch ausgesetzt.

Aus den Querschnitten des Stabes G 3.6 läßt sich entnehmen, daß die vorbestrahlten Stäbe vor der Transiente schon gebrochene Brennstofftabletten hatten. Die Bruchstücke der Tabletten saßen allerdings noch so zusammen, daß die Pelletform noch einwandfrei erhalten war. Das zeigen auch die NERA-Aufnahmen vor dem Versuch, wie z.B. die Abb. 20 des Stabes G 3.3. Einen Querschnitt des Stabes G 3.6 (195 mm von Unterkante Brennstoff) gibt Abb. 50.1 wieder. Das Bruchmuster sieht in verschiedenen Brennstoffebenen im Prinzip gleich, im Detail unterschiedlich aus. Das verdeutlichen auch die Abb. 51.1 und 51.2. Das Aussehen des Brennstoffs im Stab G 3.6 wird als typisch für alle Stäbe der G2/3-Serie angesehen, wie der Vergleich mit Abb. 50.2 des Stabes G 2.1 im wenig gebeulten Abschnitt (352 mm von UKF) zeigt.

Der Vergleich mit Brennstoff ähnlich großen Abbrands aus Leistungsreaktoren konnte bisher nur qualitativ anhand von Stab-Querschnittsbildern durchgeführt werden. Es zeigten sich keine systematischen Unterschiede im Rißmuster, in der Größe und Anzahl der Bruchstücke, so daß man den Brennstoff der im FR2 bestrahlten G2/3-Stäbe in dieser Hinsicht als typisch für den Leichtwasserreaktor ansehen kann.

Nach Längsteilung der Hülle eines Abschnitts von Stab 3.6 (Abb. 52) fielen die Pelletbruchstücke auseinander bzw. konnten durch leichten mechanischen Druck von der Hüllwand an der sie hafteten, gelöst werden.

Durch die radiale Aufweitung der Hülle beim Transientenversuch wird dem Brennstoff zusätzlicher Raum gegeben, in den die Pelletbruchstücke hineinfallen. Dies führt im Bereich größerer Dehnung, an den Beulstellen, zum vollkommenen Verlust der Pelletform. Darüberhinaus füllt der Brennstoff den Beulraum in der Art einer lockeren Schüttung von Bruchstücken auf, was durch nachrutschen von Teilchen zu einer Verkürzung der Höhe der Brennstoffsäule führt. Das Maß dieser Verkürzung (s.a. Tabelle 9) wird bestimmt von der Größe der Beule, im Falle der G2/3-Stäbe wurden bis zu 67 mm (G 3.2) gemessen.

Die Größe der Bruchstücke des Brennstoffs wurde durch den Transientenversuch im Mittel nicht geändert, wie die Auswertung der Siebanalysen für die Stäbe G2/3 in Abb. 53.1 und 53.2 darstellt. Hier sind die Teilchengrößen der Pelletbruchstücke des Stabes G 3.6 (ohne Transientenversuch) mit denen der übrigen G2/3-Stäbe (mit Transienten-Versuch) verglichen. Die Werte des Referenzstabes G 3.6 liegen im Datenband der Siebproben der übrigen G2/3-Stäbe. Die häufigste Bruchstückgröße liegt bei etwa 3 mm.

Dieses Stabverhalten ist bei den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen nicht beobachtet worden.

Der Effekt der Verkürzung der Brennstoffsäule wurde in zwei späteren Versuchen mit besonderer Instrumentierung, E3 und E4, als Indikator benutzt zur Bestimmung des Zeitpunkts im Verlauf eines Transientenversuchs, zu dem die Brennstoffumverteilung stattfindet. Letztlich sollte damit die Frage geklärt werden, ob die Brennstoffbewegung den Verformungsvorgang beeinflusst. Erste Auswertungen der beiden Versuche lassen erkennen, daß das Zusammenfallen der Brennstoffsäule in den hier typischen Transienten zum Berstzeitpunkt erfolgt und daß es damit zu keiner Beeinflussung des Verformungsvorgangs kommt. Daß kein wesentlicher Einfluß auf die Verformung vorliegt, untermauern auch die G2/3-Versuche, da die Berstdaten wie Bersttemperatur,

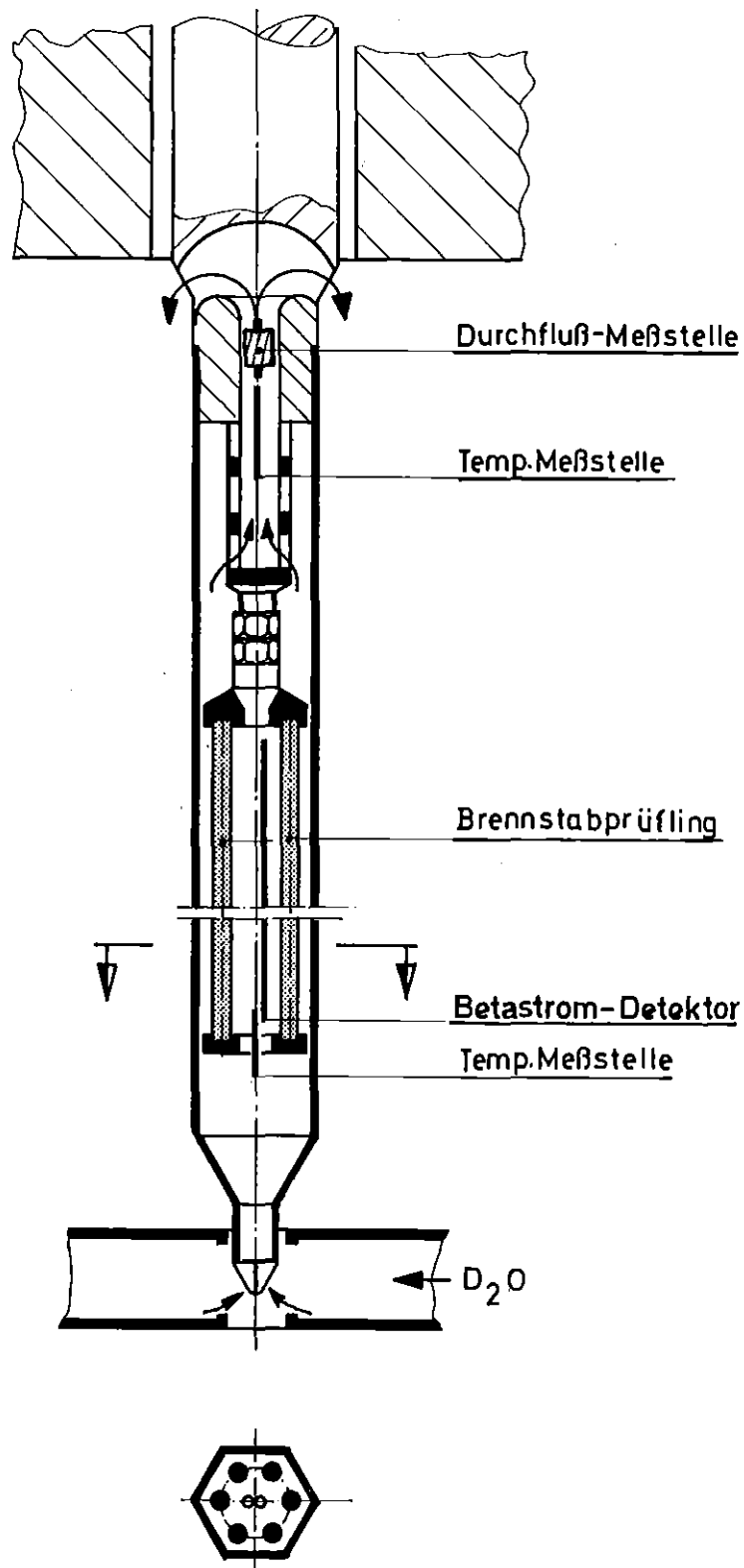


Berstdruck und plastische Hüllverformung der Versuchsstäbe aus der G2/3-Serie keine Besonderheiten bezüglich des Brennstabverhaltens im Vergleich mit unbestrahlten Prüflingen erkennen lassen.

Die endgültige Beurteilung des Stabverhaltens muß allerdings einer vergleichenden Zusammenstellung der Resultate einer größeren Zahl von Versuchen nach Abschluß und Auswertung aller Nachuntersuchungen vorbehalten bleiben.

## 8. Literatur

- /1/ Karb, E.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zur Untersuchung des Brennstabversagens. KfK 2101 (1974), S. 94 - 112
- /2/ Karb, E.:  
Ergebnisse von In-pile-Experimenten im FR2 zum Brennstabverhalten bei Kühlmittelverlust-Störfällen KfK 2570 (Dez. 1977), S. 195 - 203
- /3/ Sepold, L.; Prüßmann, M.:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /4/ Wertenbach, H.:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /5/ Wagner, K.H.:  
unveröffentlichte Ergebnisse
- /6/ Chapman, R.H.:  
Multirod Burst Test Program, Progress Report for January - March 1978, NUREG / CR-0225, ORNL / NUREG / TM-217, August 1978
- /7/ Chapman, R.H.; Cathcart, J.M.; and Hobson, D.O.:  
Status of Zircaloy Deformation and Oxidation Research at Oak Ridge National Laboratory, presented at Specialist's Meeting on the Behavior of Water Reactor Fuel Elements under Accident Conditions, September 13-16, 1976, Spatind (Nord-Torpa), Norway, USERDA Report CONF-760977-2, NTIS, 1976
- /8/ Bauer, A.A. et al.:  
Evaluating Strength and Ductility of Irradiated Zircaloy, Quarterly Progress Report January - March 1978, NUREG / CR-0085, BMI-2000, June 1978
- /9/ Karb, E.; Prüßmann, M.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall. Bericht über die Versuchsserie F  
KfK 2956 (Mai 1980)
- /10/ Prüßmann, M.; Karb, E.H.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall. Bericht über die Versuchsserie G1.  
KfK 3061 (Febr. 1981)

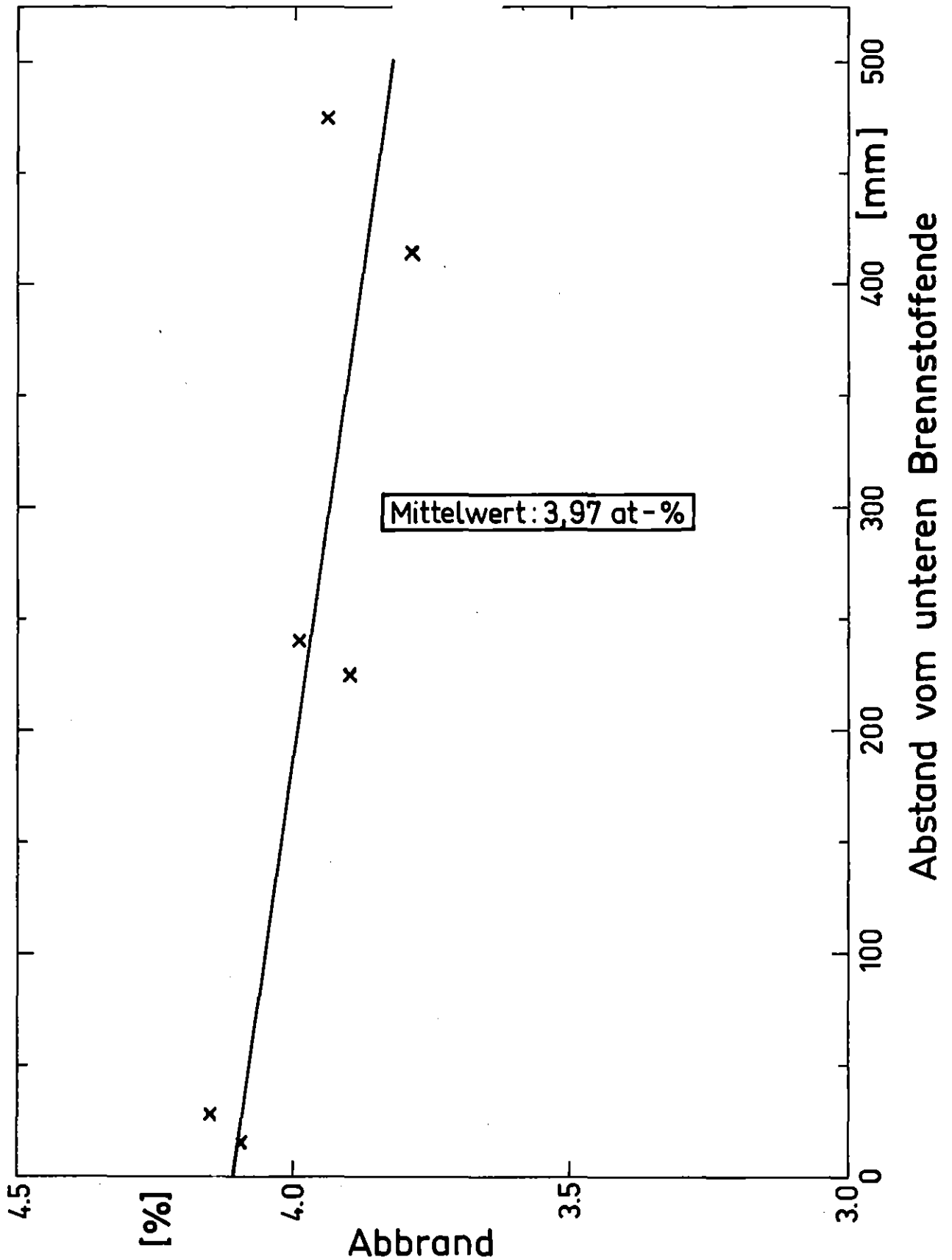


# Vorbestrahlungseinsatz

vereinfacht

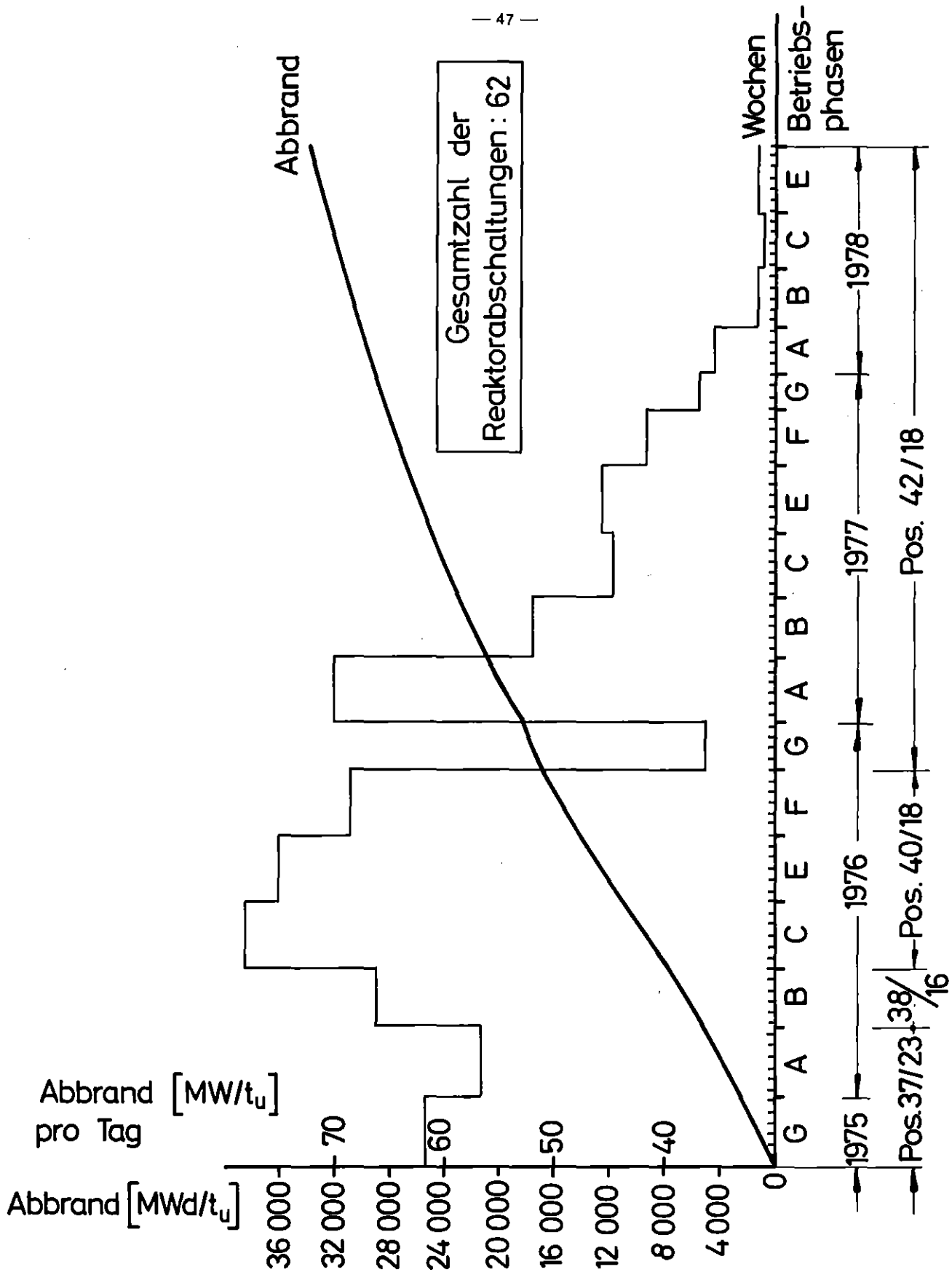
**kfk** IT 78  
PNS 4237-147

Abb.1



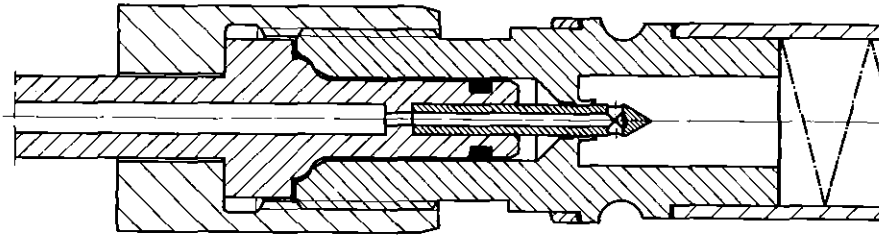
IT 80  
PNS4237-489a

Axiale Abbrandverteilung im Brennstab G3.6  
Abb.: 2

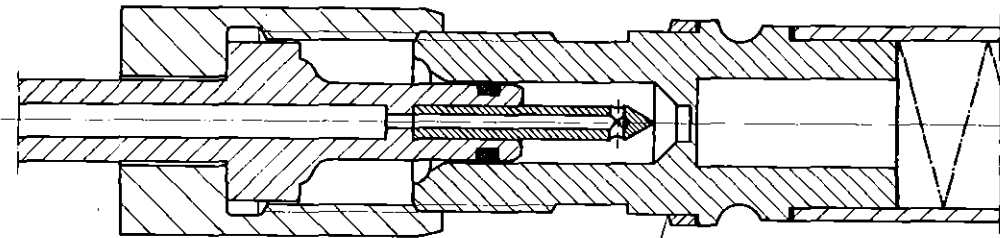


# Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung

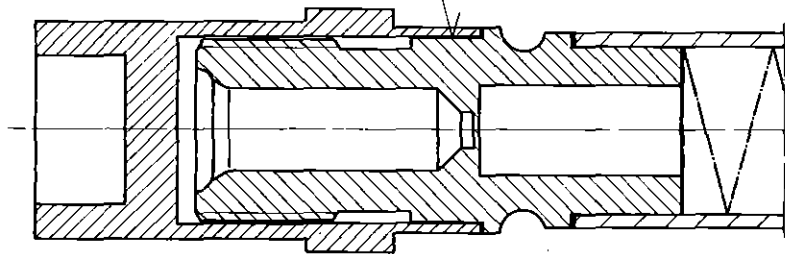
Bündel G2/3, Abbrand 34 000 MWd/t<sub>u</sub>    Abb.: 3



Ankopplung Prüfingsendstopfen  
nach Membrandurchstich



Ankopplung Prüfingsendstopfen  
vor Membrandurchstich



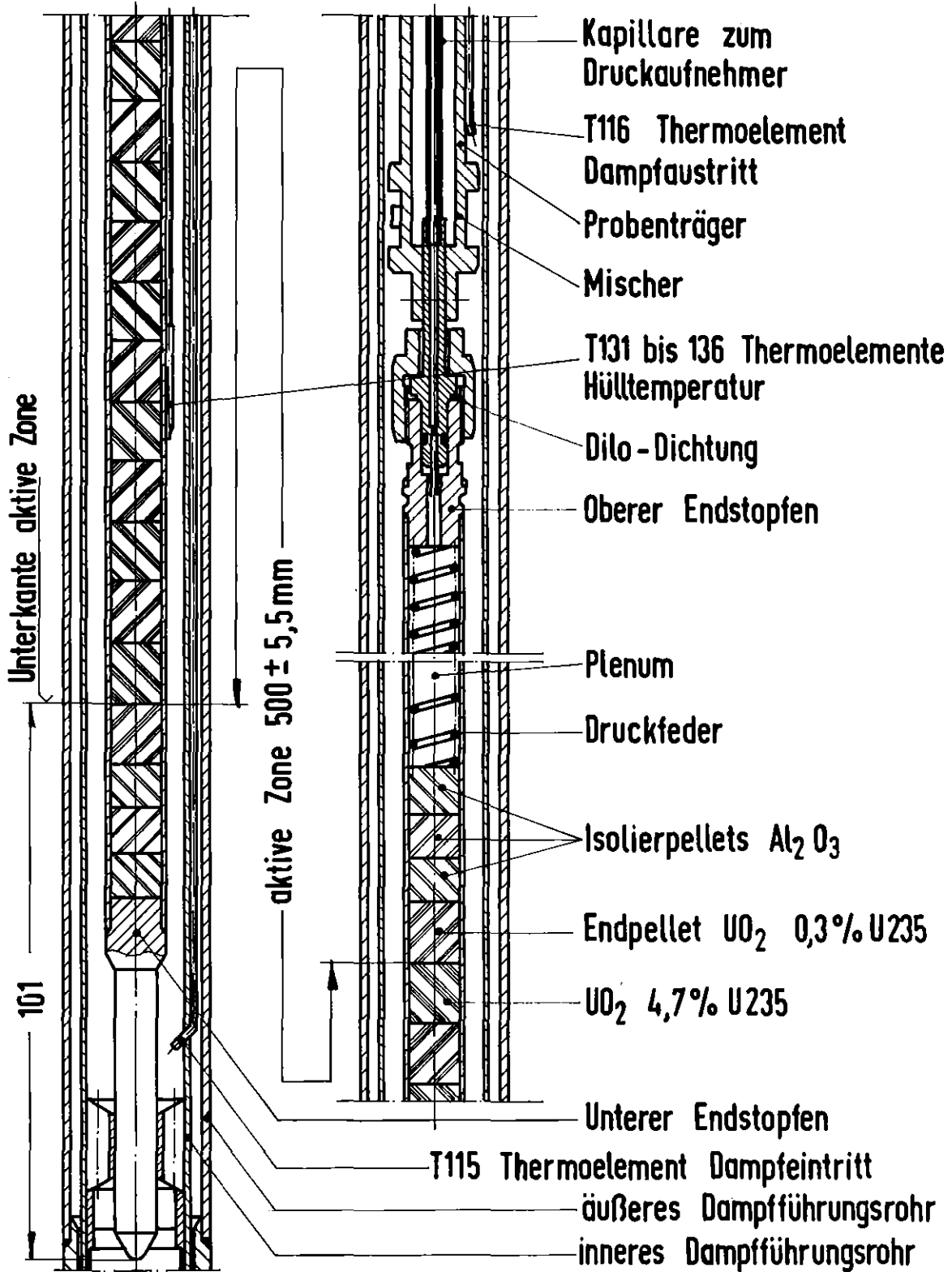
Prüfling mit Schutzkappe  
für Vorbestrahlung



IT78 PNS4237-18

Zur Messung des Stabinnendruckes

Abb.:4

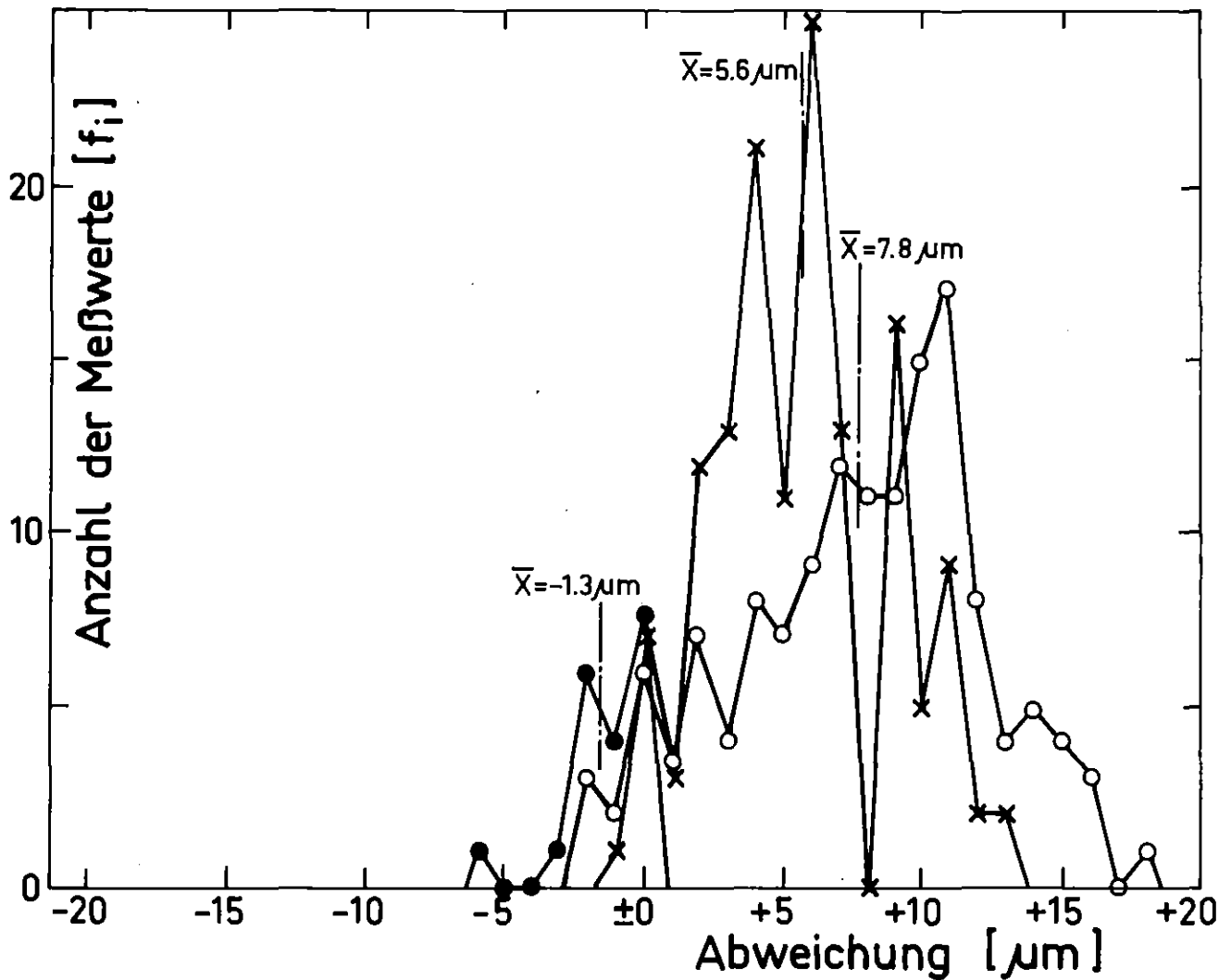


afk

IT - 1977  
PNS 4237-88

Nuklear-Prüfling vereinfacht

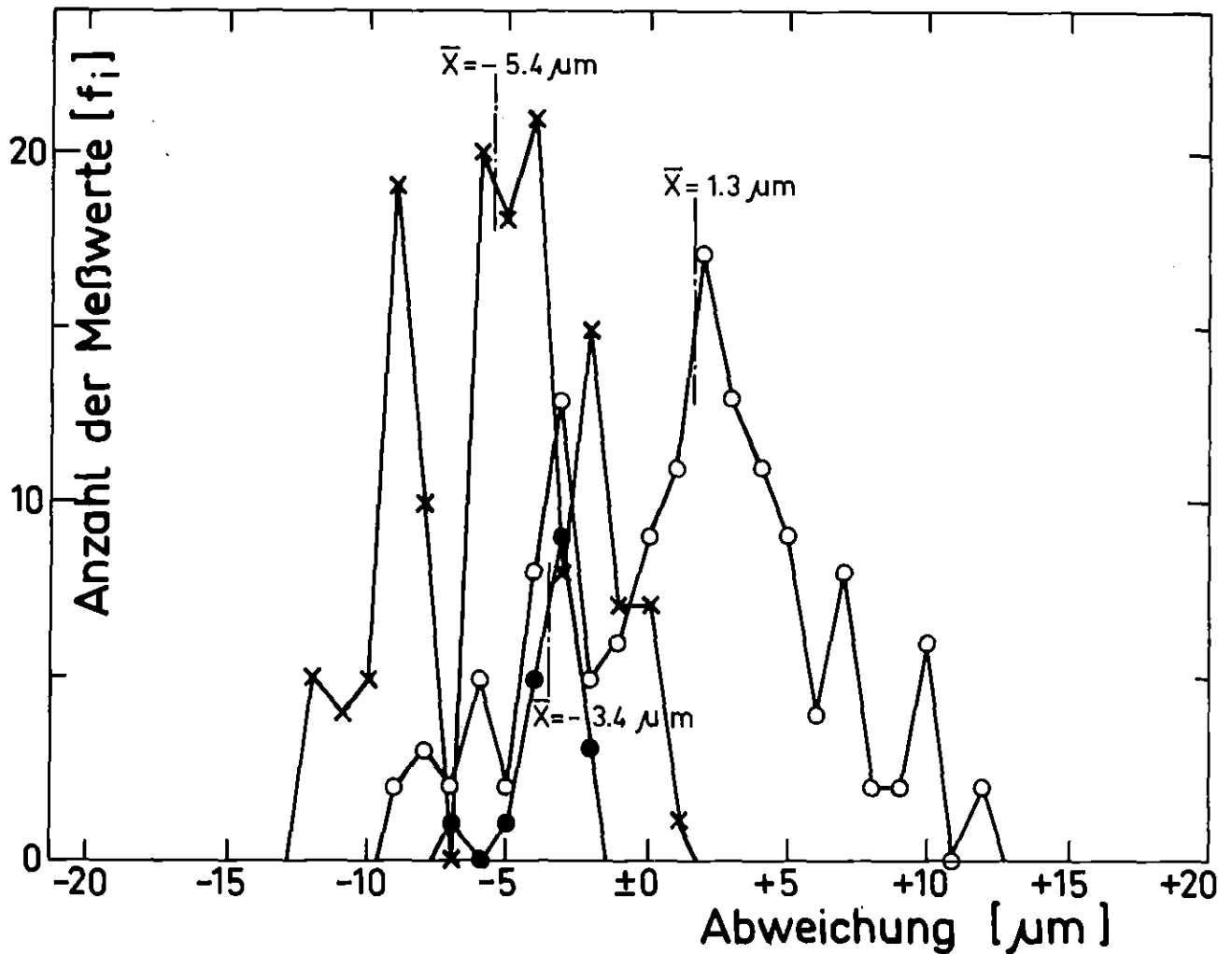
Abb.: 5



<u>Hüllrohr</u>	x <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert: 10.756 mm
	o <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert: 9.308 mm
<u>Pellet</u>	• <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm Mittelwert: 9.109 mm

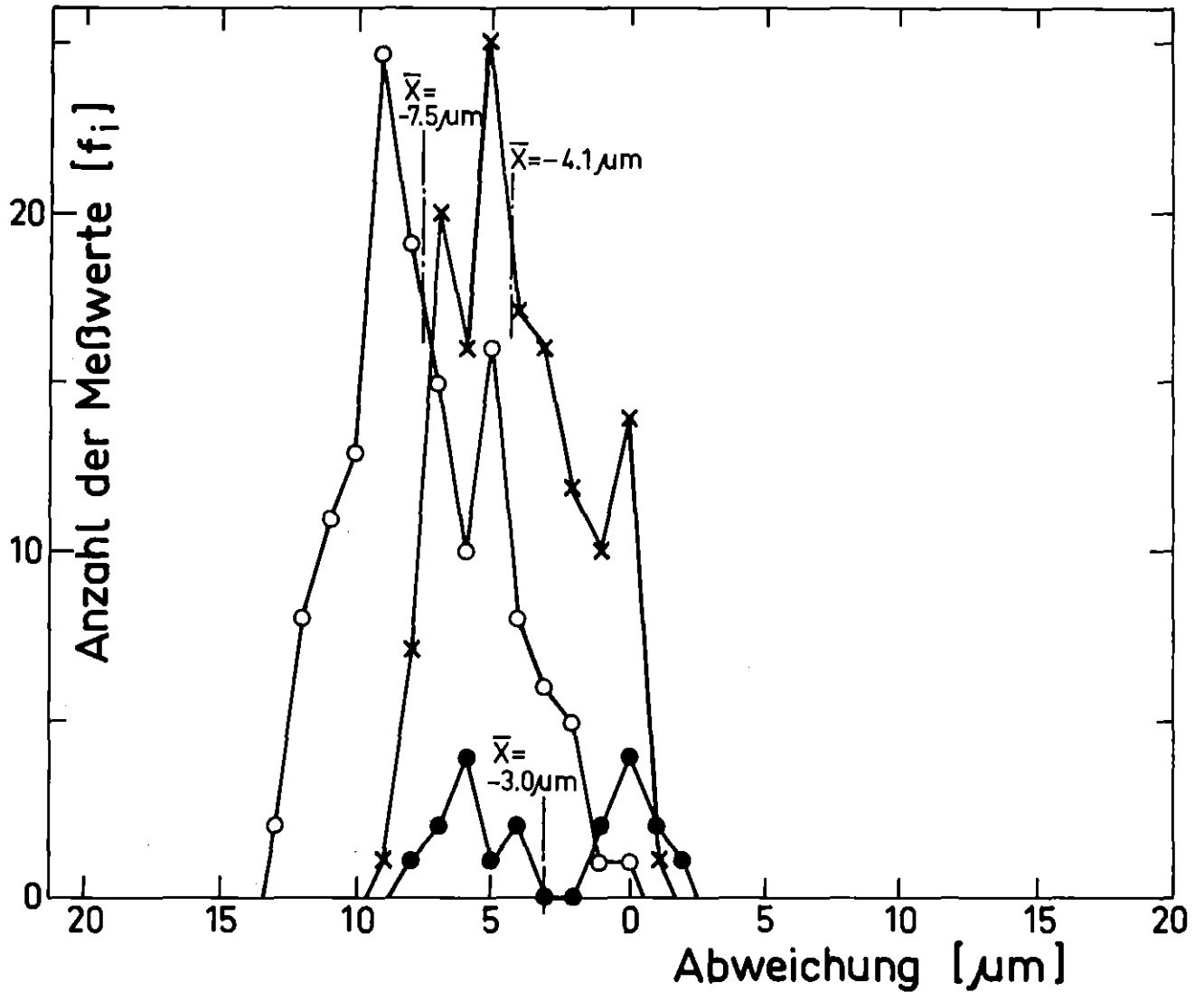
Einfüllspiel:  $S_E = 9.308 - 9.109 = 0.199 \text{ mm}$





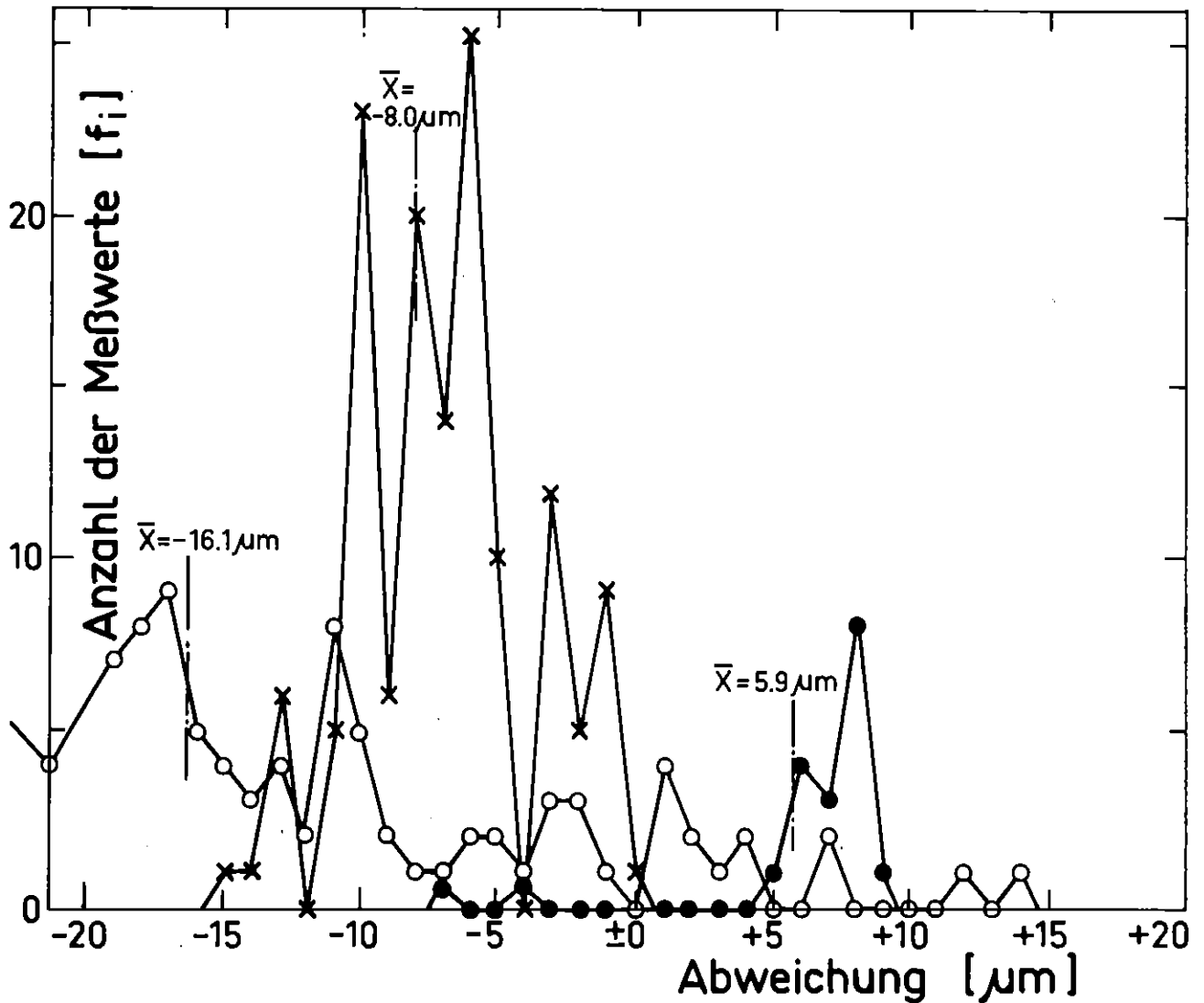
<u>Hüllrohr</u>	x <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert : 10.745 mm
	o <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.301 mm
<u>Pellet</u>	• <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm Mittelwert : 9.107 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.301 - 9.107 = 0.194 \text{ mm}$



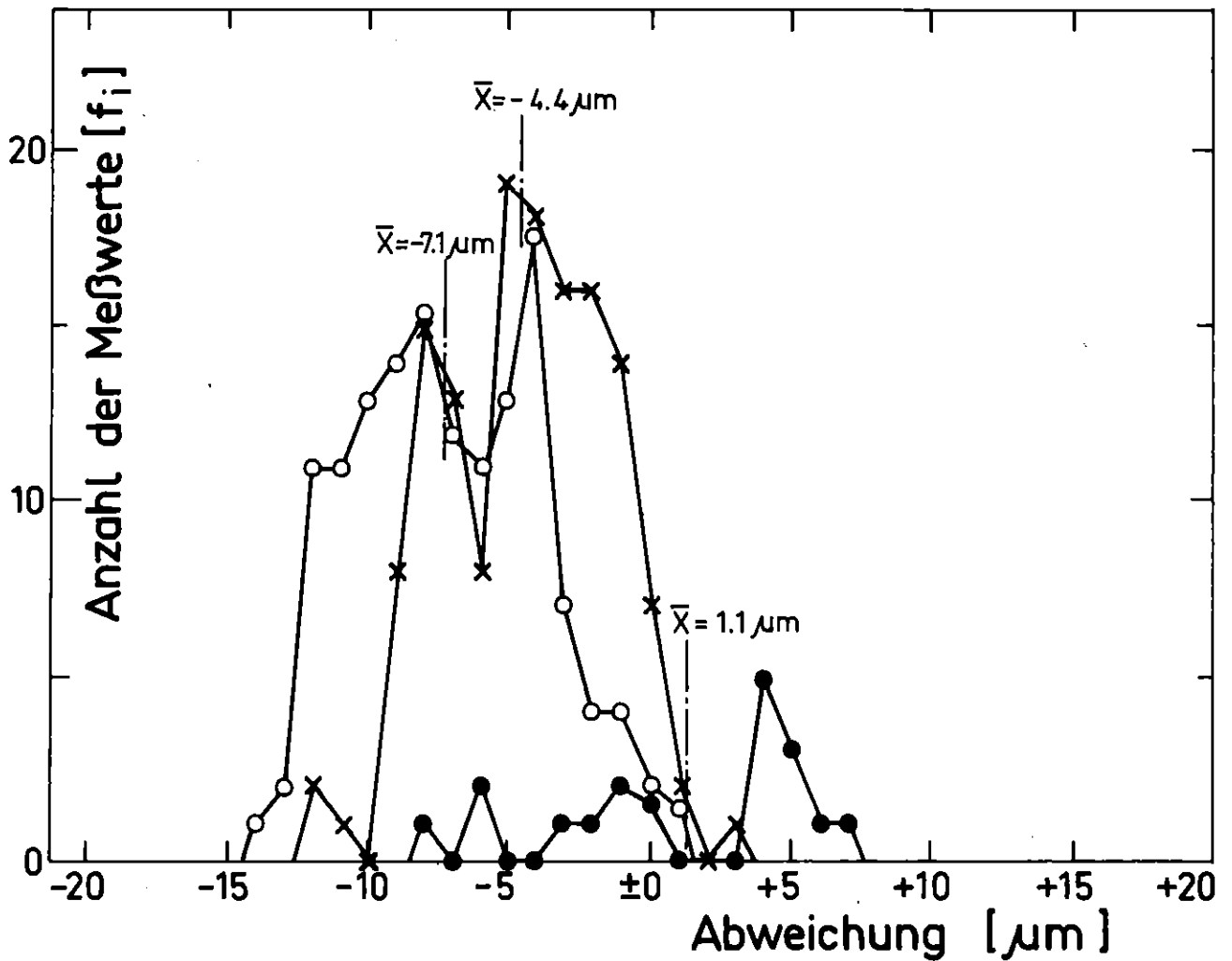
<u>Hüllrohr</u>	x <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert : 10.746 mm
	o <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.292 mm
<u>Pellet</u>	• <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm Mittelwert : 9.147 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.292 - 9.147 = 0.145 \text{ mm}$



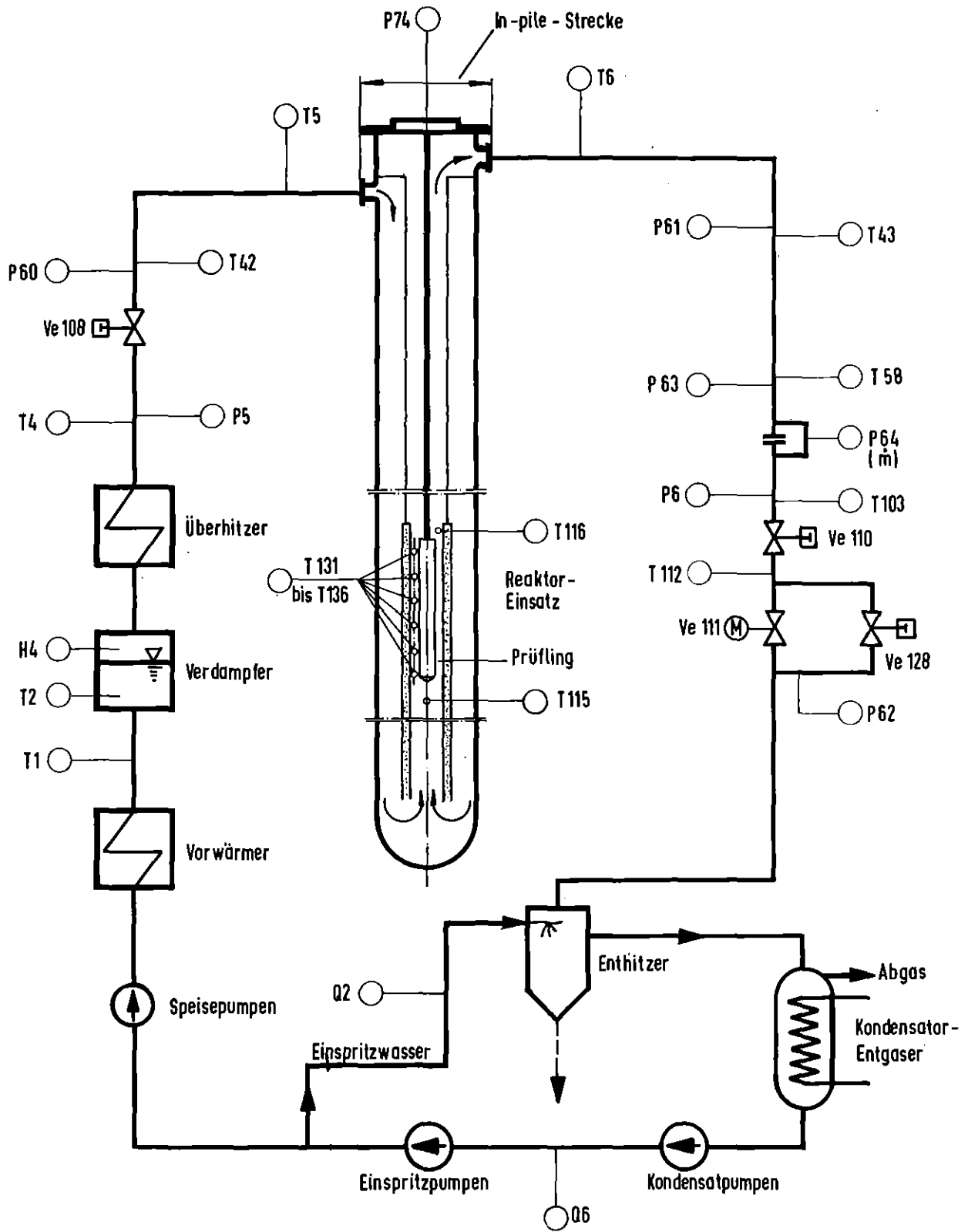
<u>Hüllrohr</u>	<u>Außendurchmesser :</u>	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert: 10.742 mm
	<u>Innendurchmesser :</u>	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.284 mm
<u>Pellet</u>	<u>Außendurchmesser :</u>	Nennmaß : 9.150 mm Mittelwert : 9.156 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.284 - 9.156 = 0.128 \text{ mm}$



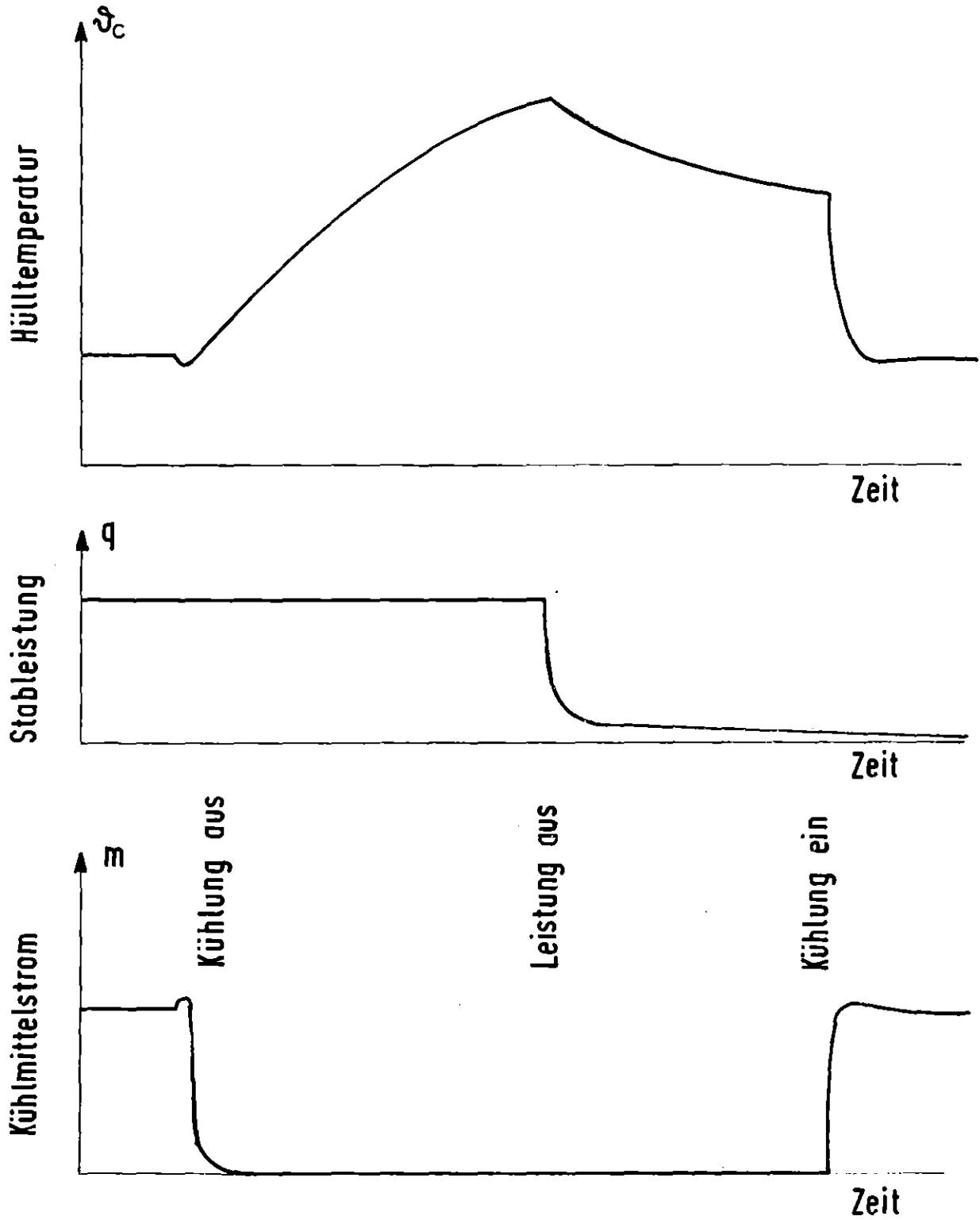
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert : 10.746 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.293 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm Mittelwert : 9.151 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.293 - 9.151 = 0.142 \text{ mm}$



ORF  
PT/IT - 1977  
PNS 4237-87

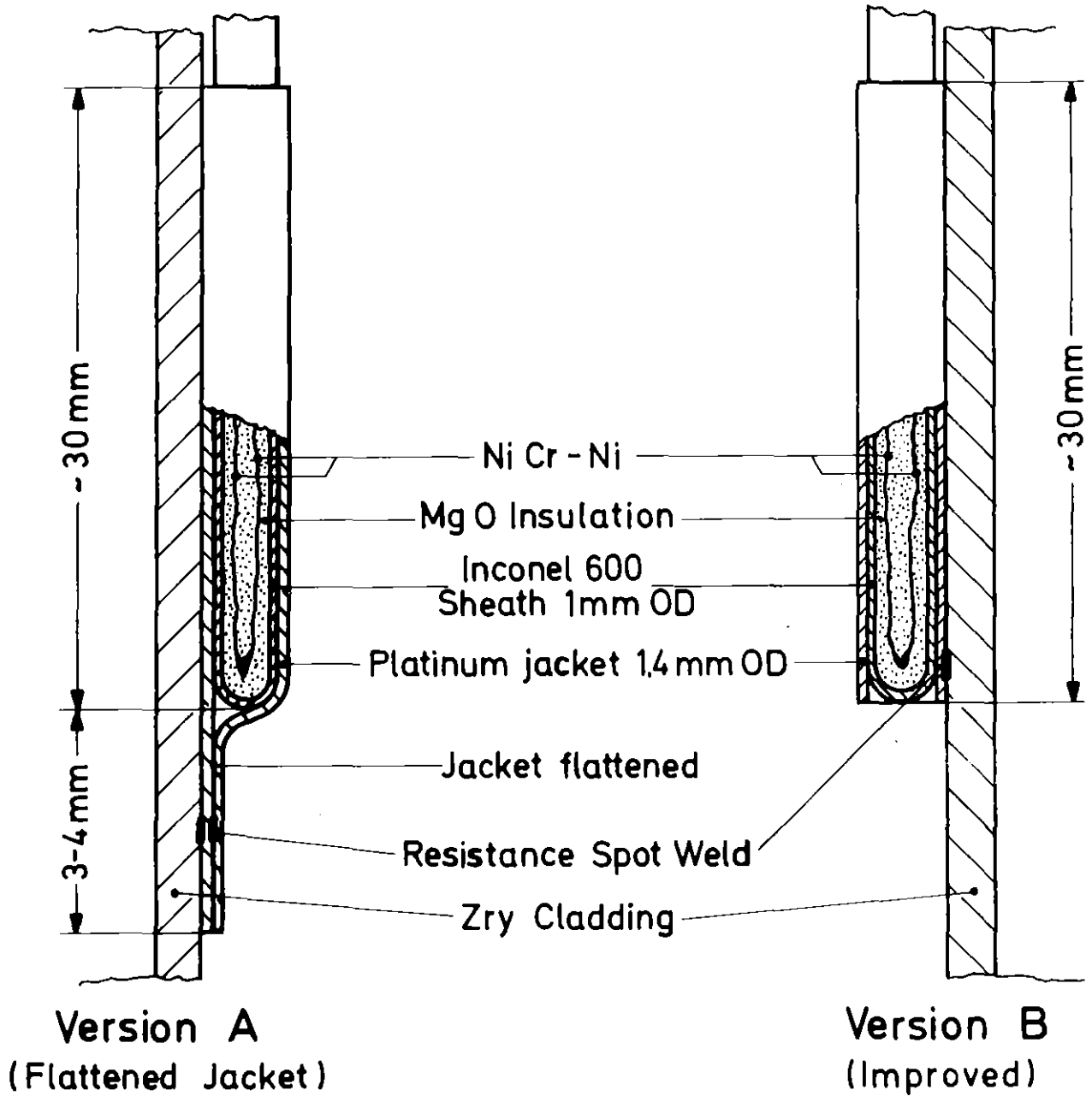
**DK-Loop am FR2. Stark vereinfachtes Kreislaufschema**  
Abb.: 7



RBT/IT-1977  
PNS 4237-59.1

# Versuchsablauf, Schema

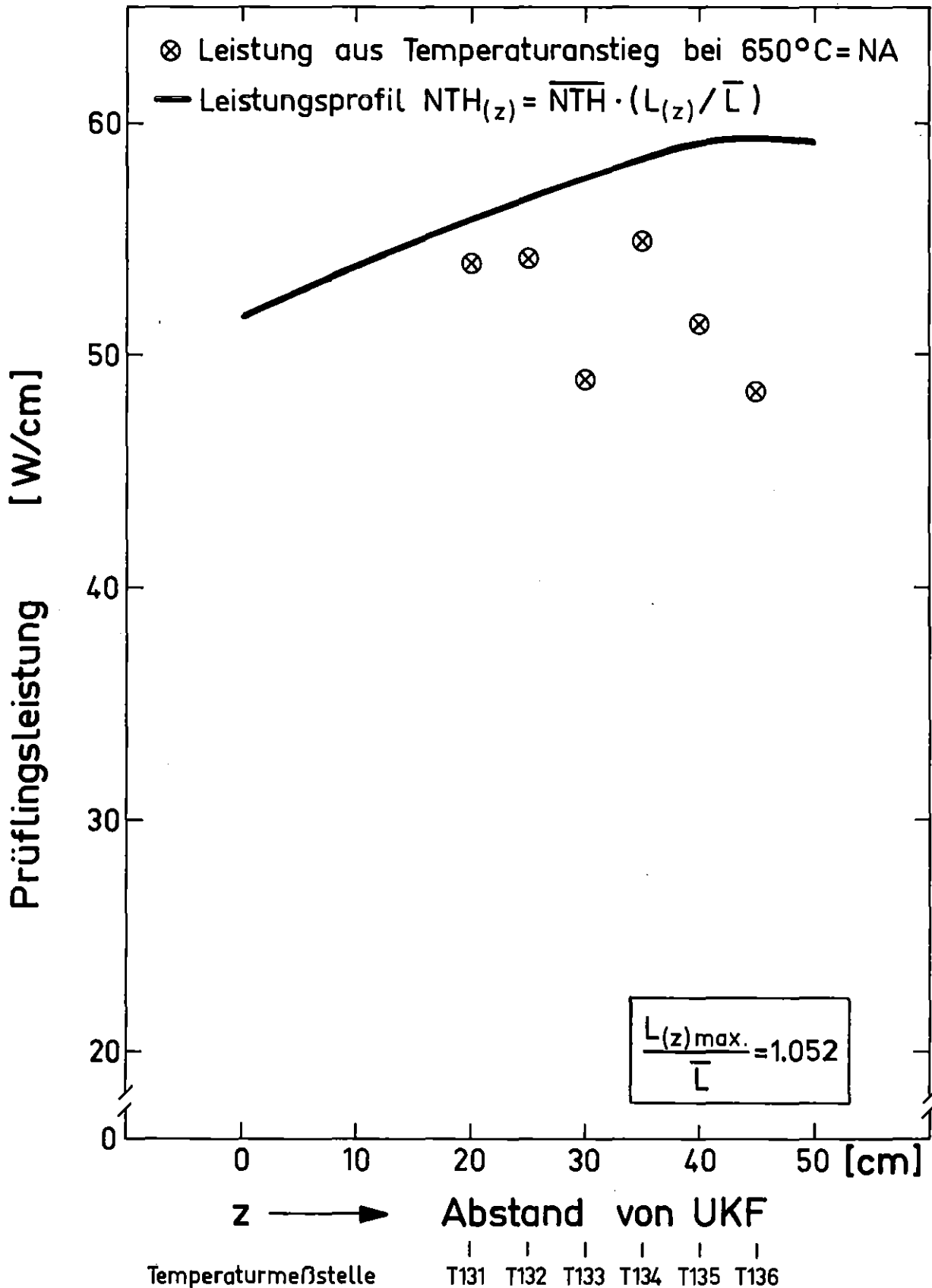
Abb.: 8



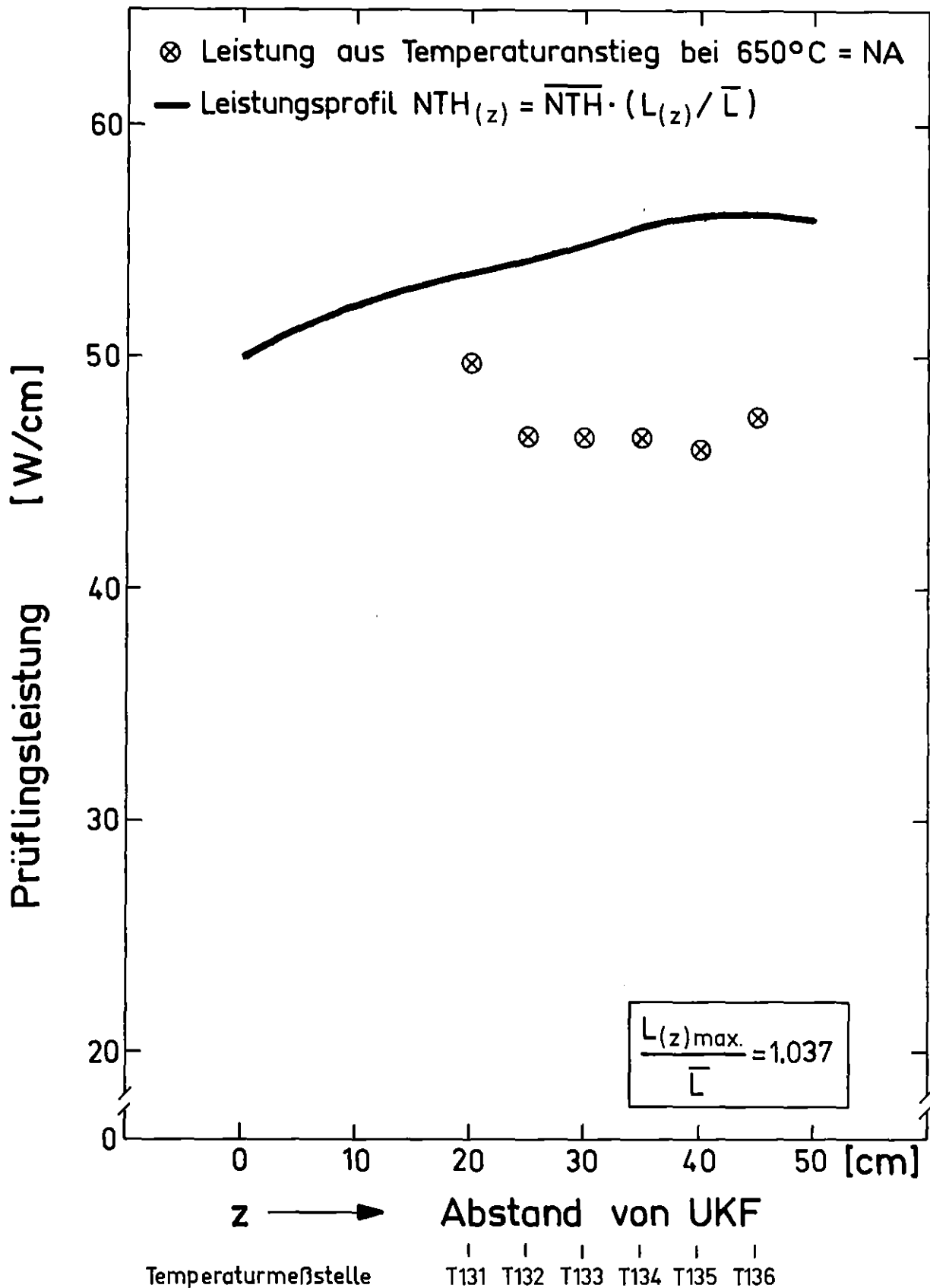
KIK  
IT-80  
PNS4237-300

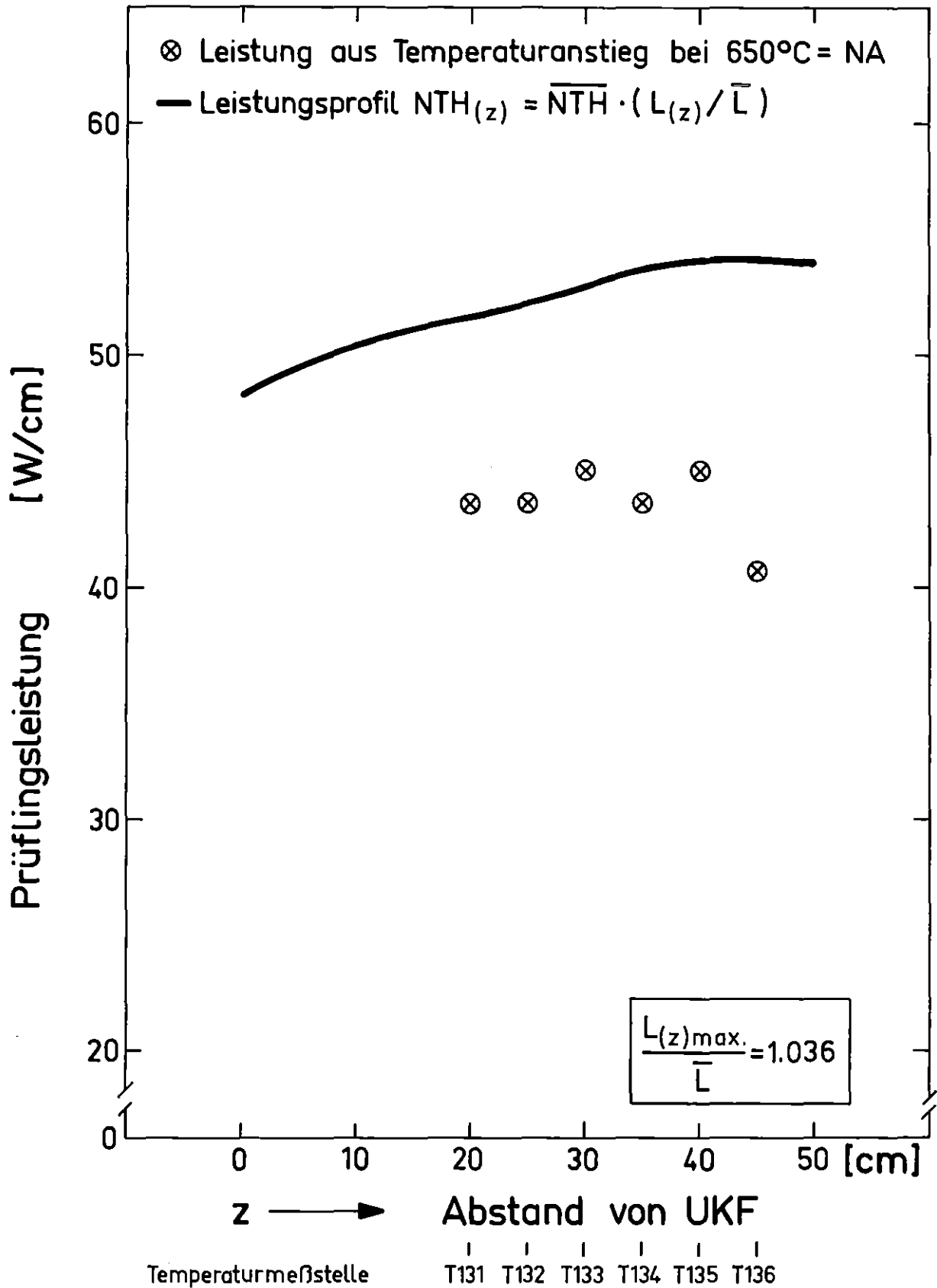
FR2 In-Pile Tests:  
Cladding Thermocouple (Schematic)

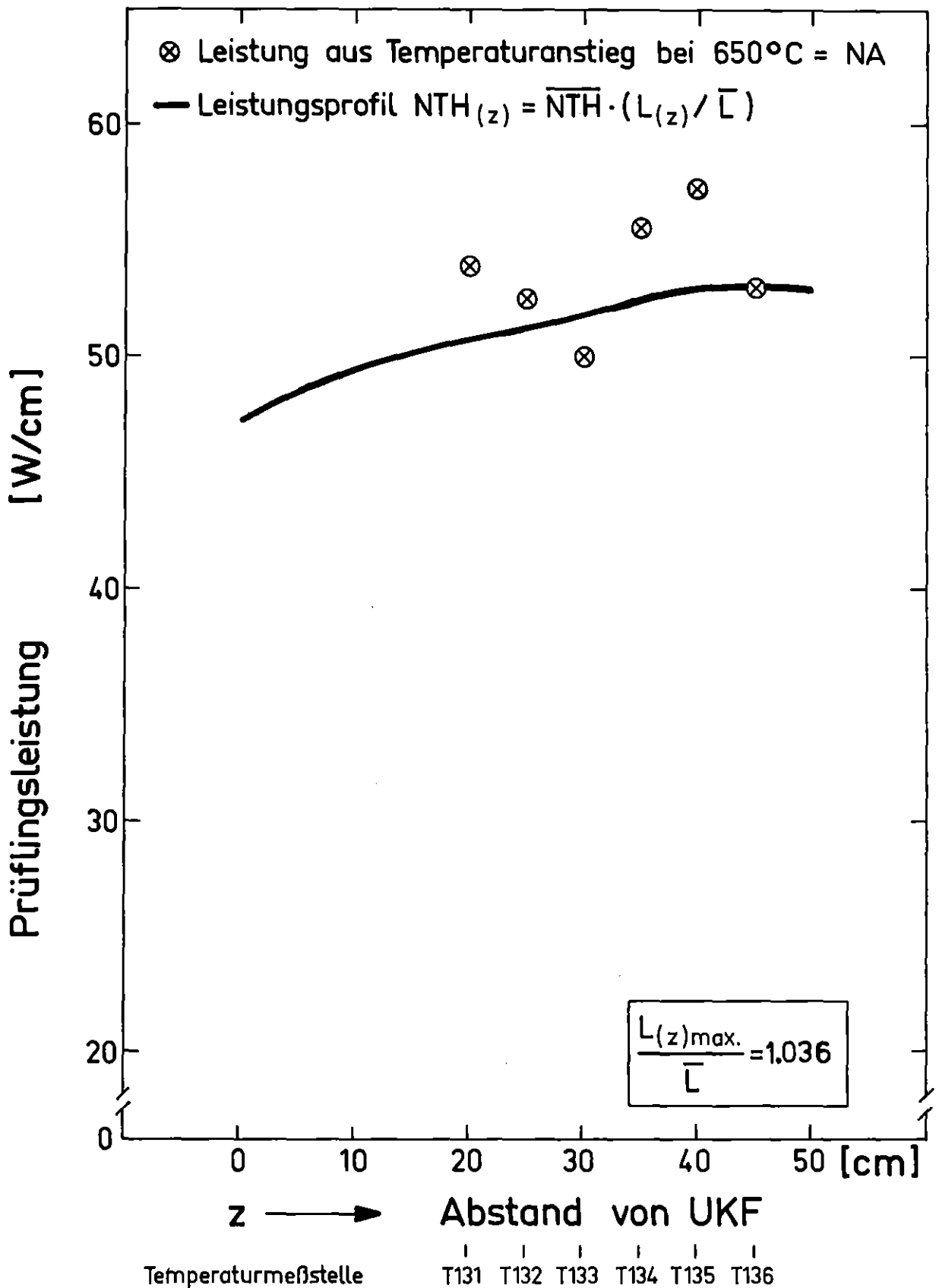
Abb.: 9

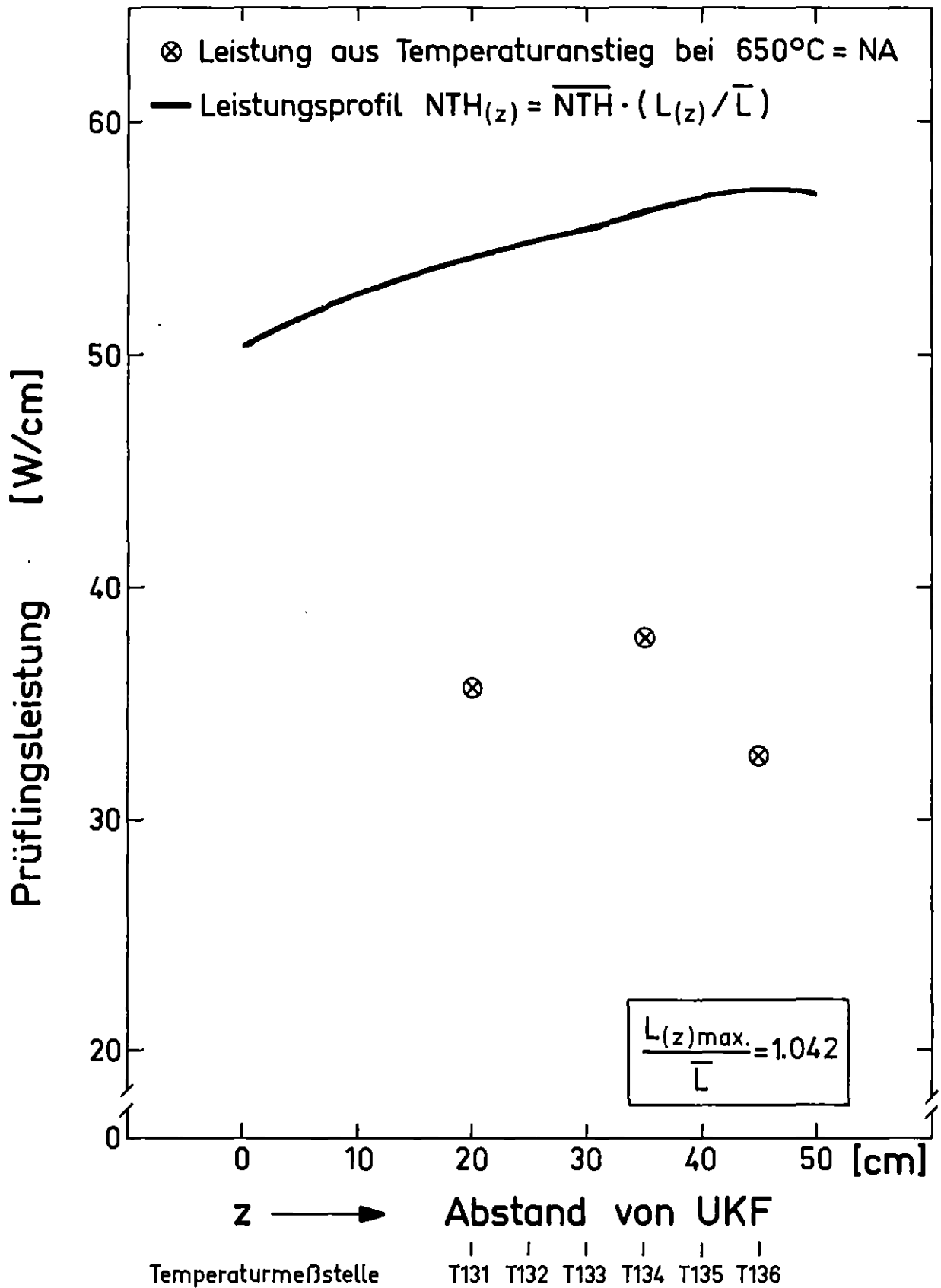


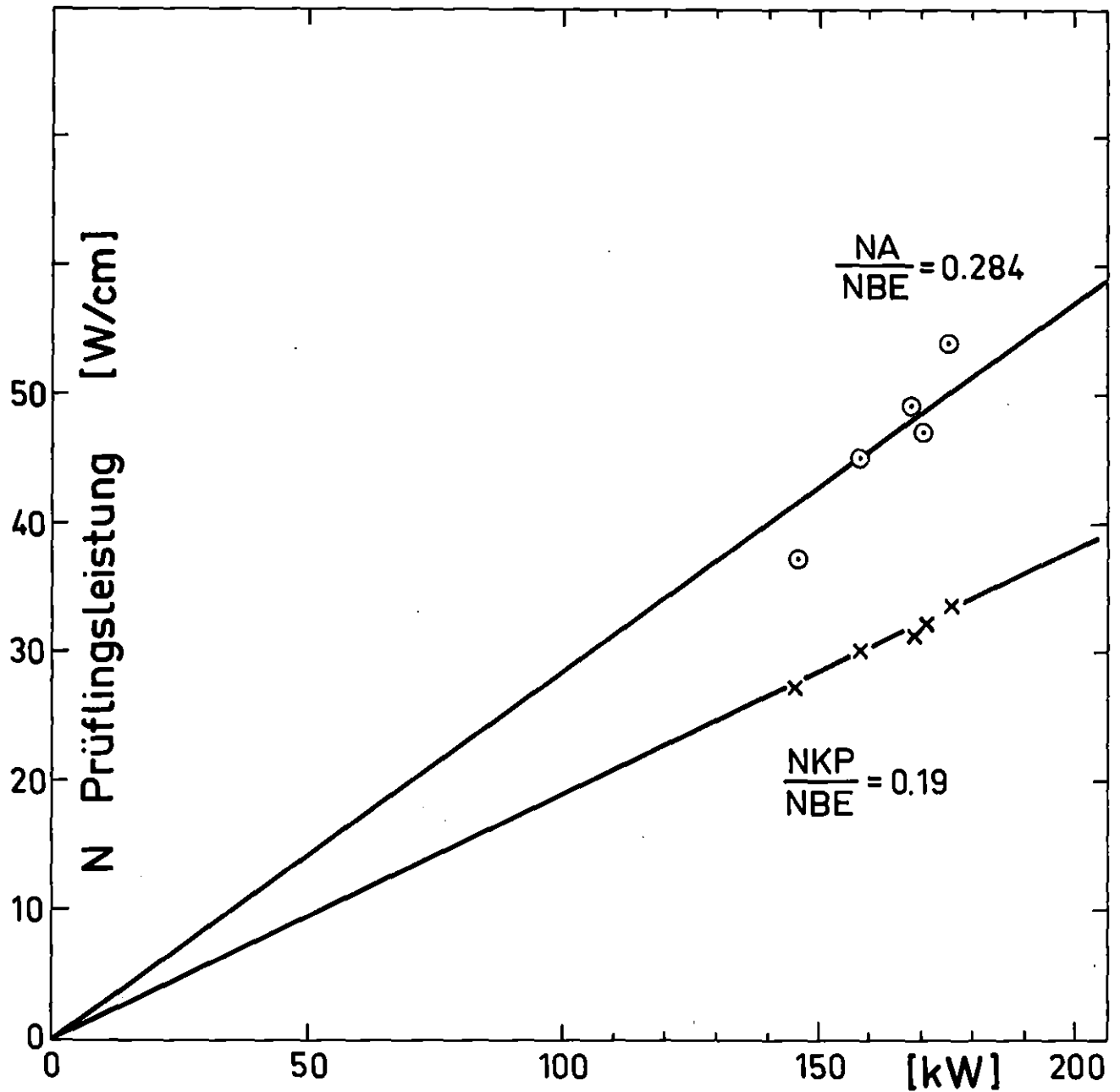








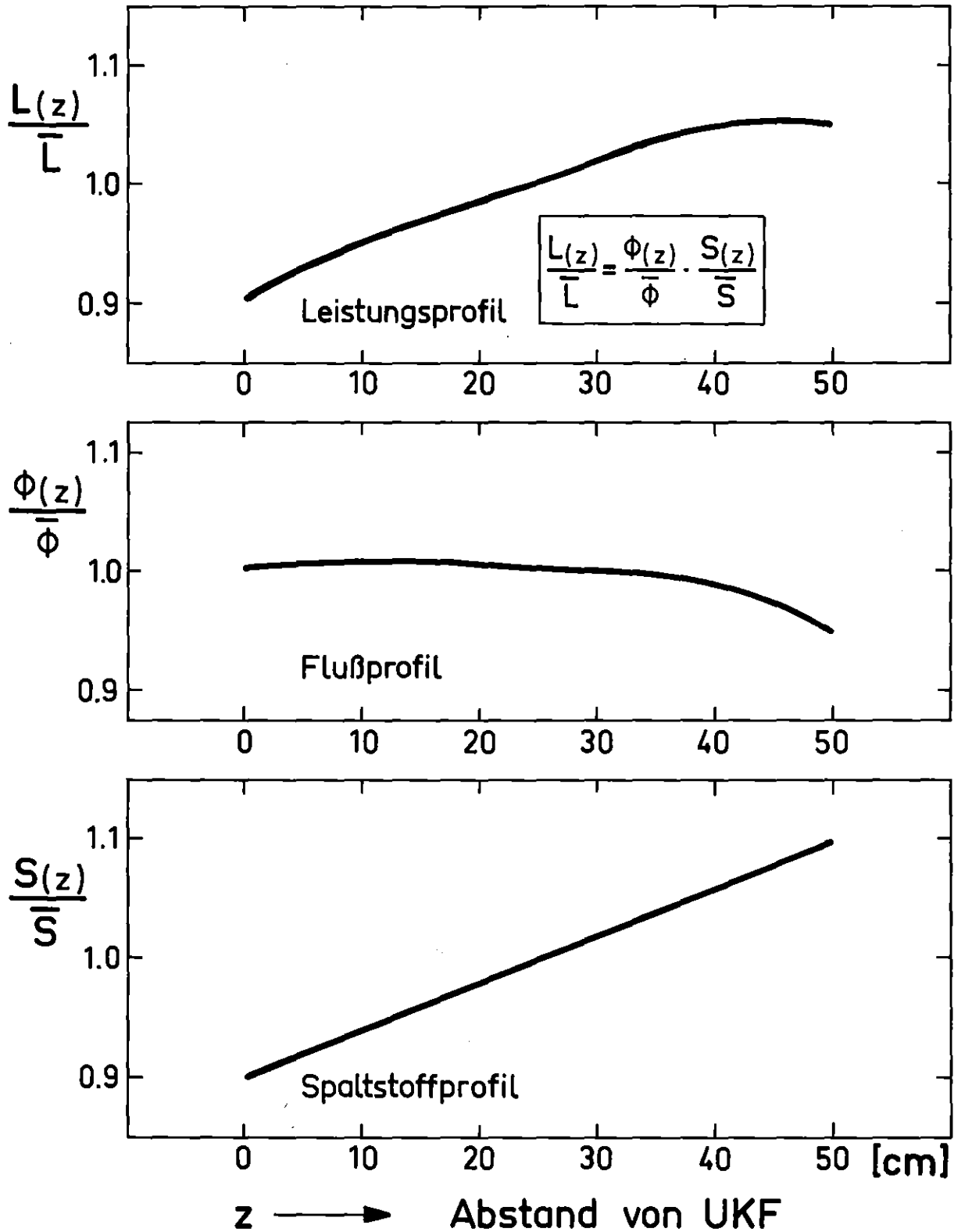




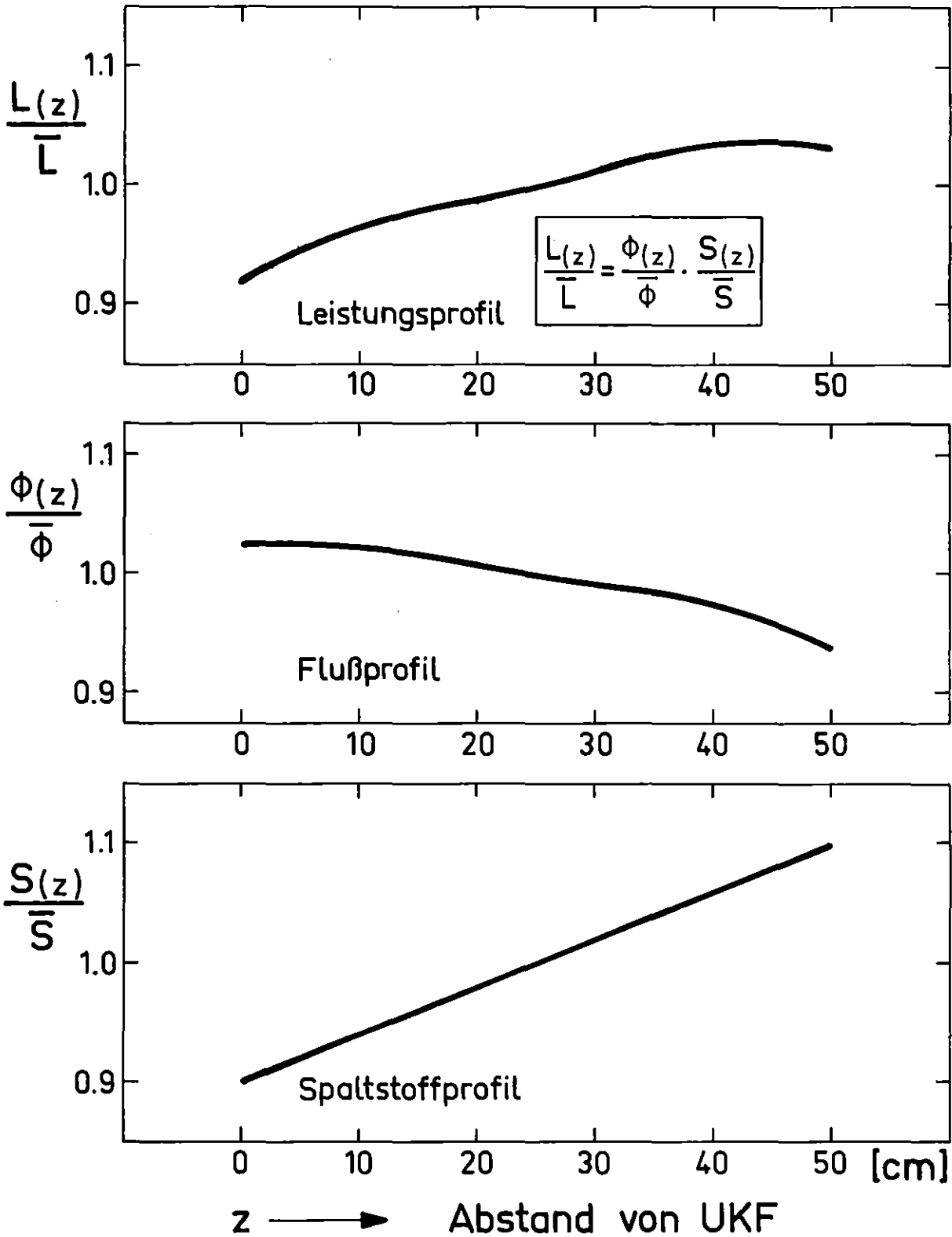
NBE = Leistung der umgebenden Brennelemente

⊙ NA = Prüfungsleistung aus Temperaturanstieg

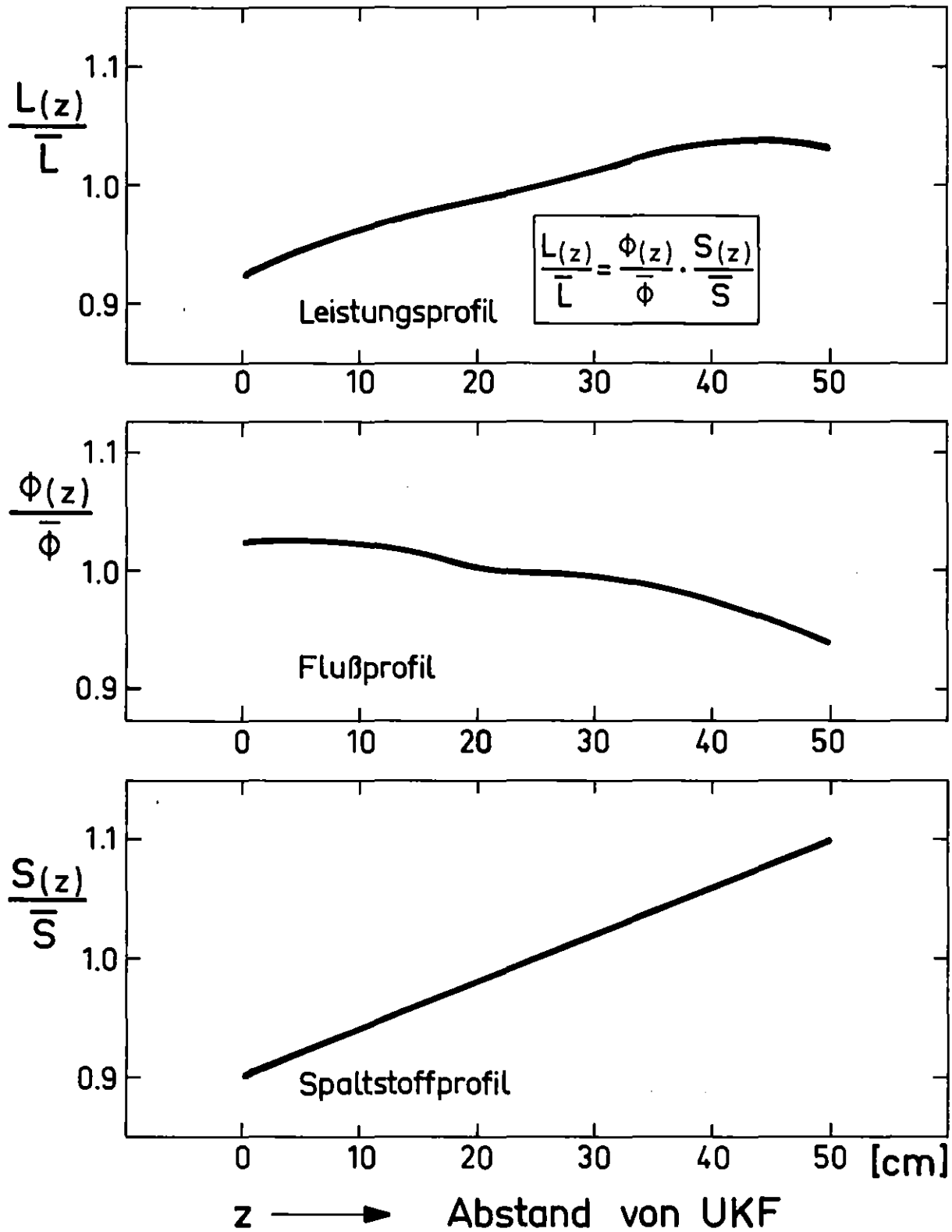
x NKP = „reaktorphysikalische“ Prüfungsleistung



Normierte Axialprofile am Prüfling  
Versuch: G2.1    Stab Nr.: 35    Abb.:12.1



Normierte Axialprofile am Prüfling  
Versuch: G2.2    Stab Nr: 36    Abb.: 12.2



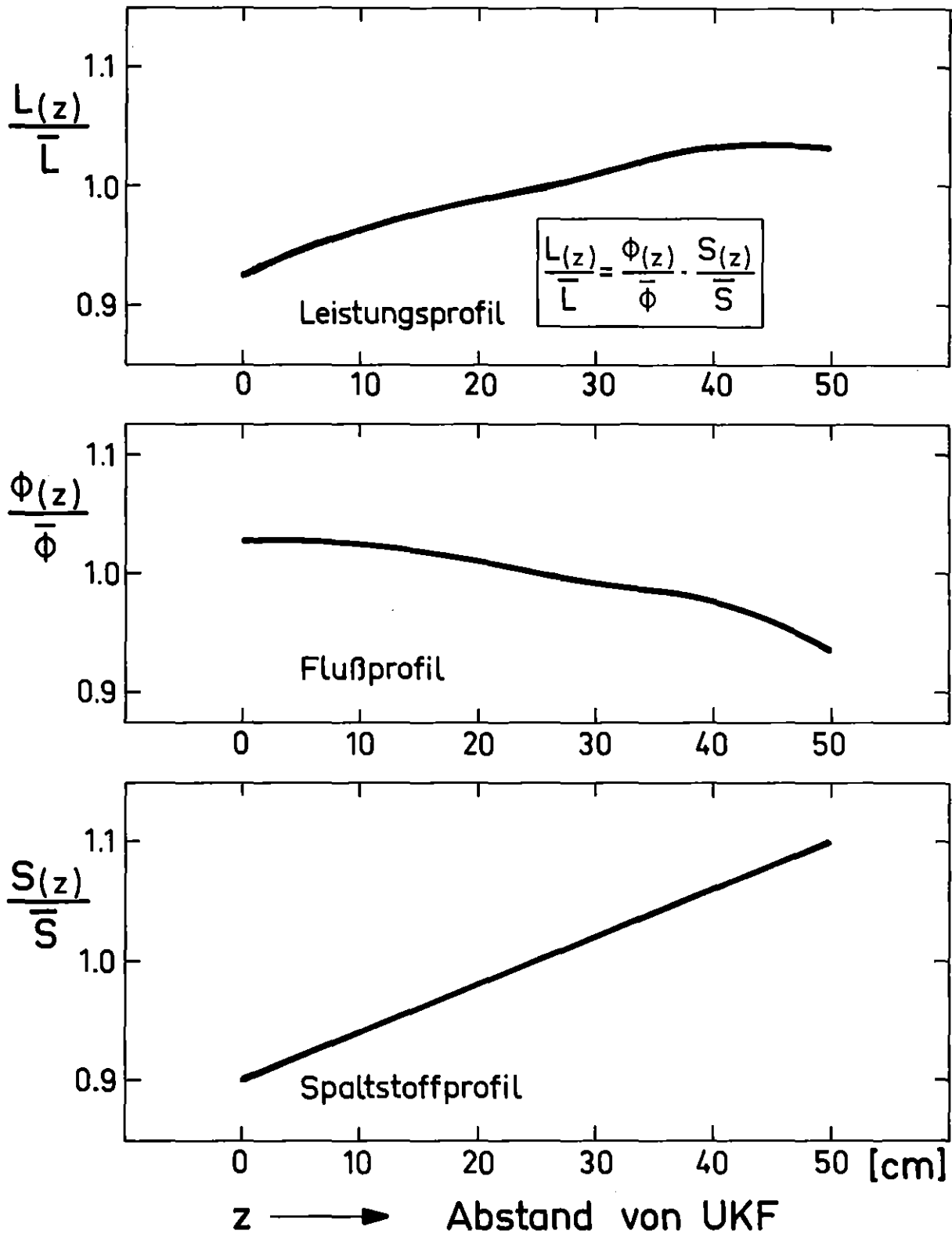
### Normierte Axialprofile am Prüfling

Versuch: G 3.1

Stab Nr.: 12

Abb.: 12.3

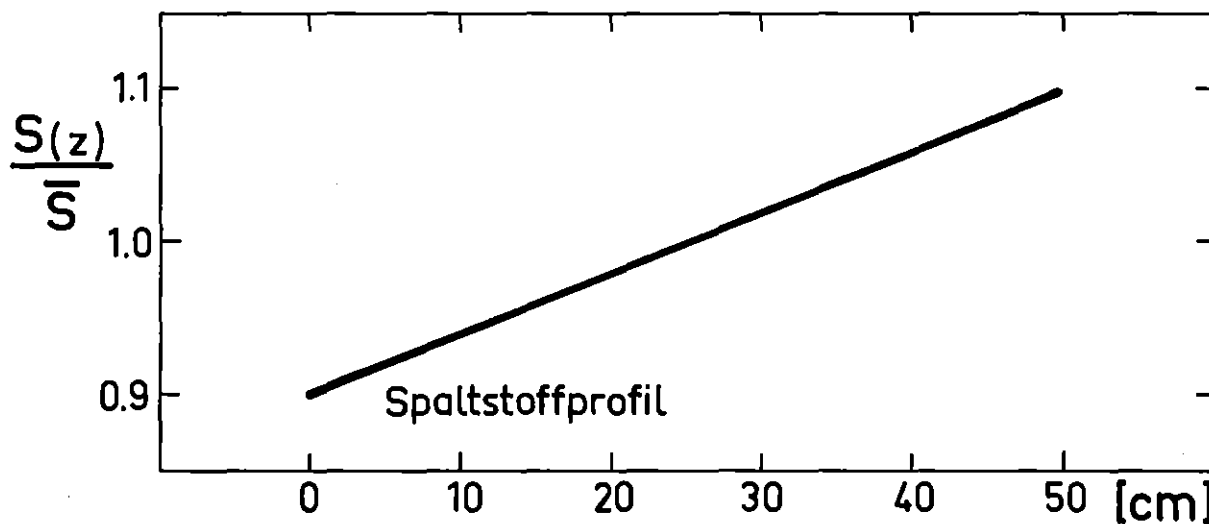
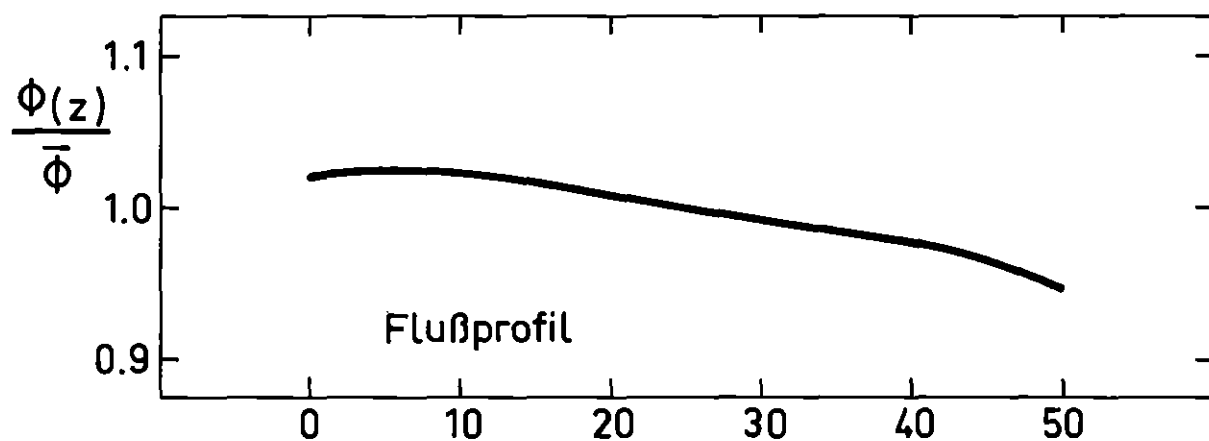
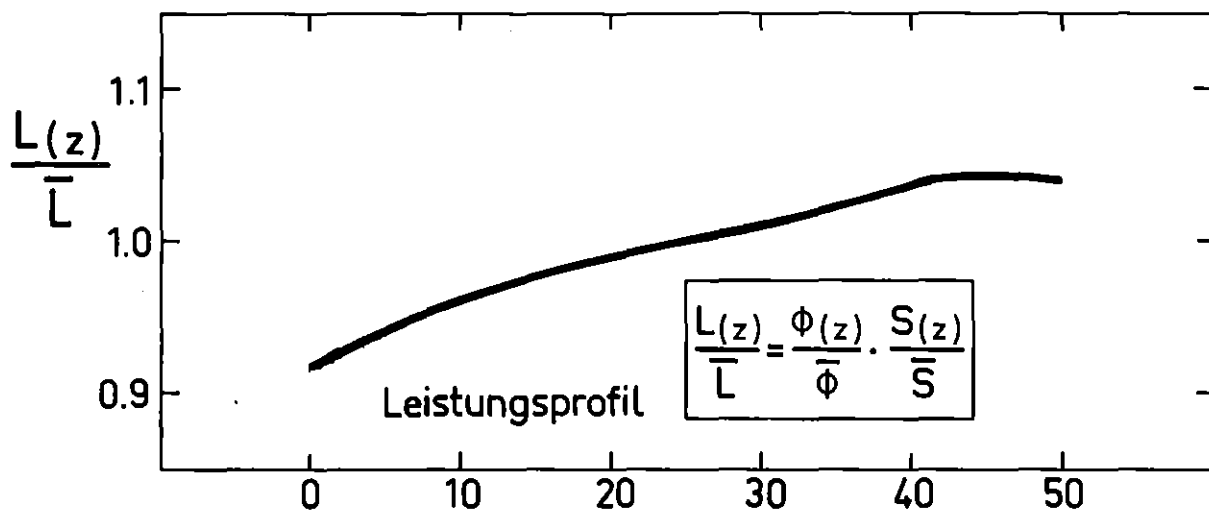




Normierte Axialprofile am Prüfling

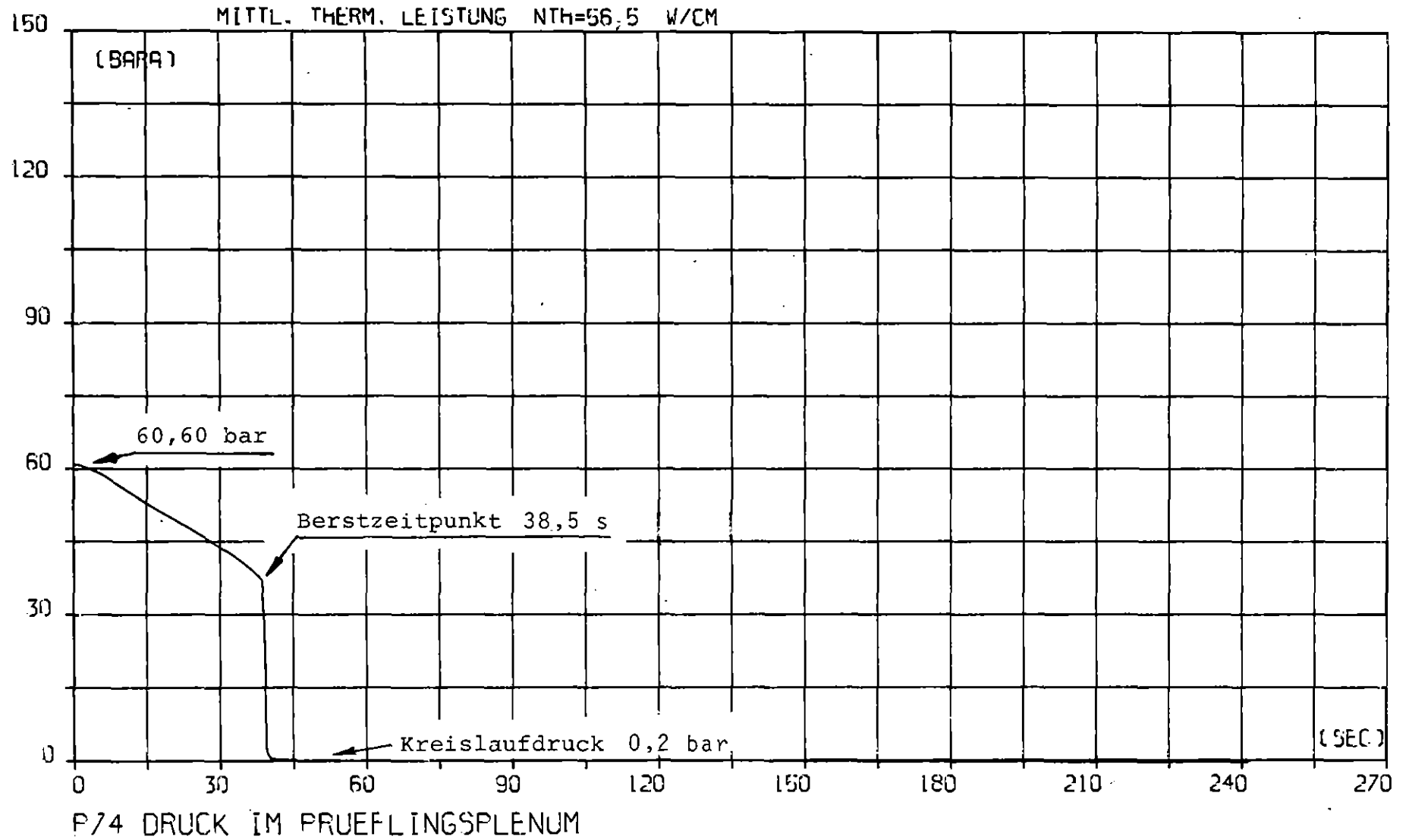
Versuch: G3.2 Stab Nr.: 11

Abb.: 12.4



z → Abstand von UKF

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 2.1  
VOM 14.11.78 ZEIT 12H15M48S



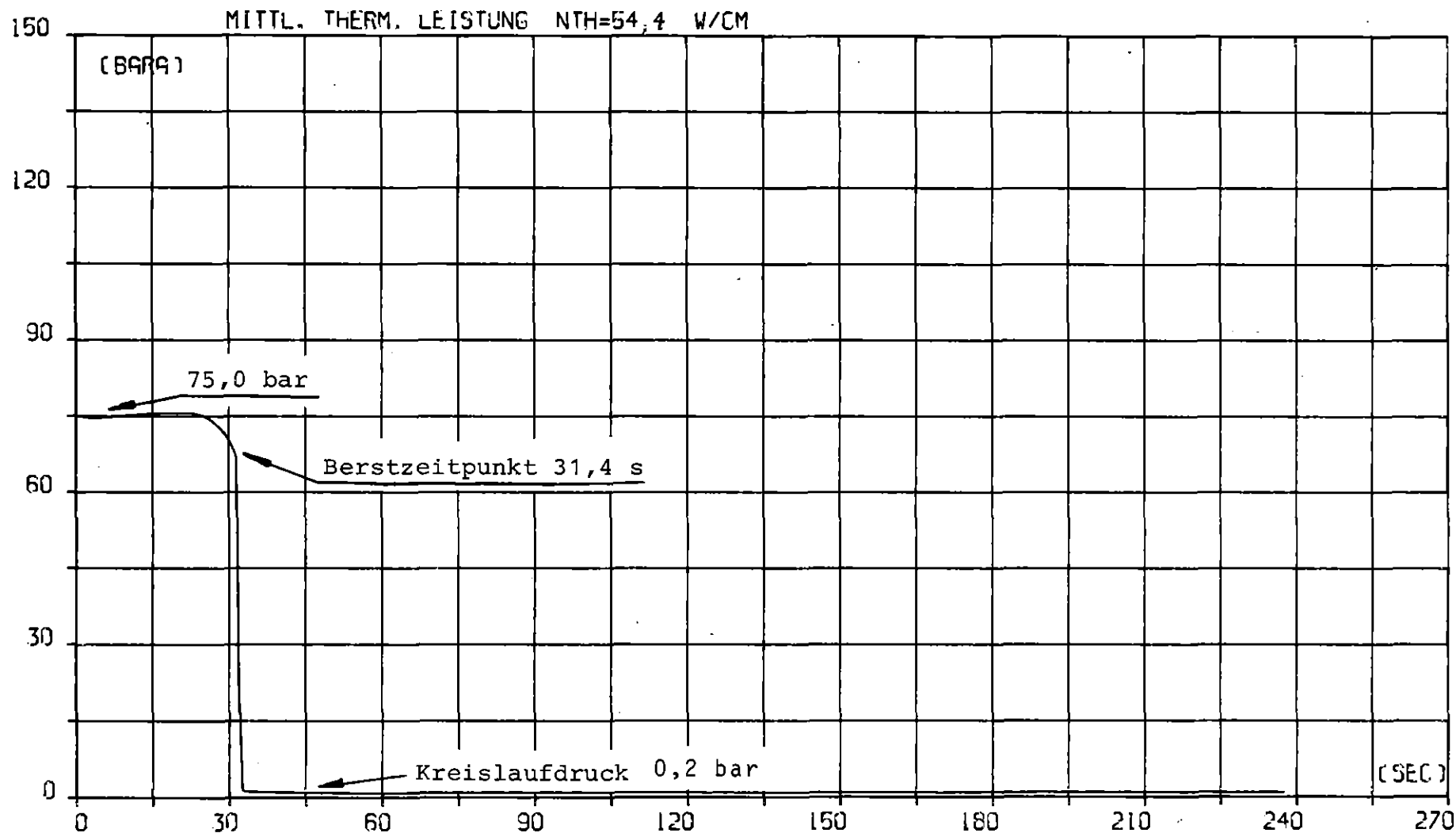
DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 2.1

ABB. 13.1

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 2.2

ABB.132

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 2.2  
VOM 16.11.78 ZEIT 14H02M09S

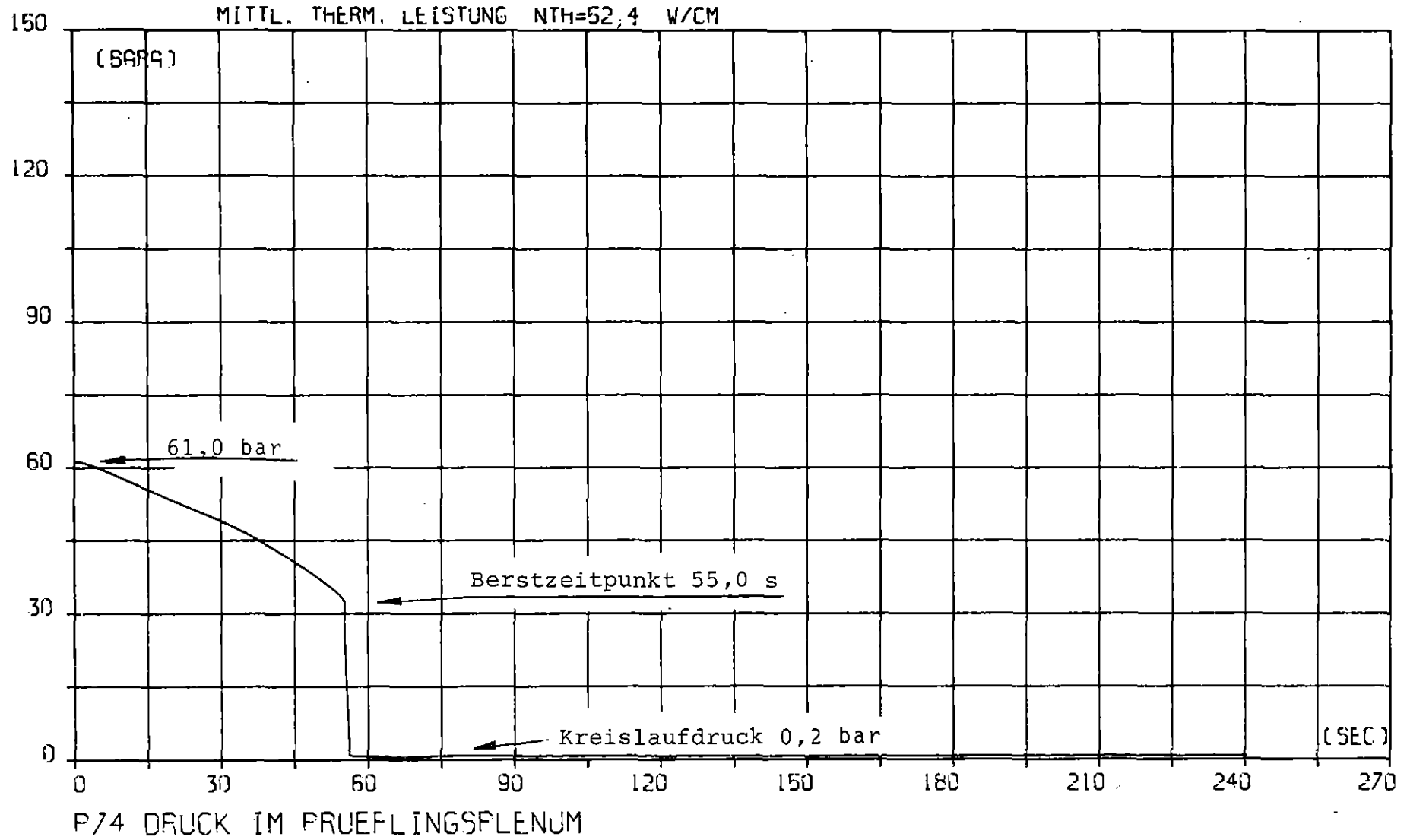


P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 3.1

ABB.13.3

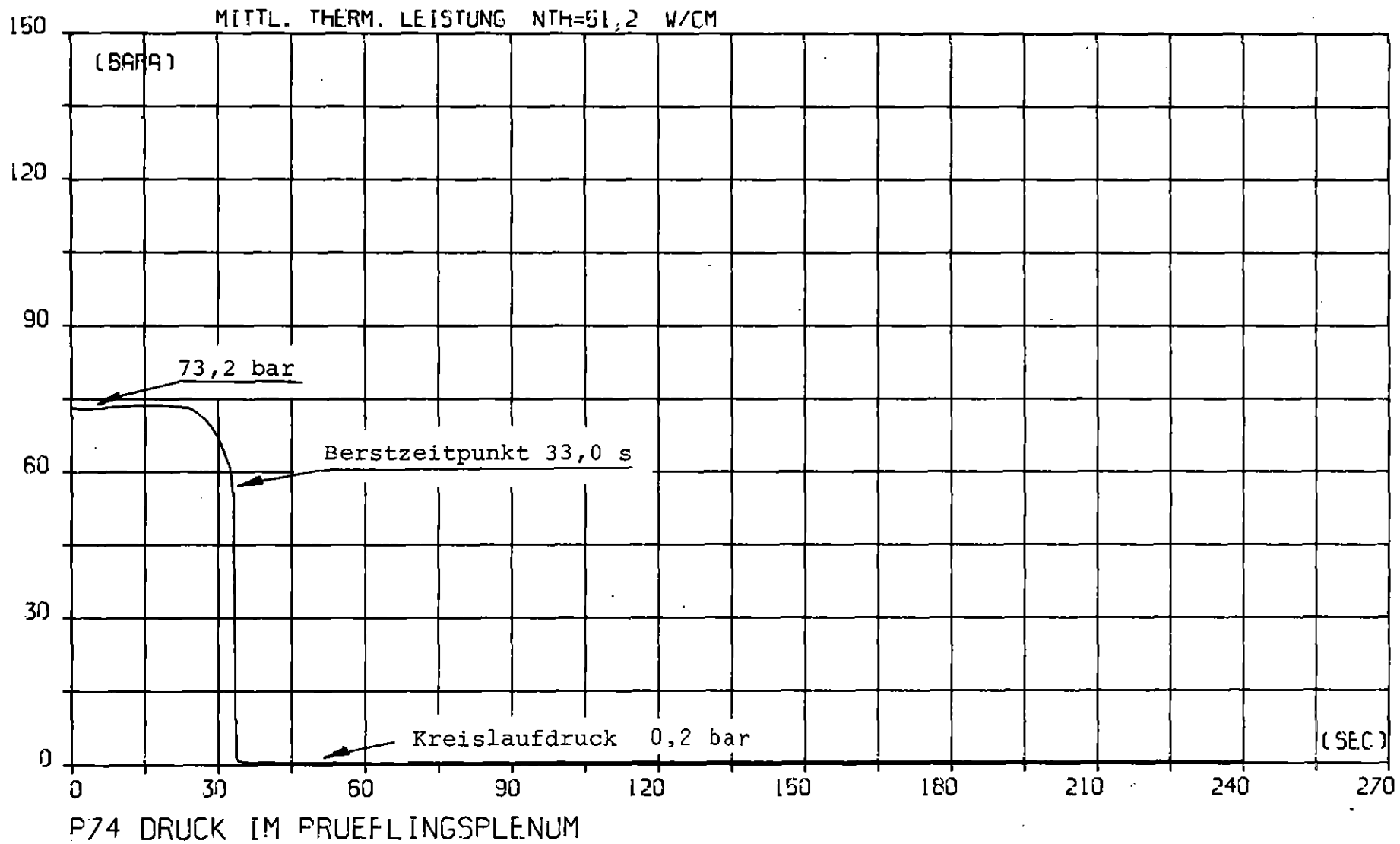
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 3.1  
VOM 21.11.78 ZEIT 11H28M12S



DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 3.2

ABB. 13.4

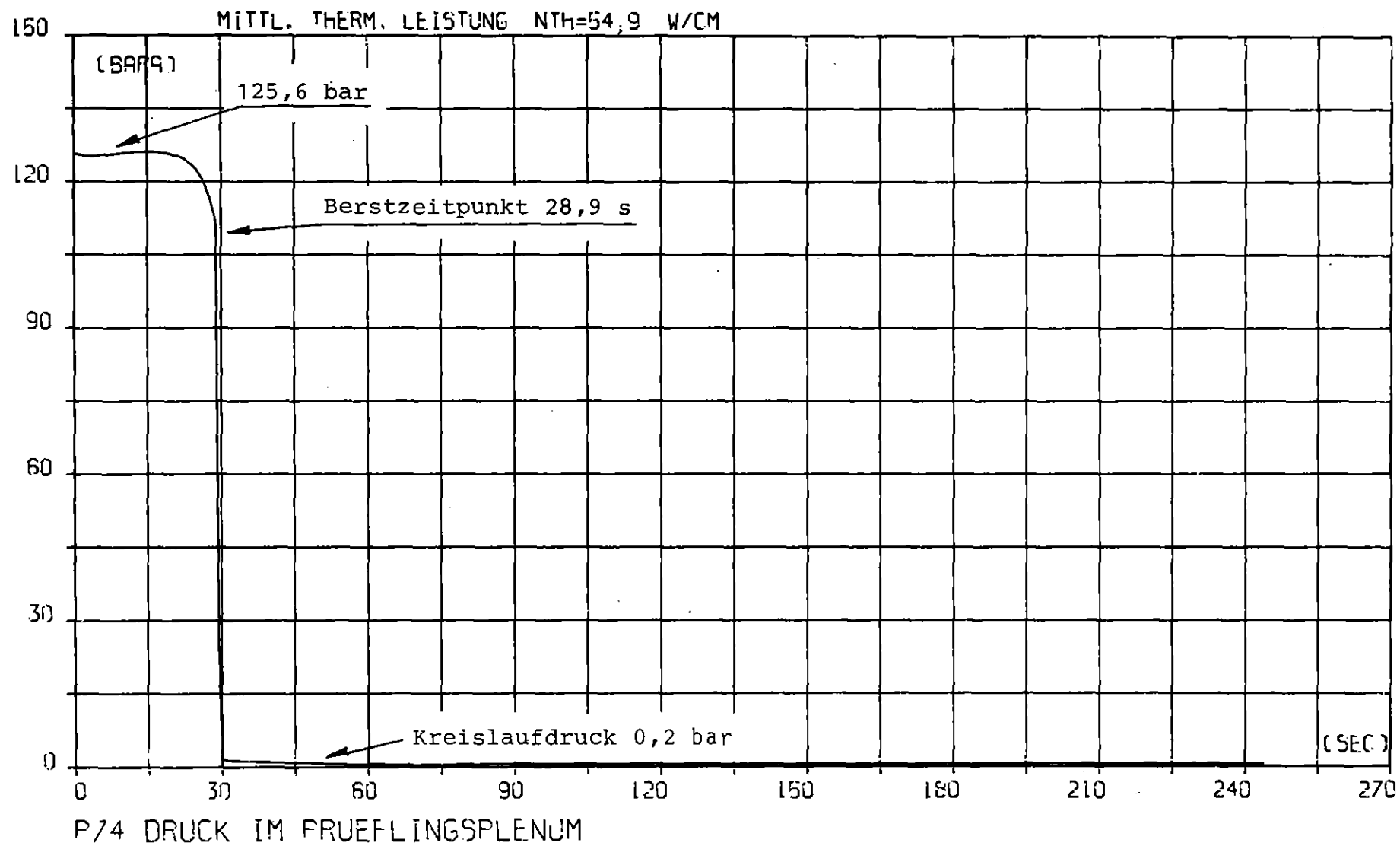
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 3.2  
VOM 28.11.78 ZEIT 12H09M52S



DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 3.3

ABB. 13.5

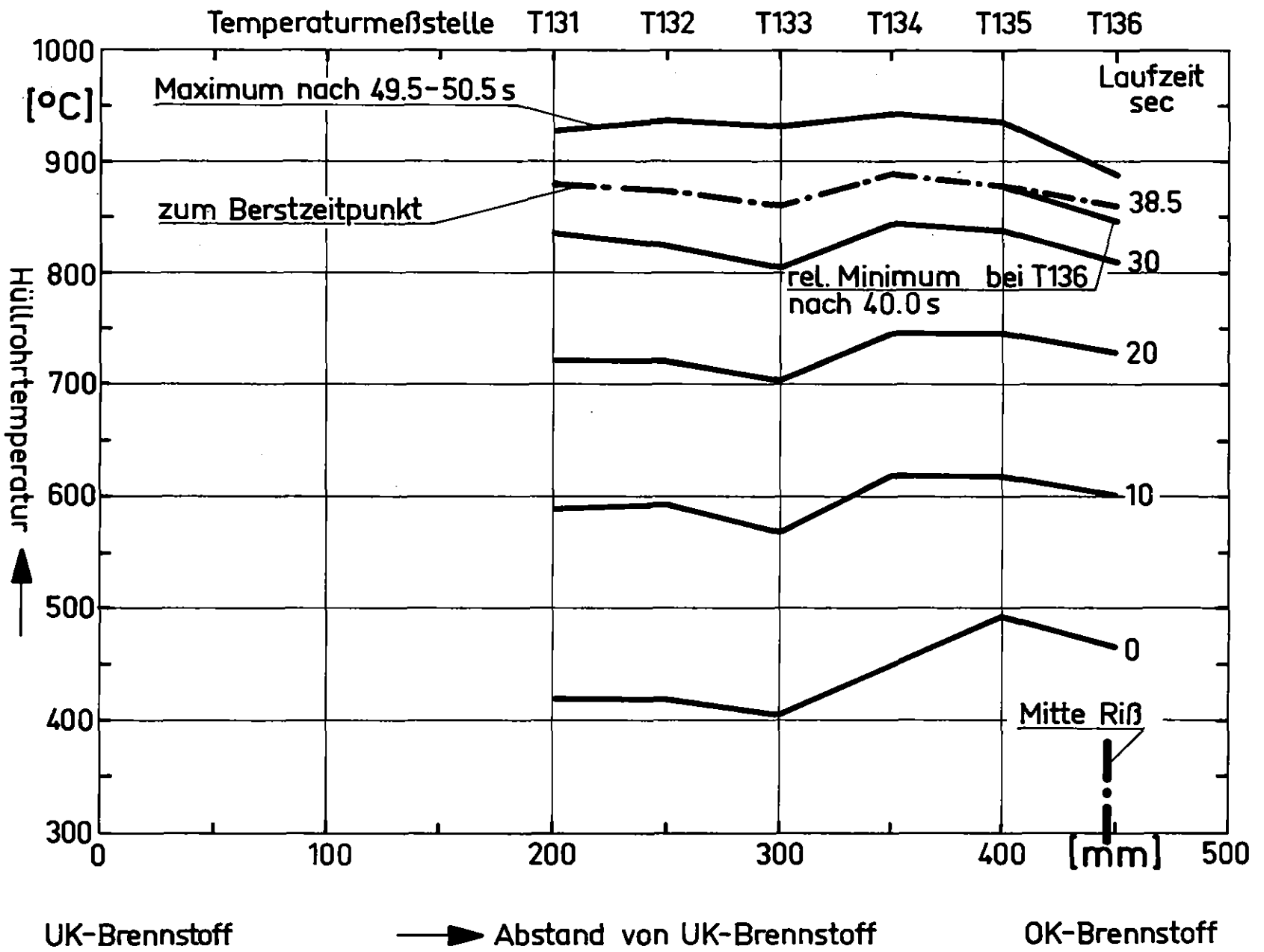
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. G 3.3  
VOM 24.11.78 ZEIT 12H11M40S



Axiales Temperaturprofil  
 Versuch: G.21 Stab: 35

Abb.: 14.1

**KUK**  
 IT1978  
 PNS 4237-84.24

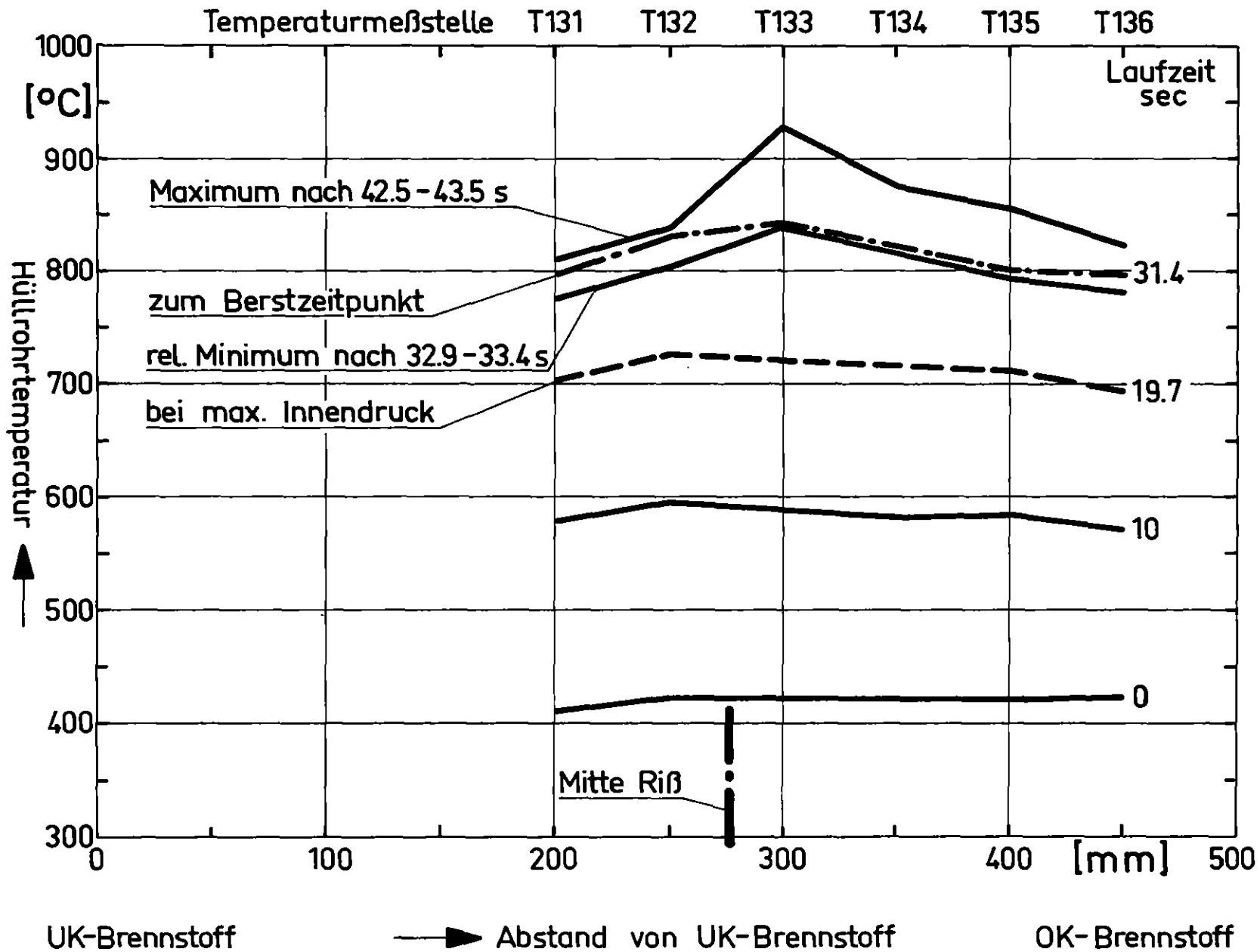


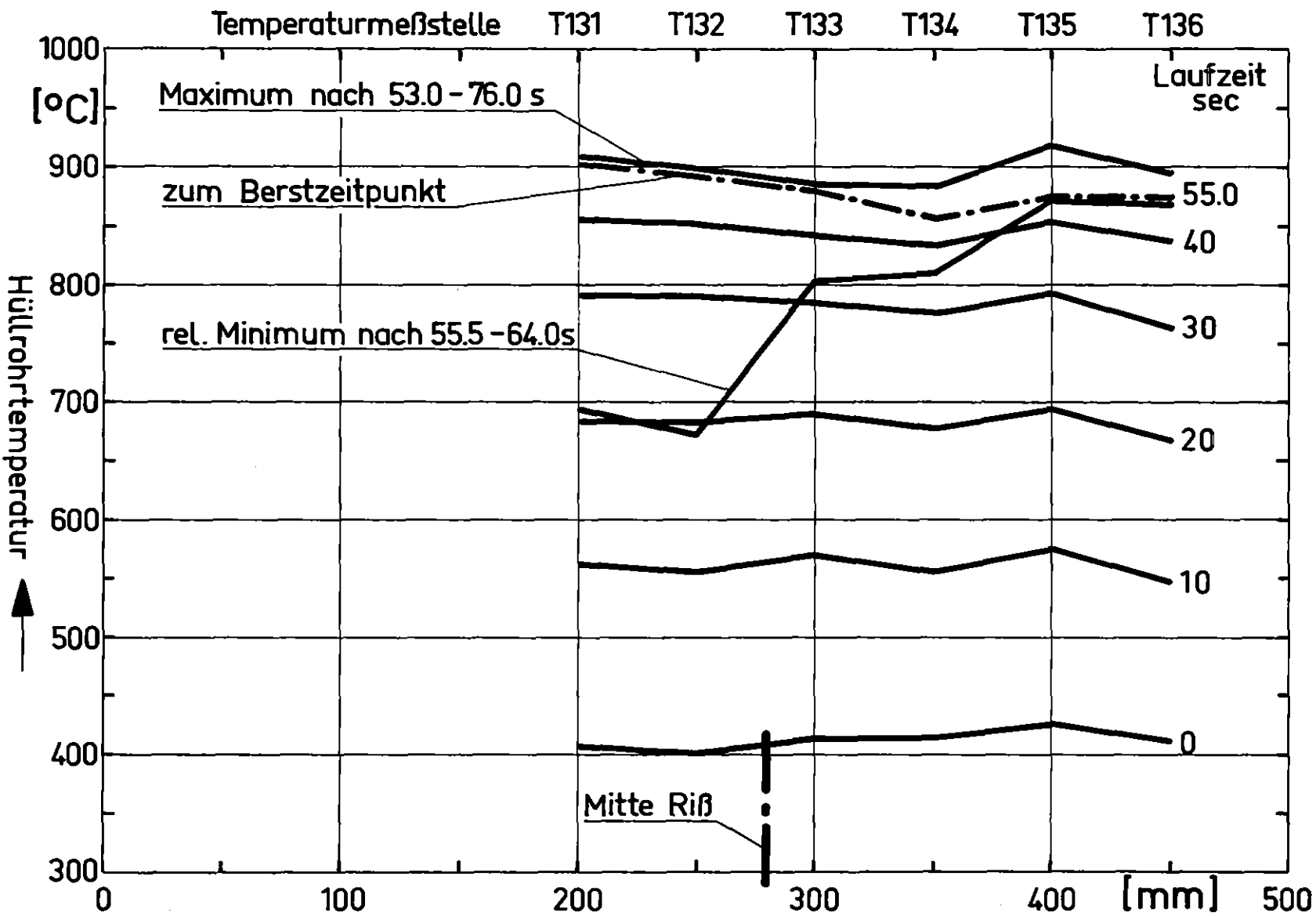


Axiales Temperaturprofil  
 Versuch: G2.2 Stab: 36

Abb.: 14.2

KJK IT1978  
 PNS4237-84.25





UK-Brennstoff      Abstand von UK-Brennstoff      OK-Brennstoff

Axiales Temperaturprofil  
 Versuch: G.3.1    Stab: 12

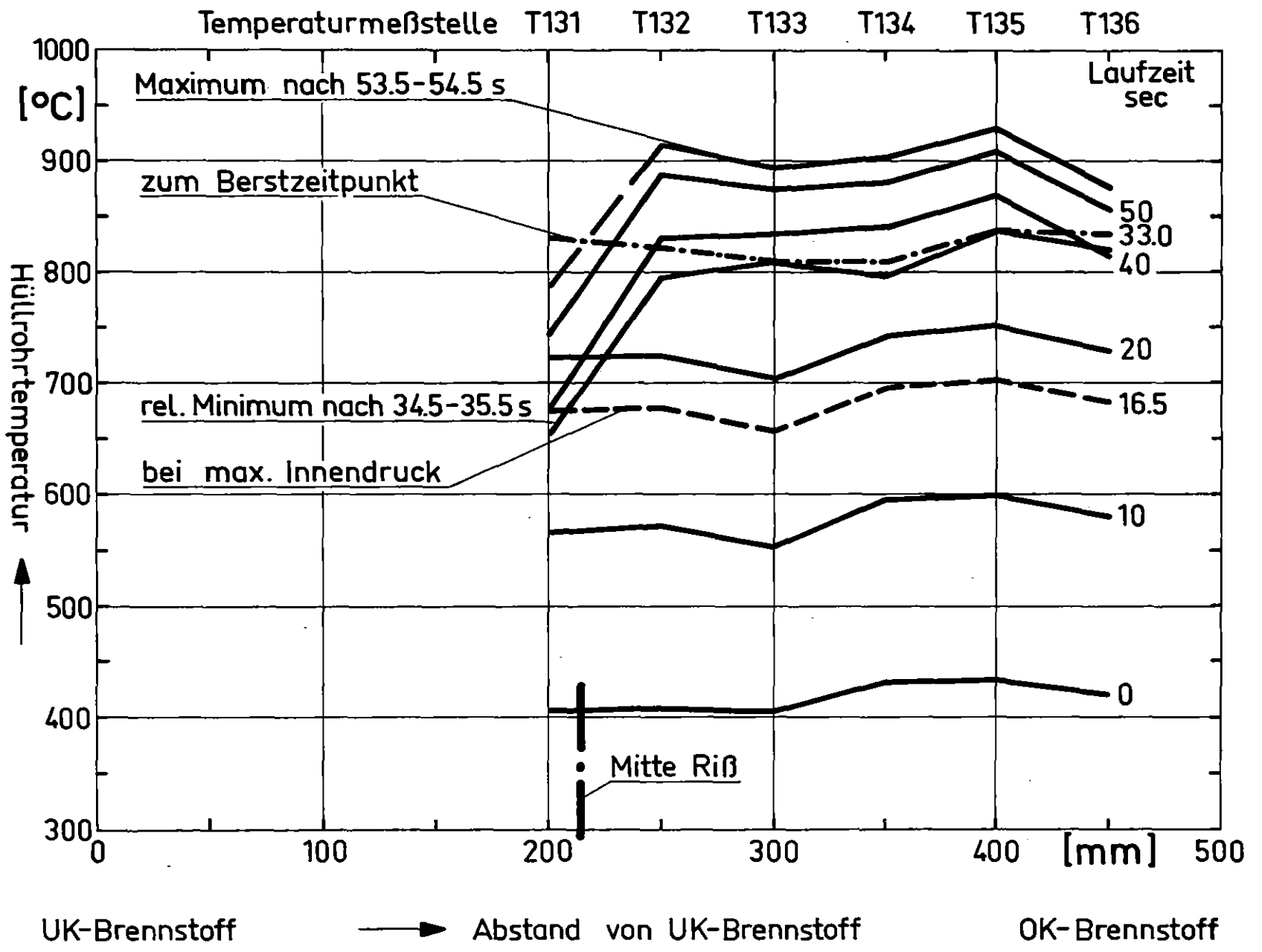
Abb.: 14.3

KfK IT 1978  
 PNS 4237-84.26

Axiales Temperaturprofil  
 Versuch: G.3.2 Stab: 11

Abb.: 14.4

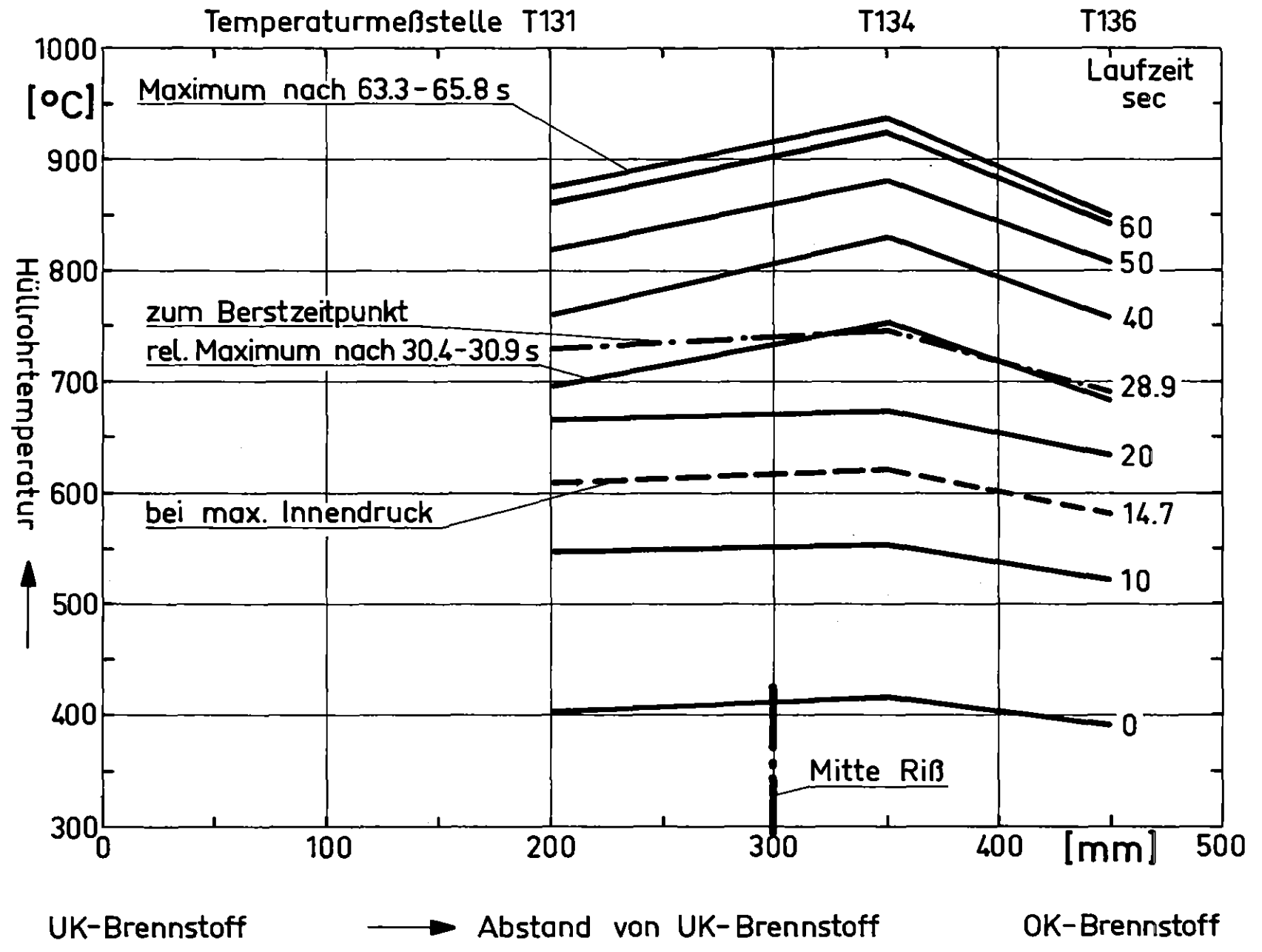
KIT  
 IT 1978  
 PNS 4237 - 84.27



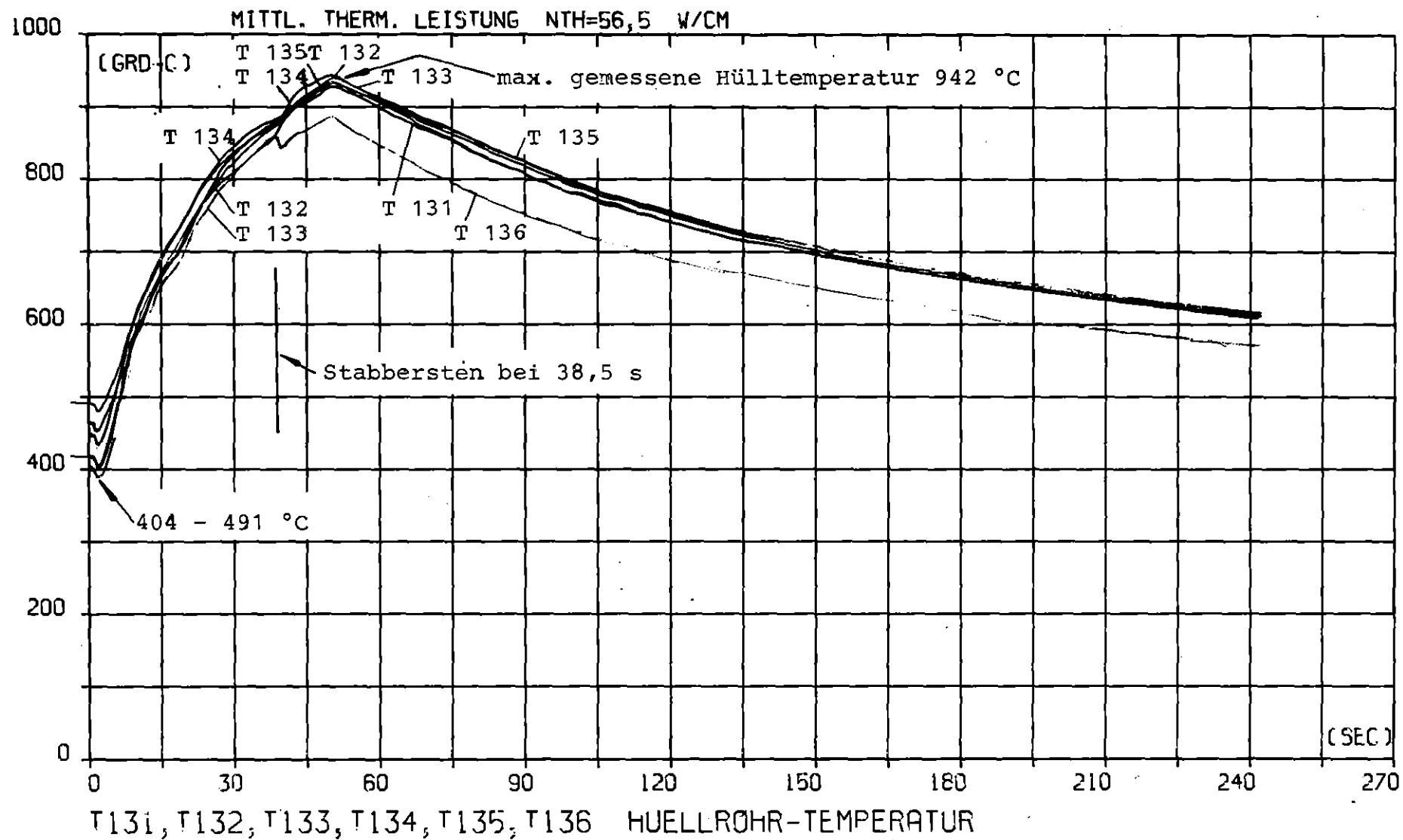
Axiales Temperaturprofil  
 Versuch: G3.3 Stab: 10

Abb.: 14.5

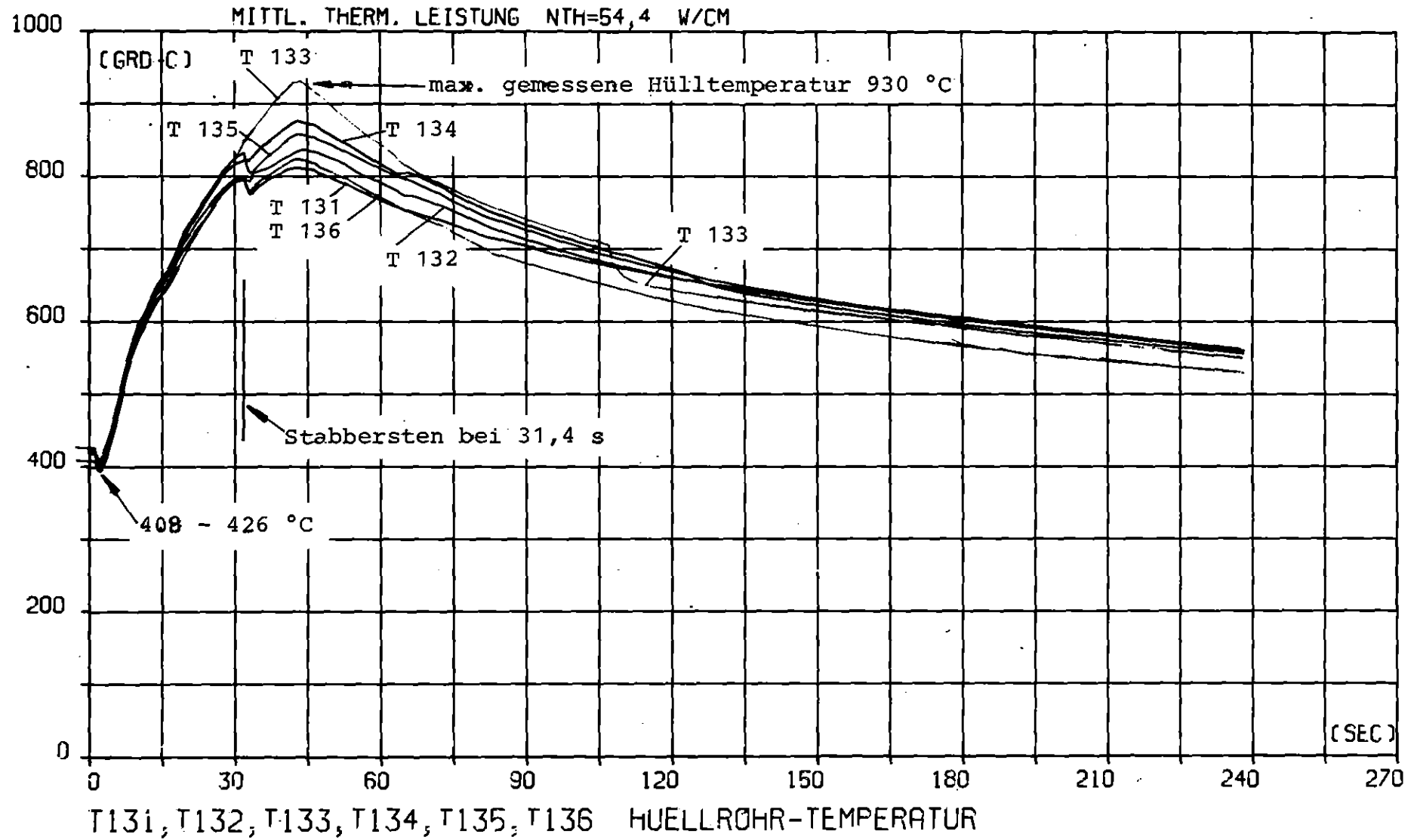
KfK  
 IT 1978  
 PNS 4237-84.28



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 2.1  
 VOM 14.11.78 ZEIT 12H15M48S

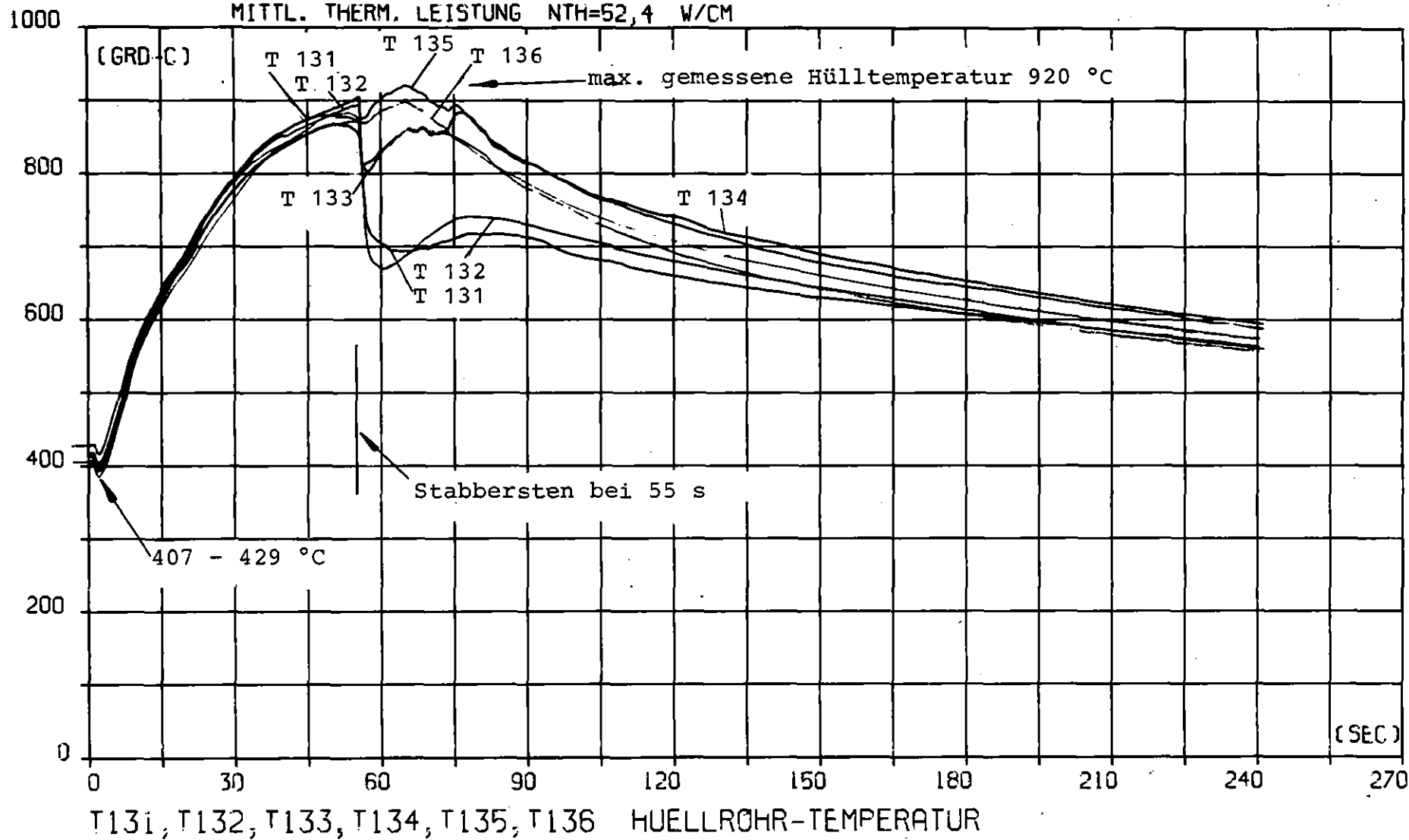


PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 2.2  
 VOM 16.11.78 ZEIT 14H02M09S



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 3.1  
 VOM 21.11.78 ZEIT 11H28M12S

MITTL. THERM. LEISTUNG NTH=52,4 W/CM



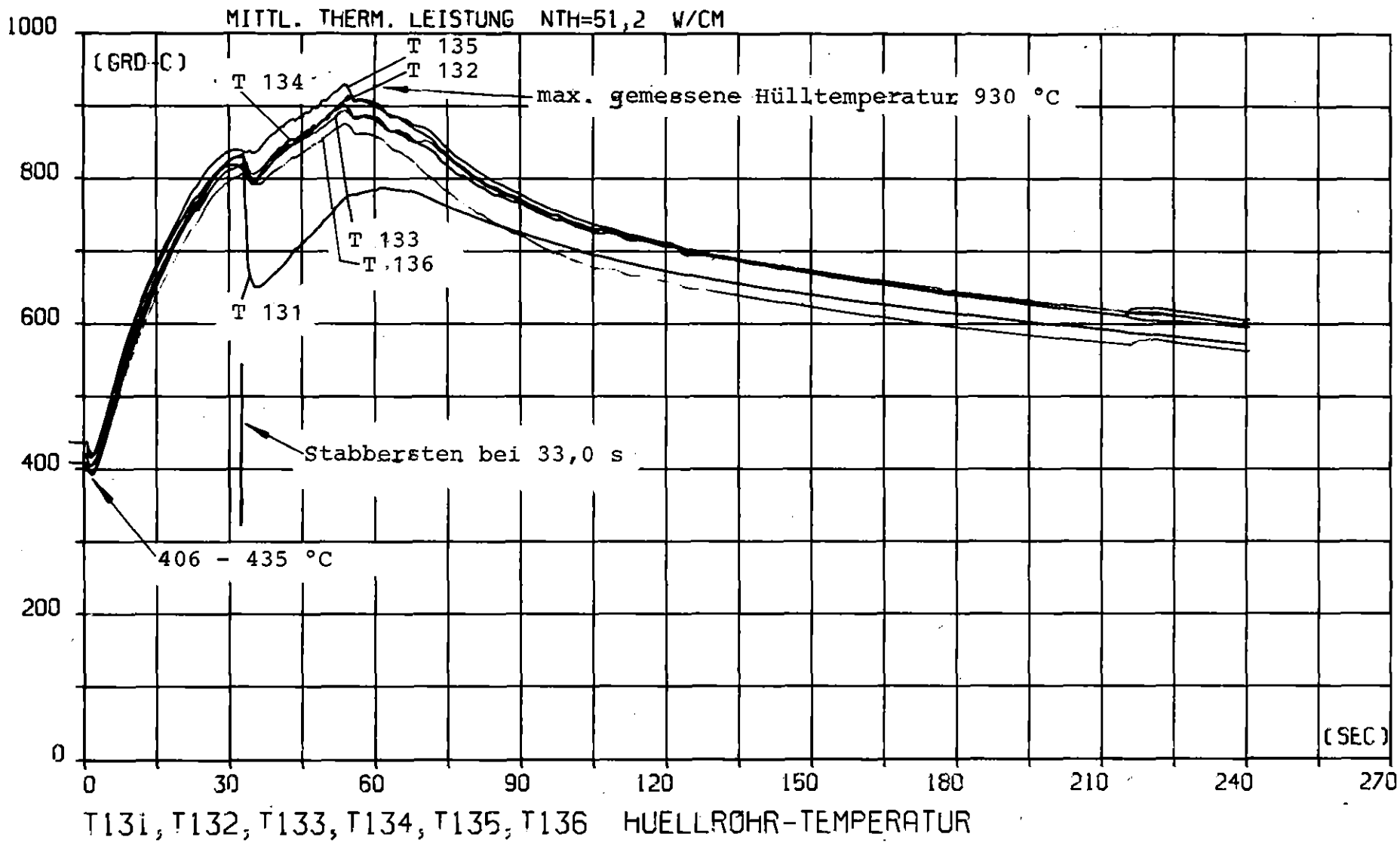
HOLLROHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 3.1

ABB. 15.3

HÜLLROHRTEMPORATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 3.2

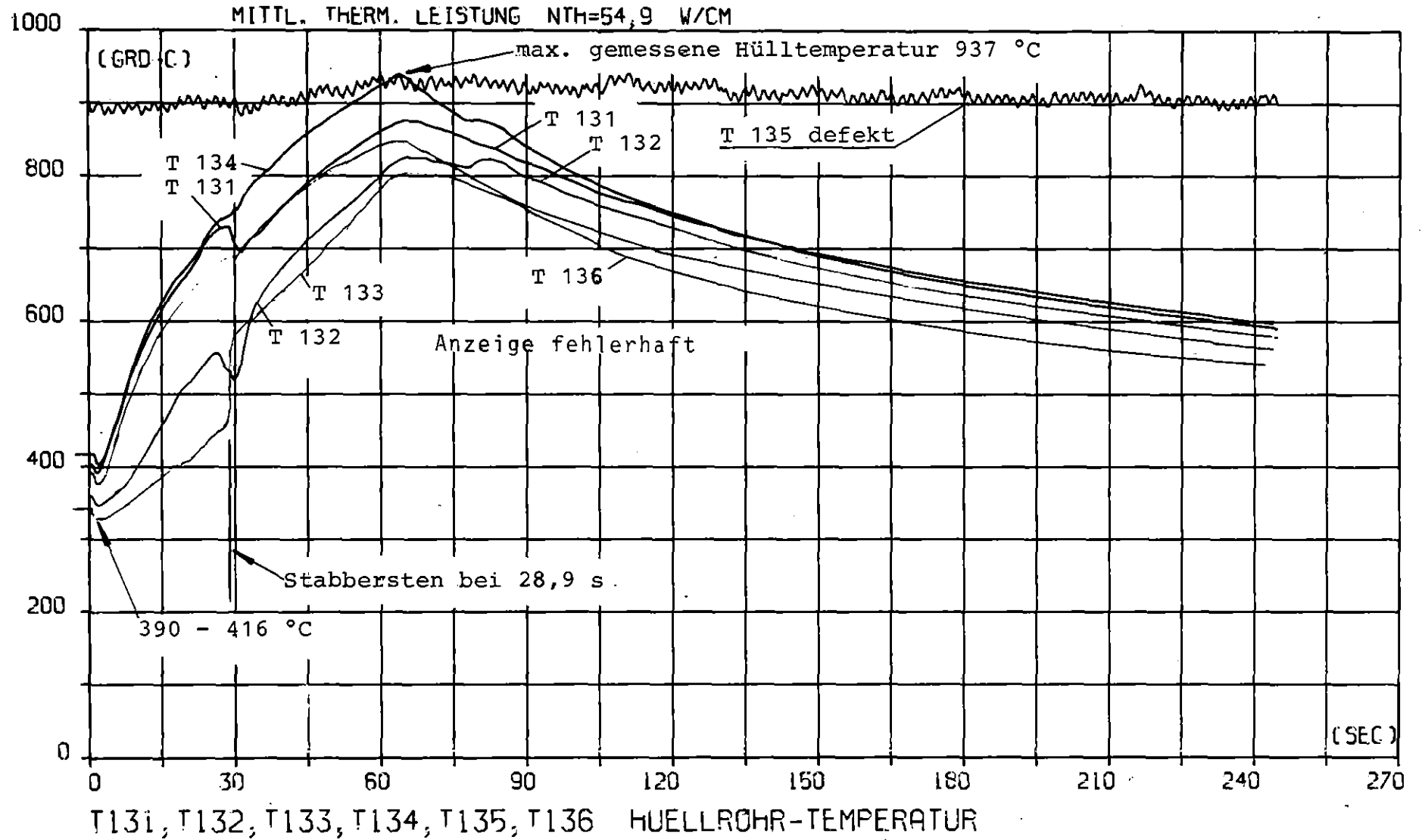
ABB. 15.4

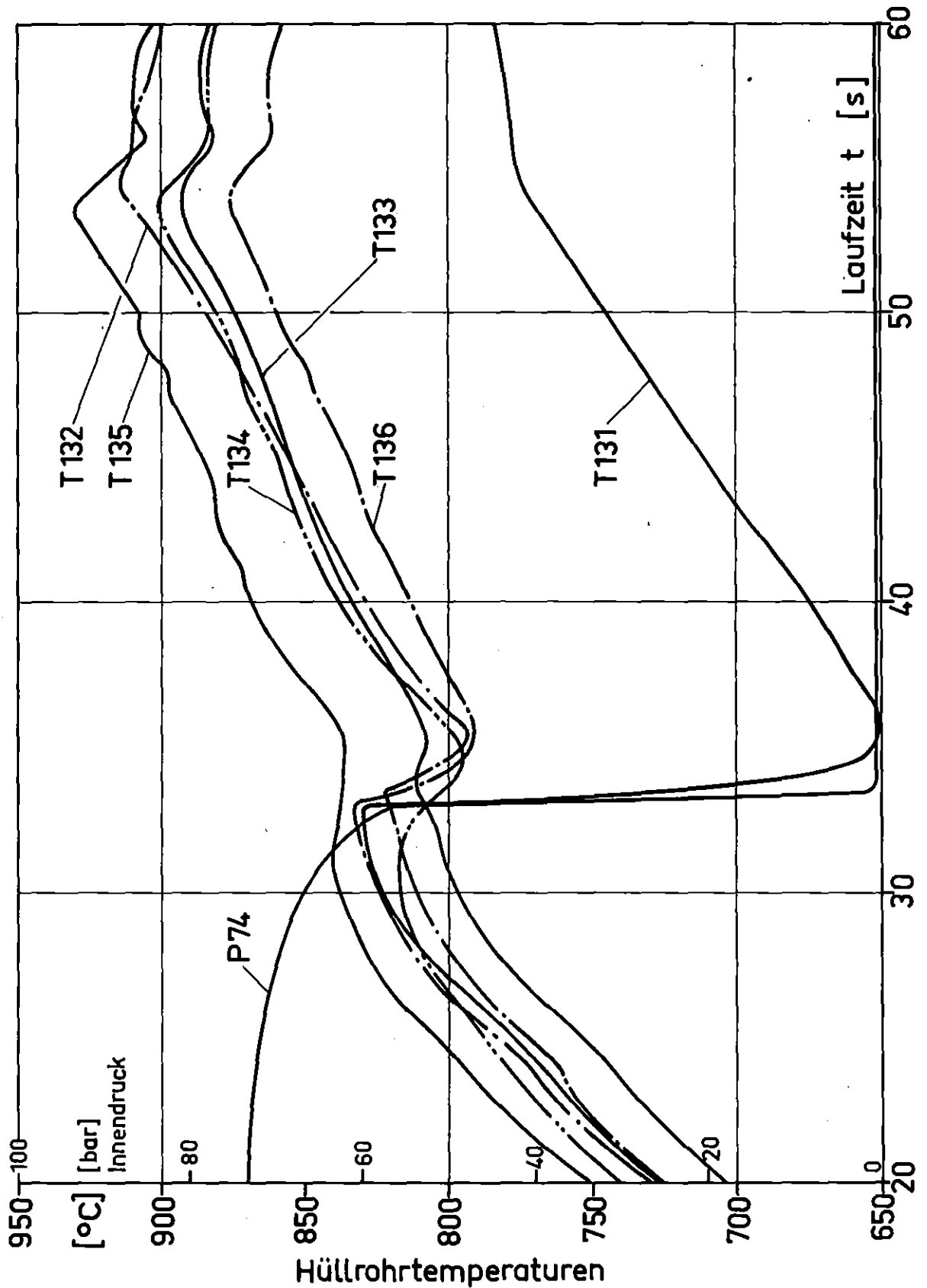
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. G 3.2  
VOM 28.11.78 ZEIT 12H09M52S





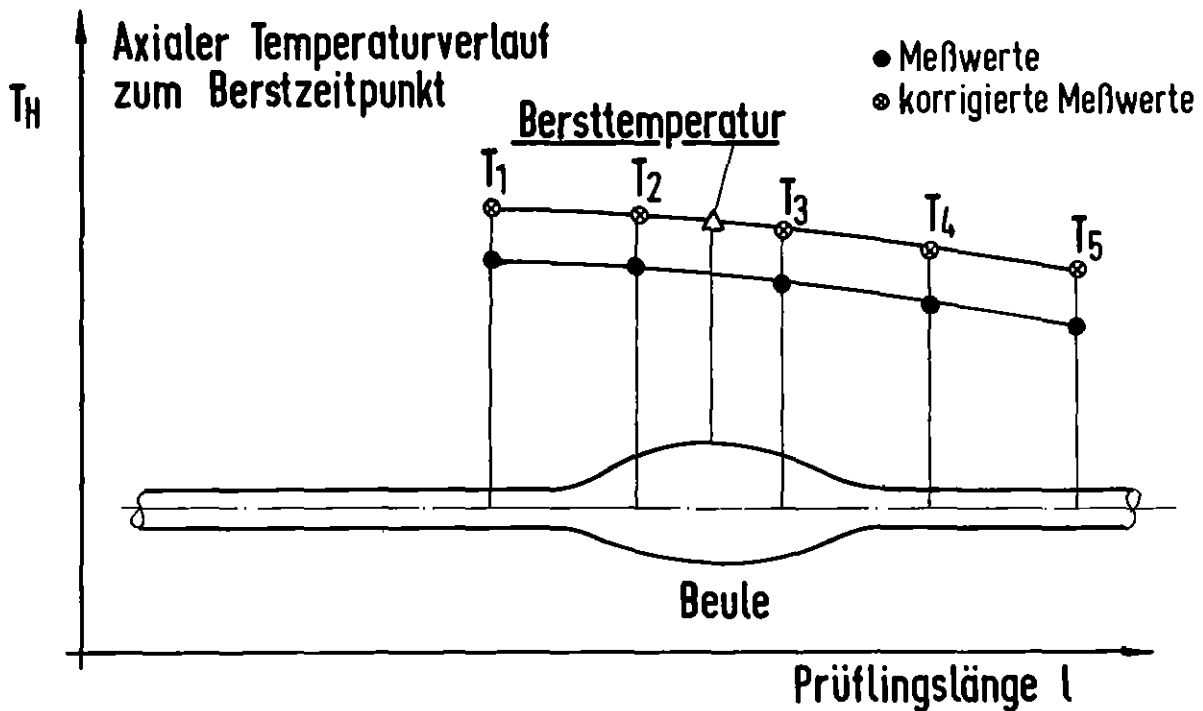
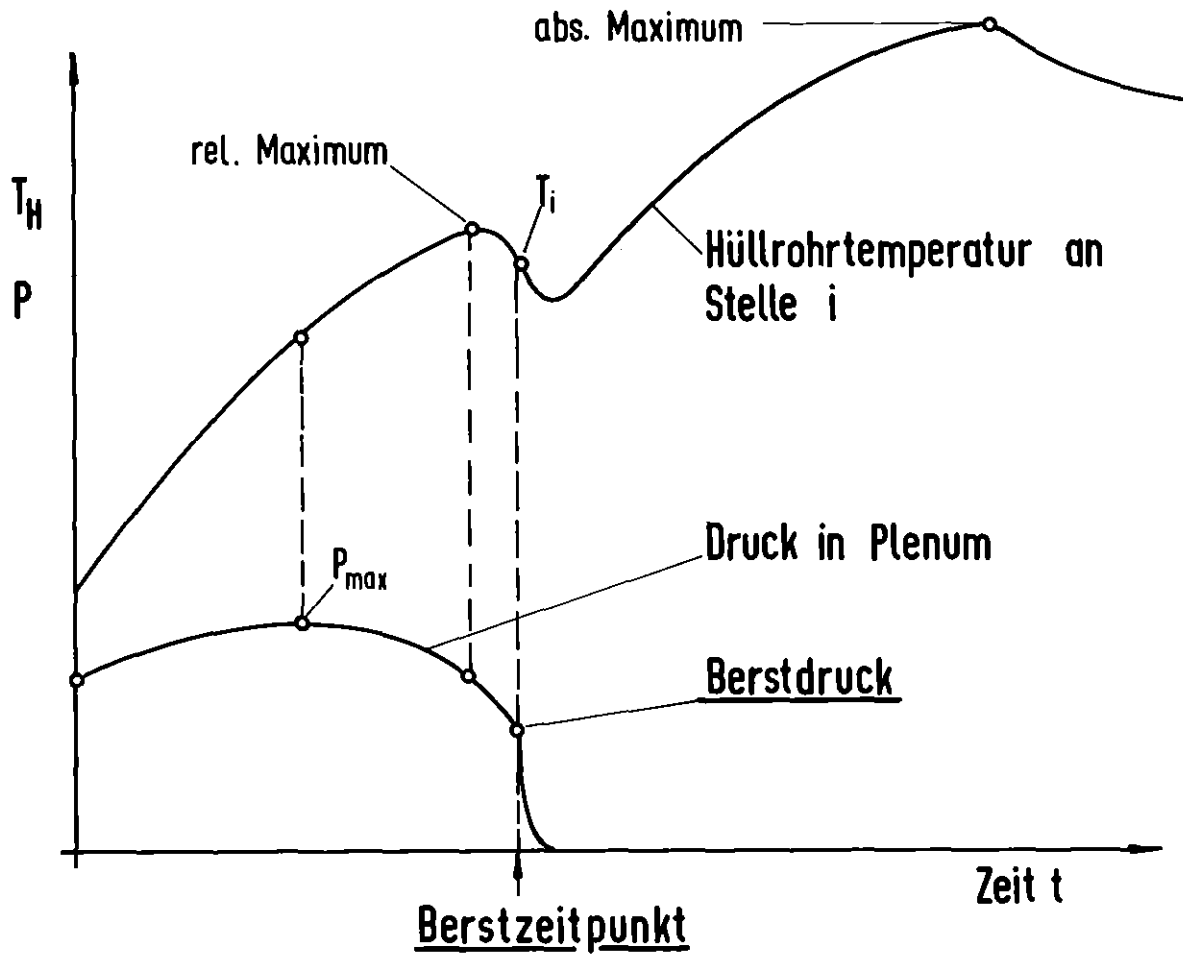
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 3.3  
 VOM 24.11.78 ZEIT 12H11M40S





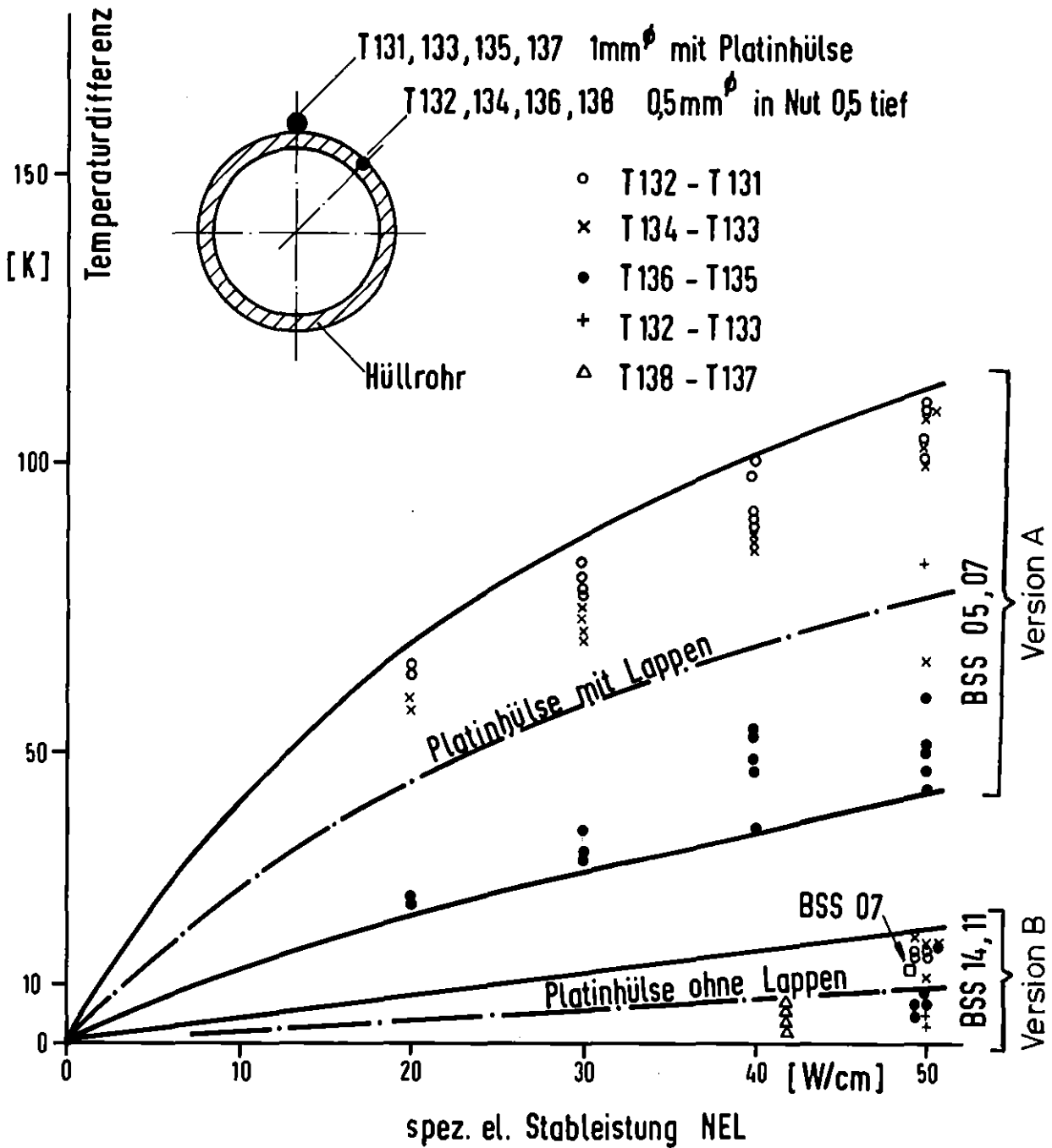
**KTK**  
IT 80  
PNS4237-494

FR2 In-Pile Versuch G 3.2  
Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt) Abb.: 16

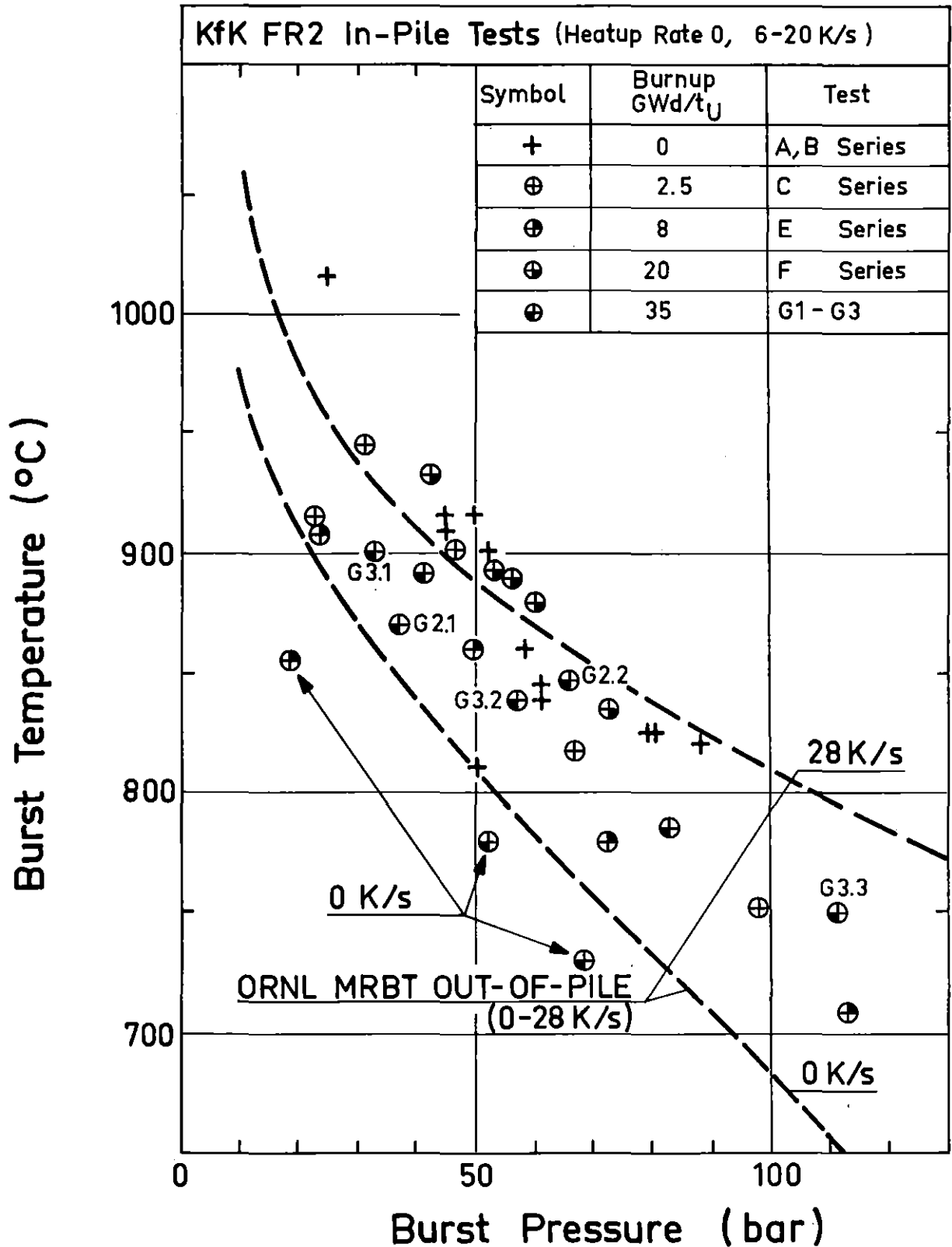


Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck

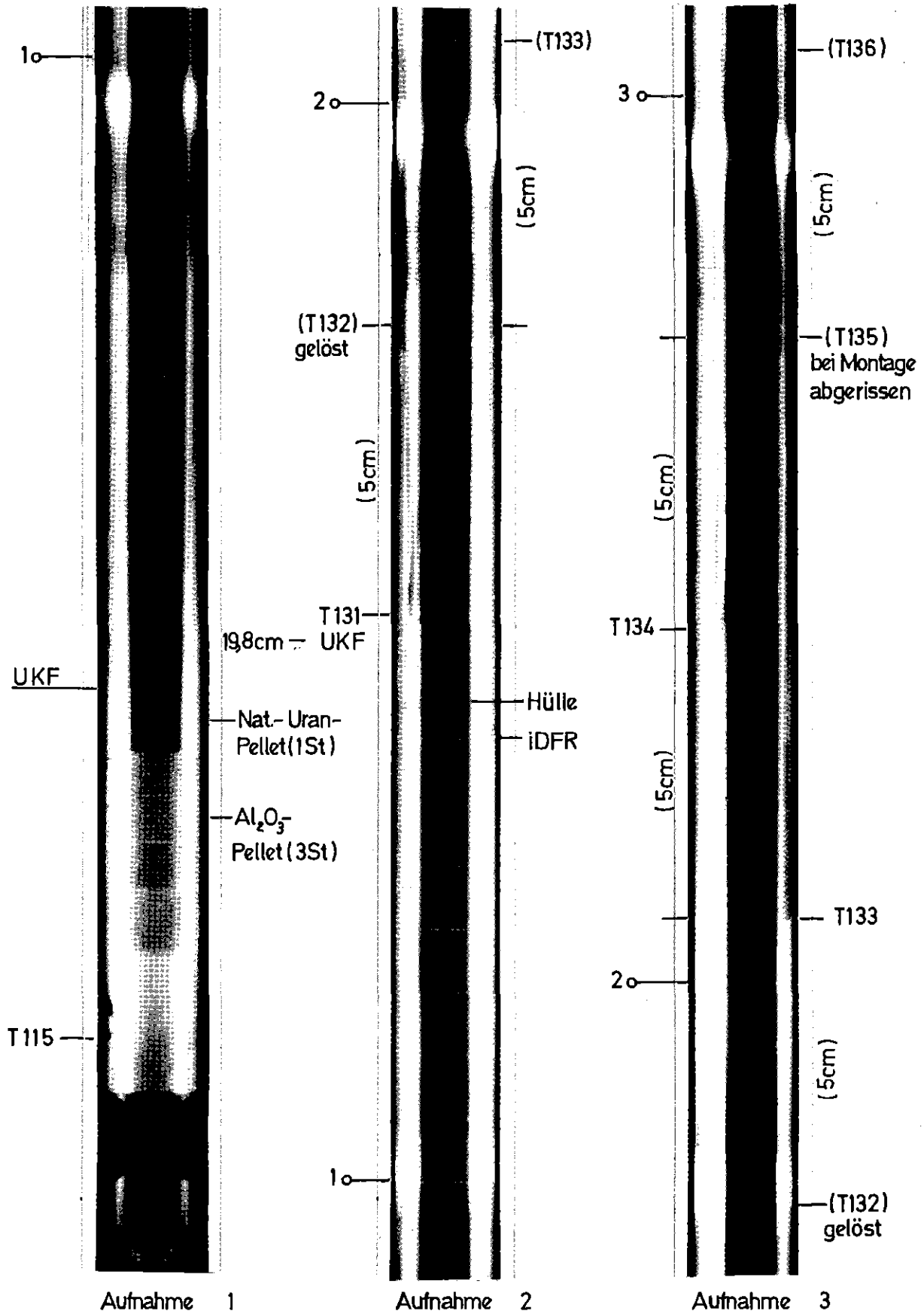
Abb.:17



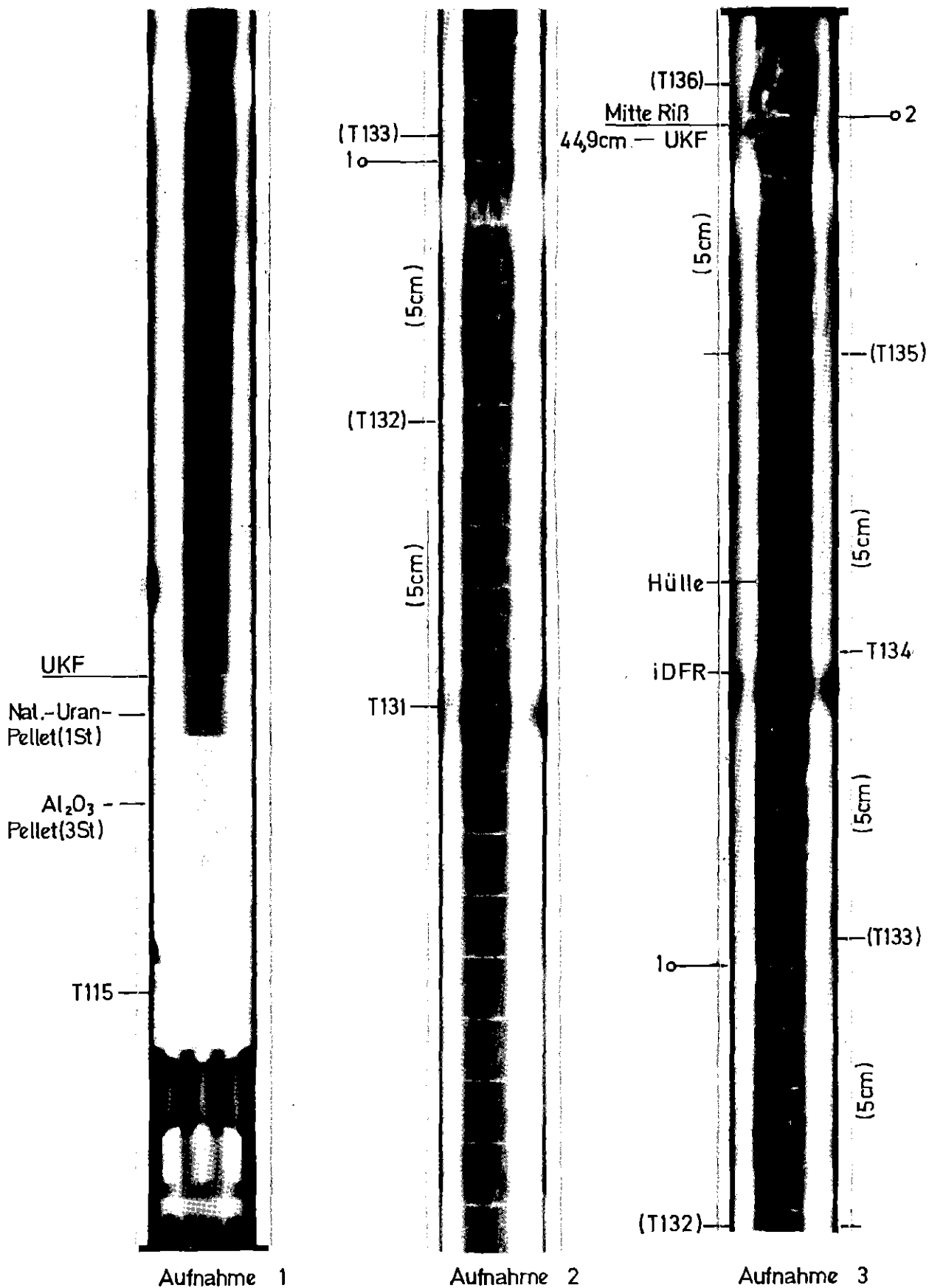
Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900°C (Transiente) **Abb.: 18**



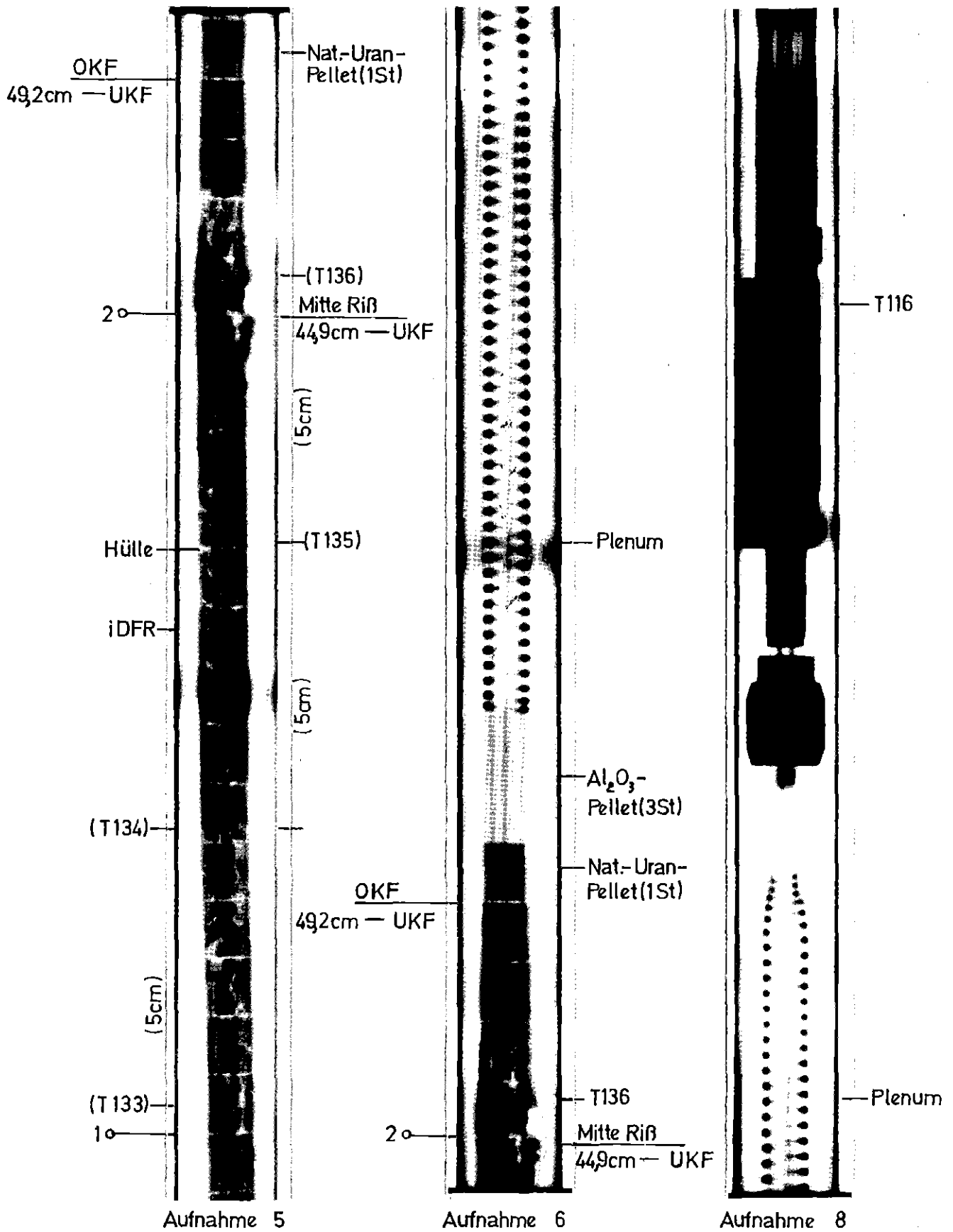
## FR2 In-Pile Single Rod Test in Steam Burst Temperature vs. Burst Pressure



**KfK**  
IT-80  
PNS4237-512



KIK  
IT-80  
PNS4237-437

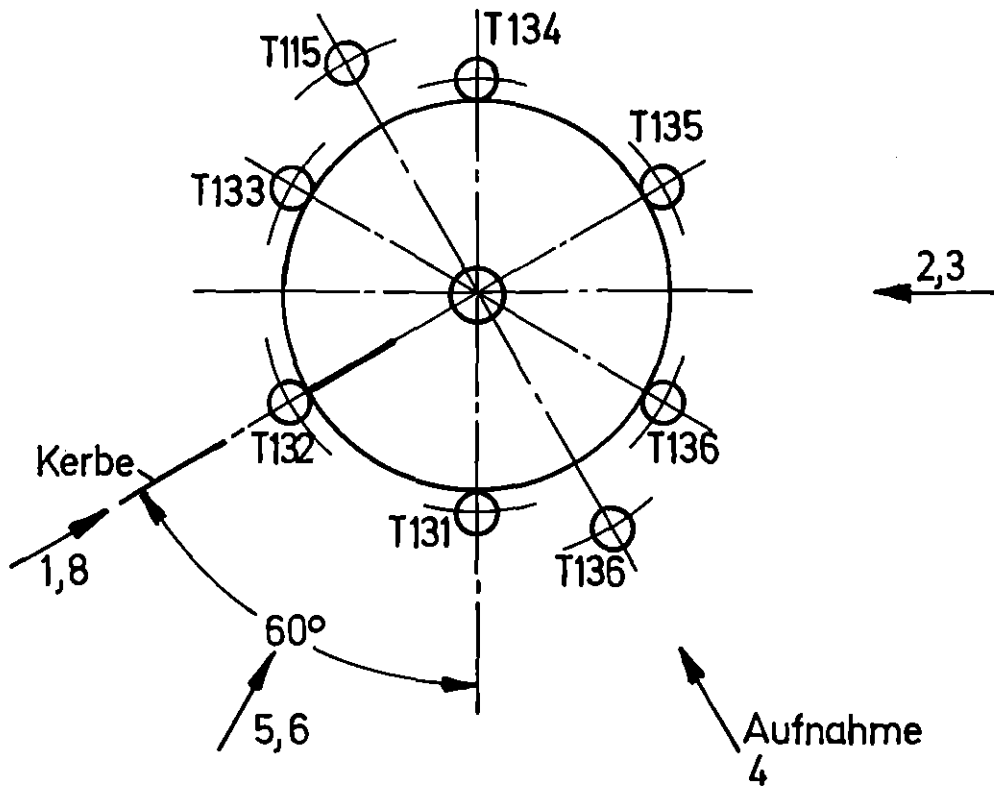


KIK IT-80  
PNS4237-438

FR2 In-pile Versuche. G2.1  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl. 2  
Abb.:21.2





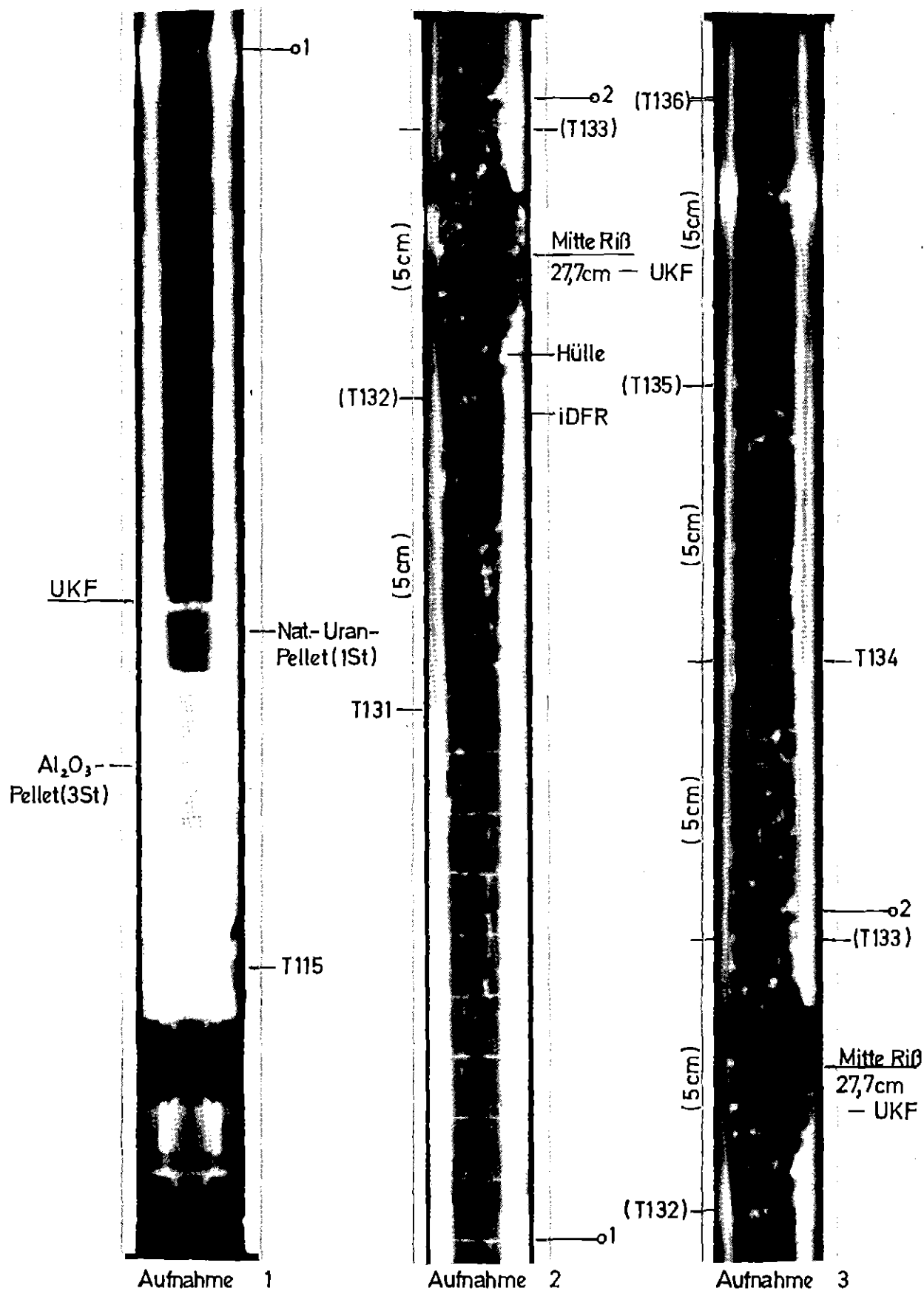
Ansicht von oben

**KJK** IT-80  
PNS4237-476.24

## FR 2 In-Pile Versuche. G2.1

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

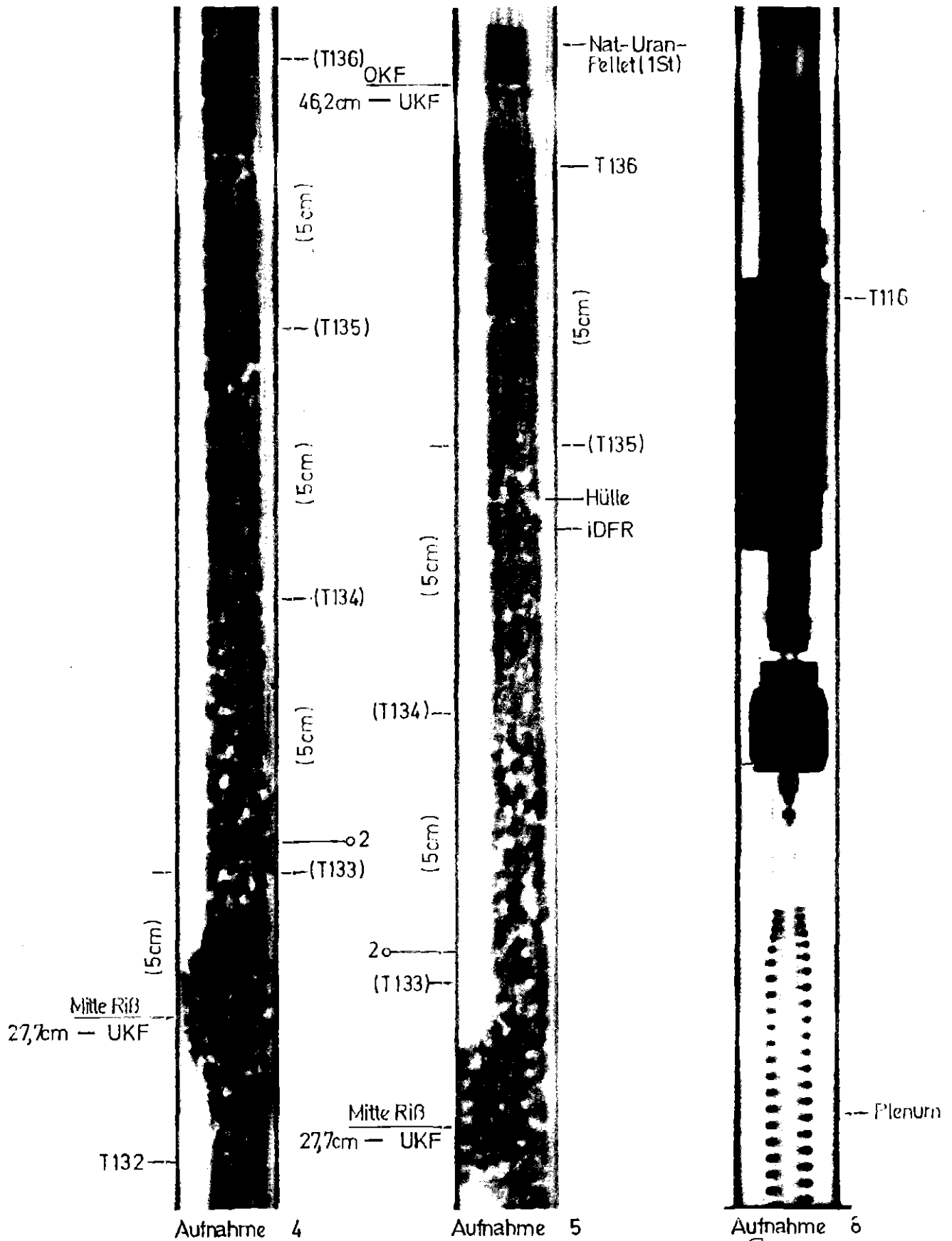
Abb.: 21.3



KIK  
IT-80  
PNS4237-439

FR2 In-pile Versuche. G 2.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

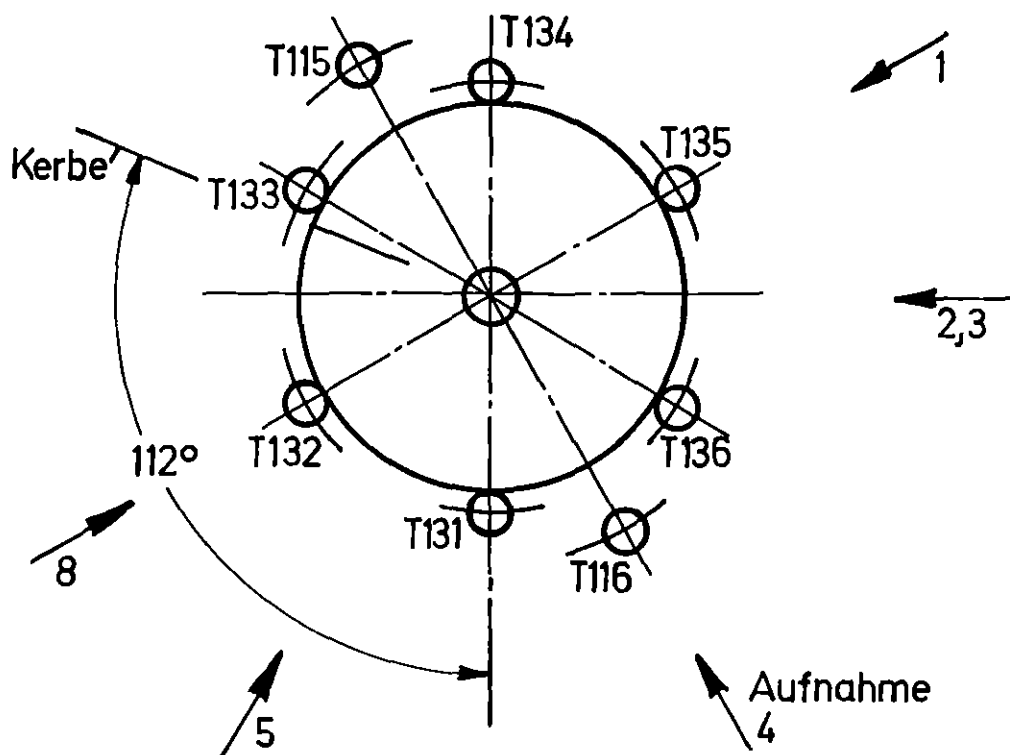
Bl.1  
Abb:22.1



KIK  
IT-80  
PNS4237-440

FR2 In-pile Versuche. G2.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb.: 22.2



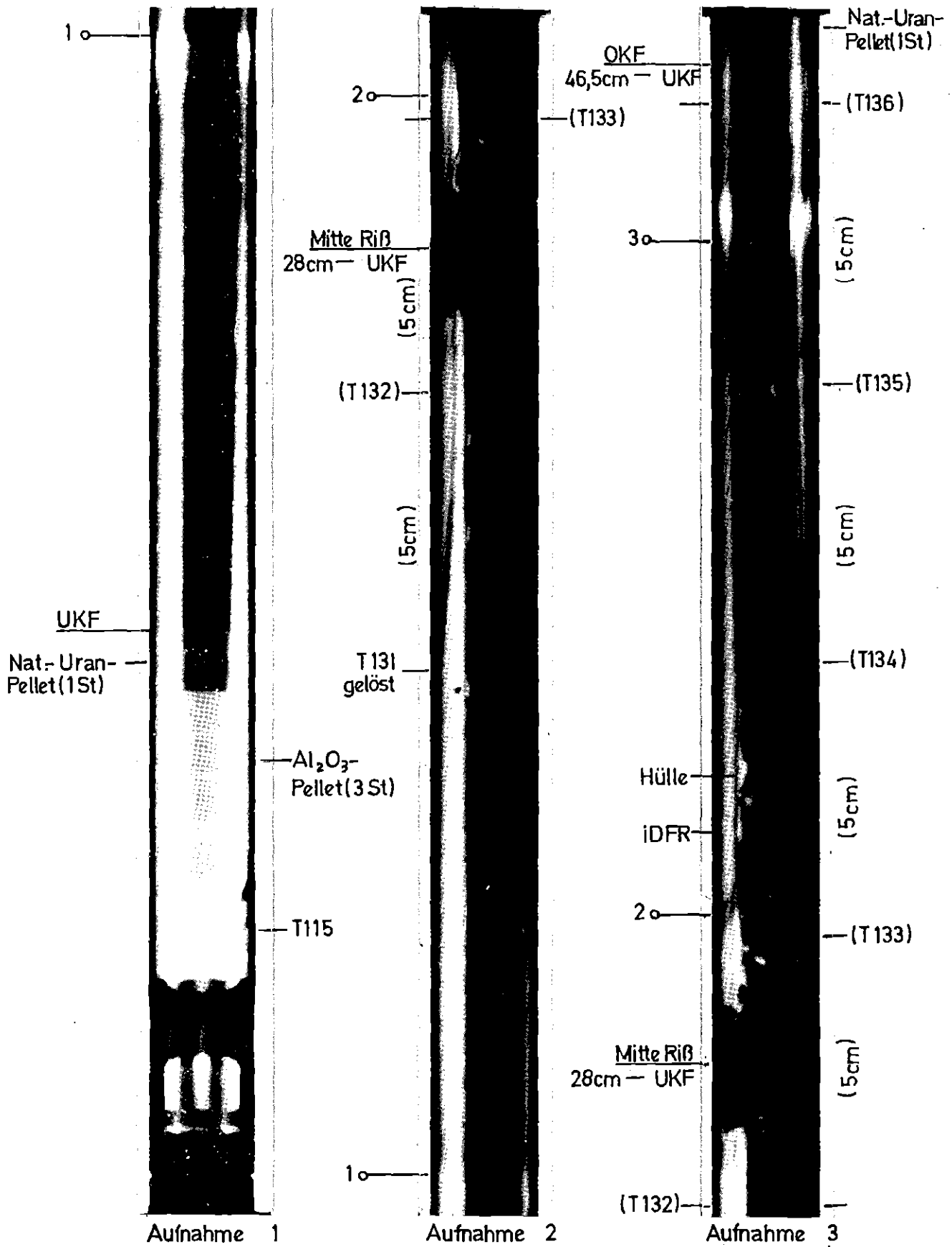
Ansicht von oben

**KfK** IT-80  
PNS4237-476.25

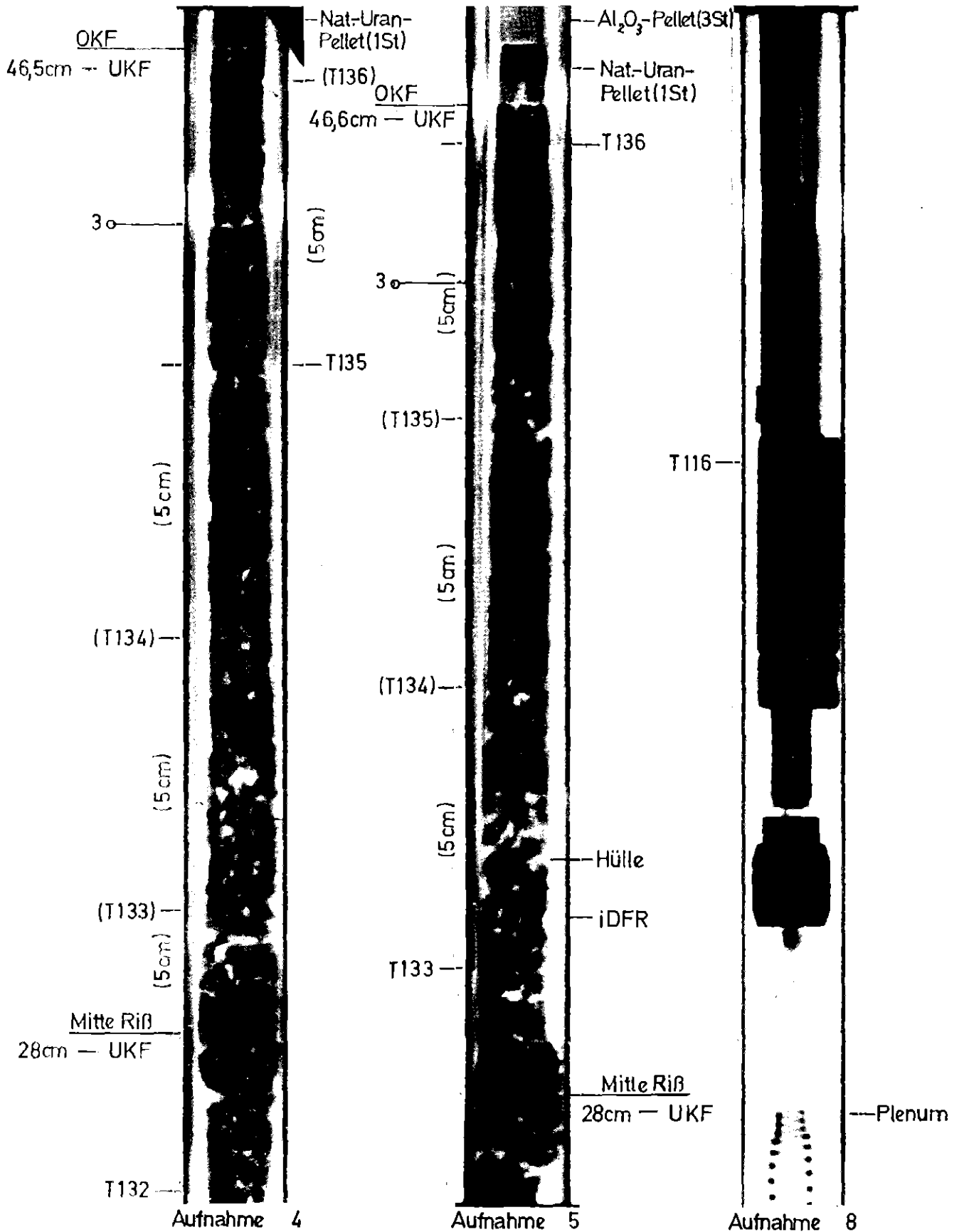
## FR 2 In-Pile Versuche. G2.2

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

Abb.:22.3



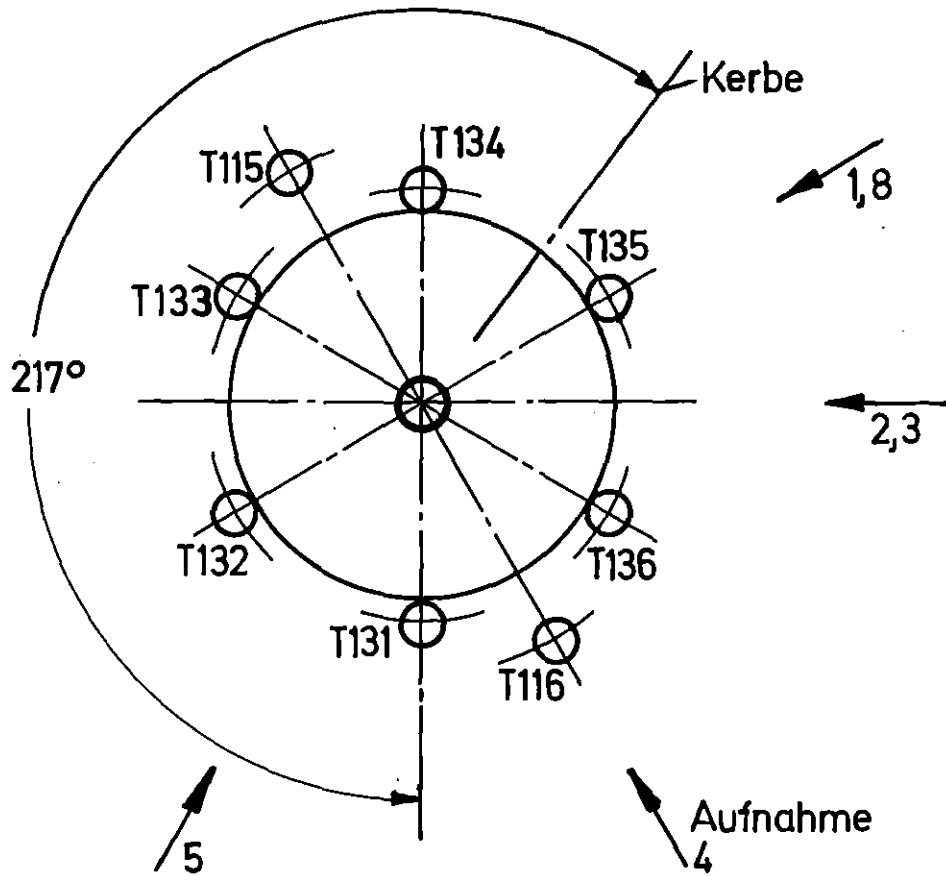
KIK  
IT-80  
PNS4237-441



**KIK**  
IT-80  
PNS 4237-442

FR2 In-pile Versuche. G3.1  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb: 23.2



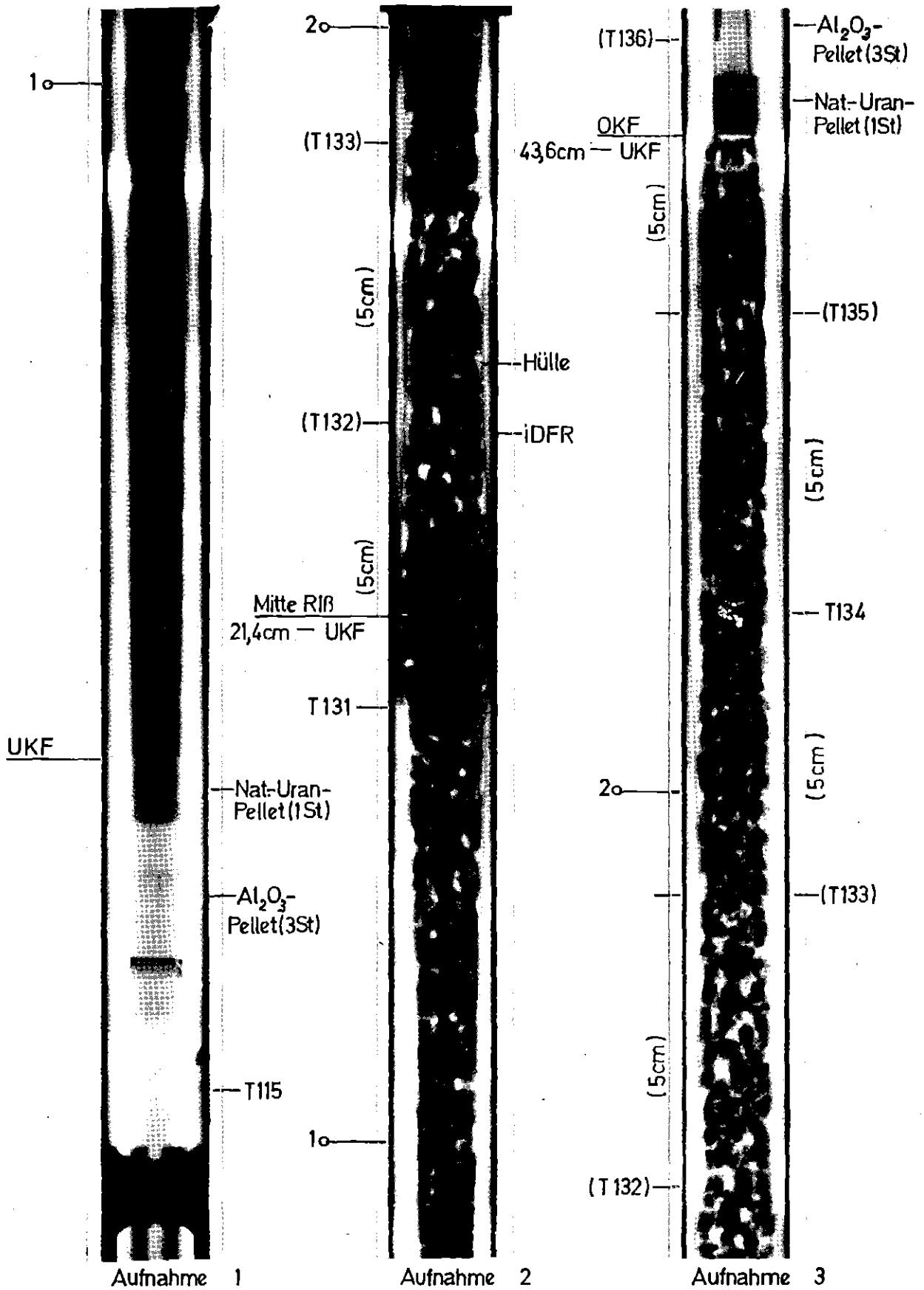
Ansicht von oben

**KfK** IT-80  
PNS4237-476.26

## FR 2 In-Pile Versuche. G 3.1

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

Abb: 23.3

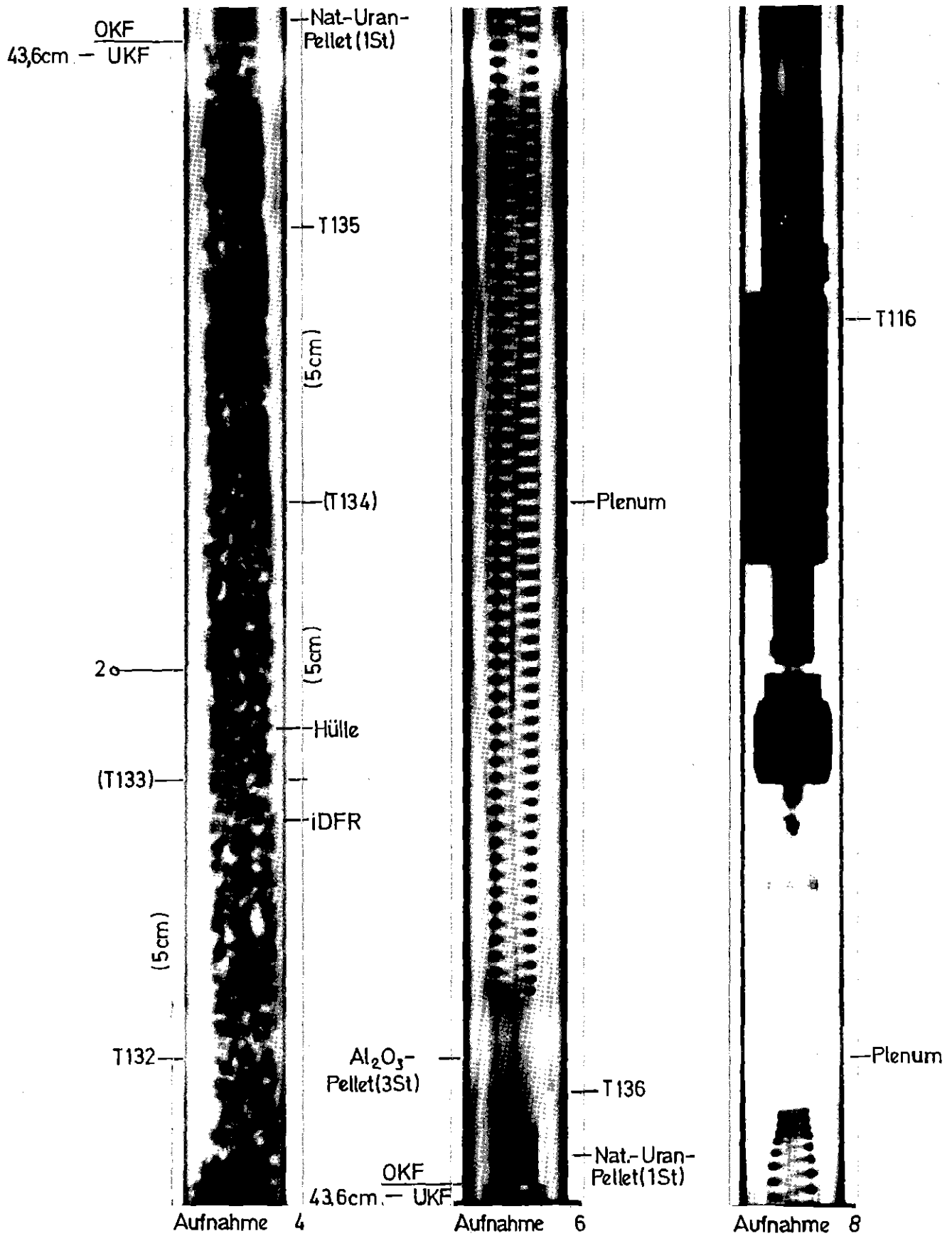


KIK  
IT-80  
PNS4237-443

FR2 In-pile Versuche. G 3.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.1  
Abb.: 24.1

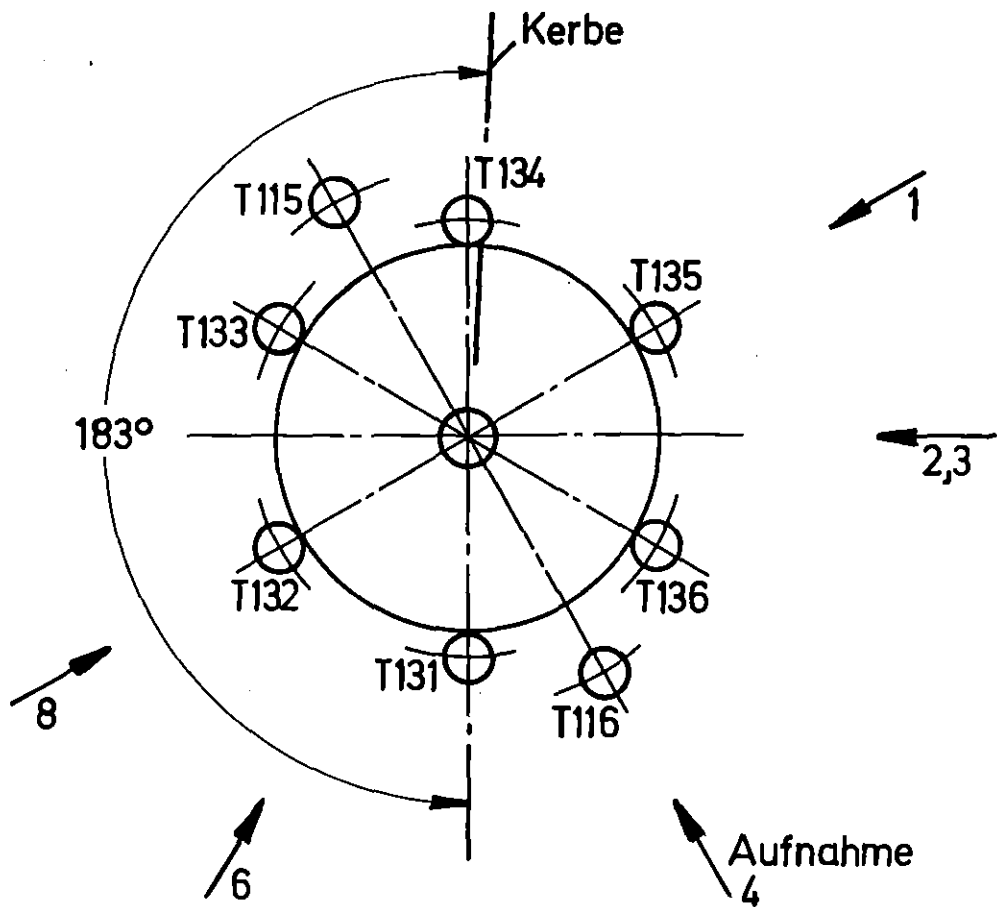




KIK  
IT-80  
PNS4237-444

FR2 In-pile Versuche. G3.2  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb.:24.2



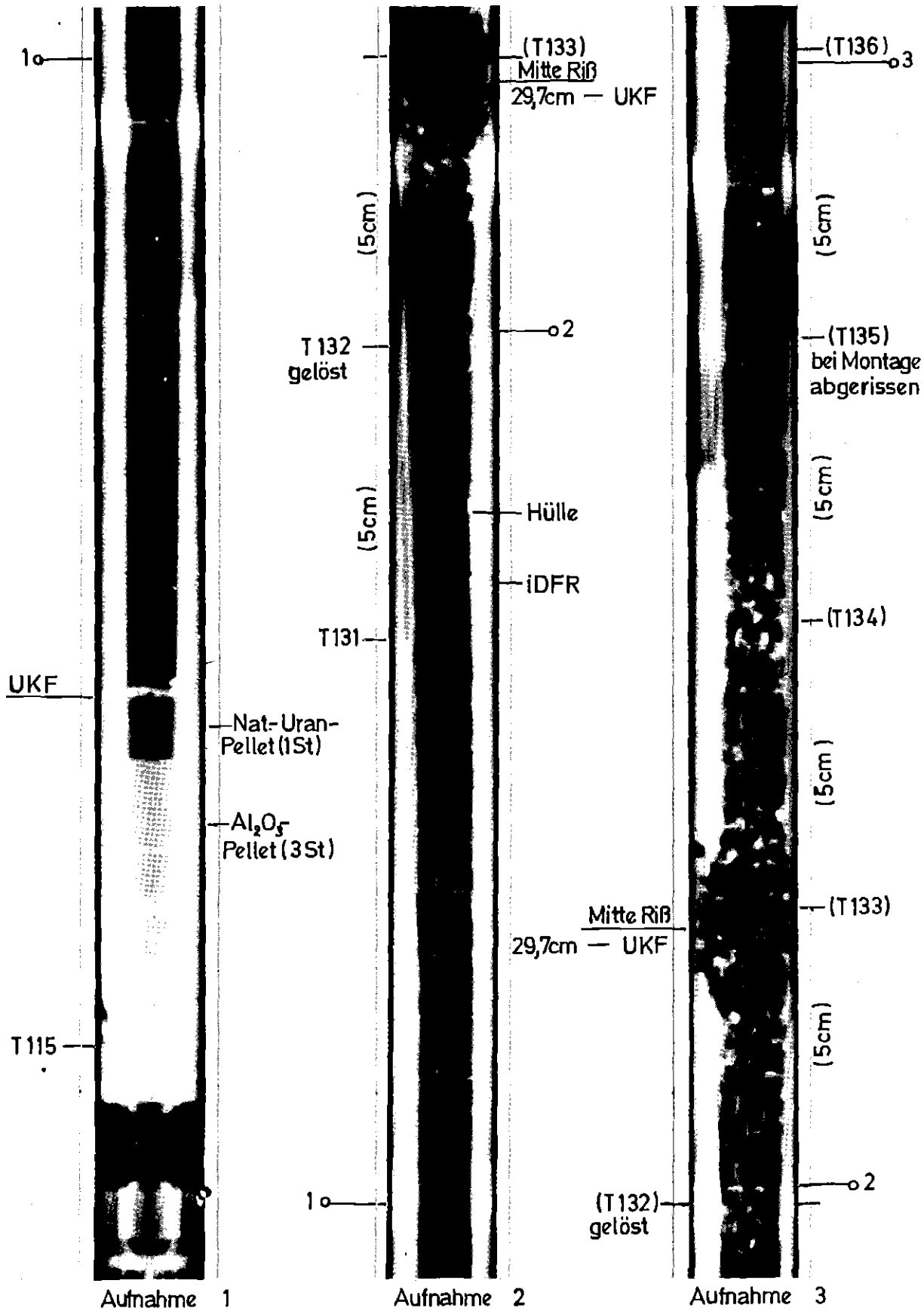
Ansicht von oben

**KfK** IT-80  
PNS4237-476.27

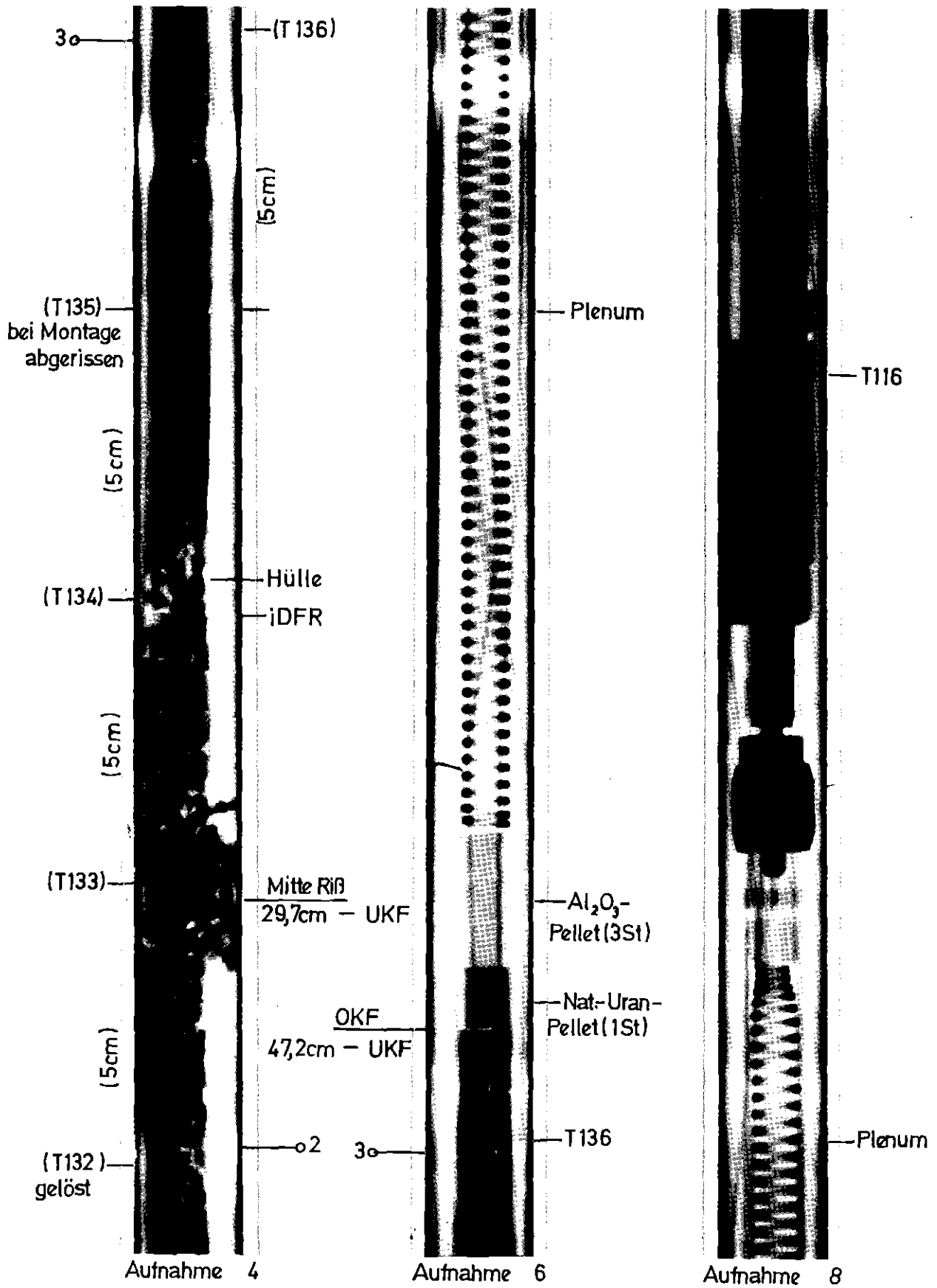
## FR 2 In-Pile Versuche. G 3.2

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

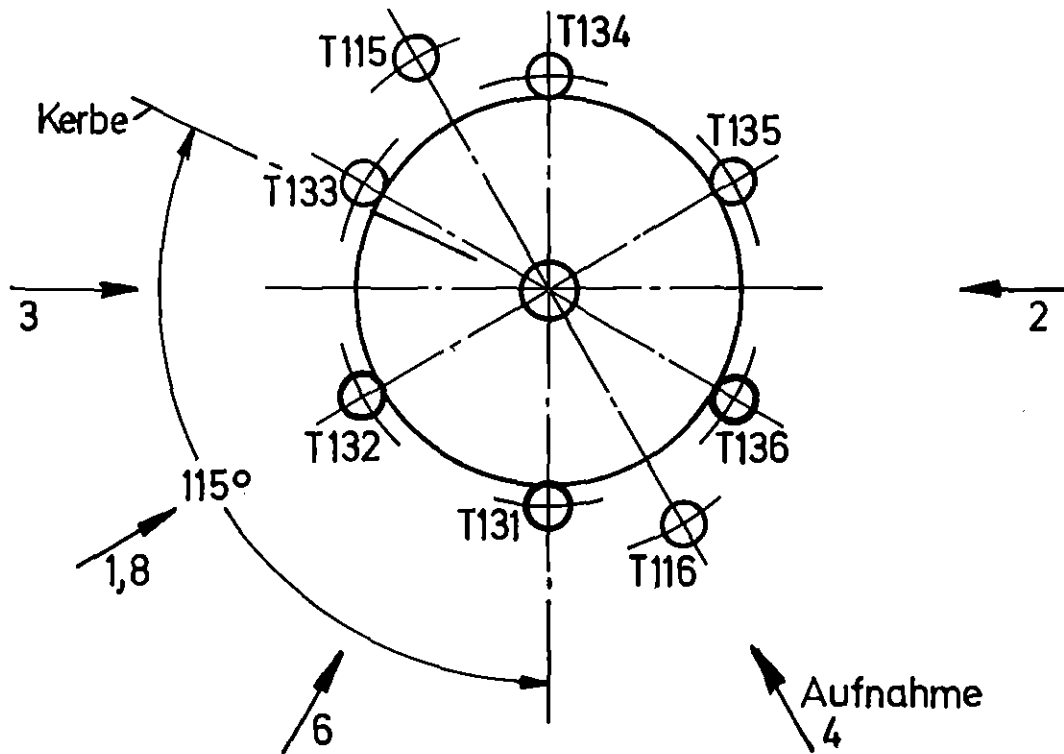
Abb.: 24.3



**KfK**  
IT-80  
PNS4237-445



KIK T-80  
PNS4237-446



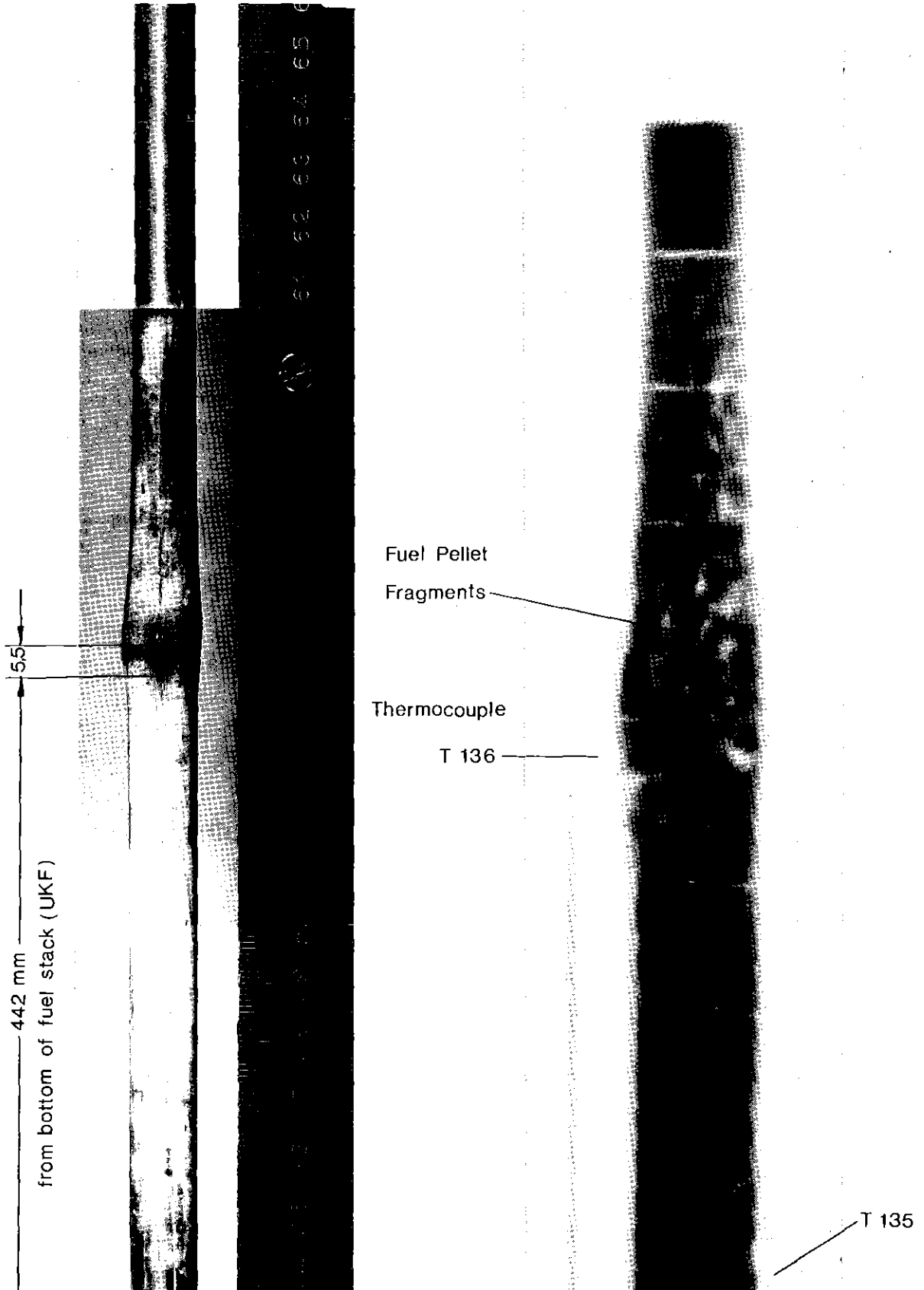
Ansicht von oben

**KIK**  
IT-80  
PNS4237-476.28

## FR 2 In-Pile Versuche. G3.3

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

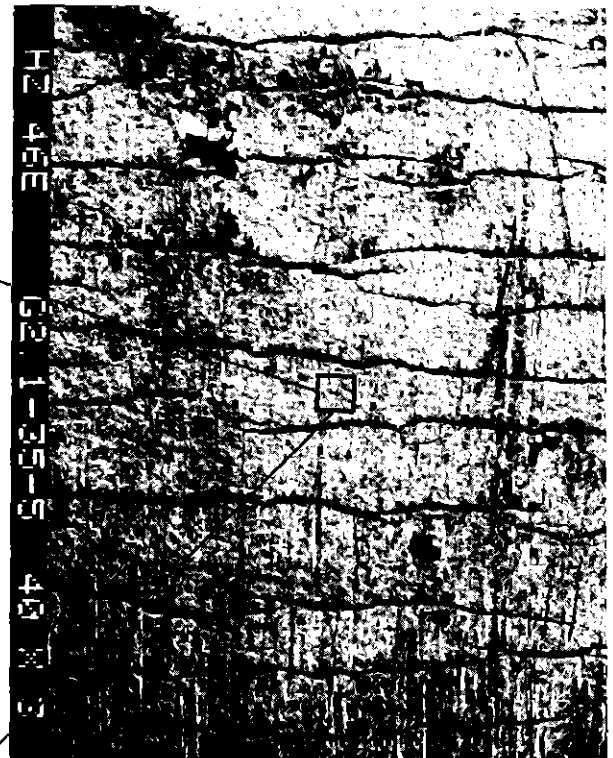
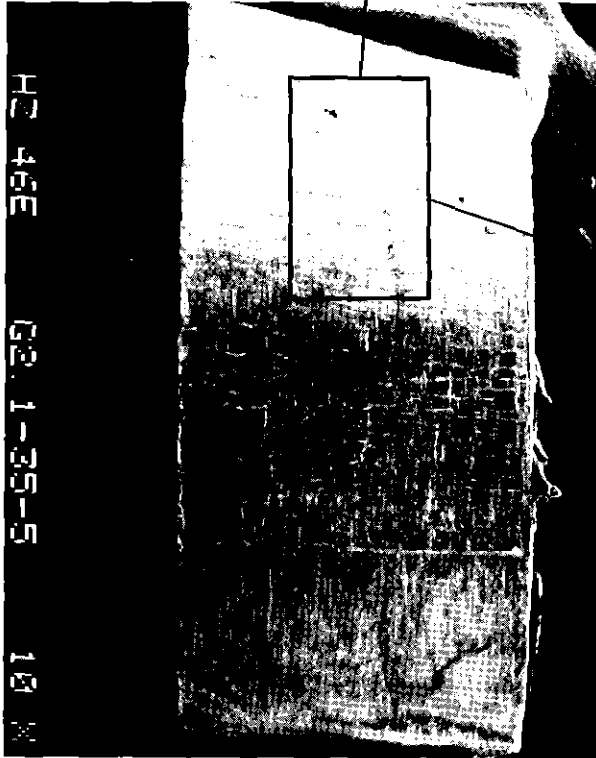
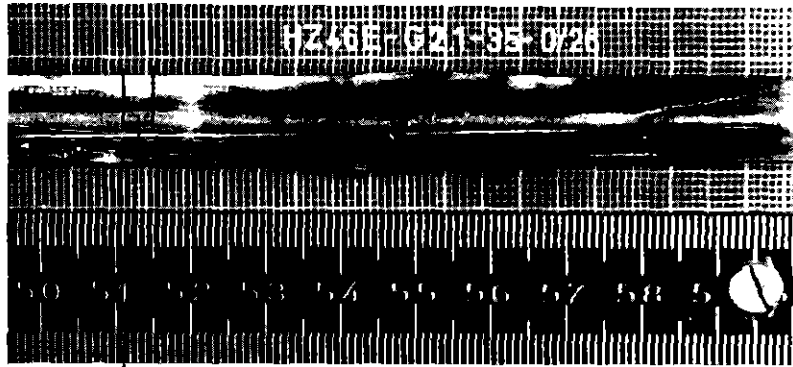
Abb.: 25.3



IT 1980  
PNS 4237-448

# FR2 In-Pile Tests. Test G2.1

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone  
Abb.: 26.1



$T_B = 869\text{ }^\circ\text{C}$   
 $P_B = 37\text{ bar}$   
Nominal Burnup  
35 000 MWd/t

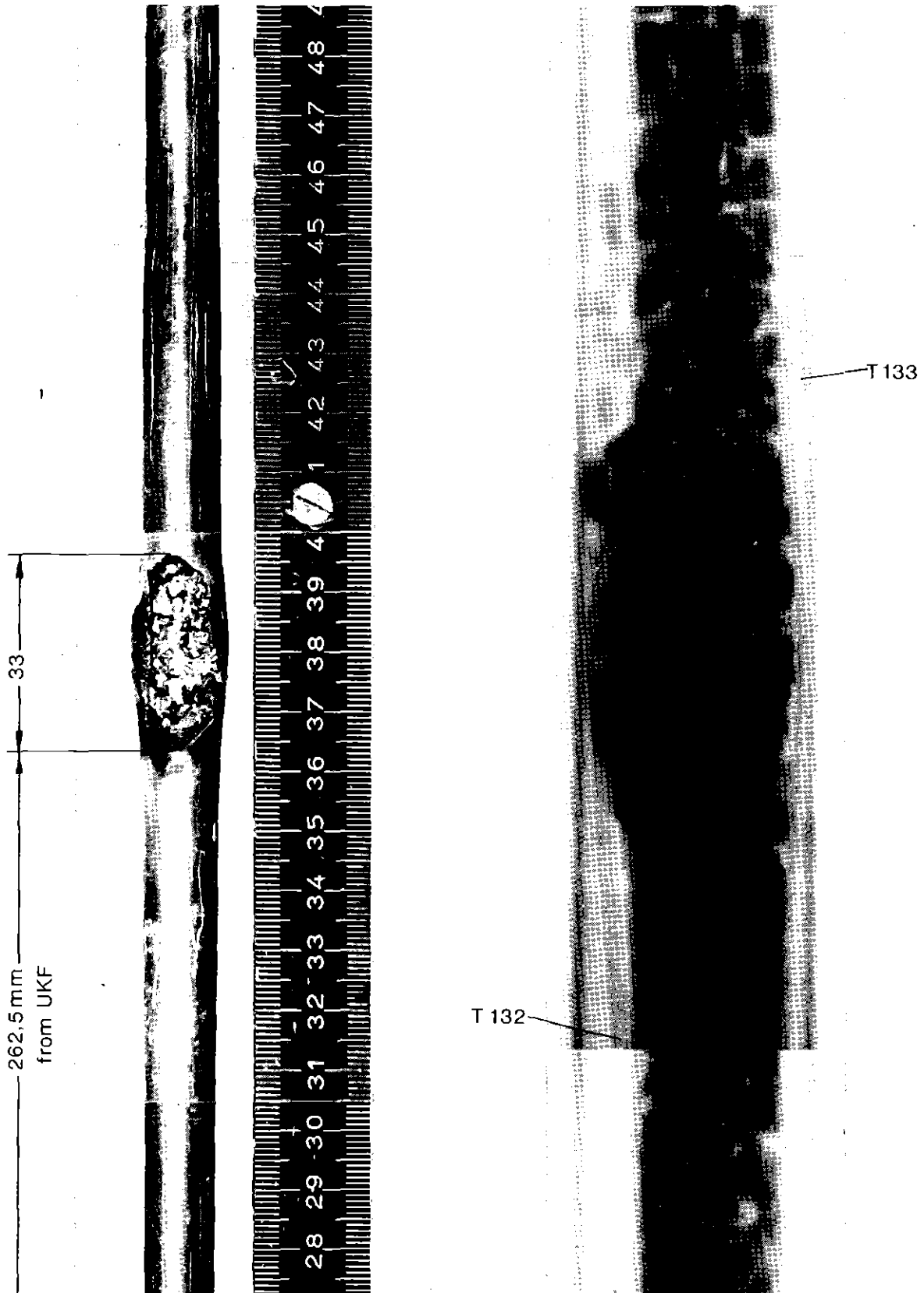


IT 1980  
PNS 4237-464

FR2 In-Pile Tests. Test G2.1

Oxidation of the Zry Cladding

Abb.: 26.2

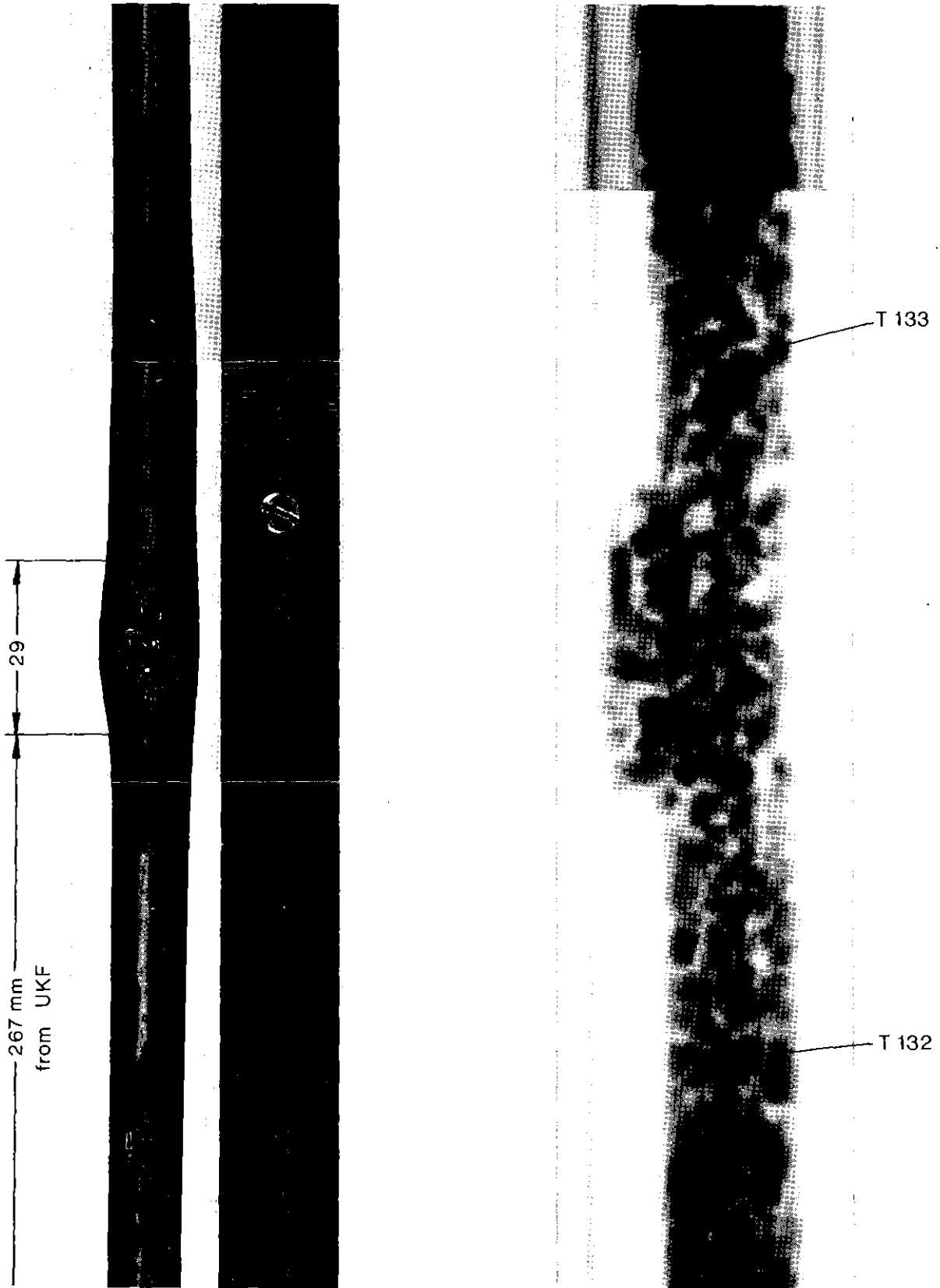


IT 1980  
PNS 4237-449

# FR2 In-Pile Tests. Test G 2.2

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone  
Abb.:27

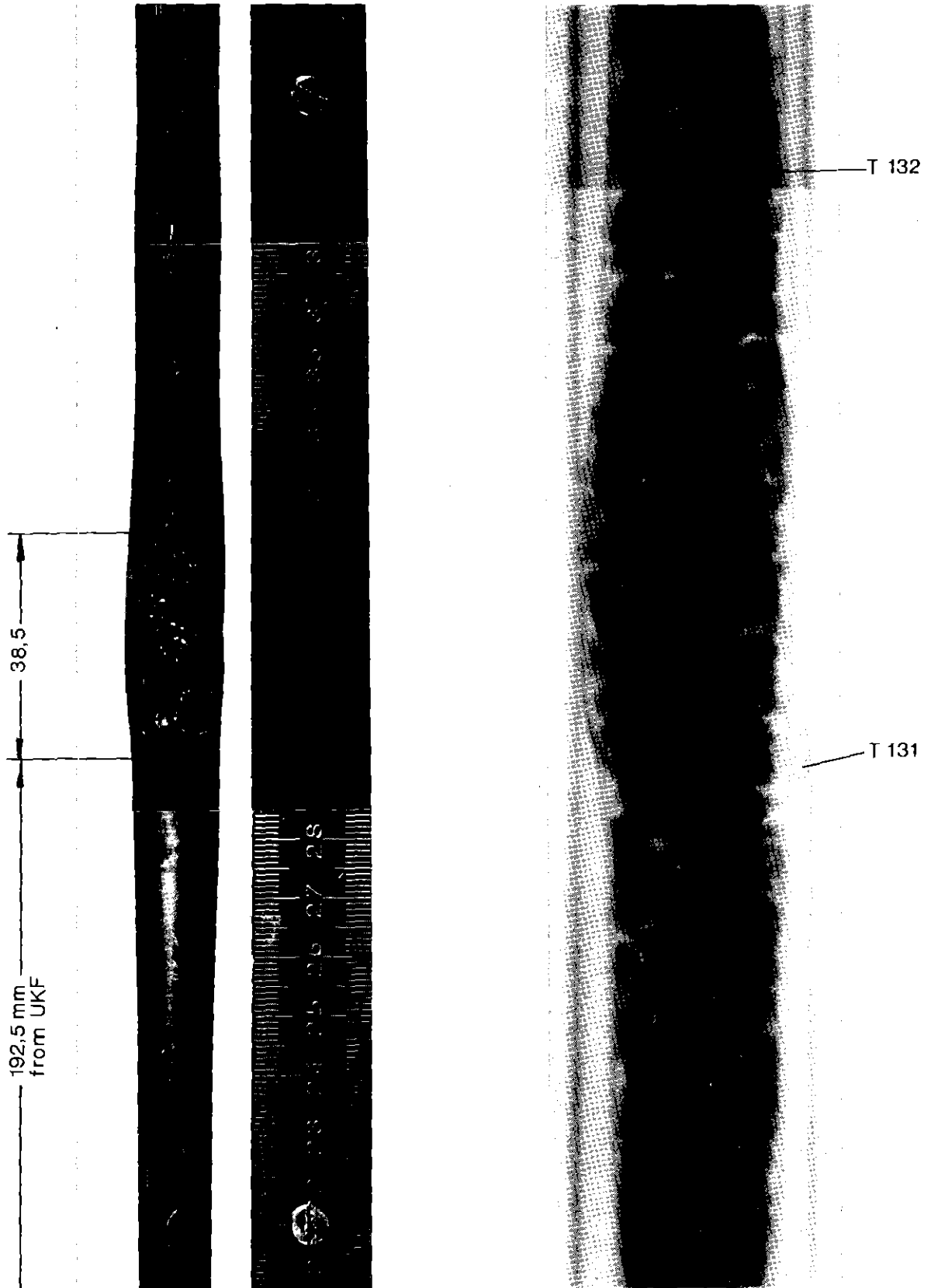




IT 1980  
PNS 4237-450

FR2 In-Pile Tests. Test G 3.1

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone  
Abb:28



FR2 In-Pile Tests.

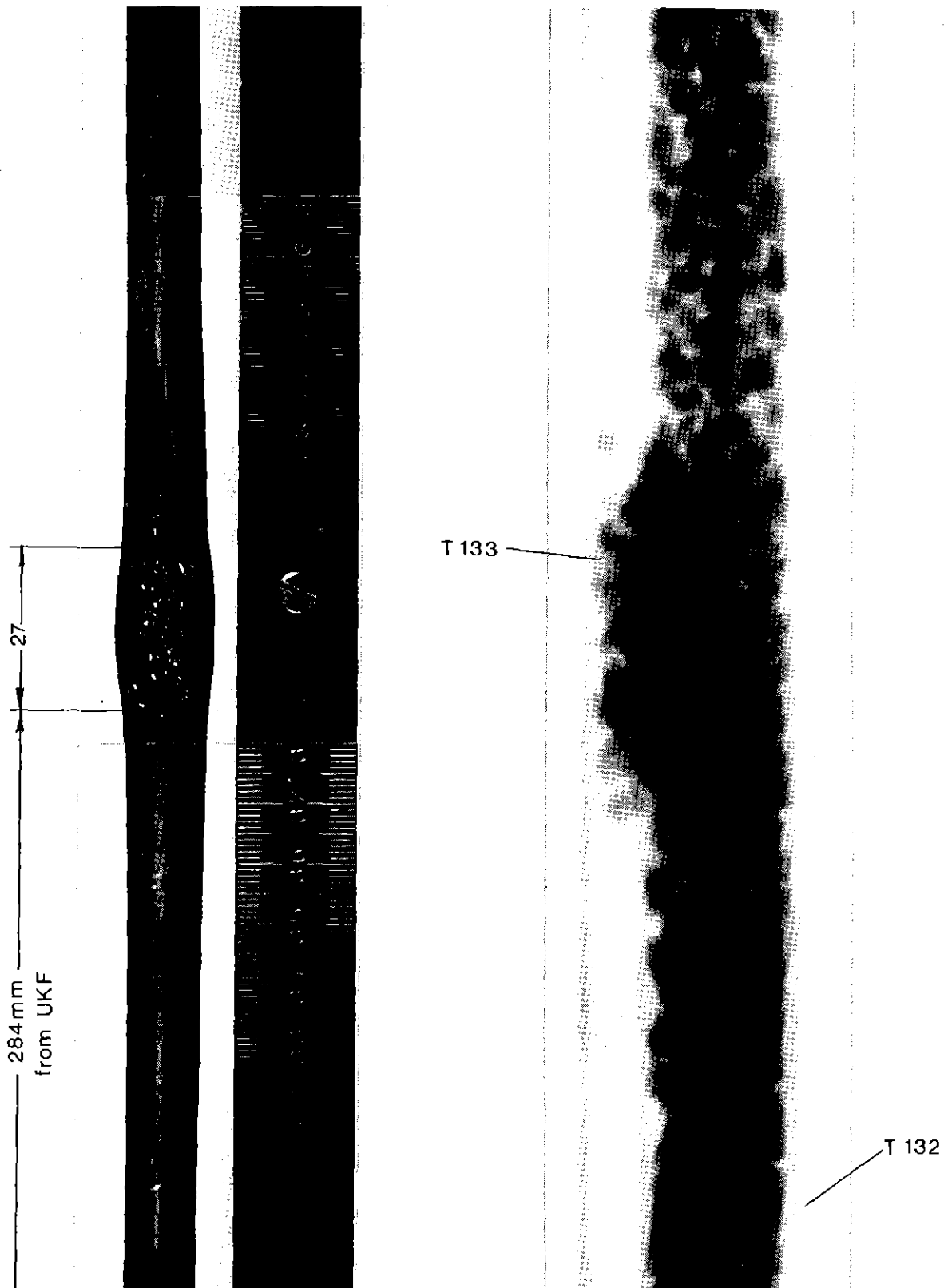
Test G 3.2



IT 1980  
PNS 4237-451

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone

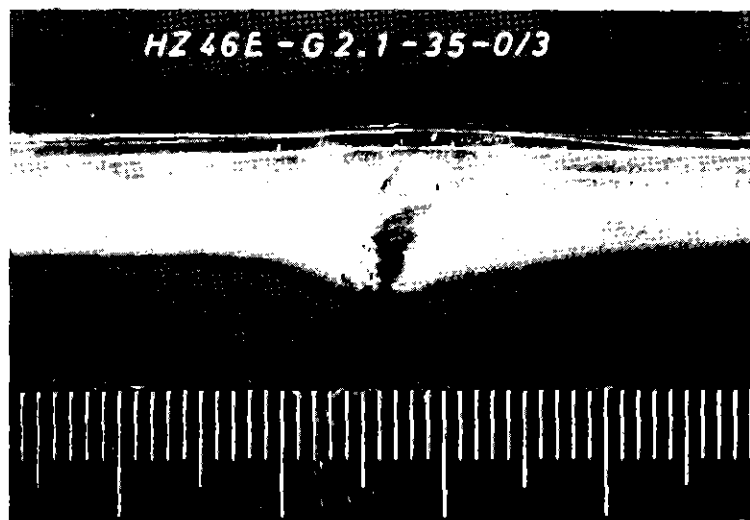
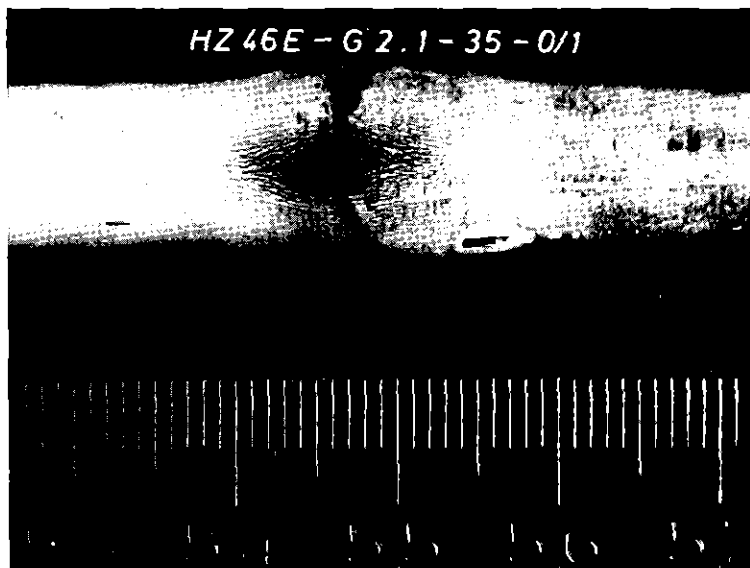
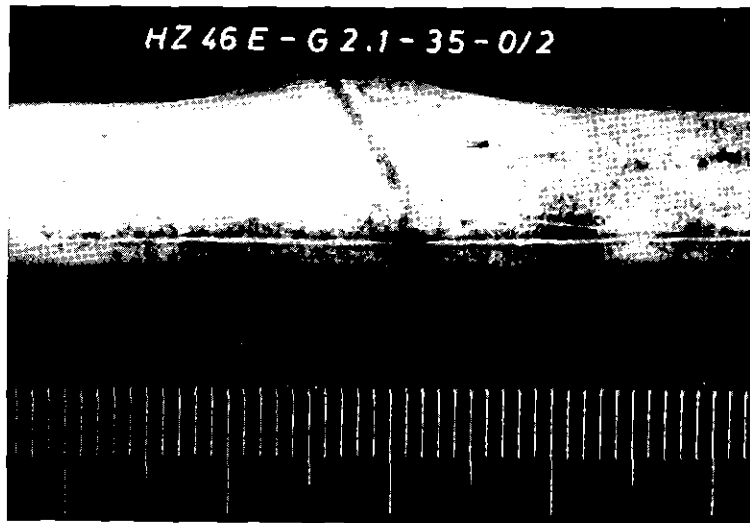
Abb.: 29



IT 1980  
PNS 4237-452

FR2 In-Pile Tests. Test G3.3

View and X-Ray Photograph of the Ruptured Zone  
Abb: 30



kfj

IT 1980  
PNS 4237-453

FR 2 In-Pile Tests. Test G2.1  
Views of the Ruptured Zone

Abb:31



IT 1980  
PNS 4237-454

FR 2 In-Pile Tests. Test G 2.2  
Views of the Ruptured Zone

Abb.: 32

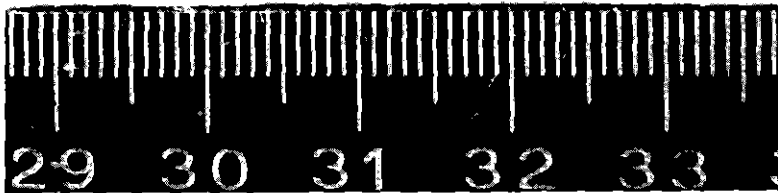


KfK

IT 1980  
PNS 4237-455

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.1  
Views of the Ruptured Zone

Abb.:33



kfk

IT 1980  
PNS 4237-456

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.2

Views of the Ruptured Zone

Abb.:34

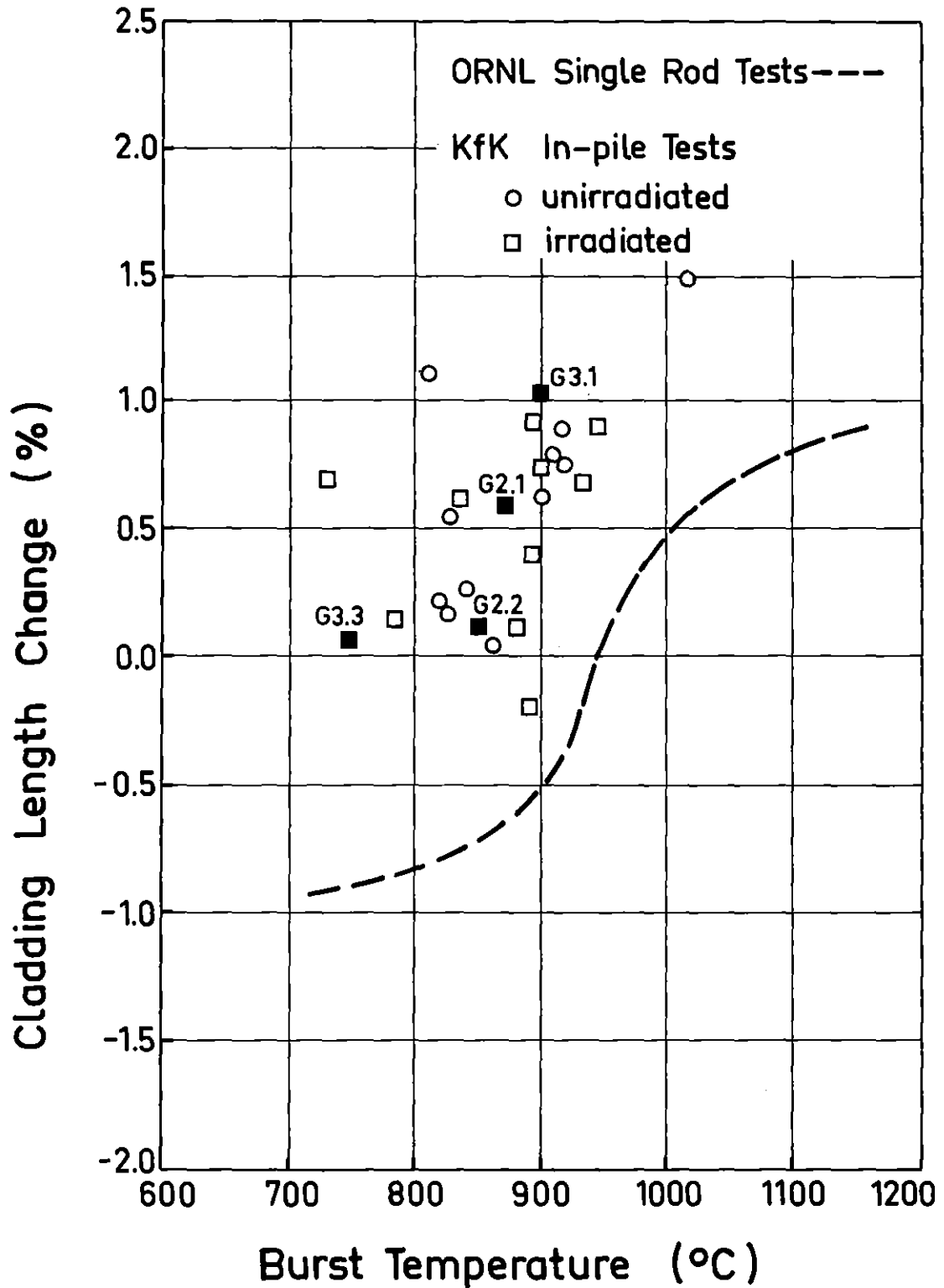


IT 1980  
PNS 4237-457

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.3  
Views of the Ruptured Zone

Abb:35

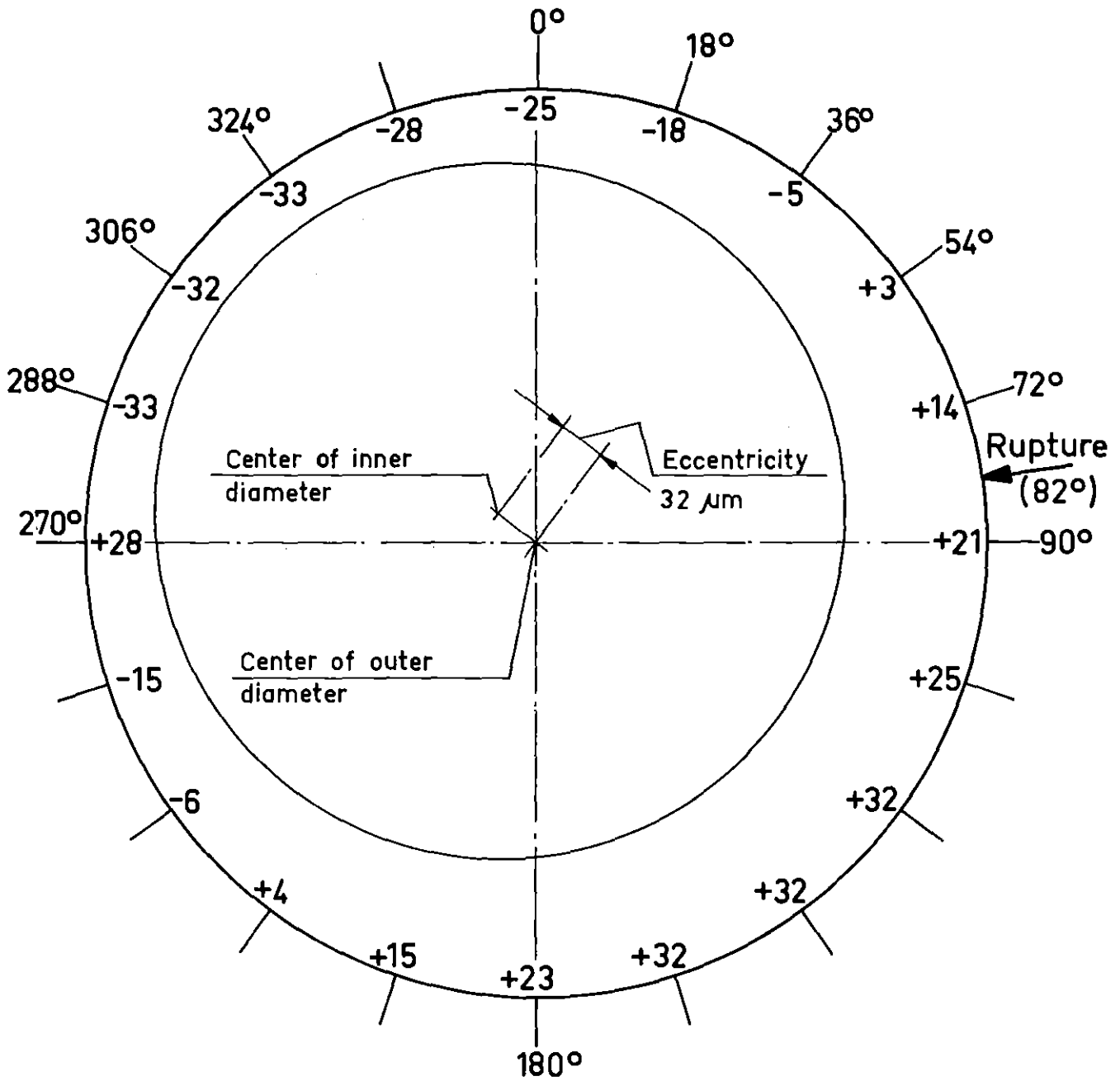




# FR2 In-Pile Tests

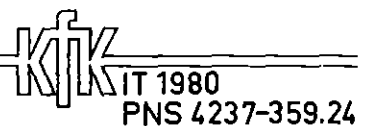
Cladding Length Change vs. Burst Temperature

Abb:36



Bottom view                      Measuring plane No.1  
   Measuring plane : 350 mm from UKF  
   Rupture midplane: 445 mm from UKF

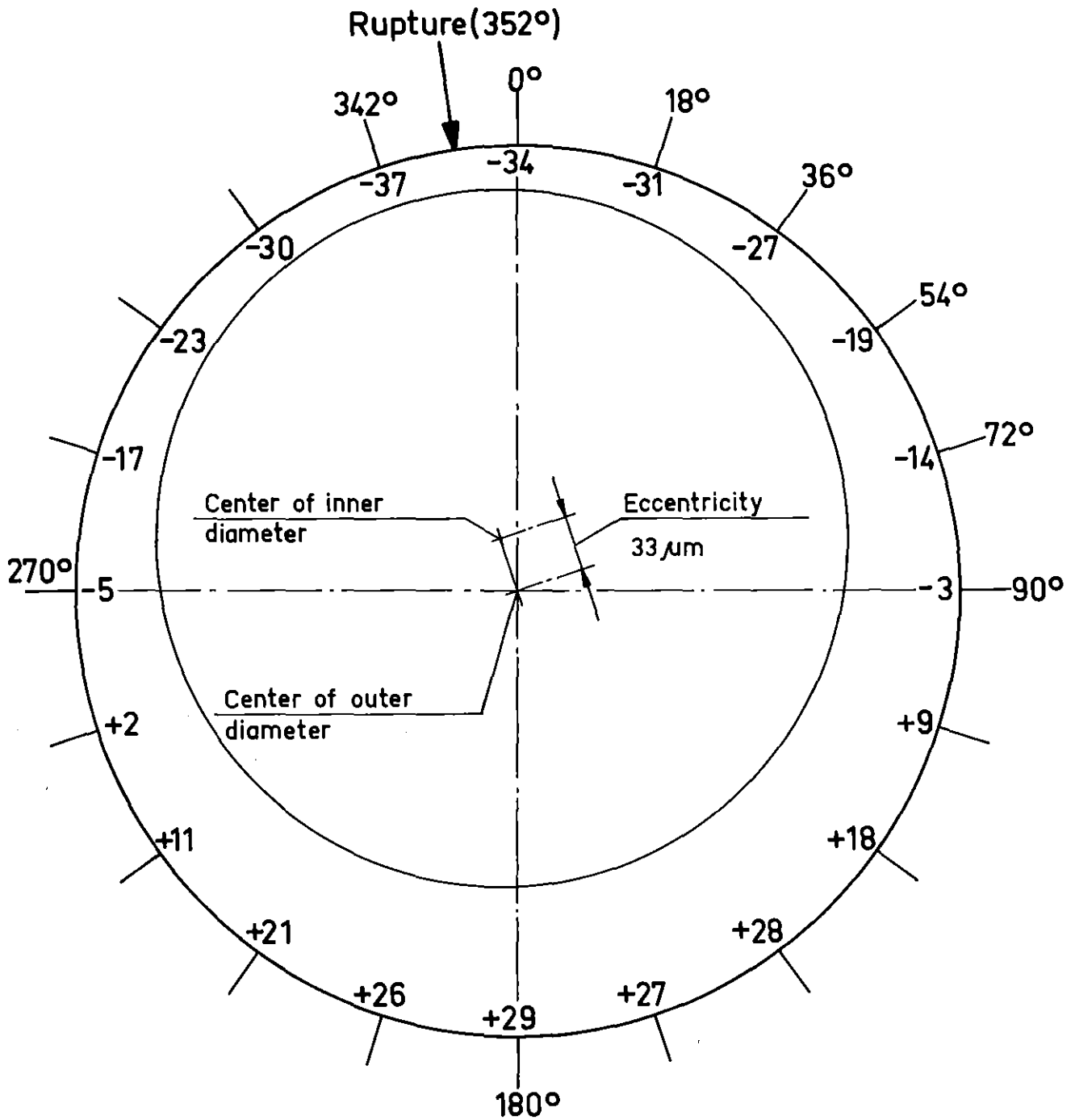
### TEST G 2.1; ROD 35



## FR 2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

Abb.:37.1



Bottom view

Measuring plane No. 6

Measuring plane : 275 mm from UKF

Rupture midplane: 279 mm from UKF

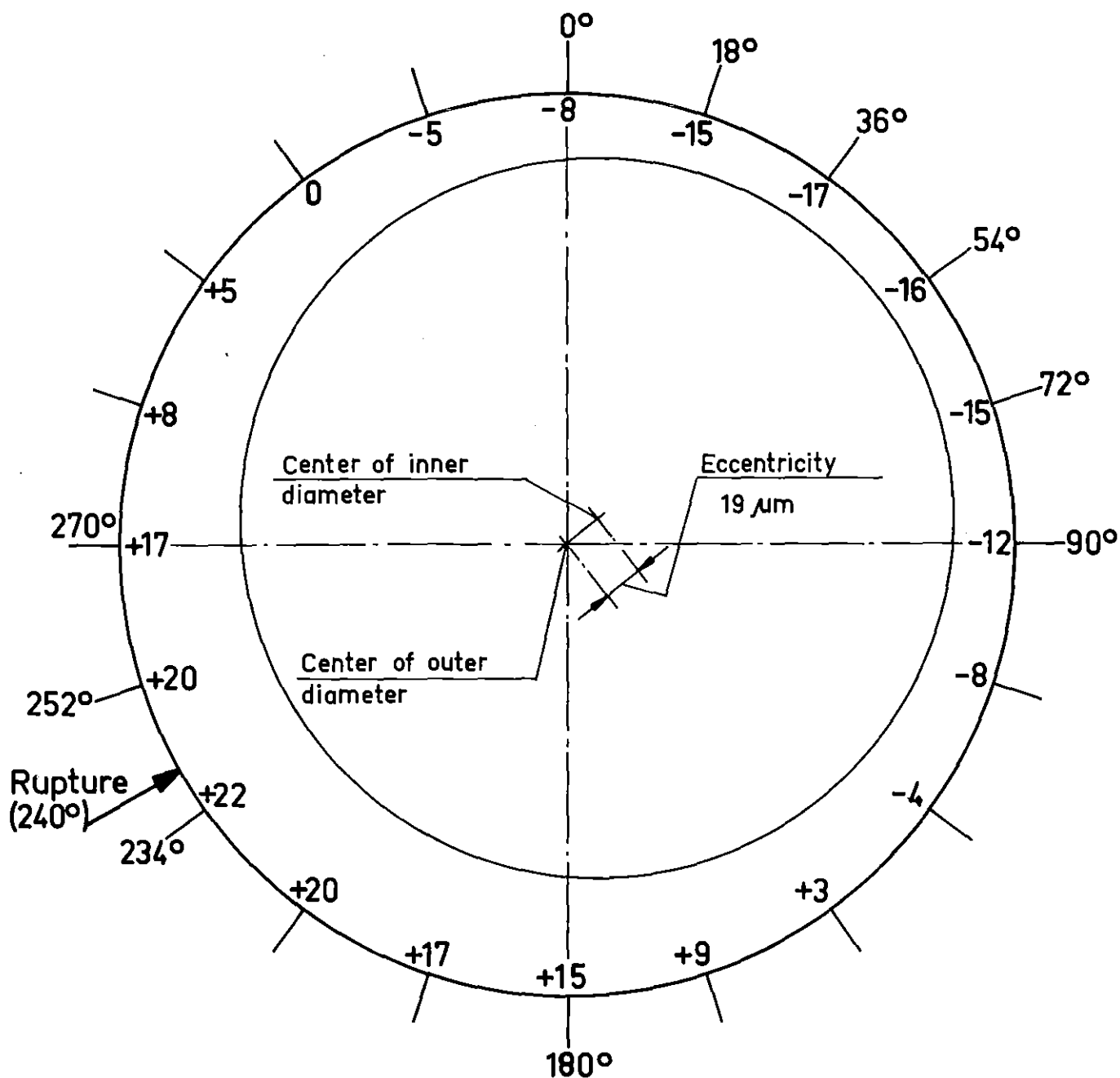
TEST G2.2; ROD 36

**KfK**  
KIT 1980  
PNS4237-359.25

## FR 2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

Abb:37.2



Bottom view

Measuring plane No. 6

Measuring plane : 275 mm from UKF

Rupture midplane: 281 mm from UKF

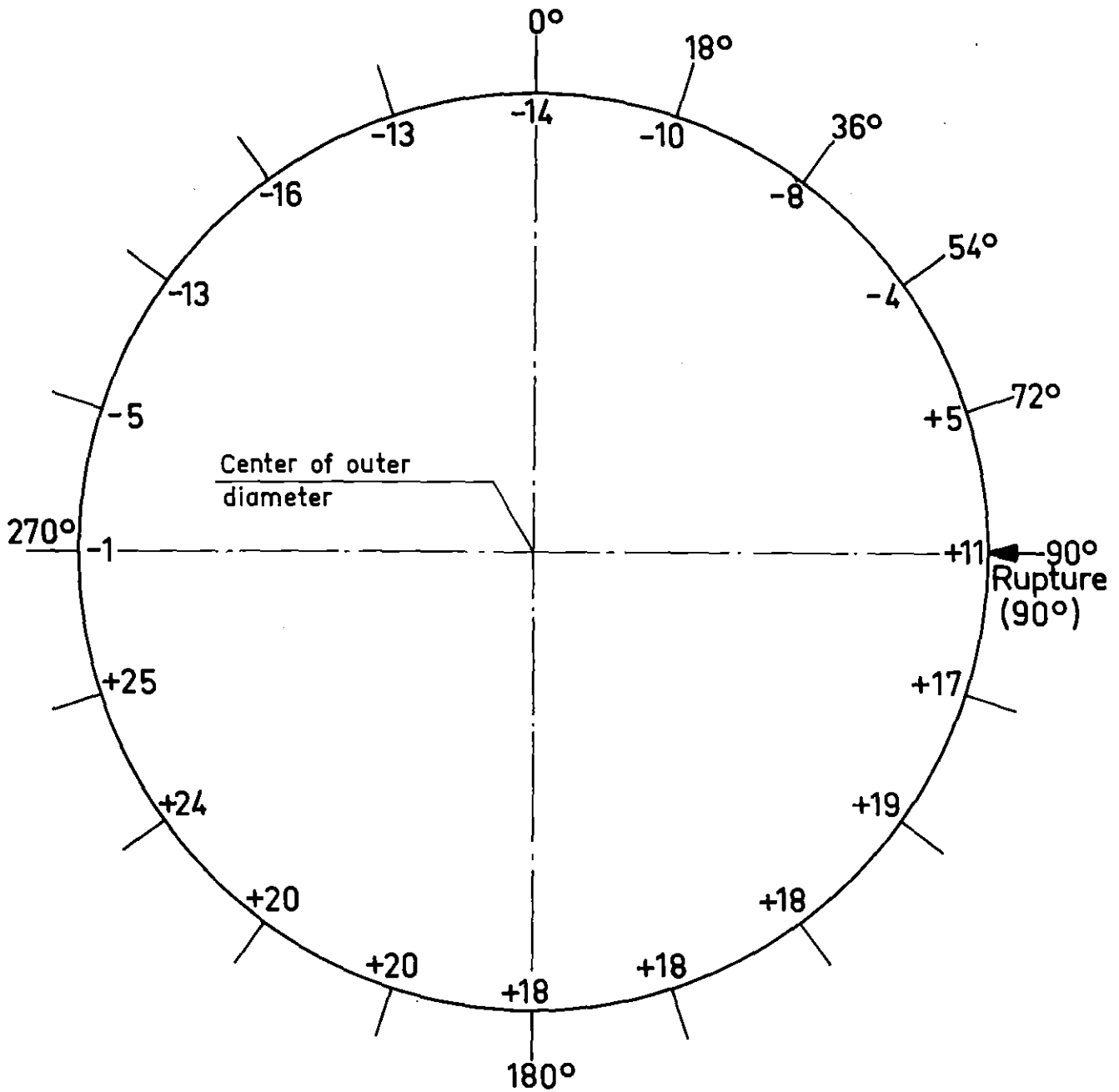
TEST G3.1; ROD 12

**KIK**  
IT 1980  
PNS 4237-359.26

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

Abb.:37.3



Meßfehler bei der Wandstärkenvermessung am Stab 11

Measuring plane No.10

Bottom view

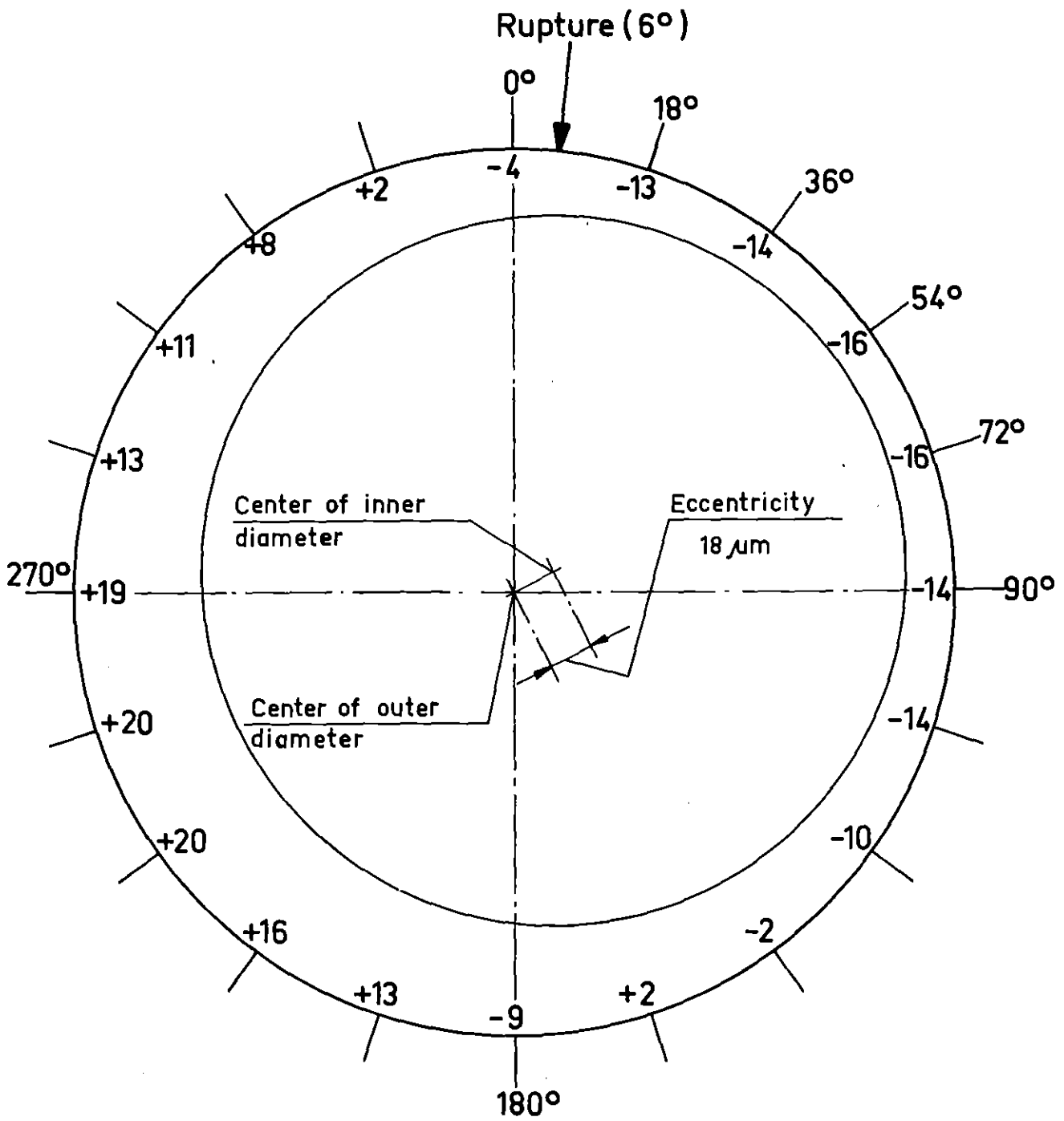
Measuring plane : 215 mm from UKF

Rupture midplane: 212 mm from UKF

TEST G3.2; ROD11

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm



Bottom view

Measuring plane No. 4

Measuring plane : 305 mm from UKF

Rupture midplane: 298 mm from UKF

TEST G3.3; ROD 10

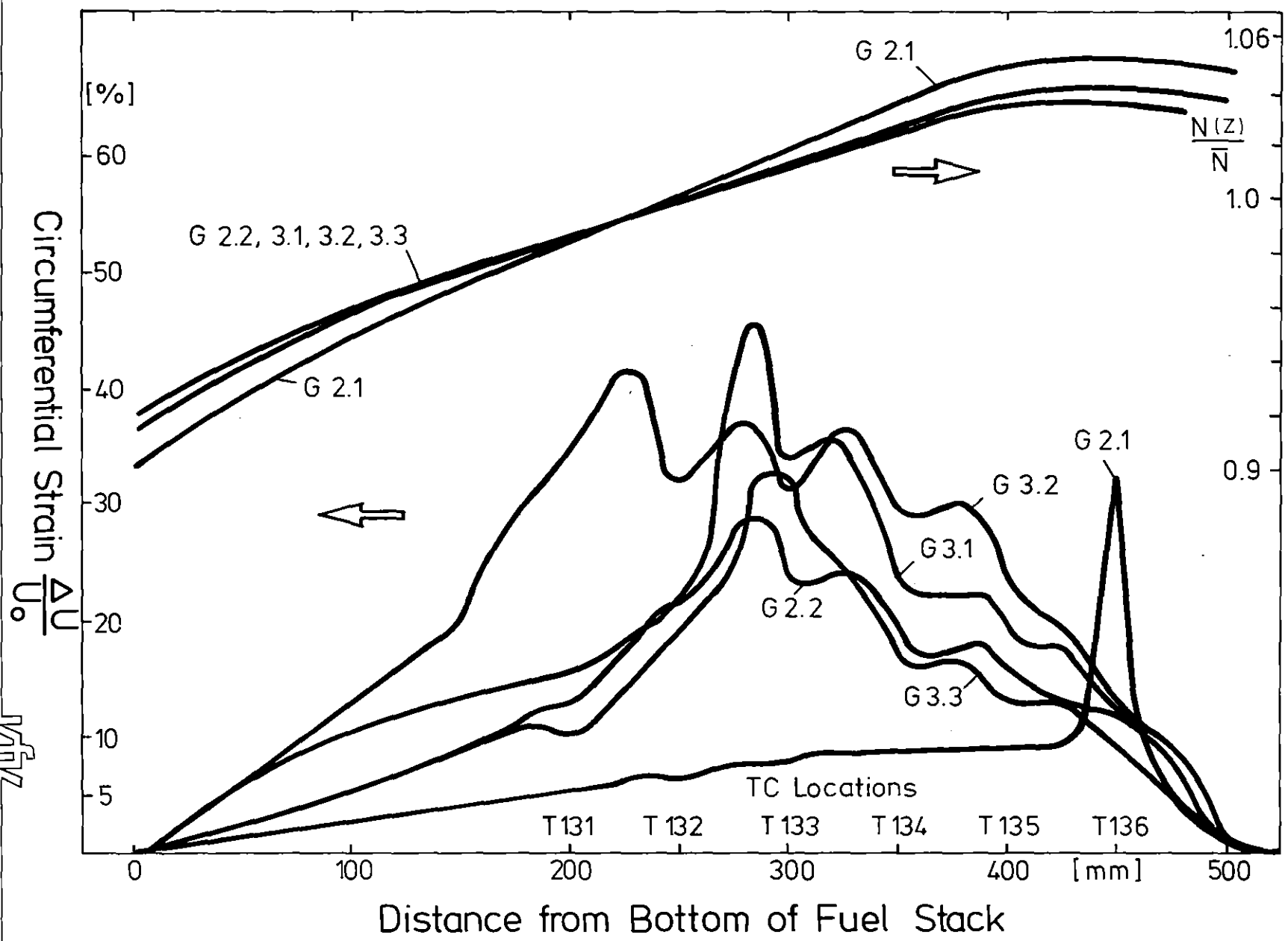


IT 1980  
PNS 4237-359.28

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm

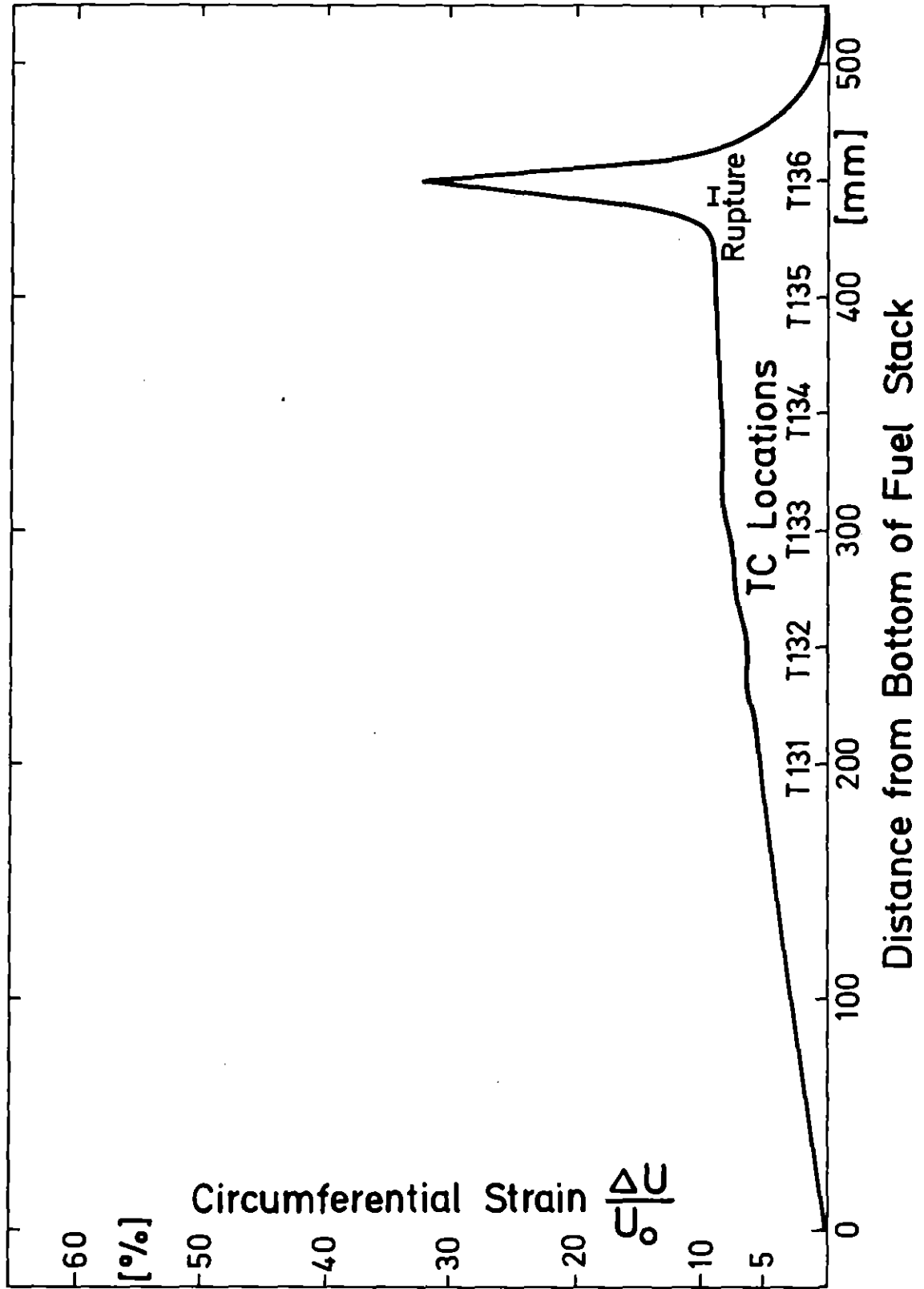
Abb.:37.5



FR 2 In-Pile Tests.  
Circumferential Strain and Axial Power Profiles  
of the G 2.1 through G 3.3 Tests

KfK  
IT 81  
PNS 4237-567

Fig. 38



# FR2 In-Pile Tests.

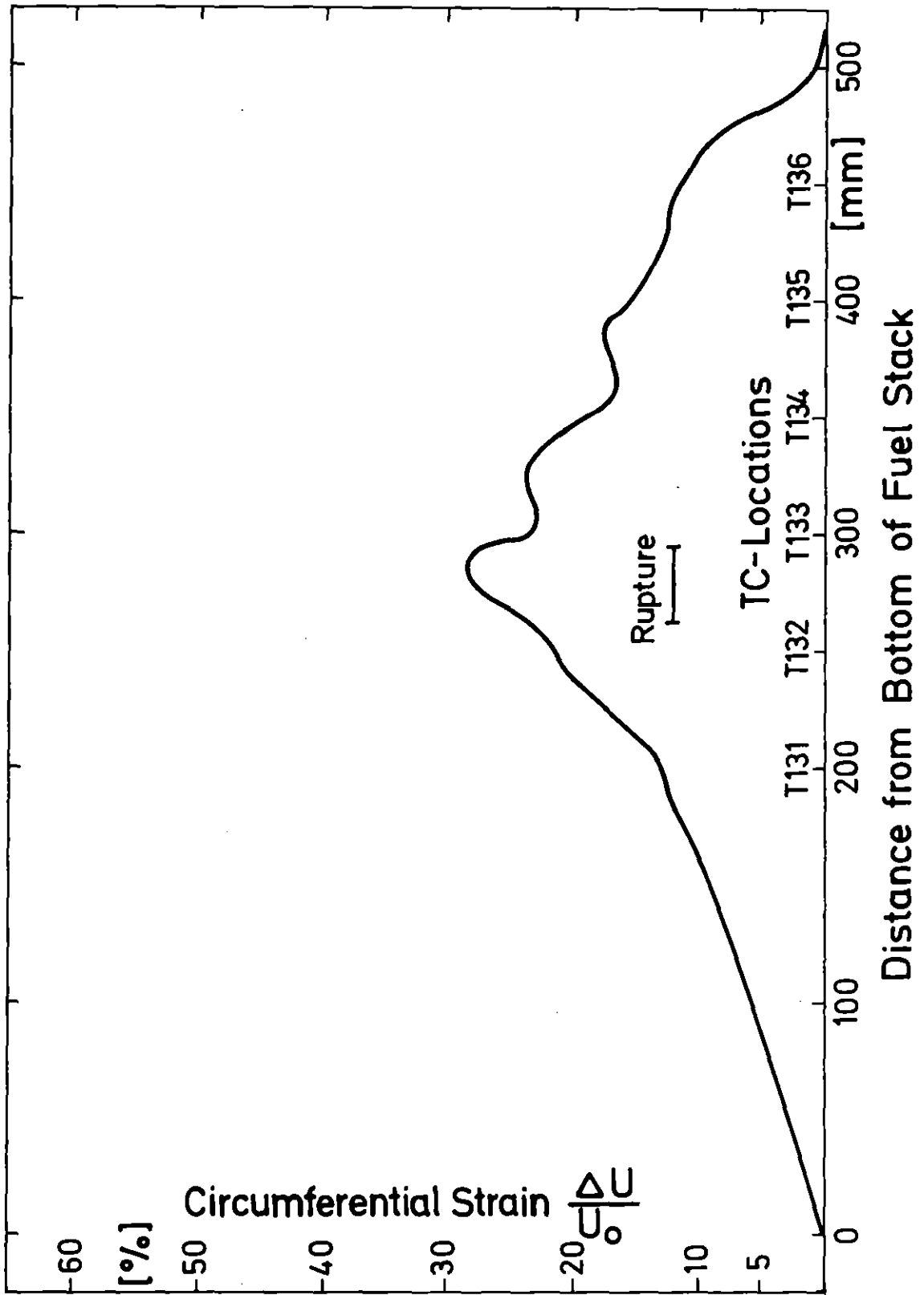
Axial Profile of Circumferential Strain, Test G2.1



IT-80  
PNS4237-95.24

Abb.:39.1





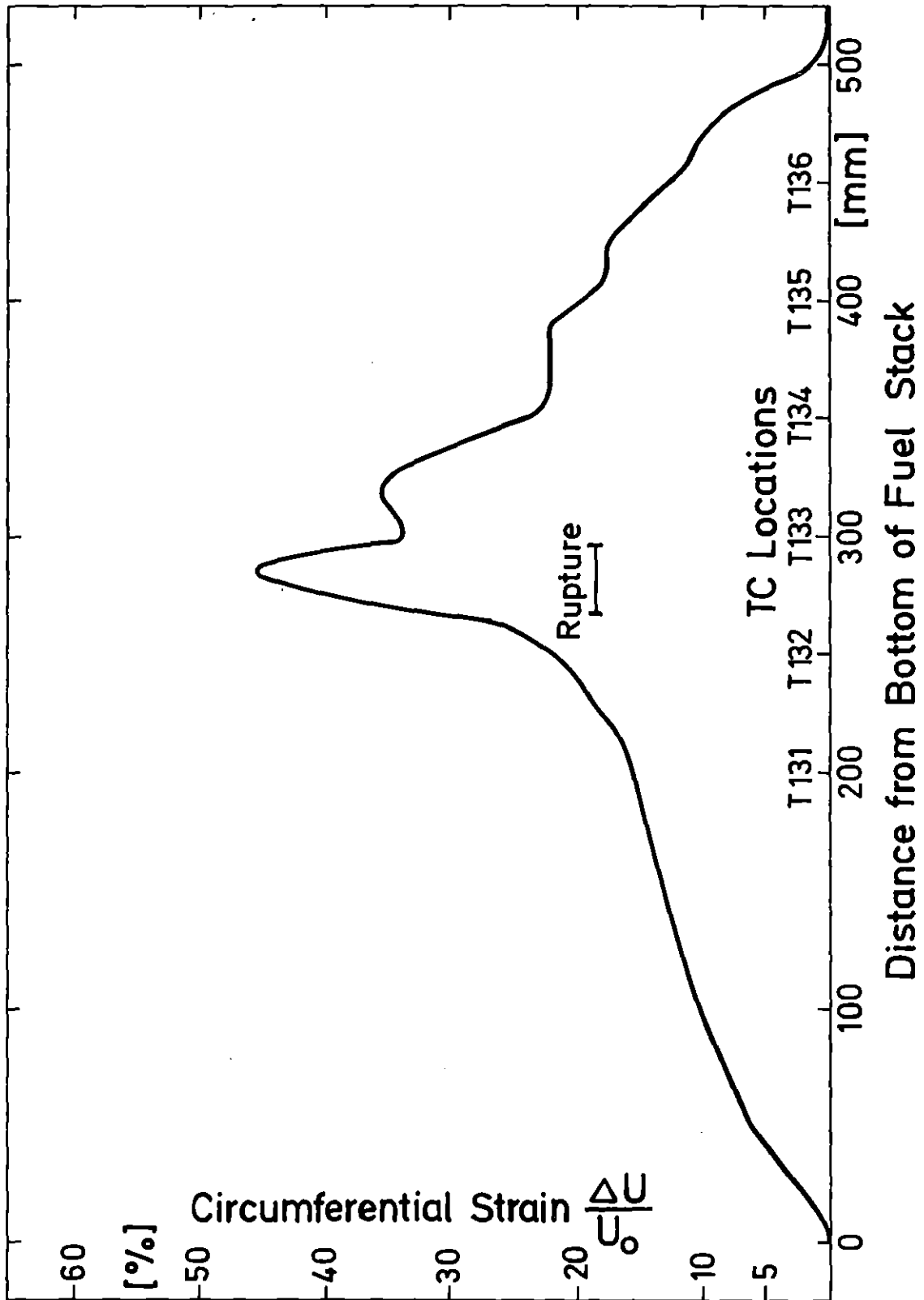
# FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G2.2



IT80  
PNS 4237-95.25

Abb.:39.2



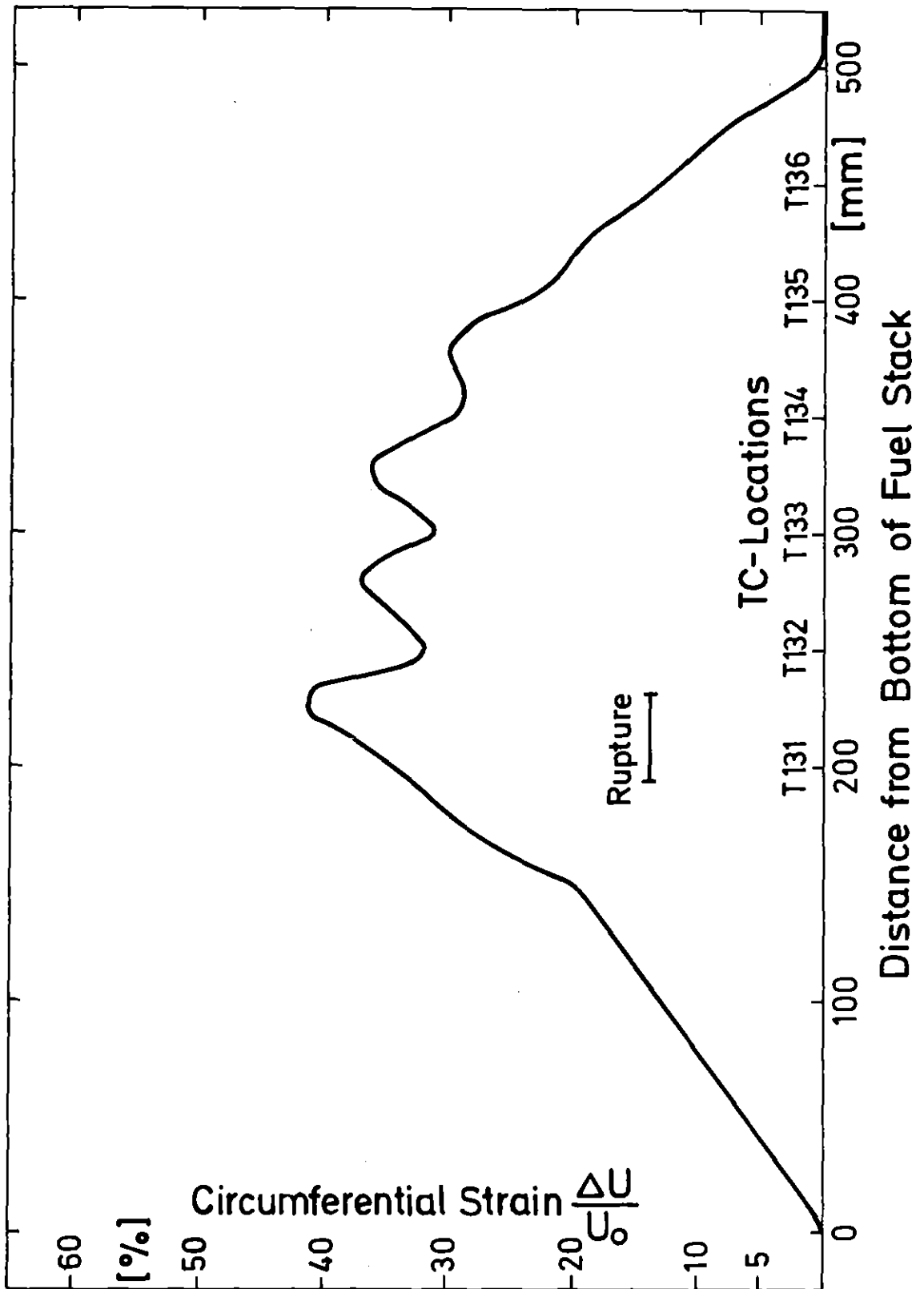
# FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G3.1



IT 80  
PNS 4237-95.26

Abb.: 39.3

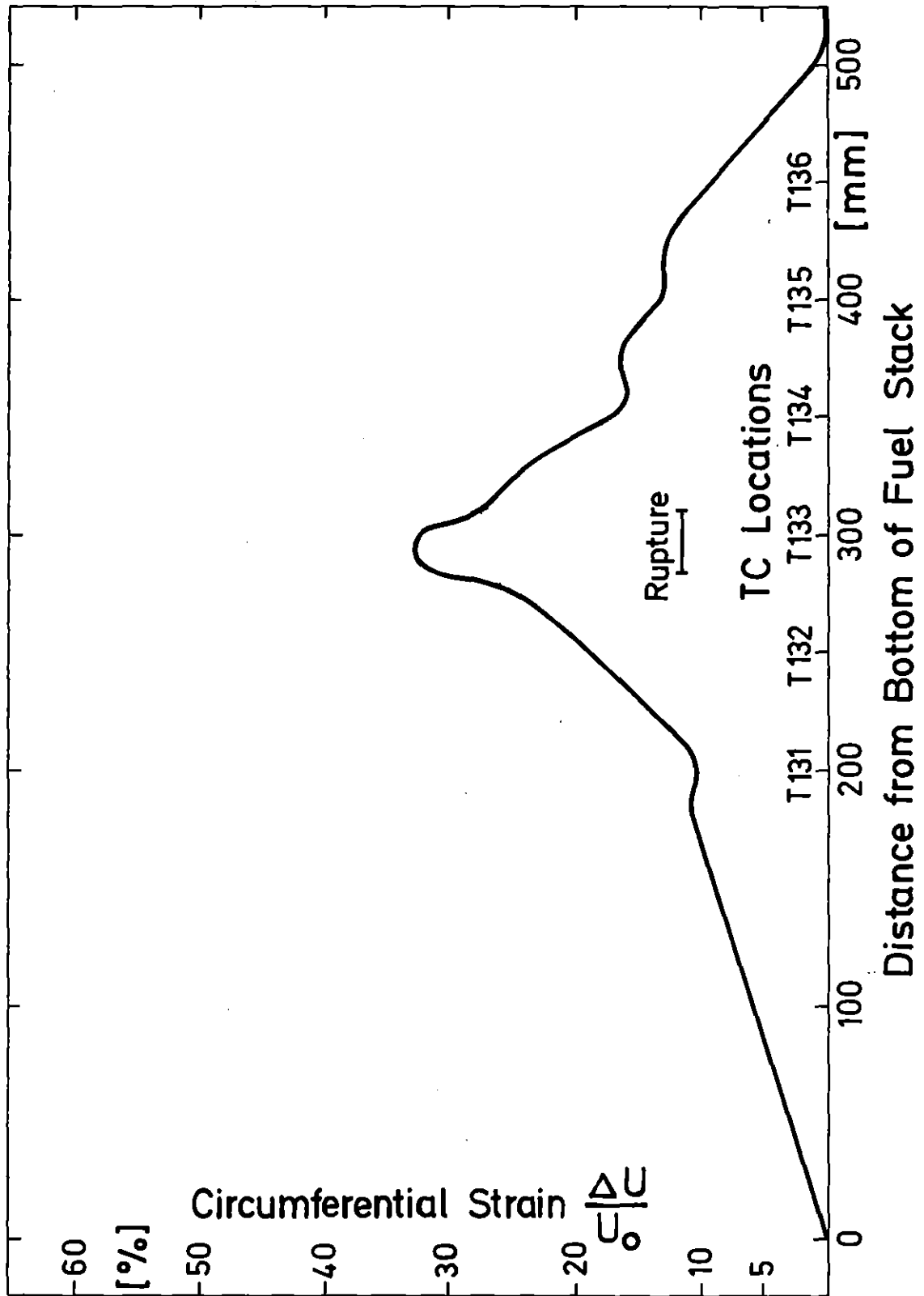


IT 80  
PNS 4237 - 95.27

# FR 2 In - Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G3.2

Abb.:39.4

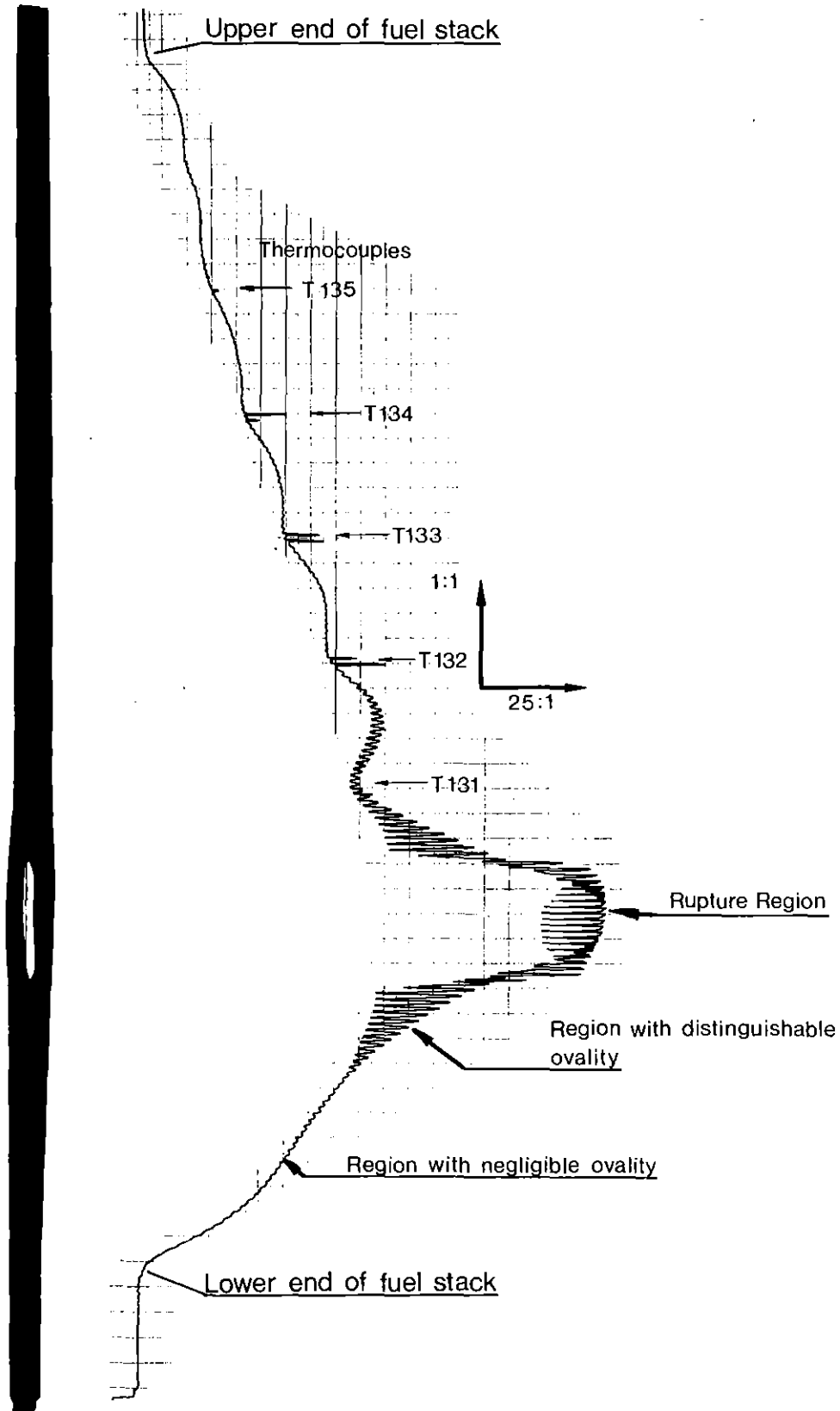


IT80  
PNS 4237-95.28

## FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G3.3

Abb: 39.5

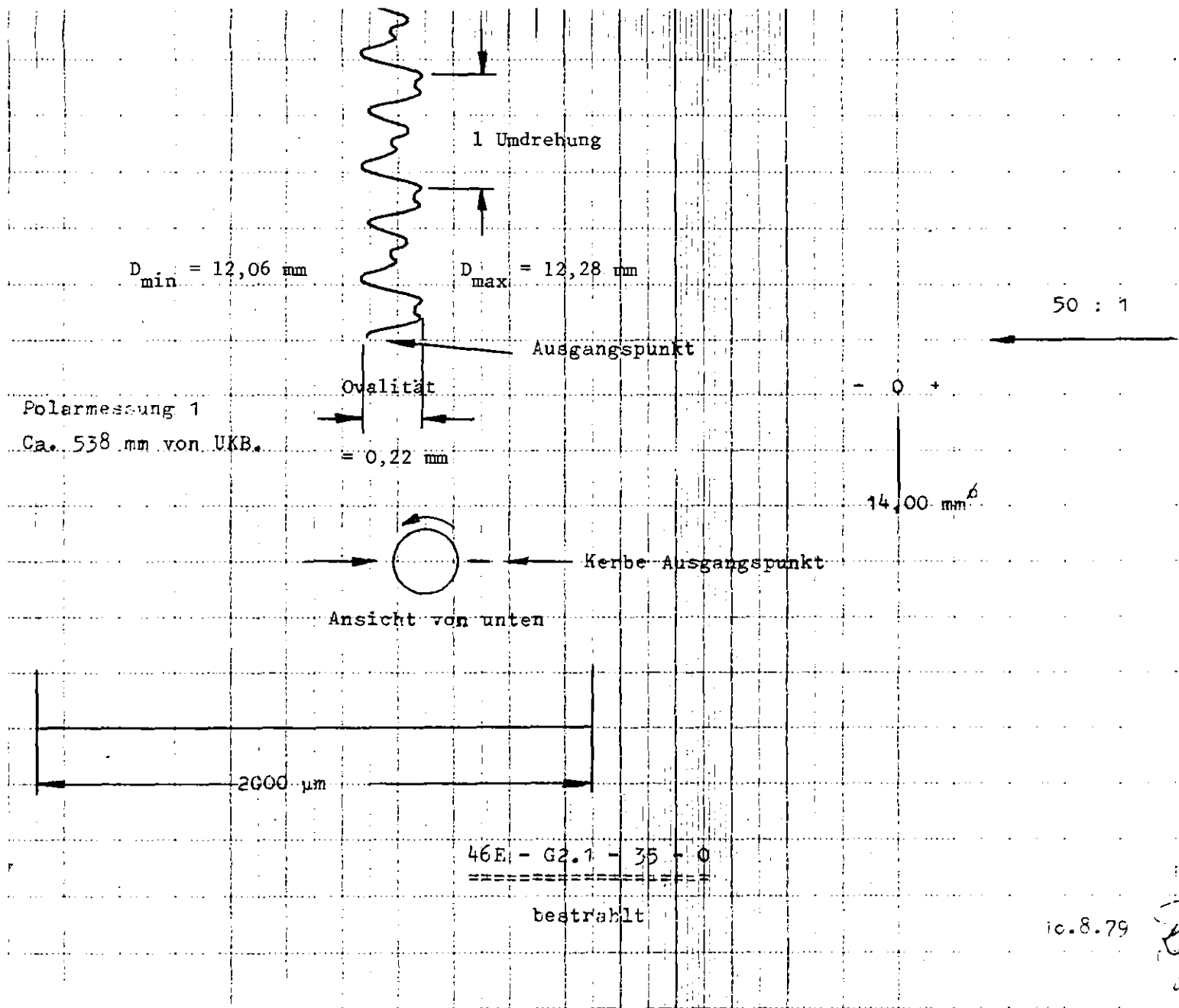


IT 1980  
PNS 4237-400

## FR 2 In-Pile Tests.

Typical spiral profile;  
posttest measured rod diameters of test A2.2

Abb.: 40



ic.8.79

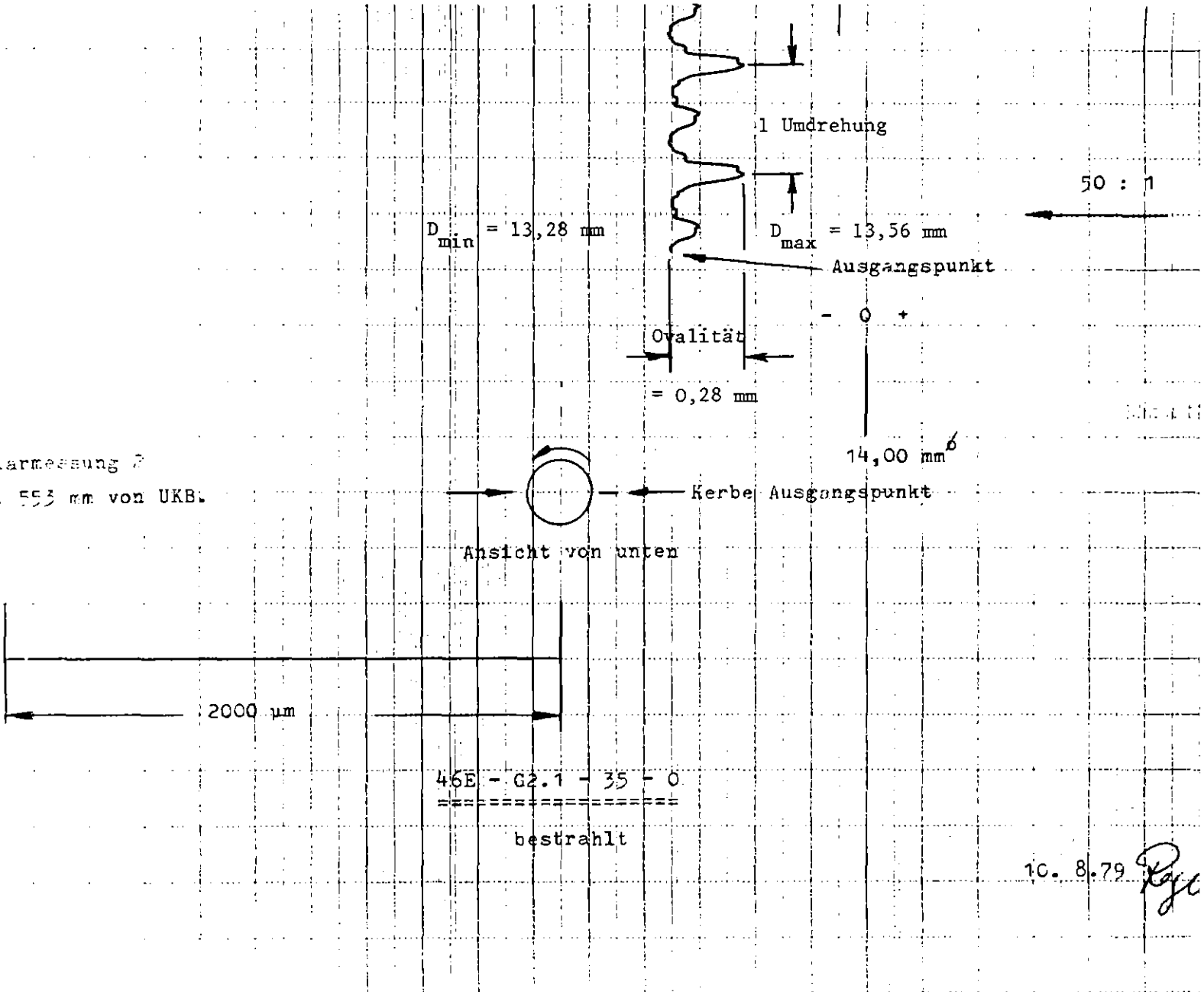
*Eya*

**KJK**  
IT 1980  
PNS 4237-482.24.1

POLARMESSUNG 1 (437 MM VON UKF)

VERSUCH G 2.1 STAB NR. 35

Abb.: 41.1



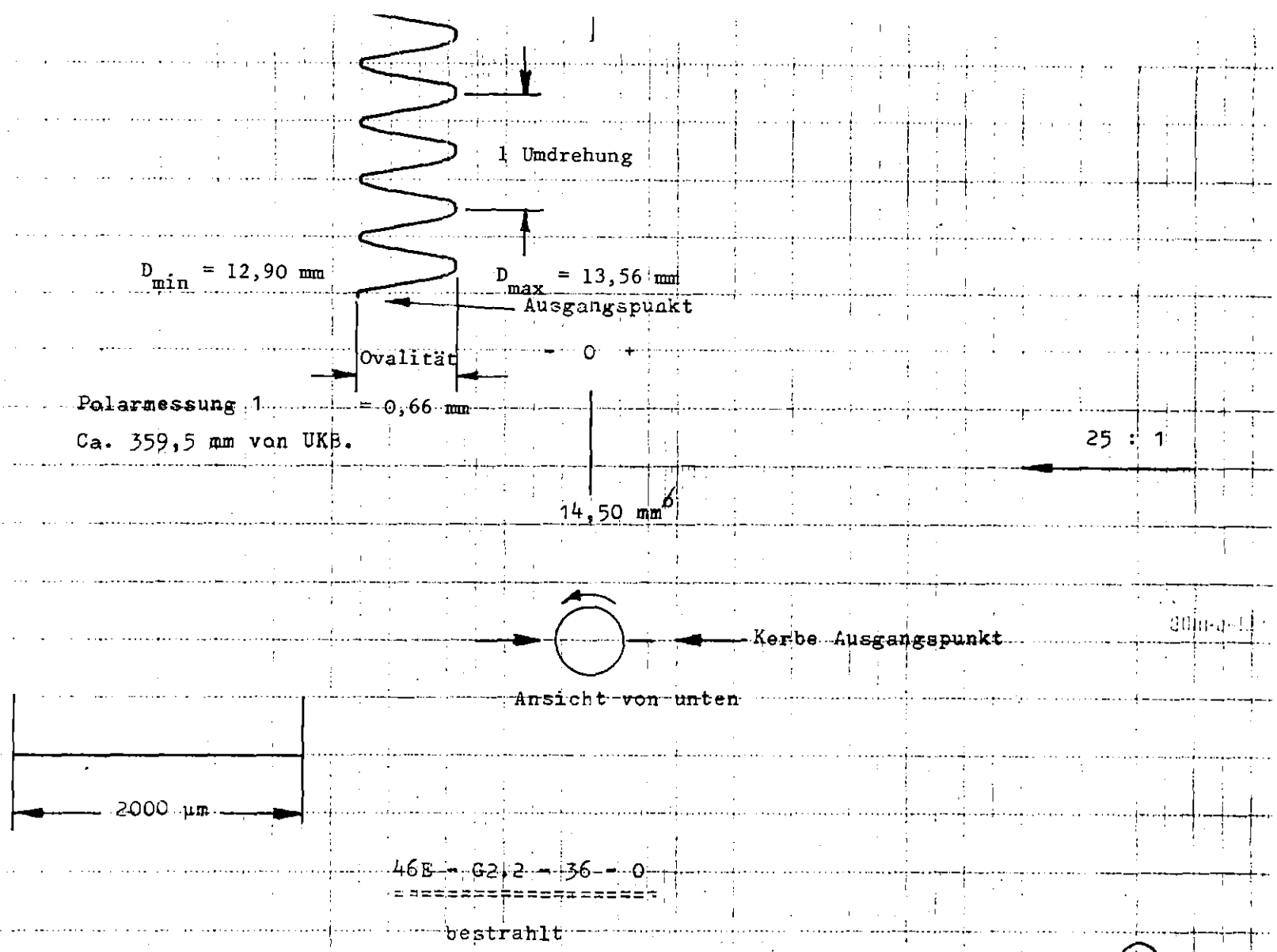
Polarmessung 2  
Ca. 553 mm von UKB:



IT1980  
PNS 4237-482.24.2

POLARMESSUNG 2 (452 MM VON UKF)  
VERSUCH G 2.1 STAB NR. 35

Abb.: 41.2



19.11.79

*Raja*

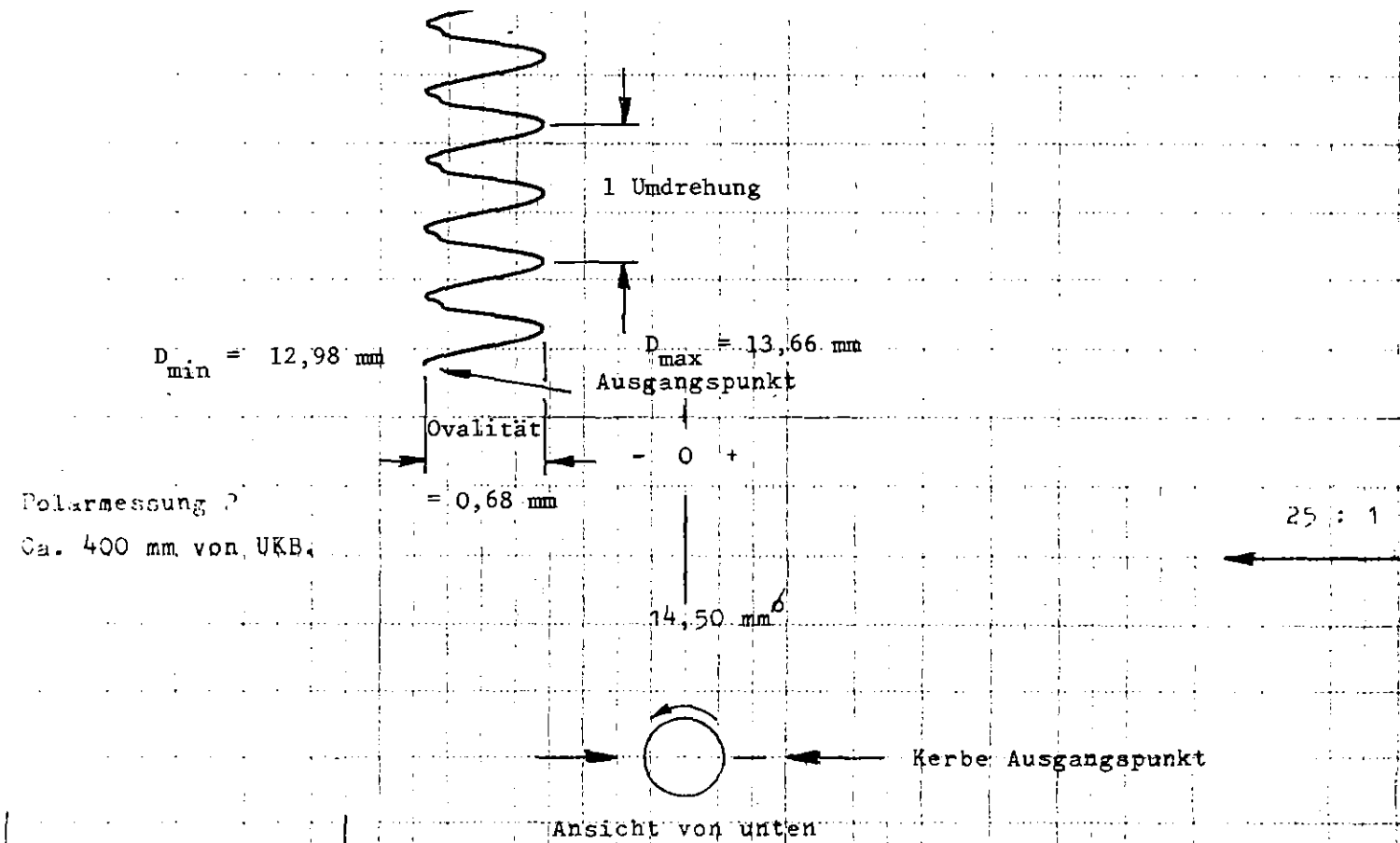


IT 1980  
PNS 4237-482.25.1

POLARMESSUNG 1 (258,5 MM VON UKF)  
VERSUCH G 2.2 STAB NR. 36

Abb: 42.1





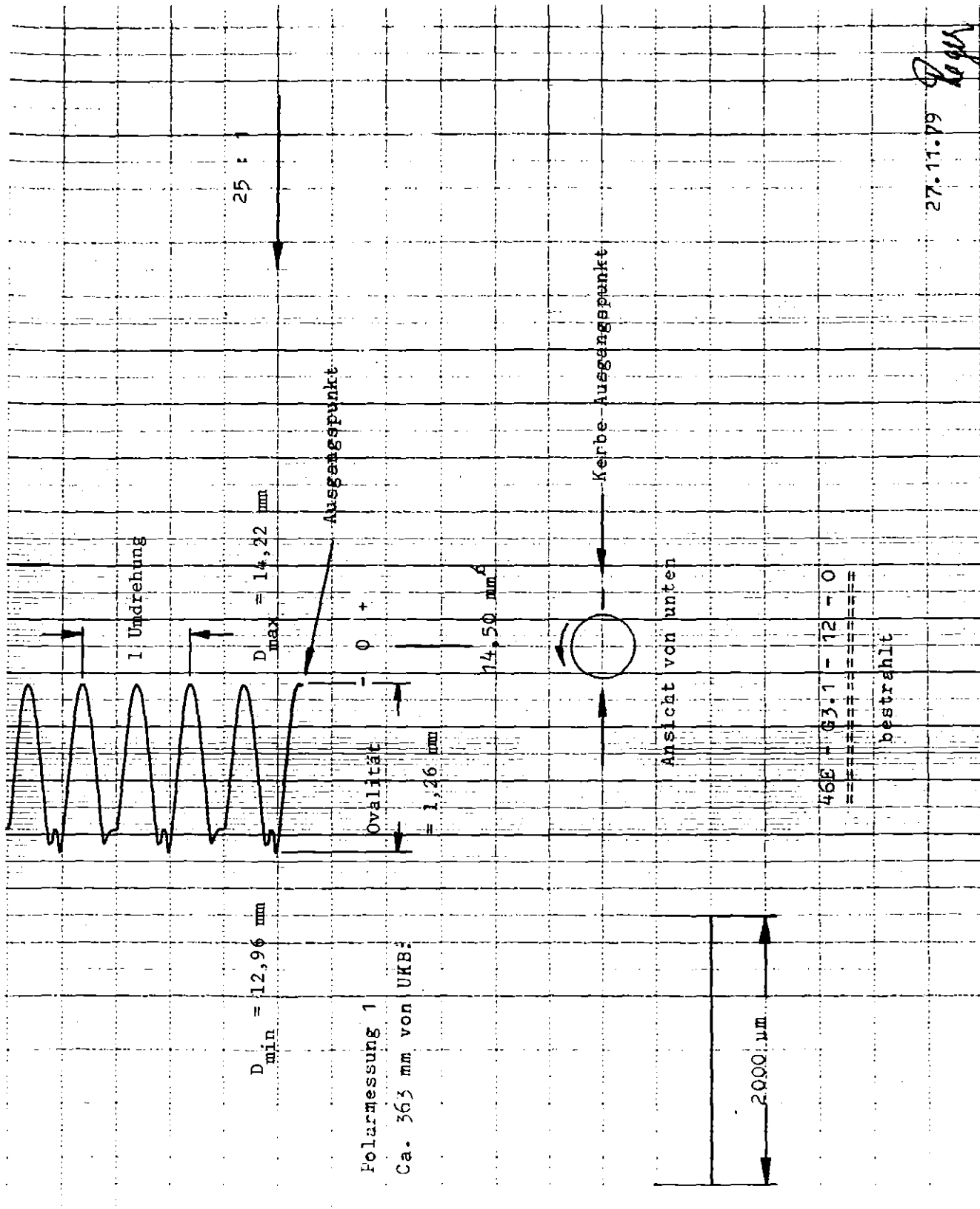
46E - G2.2 - 36 - 0  
 =====  
 bestrahlt

19.11.79 *Reyer*  
 800-117

POLARMESSUNG 2 (299 MM VON UKF)  
 VERSUCH G 2.2 STAB NR. 36

Abb.: 42.2

**KJK**  
 IT 1980  
 PNS 4237-482.25.2



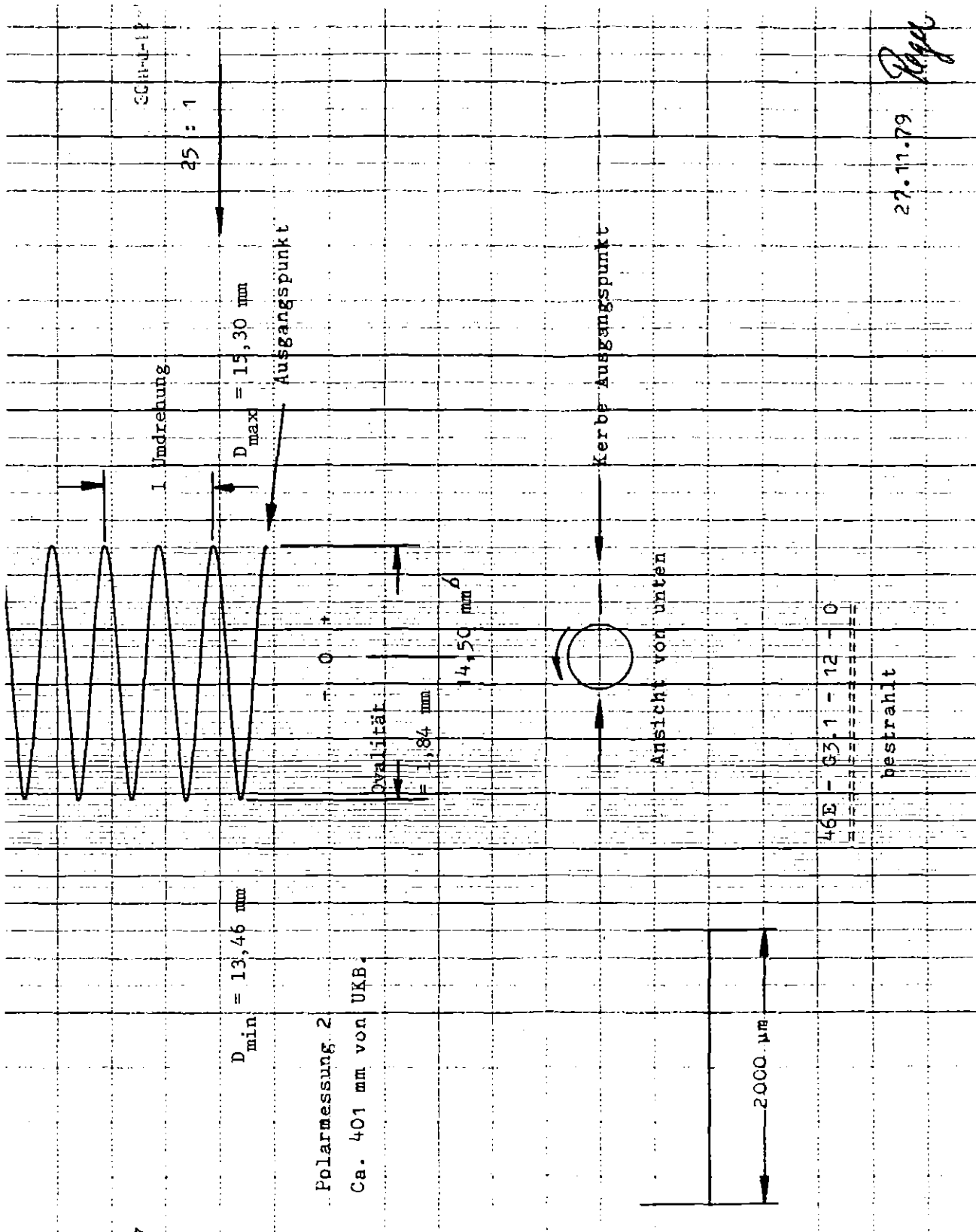
27.11.79 *Reger*



IT 1980  
PNS 4237-482.26.1

POLARMESSUNG 1 (262 MM VON UKF)  
VERSUCH G 3.1 STAB NR. 12

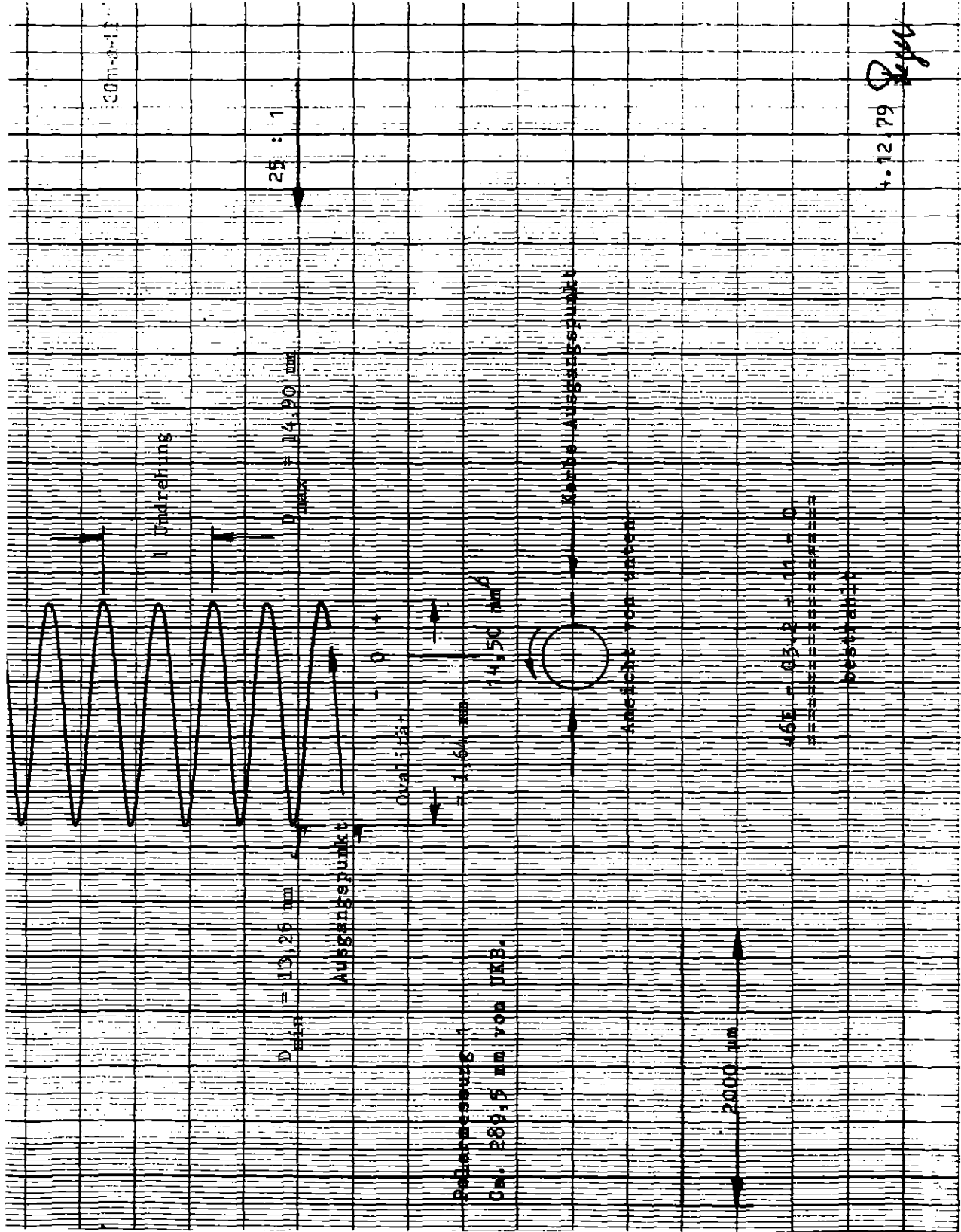
Abb:431



POLARMESSUNG 2 (300 MM VON UKF)

VERSUCH G 3.1 STAB NR. 12

Abb.:43.2



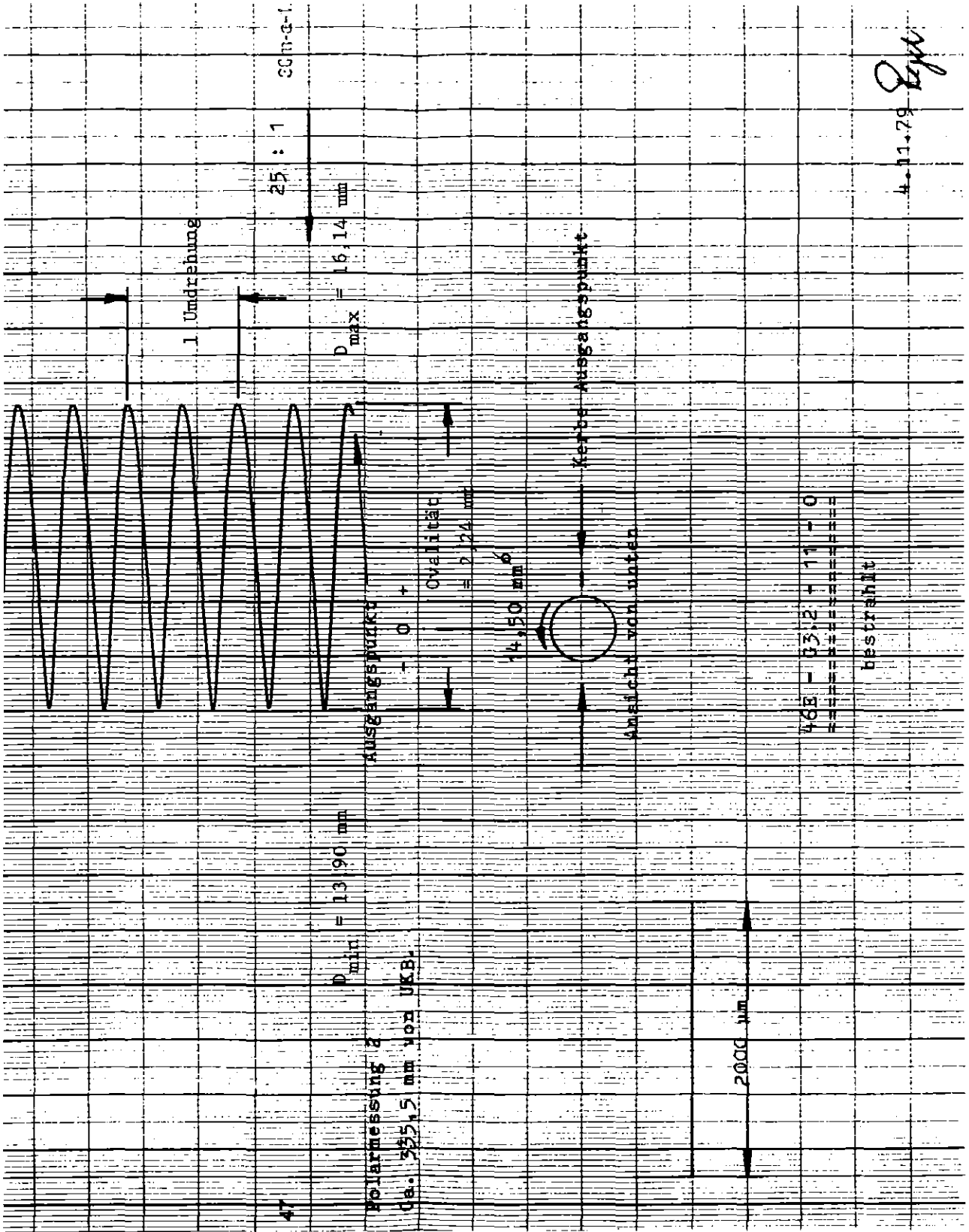
KfK

IT 1980  
PNS 4237-482.27.1

POLARMESSUNG 1 (188,5 MM VON UKF)

VERSUCH G 3.2 STAB NR. 11

Abb.:44.1



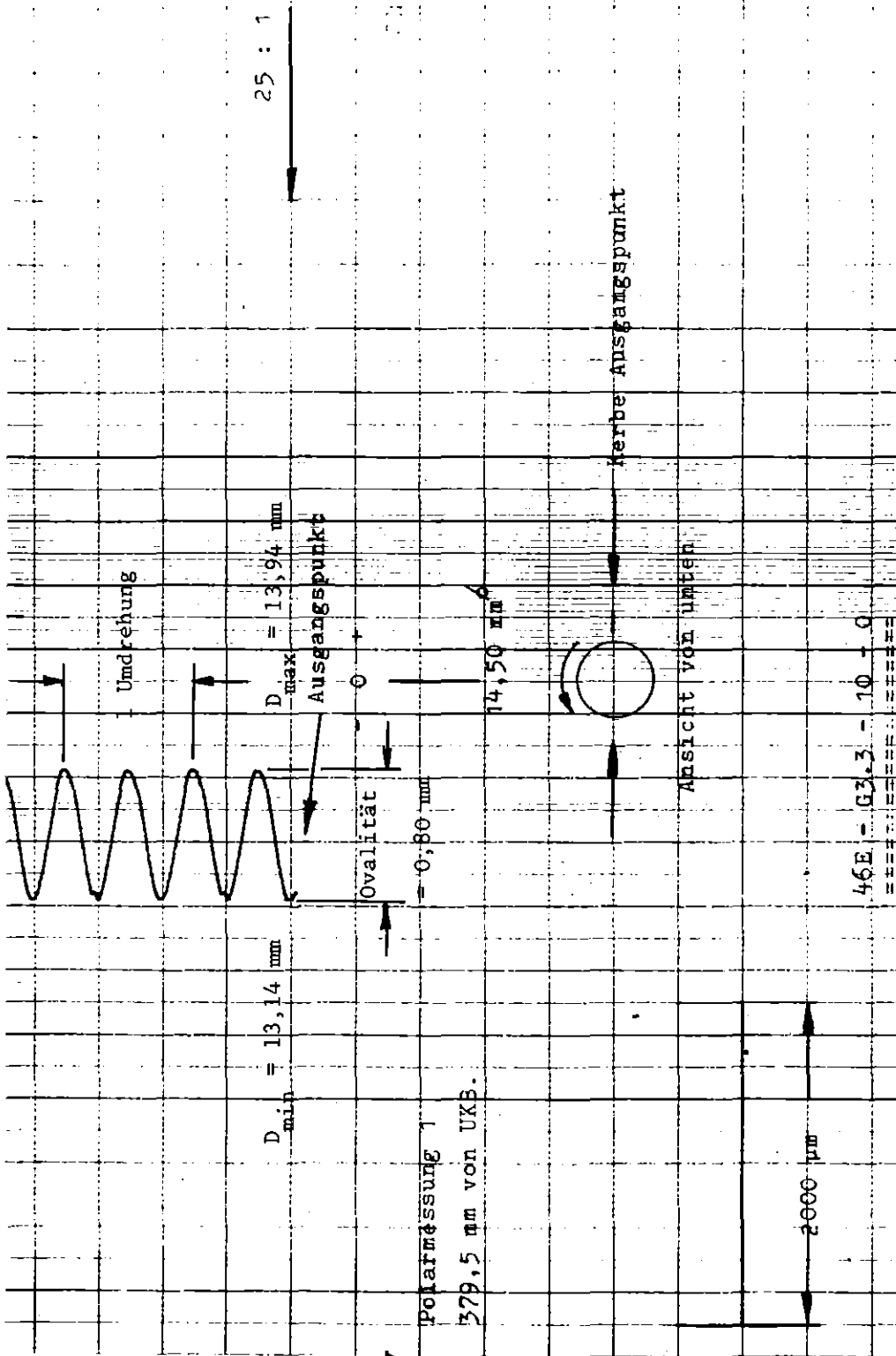
POLARMESSUNG 2 (234,5 MM VON UKF)

VERSUCH G 3.2 STAB NR. 11

Abb:44.2



IT 1980  
PNS 4237-482.27.2



30.1.80 Rega

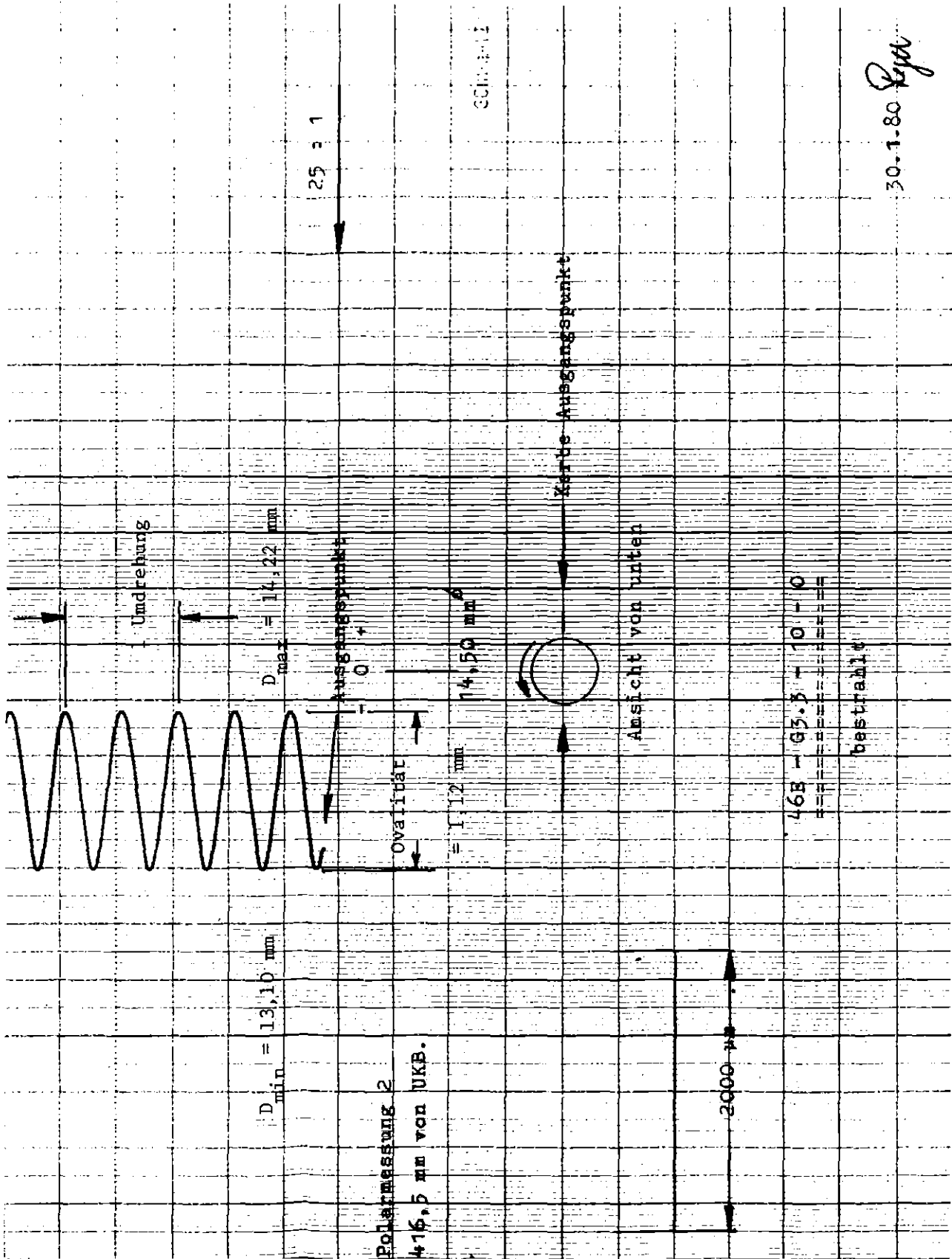
kfk

IT 1980  
PNS 4237-482.28.1

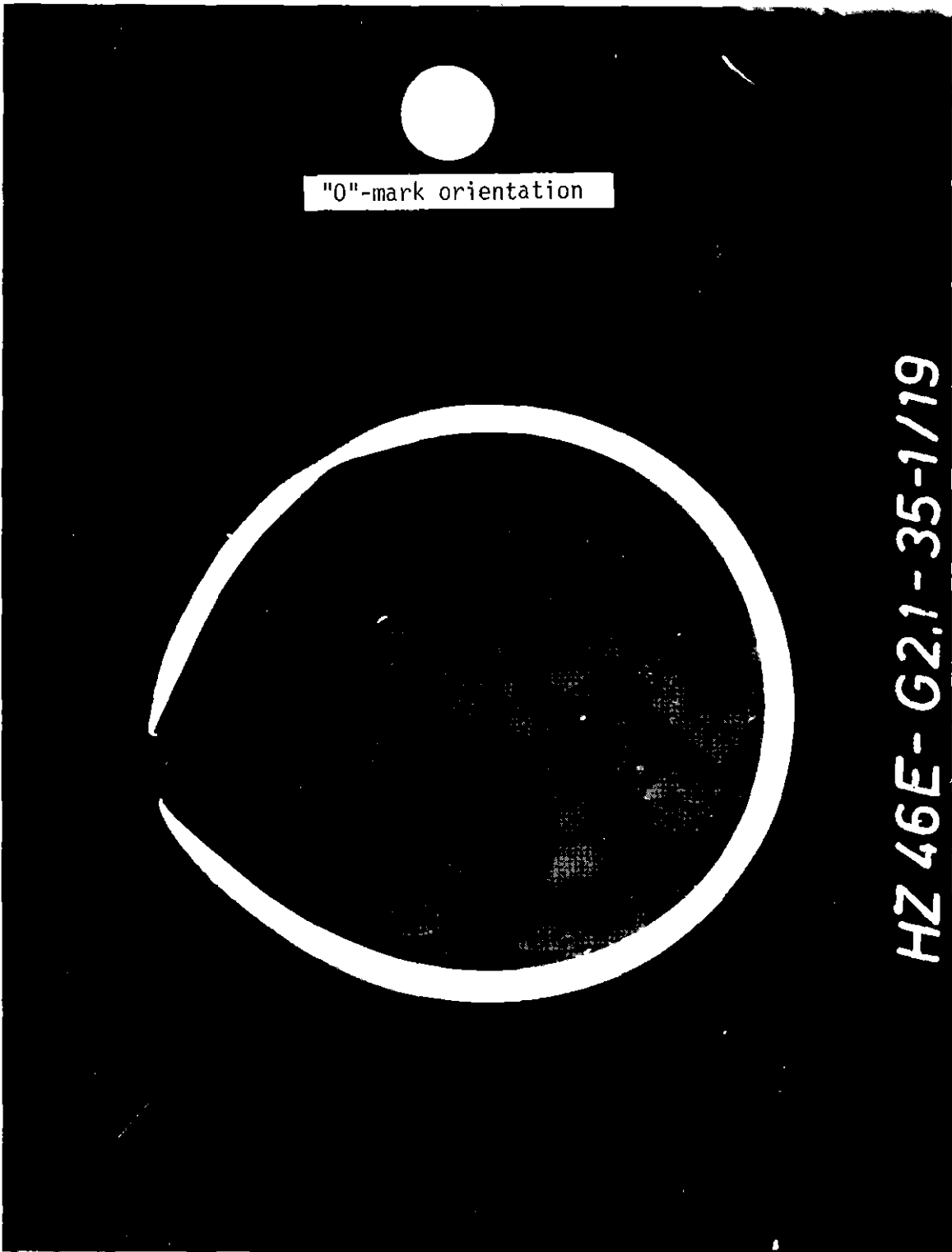
POLARMESSUNG 1 (278,5 MM VON UKF)

VERSUCH G 3.3 STAB NR. 10

Abb:45.1



POLARMESSUNG 2 (315,5 MM VON UKF)  
 VERSUCH G 3.3 STAB NR. 10



"0"-mark orientation

HZ 46E- G2.1 - 35-1/19

5 mm

445,6 mm from UKF

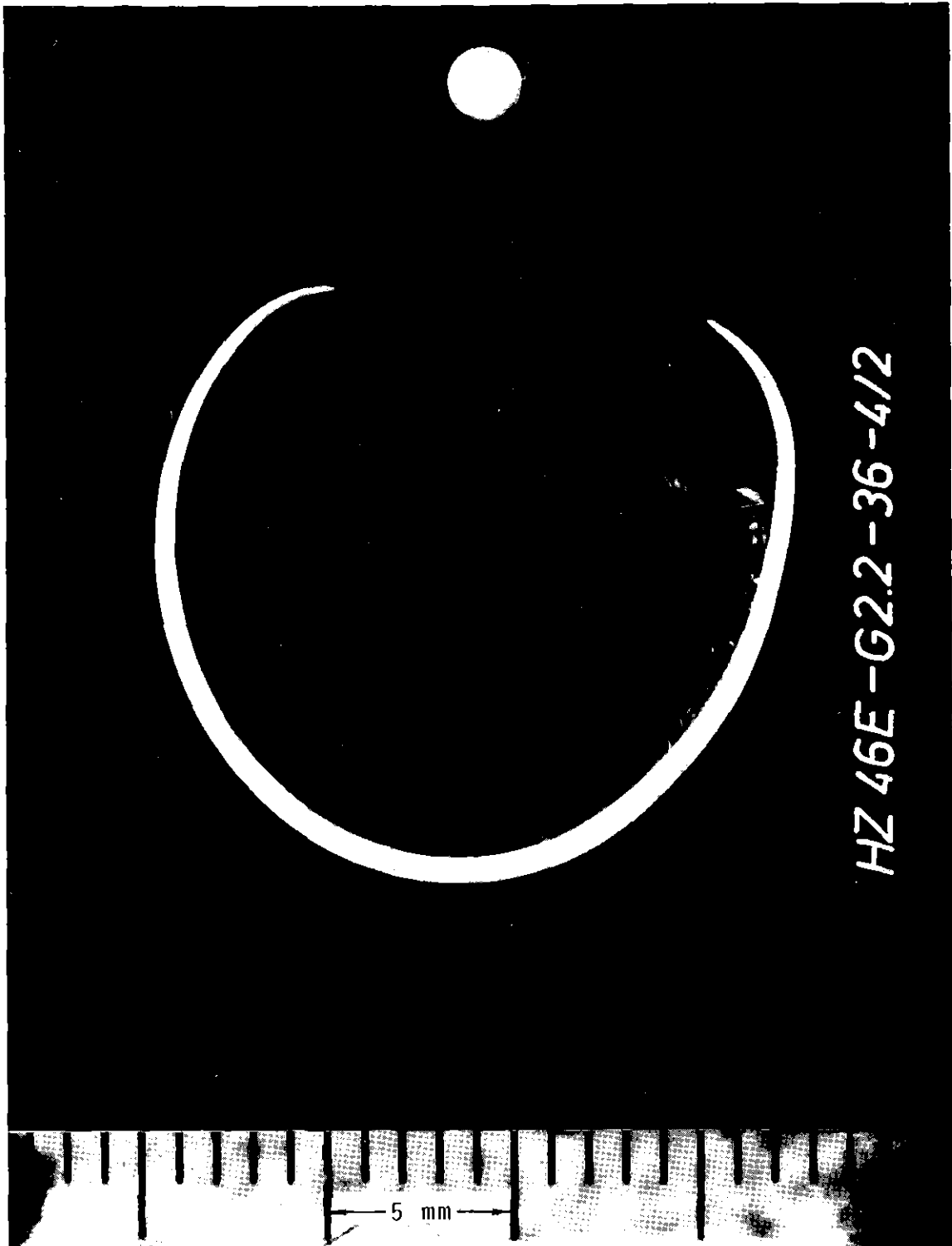


IT 1980  
PNS 4237-458

FR 2 In-Pile Tests. Test G 2.1  
Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.: 46.1





280mm from UKF

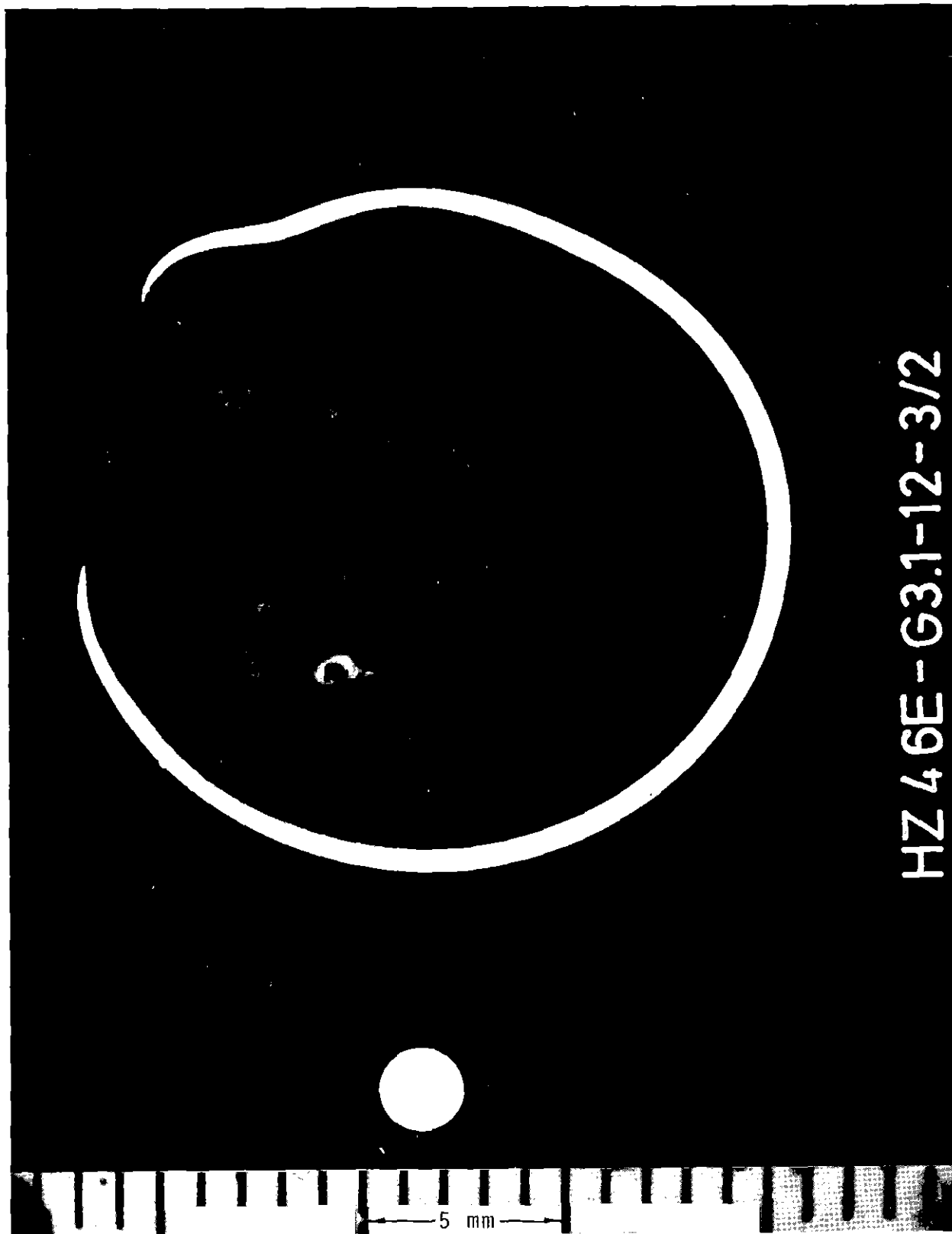


IT 1980  
PNS 4237-459

FR 2 In-Pile Tests. Test G 2.2

Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.: 46.2



HZ 46E-G3.1-12-3/2

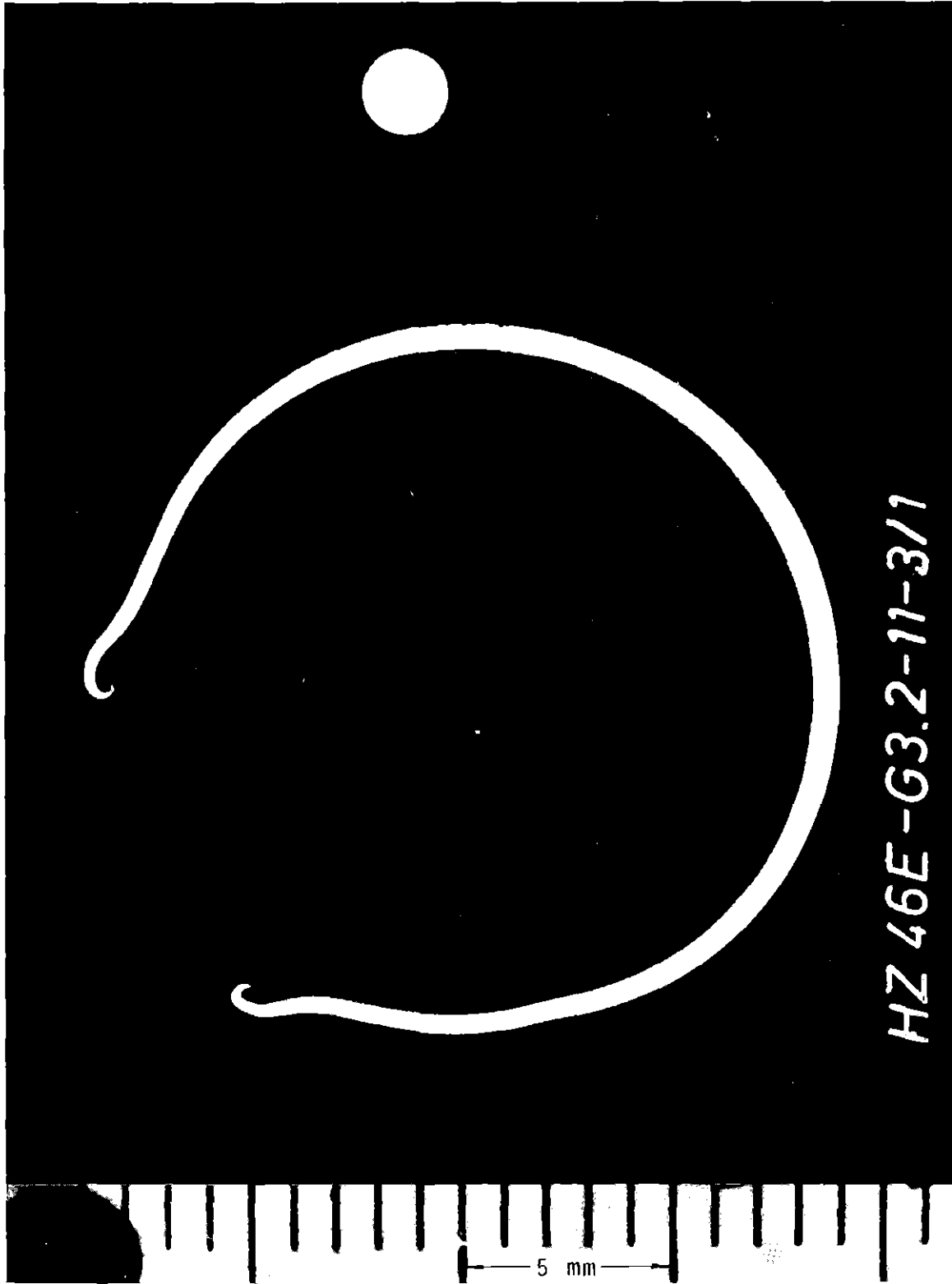
283 mm from UKF



IT 1980  
PNS 4237-460

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.1

Cross Section, Max. Circumferential Strain Abb:46.3



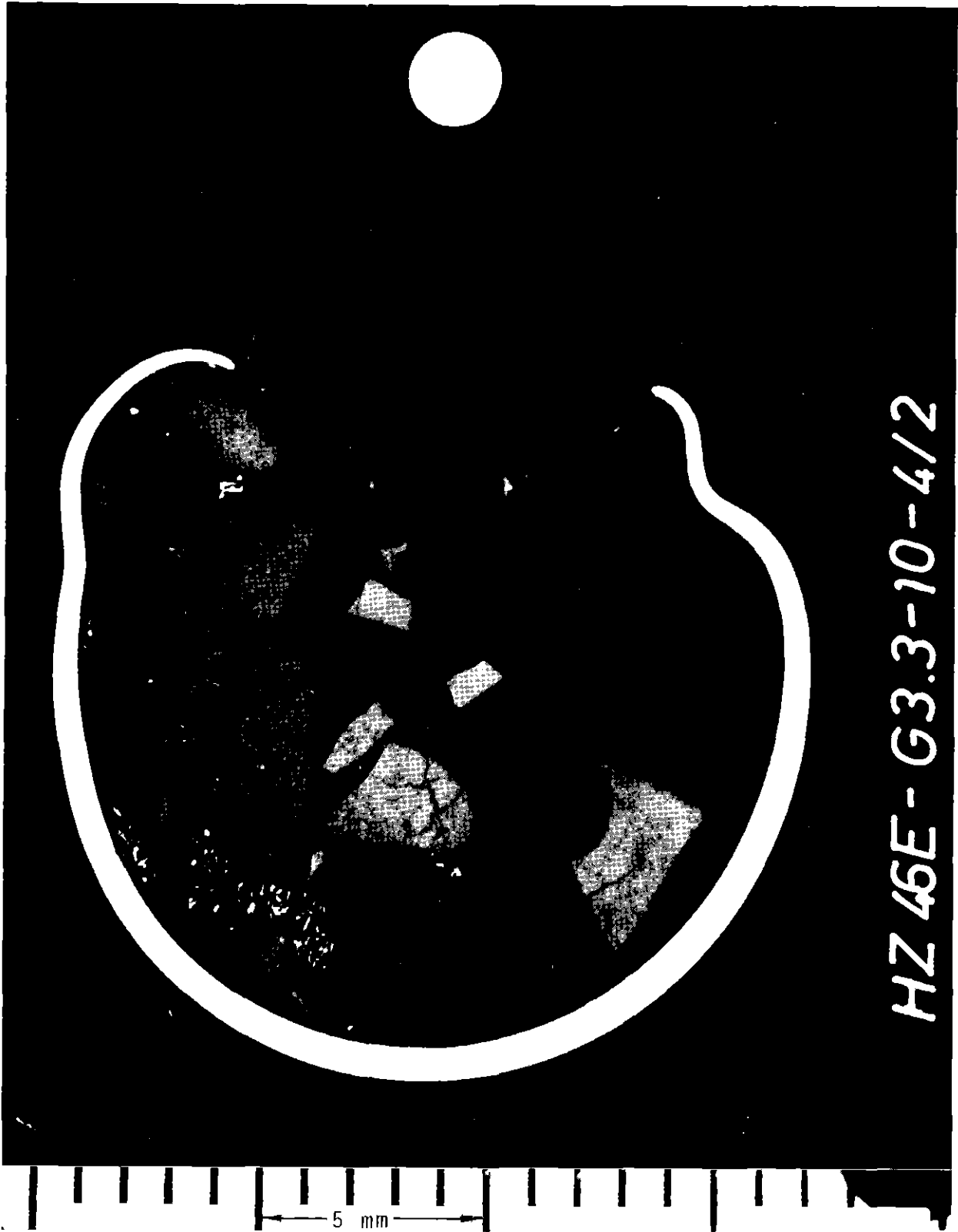
223mm from bottom of fuel stack (UKF)



IT 1980  
PNS 4237-461

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.2  
Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb: 46.4



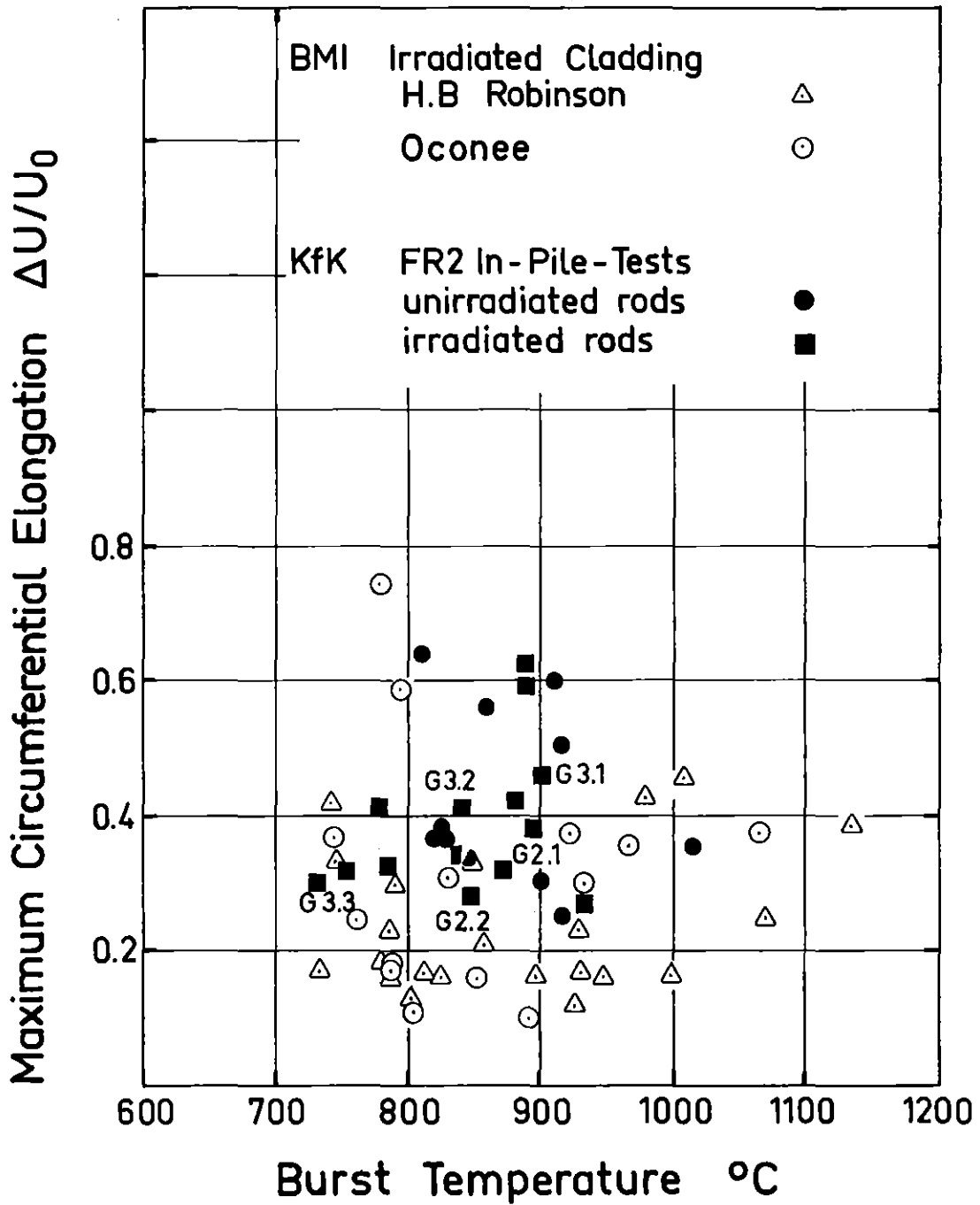
299 mm from UKF



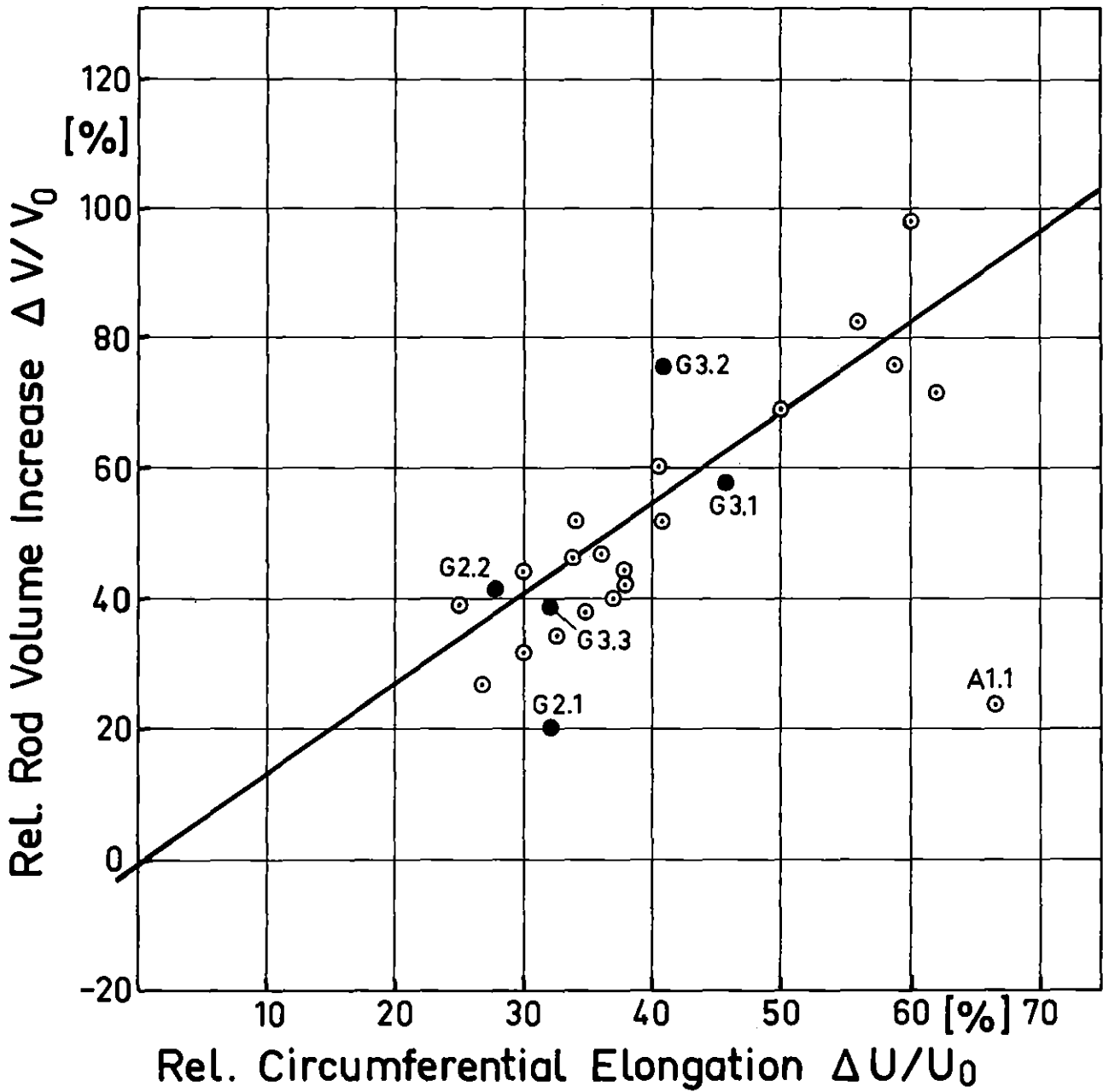
IT 1980  
PNS 4237-463

FR 2 In-Pile Tests. Test G 3.3  
Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb: 46.5



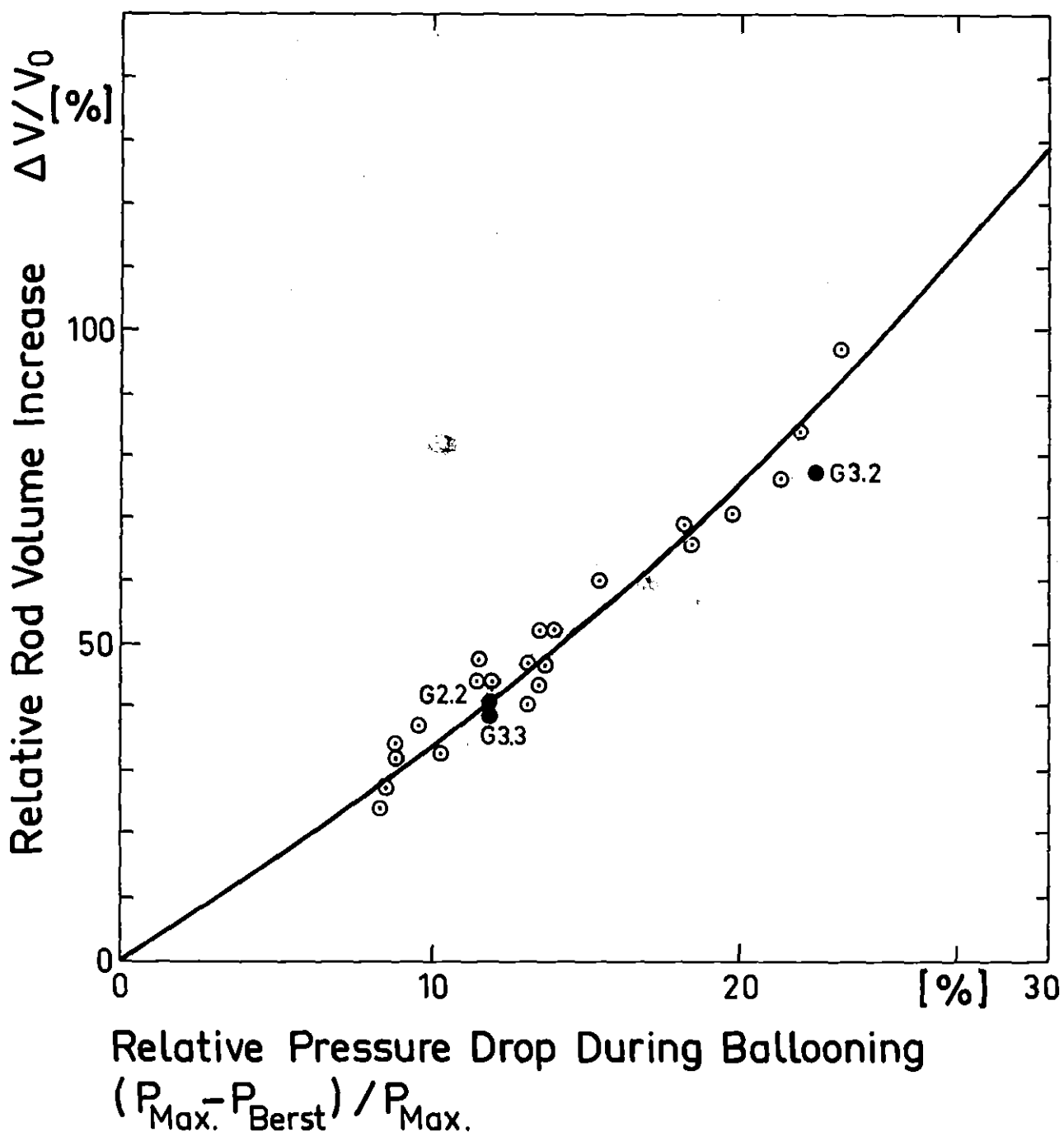
FR 2 In-Pile Single Rod Tests in Steam  
Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temperature  
Abb.: 47



## FR2 In-Pile Tests

Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation

Abb.:48



KfK  
IT1980  
PNS4237-232.24

## FR 2 In - Pile Tests

Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop

Abb.:49



*HZ-46E-G3.6-6-5/21 10 x geätzt*

2 mm

Sample 5, 195mm from UKF  
35 000 MWd/t burnup,  
not transient-tested

---

**KfK**

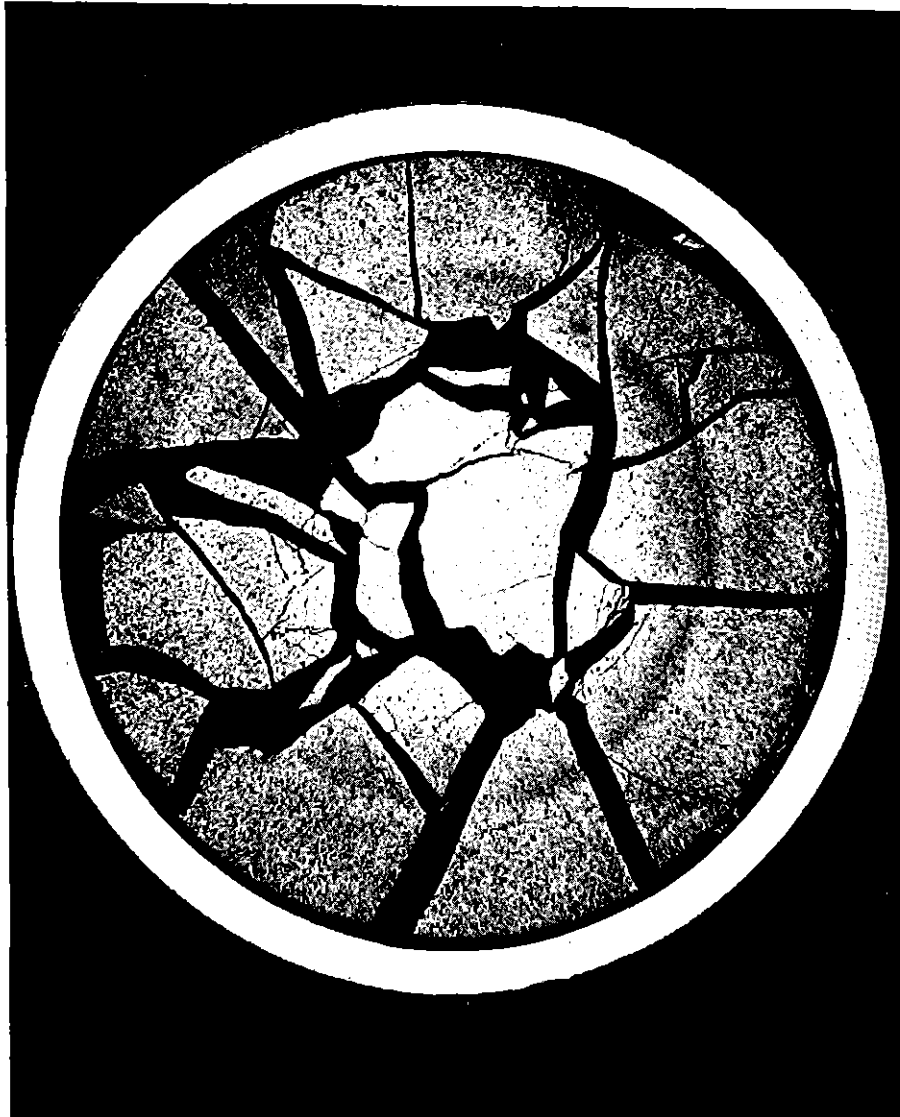
IT 1980  
PNS 4237-468

**FR 2 In-Pile Tests.**

Cross Section of the G3.6 Fuel Rod

Abb.: 50.1





*HZ-46E-G2.1-35-3/24 10x geätzt*

2 mm

Sample 3; 352 mm from UKF

35 000 MWd/t burnup

transient-tested

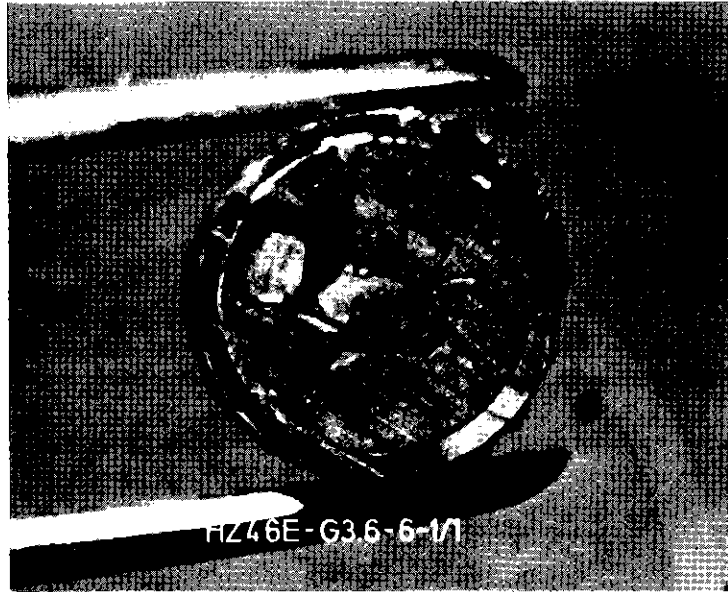


IT 1981  
PNS 4237-514

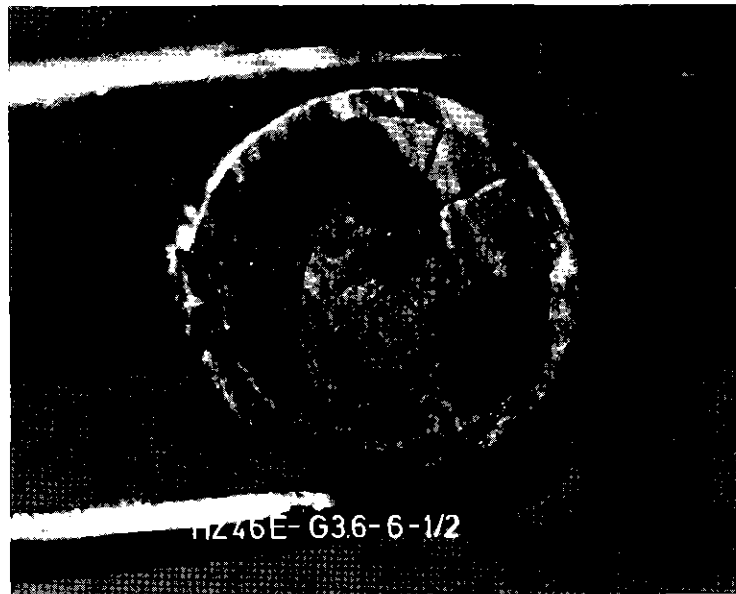
## FR 2 In-Pile Tests.

Cross Section of the G 2.1 Fuel Rod

Fig. 50.2



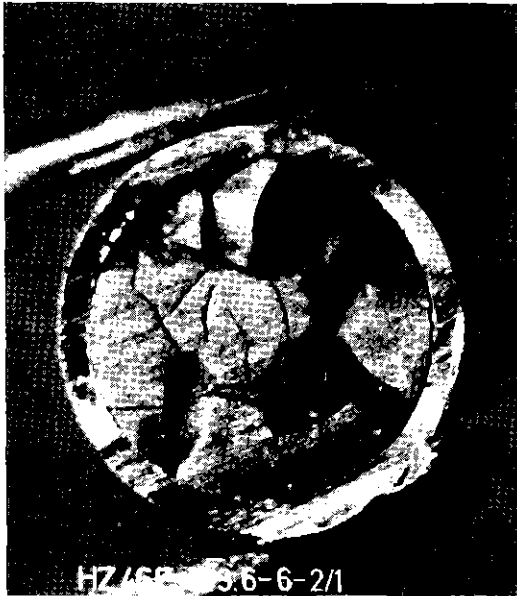
Sample 1, 474 mm from UKF



IT 1980  
PNS 4237-465

## FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the G3.6 Fuel Rod  
Abb: 51.1



Sample 2, 240mm from UKF



Sample 3, 27,5mm from UKF

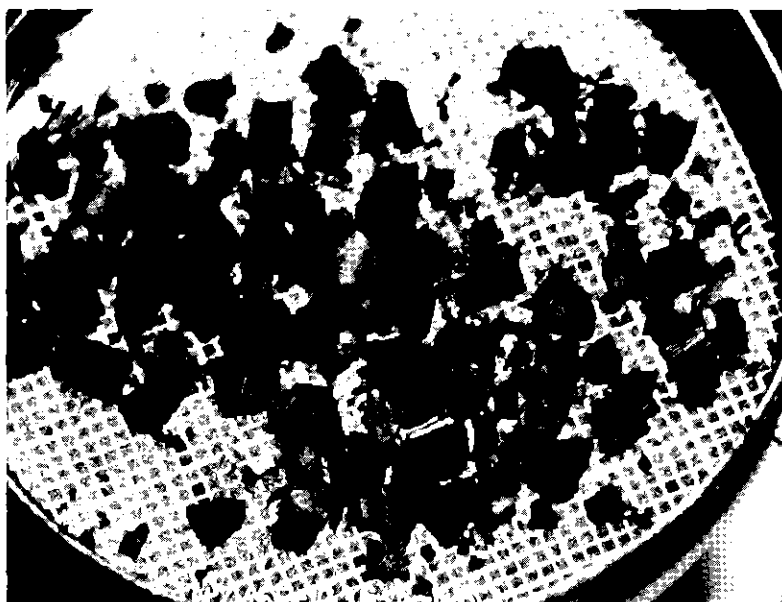
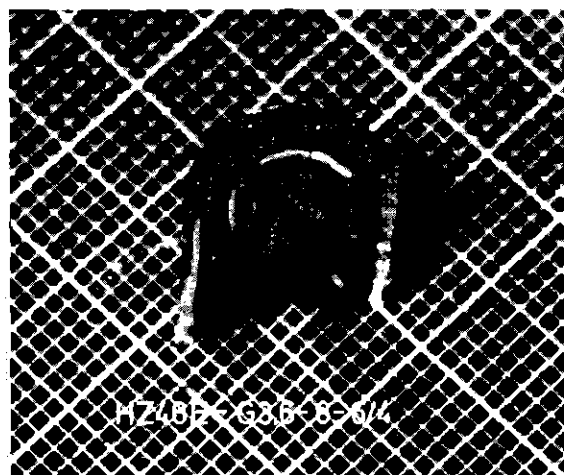
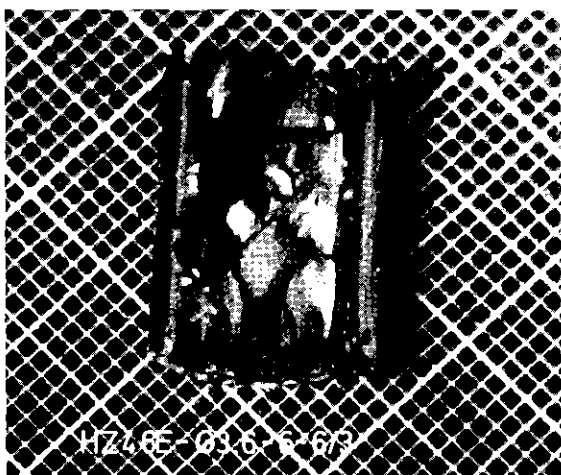
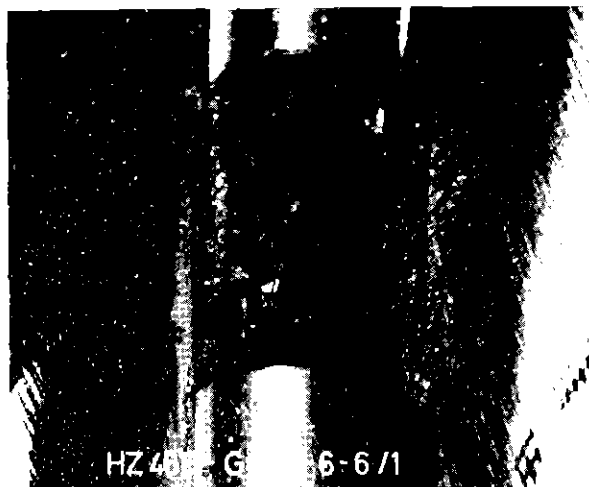


IT 1980  
PNS 4237-466

## FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the G 3.6 Fuel Rod

Abb.: 51.2



Sample 6, 172 mm from UKF

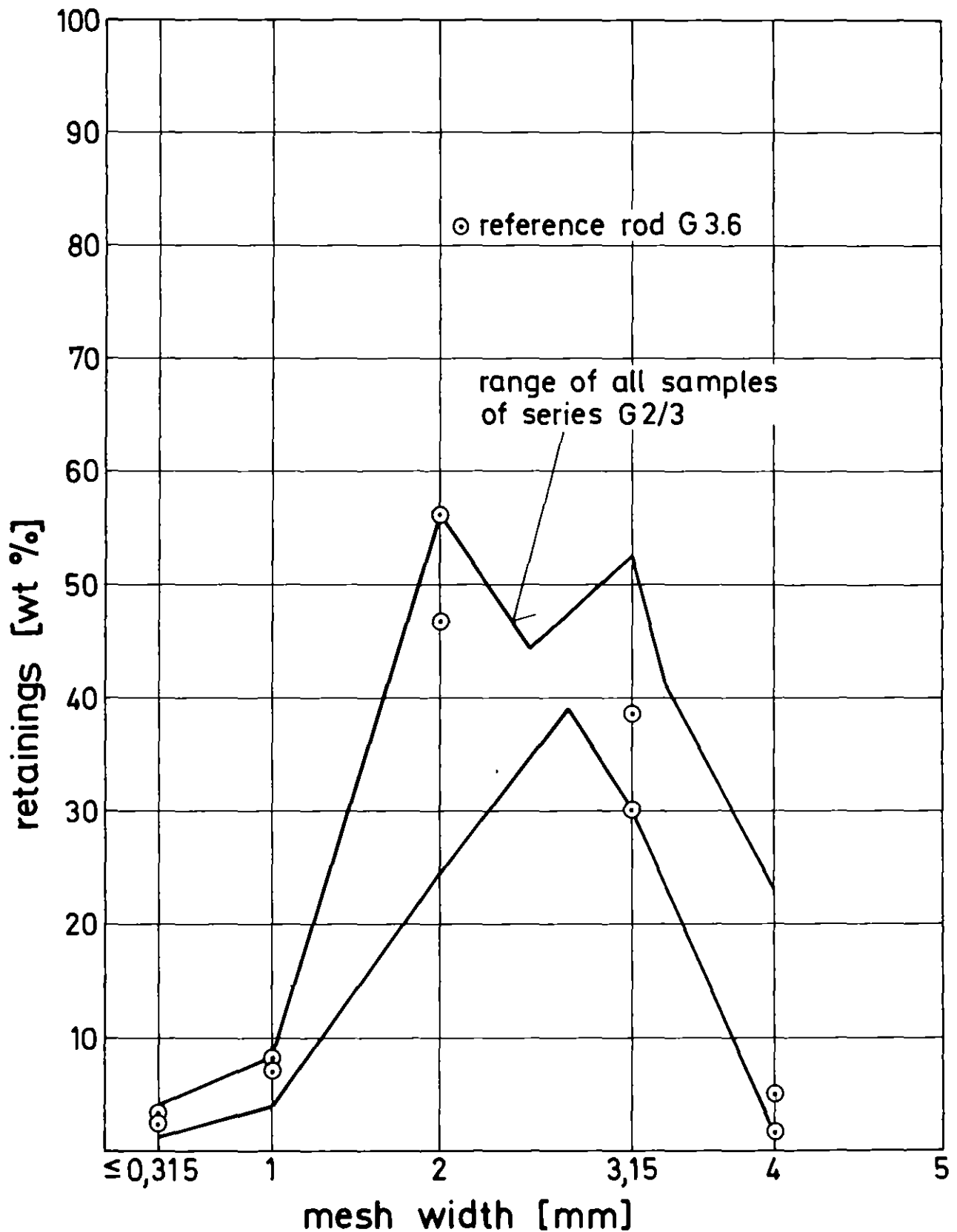


IT 1980  
PNS 4237-467

## FR 2 In-Pile Tests.

Fuel Pellet Fragments from G 3.6 Fuel Rod

Abb.:52

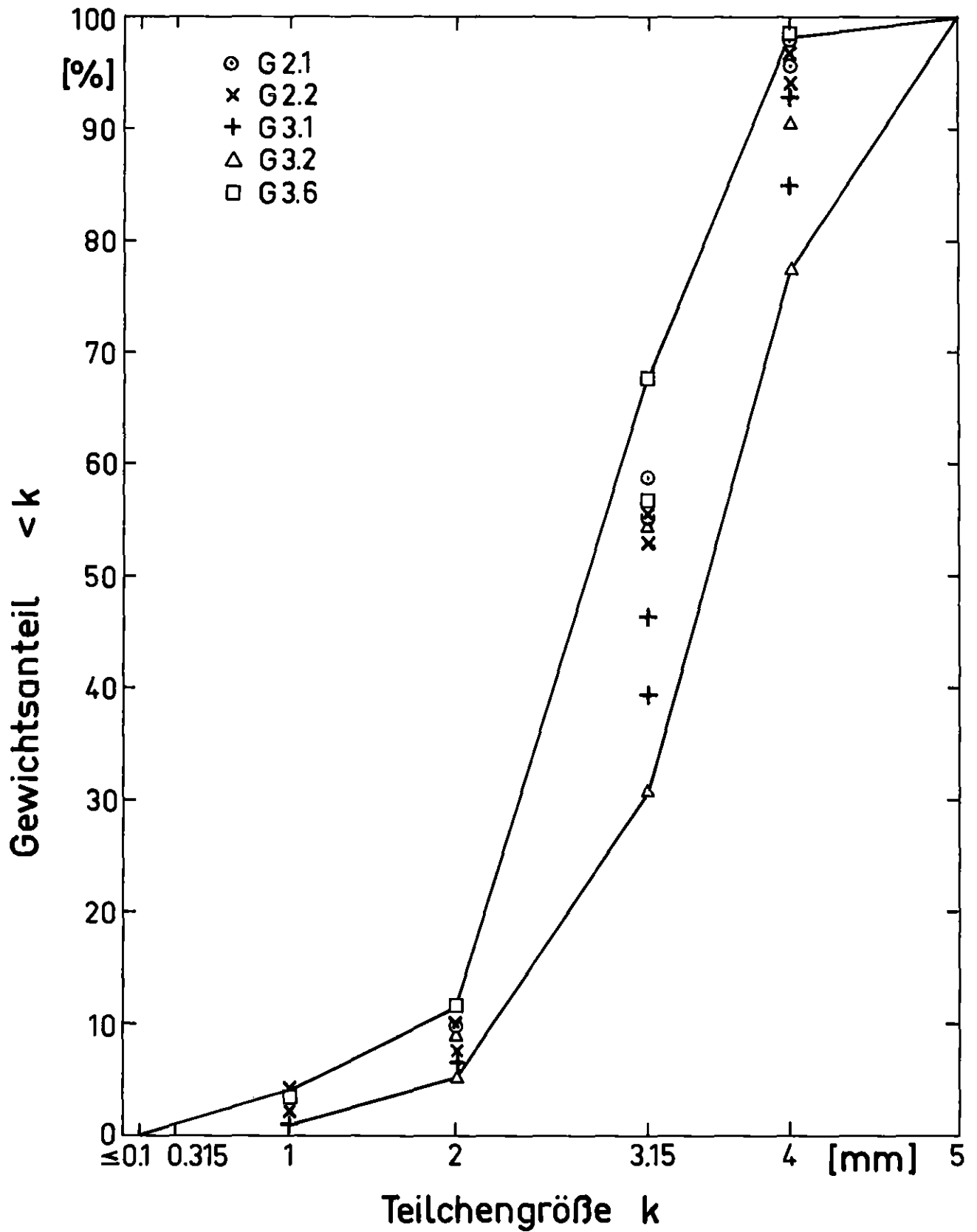


**KfK** IT-80  
PNS 4237-481

# FR2 In-Pile Tests: Series G 2/3

Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses

Abb.: 53.1



A N H A N G

Meßwerte vor Auslösung der Transienten,  
Versuch G 2.1 bis G 3.3

Tabelle 16.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 2.1

Datum: 14.11.78

Uhrzeit: 12.15.48

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	510 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	501 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	345 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	342 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	373 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	405 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	353 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	378 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	373 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	333 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	419 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	417 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	404 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	448 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	491 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	465 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	64 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	59 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	61 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer.	541 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	30,9 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	169 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	62-64 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	818 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h



Tabelle 16.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 2.2

Datum: 16.11.78

Uhrzeit: 14.02.09

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	509 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	346 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	345 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	374 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	407 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	352 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	380 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	375 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	337 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	408 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	426 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	420 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	419 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	419 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	422 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	59 bar
18	P 63	Druck vor Blende	58 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	59 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	75 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	541 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	30,9 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	169 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	62-64 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	818 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h

Tabelle 16.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 3.1

Datum: 21.11.78

Uhrzeit: 11.28.12

CALAS-Adresse	Meßstelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	343 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	340 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	368 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	402 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	361 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	377 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	372 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	331 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	407 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	402 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	414 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	417 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	429 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	412 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	59 bar
18	P 63	Druck vor Blende	58 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	58 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	61 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer.	542 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	28,6 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	158 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	61-64 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	64 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	832 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 kg/h

Tabelle 16.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 3.2

Datum: 28.11.78

Uhrzeit: 12.09.52

CALAS-Adresse	Meßstelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	509 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	501 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	348 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	346 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	374 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	409 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	354 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	381 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	376 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	339 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	406 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	408 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	406 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	432 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	435 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	421 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	62 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	59 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	73 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	540 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	28,2 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	176 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	52 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	64-68 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	840 mbar
	m	Dampfmengenstrom	116 kg/h

Tabelle 16.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 3.3

Datum: 24.11.78

Uhrzeit: 12.11.40

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	508 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	499 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	338 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	336 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	364 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	396 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	349 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	370 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	365 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	325 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	403 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	360 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	345 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	416 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	-
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	390 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	64 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	60 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,3 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	126 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	288 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	539 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	28,8 K
	NBE	mittlere Leistung der umgeb. BE's	145 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	60-63 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	826 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

## Danksagung

Allen an den Versuchsdurchführungen und -auswertungen Beteiligten sei an dieser Stelle vielmals gedankt.

Besonderer Dank gilt den Herren G. Harbauer, H. Hespeler, W. Knappschneider, W. Legner, W. Leiling, A. Scherer und K. Wagner für die Mithilfe bei der Erstellung dieses Berichtes. Für die Ermittlung der Flußdichteprofile während der Versuche sei Herrn R. Heine, für die Aufbereitung der CALAS-Meßwerte Herrn A. Grünhagen und für die Durchführung der konstruktiven Arbeiten zu den Versuchseinsätzen sei Herrn K. Baumgärtner besonders gedankt. Dank gesagt sei auch Herrn F. Schmitt für die Betreuung des DK-Kreislaufes am FR2.