

KfK 3061
Februar 1981

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall

Bericht über die Versuchsserie G 1

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3061

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten
beim Kühlmittelverluststörfall

Bericht über die Versuchsserie G 1

M. Prüßmann
E.H. Karb
L. Sepold

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 G1 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 G1 (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 G1.

Abstract

This report describes the results of the Test Series G1 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 G1 (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 G1 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 der DWR- (Druckwasserreaktor-) Stäbe 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 Innendrückerbeaufschlagung, die typisch für DWR-Brennstäbe sind.

Die Versuchsreihe G1 bestand aus fünf Einzelstab-Versuchen, die mit vorbestrahlten Prüflingen vom 22.2. bis 3.3.1978 durchgeführt wurden. Der Nominalabbrand der Stäbe betrug 35000 MWd/t. Als Ausgangswerte für die Transienten wurden Innendrucke von 50 bis 90 bar (warm) eingestellt. Vier Einzelstäbe barsten während der Aufheizphase, die Berstdrucke betragen 68, 41, 83 bzw. 52 bar, die Bersttemperaturen 730, 890, 785 bzw. 780 °C (in der Reihenfolge der Versuche G 1.2, G 1.3, G 1.4 und G 1.5). Die größten Umfangsdehnungen betragen 30, 62, 33 und 41 %. Der Stab des Versuches G 1.1 ist nicht gebarsten, er wurde zu Beginn der Transiente undicht.

Im Unterschied zu den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen zeigten die G1-Versuchsstäbe 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 G1-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 G1

Summary

This report describes the results of the Test Series G1, Tests G 1.1 through G 1.5, 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 G1 tests were performed from February 22, 1978 to March 3, 1978. The nominal burnup of the test rods was 35000 MWd/t. The test rods were pressurized with helium to hot internal pressures between 50 and 90 bar and were subjected to rod powers between 23 and 45 W/cm.

The test rods burst during the heatup phase at pressures of 68, 41, 83 and 52 bar, respectively. The burst temperatures were determined to be 730, 890, 785, and 780 °C for tests G 1.2 through G 1.5. The maximum total circumferential elongations

amount to 30, 62, 33, and 41 %, respectively. The G1.1 test rod did not burst due to a leak that occurred at the begin of the transient operation.

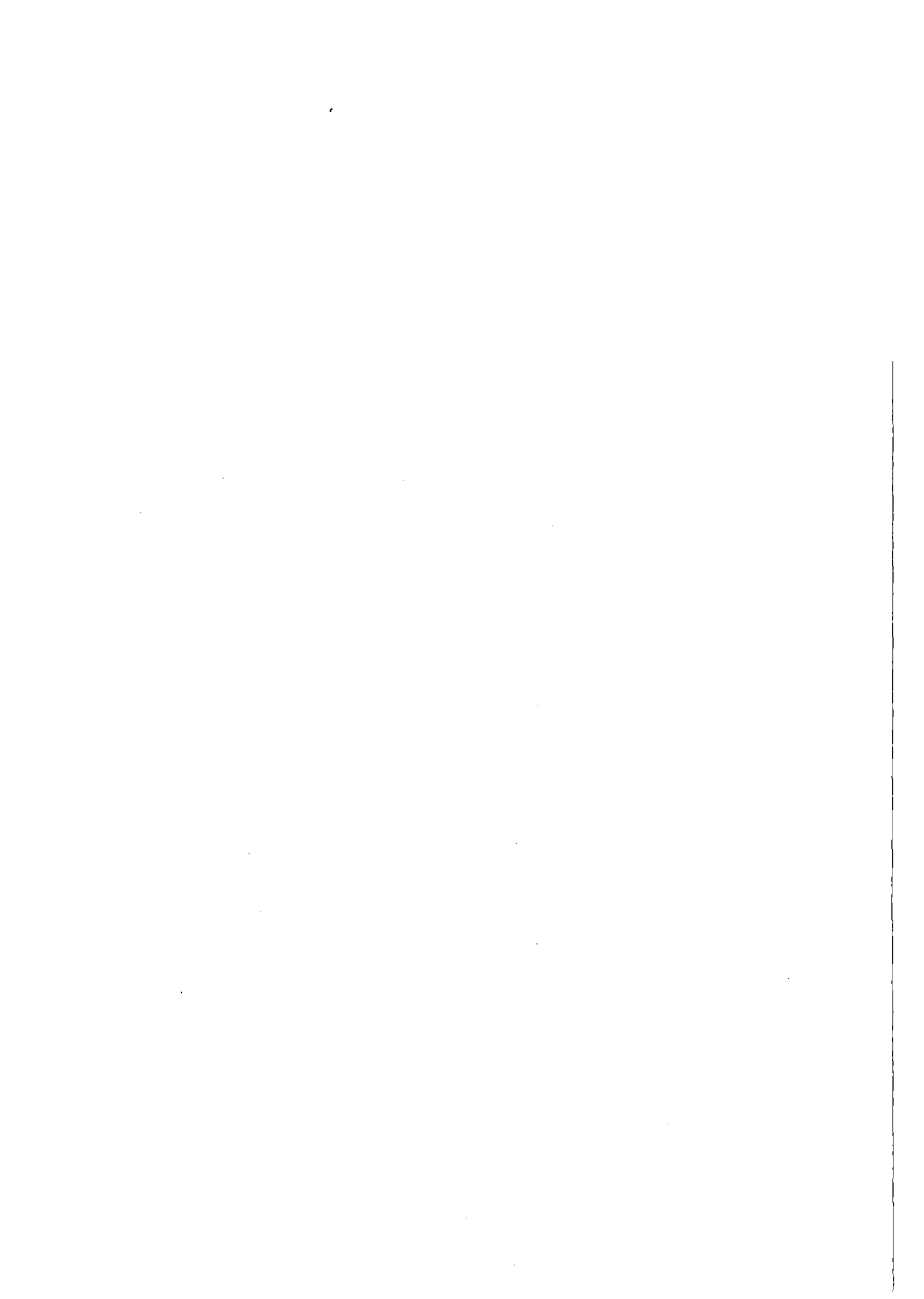
The G1 tests - like the previous tests with irradiated specimens - showed cracked fuel after the irradiation (prior to the tests) and a fragmentation of fuel pellets after the transient tests due to cladding ballooning. The posttest results indicated a reduction of the pellet stack length of the test rods.

The burst data of the G1 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 G1-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 Nachuntersuchung	29
6.1 Durchstrahlung der Stäbe	29
6.2 Fotodokumentation	31
6.3 Vermessung der Prüflinge	31
7. Brennstoffzustand und -verhalten	41
8. Literatur	44
Anhang: Meßwerte vor Auslösung der Transienten	149



<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
1. Vorbestrahlungseinsatz, vereinfacht	45
2. Axiale Abbrandverteilung im Brennstab G 1.6	46
3. Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung, Bündel G1	47
4. Zur Messung des Stabinnendrucks	48
5. Nuklearprüfling vereinfacht	49
6.1 - Durchmesserabmaße und Einfüllspiel, Versuche 6.5 G 1.1 bis G 1.5	50 - 54
7. DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislauf- schema	55
8. Versuchsablauf, Schema	56
9. Cladding Thermocouple (Schematic)	57
10.1 - Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil 10.5 Versuche G 1.1 bis G 1.5	58 - 62
11. In-pile-Versuche, G1, Prüflingsleistungen NA und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente	63
12.1 - Nominierte Axialprofile am Prüfling, 12.5 Versuche G 1.1 bis G 1.5	64 - 68
13.1 - Druck im Prüflingsplenum, 13.5 Versuche G 1.1 bis G 1.5	69 - 73
14.1 - Axiales Temperaturprofil, 14.5 Versuche G 1.1 bis G 1.5	74 - 78
15.1 - Hüllrohrtemperaturen T 131 bis T 136 15.5 im Versuch G 1.1 bis G 1.5	79 - 83
16. Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt), Versuch G 1.3	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 1.5 vor Versuch	88
21. Winkellagen der Neutronenradiografieaufnahmen G 1.1	89
22. Neutronenradiografie G 1.1 nach Versuch (Bl. 1 und 2)	90 + 91
23. Winkellagen der NERA-Aufnahmen G 1.2	92
24. Neutronenradiografie G 1.2 nach Versuch (Bl. 1 und 2)	93 + 94
25. Winkellagen der NERA-Aufnahmen G 1.3	95
26. Neutronenradiografie G 1.3 nach Versuch (Bl. 1 und 2)	96 + 97
27. Winkellagen der NERA-Aufnahmen G 1.4	98
28. Neutronenradiografie G 1.4 nach Versuch (Bl. 1 und 2)	99 + 100
29. Winkellagen der NERA-Aufnahmen G 1.5	101
30. Neutronenradiografie G 1.5 nach Versuch (Bl. 1 u. 2)	102+103
31. FR2 In-Pile Tests	
View and X-Ray Photograph, Test G 1.1	104
32. View and X-Ray Photograph, Test G 1.2	105
33. View and X-Ray Photograph, Test G 1.3	106
34. View and X-Ray Photograph, Test G 1.4	107
35. View and X-Ray Photograph, Test G 1.5	108
36. Views of the Ruptured Zone, Test G 1.2	109
37. Views of the Ruptured Zone, Test G 1.3	110
38. Views of the Ruptured Zone, Test G 1.4	111
39. Views of the Ruptured Zone, Test G 1.5	112
40. FR2 In-Pile Tests	
Cladding Length Change vs. Burst Temperature	113

	<u>Seite</u>
41.1 - Circumferential Cladding Thickness Distribution 41.5 (as Received) Presented as Differences from the Nominal 0,725 mm, Tests G 1.1 - G 1.5	114 - 118
42. Circumferential Elongations and Axial Power Pro- files of the G 1.1 through G 1.5 Tests	119
43.1 - Axial Profile of Circumferential Strain. 43.5 Tests G 1.5 bis G 1.6	120 - 124
44. Typical spiral profile; posttest measured rod diameters of test A 2.2	125
45.1 Versuch G 1.2, Polarmessung 1 (296 mm von UKF)	126
45.2 Versuch G 1.2, Polarmessung 2 (301 mm von UKF)	127
46.1 Versuch G 1.3, Polarmessung 1 (304 mm von UKF)	128
46.2 Versuch G 1.3, Polarmessung 2 (340 mm von UKF)	129
47.1 Versuch G 1.4, Polarmessung 1 (297 mm von UKF)	130
47.2 Versuch G 1.4, Polarmessung 2 (335 mm von UKF)	131
48.1 Versuch G 1.5, Polarmessung 1 (321 mm von UKF)	132
48.2 Versuch G 1.5, Polarmessung 2 (373 mm von UKF)	133
49.1 - FR2 In-Pile Tests G 1.1 through G 1.5 49.5 Cross Section, Max. Circumferential Strain	134 - 138
50. FR2 In-Pile-Single Rod Tests in Steam Max. Circumferential Elongations vs. Burst Temp.	139
51. FR2 In-Pile Tests, Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	140
52. FR2 In-Pile Tests, Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop.	141
53. Cross Section of the G 1.6 Fuel Rod	142
54.1 - View of the Fuel Condition of the G 1.6 Fuel Rod 54.3	143 - 145
55. Fuel Pellet Fragments from G 1.6 Fuel Rod	146
56.1 - FR2 In-Pile Tests G 1. 56.2 Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses	147 - 148

<u>Verzeichnis der Tabellen</u>	<u>Seite</u>
1. In-pile-Versuche zum Brennstabverhalten, Test Matrix	3
2. Nominal Test Fuel-Rod Data	9
3. Gemessene Prüflingsdaten der G1-Stäbe	11
4.1 - Daten der Versuche G 1.1 bis G 1.5 4.5	14 - 18
5. Anordnung der Hüll-TE in den Versuchen G 1.1 bis G 1.5	20
6. Kühlmitteldaten der G1-Versuche	21
7. Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe G1	26
8. Hülltemperaturgradienten an den Beulstellen, Versuche G 1.1 bis G 1.5	28
9. Längenänderung der Brennstoffsäule durch die G1-Versuche	30
10. Längenänderung und Rißlage der G1-Stäbe	32
11. Circumferential Strain Data from Rod Diameter Measurement, G 1.1 through G 1.5	34
12. Ovalität im Beulbereich der G1-Versuchsstäbe	36
13. Umfangsdehnung im Beulbereich der G1-Versuchsstäbe	36
14. Exzentrizität der Beule bei den G1-Versuchsstäben	38
15. Krümmung der G1-Versuchsstäbe	38
16.1 - Tabelle der Meßwerte vor Auslösung der Transiente, 16.5 G 1.1 bis G 1.5 (Anhang)	150-154

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 ungebaulten Prüflinge der Serie G1, 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 1.6 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 G1 sollte das Verhalten von vorbestrahlten Prüflingen untersucht werden. Von den sechs bis zu einem Abbrand von 35.000 MWd/t bestrahlten Stäben G 1.1 bis G 1.6 waren fünf einer Transiente auszusetzen, der Stab G 1.6 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 μm	Number of Tests	Target Burnup 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						
III (Main Parameter: Burnup)	C	6	190	5	2500	25 - 110
	D	6	190	-	5000	cancelled
	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 G1-Serie kann Abb. 2 entnommen werden. Als Grundlage der angegebenen Abbrandwerte dienten die kalorimetrisch ermittelten Leistungen des Einsatzes. Als Endabbrand ergab sich daraus ein Wert von 35.990 MWd/t. Der entsprechende Wert aus der radiochemischen Abbrandanalyse des Stabes G 1.6 beträgt als axialer Mittelwert 3,7 at-% /4/. Das entspricht 33.781 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 ist in Abb. 3 wieder-

gegeben. Es beruht auf sechs axialen Abbrandproben (fünf Proben des G 1.6-Stabes und einer Kontrollprobe des Stabes G 1.1), 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_U 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 G1 in Abb. 3 (Abschaltungen und die Dauer von Betriebspausen sind nicht enthalten).
- 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 ≥ 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 Probenrägern 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 Probenrägers verbunden. Der Plenumsdruck, der sich während der Vorbestrahlung eingestellt hat, wird ermittelt, die Dichtheit der Koppelstelle geprüft.

Die am Probenräger 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 Dampfrohr 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° 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 ₂
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 ³	10.35
Density, %T.D.*	94.4
Insulating pellets	
Material	Al ₂ O ₃
Diameter, mm	9.15
Length, mm	8
Void Volumes	
Dishing per pellet, mm ³	16
Gap Volume (nominal gap), cm ³	1.57
Plenum (excl. spring), cm ³	15.87
End plug, Capillary tube, and pressure transducer, cm ³	12.25
Fillgas composition	100 % Helium

*) T.D. = theoretical density

3.2 Daten der Prüflinge für die Versuchsserie G1

Die verwendeten sechs Prüflinge haben die folgende Bezeichnung

Stab Nr. 3 → G 1.1
Stab Nr. 4 → G 1.2
Stab Nr. 5 → G 1.3
Stab Nr. 7 → G 1.4
Stab Nr. 9 → G 1.5
Stab Nr. 8 → G 1.6 (Abbrandstab).

Alle Prüflinge der G1-Serie haben die Spaltweite "s", d.h. einen Nennwert des diametralen Einfüllspiels von 150 μm .

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 1.1 bis G 1.5 eingesetzten Stäbe.

Tabelle 3 GEMESSENE PRÜFLINGSDATEN GI-STÄBE

	G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5	G 1.6	
Brennstablänge (mm)	973,0	973,0	973,0	972,9	972,9	973,0	
Länge der aktiven Zone (mm)	498,7	499,4	500,3	500,3	500,0	500,3	
Länge des Brennstabplenums (mm)	312,0	311,0	310,0	310,5	310,5	310,0	
Plenumvolumen (cm ³) [a]	16,02	15,95	15,90	15,88	15,90	15,85	
Dishingvolumen (cm ³) [a]	0,773	0,753	0,757	0,777	0,775	0,770	
Spaltvolumen (cm ³) [a]	1,302	1,271	1,306	1,239	1,272	1,264	
Hüllaußendurchmesser (mm)	{ max.	10,753	10,751	10,754	10,766	10,766	10,763
	{ mittel	10,748	10,747	10,749	10,752	10,758	10,756
	{ min.	10,744	10,736	10,743	10,745	10,750	10,749
Hüllinnendurchmesser (mm)	{ max.	9,311	9,311	9,315	9,307	9,310	9,303
	{ mittel	9,303	9,303	9,306	9,295	9,299	9,296
	{ min.	9,296	9,289	9,298	9,284	9,285	9,287
Wandstärke (mm)	{ max.	0,738	0,740	0,739	0,742	0,740	0,740
	{ mittel	0,723	0,722	0,721	0,729	0,729	0,730
	{ min.	0,707	0,705	0,706	0,715	0,716	0,718
Brennstoffdichte (g/cm ³)	10,42	10,42	10,43	10,43	10,44	10,45	
Tablettendurchmesser (mm)	{ max.	9,150	9,152	9,152	9,150	9,151	9,146
	{ mittel	9,145	9,149	9,148	9,145	9,145	9,143
	{ min.	9,141	9,144	9,141	9,140	9,141	9,141
mittleres diametrales Einfüllspiel (mm) [a]	0,158	0,154	0,158	0,150	0,154	0,153	

[a] aus Meßdaten berechnet

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
Dampf-temperatur 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 (~ 920 °C) die Prüflingsleistung durch Reaktorscram praktisch abgeschaltet. Die Hülltemperatur beginnt langsam zu sinken. Nach Erreichen einer weiteren Temperaturmarke (~ 740 °C) wird der Kühldampfstrom wieder eingeschaltet; die Hülltemperatur sinkt schnell ab, ähnlich wie beim Abschrecken (Quenching) durch Flutung beim KVS im wirklichen Reaktor. 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.

Von den fünf G1-Versuchen wurde bei den Versuchen G 1.1 und G 1.5 das Quenching durchgeführt, bei den übrigen drei Versuchen nicht.

5. Versuchsdaten

Die Tabellen 4.1 bis 4.5 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßwerte der Versuche G 1.1 bis G 1.5 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	22,1	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,010	Abbrand 35.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	39,76 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		39,4 bis 44,6 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		31,7 bis 37,4 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	21,98 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	62,52
Maximum	Der Stab war undicht!	--
beim Temperaturmaximum von T		--
BERSTDRUCK		-- 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		369	367	370	375	374	394
bei max. Innendruck nach -- sec		--	--	--	--	--	--
rel. Maximum nach -- bis -- sec		--	--	--	--	--	--
beim Bersten -- nach -- sec		--	--	--	--	--	--
abs. Maximum nach 70,6 bis 71,6 sec		929	938	935	914	881	894
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		+ K				-- °C	

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

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T134 bei 400 °C nach 5,8 sec		20,2 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	9,3 bis 11,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	26,4 bis 30,9 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 132	65,5 sec

DATEN DES VERSUCHS G 1.1 VOM 22.2.1978

TABELLE 4.1

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	26	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$ 1,025		Abbrand 35.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	45,39 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		42,0 bis 50,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		-- bis -- W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	27,18 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	73,02
Maximum	37,50	75,12
beim Temperaturmaximum von T 133	45,00	74,16
BERSTDRUCK	55,00	68,38 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		390	376	383	389	395	381
bei max. Innendruck nach 37,5 sec		687	638	658	676	697	644
rel. Maximum nach 30,0 bis 50,0 sec		716	666	682	711	728	670
beim Bersten nach 55,0 sec		691	672	654	713	731	681
abs. Maximum nach 109,5 bis 119,0 sec		889	855	843	895	934	881
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 655 + 75 K						730 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	29 cm
---	--------------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 135 bei 397 °C nach 3,5 sec	14,6 K/s
bei 450 bis 500 °C T 131 bis T 136	13,5 bis 16,5 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T -- bis T --	-- bis -- sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 135	105,8 sec

DATEN DES VERSUCHS G 1.2 VOM 24.2.1978

TABELLE 4.2

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	20	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,017	Abbrand 35.000	MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	37,54 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		37,5 bis 38,5 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		30,3 bis 32,7 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	21,19 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	50,27
Maximum	45,50	51,41
beim Temperaturmaximum von T 135	66,00	45,81
BERSTDRUCK	70,00	41,17 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		375	381	380	384	386	389
bei max. Innendruck nach 45,50 sec		785	785	792	797	779	782
rel. Maximum nach 63,0 bis 70,0 sec		868	862	853	848	844	857
beim Bersten nach 70,00 sec		868	862	850	795	833	856
abs. Maximum nach 101,0 bis 102,5 sec		875	907	887	856	917	885

BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert) 830 + 60 K	890 °C
--	--------

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie) 32,5 cm
--

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 134 bei 450 °C nach 8,0 sec	20,1 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	8,7 bis 9,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	29,9 bis 32,3 sec
Dauer der Aufheizphase bis 917 °C bei T 135	102,0 sec

DATEN DES VERSUCHS G 1.3 VOM 1.3.1978

TABELLE 4.3

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	15,8	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,013	Abbrand	35.000 MWd/t
spezifische Stärkeleistung	mittlere thermische	NTH	23,12 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		27,7 bis 30,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		23,8 bis 25,8 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	16,05 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	90,08
Maximum	37,00	91,31
beim Temperaturmaximum von T 133	55,70	87,37
BERSTDRUCK	58,20	83,26 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		345	356	366	373	375	362	
bei max. Innendruck nach 37,0 sec		639	651	660	648	659	649	
rel. Maximum nach 55,2 bis 59,3 sec		739	724	740	750	772	760	
beim Bersten nach 58,20 sec		736	719	723	754	769	759	
abs. Maximum nach 120,0 bis 123,7 sec		898	874	835	919	917	900	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	733 + 52 K						785	°C

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	31,5 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 133 bei 385 °C nach	4,8 sec	14,63	K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	5,7 bis 6,6	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	38,1 bis 41,0	sec
Dauer der Aufheizphase bis 919 °C	bei T 134	122,1	sec

DATEN DES VERSUCHS G 1.4 VOM 3.3.1978

TABELLE 4.4

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	25	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,012	Abbrand	35.000 MWd/t
spezifische Stärkeleistung	mittlere thermische	NTH	38,49 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 600°C		38,2 bis 41,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		28,0 bis 31,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	26,52 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	57,97
Maximum	40,50	59,90
beim Temperaturmaximum von T 134	56,00	56,05
BERSTDRUCK	60,50	51,58 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		381	382	404	423	450	412	
bei max. Innendruck nach 40,50 sec		714	707	764	759	781	761	
rel. Maximum nach 56,0 bis 61,5 sec		758	744	786	784	--	794	
beim Bersten nach 60,50 sec		753	737	771	769	804	784	
abs. Maximum nach bis sec		805	787	830	837	917	893	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)	770 + 10 K						780 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	34,5 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG			
Maximum T 133 bei 435 °C nach 4,7 sec		22,35	K/s
bei 600°C	T 131 bis T 136	11,0 bis 12,5	K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	29,8 bis 35,0	sec
Dauer der Aufheizphase bis 917 °C	bei T 135	92,5	sec

DATEN DES VERSUCHS G 1.5 VOM 23.2.1978

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 \varnothing mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platinhülse, da die direkte Schweißverbindung Inconel/Zry problematisch ist. Der überstehende Teil der Pt-Hülse wird flachgedrückt und der so entstandene Lappen an das Hüllrohr gepunktet (siehe Abb. 9, Version A). Beim Versuch G 1.5 wurde die Platinhülse der Thermoelemente erstmals 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 1.1 - G 1.5

TE-Bezeichnung	axiale Lage (a) (Soll-Maße)	Axiale Lage (Ist-Maße) und Umfangslage (b)				
		G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
T 131	200 mm	199 mm/255°	198 mm/253°	198 mm/347°	199 mm/100°	200 mm/259°
T 132	250 mm	255 mm/195°	249 mm/193°	248 mm/287°	249 mm/ 40°	250 mm/199°
T 133	300 mm	300 mm/135°	299 mm/133°	299 mm/227°	299 mm/340°	300 mm/139°
T 134	350 mm	350 mm/75°	349 mm/73°	349 mm/167°	350 mm/280°	350 mm/79°
T 135	400 mm	400 mm/15°	400 mm/13°	400 mm/107°	400 mm/220°	400 mm/19°
T 136	450 mm	450 mm/315°	450 mm/313°	450 mm/47°	450 mm/160°	450 mm/319°

(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 1.1 bis G 1.5 unmittelbar vor Auslösung der Transiente gibt Tabelle 6 wieder.

Tabelle 6 Kühlmitteldaten G1-Versuche

Versuch	G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
Kühlmittelintrittstemperatur T 115 (°C)	323	335	334	320	330
Kühlmittelaustrittstemperatur T 116 (°C)	343	358	355	333	351
Kühlmitteldruck in der Teststrecke ^[a] (bar)	64	61	61	58	60
Kühlmittelmengenstrom (kg/h)	117	122	117	113	119

[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 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 1.1 bis G 1.5 zu

NTH = 38,8 W/cm (G 1.1), 45,4 W/cm (G 1.2), 37,5 W/cm (G 1.3),
23,1 W/cm (G 1.4), bzw. 38,5 W/cm (G 1.5).

- 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^(a) 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 etwa 1 % pro TE-Kabel erhöht werden, beim obersten Thermoelement T 136 insgesamt um 6 % (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 G1-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 relativem 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 Reaktorbrunnenelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brennelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Aufgrund der bei allen G1-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 G1-Versuche wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

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

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA) liefert einen 71 % höheren k-Wert, nämlich 0,325 (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) $k = f \cdot (\varphi_{Pr.,max.} / \varphi_{Core}) = f \cdot \varphi$
abgeschätzt wurde $f = 0,17$, gemessen wurde $\varphi \sim 1,1$

Reaktorpositionen axiale Flußdichteprofile über die ganze Corehöhe aufgenommen und auf jeder Axialkote z gemittelt. Das so gewonnene mittlere Flußdichteprofil \varnothing_{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 nominierte, d.h. 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 1.1 bis G 1.5 dargestellt. Das Spaltstoffprofil darin ist aus den Werten von fünf Einzelproben des Stabes G 1.6 (15, 28, 266, 397 und 467 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^(a).

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

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

in den Abb. 10.1 bis 10.5 (Versuche G 1.1 bis G 1.5) zusammen mit den oben erwähnten NA-Werten aufgetragen. Auch der jeweilige axiale Formfaktor, d.h. das Verhältnis von Maximal- zu Mittelwert, ist darin angegeben.

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

5.4 Prüflingsinnendruck

Die zeitlichen Druckverläufe der Versuche G 1.1 bis G 1.5 zeigen die Abb. 13.1 bis 13.5. Daraus ergeben sich die Berstzeitpunkte zu 55 s, 70 s, 58,2 s und 60,5 s in der Reihenfolge der Versuche G 1.2 bis G 1.5.

Der Stab G 1.1 war undicht und ist daher nicht geborsten.

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 wenig. Man erkennt die Aufheizung des Dampfes von etwa 20 K beim Strömen durch den Kühlkanal vom untersten TE (T 131, 200 mm von UKF) bis zum obersten (T 136, 450 mm von UKF). 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 $t = 55, 70, 58, 61$ s (G 1.2 bis G 1.5) platzten die Stäbe (siehe Druckverlauf in den Abb. 13.2

bis 13.5). Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurde die Leistung zurückgenommen. Das Zuschalten der Dampfkühlung (Quenching) im weiteren Versuchsablauf erfolgte nur bei den Versuchen G 1.1 und G 1.5.

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 1.3 sind außerdem die Temperatureinbrche der sechs Temperaturmeßstellen in Abb. 16 vergrößert, d.h. als Ausschnitt aus Abb. 15.3 dargestellt.

Die gemessenen maximalen Temperatureinbrche der G1-Versuche können Tabelle 7 entnommen werden.

Tabelle 7

Maximale Temperatureinbrche nach dem Bersten der Versuchsstäbe G1

Versuch	Temp. mest.	Zeitpunkt (s)	Temp. abfall (K)	Abst. Meßstelle/Rimitte	
				(mm)	Grad ^(b)
G 1.1 ^(a)	-	-	-	-	-
G 1.2	T 133	55,0	19	1	145
G 1.3	T 134	63,0	120	29	147
G 1.4	T 133	55,7	76	16	147
G 1.5	T 134	56,0	93	0	97

(a) Der Stab ist nicht geborsten

(b) kleinster Winkel

Die axialen Temperaturverläufe (Abb. 14.1 bis 14.5) lassen 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^(a) /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 1.3 und G 1.4 liegen in der Mitte des Bereichs der ORNL-Daten und im Streubereich der KfK-in-pile-Daten. Die Bersttemperaturen der Versuche G 1.2 und G 1.5 liegen noch unterhalb der 0 K/s-Kurve des ORNL, was auf einen anderen Temperaturverlauf der Versuche während der Verformung zurückzuführen ist (Temperaturplateau).

(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 1.1 bis G 1.5 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 1.1	10,5
G 1.2	14,7 *)
G 1.3	9,0
G 1.4	6,0
G 1.5	12,0 **)

*) bei 450 °C

**) bei 600 °C

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 1.5 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, 23, 25, 27 und 29 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. Auch das beim Abschrecken durch den Riß in die Hüllrohre als Dampf eingedrungene Wasser, zum Zeitpunkt der Aufnahme z.T. noch als Kondensat vorhanden, erscheint dunkel (unterer Brennstoffbereich, unterer Bereich Druckfeder im Gasplenum G 1.5, Abb. 30, Blatt 2).

Aus den Aufnahmen (Abb. 22, Blatt 1 und 2, für G 1.1, bis zu Abb. 30, Blatt 1 und 2, für G 1.5) 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).
- Bei den Versuchen G 1.2 und G 1.4 sind die Prüflinge weniger stark aufgeweitet als bei G 1.3 und G 1.5.

Tabelle 9

Längenänderung der Brennstoffsäule durch die G1-Versuche

Versuch	Montagemaß [a] (mm)	Länge nach Versuch (mm)	Längendiffe- renz (mm)
G 1.1	499	498	1
G 1.2	499	496	3
G 1.3	500	438	62
G 1.4	500	486	14
G 1.5	500	455	45

[a] wird gleichgesetzt mit dem Maß nach der Bestrahlung

Neben den Radiografien werden in den Heißen Zellen Röntgenaufnahmen der Versuchsstäbe hergestellt (Abb. 31, 32, 33, 34 u. 35). 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. Das bei den Neutronenradiografien noch sichtbare Wasser dürfte wohl bei dem bis zur Röntgung stattgefundenen Transport und der Handhabung in waagrechter Lage ausgelaufen sein. Es wäre auf der Röntgenaufnahme aber ohnehin nicht sichtbar.

6.2 Fotodokumentation

In Gegenüberstellung mit den Röntgenaufnahmen ist auf den Abb. 31, 32, 33, 34 und 35 ein Stab-Abschnitt mit der entsprechenden Ansicht der Rißstelle gezeigt. Die Aufnahmen wurden bald nach Abziehen des iDFR erstellt, wobei die noch haftenden TE z.T. sichtbar sind. Auf den weiteren Abb. 36, 37, 38 und 39 sind Detailaufnahmen der Beul- bzw. Rißstellen gezeigt. Die TE sind hier bereits entfernt. Der Stab G 1.5 wurde beim Demontieren des Dampfleitungsrohres versehentlich an der Beulstelle durchtrennt (Abb. 35 und 39).

Neben den hier beispielhaft gezeigten Bildern existieren von jedem Stab noch Aufnahmen des gesamten Prüflings unmittelbar nach Demontage des iDFR sowie weitere Detailaufnahmen der Beulstelle.

6.3 Vermessung der Prüflinge

Die Längenänderungen der G1-Versuchsstäbe sowie die Rißlagen 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 Rißlage wurde mit Hilfe eines Maßstabes bestimmt.

Tabelle 10 Längenänderung und Rißlage G1-Stäbe

	G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
Gesamtlänge vor der Transiente (mm)	974,2	974,1	974,4	974,5	974,5
nach der Transiente (mm)	978,2	976,5	979,0	975,2	*
Bleibende Längung des Stabes (mm)	4,0	2,4	4,6	0,7	-
Riß-Anfang (mm von UKF)	Der Stab ist nicht geborster	297,0	309,0	304,0	325,0
Riß-Ende (mm von UKF)		300,5	335,5	329,0	369,0
Riß-Länge (mm)		3,5	26,5	25,0	44
Riß-Breite max. (mm)		0,4	2,6	10,0	7,2
Riß-Winkellage zur Kerbe		348°	314°	193°	0°

*) nicht meßbar

In Abb. 40 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 azimuthalen Rißlagen sind in den Abb. 41.2 bis 41.5 in die Diagramme der vor der Bestrahlung bestimmten Wandstärkeverteilung über dem Umfang eingezeichnet. Die Wandstärke ist darin 18°-weise als Abweichung vom Sollwert in (µm) angegeben. Die angegebene Wandstärkeverteilung gilt für die Rißebeine, 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 azimuthalen Rißlagen sind in Bezug auf die Ausgangs-Wandstärke nicht systematisch. Die Rißlage wird generell nicht als Folge des azimuthalen Wandstärkeprofils, sondern als Folge der azimuthalen Temperaturverteilung angesehen.

Durchmesseränderung und Umfangsdehnung

Die Ergebnisse der Durchmesseränderungen und Umfangsdehnungen der G1-Stabhüllen sind in den Abb. 42 und 43.1 bis 43.5 dargestellt. Dabei sind die Dehnprofile aus den Versuchen G 1.2 bis G 1.5 zusammen in Abb. 42, die Einzelkurven der 4 Stäbe in den Abb. 43 wiedergegeben.

Die bleibende Durchmesserzunahme erstreckt sich über den gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs. Oberhalb der Brennstabmitte an der Versagensstelle haben sich die Beulen ausgebildet. Der Versuchsstab G 1.1 zeigt eine geringfügige Dehnung von 1,5 % über den gesamten Brennstoffbereich (Abb. 43.1). Trotz des Lecks an der Stabkoppelstelle während der Transiente muß der innere Restdruck für diese geringe Aufweitung gesorgt haben.

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 1.3 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 $\leq 50 \mu\text{m}$),

FR2 IN-PILE TESTS G 1.1 THROUGH G 1.5
CIRCUMFERENTIAL STRAIN DATA FROM ROD DIAMETER MEASUREMENT

KfK
IT 1980

Test G 1.1		Test G 1.2		Test G 1.3		Test G 1.4		Test G 1.5	
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
150	1,5	130	5	95	5	128	5	125	5
400	1,5	206	10	130	10	212	10	205	10
500	0	235	15	160	15	260	15	235	15
		265	20	206	20	275	20	270	20
		285	25	232	25	290	25	290	25
		297	[c] (29)	285	30	300	30	318	30
		300,5	(26)	298	35	304	(32)	322	35
		310	25	302	40	329	(27)	325	(37)
		336	20	305	45	338	25	369	(37)
no rupture opening		370	15	308	(47)	358	20	385	35
		400	10	337	(62)	380	15	393	30
		460	5	338	60	410	10	400	25
		500	0	345	55	480	5	440	20
				350	50	500	0	456	15
				355	45			482	10
				360	40			490	5
				370	35			500	0
				385	30				
				405	25				
				427	20				
				447	15				
				467	10				
				485	5				
				500	0				
max.at ./.	./.	max.at 297	29,5	max.at 326	62	max.at 318	33	max.at 342	41
[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									

- 2) Bereiche nahe dem Riß, die eine deutliche Ovalität aufweisen,
- 3) der Rißbereich.

Die drei Bereiche sind in Abb. 44 verdeutlicht. Sie zeigt einen typischen Wendelschrieb eines Versuchsstabes (hier Versuch A 2.2).

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 Querschlifffbildern ermittelt.

Die Ovalität $D_{\max} - D_{\min}$ wird Polarschrieben (Wendelschriebe ohne Längsvorschub des Stabes) entnommen. Die Polarschriebe erfassen die Ovalität möglichst nahe der Rißstelle. Die Abbildungen 45.1 und .2 bis 48.1 und .2 zeigen die Polarschriebe der G1-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 bestimmt. Die Ergebnisse der Umfangsmessung und der prozentualen Umfangszunahme $\Delta U/U_0$ sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die maximal ermittelten Umfangszunahmen der Stäbe G 1.2 bis G 1.5 sind demnach: 29,5 %, 62 %, 33 % und 41 %. Sie sind außerdem in den Abbildungen 49.1 bis 49.5 veranschaulicht.

Diese größten Umfangszunahmen der Hülle sind in Abb. 50 zusammen mit den anderen Versuchspunkten dieses Versuchsprogramms eingetragen und mit den von BMI [a] in /8/ und den von KfK/IRB in /9/ angegebenen Umfangsdehnungen als Funktion der Temperatur verglichen. Die BMI-Daten sind aus Versuchen mit bestrahlten Hüllrohren, die KfK/IRB-Daten aus Bündelversuchen mit Brennstab-

[a] Battelle-Columbus Laboratories, Columbus, Ohio, U.S.A.

Tabelle 12

Ovalität im Beulbereich G1-Versuchsstäbe

Versuch		* G 1.1	G 1.2		G 1.3		G 1.4		G 1.5	
Stab	Nr.	3	4		5				9	
Polar-schrieb	Nr.		1	2	1	2	1	2	1	2
Abstand v. UKF	mm		296,5	301	304	340	297	335	321	373
D _{min}	mm		13,5	13,4	14,4	16,7	13,1	13,1	13,7	14,1
D _{max}	mm		14,4	13,8	15,3	17,3	14,1	14,0	14,7	15,1
Ovalit.	mm		0,89	0,38	0,94	0,64	0,95	0,90	0,94	1,02

*) kein Polarschrieb

Tabelle 13

Umfangsdehnung im Beulbereich G1-Versuchsstäbe

Versuch			* G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
Stab	Nr.		3	4	5	7	9
unteres Rißende	U	mm		43,7	49,6	44,7	46,4
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%		29,5	46,9	32,3	37,3
Mitte Riß	U	mm		43,3	54,8	44,8	47,6
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%		28,3	62,3	32,6	40,8
oberes Rißende	U	mm		43,0	54,8	43,7	46,3
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%		27,4	62,3	29,4	37,0

*) Der Stab war undicht !

simulatoren (REBEKA-Programm) gewonnen worden. Die Versuchspunkte der G1-Reihe liegen im Streubereich der Punkte aus den übrigen Versuchen des hier beschriebenen Vorhabens.

Exzentrizität der Beule

Zur Feststellung der Beulenlage in bezug auf die Stablängsachse wurden die Mantelschriebe der verformten Stäbe an drei Umfangswinkelpaaren ($0^\circ/180^\circ$, $60^\circ/240^\circ$, $120^\circ/300^\circ$) 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 G1-Reihe sind die Werte in Tabelle 14 aufgelistet.

Krümmung:

Ebenfalls aus den Mantelschrieben wird die Stabkrümmung abgeleitet. Die Maximalwerte liegen bei 340 - 500 mm von UK aktive Zone, d.h. am oberen Ende der Brennstoffsäule. Die Auslenkung beträgt 1,3 bis 2,3 mm (siehe Tabelle 15). Im Beulbereich zeigen die G1-Stäbe etwa die gleichen Auslenkungen von der Stablängsachse. Die azimuthale Lage der Krümmung zum Riß ist nur beim Stab G 1.5 so, daß die Krümmungsinenseite am Riß liegt (180° zwischen Riß und Auslenkung des Stabs durch Krümmung).

Volumenzunahme des gebeulten 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 die Hüllwandstärke und das Brennstoffvolumen wurden die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelvolumina stellt das vergrößerte Volumen V_1 dar. Der relative Volumenzu-

Tabelle 14

Exzentrizität der Beule bei G1-Versuchsstäben

Versuch		* G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
Stab	Nr.	3	4	5	7	9
Abstand von UKF	mm	-	300	320	315	350
Lage zum Riß	Grad	-	0	135	153	-
zur Nullmarke	Grad	-	350	90	40	-
Exzentrizität	mm	-	0,2	0,2	0,6	0

*) Der Stab war undicht !

Tabelle 15

Krümmung G1-Versuchsstäbe

Versuch		G 1.1	G 1.2	G 1.3	G 1.4	G 1.5
Stab	Nr.	3	4	5	7	9
max. Krümmung	mm	1,3	1,7	1,4	2,3	2,3
Abstand von UKF	mm	450	500	490	340	400
Lage zur Nullmarke	Grad	50	285	260	40	190
Krümmung im Beulbereich	mm	-	1,1	0,6	2,2	2,0
Abstand von UKF	mm	-	300	320	315	350
Lage zum Riß	Grad	-	90	100	40	180

wachs ergibt sich dann zu

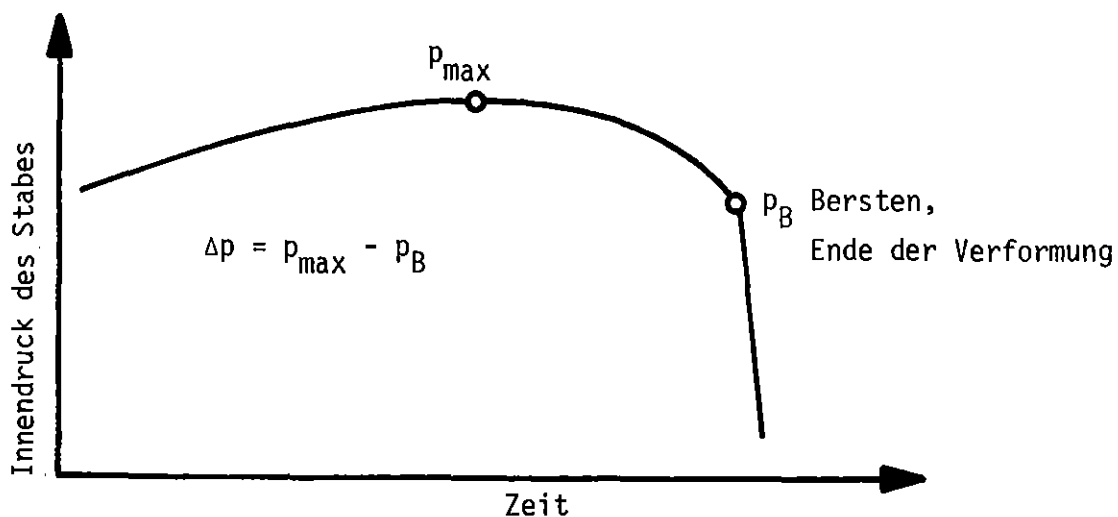
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} - 1$$

wobei V_1 = Leervolumen des Stabes nach dem Versuch

V_0 = Leervolumen des Stabes vor dem Versuch.

In Abb. 51 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche G 1.2 bis G 1.5 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. 52 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

Von den sechs Versuchsstäben der Serie G1 wurde der Stab G 1.6 nicht im Transientenversuch getestet. Er wird u.a. zur Beurteilung des Brennstoffzustandes nach der Vorbestrahlung, also vor dem Versuch, herangezogen.

Aus den Querschnitten des Stabes G 1.6 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 1.5.

Einen Querschnitt des Stabes G 1.6 (195 mm von Unterkante Brennstoff) gibt Abb. 53 wieder. Das Bruchmuster sieht in verschiedenen Brennstoffebenen im Prinzip gleich, im Detail unterschiedlich aus. Das verdeutlichen auch die Abb. 54.1 bis 54.3. Das Aussehen des Brennstoffs im Stab G 1.5 wird als typisch für alle Stäbe der G1-Serie angesehen.

Nach dem Entfernen der Hülle des Stabes G 1.6 fielen die Pelletbruchstücke auseinander (Abb. 55, wie im Bereich großer Deformation bei den der Transiente ausgesetzten Stäben (s.Kap. 6.1)). Die Größe der Bruchstücke des Brennstoffs wurde durch den Transientenversuch im Mittel nicht geändert, wie die Auswertung einer Siebanalyse für die Stäbe G1 in Abb. 56 zeigt. Hier sind die Teilchengrößen der Pelletbruchstücke des Stabes G 1.6 (ohne Versuch) mit denen der übrigen G1-Stäbe (mit Versuch) verglichen. Die Werte des Referenzstabes G 1.6 liegen im Datenband der Siebproben der übrigen G1-Stäbe. Die häufigste Bruchstückgröße liegt bei etwa 3 mm.

Die Untersuchungen der G1-Prüflinge nach der Bestrahlung im FR2-Reaktor zeigen, daß der Brennstoff gerissen ist, die Pellets zerbrochen sind, 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 G1-Stäbe in dieser Hinsicht als typisch für den Leistungsreaktor ansehen kann.

Durch den Versuch (LOCA-Transiente) wird dem Brennstoff durch die Aufweitung der Hülle mehr Raum gegeben. Der Brennstoff verliert im Beulenbereich die Tablettenform und liegt als Schüttung vor, die den aufgebeulten Bereich der Hülle auffüllt. Durch diese Umstrukturierung des Brennstoffs ergibt sich eine Verkürzung der aktiven Zone, im Falle der G1-Stäbe von bis zu 62 mm (Versuch G 1.3).

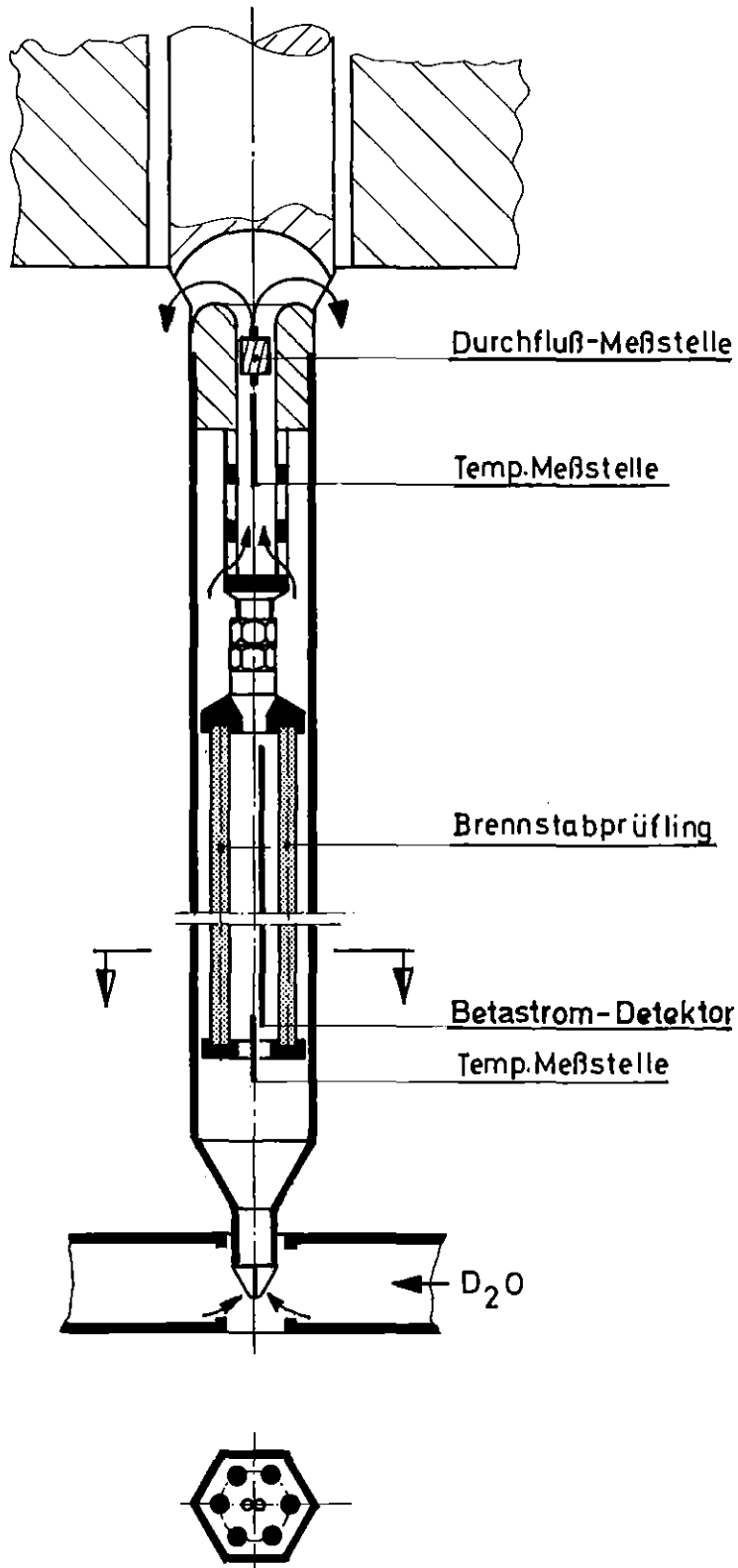
Dieses Stabverhalten ist bei den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Prüflingen nicht beobachtet worden.

Zur Klärung der Fragen, wann genau im Verlauf einer Transiente die Pellets auseinander fallen und insbesondere, ob dies den Verformungsvorgang beeinflusst, wurden zwei spätere Versuche der Serie E, E3 und E4, durchgeführt. 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 G1-Versuche, da die Berstdaten wie Bersttemperatur, Berstdruck und plastische Hüllverformung der Versuchsstäbe aus der G1-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/ Wertebach, 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 Specialists' 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/ Erbacher, F.; Neitzel, H.J.; Wiehr, K.:
Deformation Mechanism of Zircaloy Fuel Cladding in a LOCA and Interaction with the Emergency Core Cooling, Transactions of the ANC 1979 Conference, Vol. 31, TANSO 31 1-666 (1979)

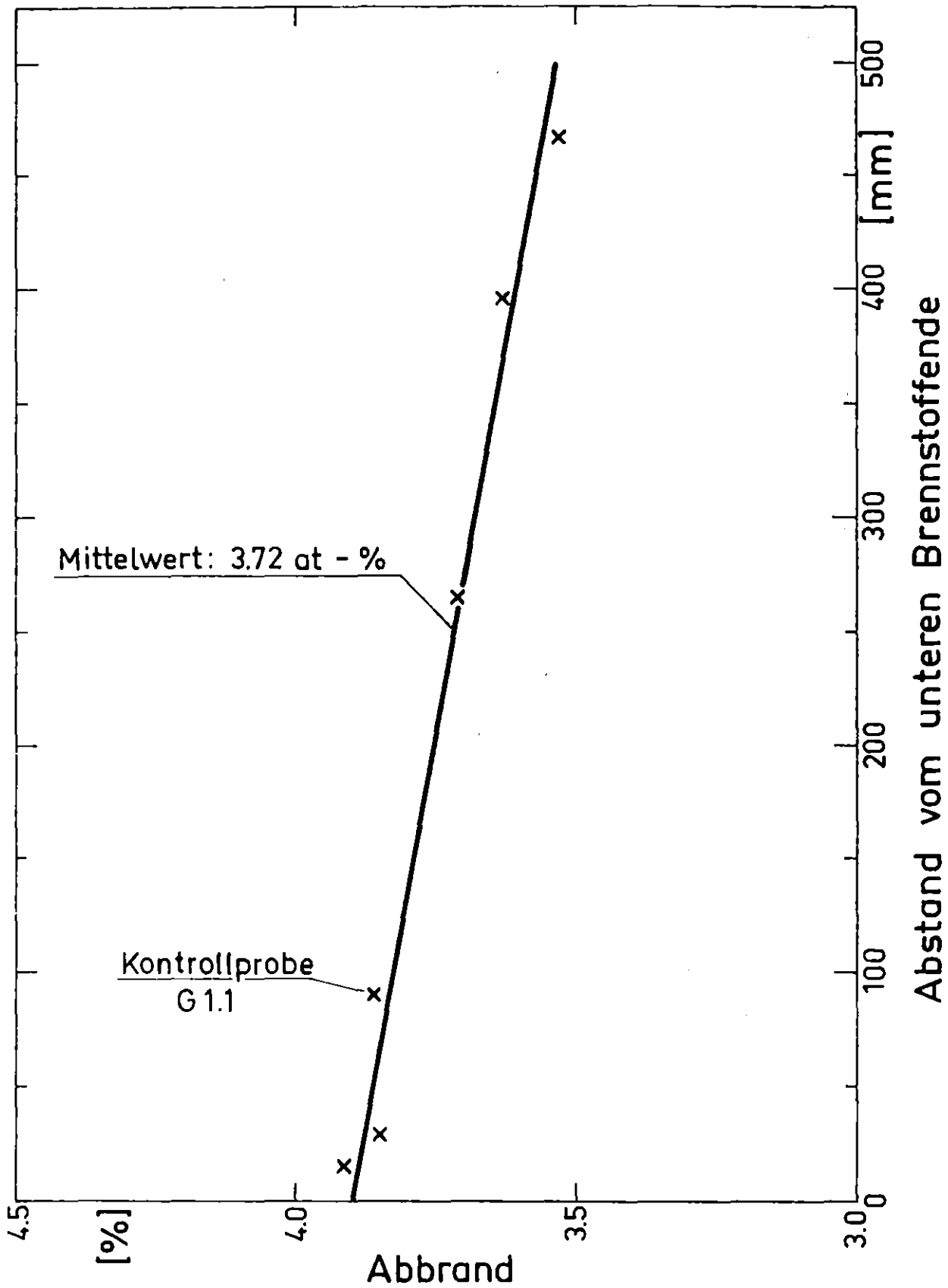


KfK IT 78
PNS 4237-147

Vorbestrahlungseinsatz

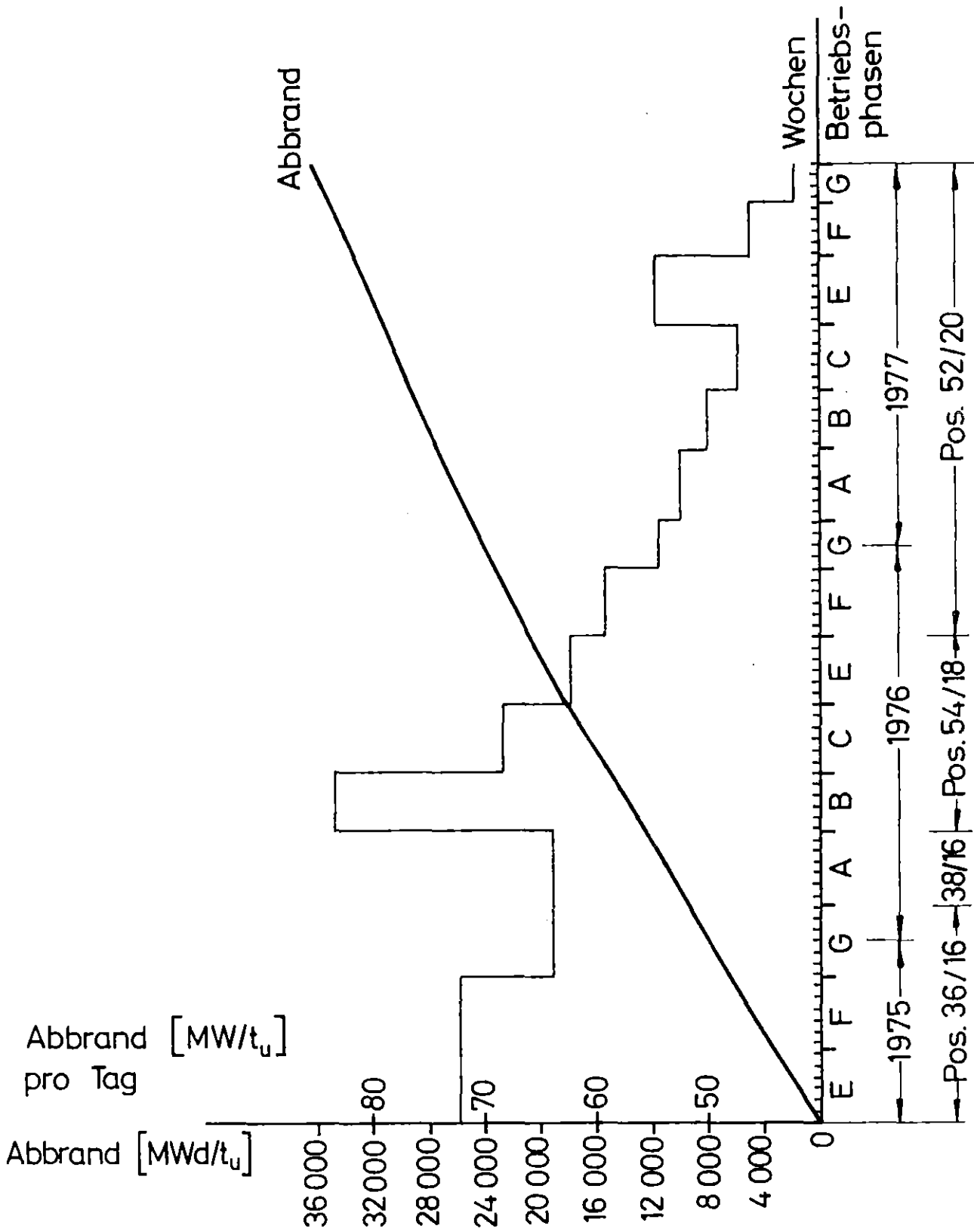
vereinfacht

Abb.1



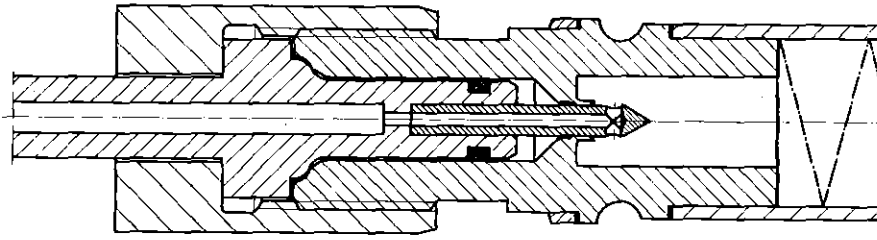
KfK
IT-80
PNS4237-477

Axiale Abbrandverteilung im Brennstab G 1.6
Abb. 2

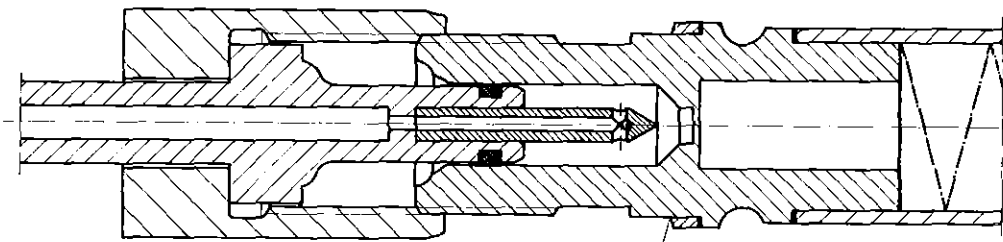


Betriebsgeschichte der Vorbestrahlung
Bündel G1, Abbrand 36 000 MWd/t_u

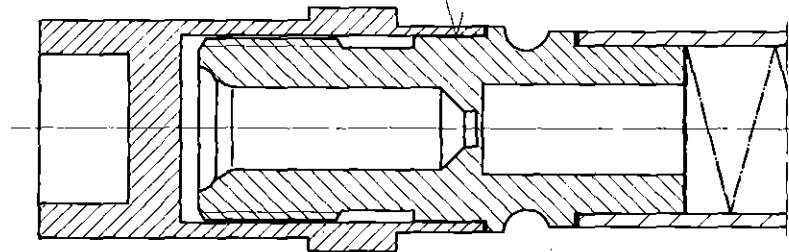
Abb.: 3



Ankopplung Prüfingsendstopfen
nach Membrandurchstich



Ankopplung Prüfingsendstopfen
vor Membrandurchstich



Prüfling mit Schutzkappe
für Vorbestrahlung

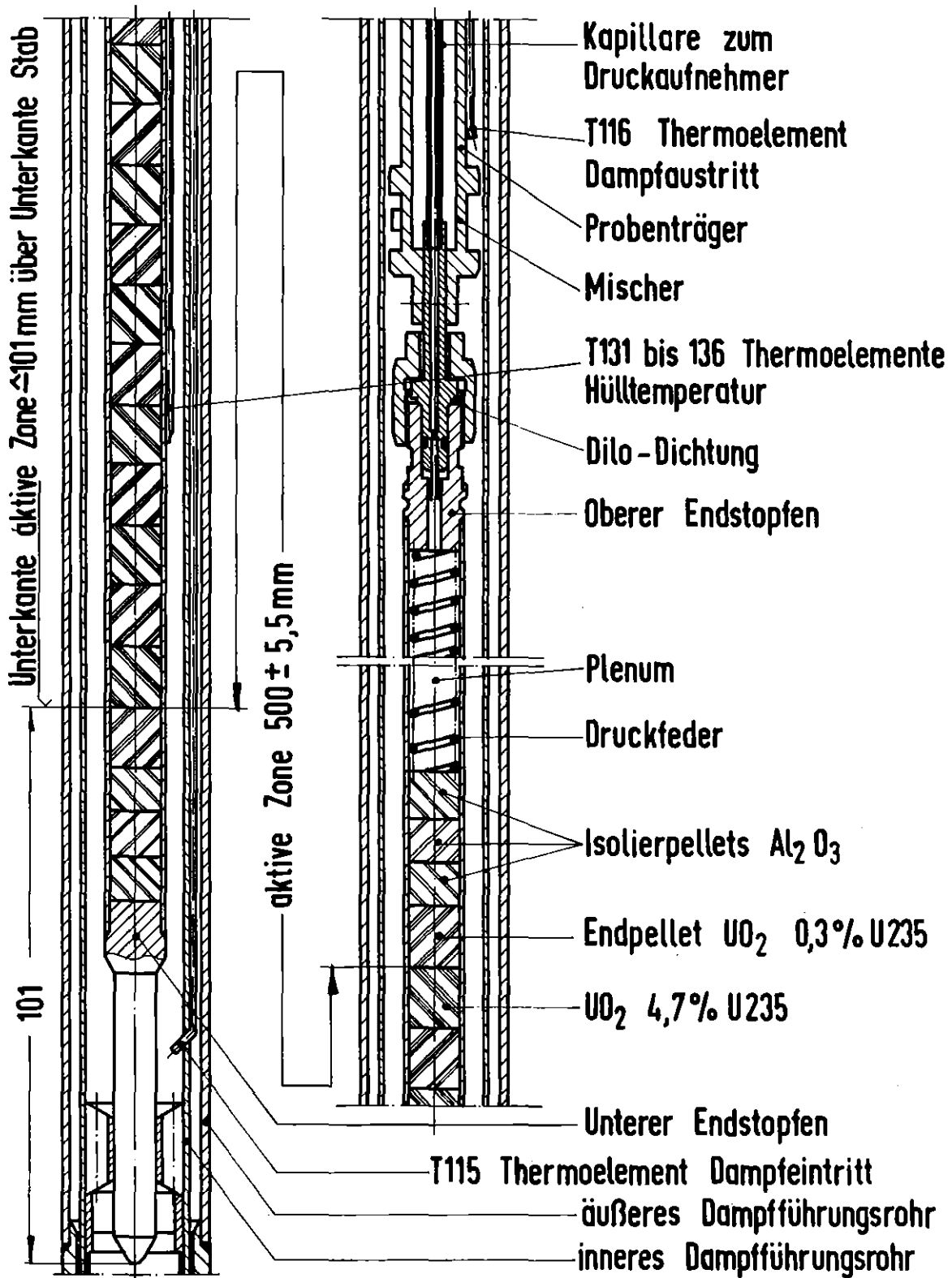
Trennstelle Schutzkappe



IT78 PNS4237-18

Zur Messung des Stabinnendruckes

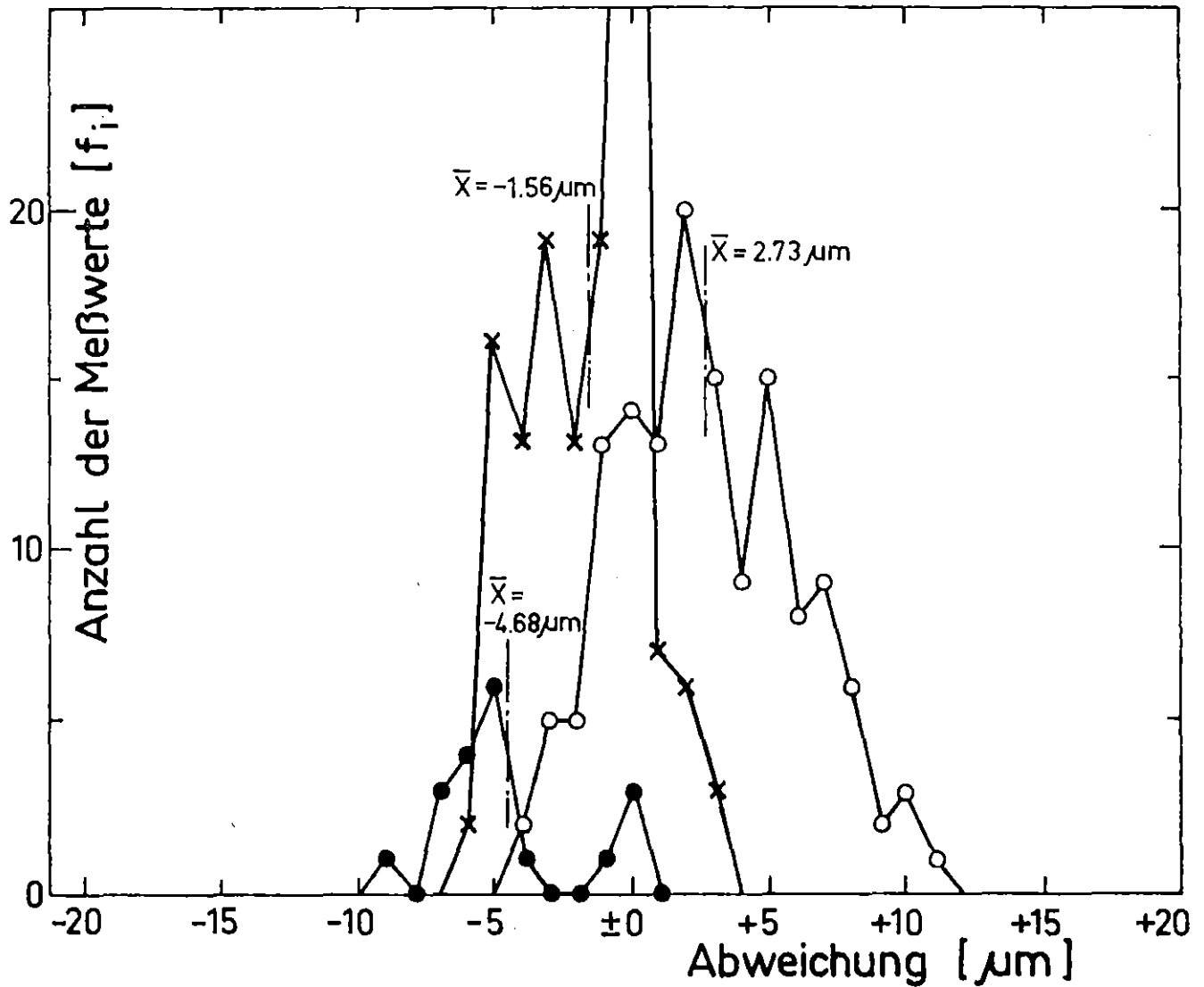
Abb. 4



RBT/IT - 1977
PNS 4237-88

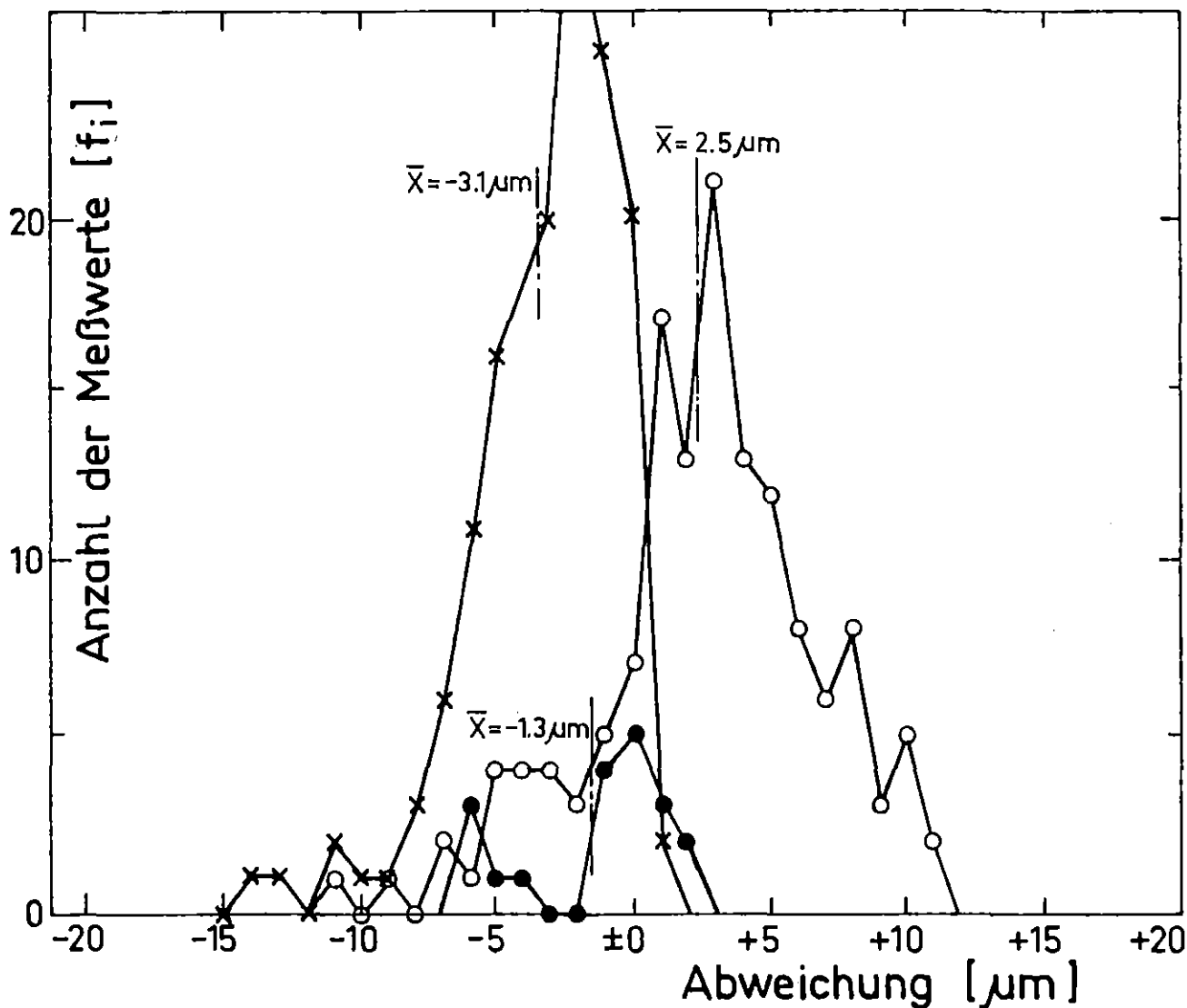
Nuklear-Prüfling vereinfacht

Abb.: 5



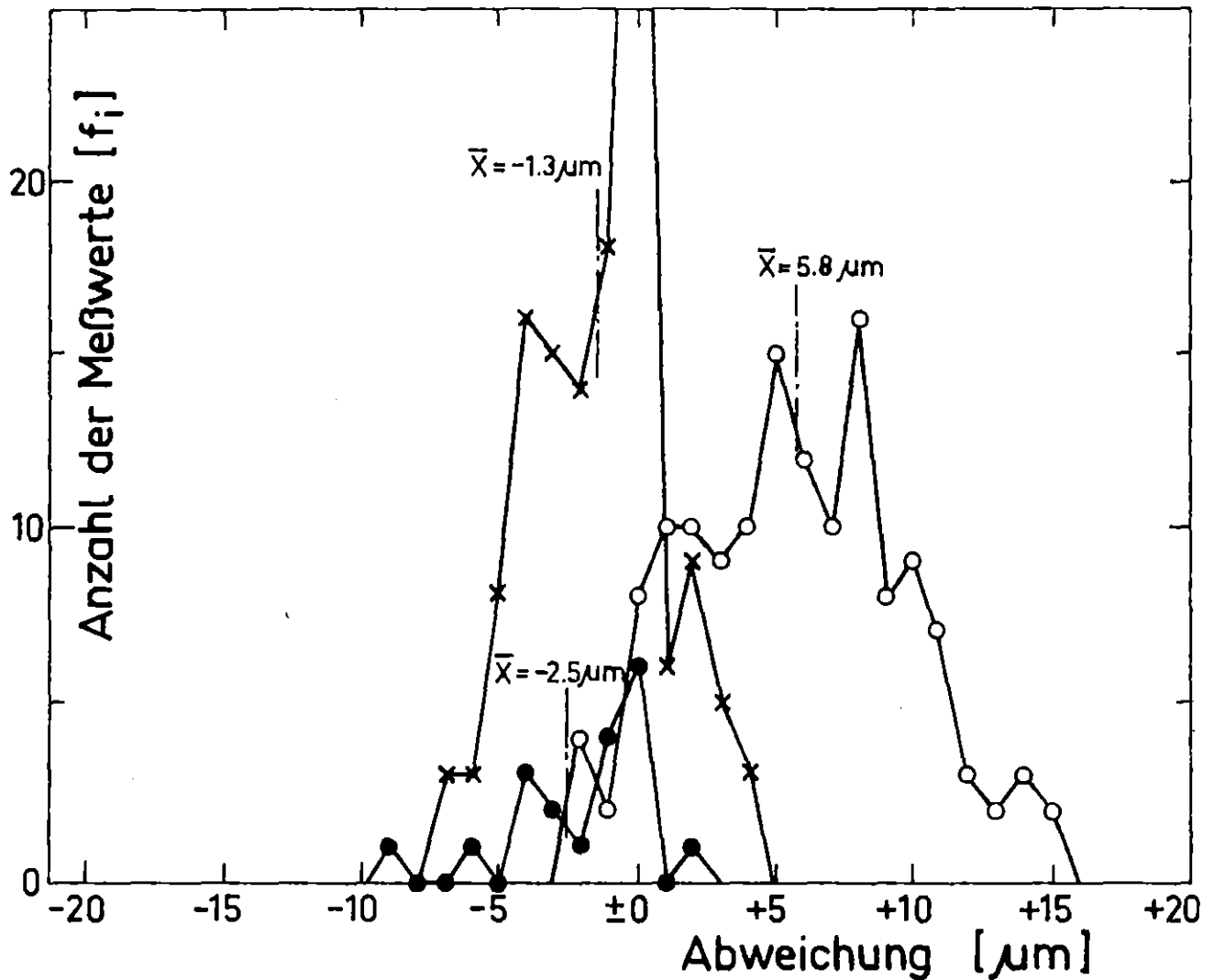
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
		Mittelwert : 10.748 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
		Mittelwert : 9.303 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm
		Mittelwert : 9.145 mm

Einfüllspiel: $S_E = 9.303 - 9.145 = 0.158 \text{ mm}$



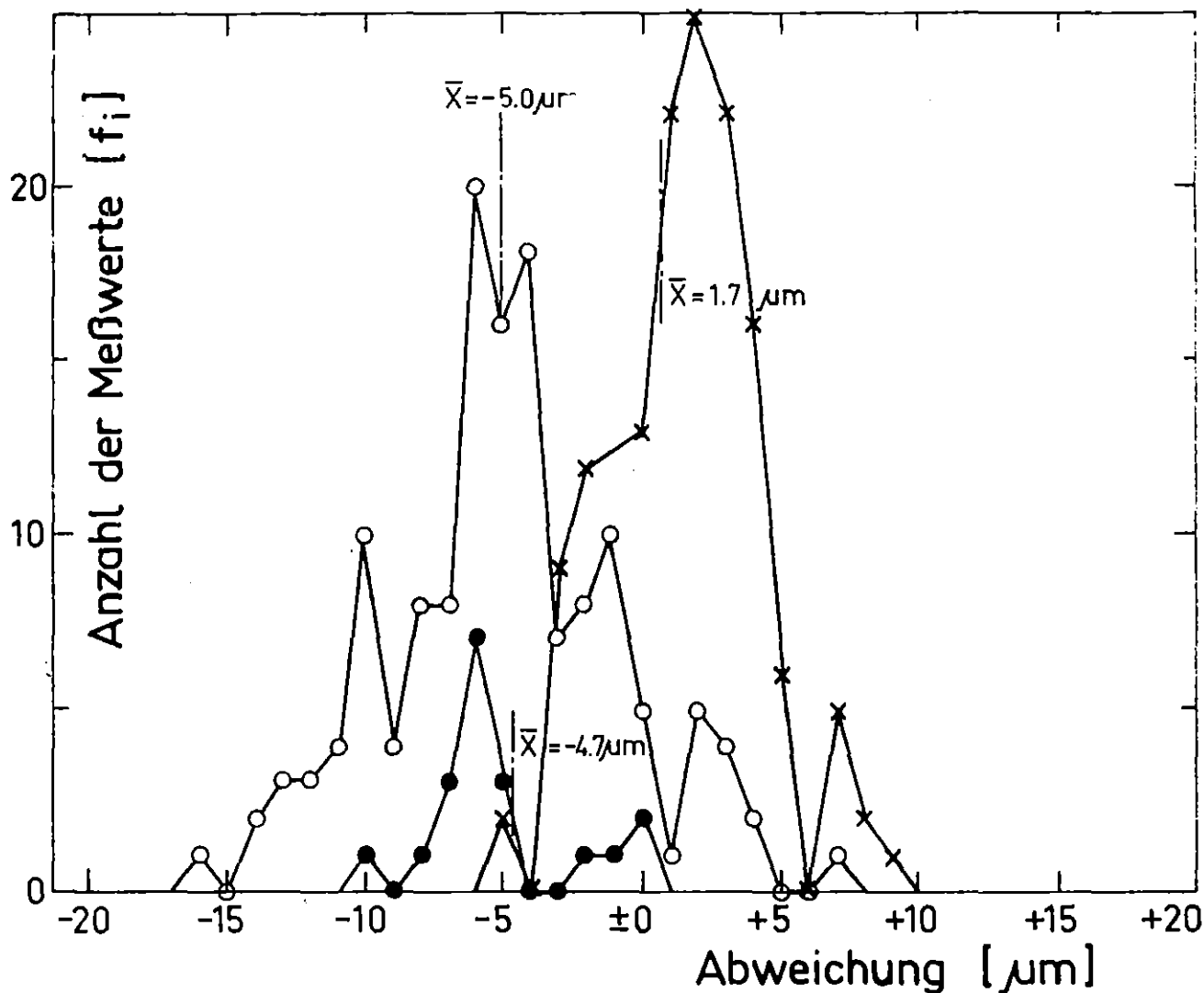
<u>Hüllrohr</u>	x <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert : 10.747 mm
	o <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.303 mm
<u>Pellet</u>	• <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm Mittelwert : 9.149 mm

Einfüllspiel: $S_E = 9.303 - 9.149 = 0.145 \text{ mm}$



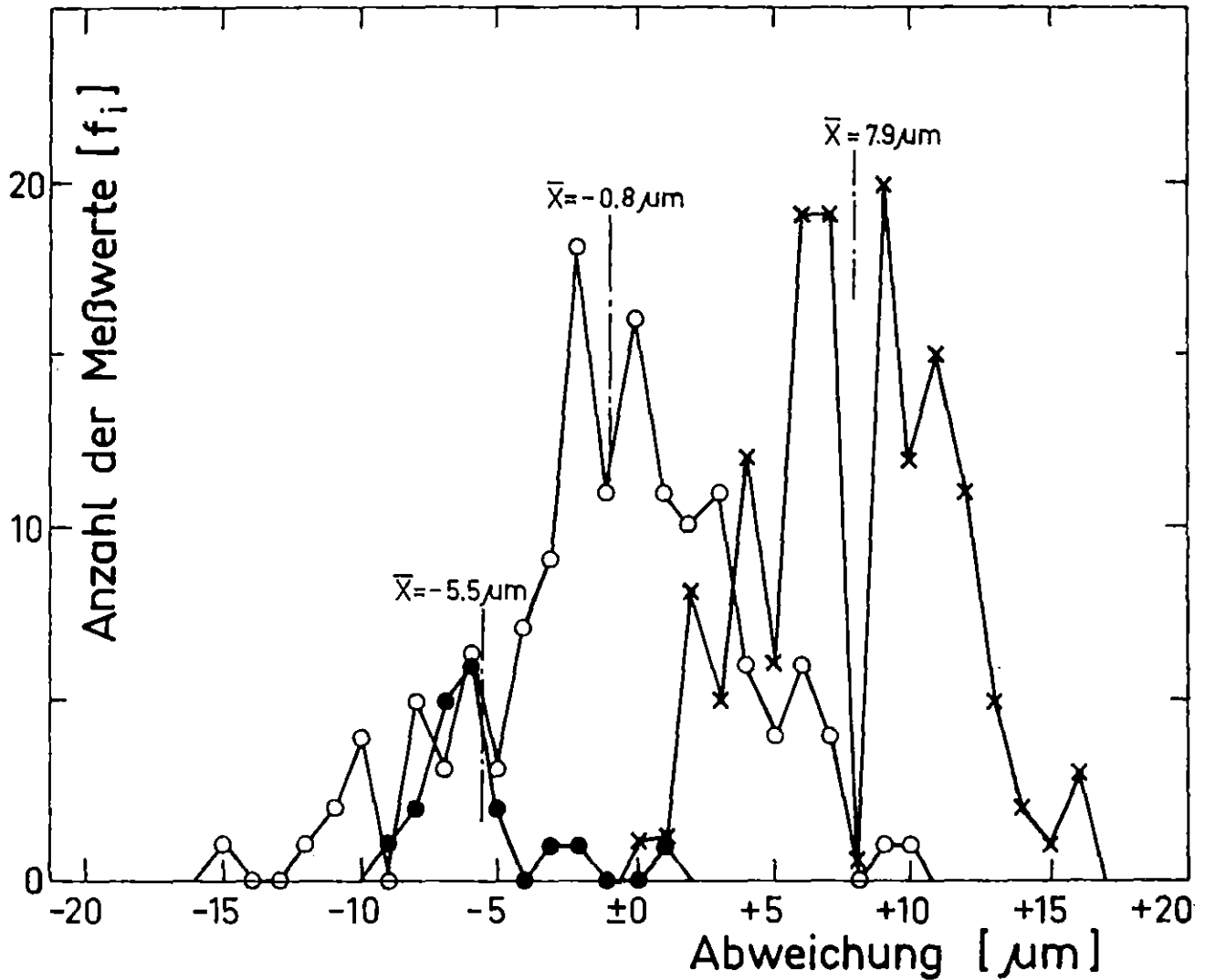
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
		Mittelwert: 10.749 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
		Mittelwert: 9.306 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm
		Mittelwert: 9.148 mm

Einfüllspiel: $S_E = 9.306 - 9.148 = 0.158$ mm



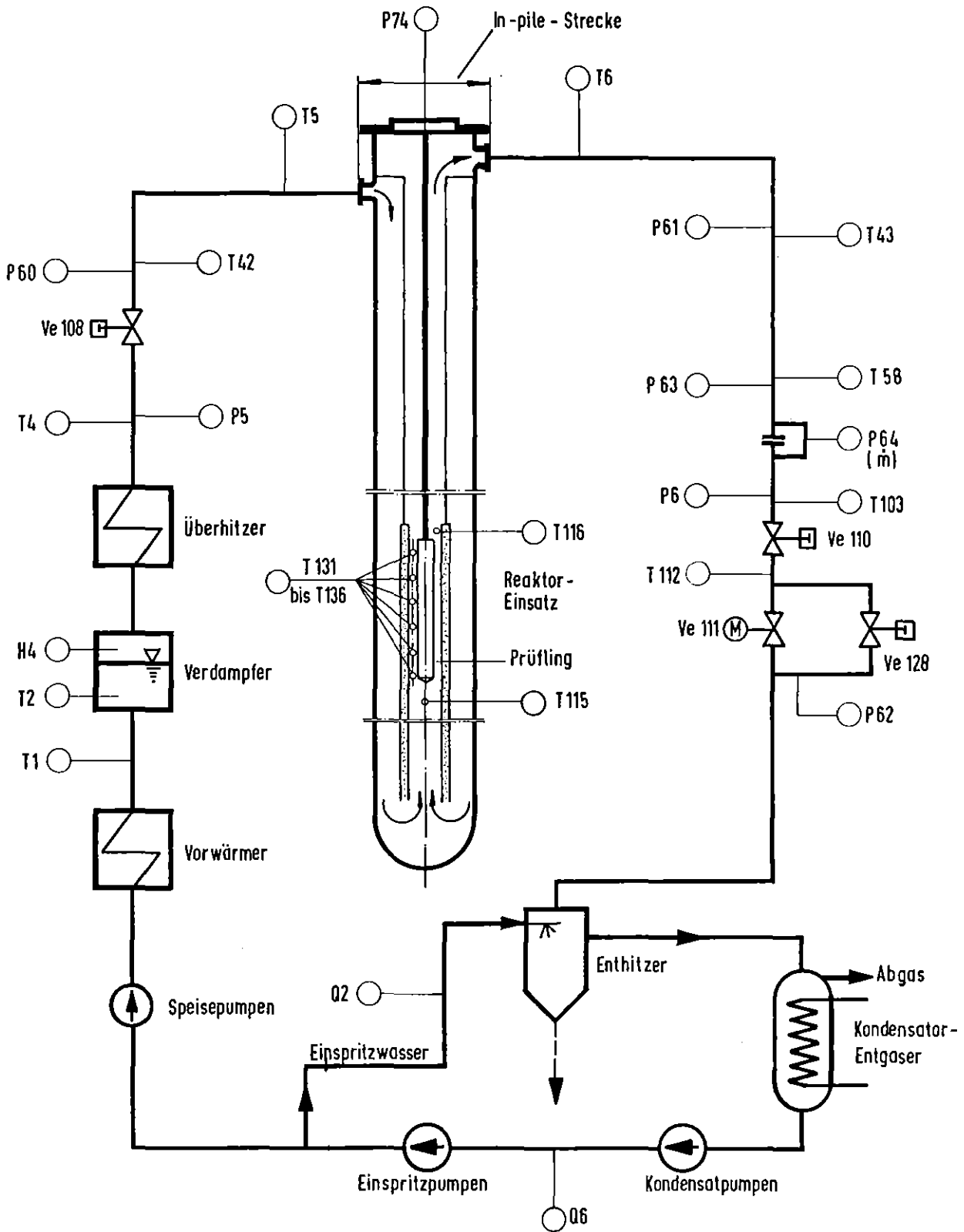
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
		Mittelwert : 10.752 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
		Mittelwert : 9.295 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm
		Mittelwert : 9.145 mm

Einfüllspiel: $S_E = 9.295 - 9.145 = 0.150$ mm



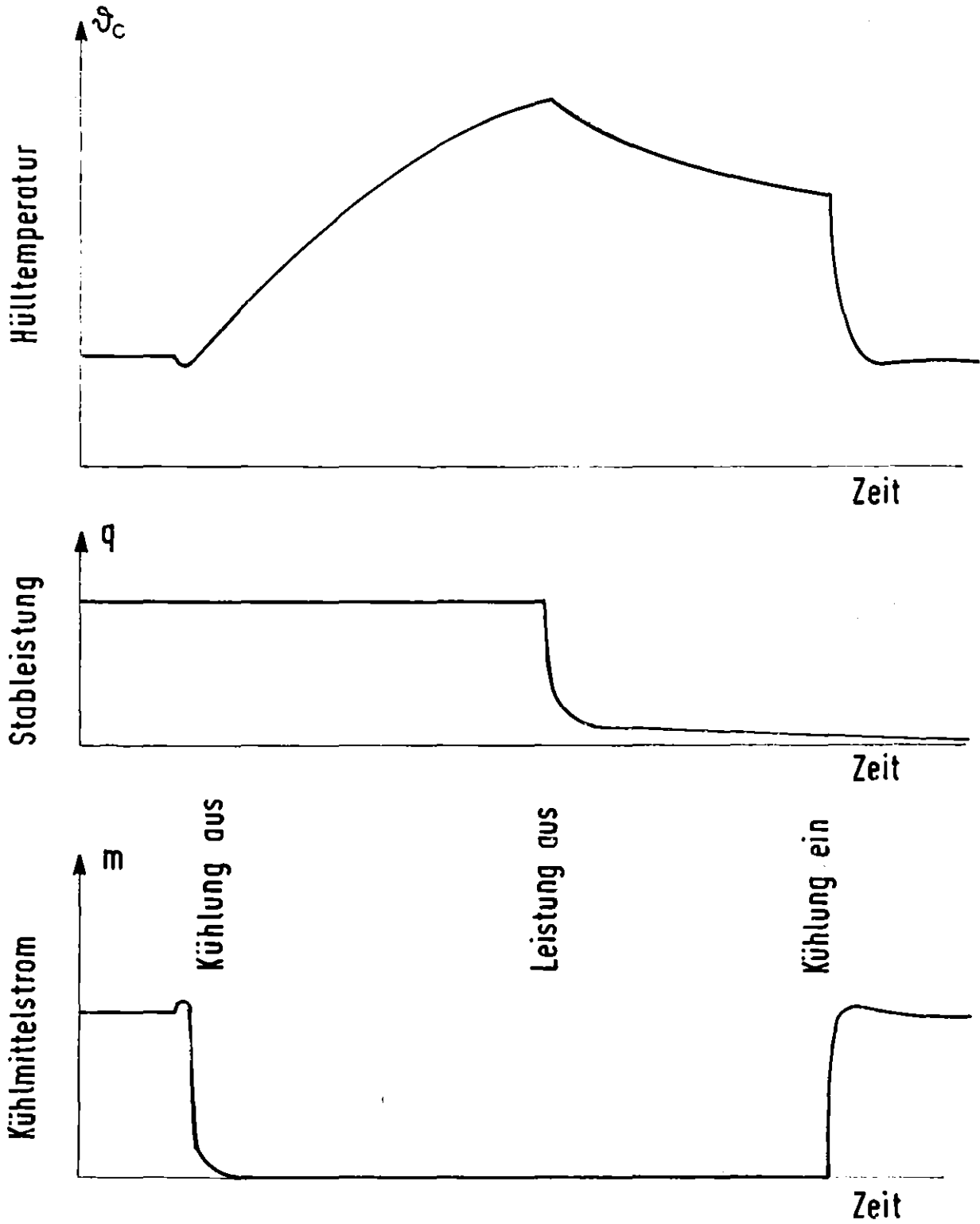
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
		Mittelwert: 10.758 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
		Mittelwert: 9.299 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.150 mm
		Mittelwert: 9.145 mm

Einfüllspiel: $S_E = 9.299 - 9.145 = 0.154 \text{ mm}$



IT-1977
PNS 4237-87

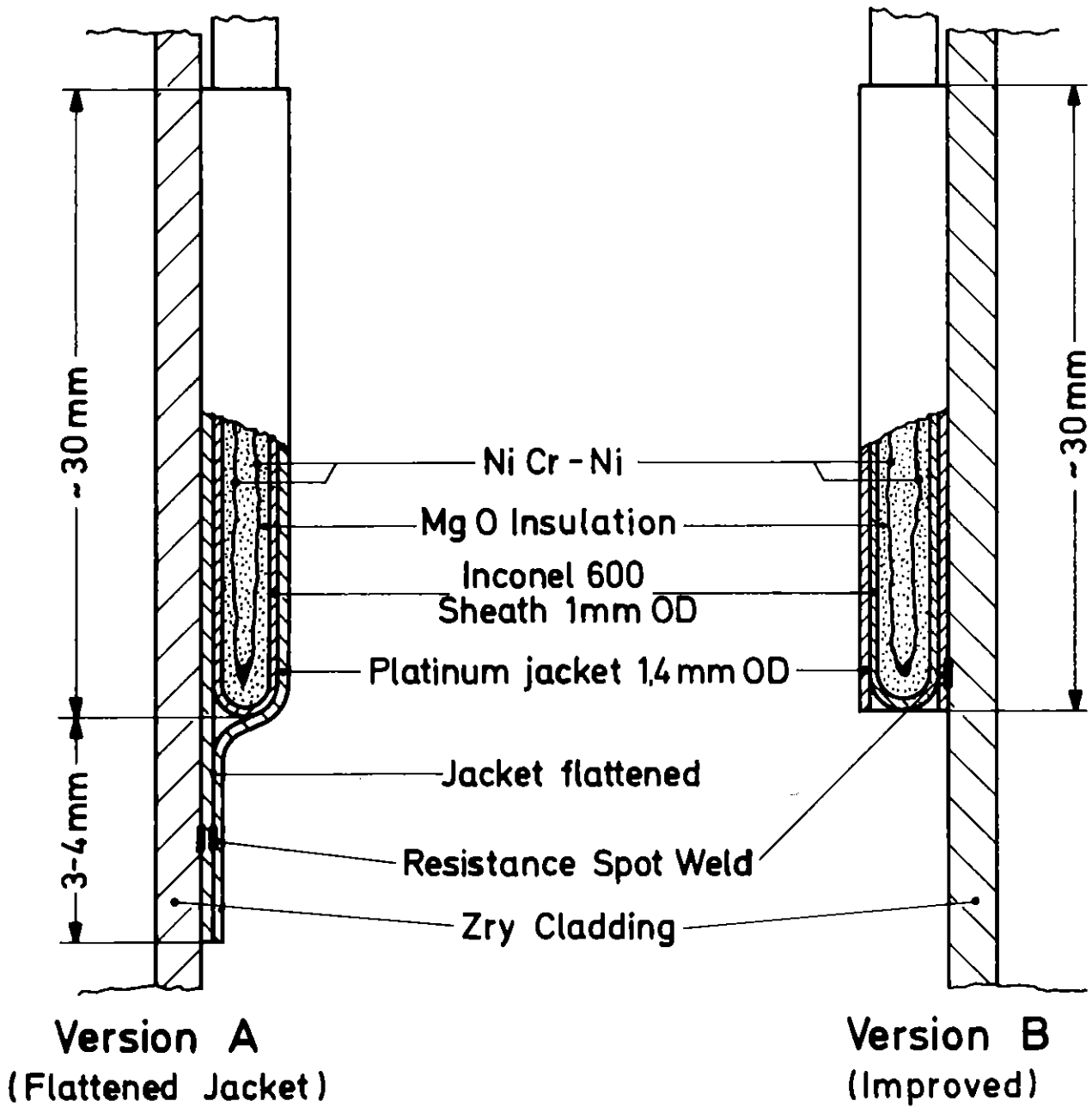
DK-Loop am FR2. Stark vereinfachtes Kreislauf-
schema Abb.: 7



RBT/IT-1977
PNS 4237-59.1

Versuchsablauf, Schema

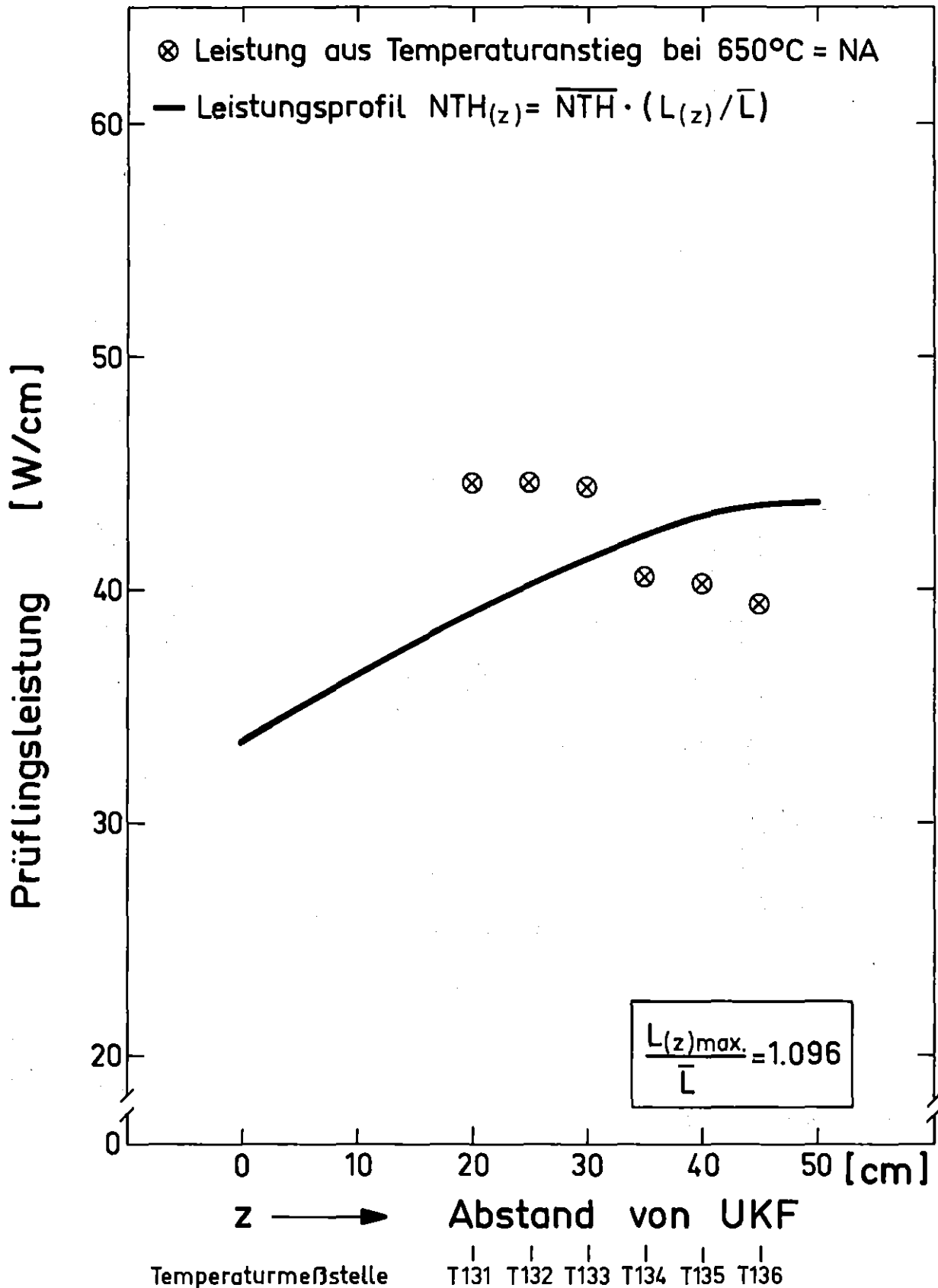
Abb.: 8

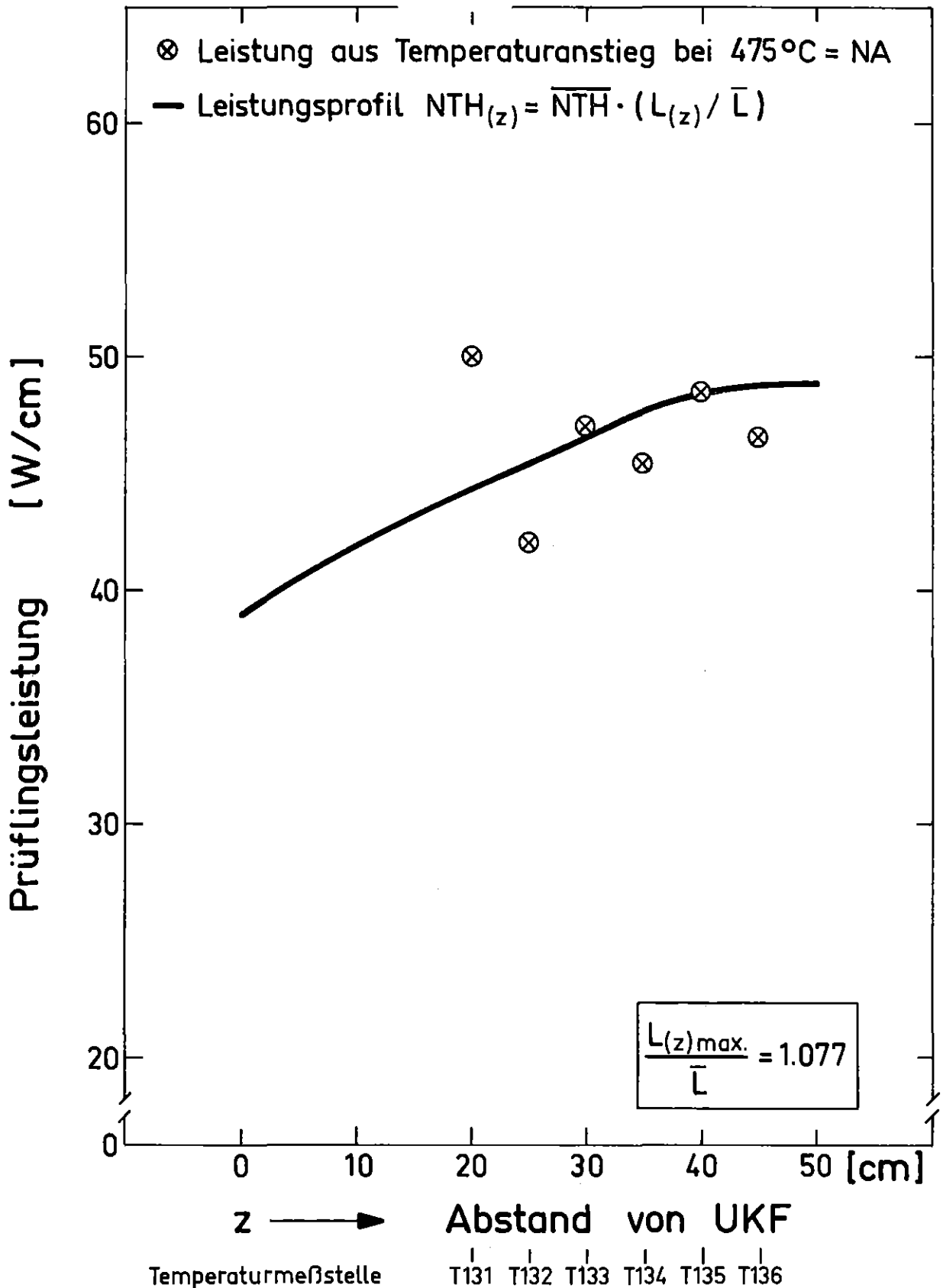


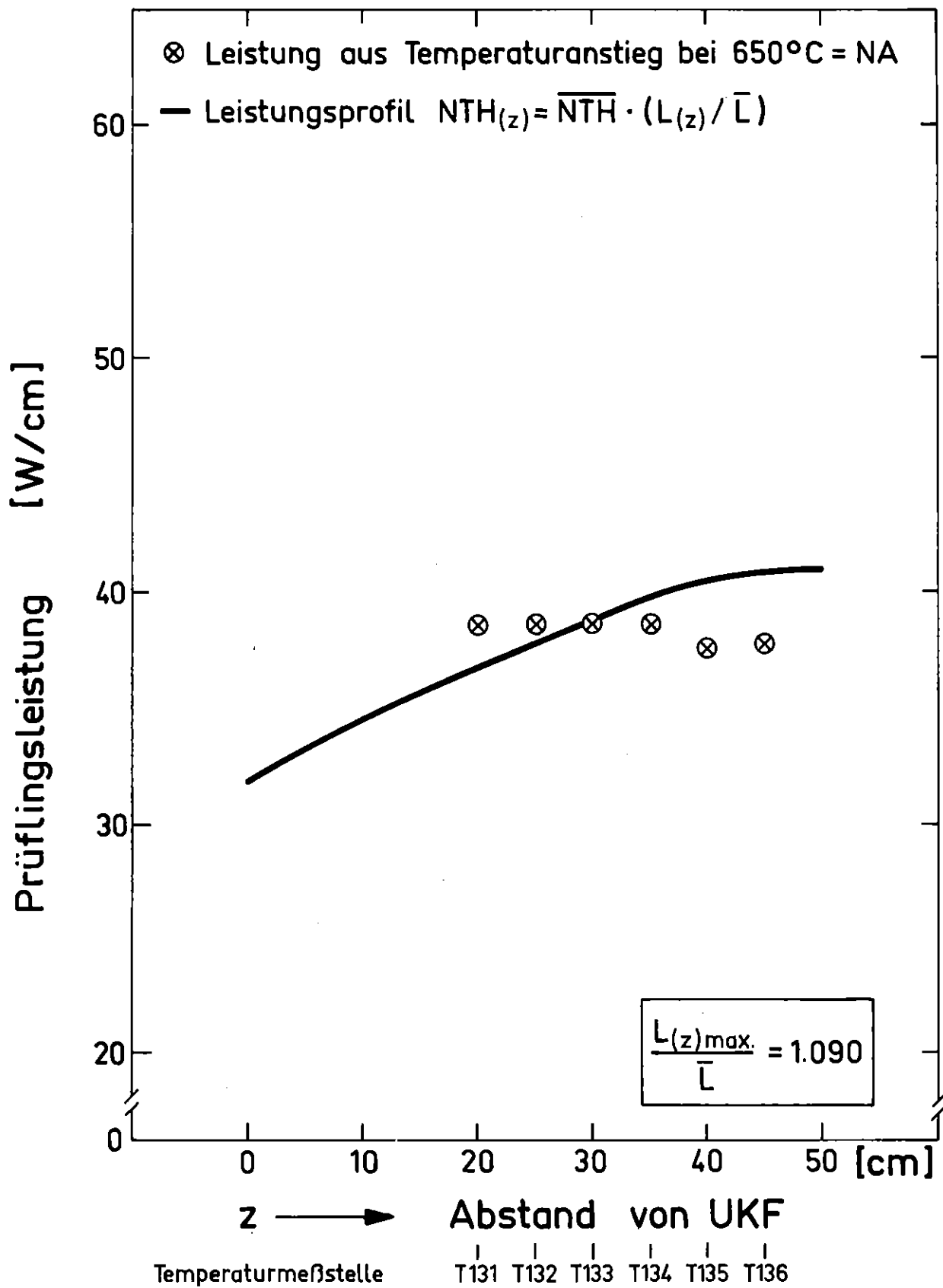
KIK
KIT-80
PNS4237-300

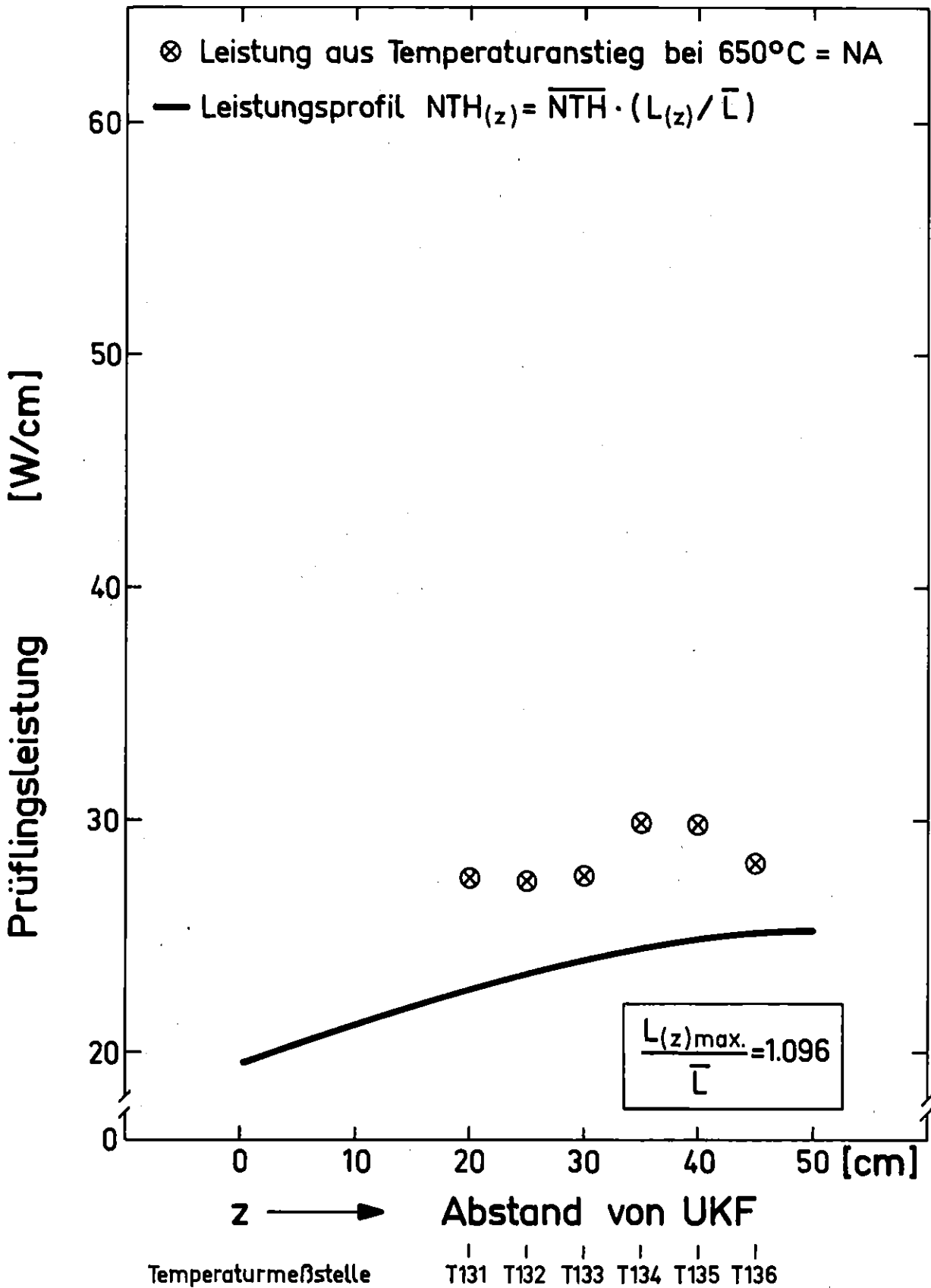
FR2 In-Pile Tests:
Cladding Thermocouple (Schematic)

Fig. 9

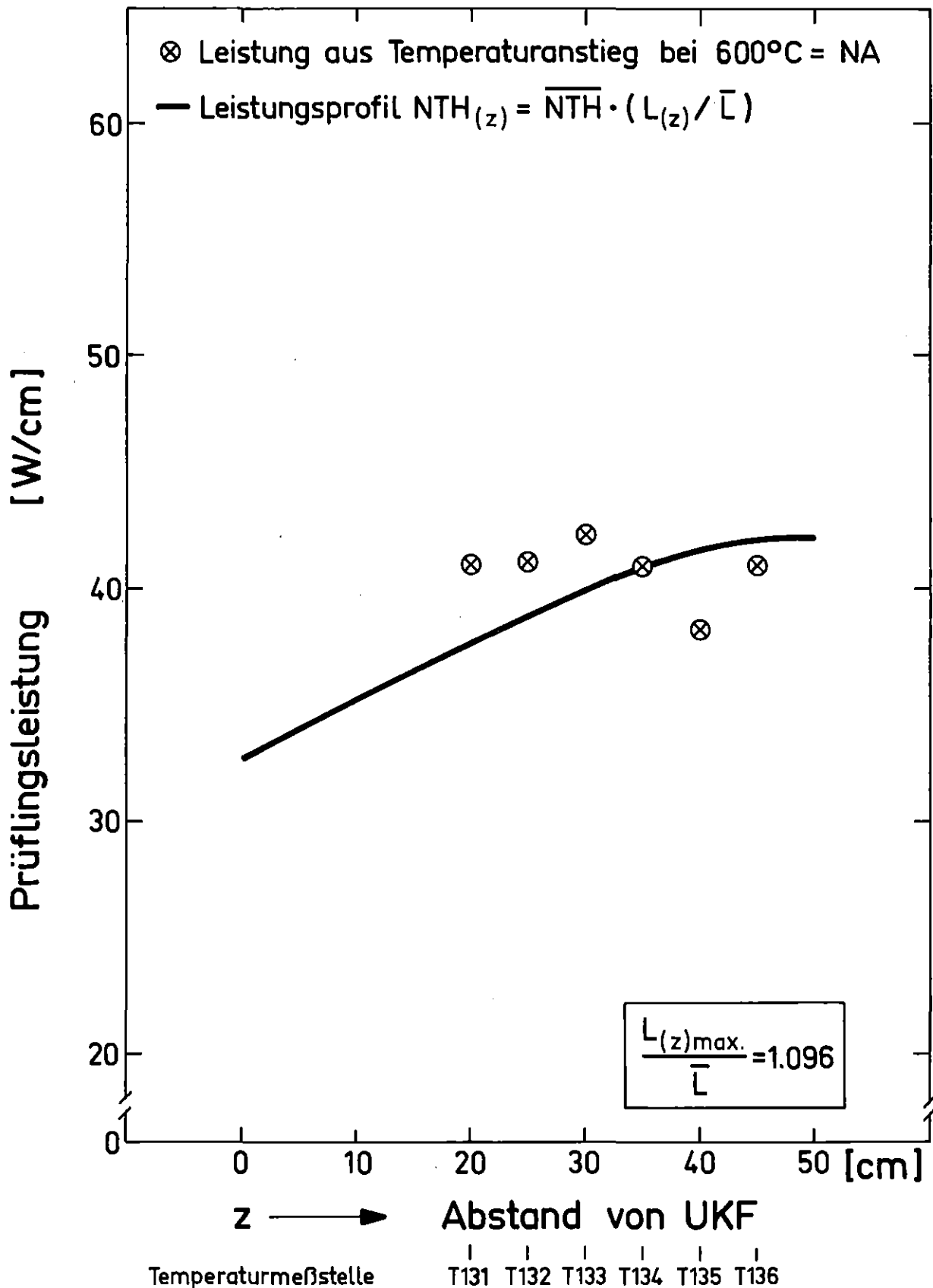


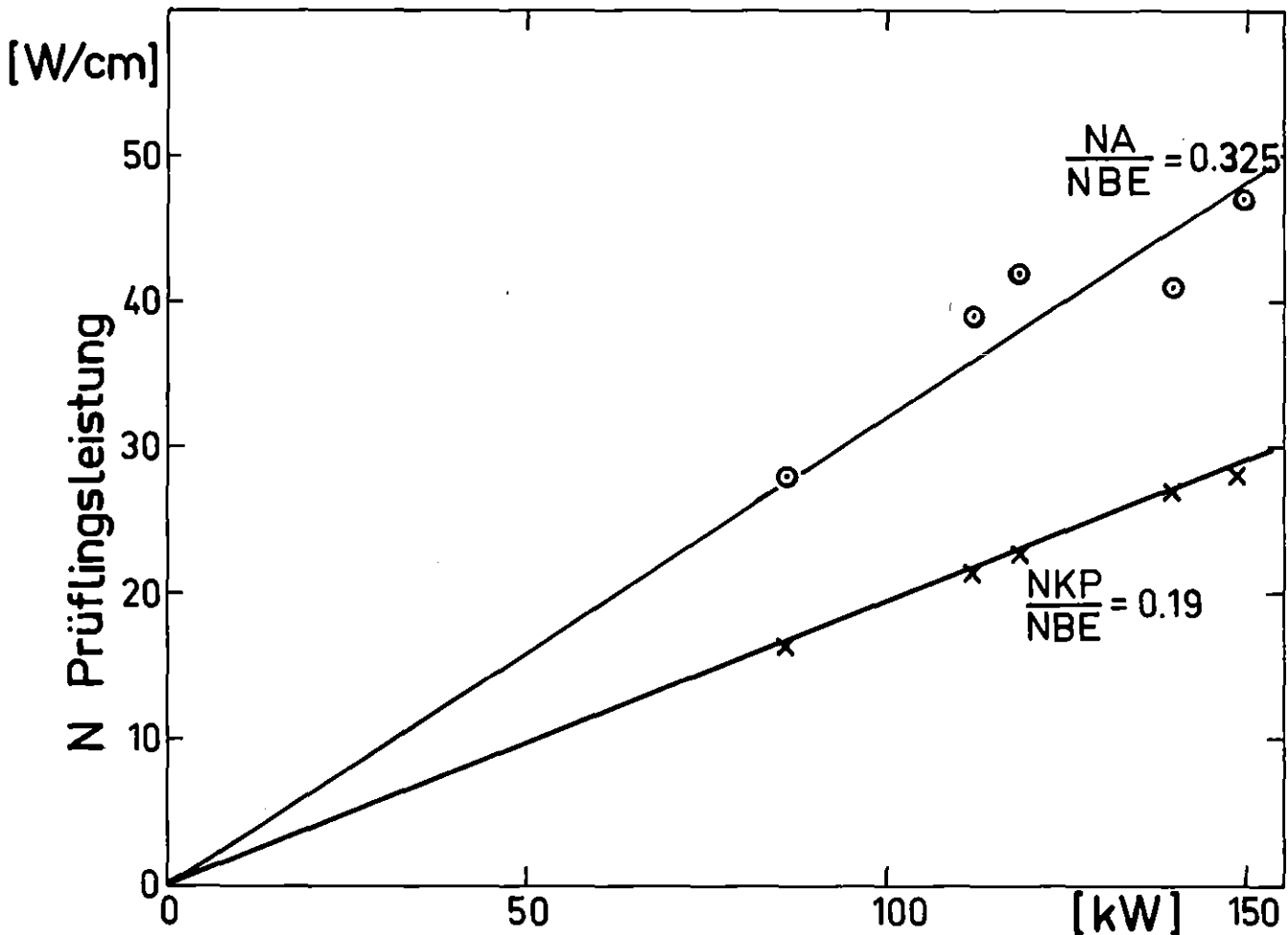






IT 80
PNS 4237-486.22





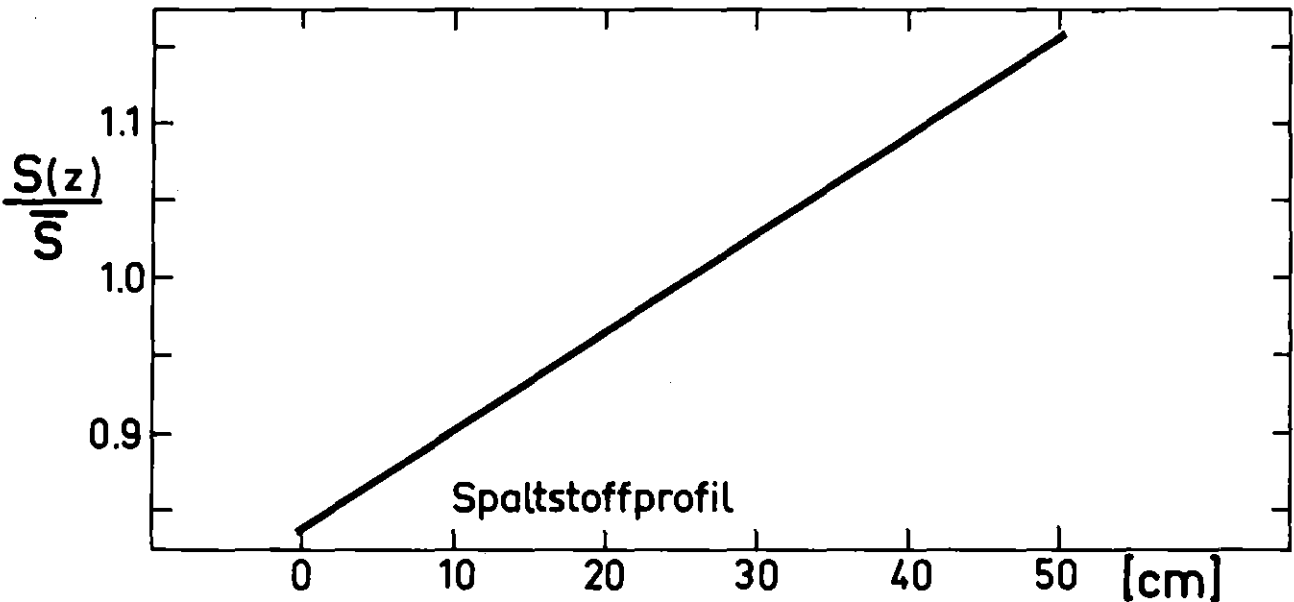
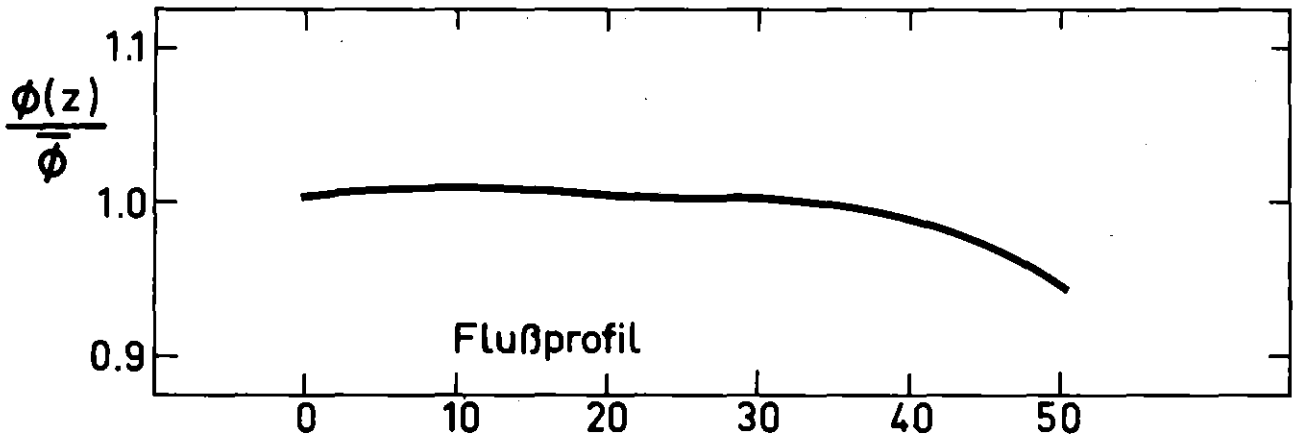
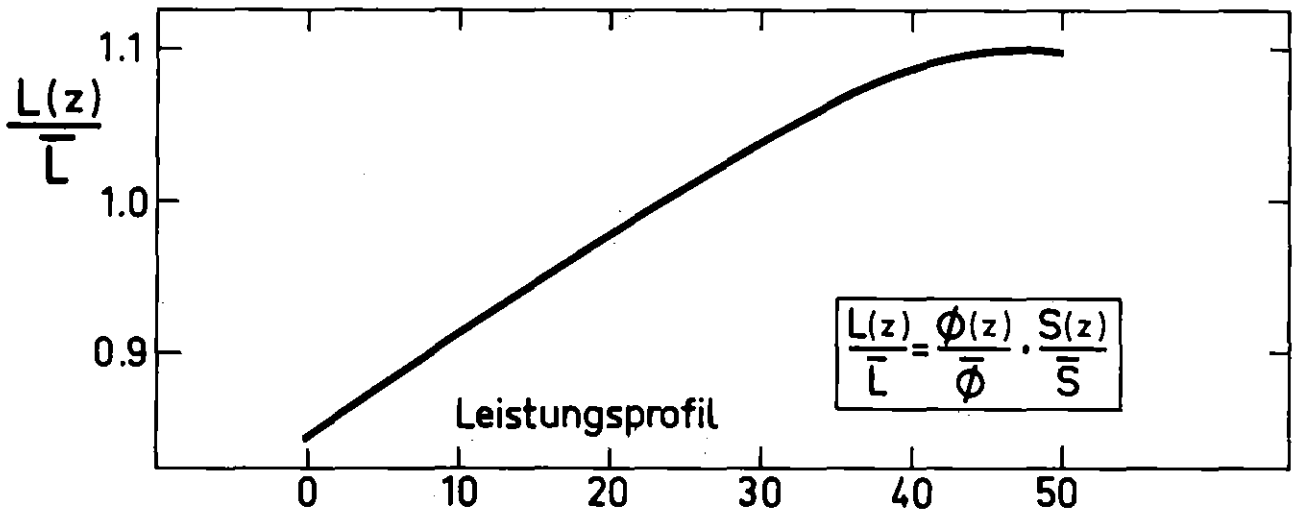
NBE = Leistung der umgebenden Brennelemente

- NA = Prüfungsleistung aus Temperaturanstieg
- × NKP = reaktorphysikalische Prüfungsleistung

FR2 In-Pile Versuche G1

Prüfungsleistungen NA und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente NBE

Abb.:11

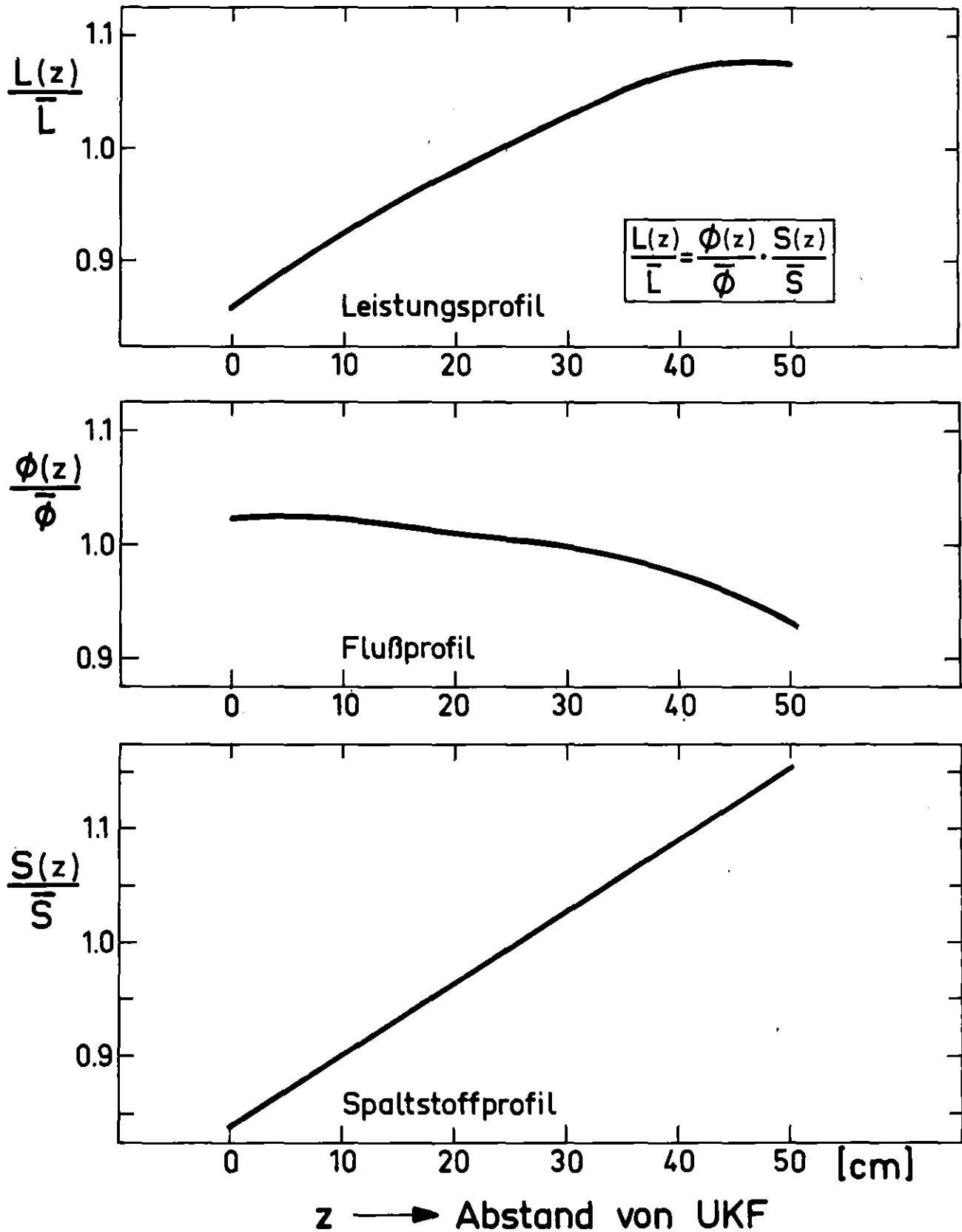


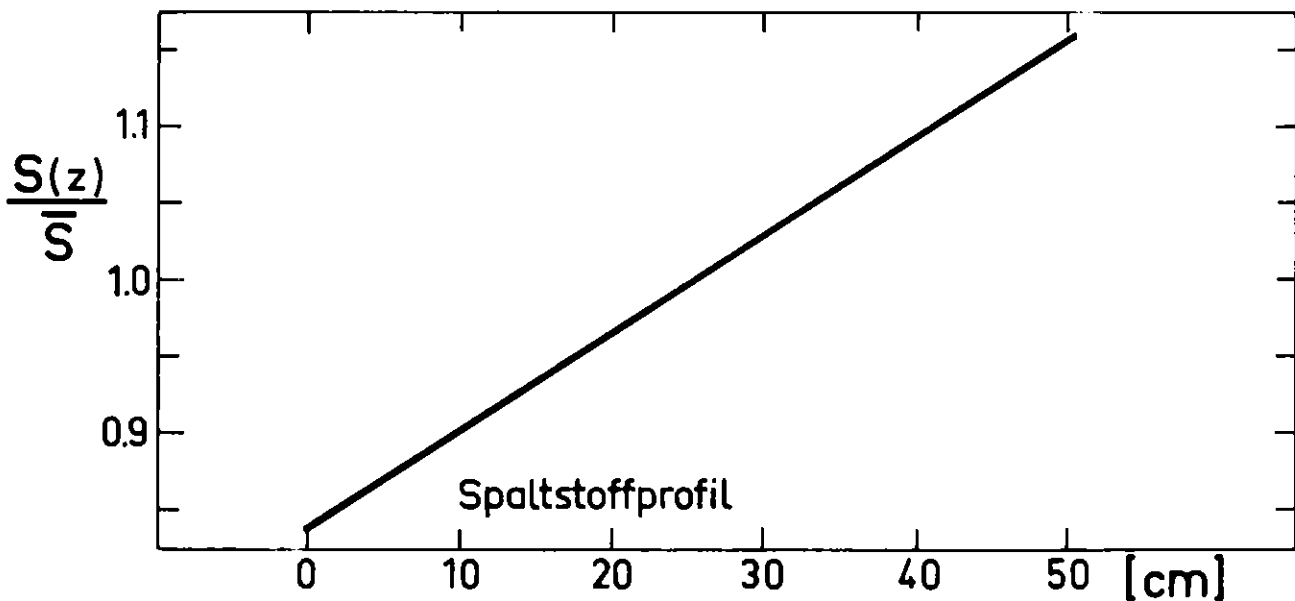
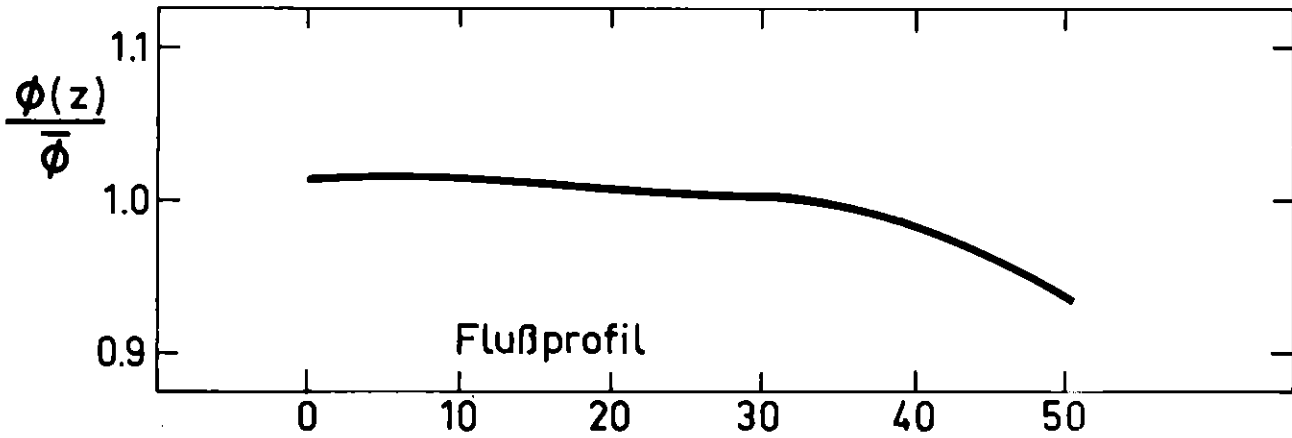
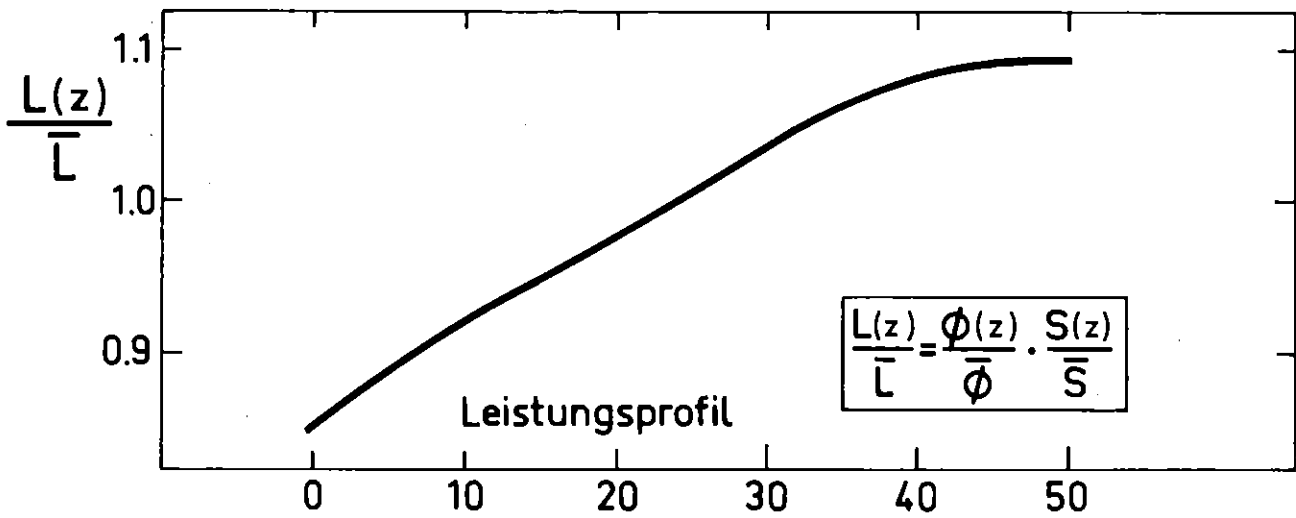
z → Abstand von UKF



IT 79
PNS4237-248.19

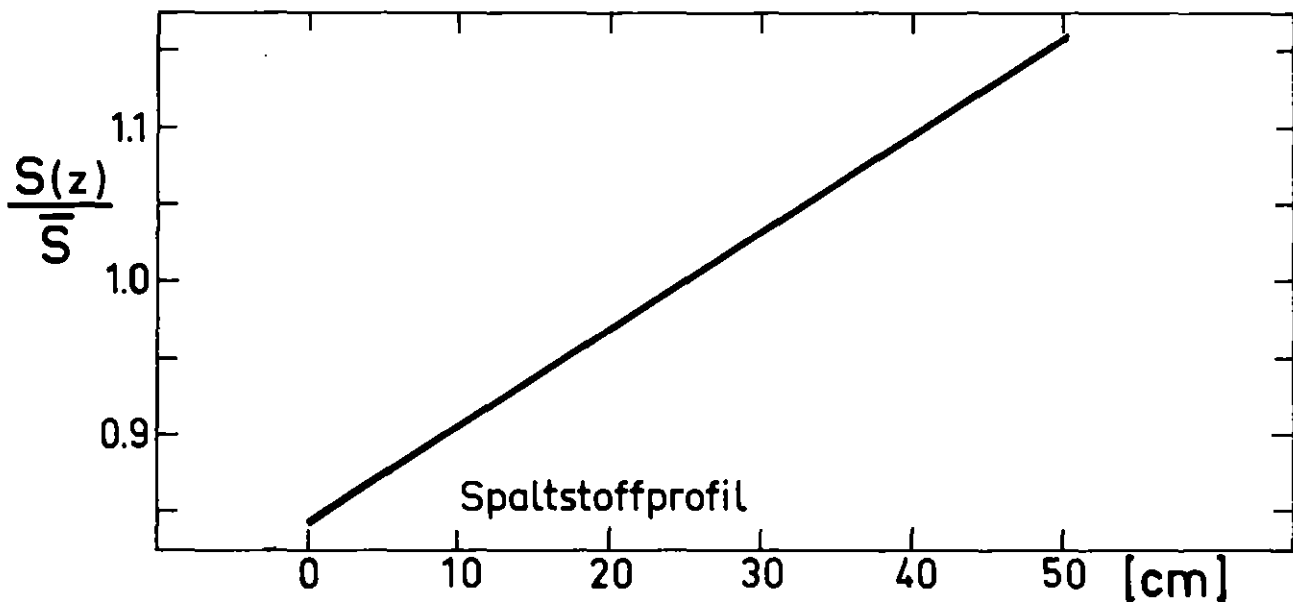
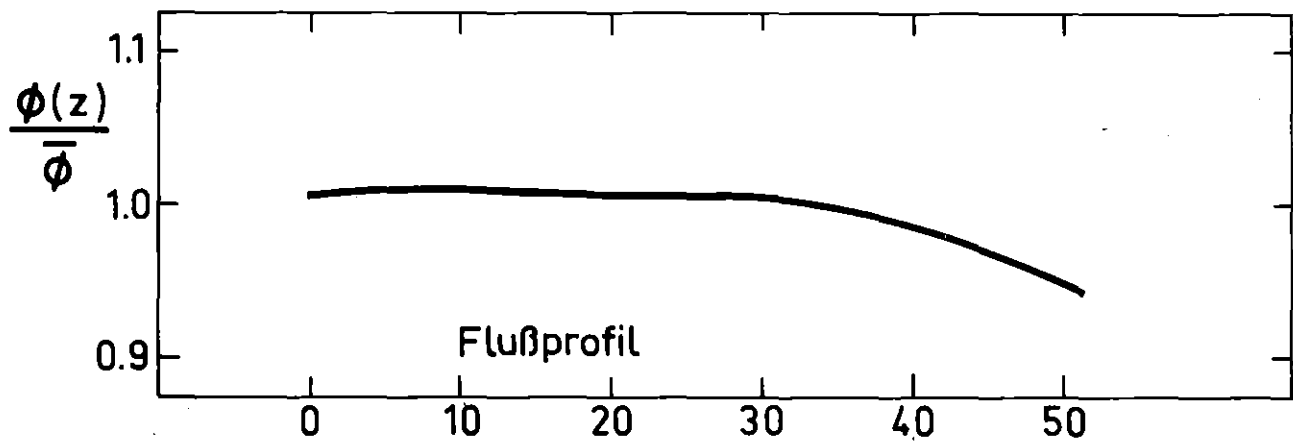
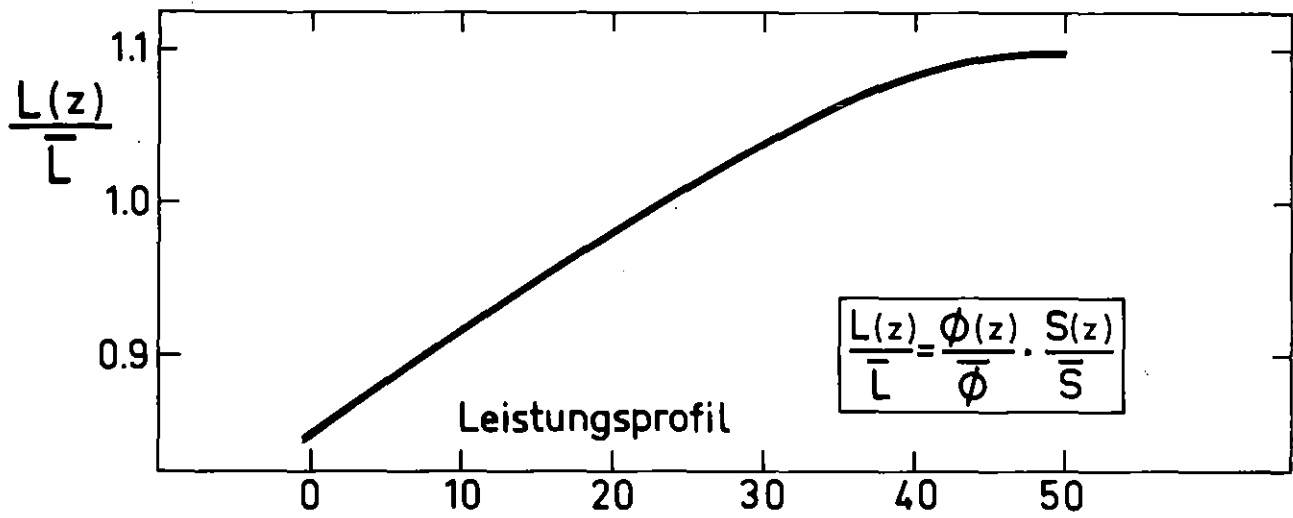
Normierte Axialprofile am Prüfling
Versuch: G1.1 Stab Nr.: 3 Abb.: 12.1



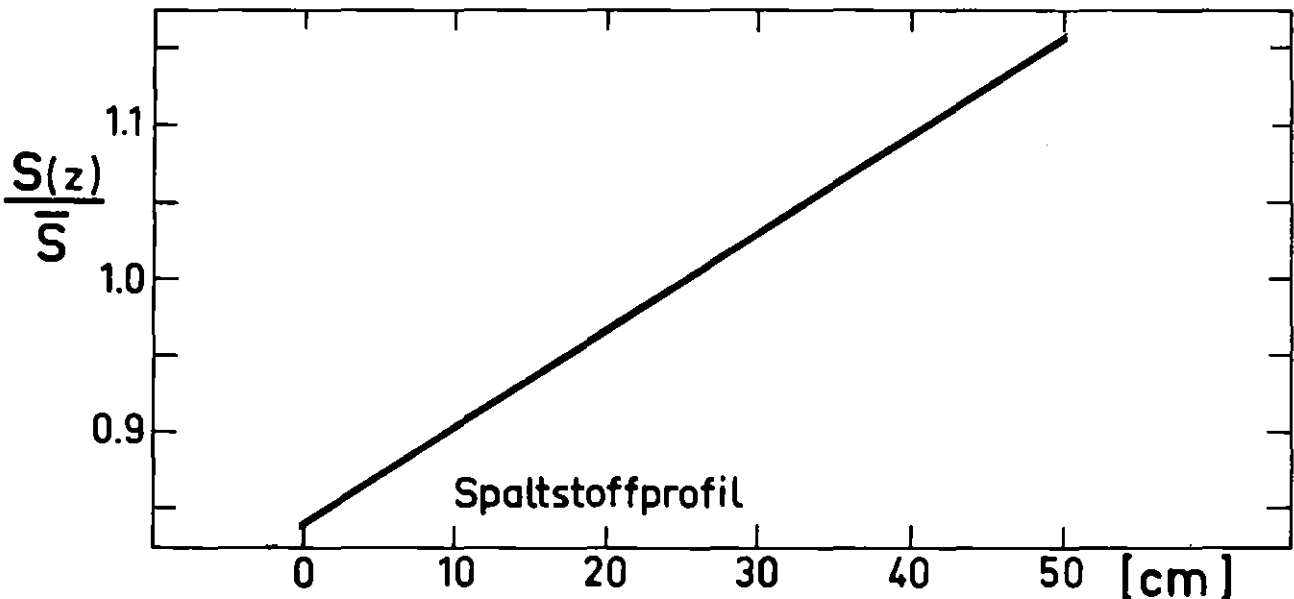
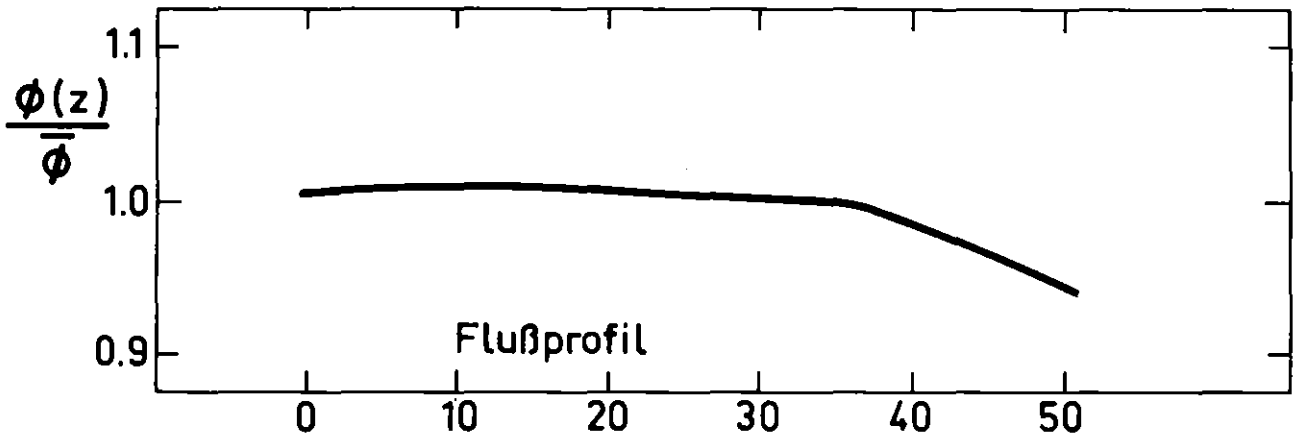
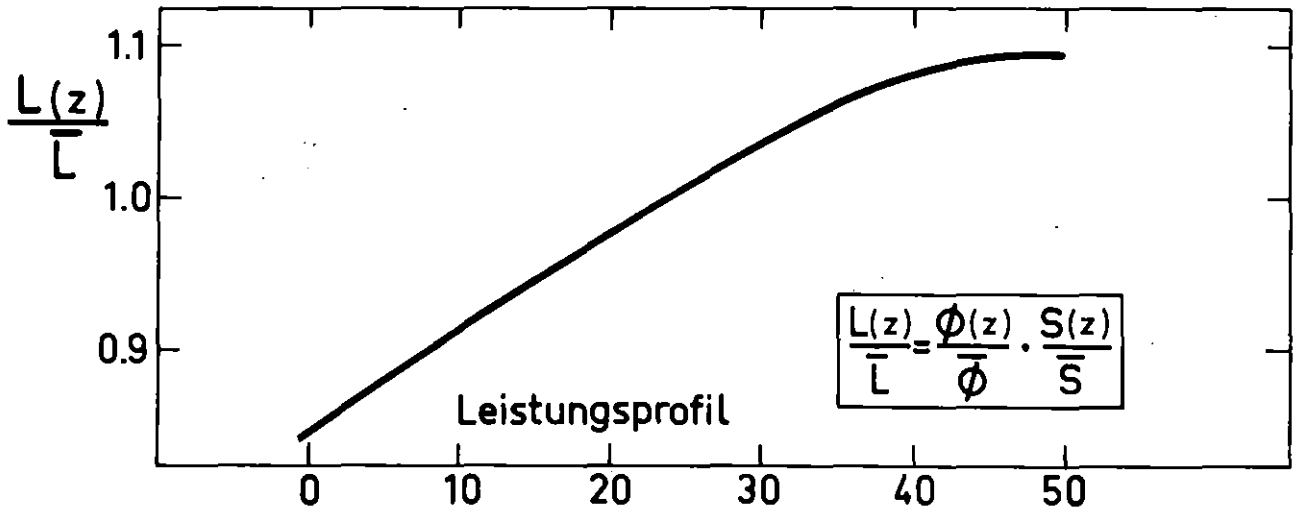


z → Abstand von UKF





z → Abstand von UKF

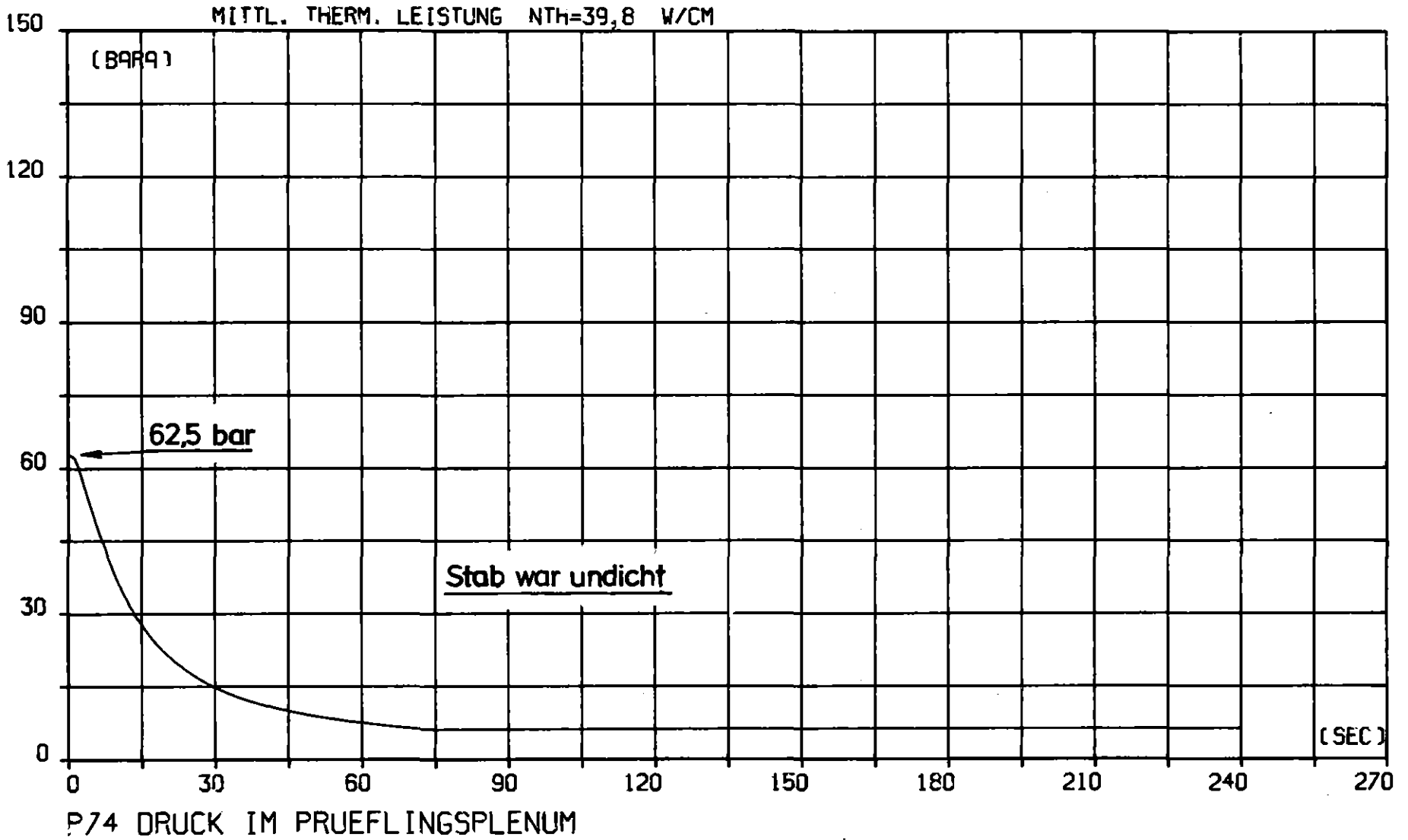


z → Abstand von UKF

Normierte Axialprofile am Prüfling
Versuch: G1.5 Stab Nr.: 9 Abb.: 12.5

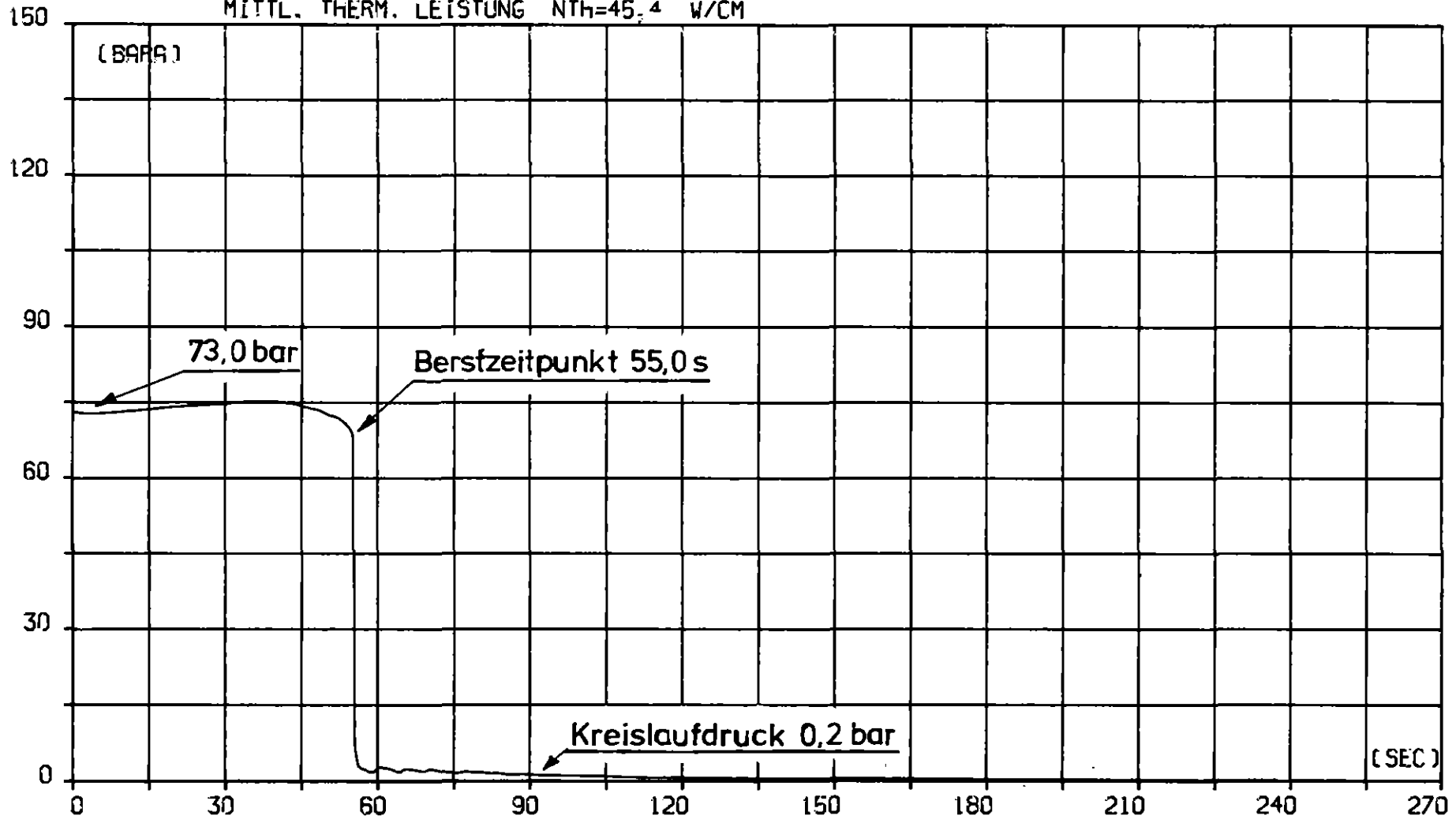
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.1
VOM 22.02.78 ZEIT 12H03M45S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 1.1
Abb.13.1



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.2
VOM 24.02.78 ZEIT 16H28M38S

MITTL. THERM. LEISTUNG $N_{Th}=45,4$ W/CM



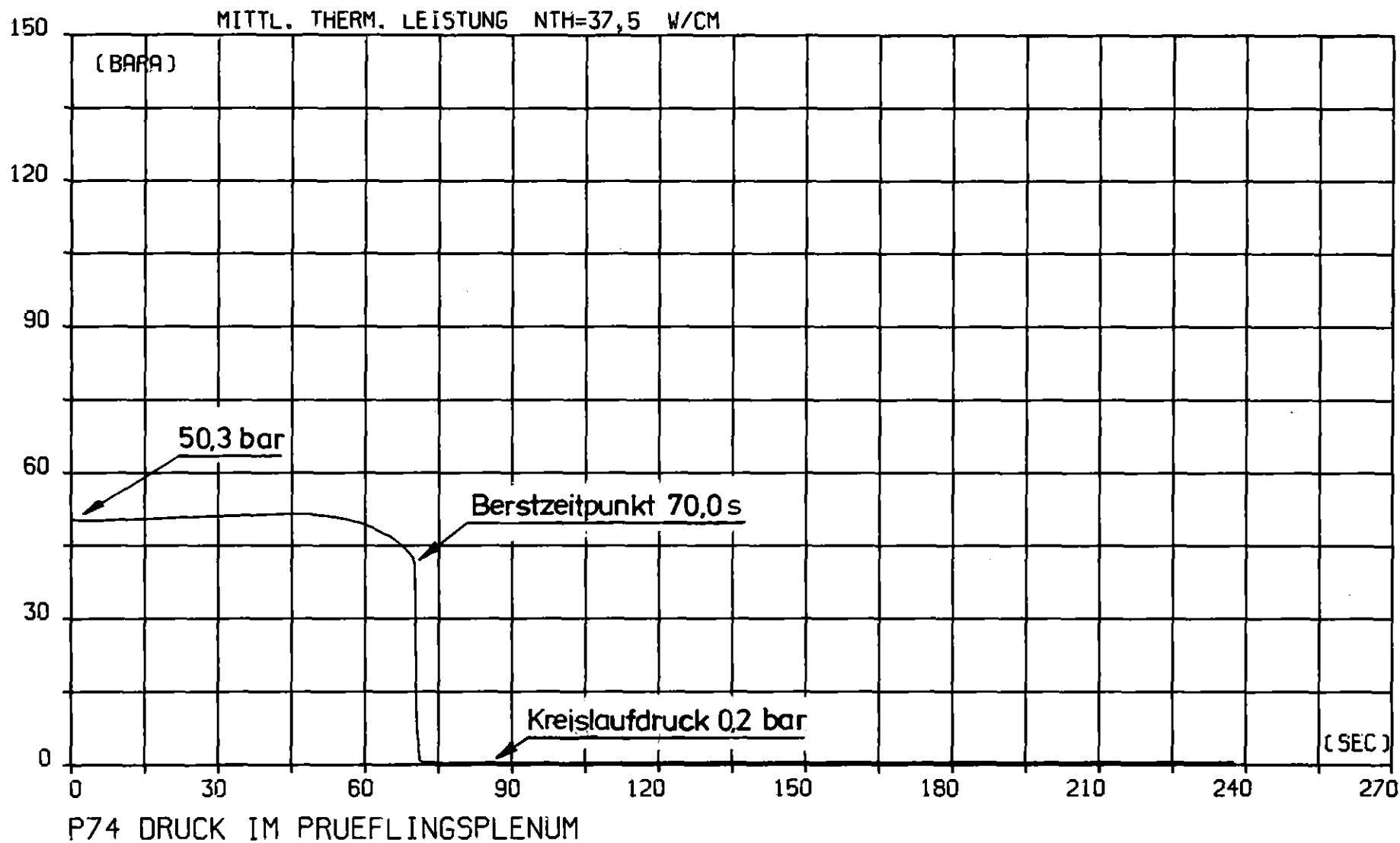
P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 1.2

Abb.13.2

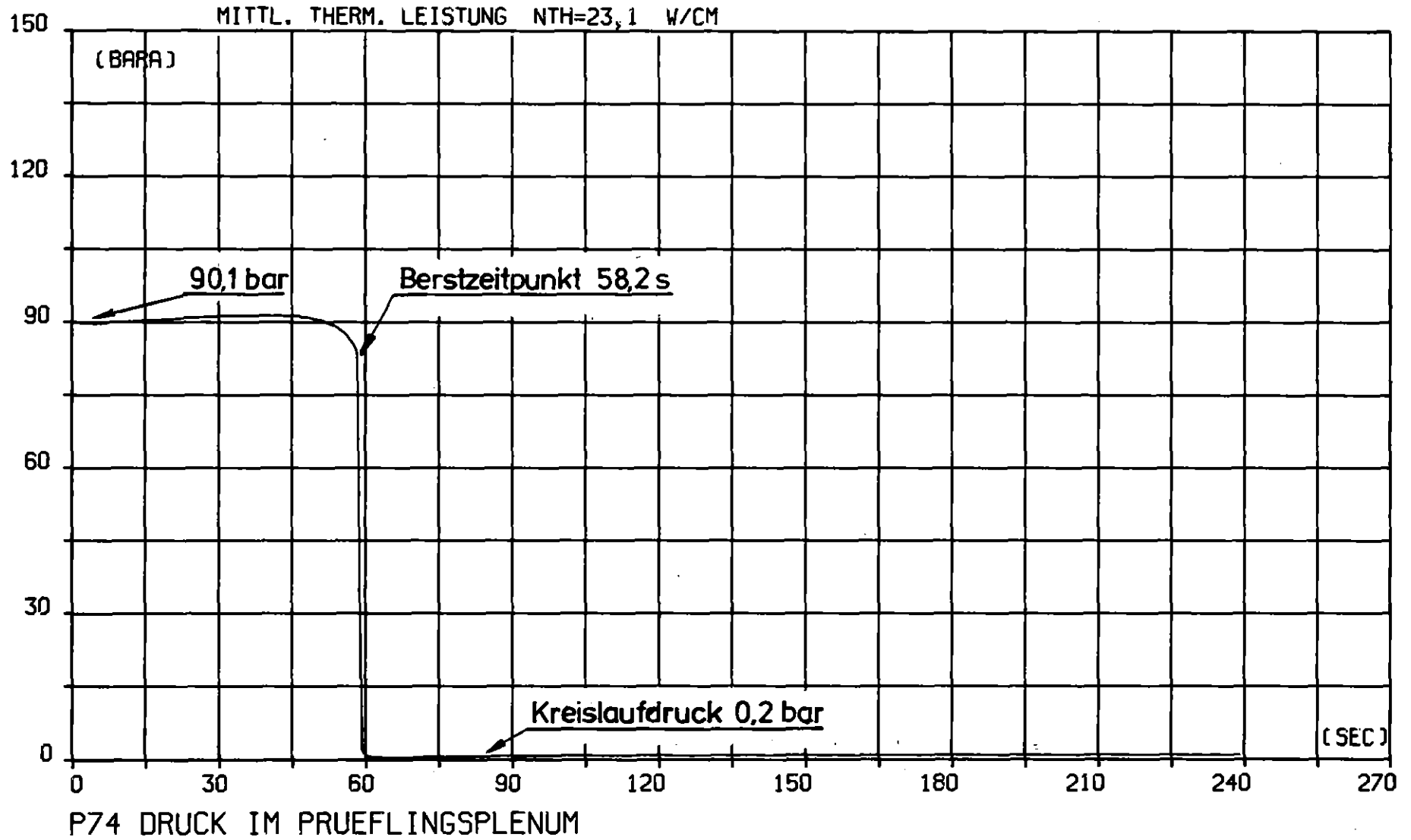
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.3
VOM 01.03.78 ZEIT 14H44M43S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 1.3 Abb.13.3



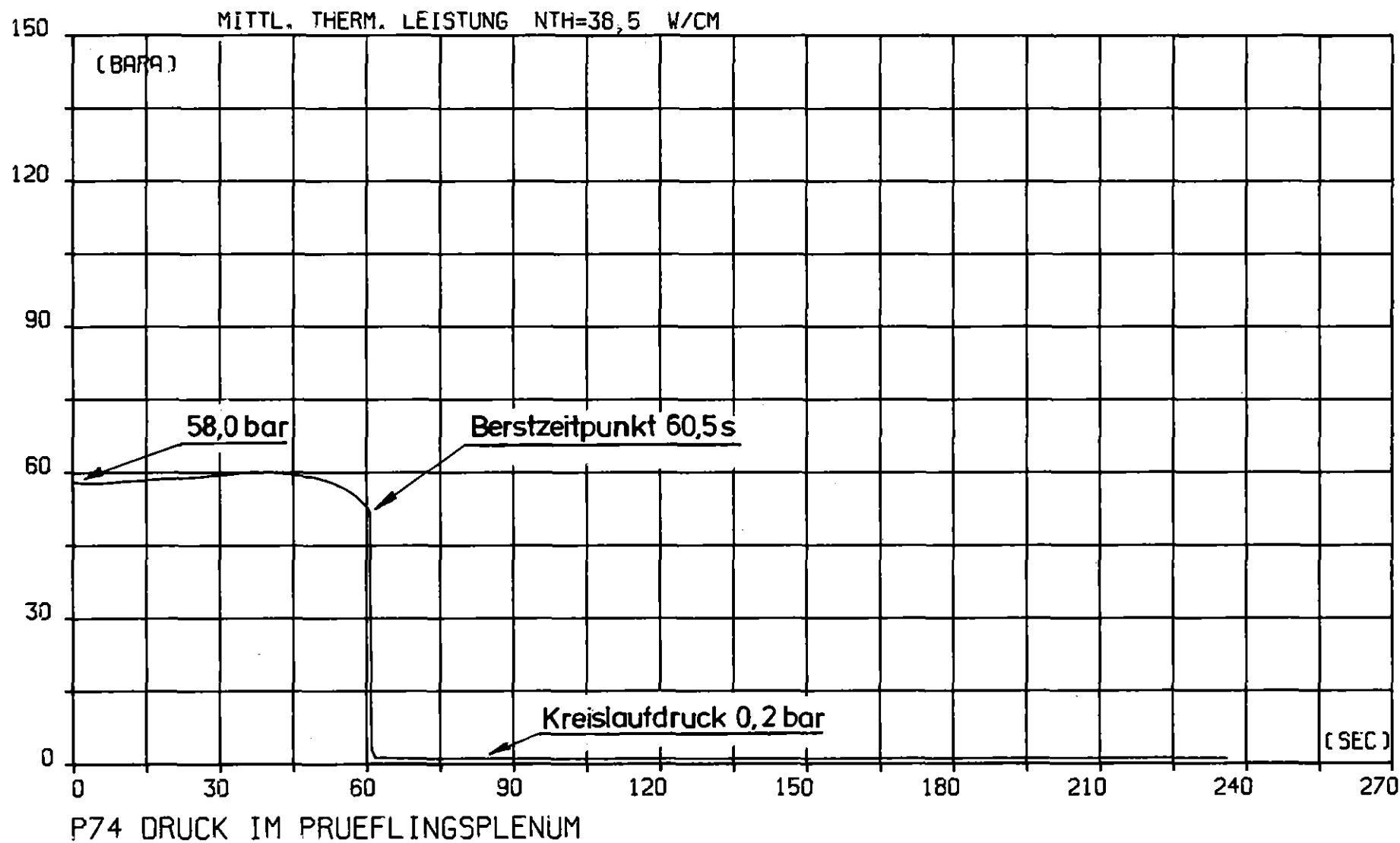
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.4
VOM 03.03.78 ZEIT 15H02M16S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 1.4 Abb.13.4



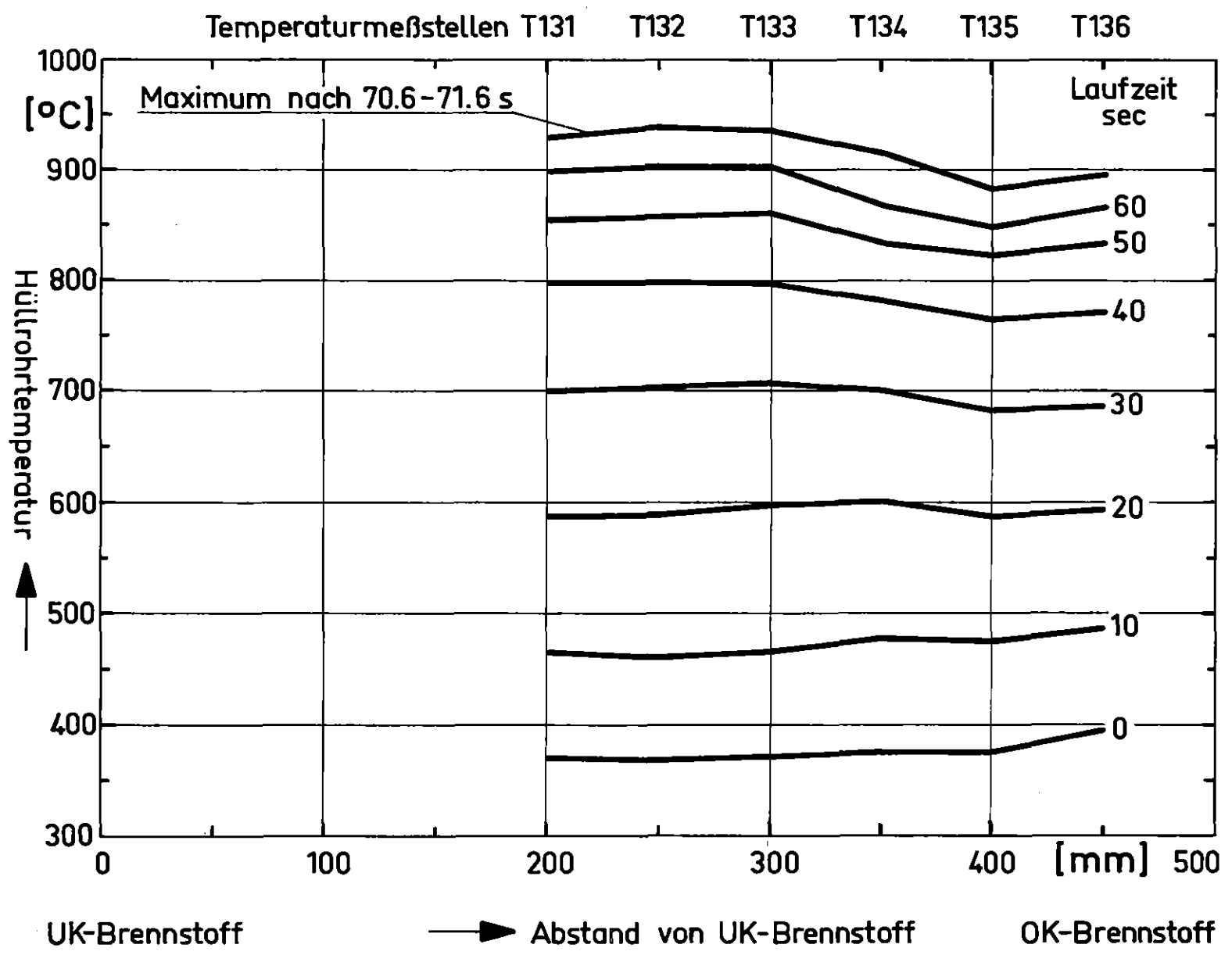
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.5
VOM 23.02.78 ZEIT 13H01M11S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P 74) IM VERSUCH G 1.5 Abb.13.5



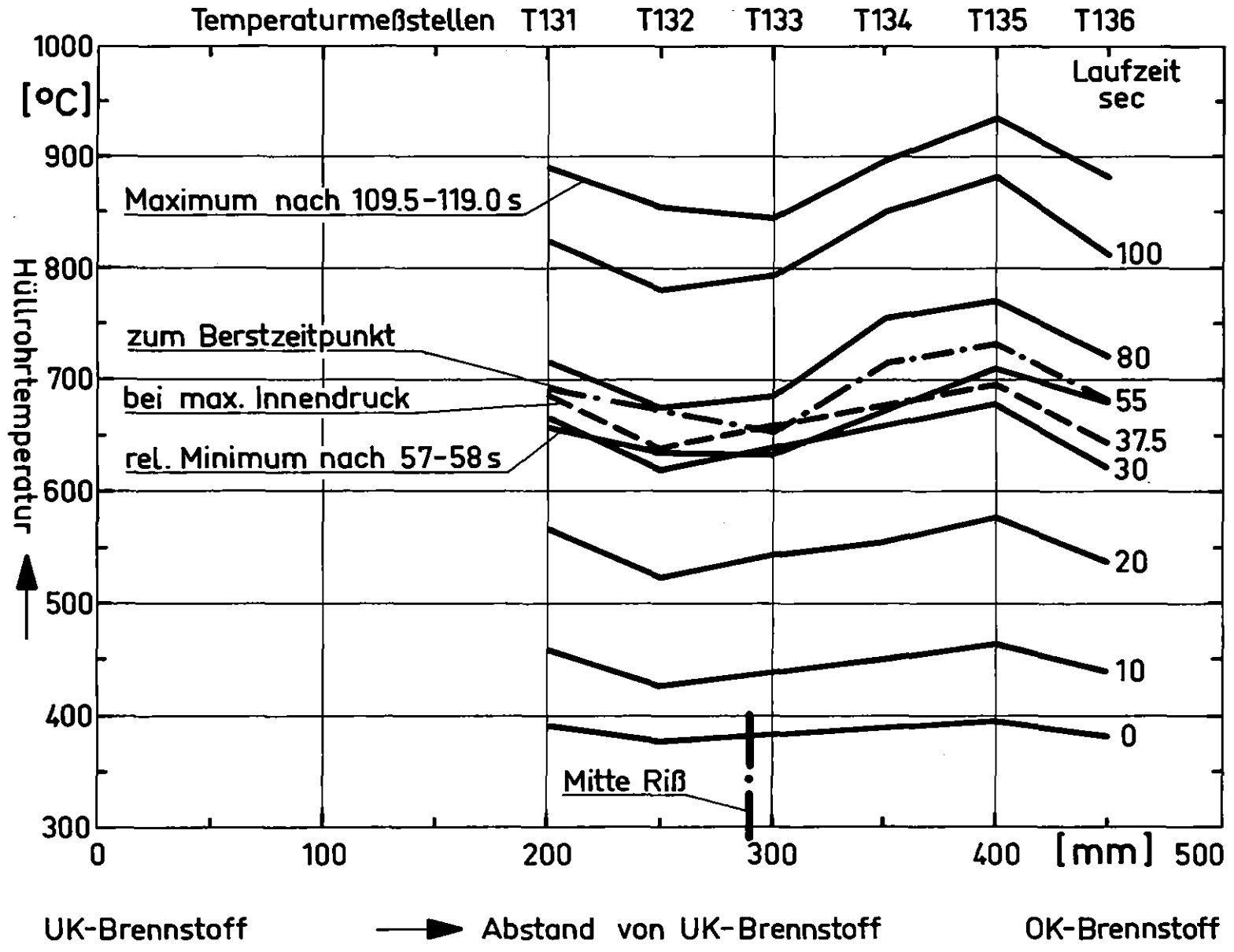
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen
Axiales Temperaturprofil Versuch: G1.1 Abb.14.1

RBT/IT-1978
 PNS 4237-84.19



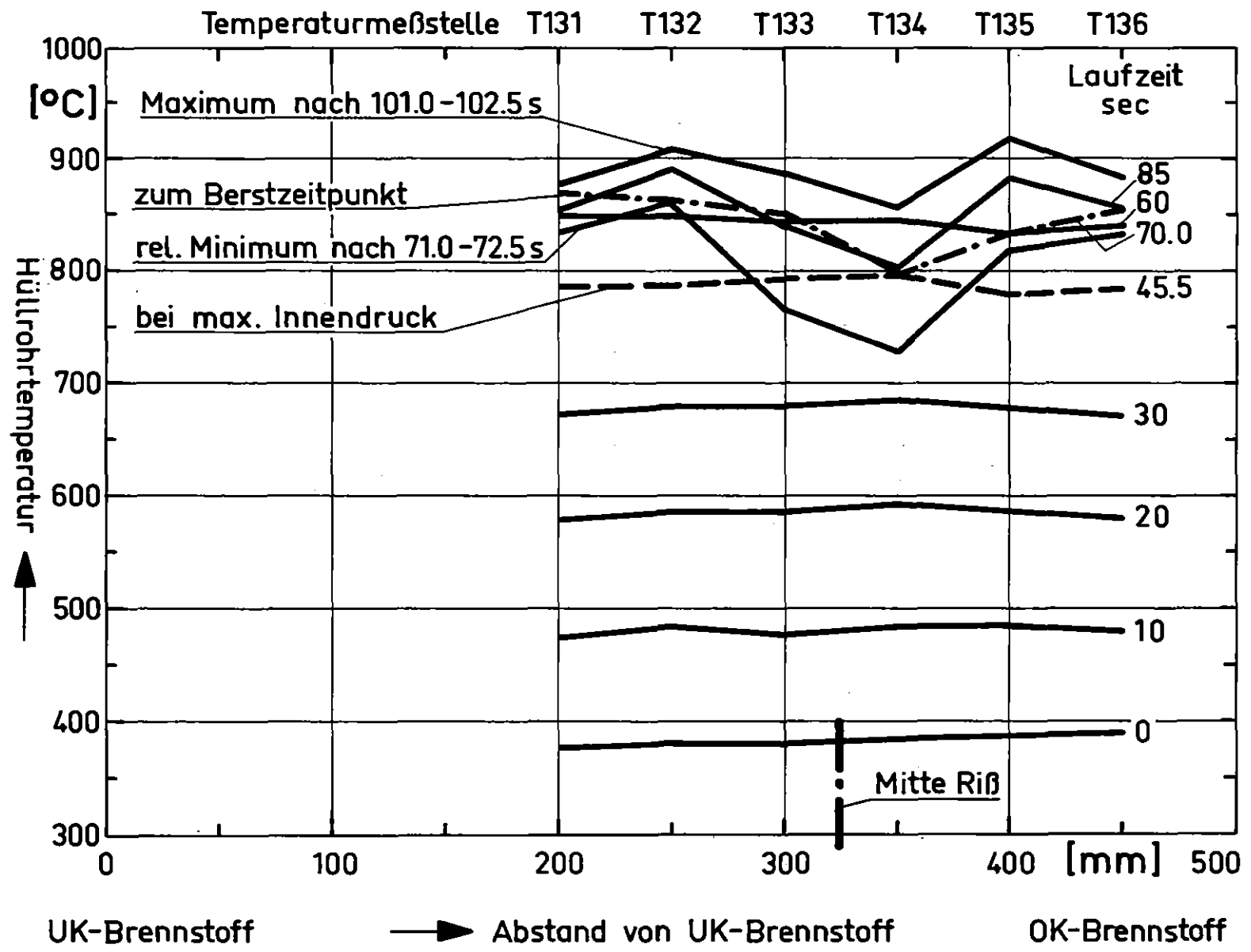
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen
 Axiales Temperaturprofil Versuch: G1.2 Abb.14.2

KfK
 RB7/IT-1978
 PNS 4237-84.20



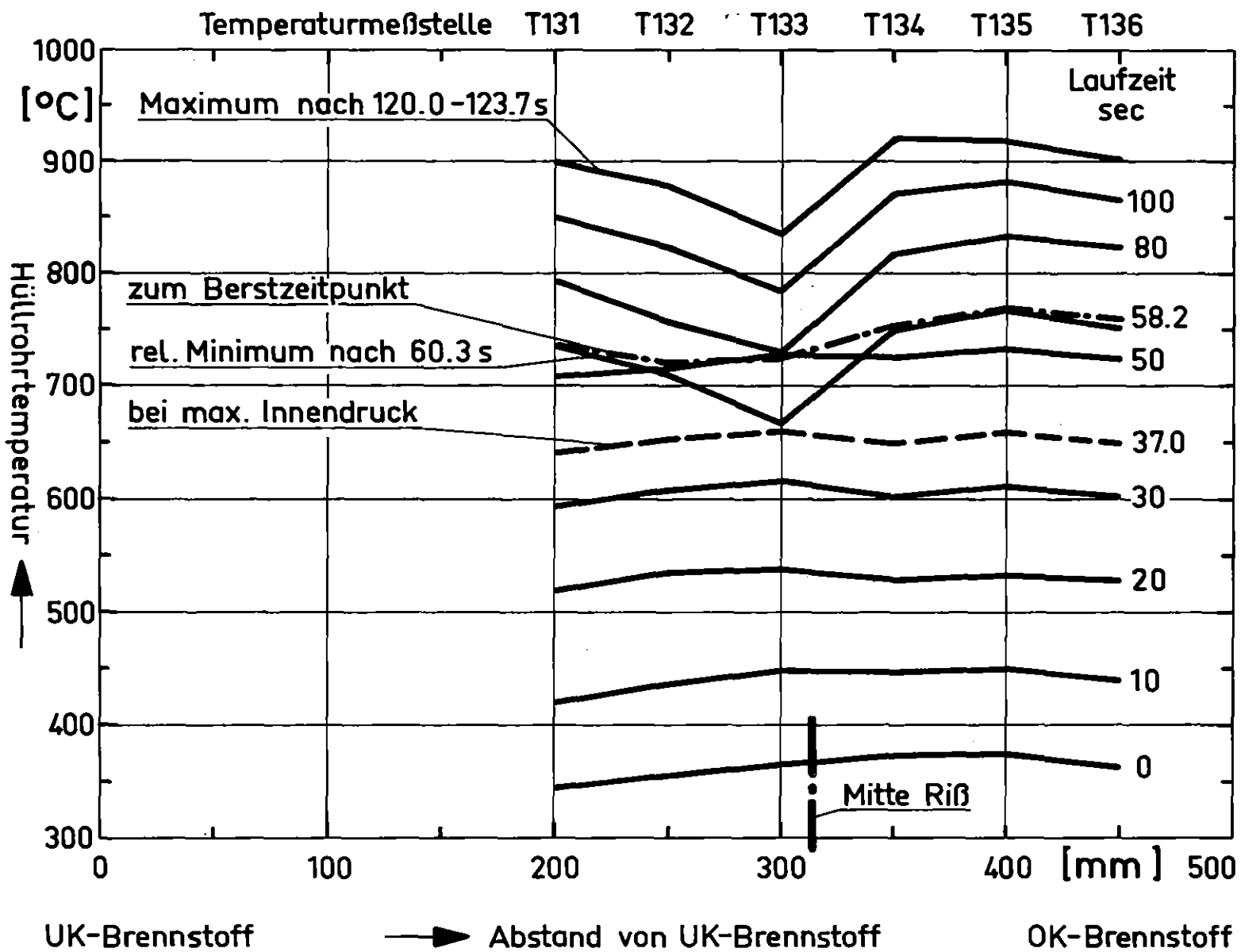
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen
 Axiales Temperaturprofil Versuch: G1.3 Abb. 14.3

KfK
 RBT/IT-1978
 PNS 4237-84.21



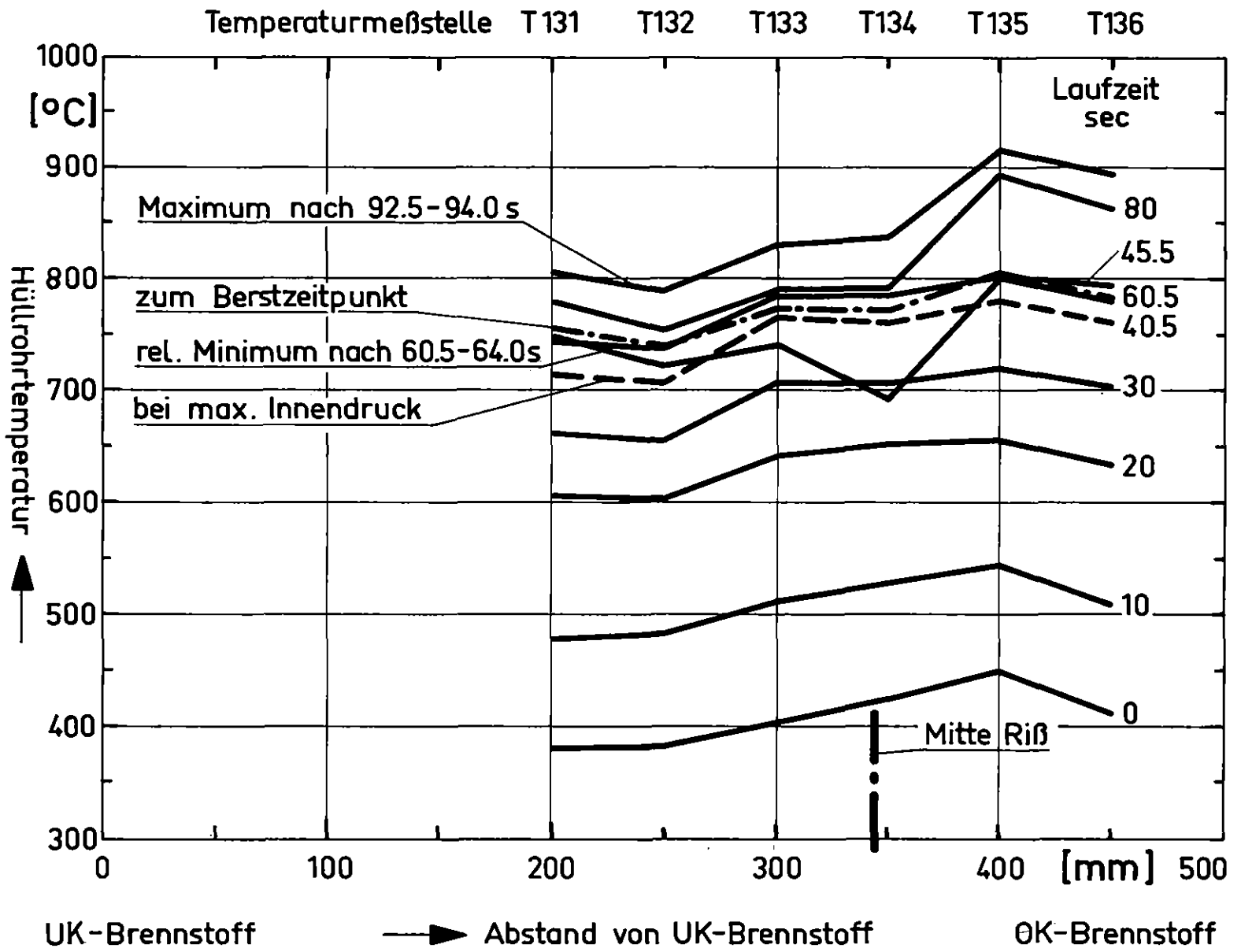
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen
Axiales Temperaturprofil Versuch G1.4 Abb. 14.4

KfK
 RBT/IT-1978
 PNS 4237-84.22



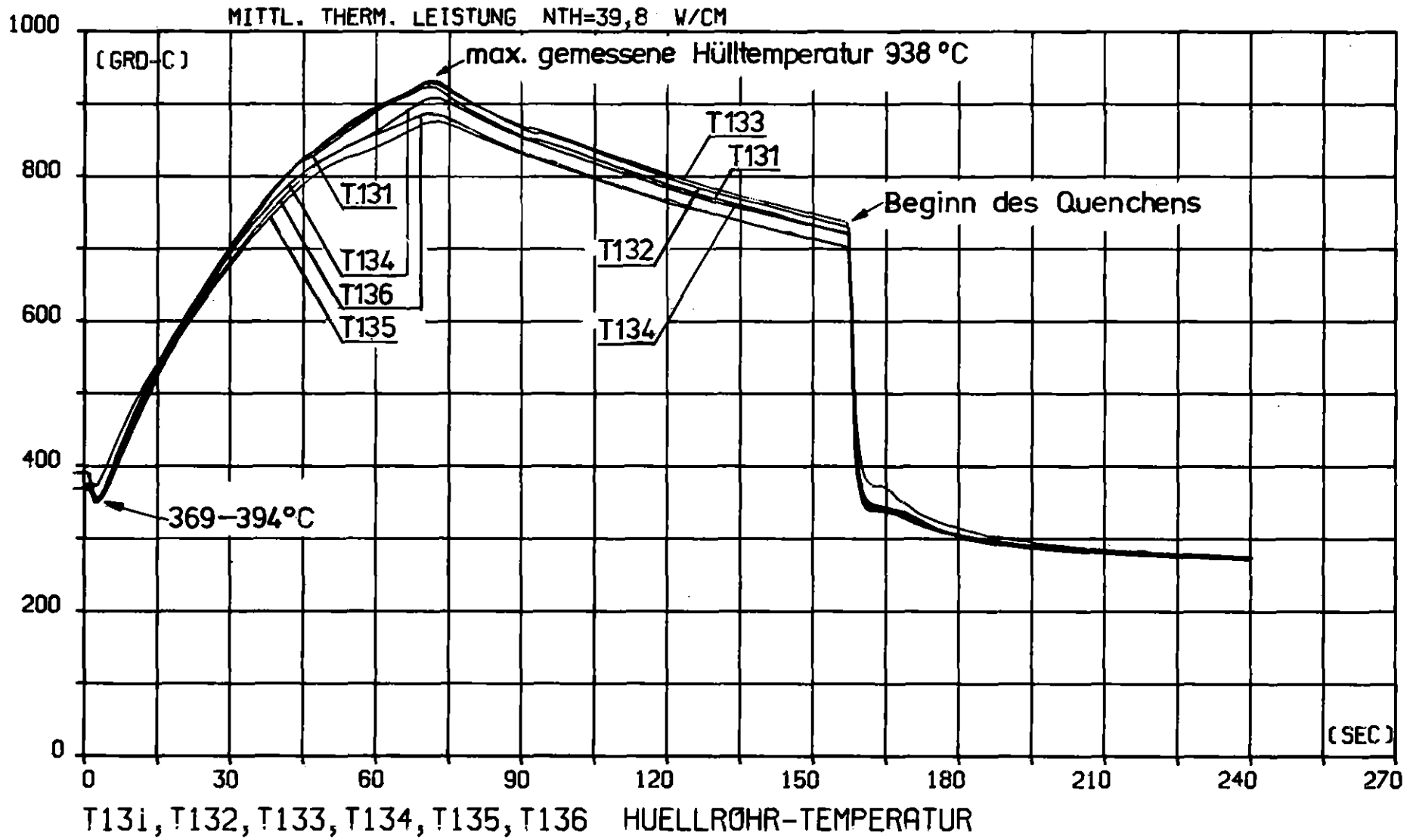
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen
 Axiales Temperaturprofil Versuch: G.1.5 Abb. 14.5

KfK
 RBT/IT-1978
 PNS 4237-84.23



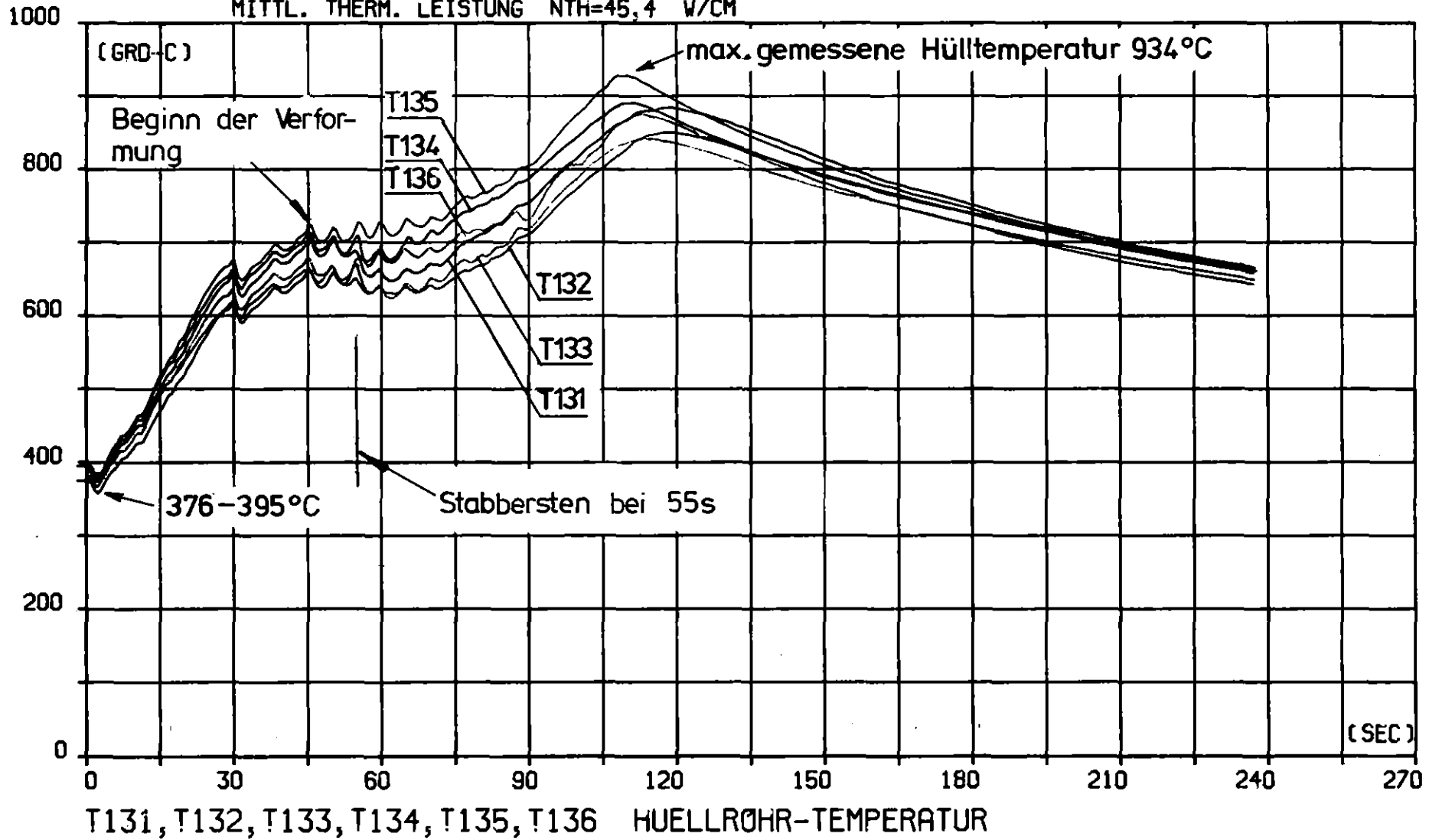
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.1
VOM 22.02.78 ZEIT 12H03M45S

HÜLLRÖHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 1.1 Abb. 15.1



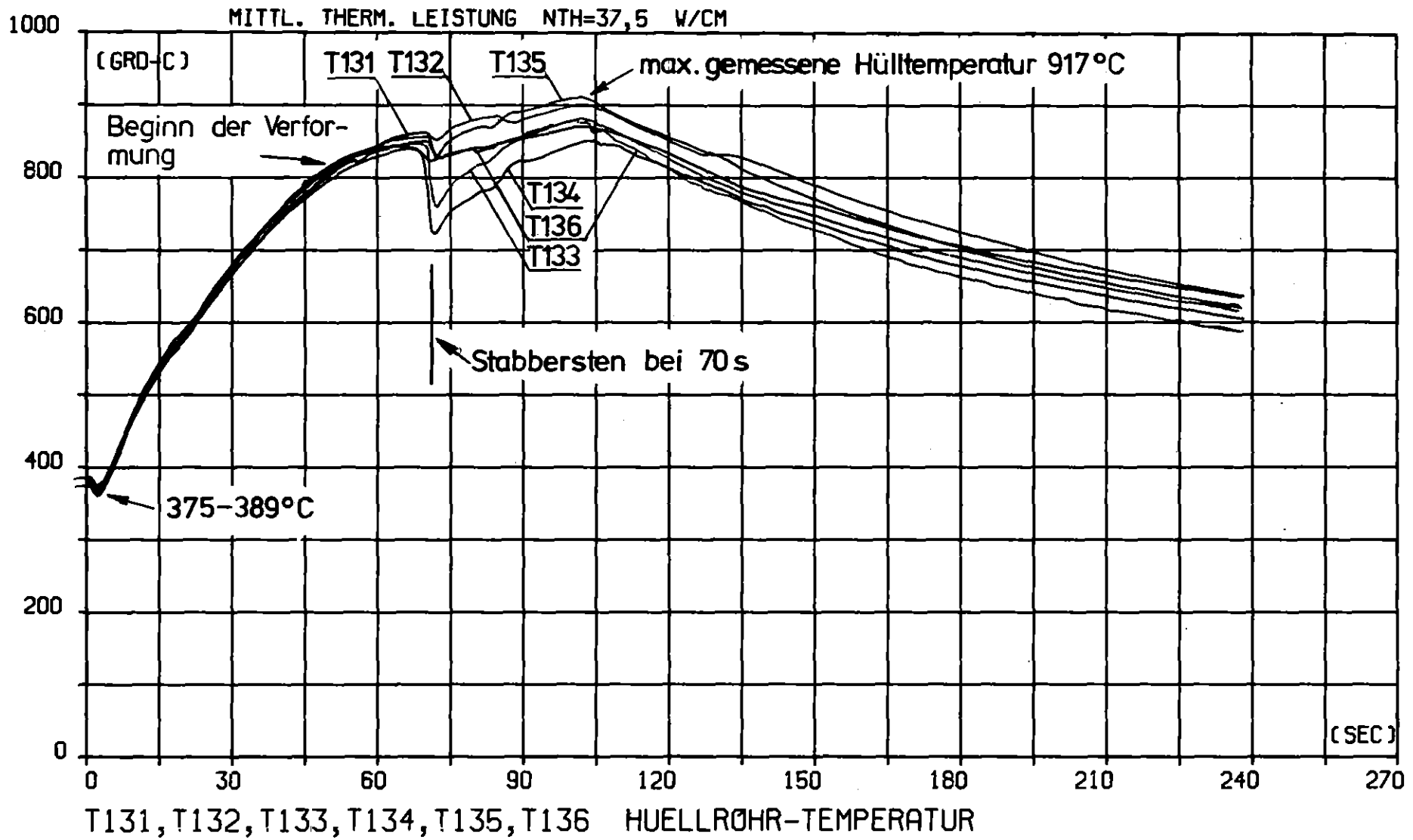
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.2
VOM 24.02.78 ZEIT 16H28M38S

MITTL. THERM. LEISTUNG $NTH=45,4$ W/CM



HÜELLRÖHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 1.2 Abb.15.2

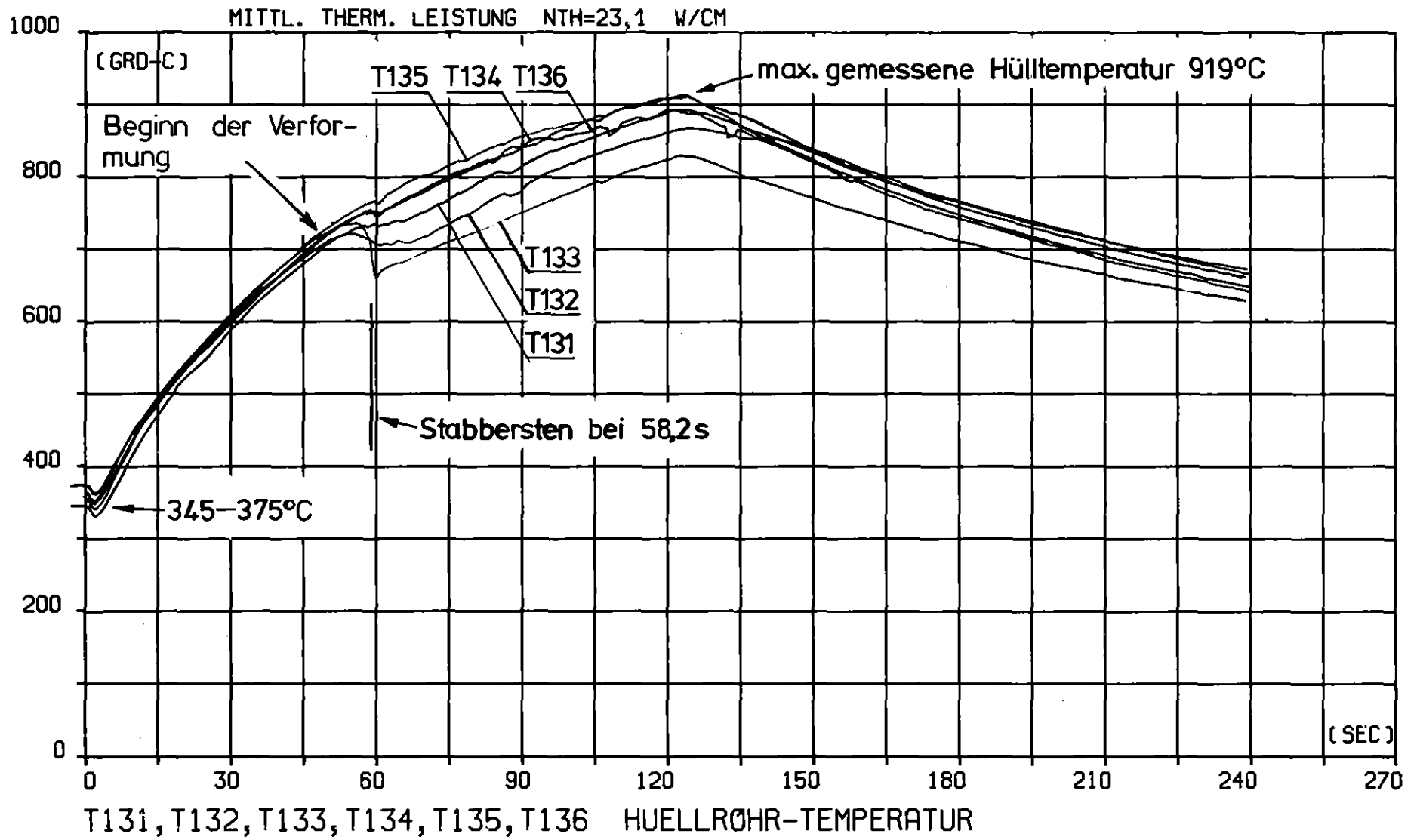
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.3
VOM 01.03.78 ZEIT 14H44M43S



HÜLLROHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 1.3 Abb. 15.3

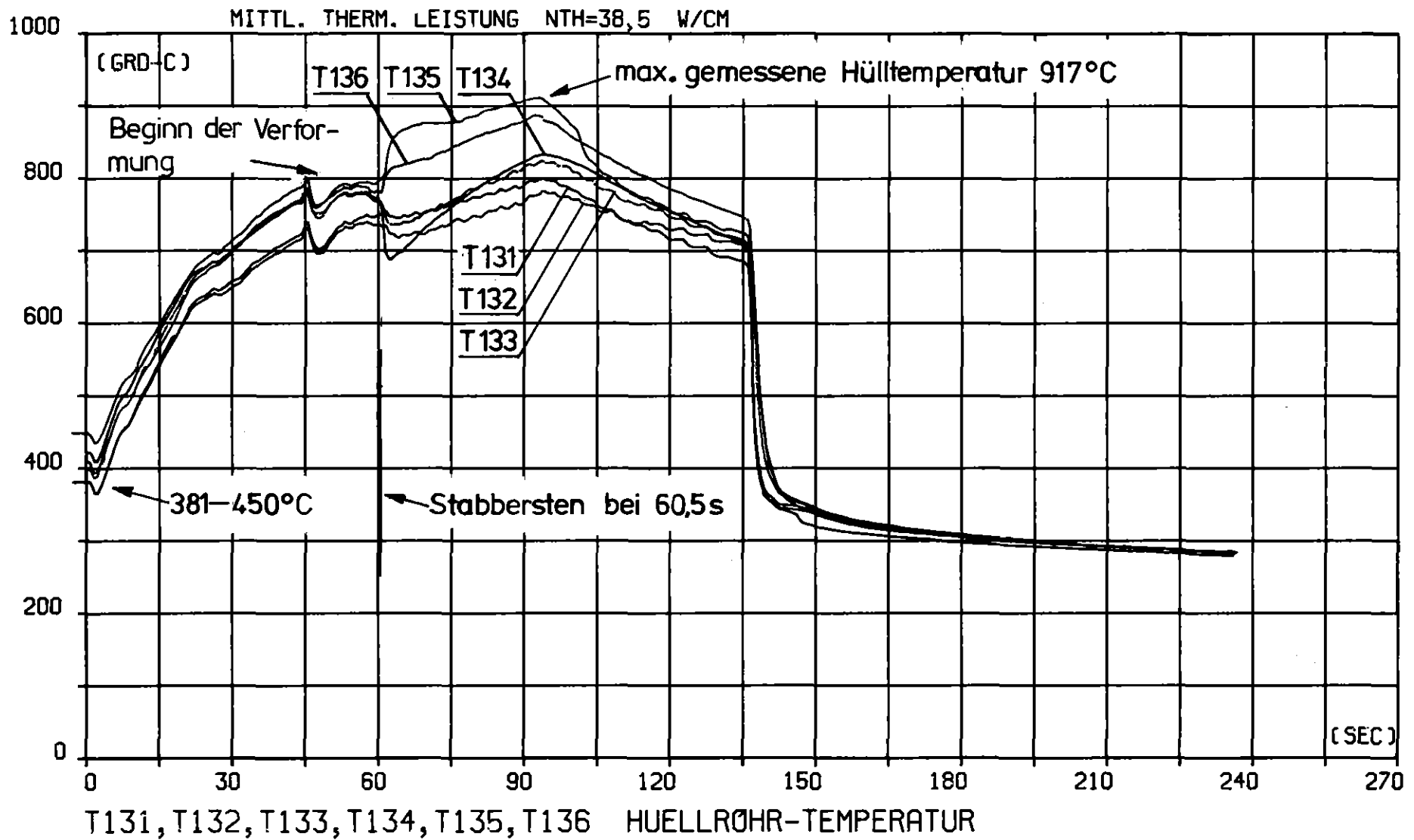
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.4
VOM 03.03.78 ZEIT 15H02M16S

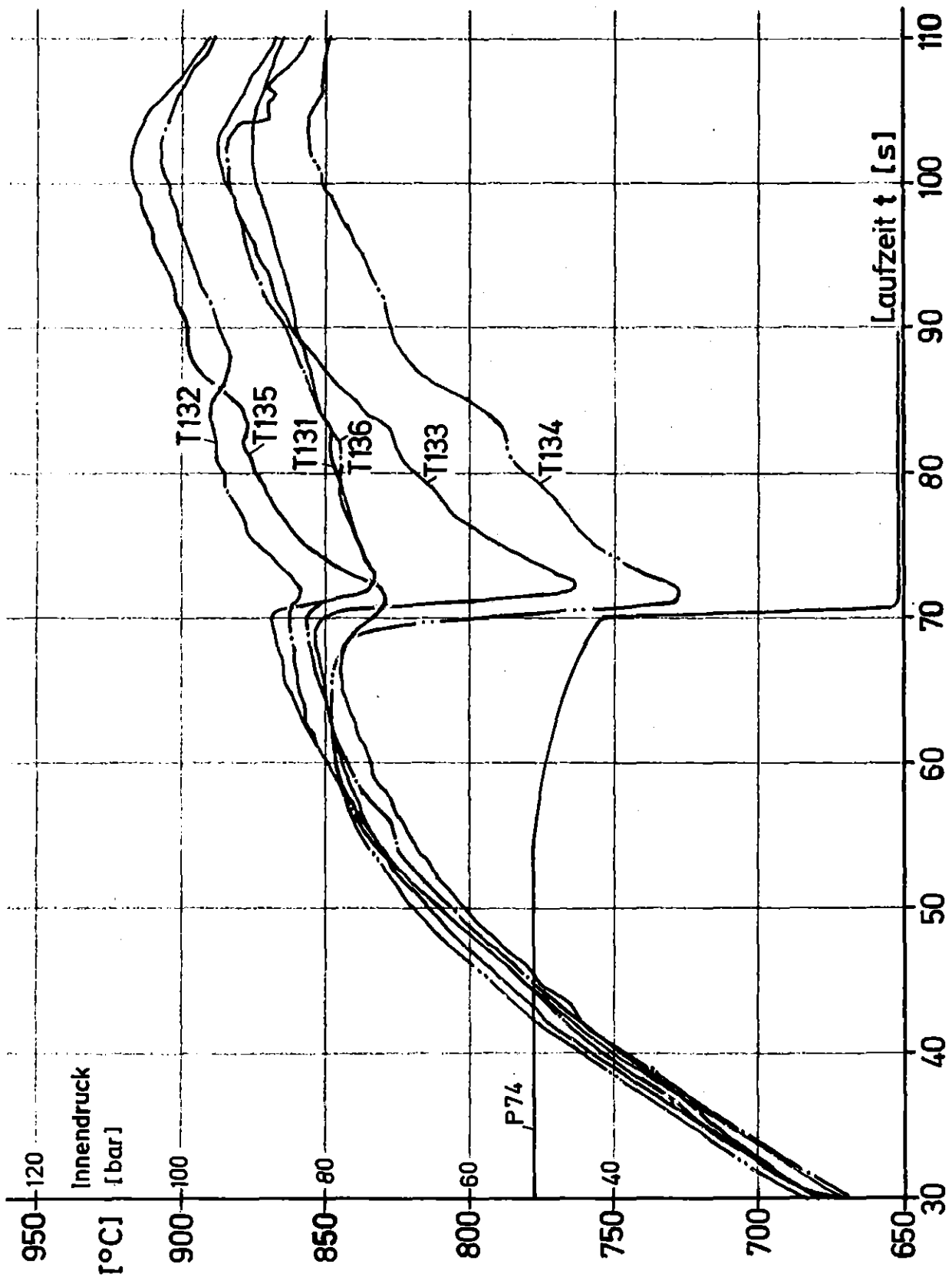
HÜLLROHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 1.4 Abb. 15.4



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : G 1.5
VOM 23.02.78 ZEIT 13H01M11S

HÜLLRÖHRTEMPERATUREN T 131 - T 136 IM VERSUCH G 1.5 Abb. 15.5

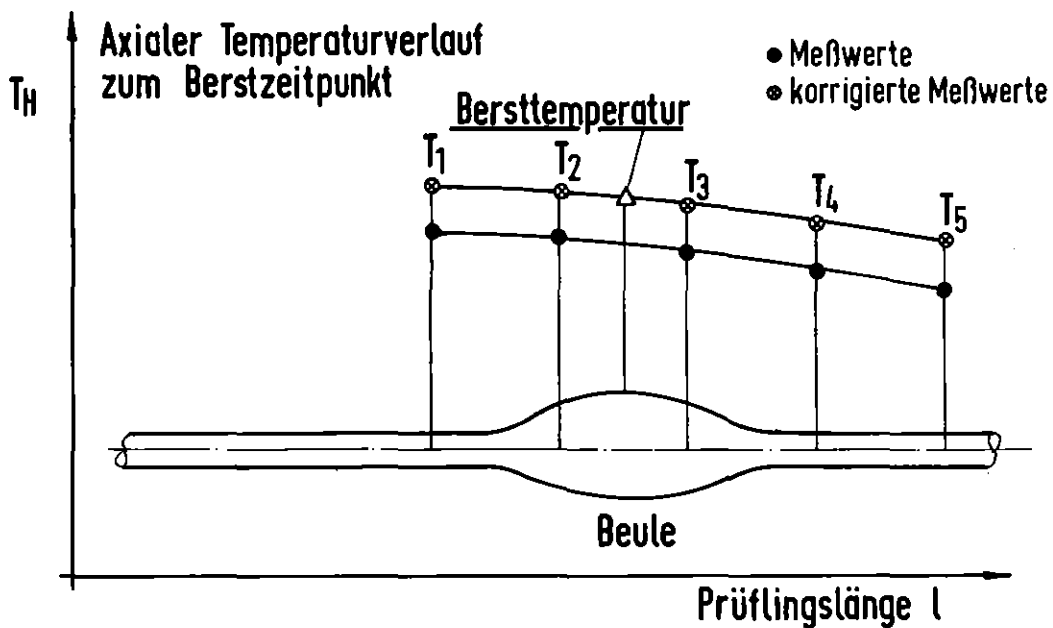
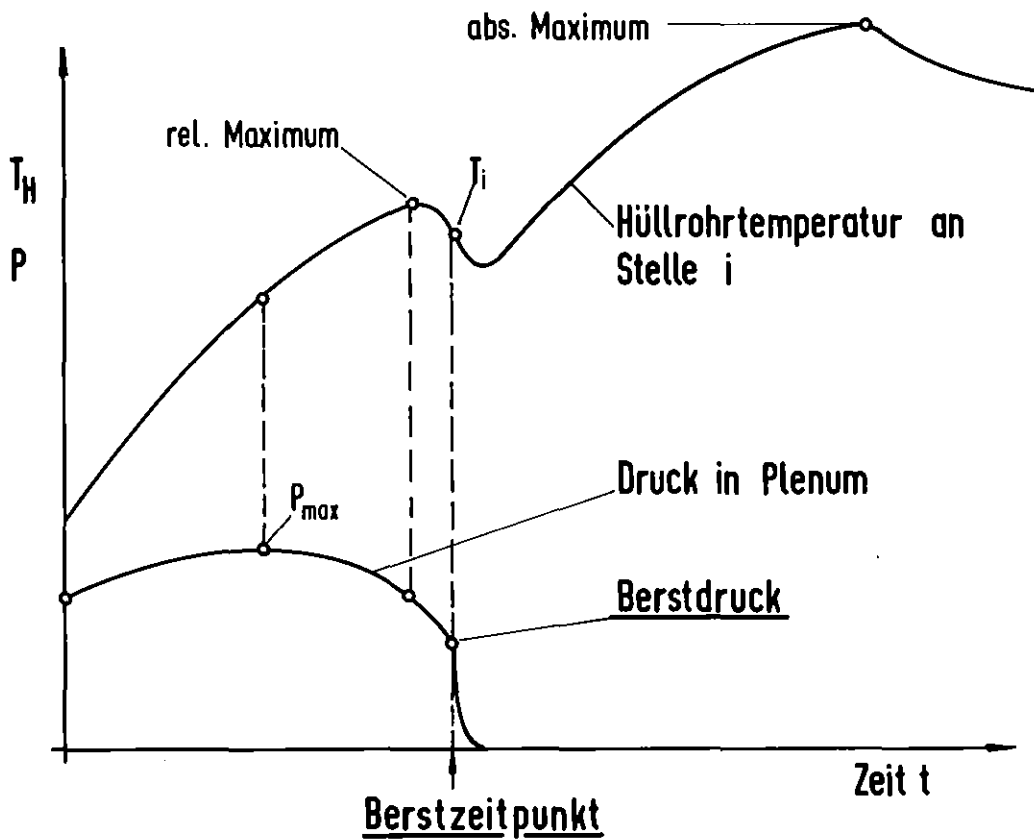




IT 78
PNS 4237-152

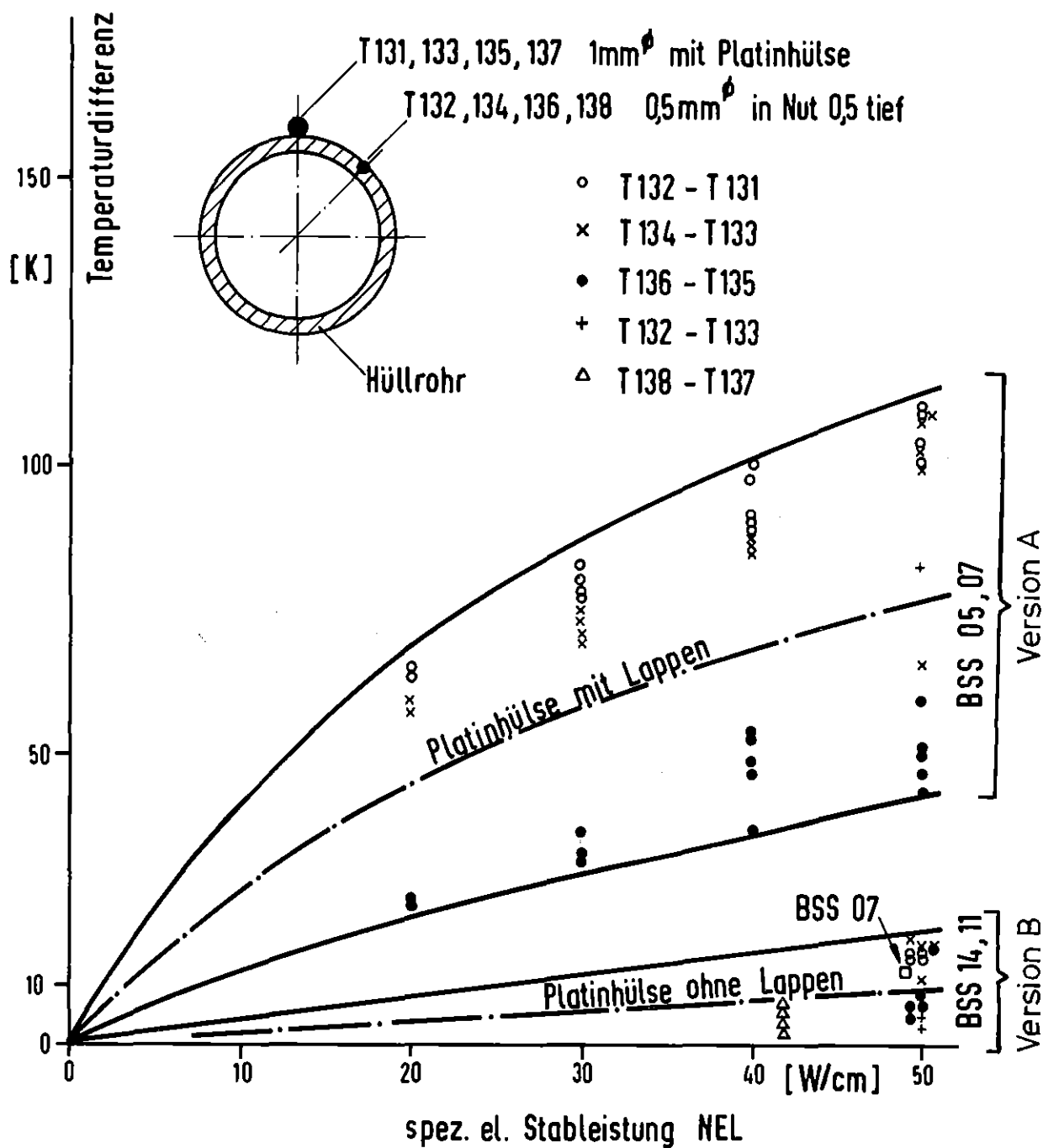
In-pile Versuch G1.3
Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt)

Abb.16

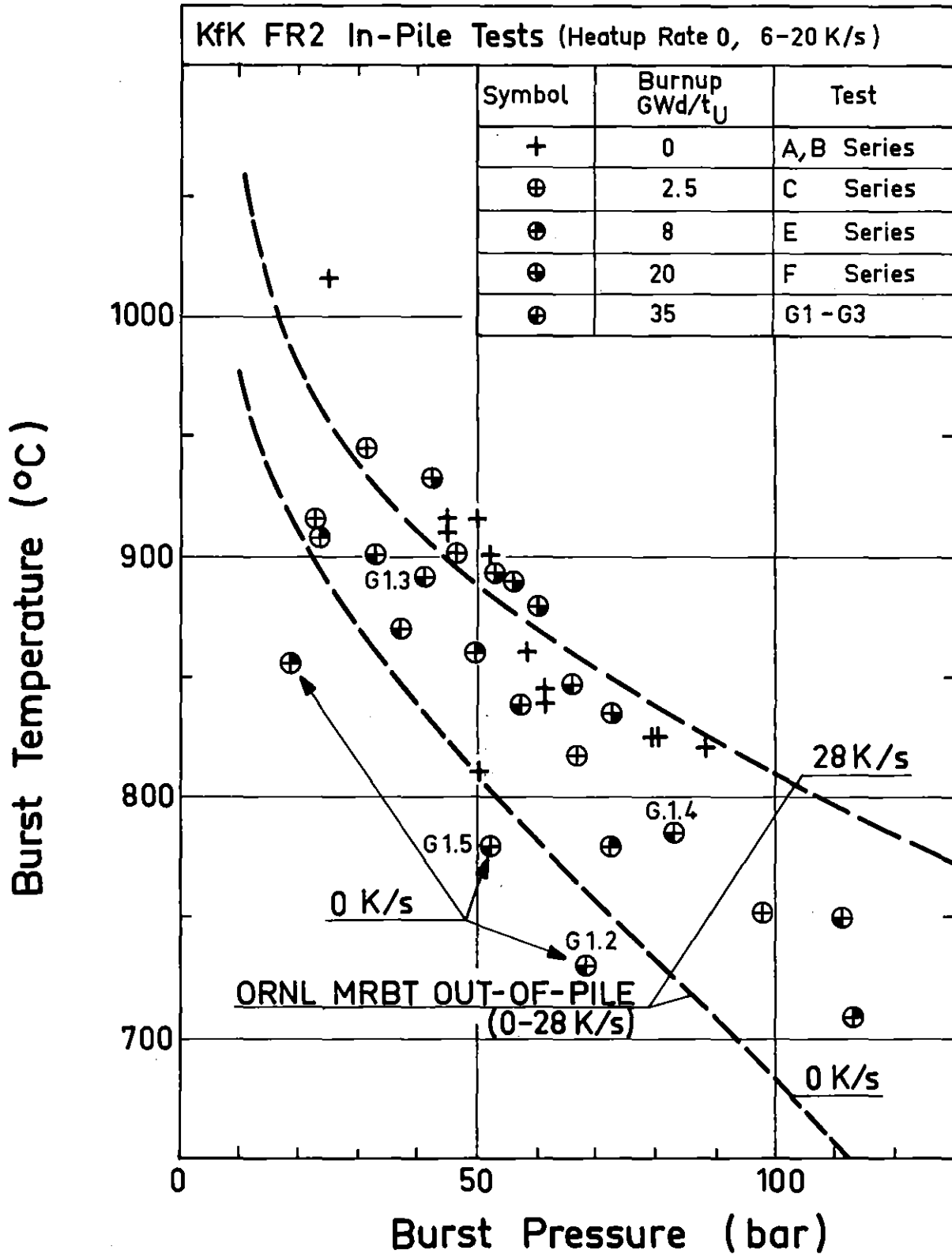


Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck

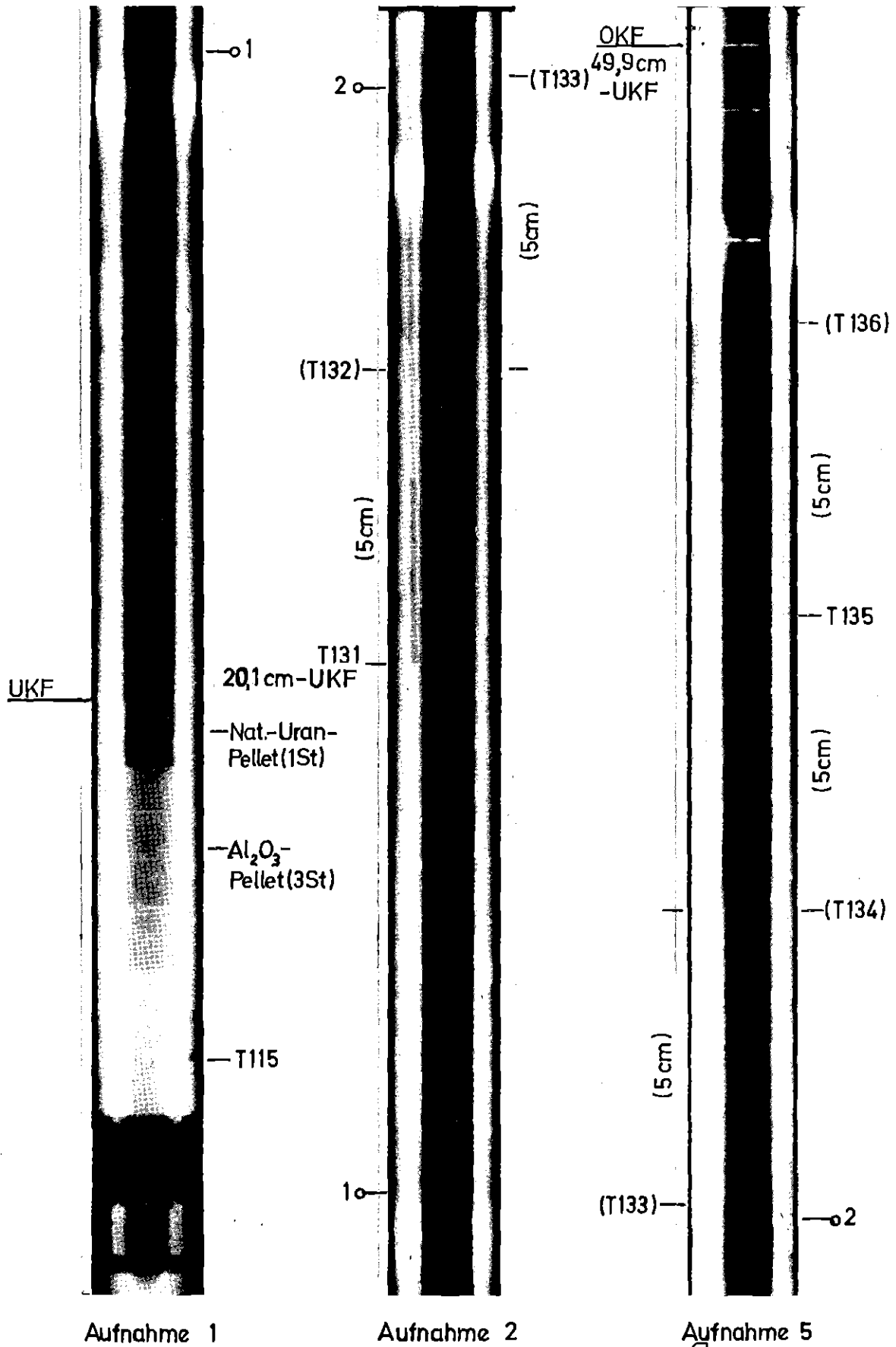
Abb.17



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



FR 2 In-Pile Single Rod Test in Steam
 Burst Temperature vs. Burst Pressure Abb. 19

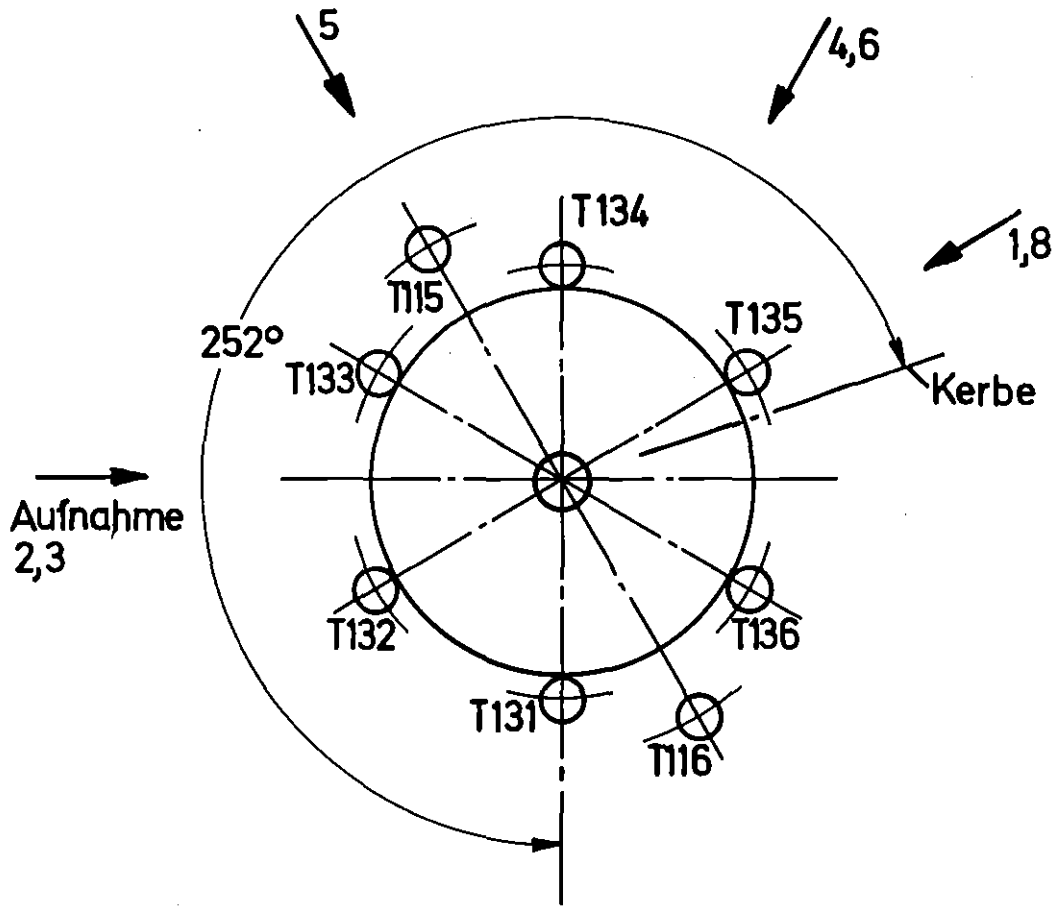


KIK
IT-80
PNS4237-367

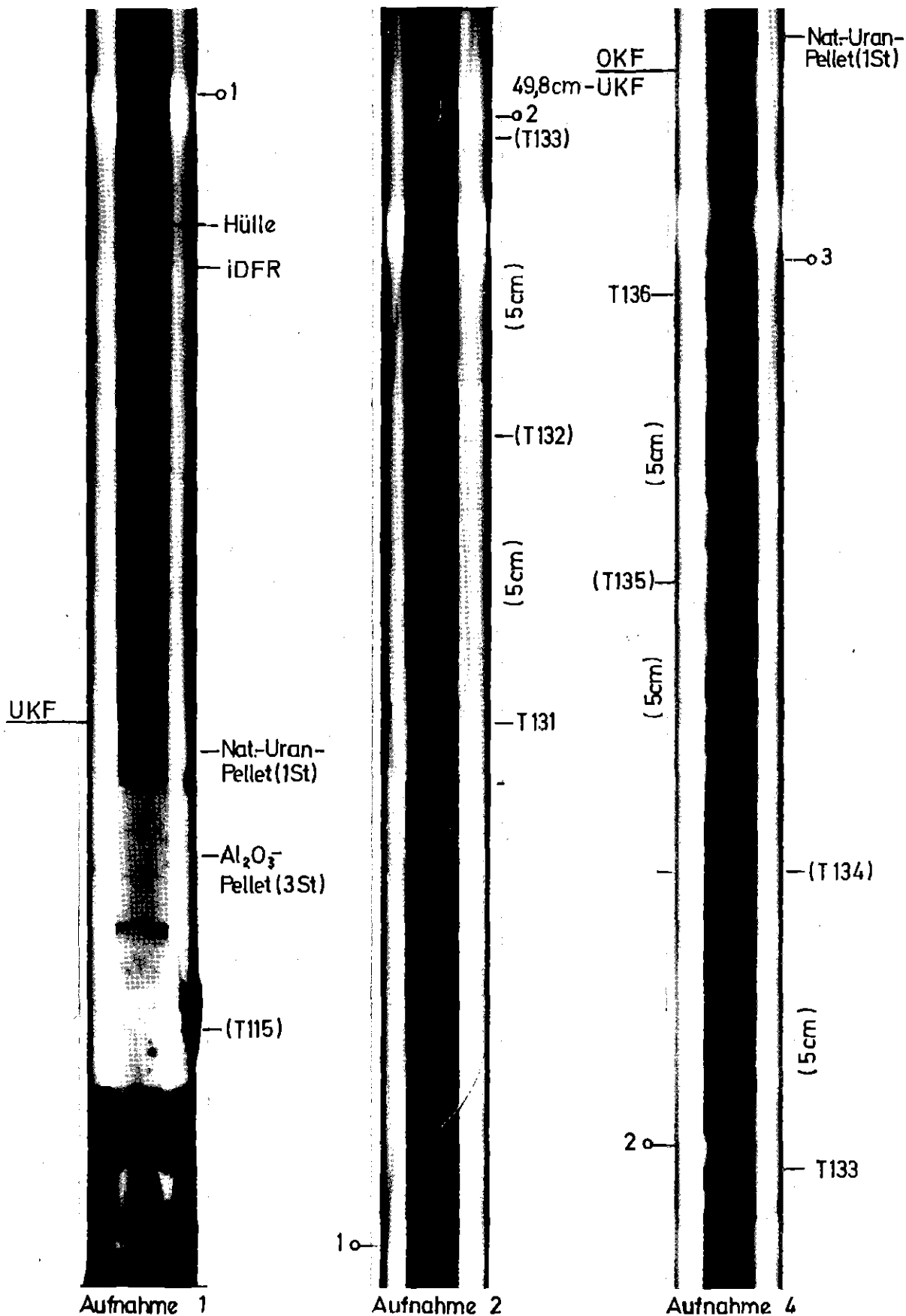
FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie vor Versuch G1.5

Abb. 20



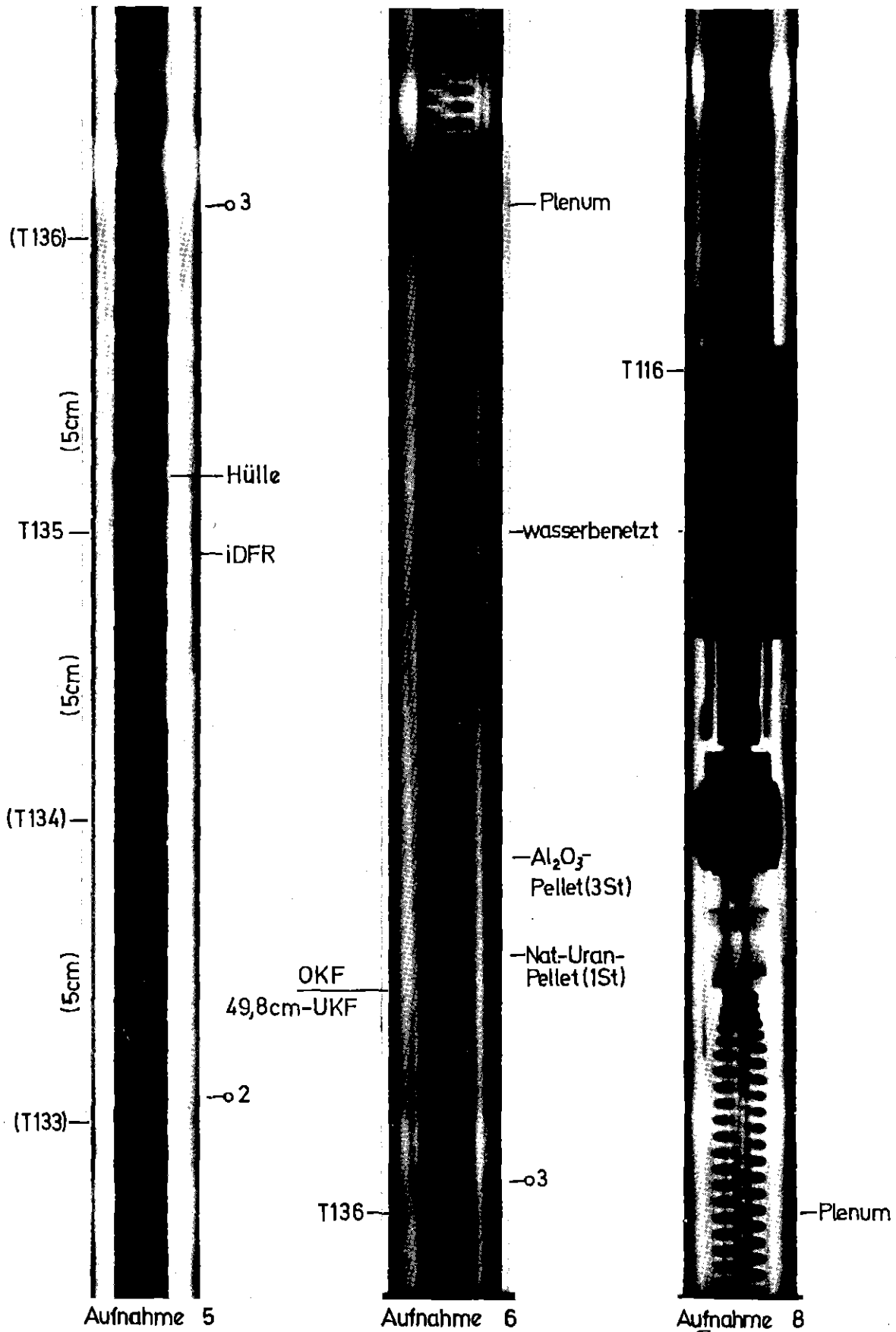
Ansicht von oben



KfK
IT-80
PNS4237-368

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.1 Abb.22 Bl.1

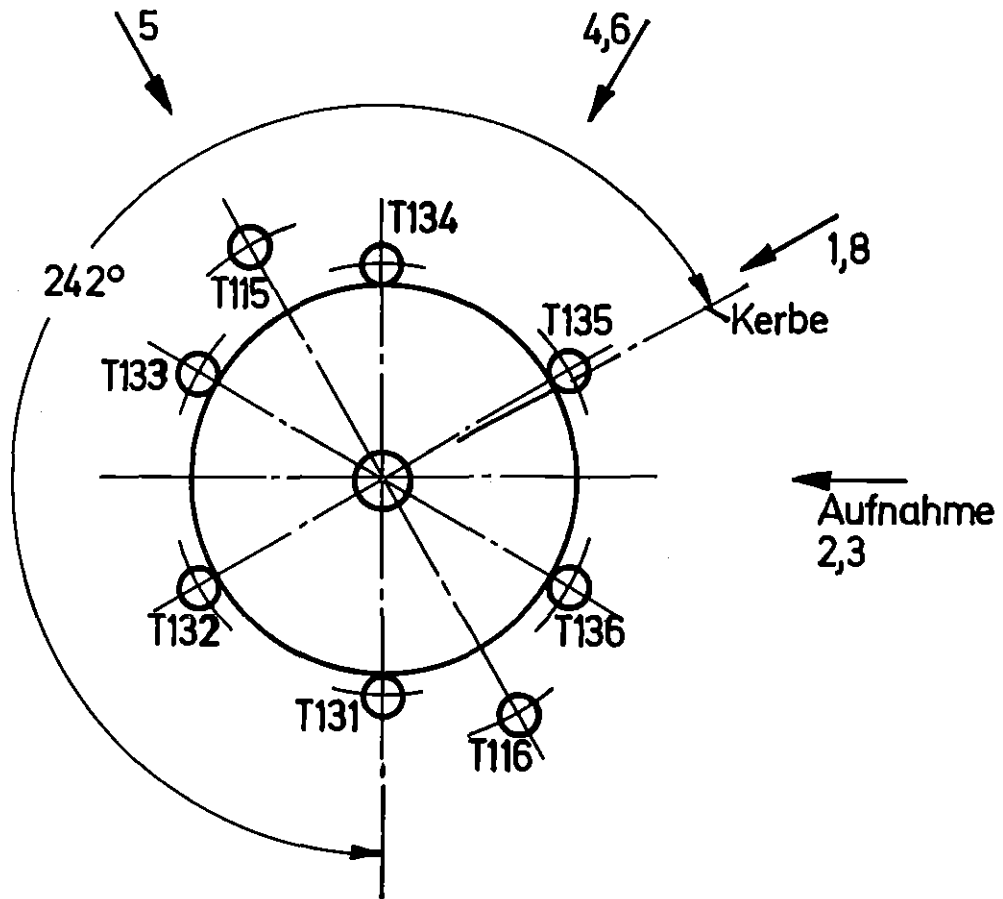


KFK
KIT-80
PNS4237-369

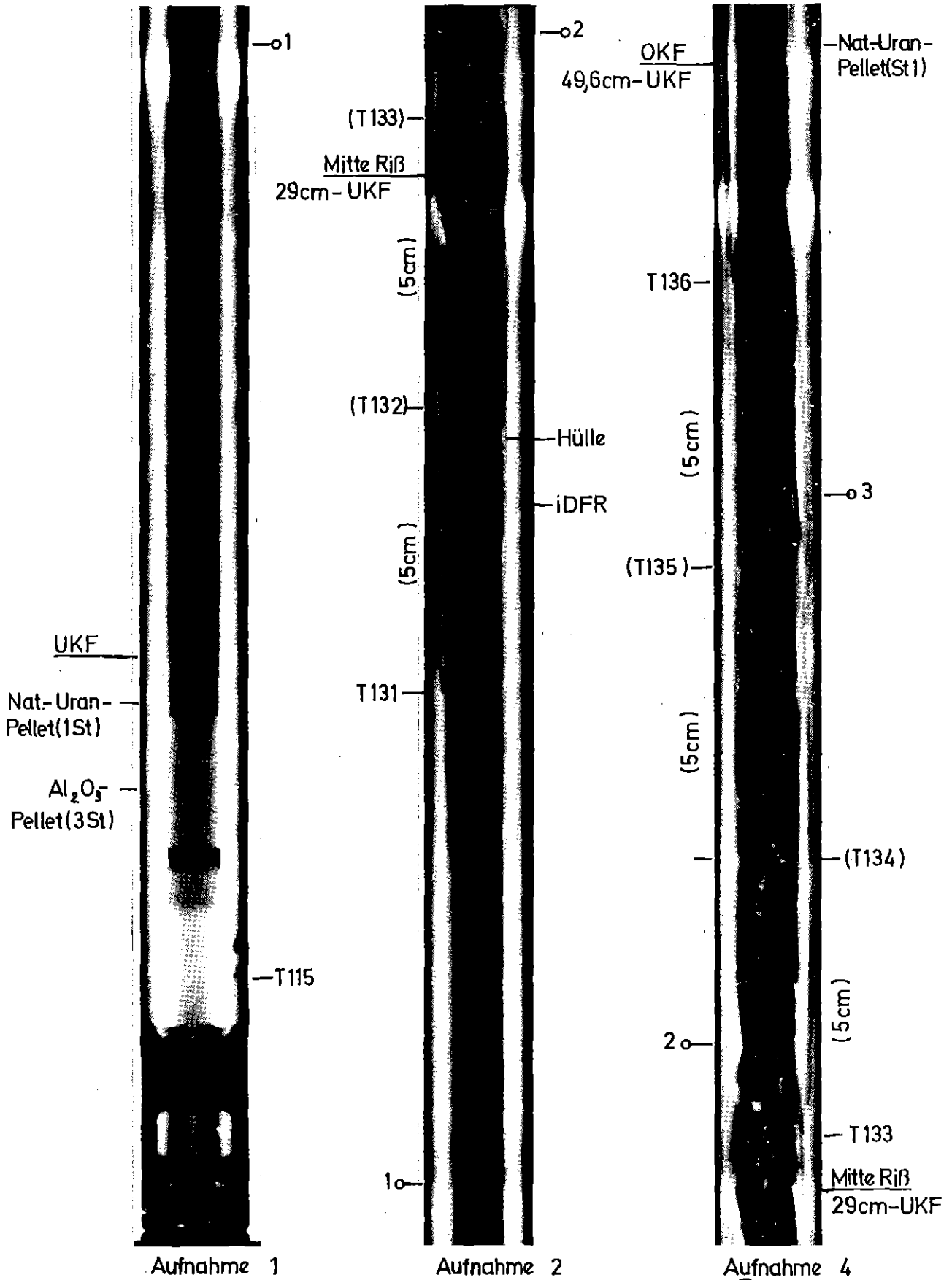
FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.1

Abb.22 Bl.2



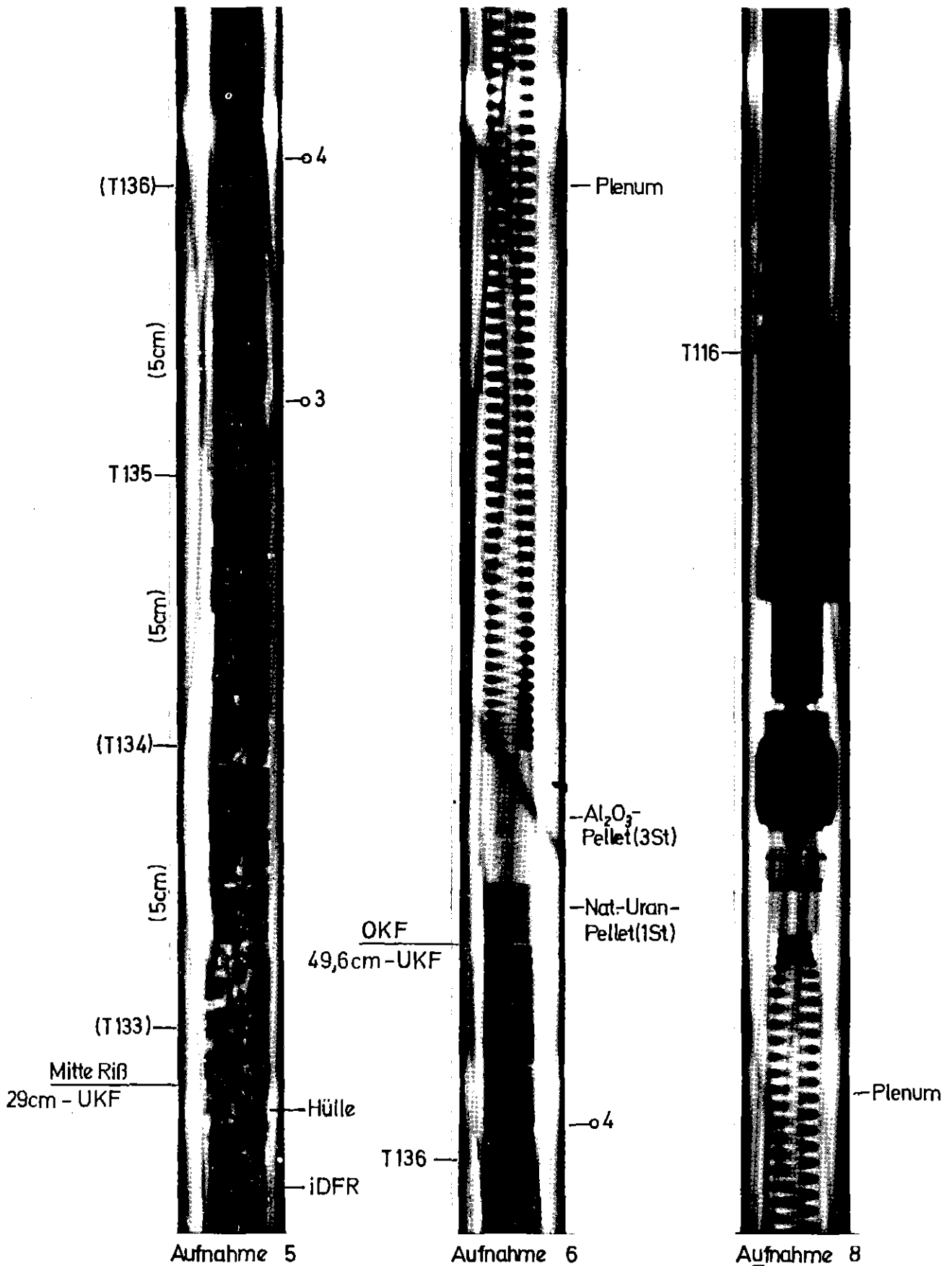
Ansicht von oben



KIK IT-80
PNS4237-370

FR2 In-pile Versuche.

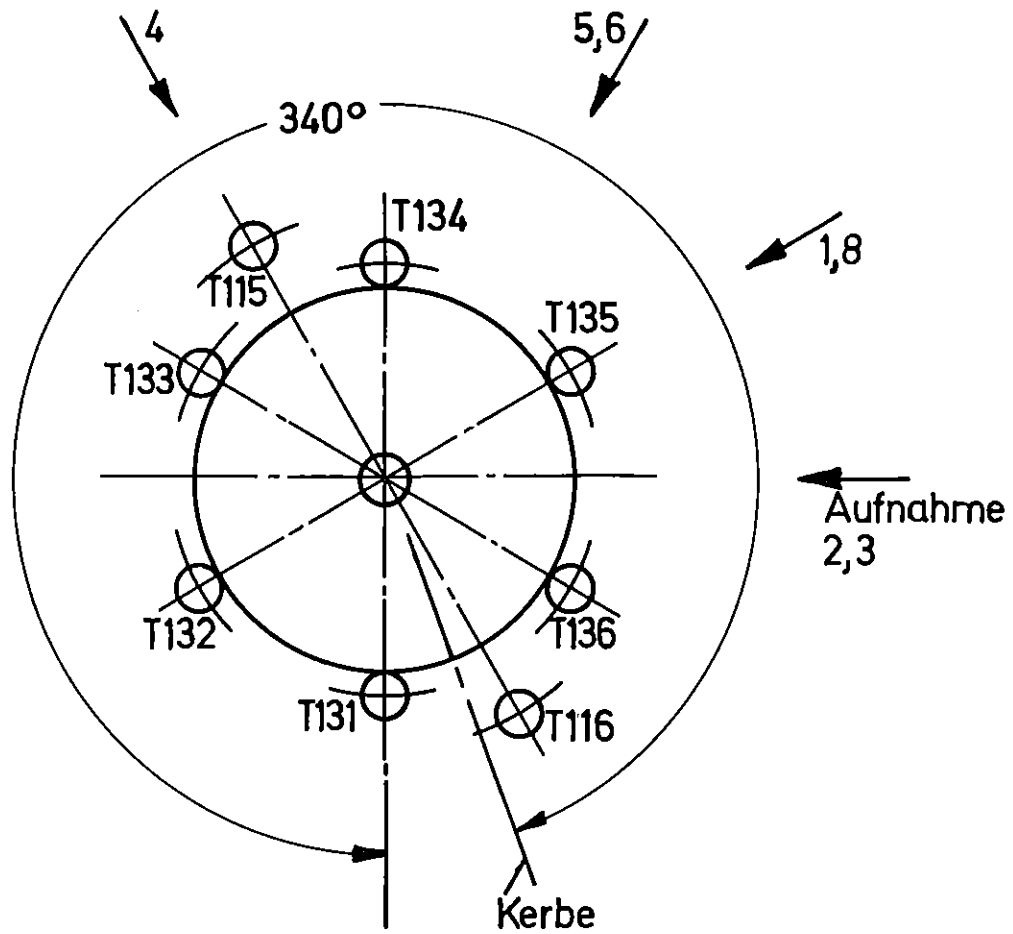
Neutronenradiografie nach Versuch G1.2 Abb. 24 Bl.1



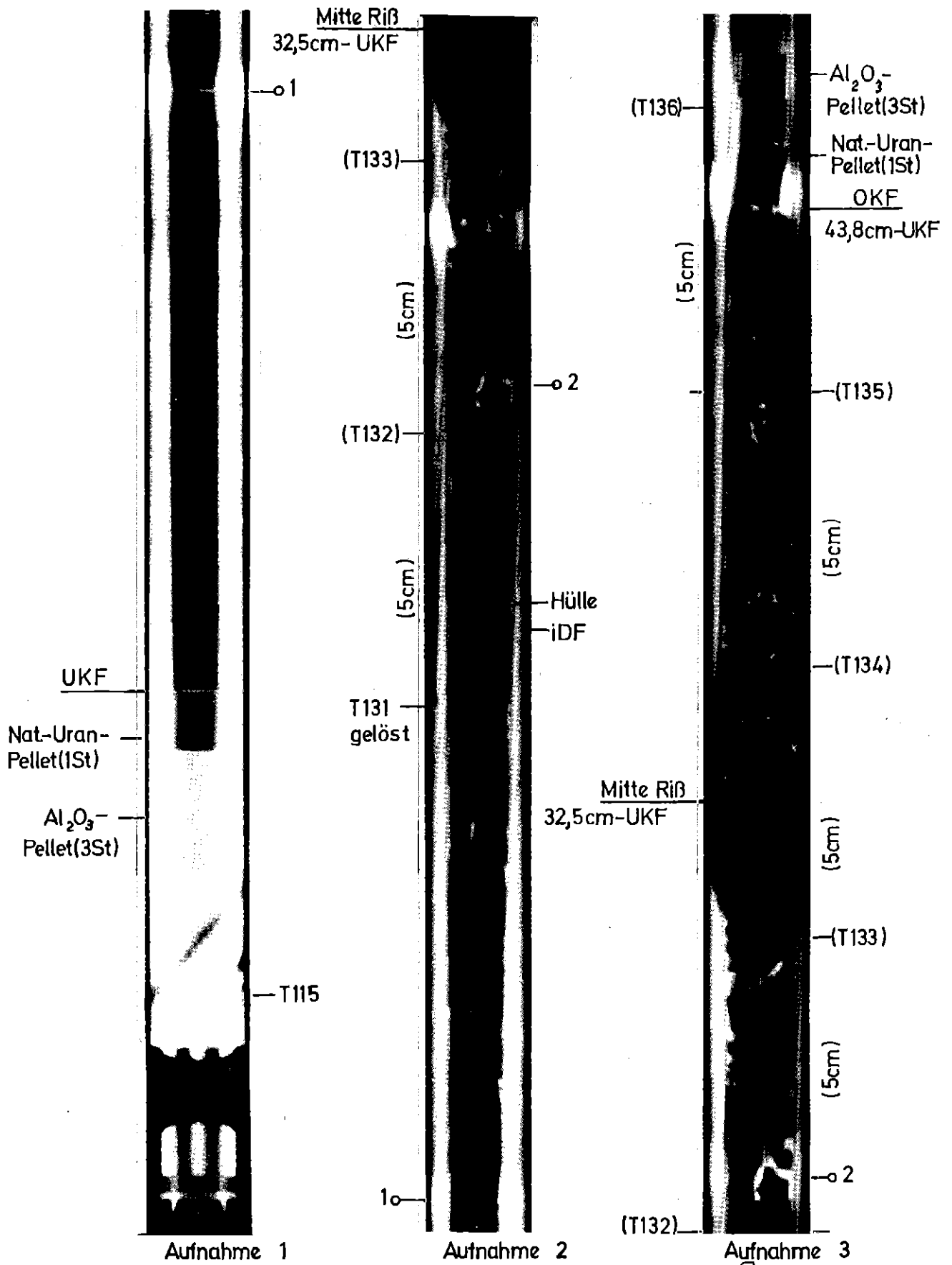
KfK IT-80
PNS4237-371

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.2 Abb.24 Bl.2



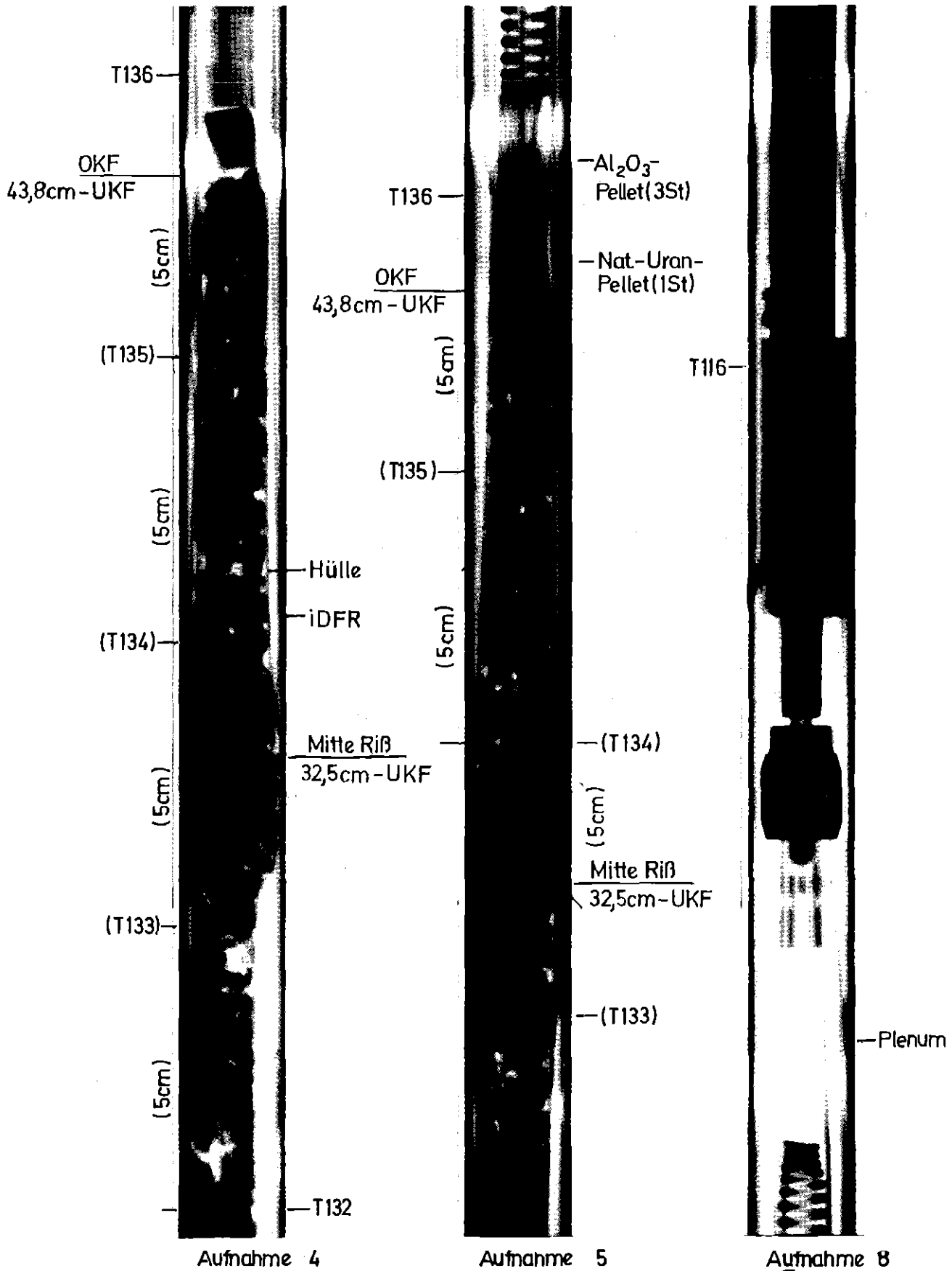
Ansicht von oben



KIK
KIT-80
PNS4237-372

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.3 Abb.26 Bl.1

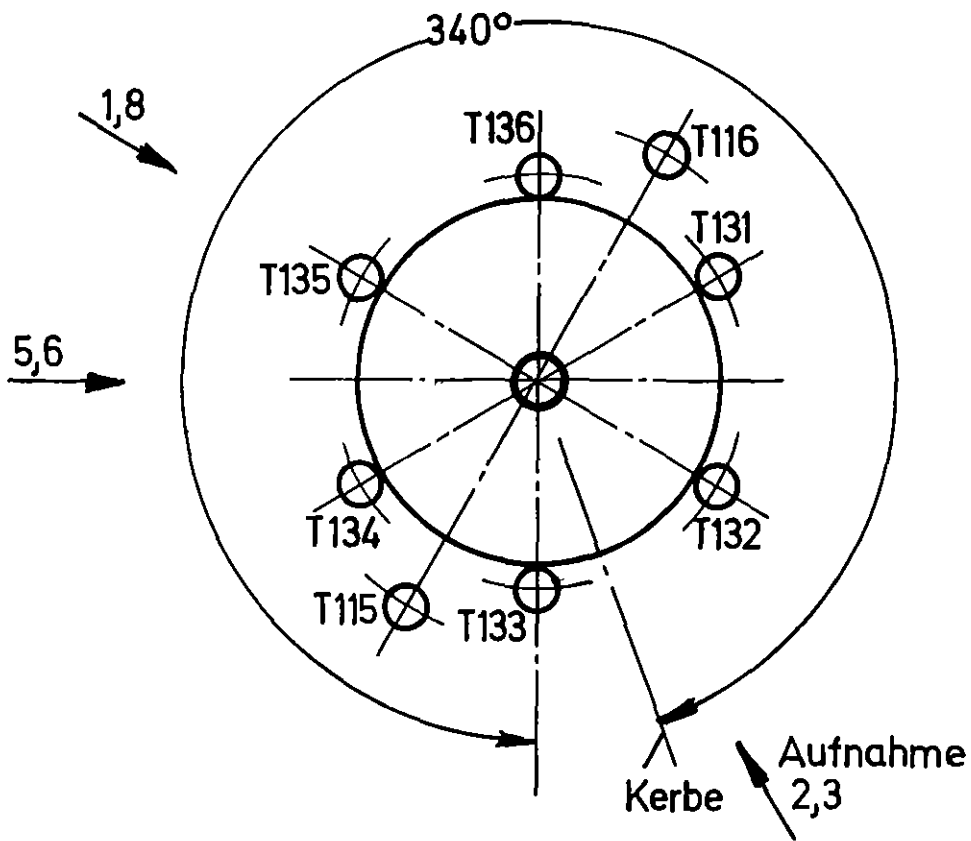


KfK
IT-80
PNS 4237-373

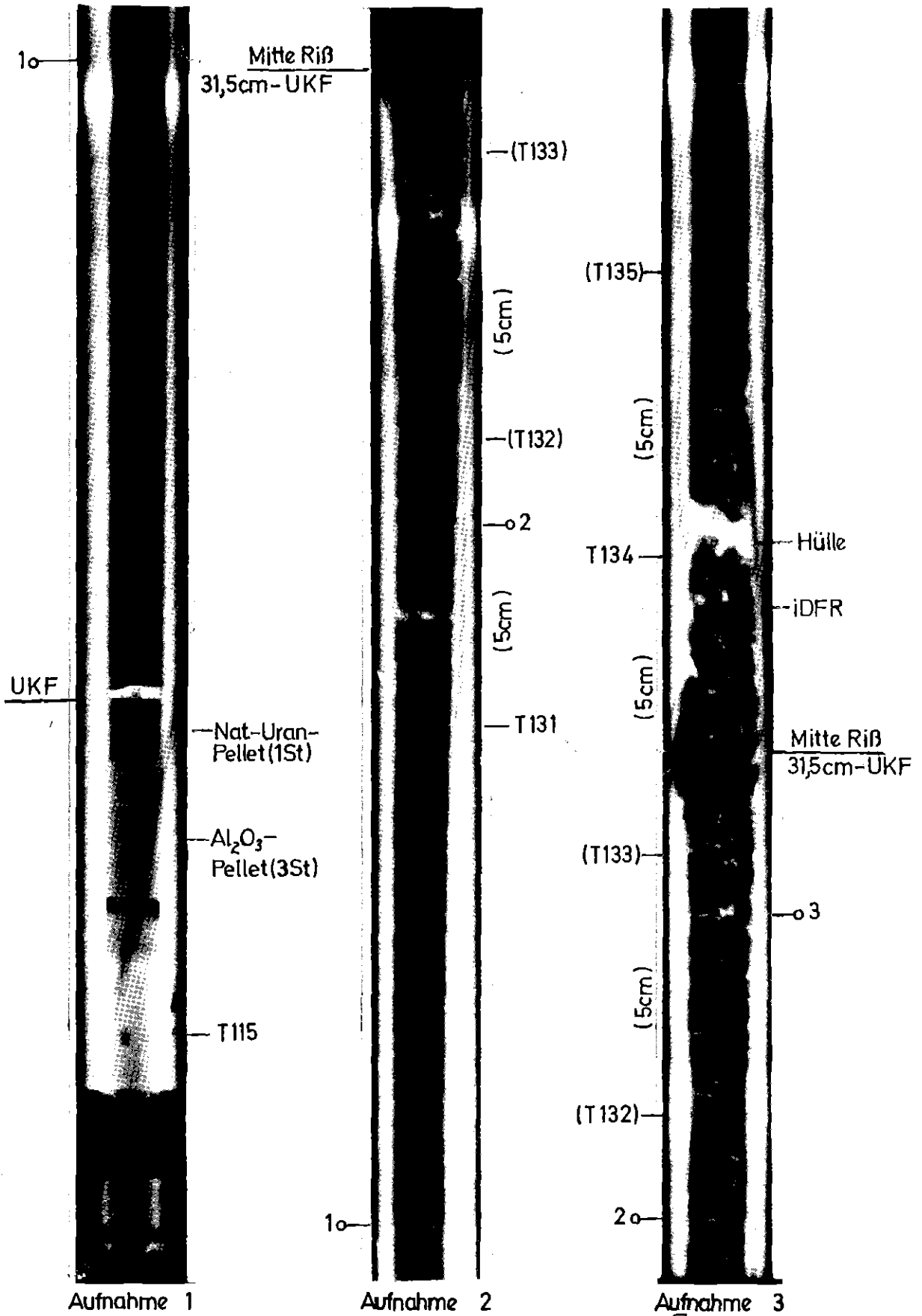
FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.3

Abb.26 Bl.2



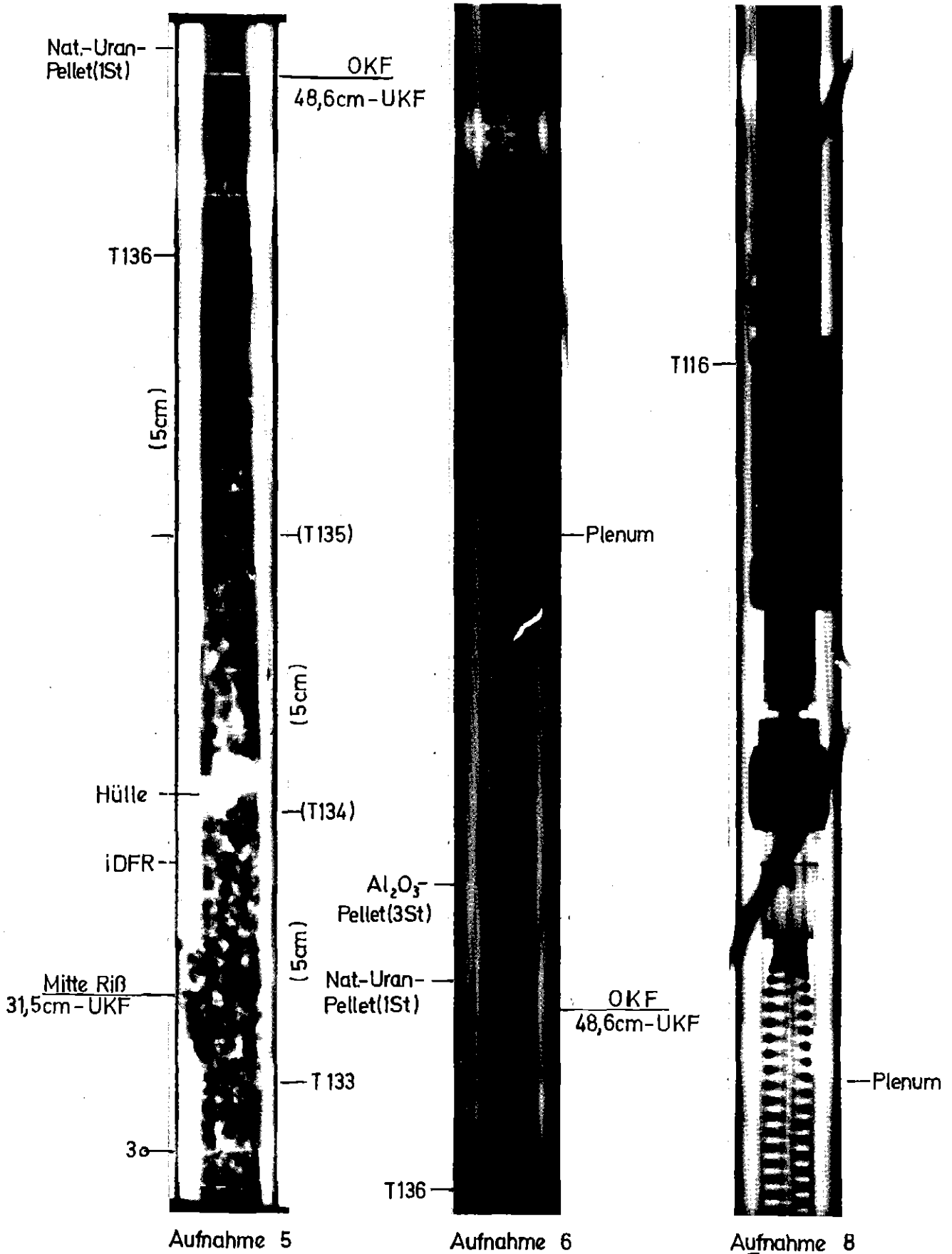
Ansicht von oben



KIK IT-80
PNS4237-374

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.4 Abb.28 Bl.1

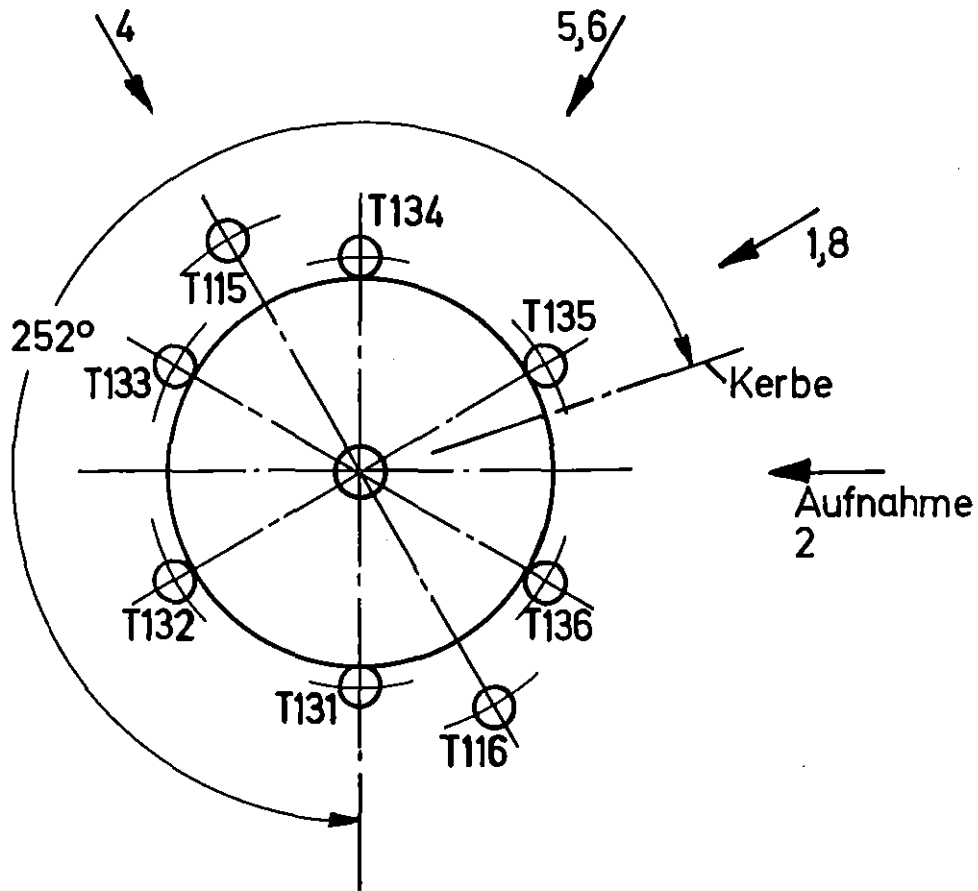


KIK IT-80
PNS/4237-375

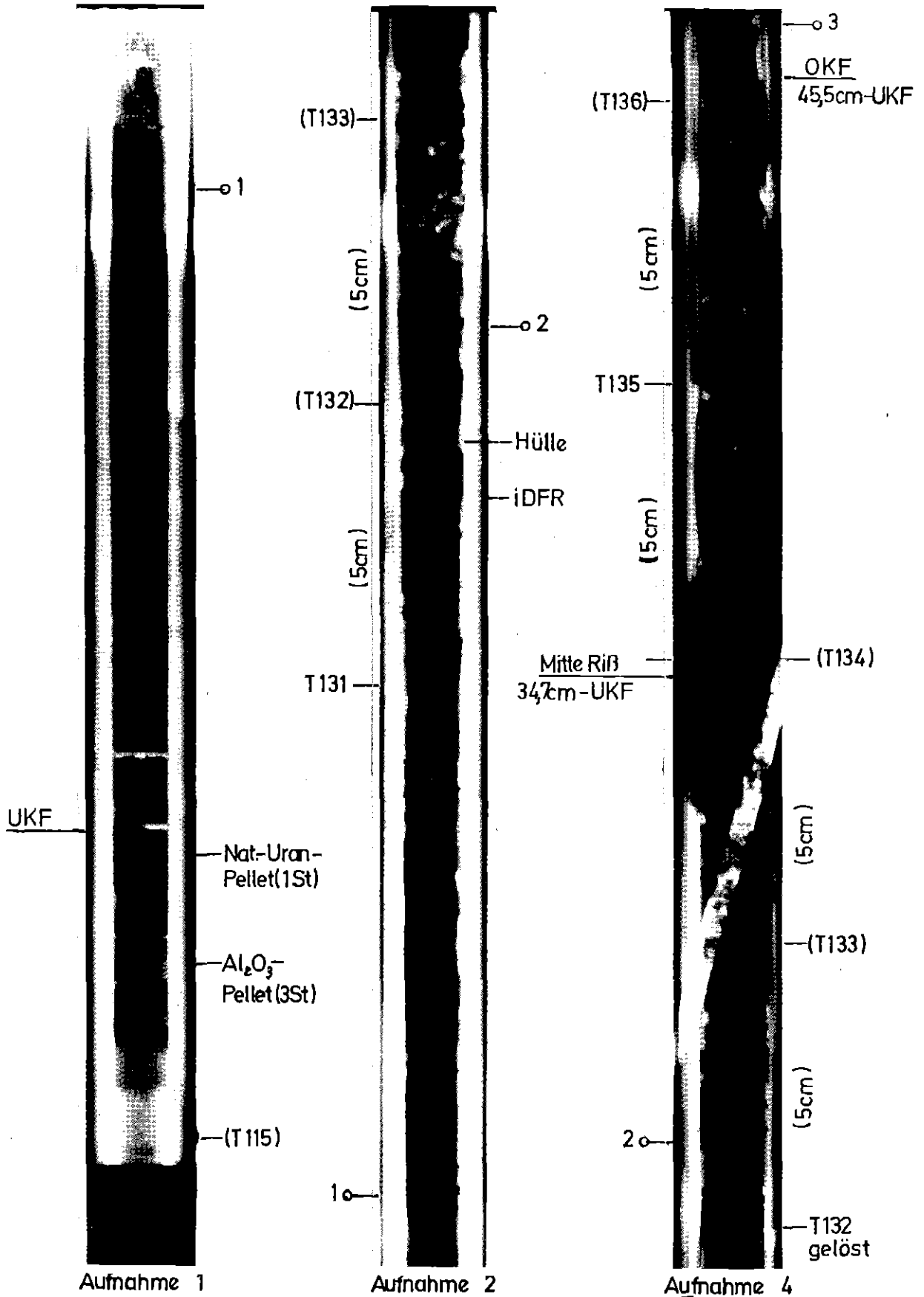
FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G 1.4

Abb.28 Bl.2



Ansicht von oben

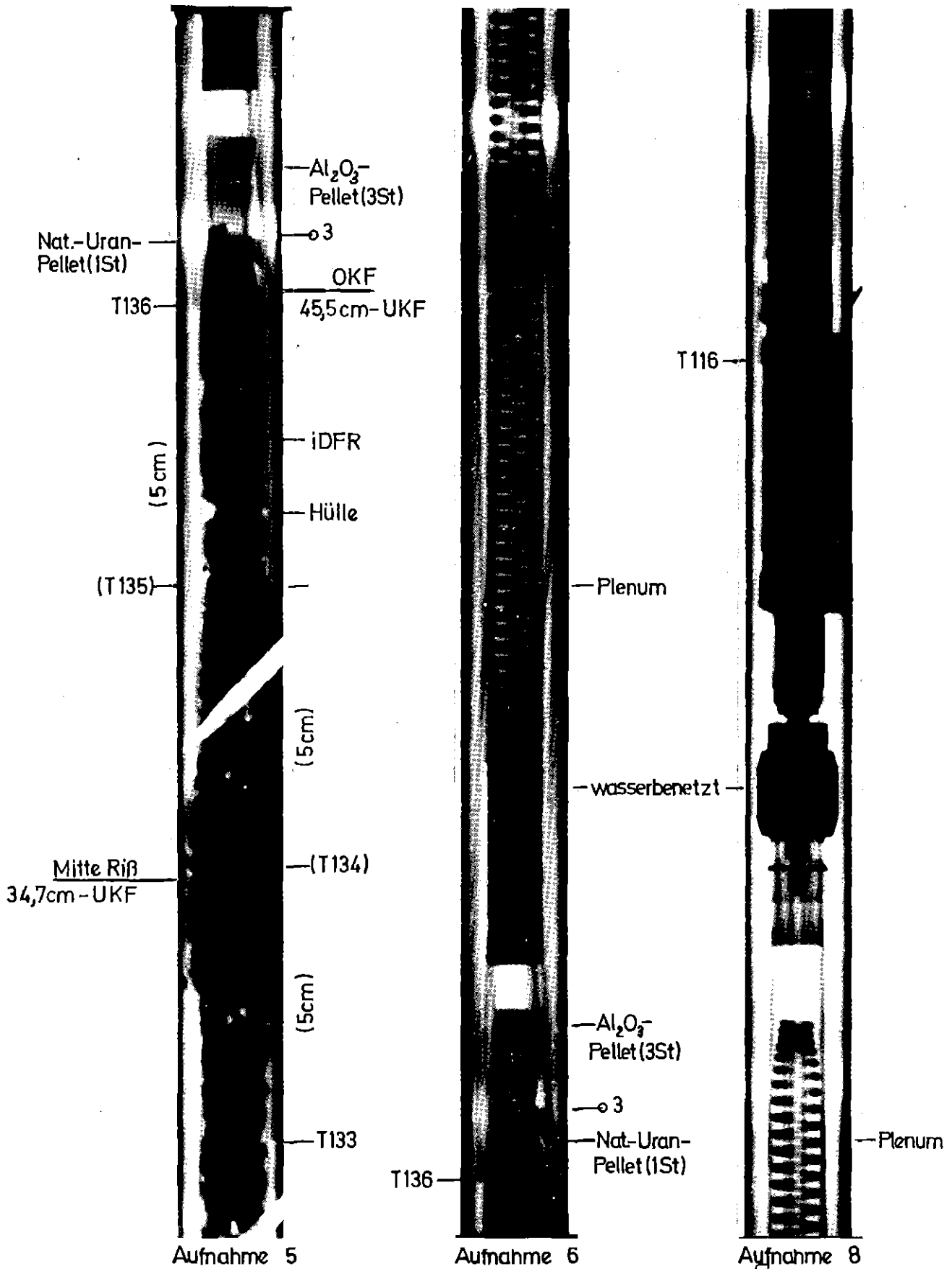


KIK IT-80
PNS 4237-376

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.5

Abb.30 Bl.1

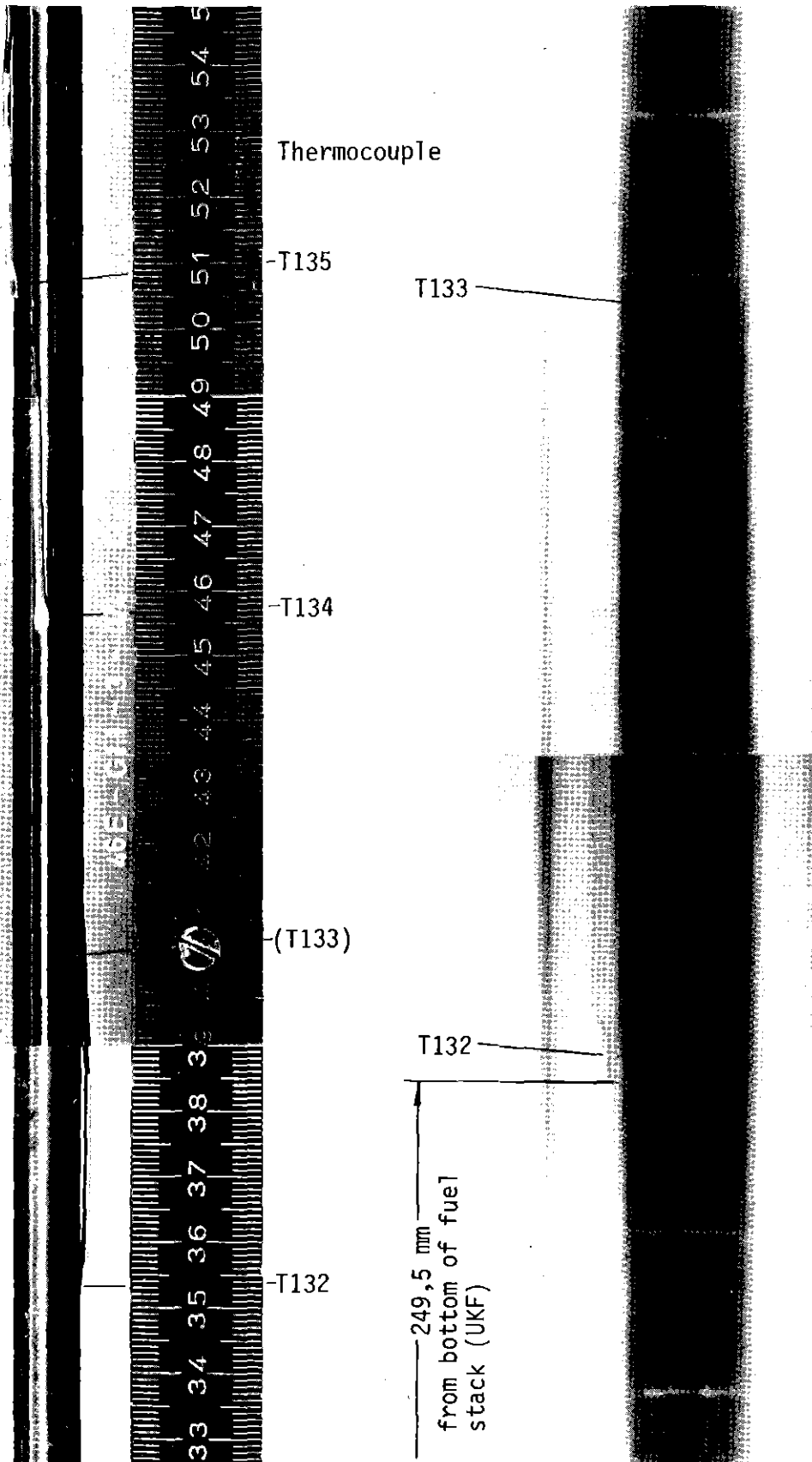


KIK IT-80
PNS 4237-377

FR2 In-pile Versuche.

Neutronenradiografie nach Versuch G1.5

Abb. 30 Bl. 2

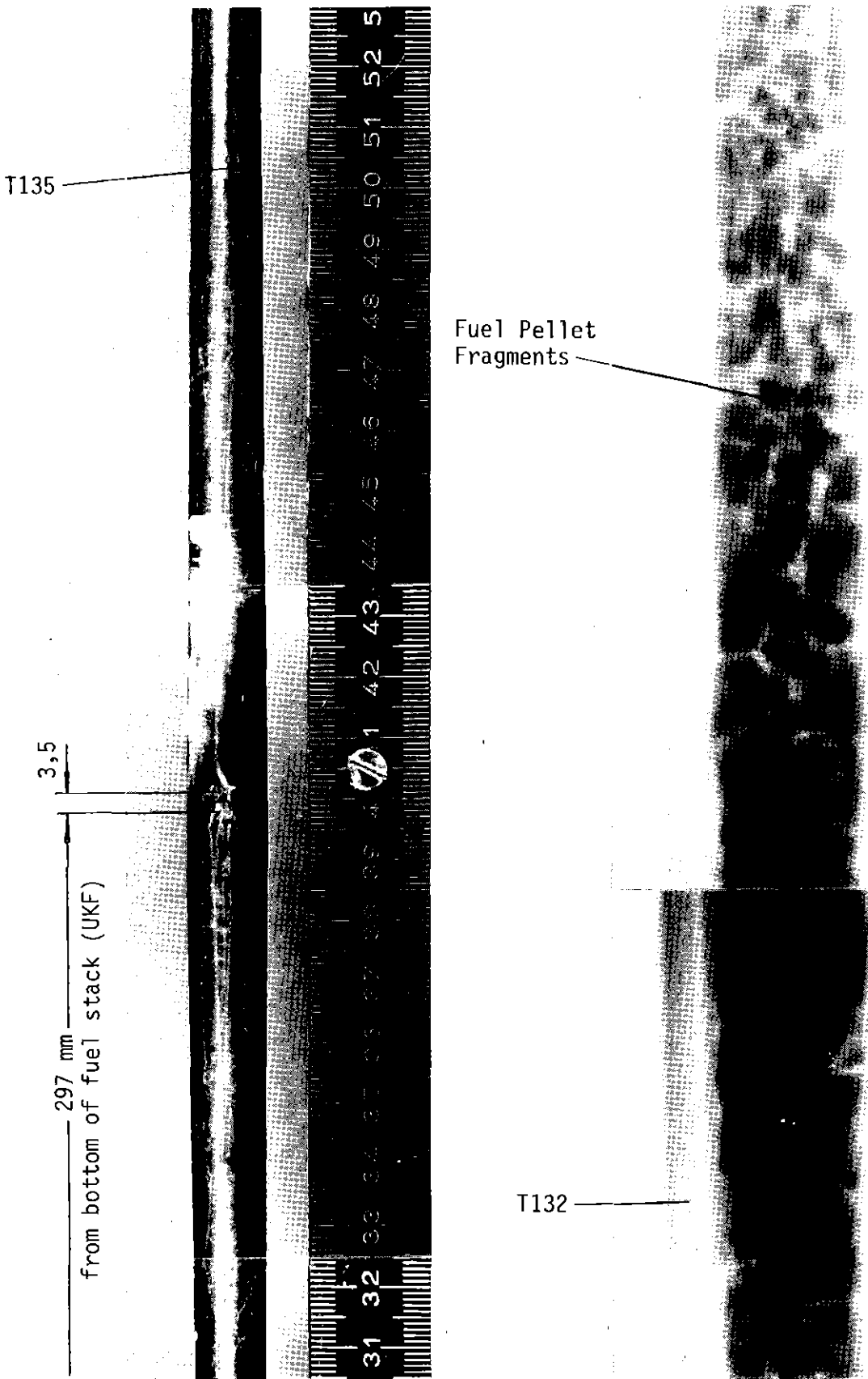


IT 1980
PNS 4237-378

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.1

View and X-Ray Photograph

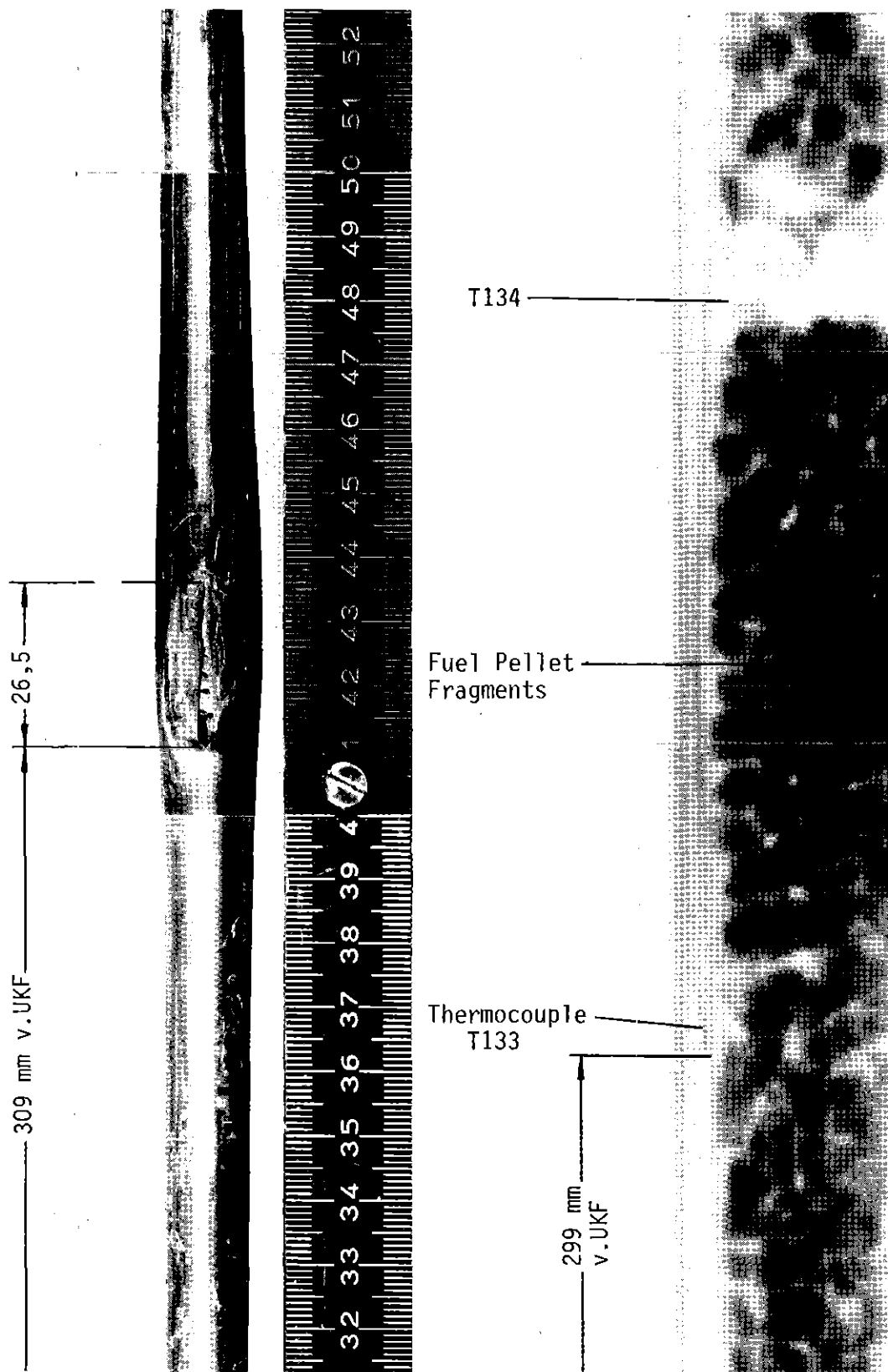
Fig. 31



IT 1980
PNS 4237-379

FR2 In-Pile Tests. Test G 1.2
View and X-Ray Photograph

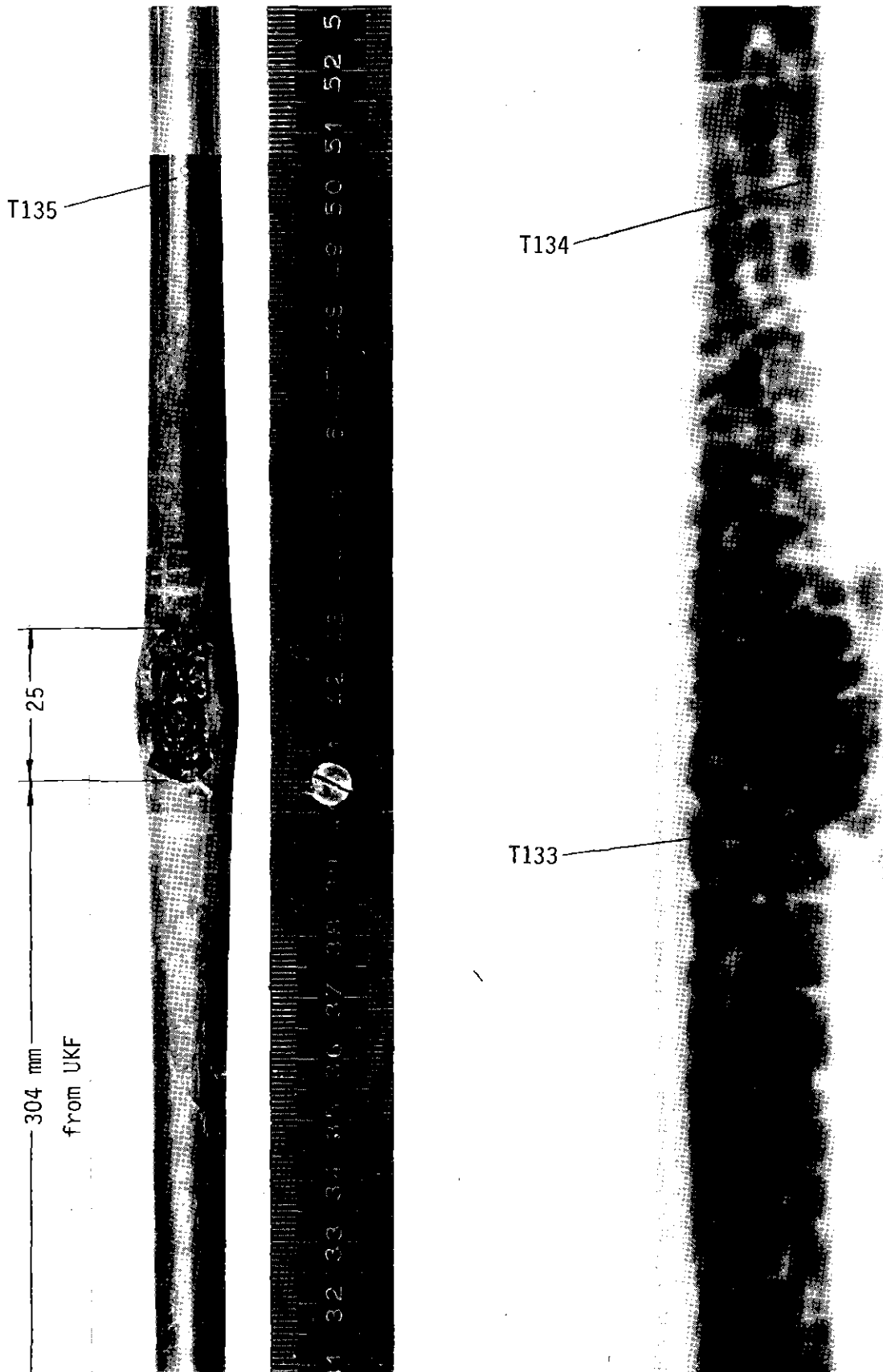
Fig. 32



IT1980
PNS 4237-380
Fig. 33

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.3

View and X-Ray Photograph of Ruptured Zone

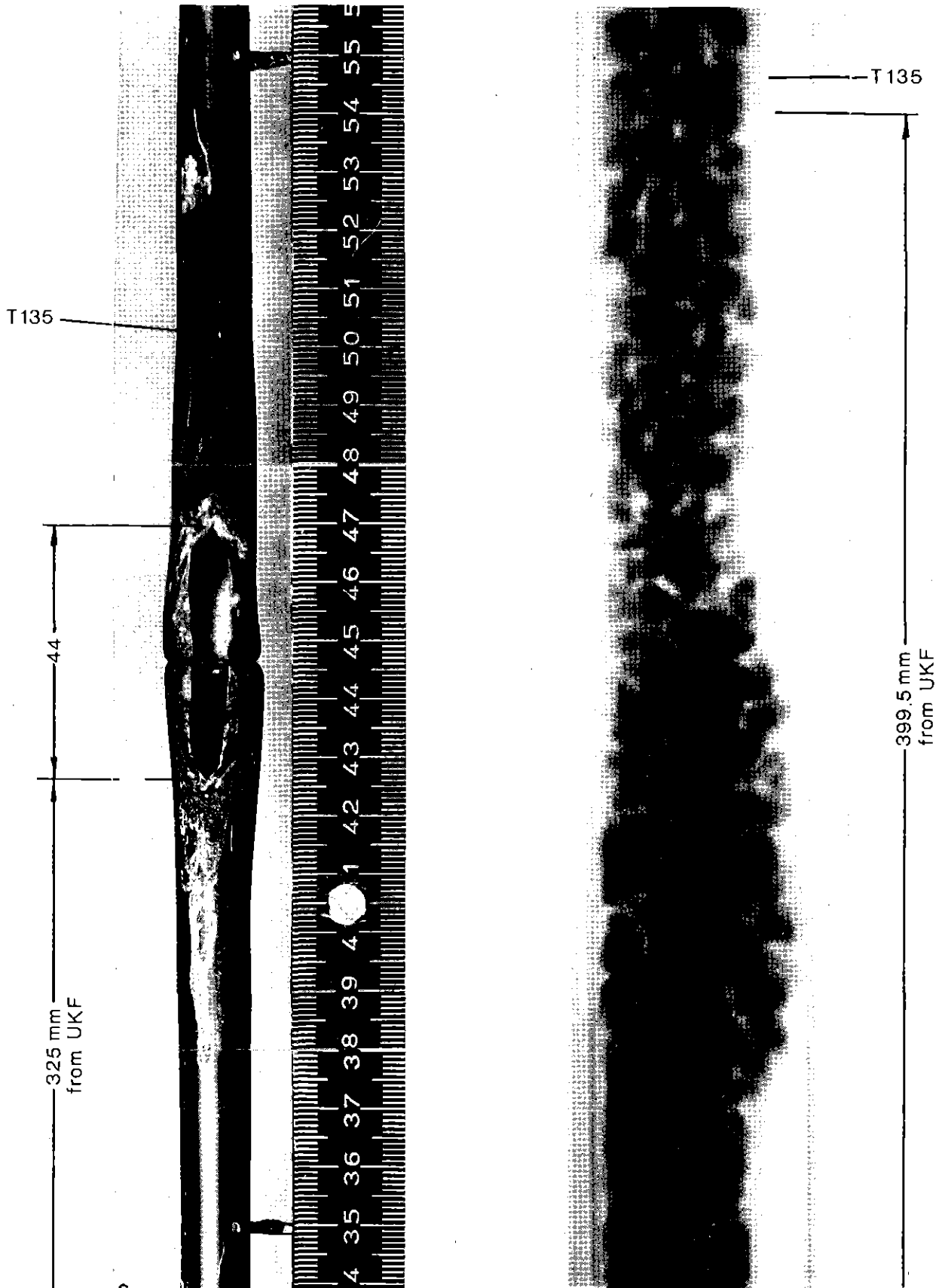


IT 1980
PNS 4237-381

Fig. 34

FR 2 In-Pile Tests. TEST G 1.4

View and X-Ray Photograph of Ruptured Zone

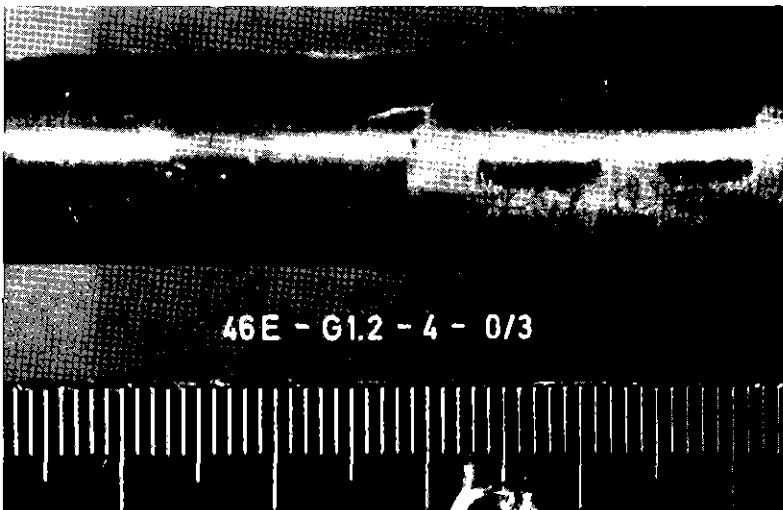
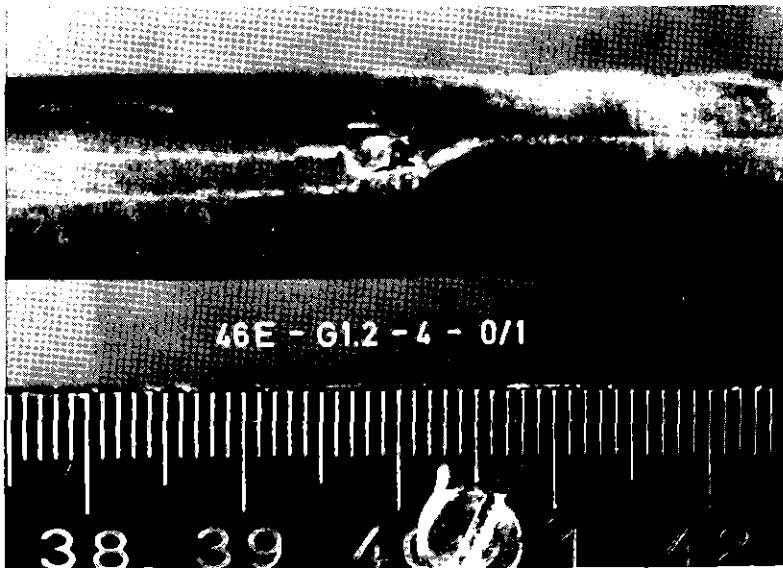
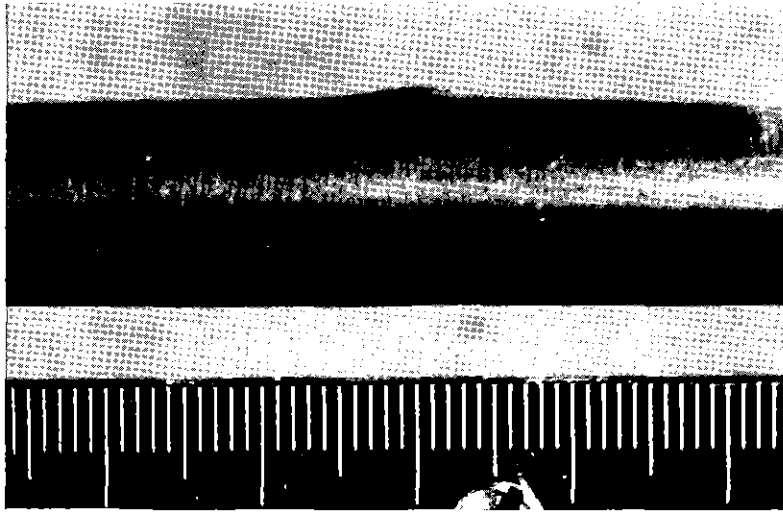


IT 1980
PNS 4237-382

FR 2 In-Pile Tests. TEST G1.5

Fig. 35

View and X-Ray Photograph of Ruptured Zone



IT 1980
PNS 4237-383

FR2 In-Pile Tests. Test G1.2

Views of the Ruptured Zone

Fig.36



IT 1980
PNS 4237-384

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.3

Views of the Ruptured Zone

Fig. 37



IT 1980
PNS 4237-385

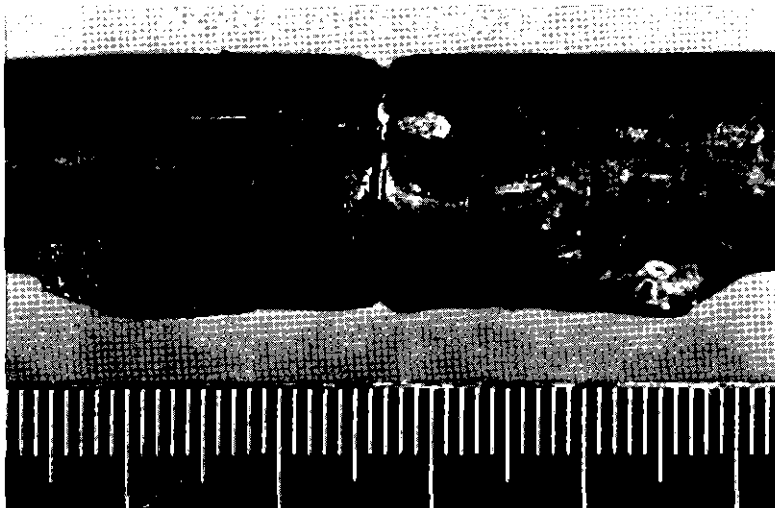
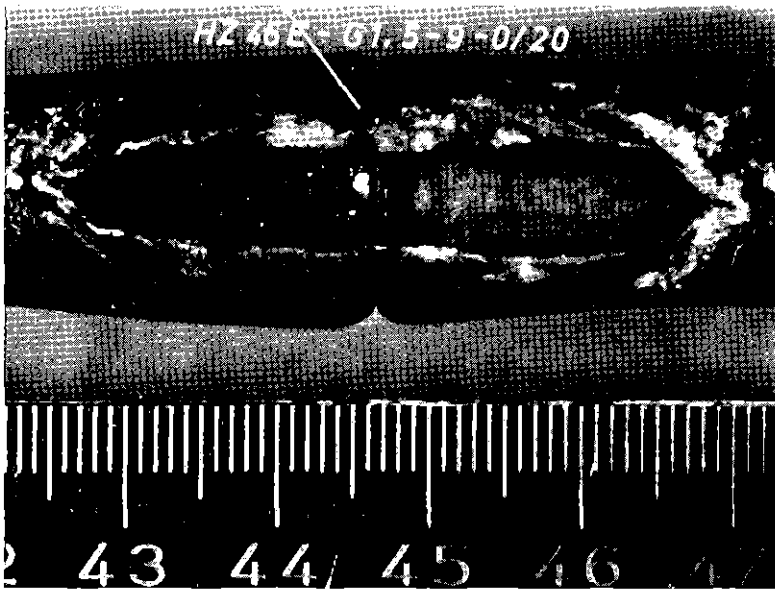
FR 2 In-Pile Tests. Test G1.4

Views of the Ruptured Zone

Fig.38



accidentally cut by hot cell tool

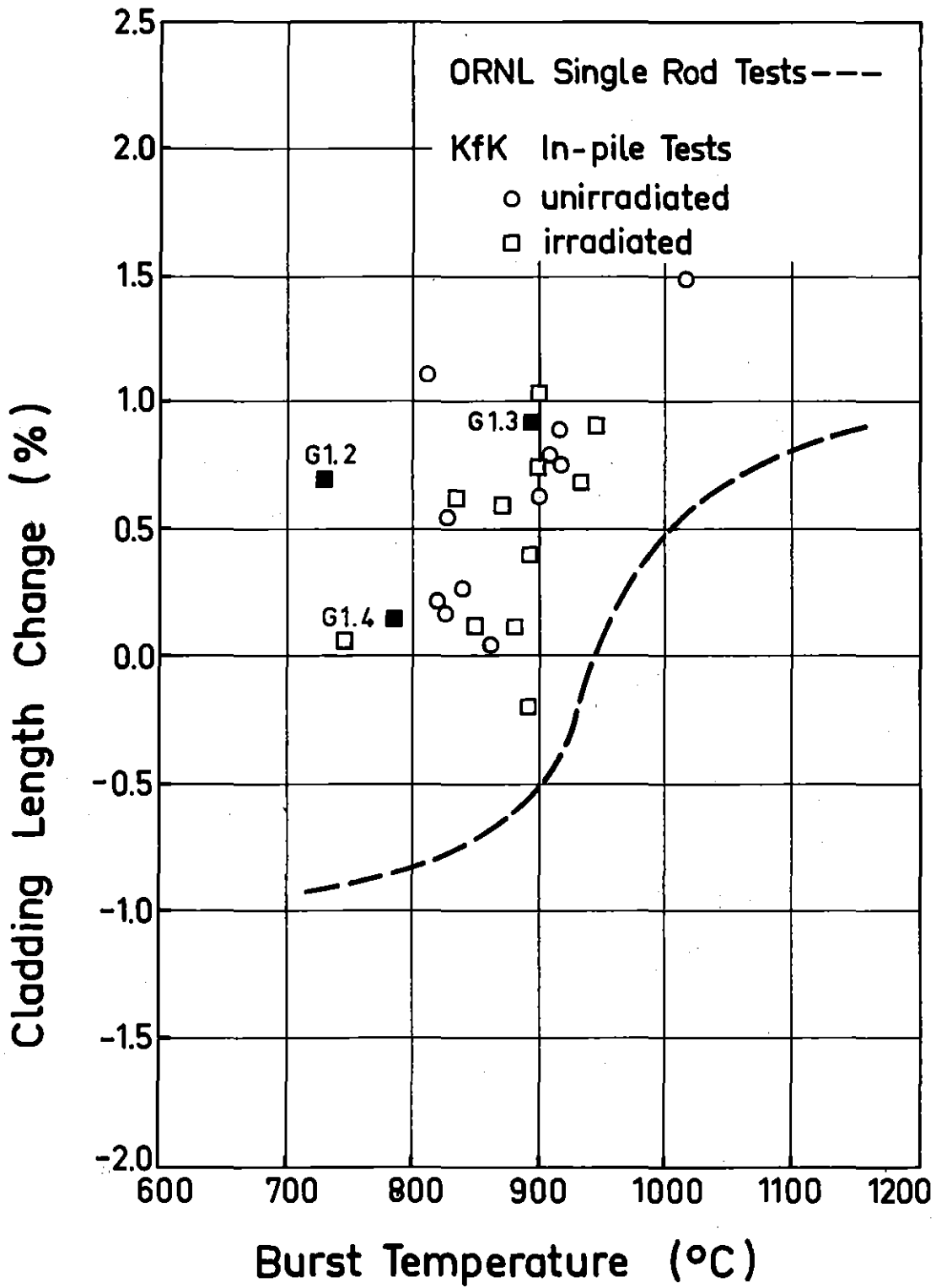


IT 1980
PNS 4237-386

FR 2 In-Pile Tests. TEST G1.5

Views of the Ruptured Zone

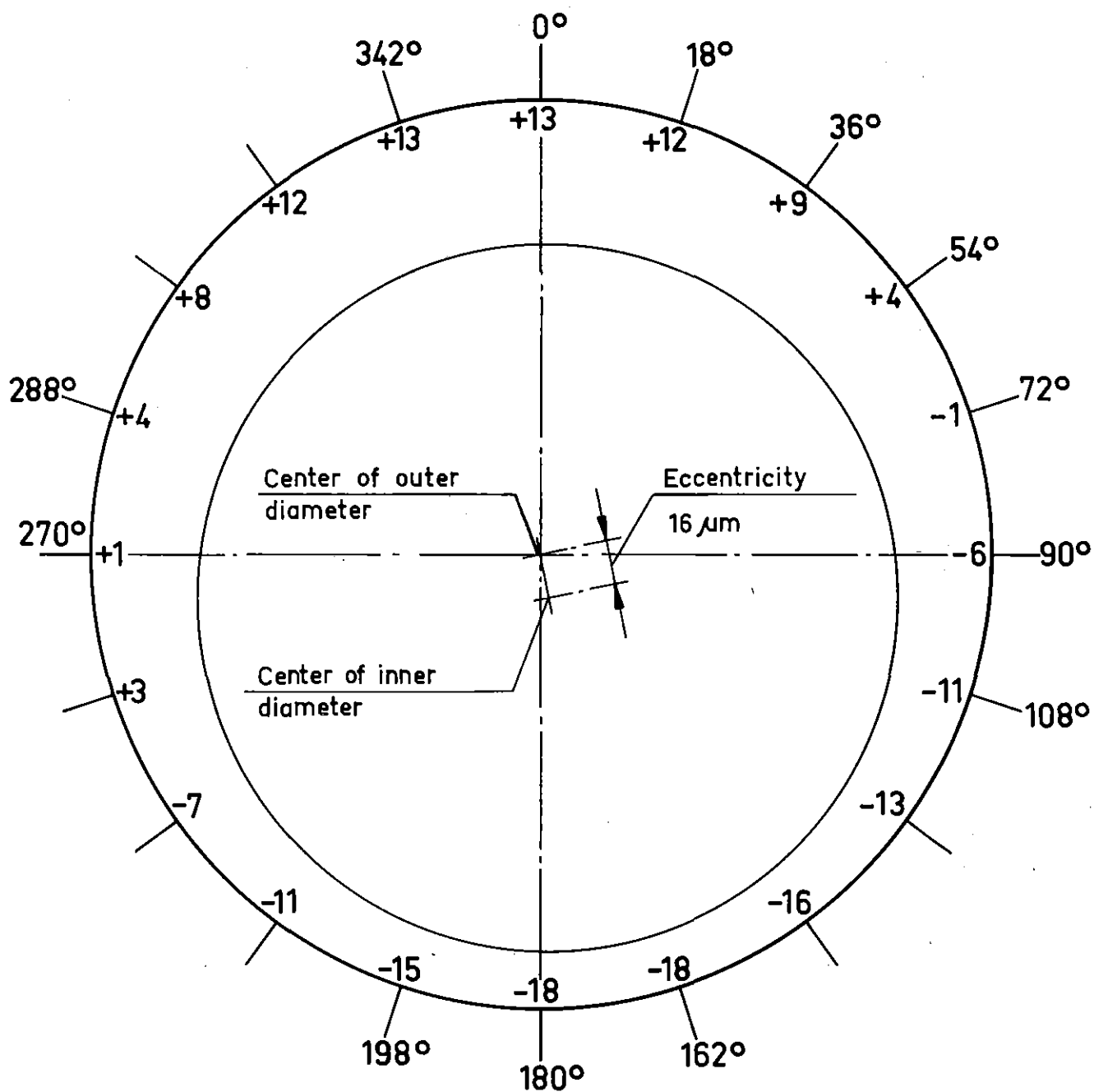
Fig.39



FR2 In-Pile Tests

Cladding Length Change vs. Burst Temperature

Fig.40



Bottom view

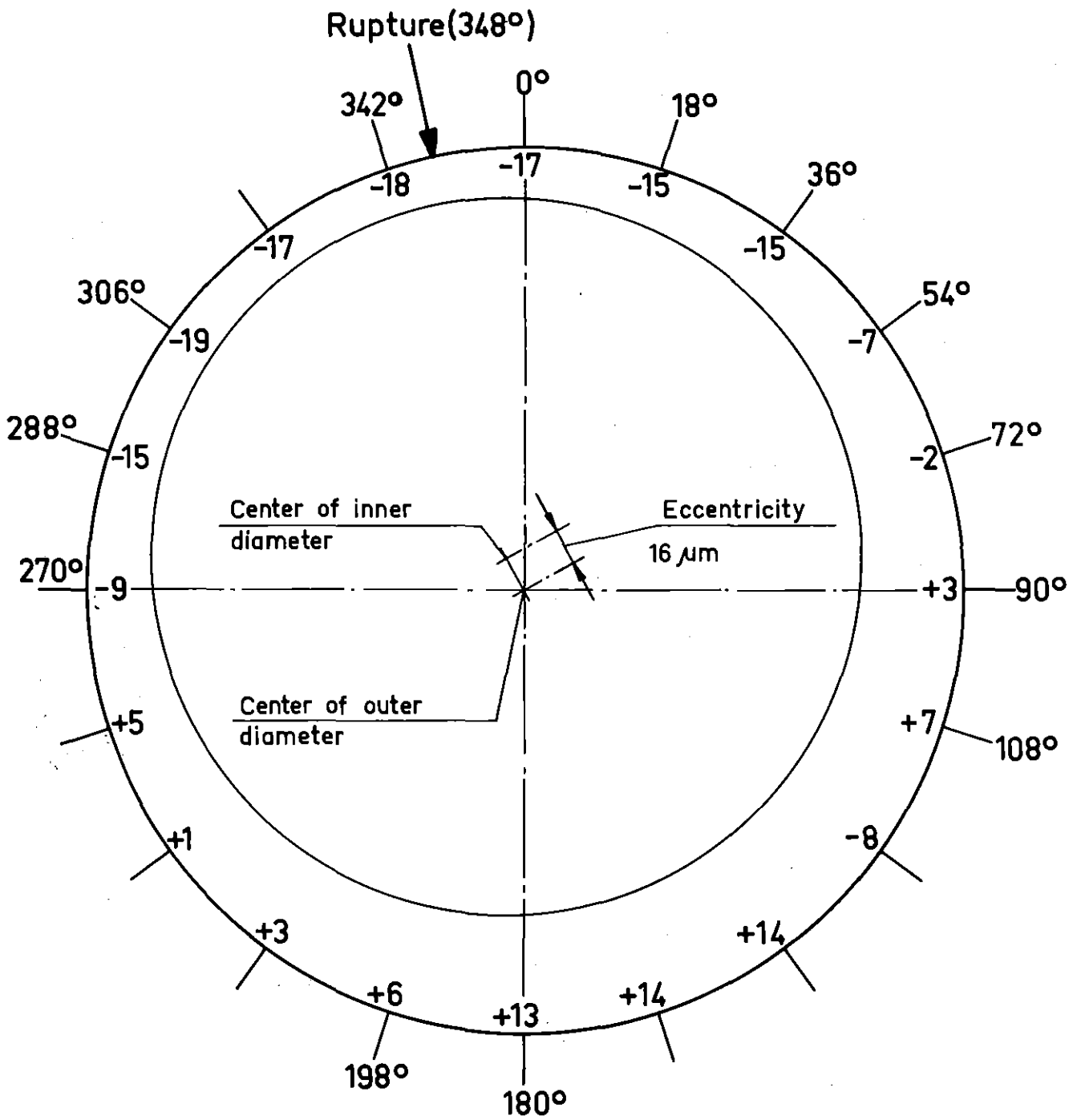
Measuring plane: 1-14

TEST G1.1; ROD 3

FR2 In-pile tests

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

Fig.41.1



Bottom view

Measuring plane No. 4

Measuring plane : 305 mm from UKF

Rupture midplane: 300 mm from UKF

TEST G1.2, ROD 4



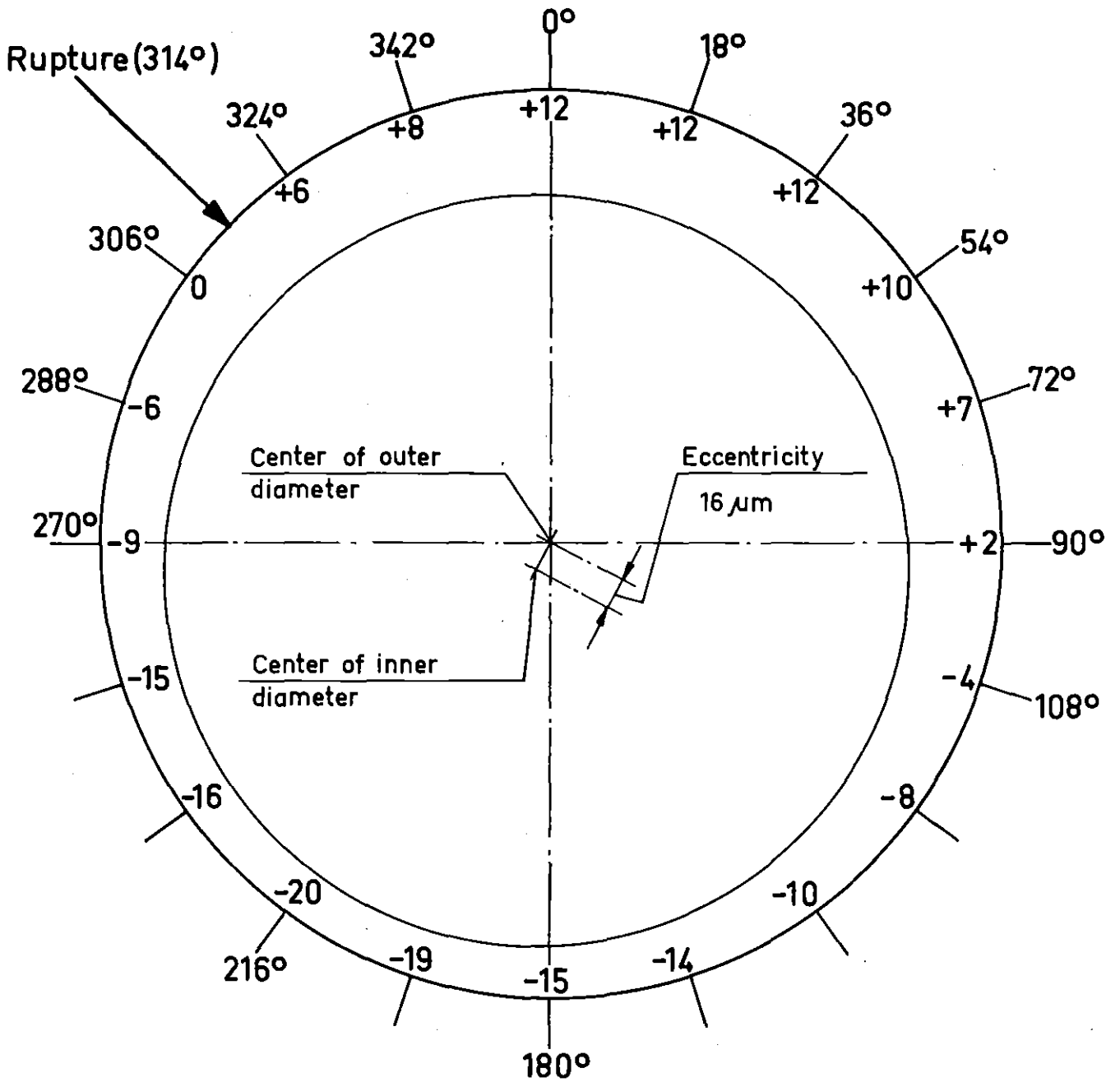
IT 1980

PNS4237-359.20

FR 2 In-pile tests

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

Fig.41.2

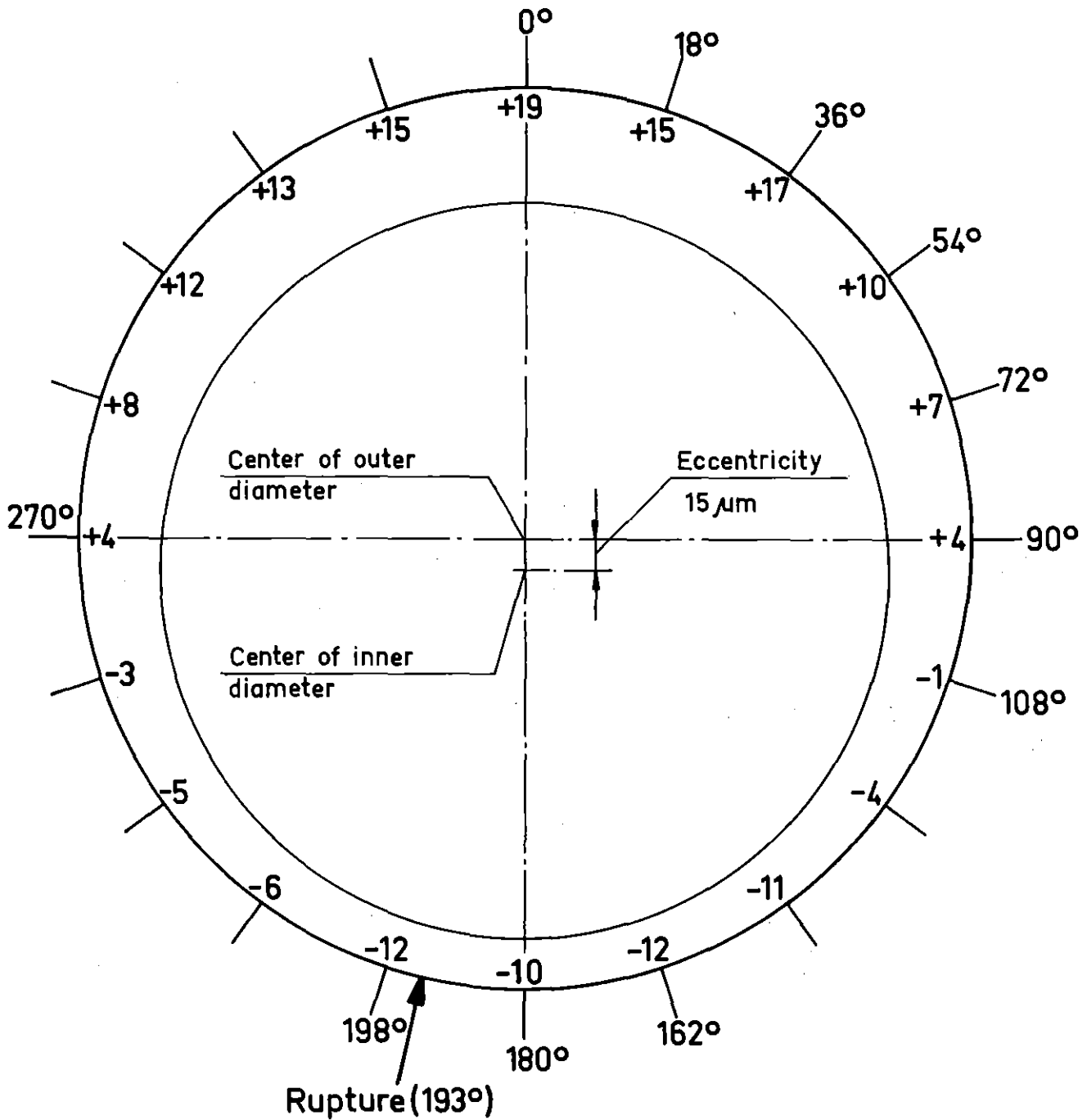


Bottom view
Measuring plane No. 3
Measuring plane : 320mm from UKF
Rupture midplane: 320mm from UKF

TEST G1.3; ROD 5

FR 2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)
presented as differences from the nominal 0.725 mm Fig.41.3



Bottom view

Measuring plane No. 3

Measuring plane : 320 mm from UKF

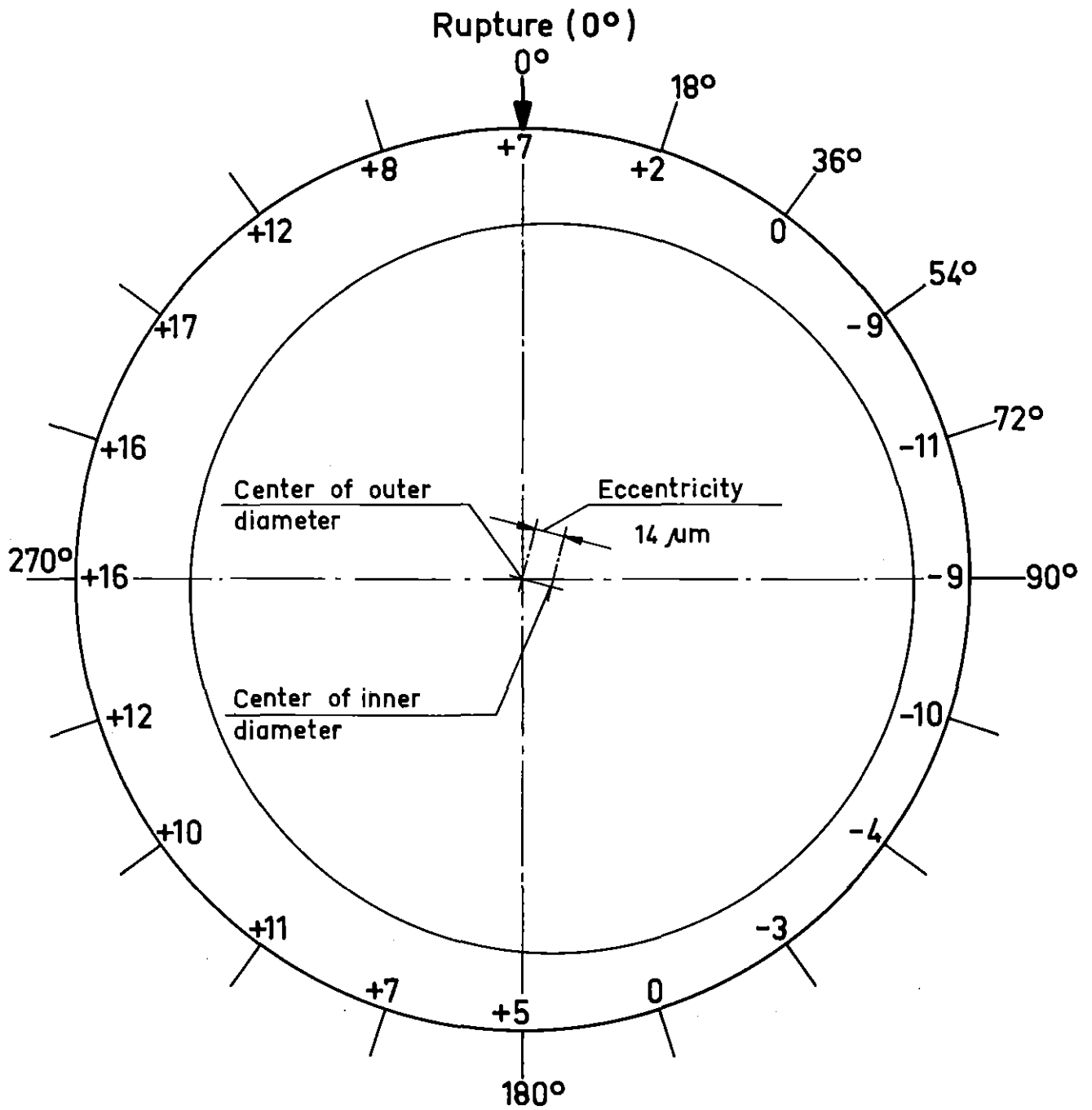
Rupture midplane: 315 mm from UKF

TEST G1.4; ROD 7

FR2 In-pile tests

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

Fig. 41.4



Bottom view

Measuring plane No. 1

Measuring plane : 350 mm from UKF

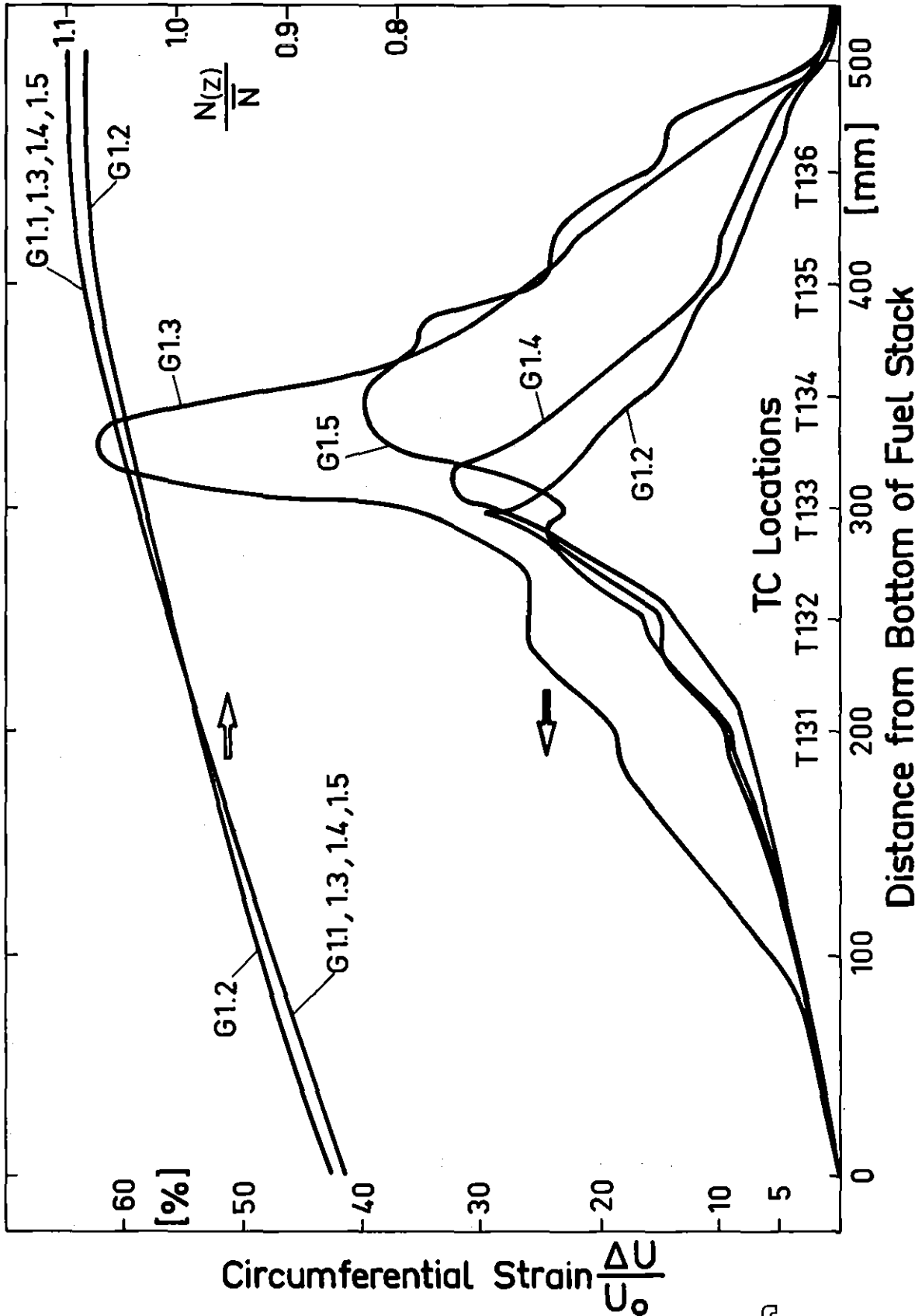
Rupture midplane: 350 mm from UKF

TEST G1.5; ROD 9

FR2 In-pile tests

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

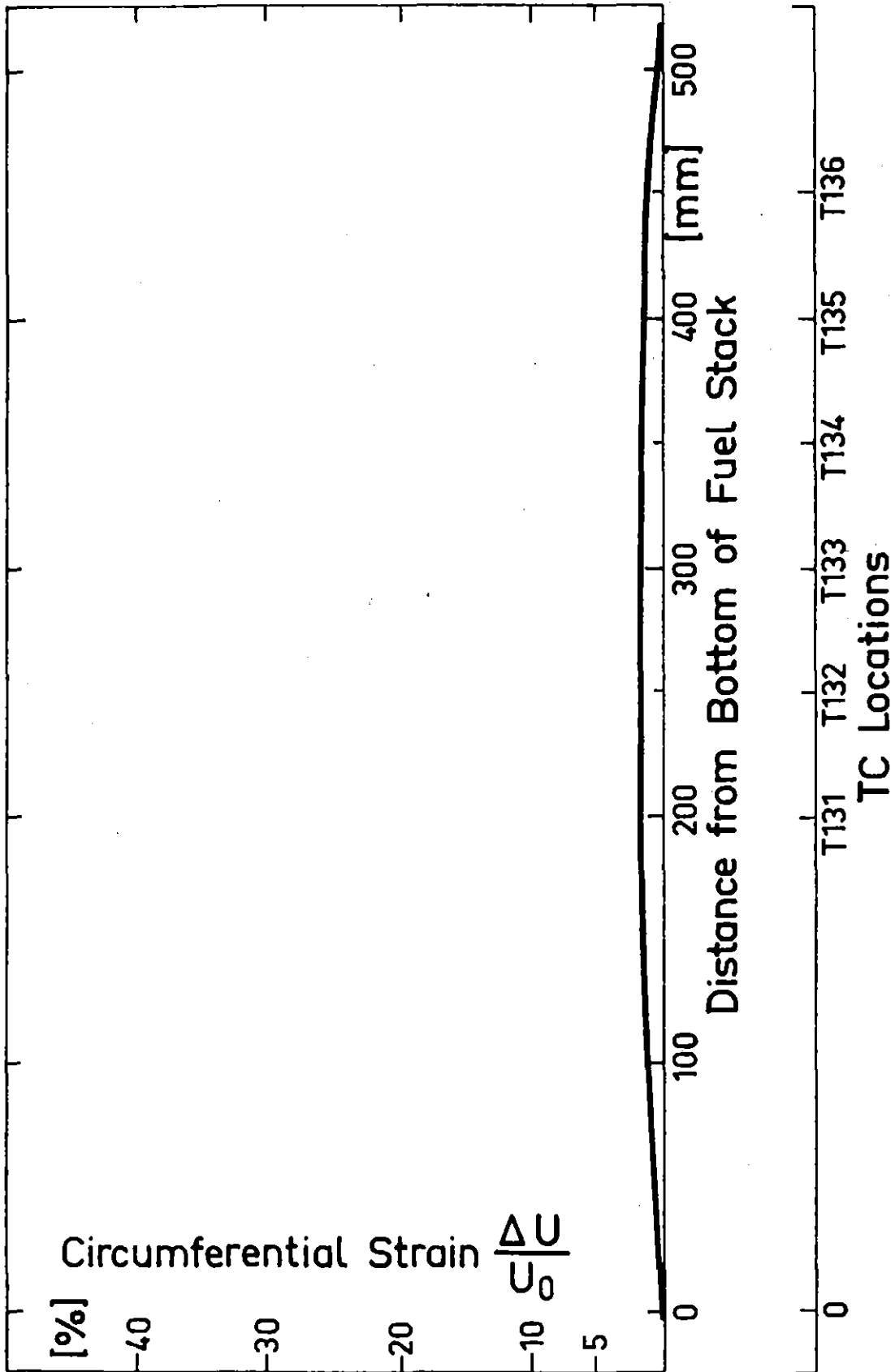
Fig. 41.5



FR 2 In-Pile Tests.

Circumferential Elongations and Axial Power Profiles of the G1.1 through G1.5 Tests

Fig. 42

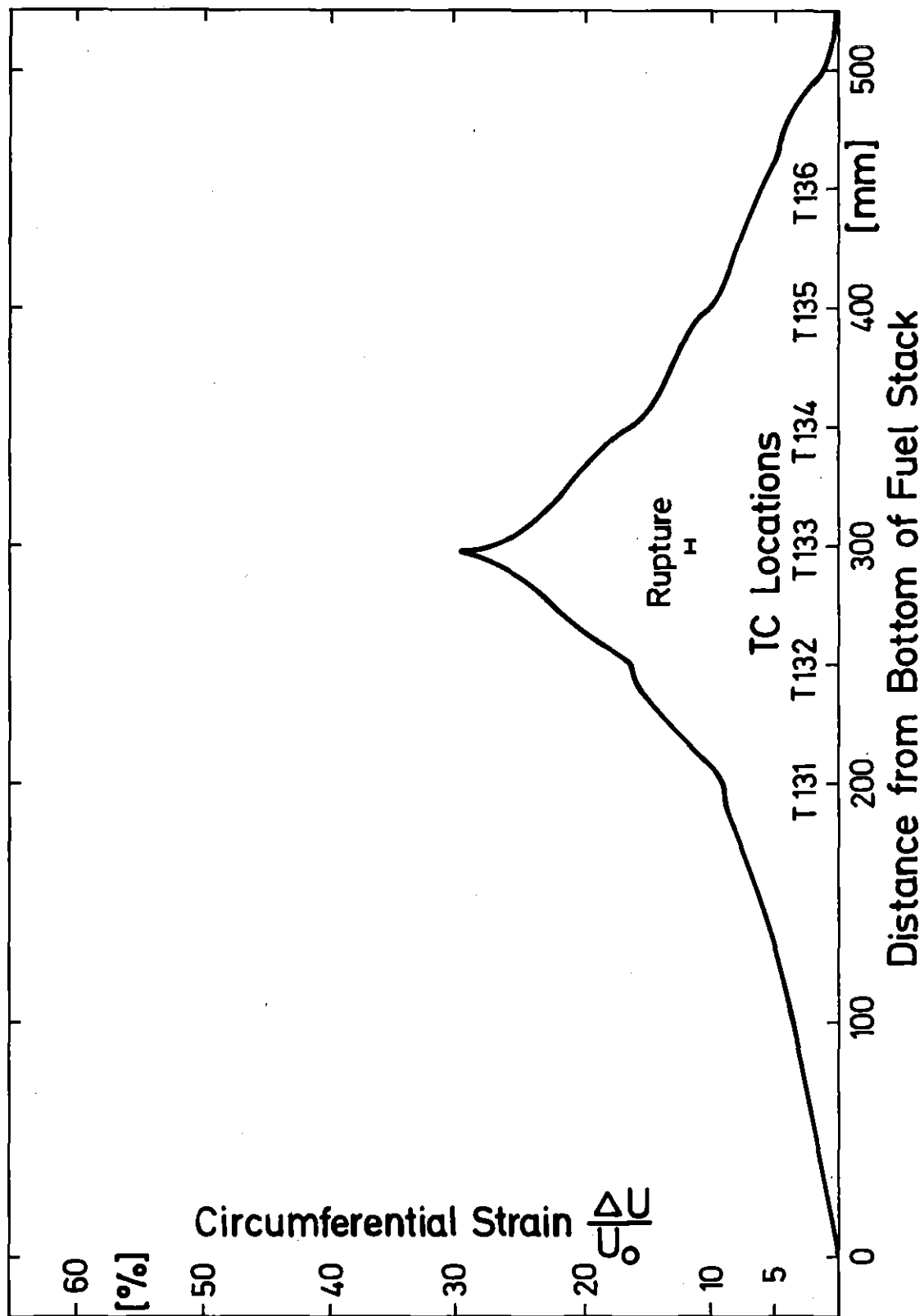


IT-1980
PNS 4237-95.19 a

FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G1.1

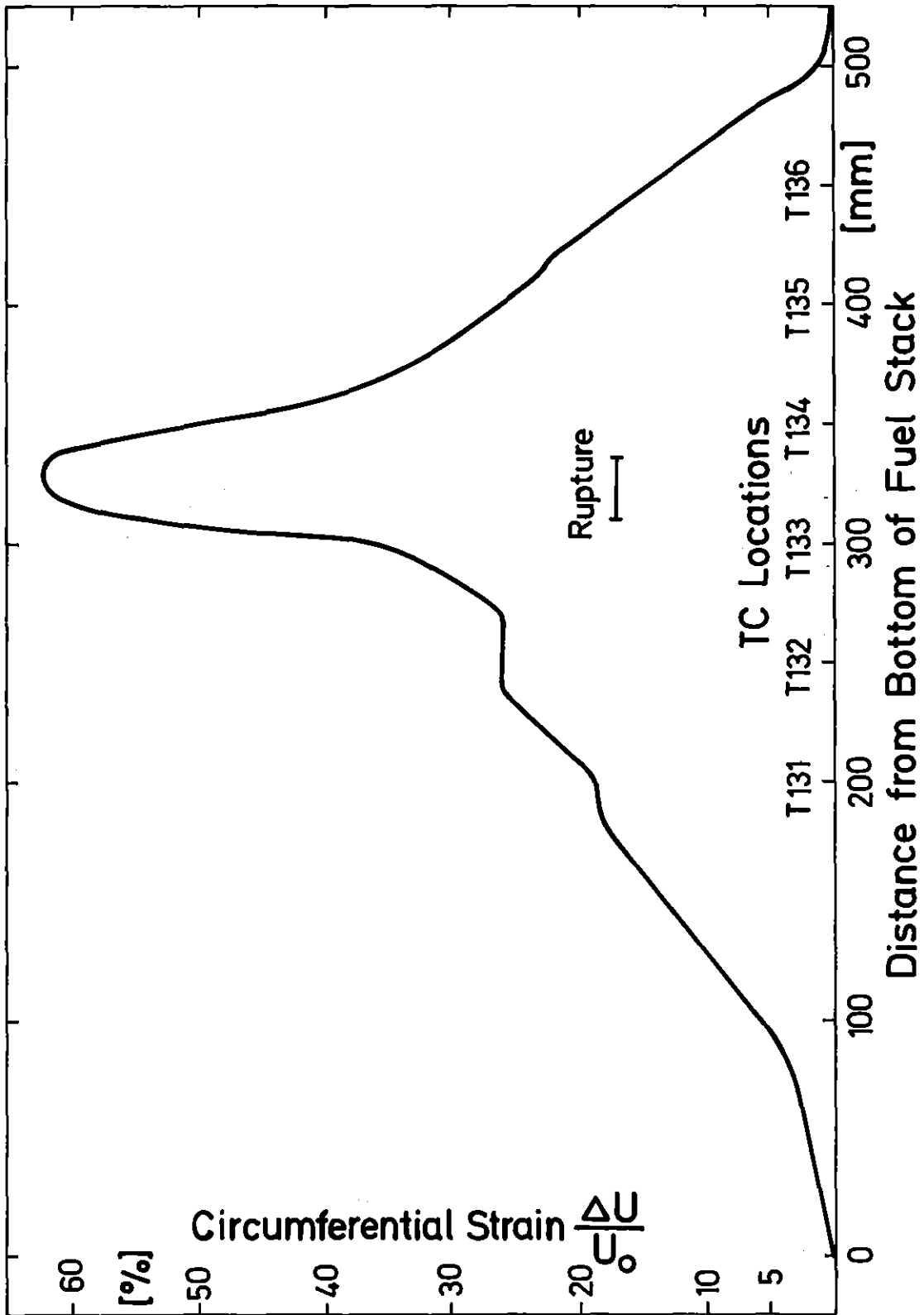
Fig. 43.1



FR2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G 1.2

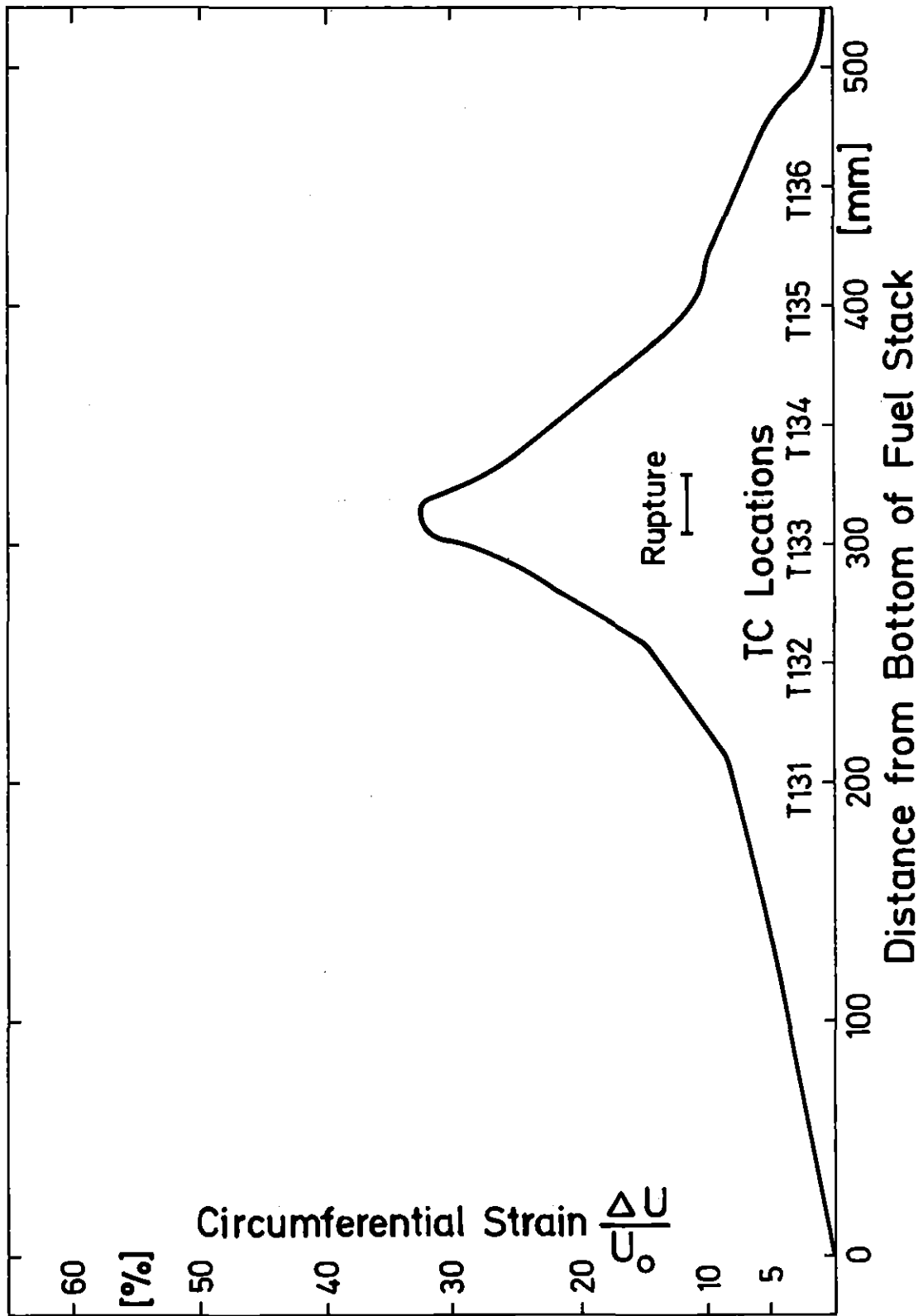
Fig.43.2



FR 2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G 1.3

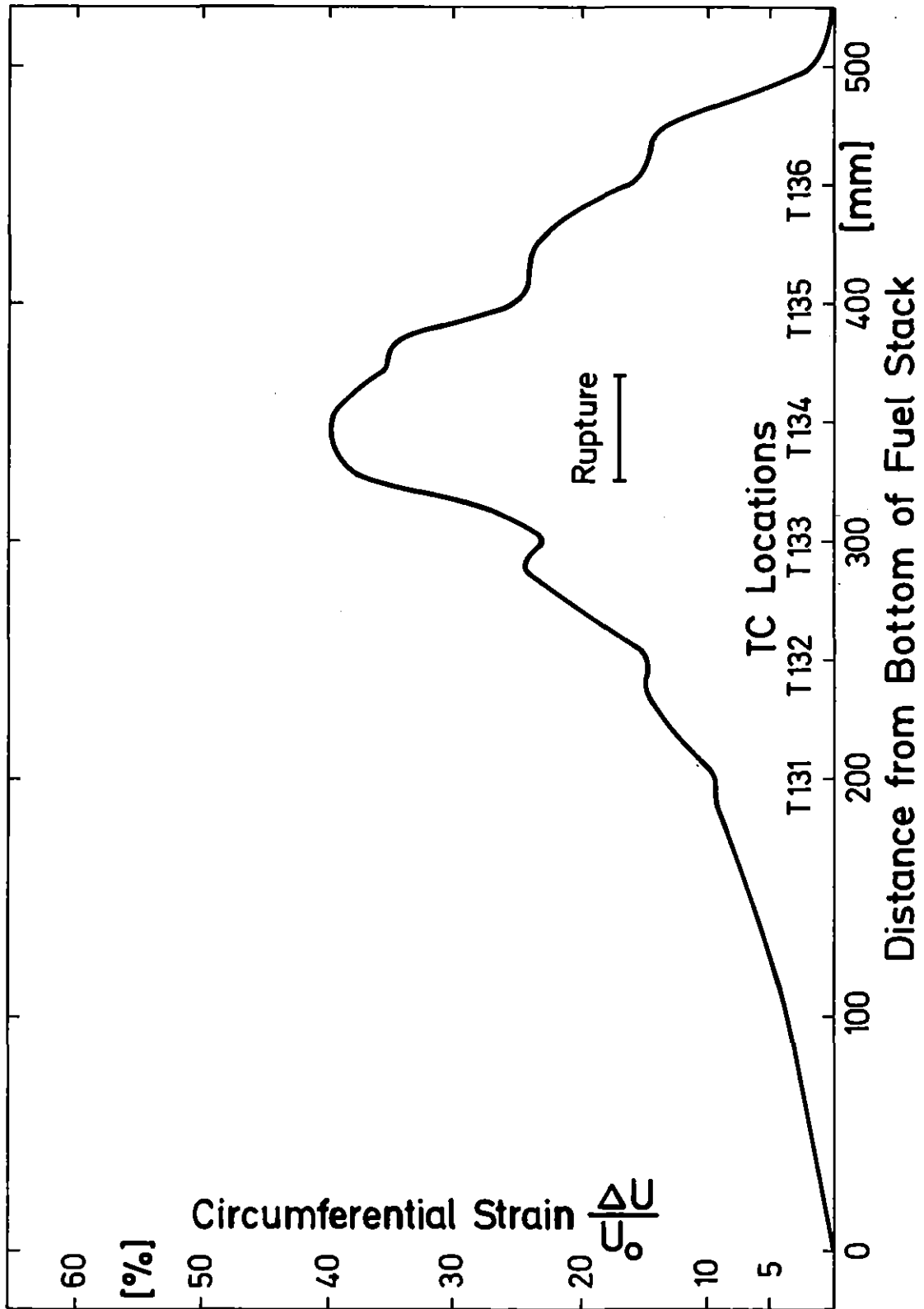
Fig. 43.3



FR 2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G1.4

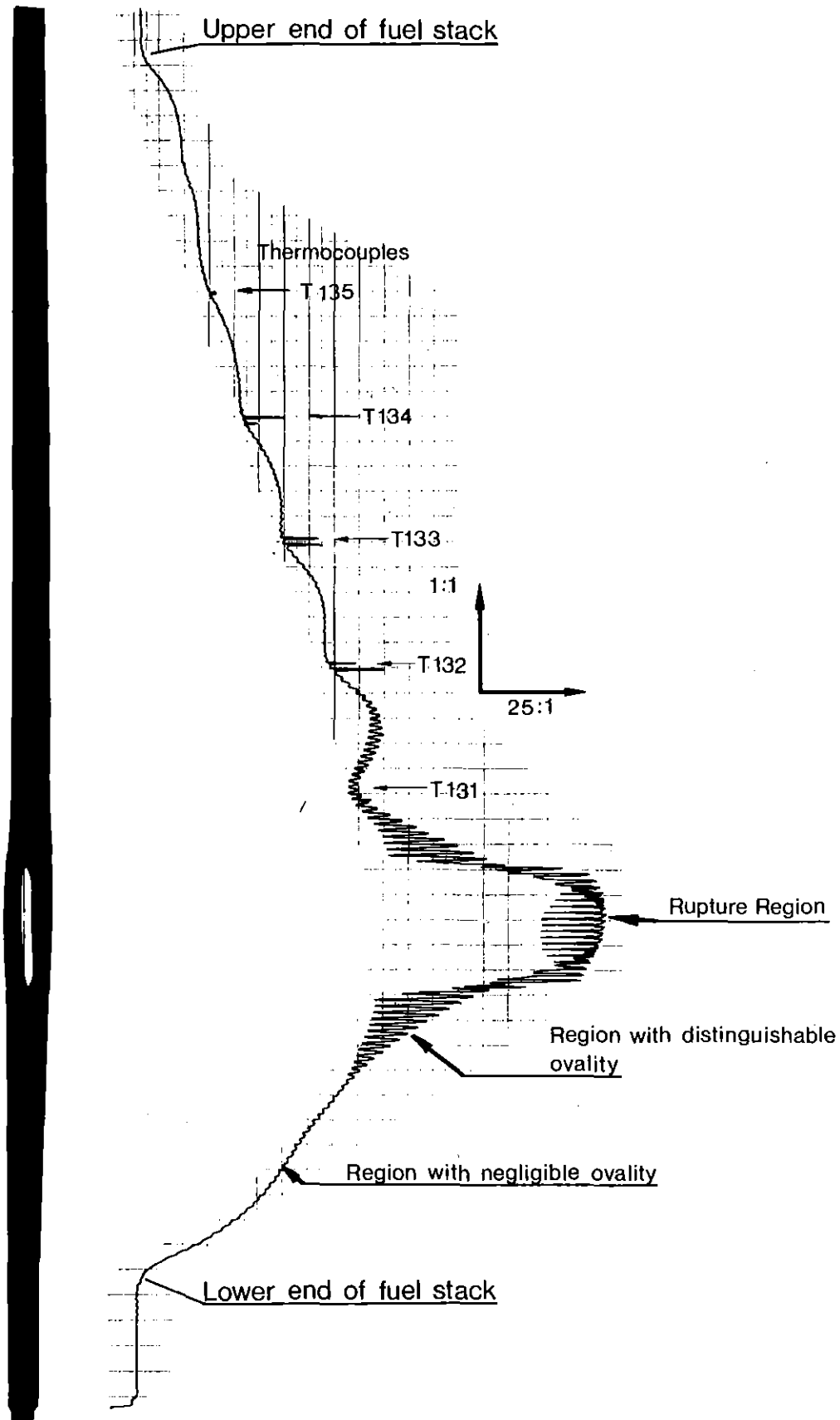
Fig.43.4



FR 2 In-Pile Tests.

Axial Profile of Circumferential Strain, Test G 1.5

Fig.43.5

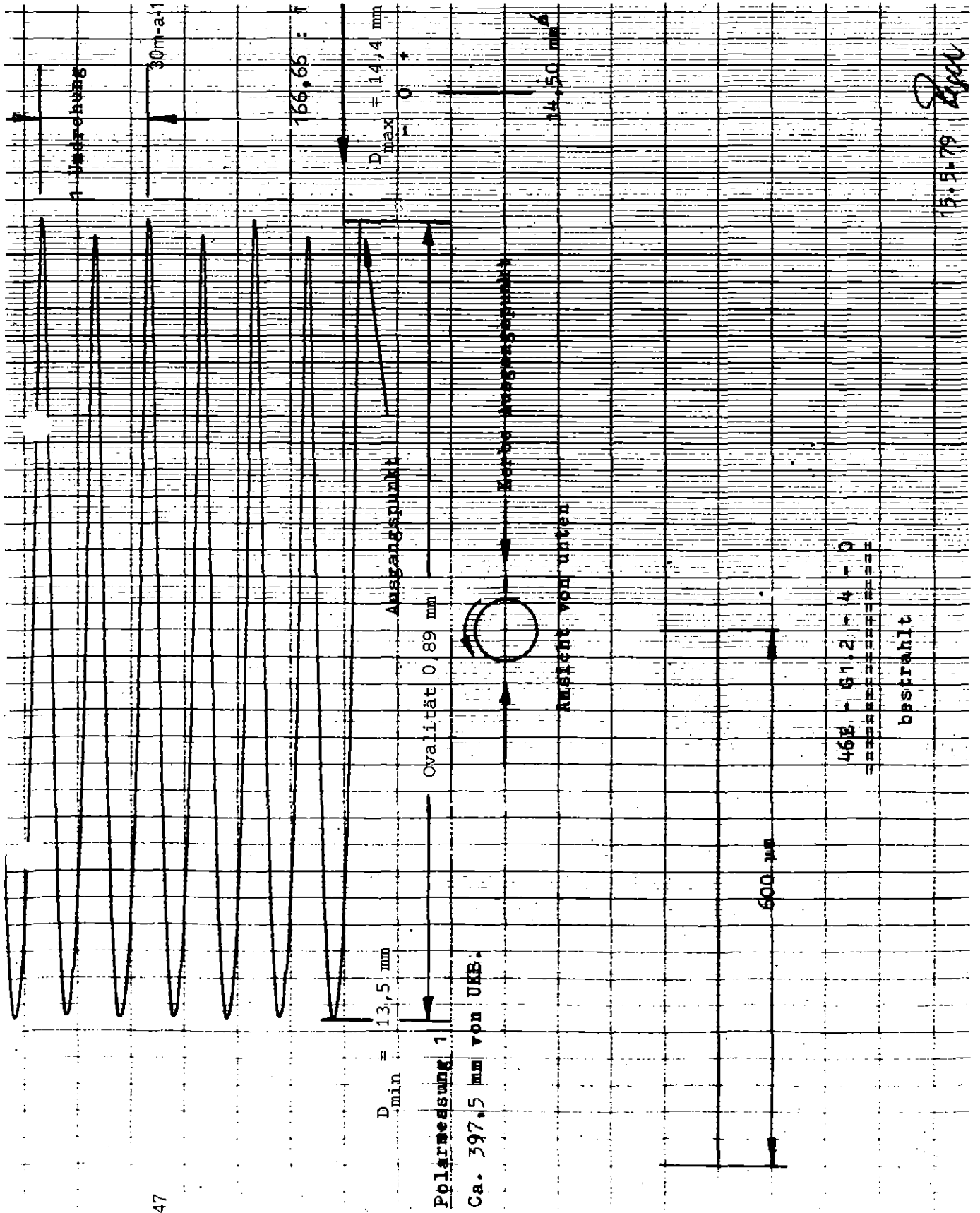


IT 1980
PNS 4237-400

FR 2 In-Pile Tests.

Typical spiral profile;

posttest measured rod diameters of test A2.2 Fig. 44

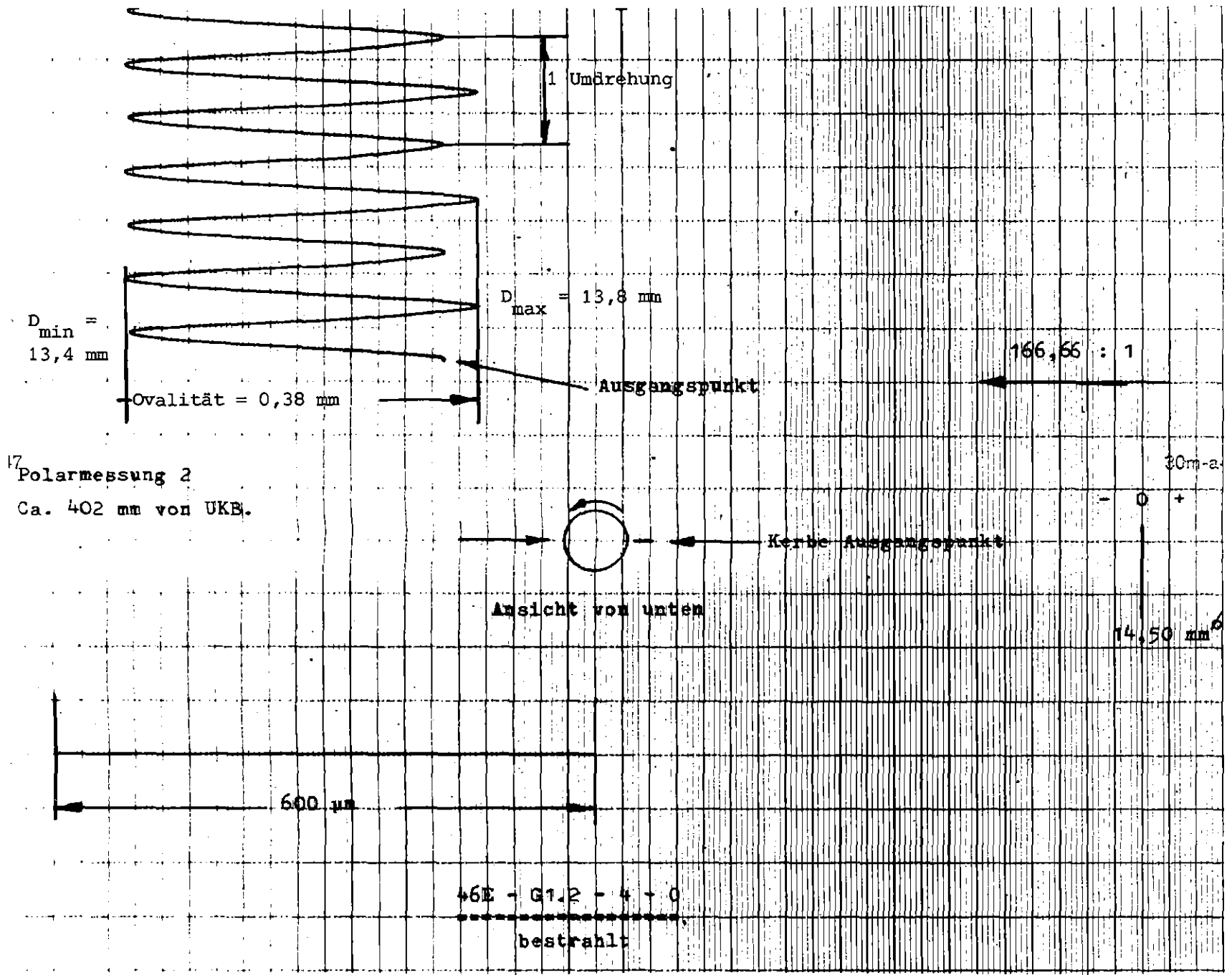


47

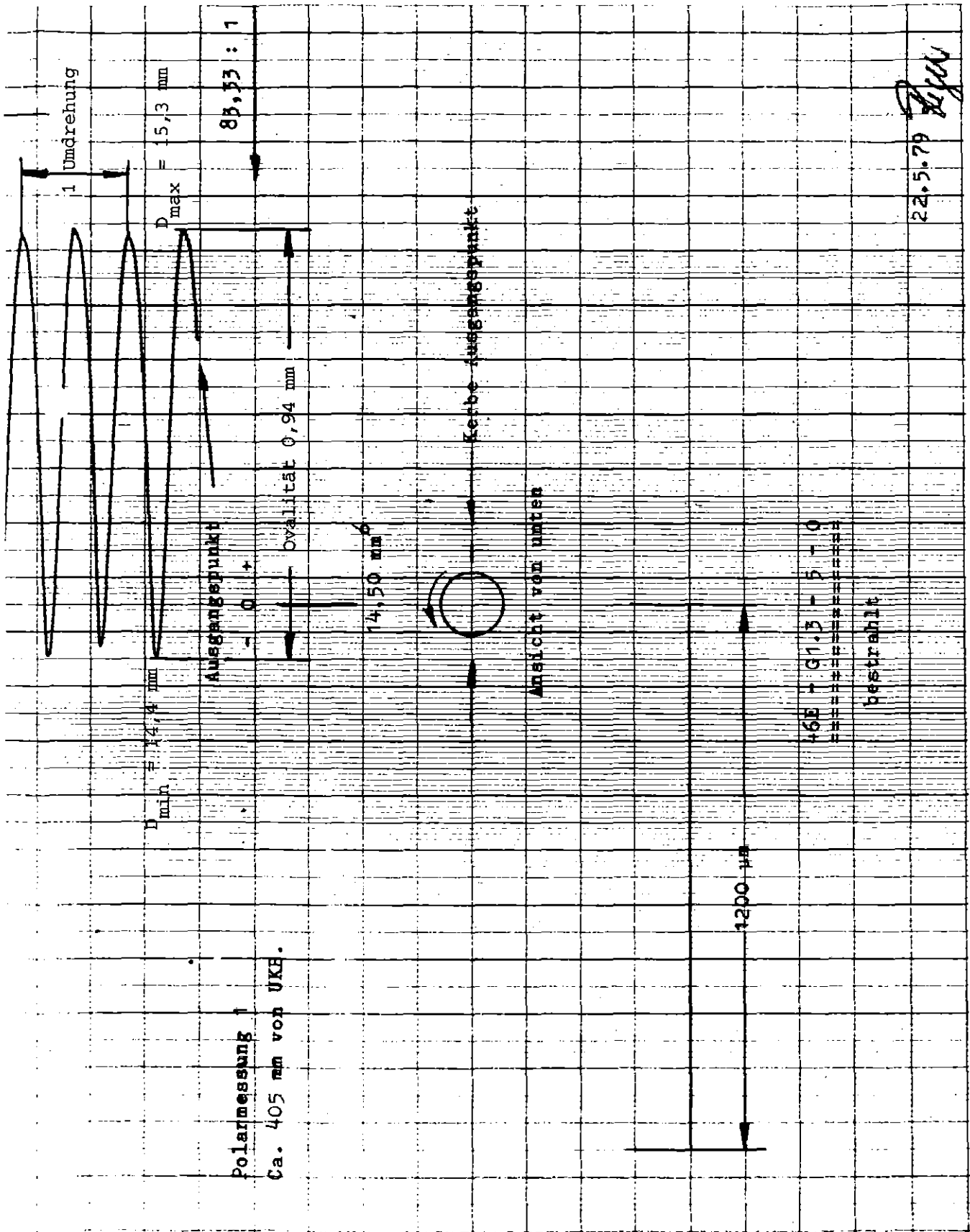


POLARMESSUNG 1 (296,5 MM VON UKF)
 VERSUCH G 1.2 STAB NR. 4

Abb. 45.1



KfK



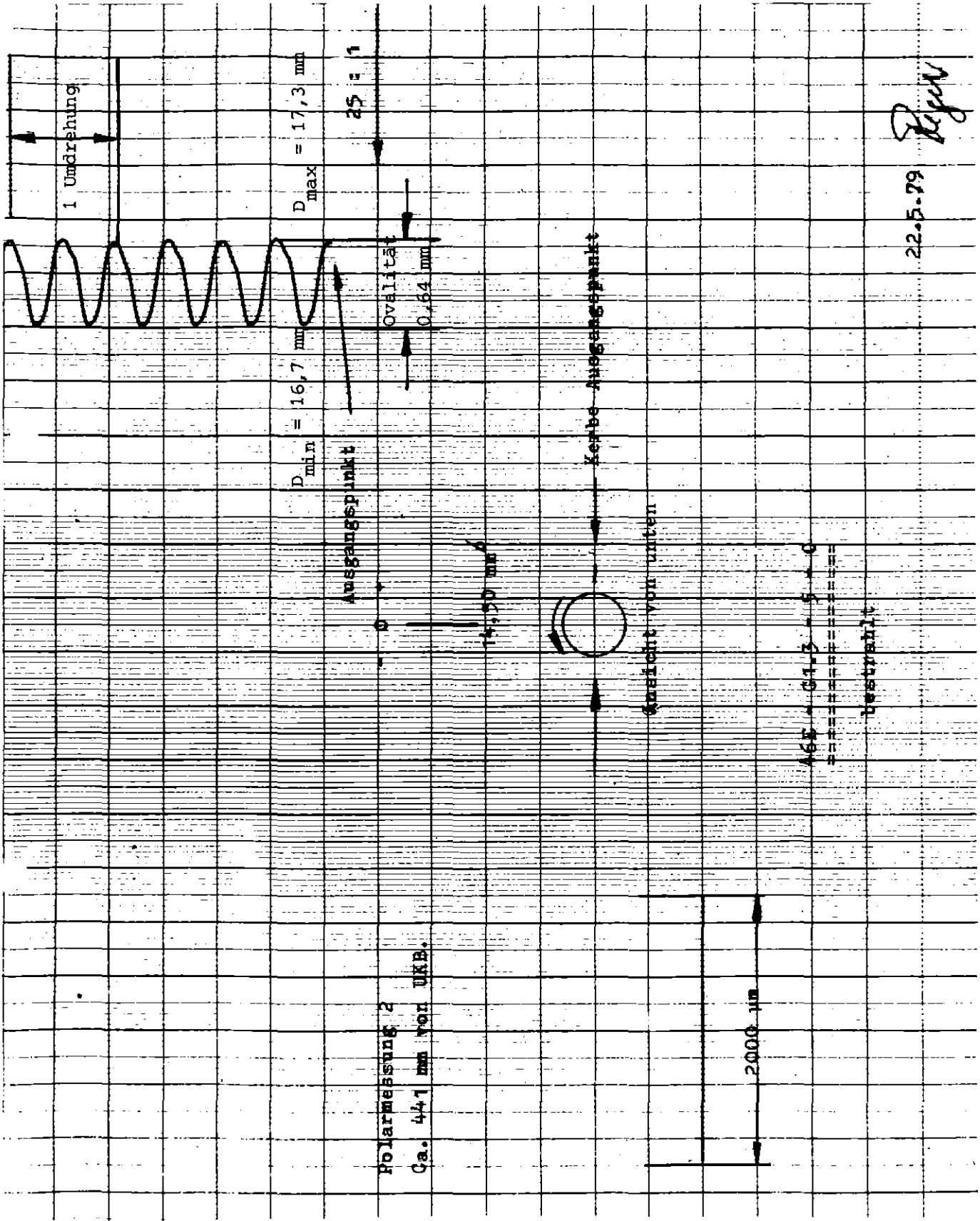
Polarmessung 1
 Ca. 405 mm von UKF.



POLARMESSUNG 1 (304 MM VON UKF)

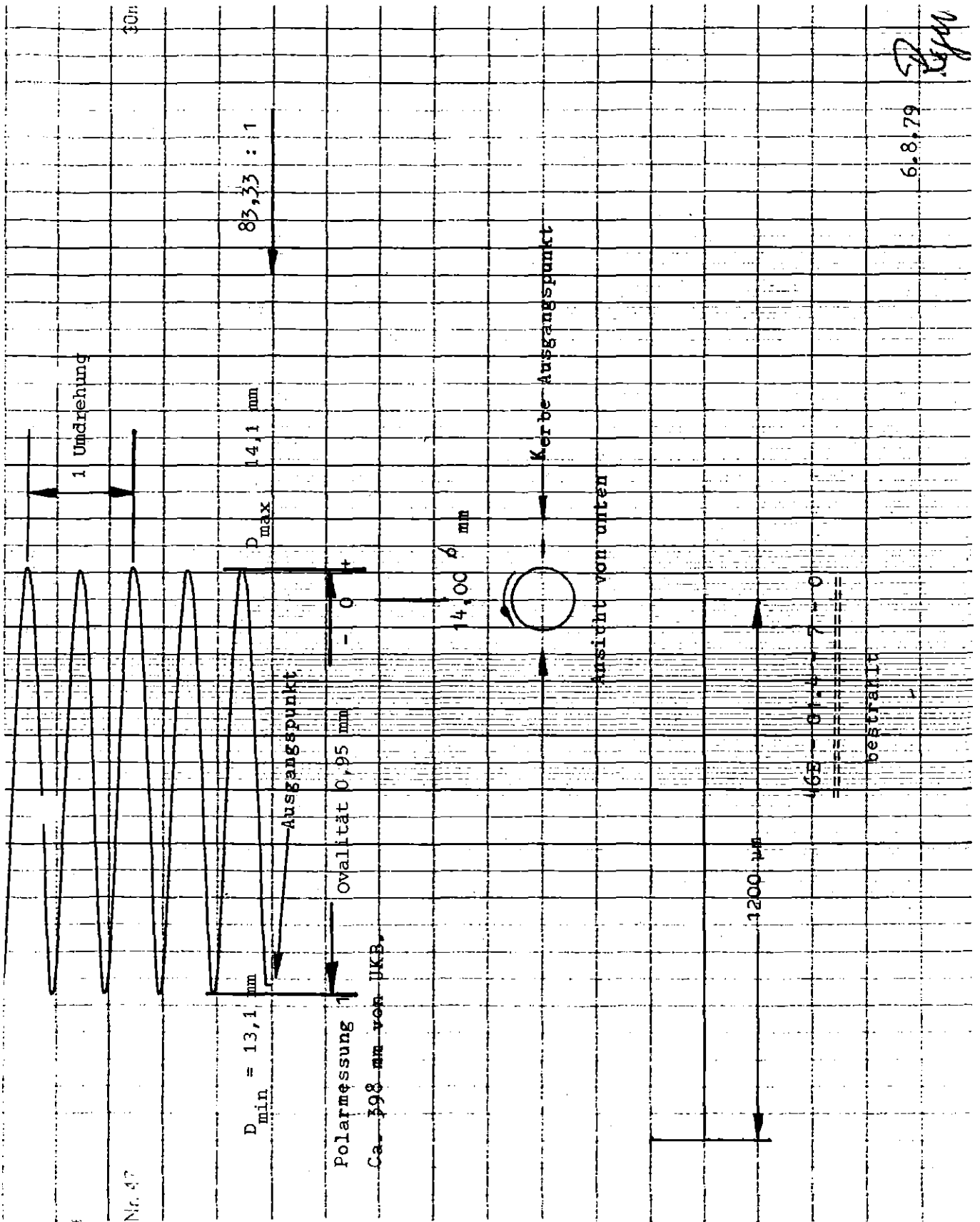
VERSUCH G 1.3 STAB NR. 5

Abb. 46.1



Polarmessung 2
 Ca. 441 mm von UKB.

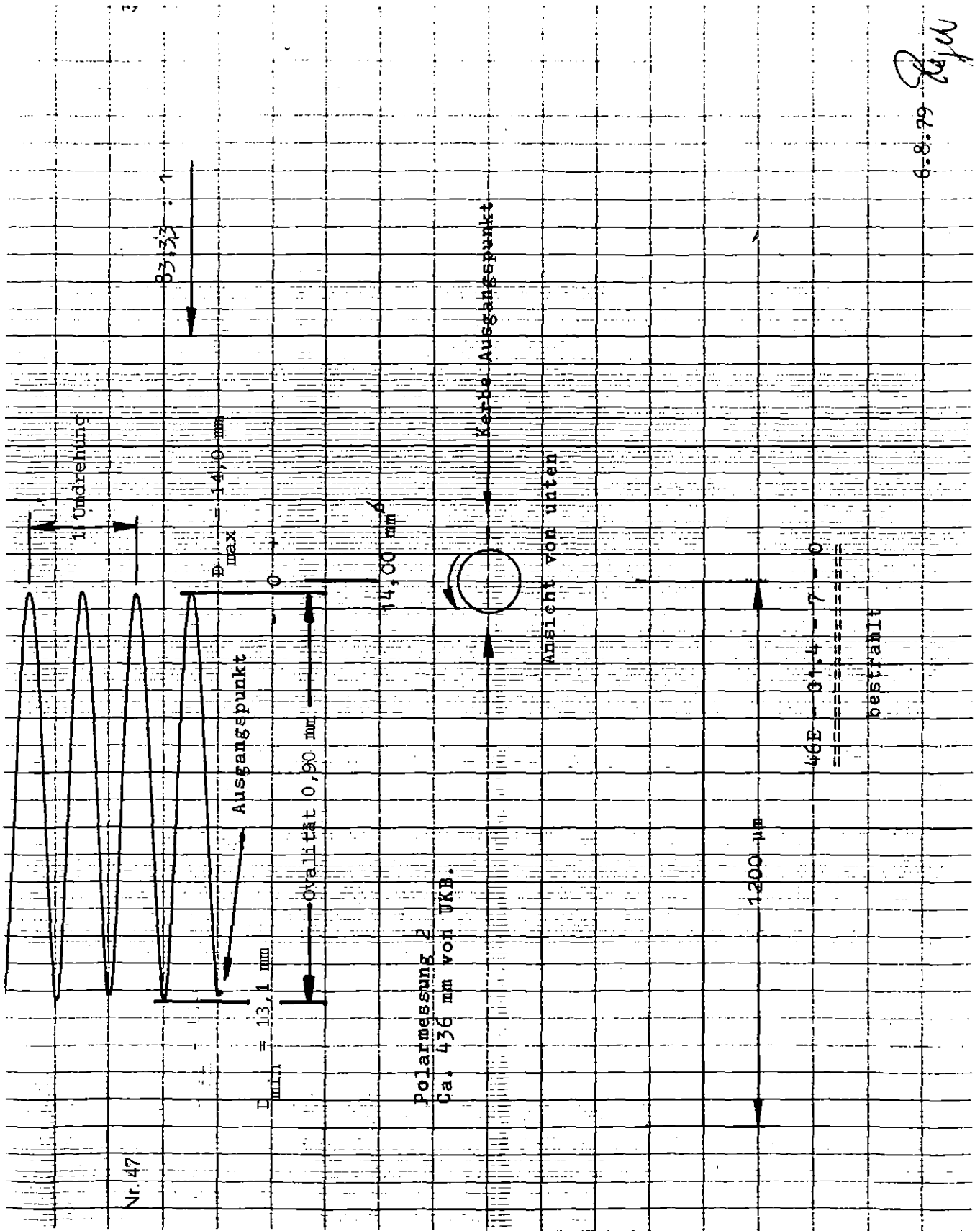




POLARMESSUNG 1 (297 MM VON UKB)
 VERSUCH G 1.4 STAB NR. 7

Abb. 47.1

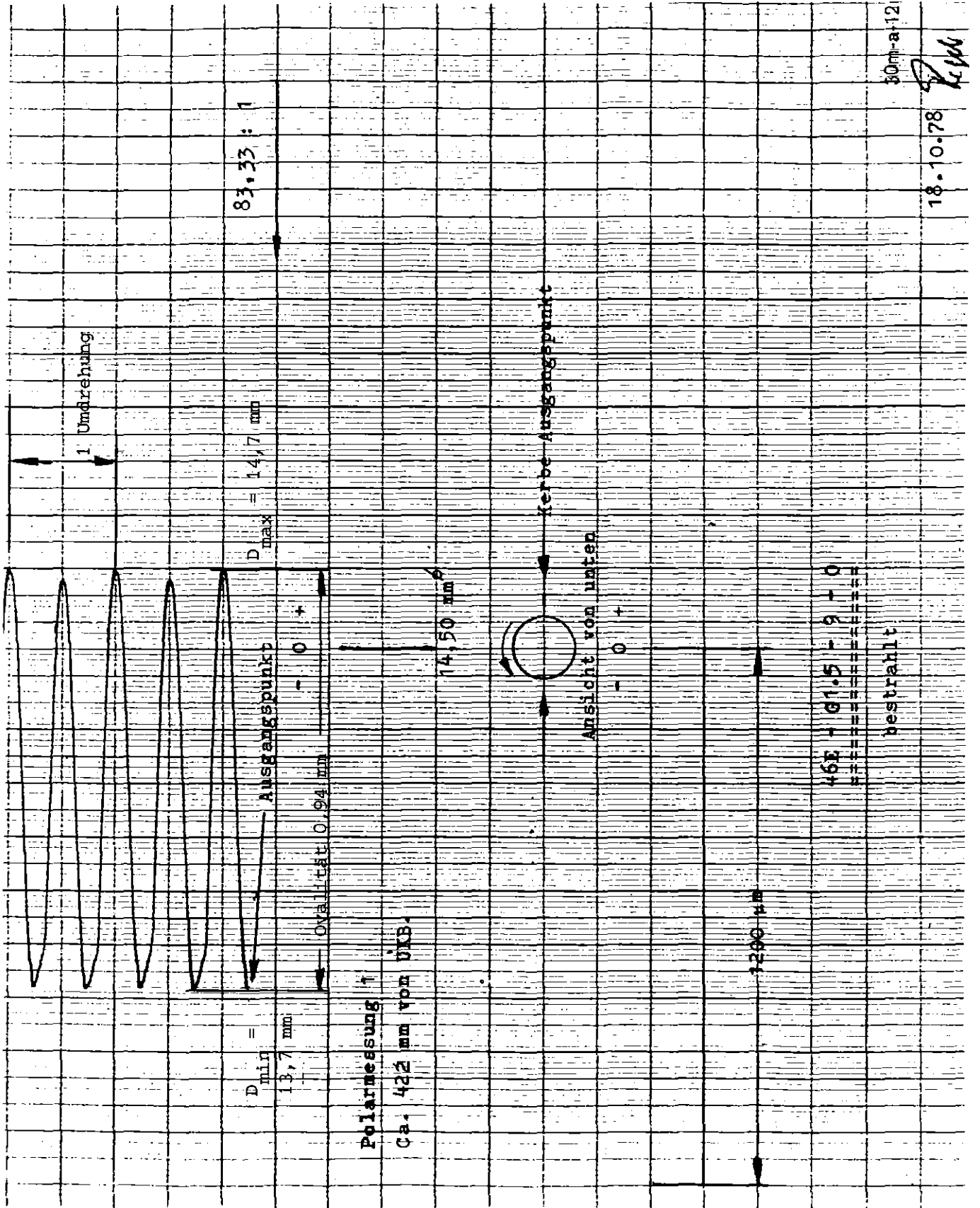




POLARMESSUNG 2 (335 MM VON UKF)

VERSUCH G 1.4 STAB NR. 7

Abb. 47.2



30mm-a-12

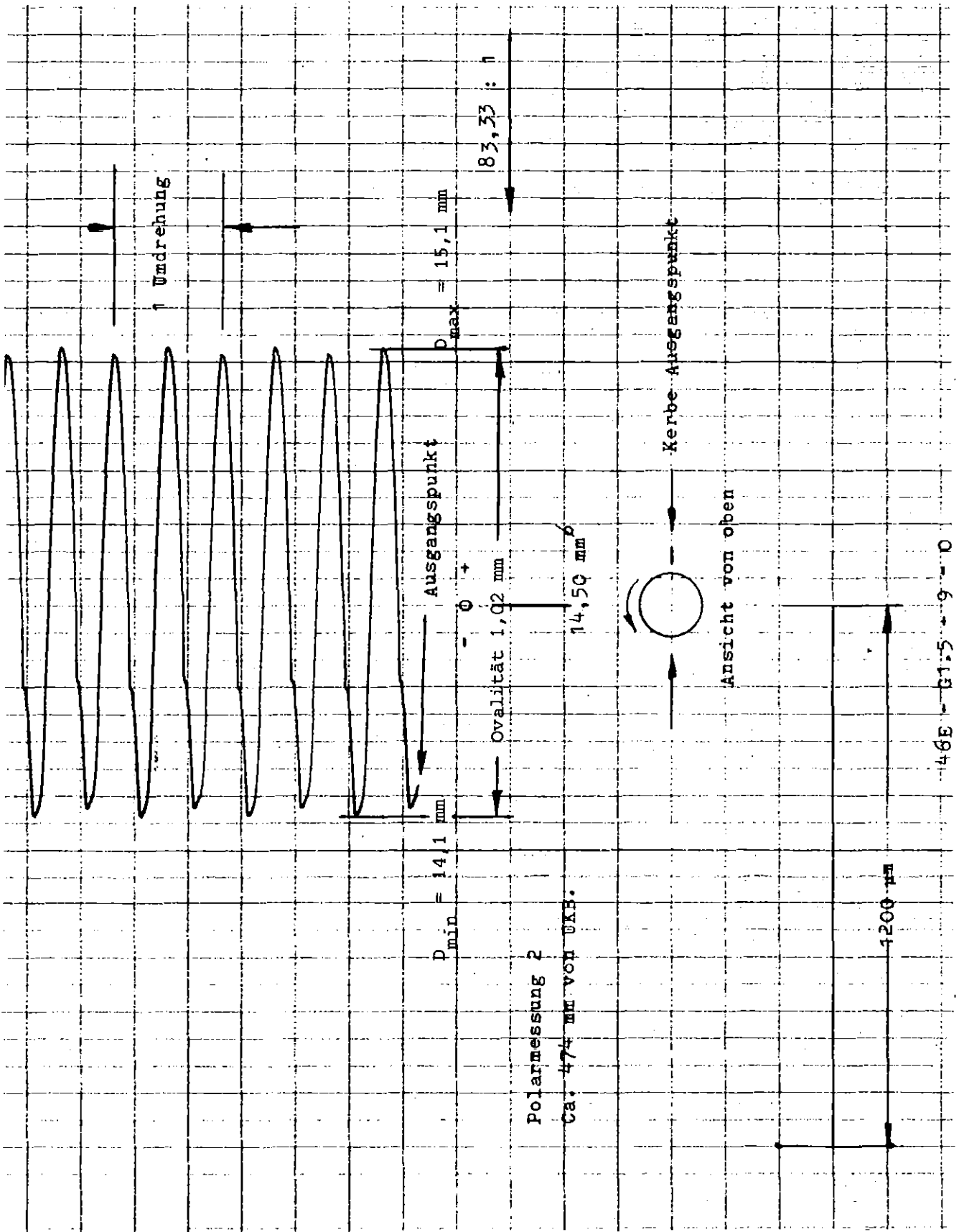
18.10.78
KMK



POLARMESSUNG 1 (321 MM VON UKF)

VERSUCH G 1.5 STAB NR. 9

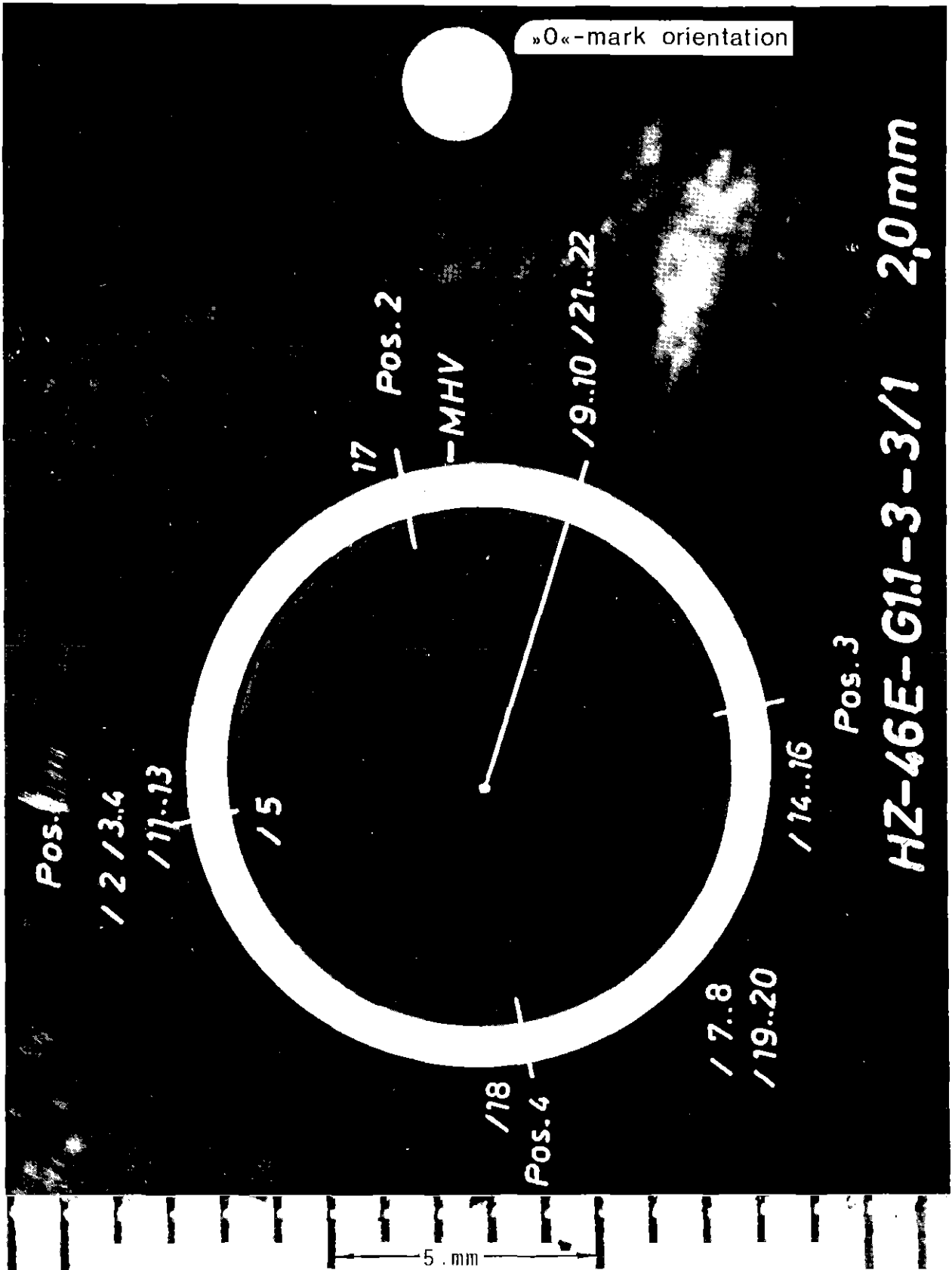
Abb. 48.1



POLARMESSUNG 2 (373 MM VON UKF)

VERSUCH G 1.5 STAB NR. 9

Abb. 48.2

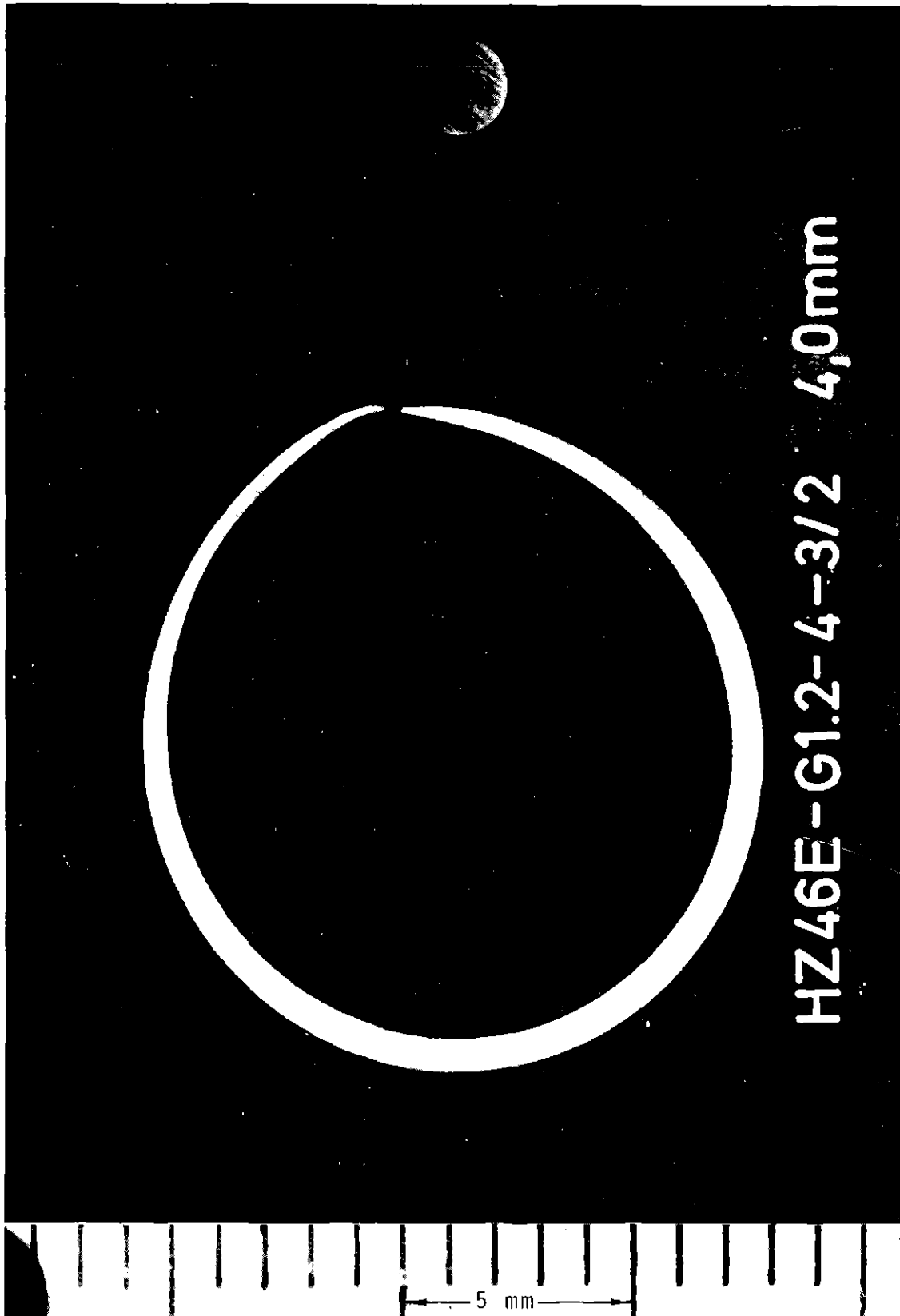


IT 1980
PNS 4237-387

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.1

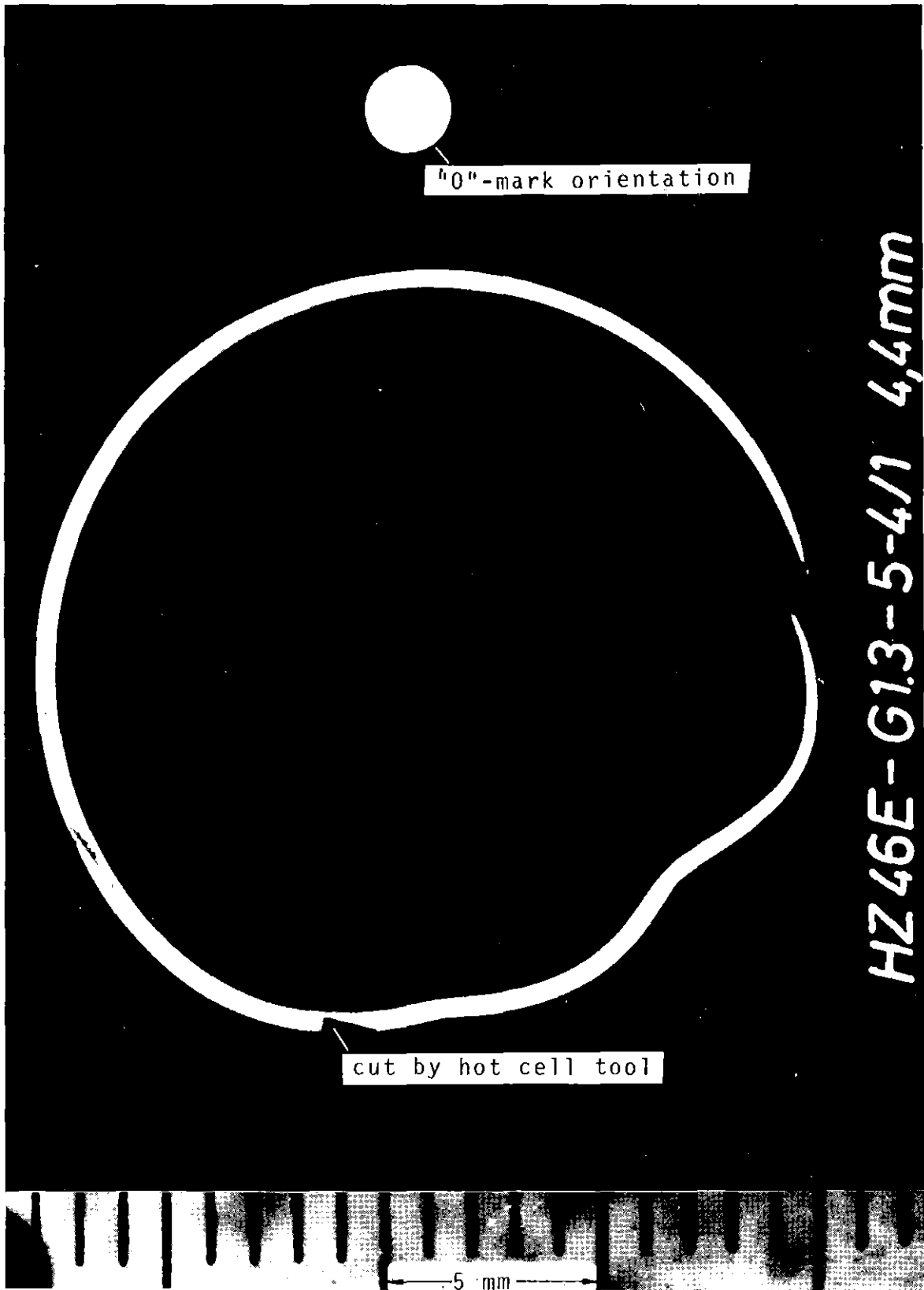
Cross Section

Fig.49.1



IT 1980
PNS 4237-388

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.2 Fig. 49.2
Cross Section, Max. Circumferential Strain



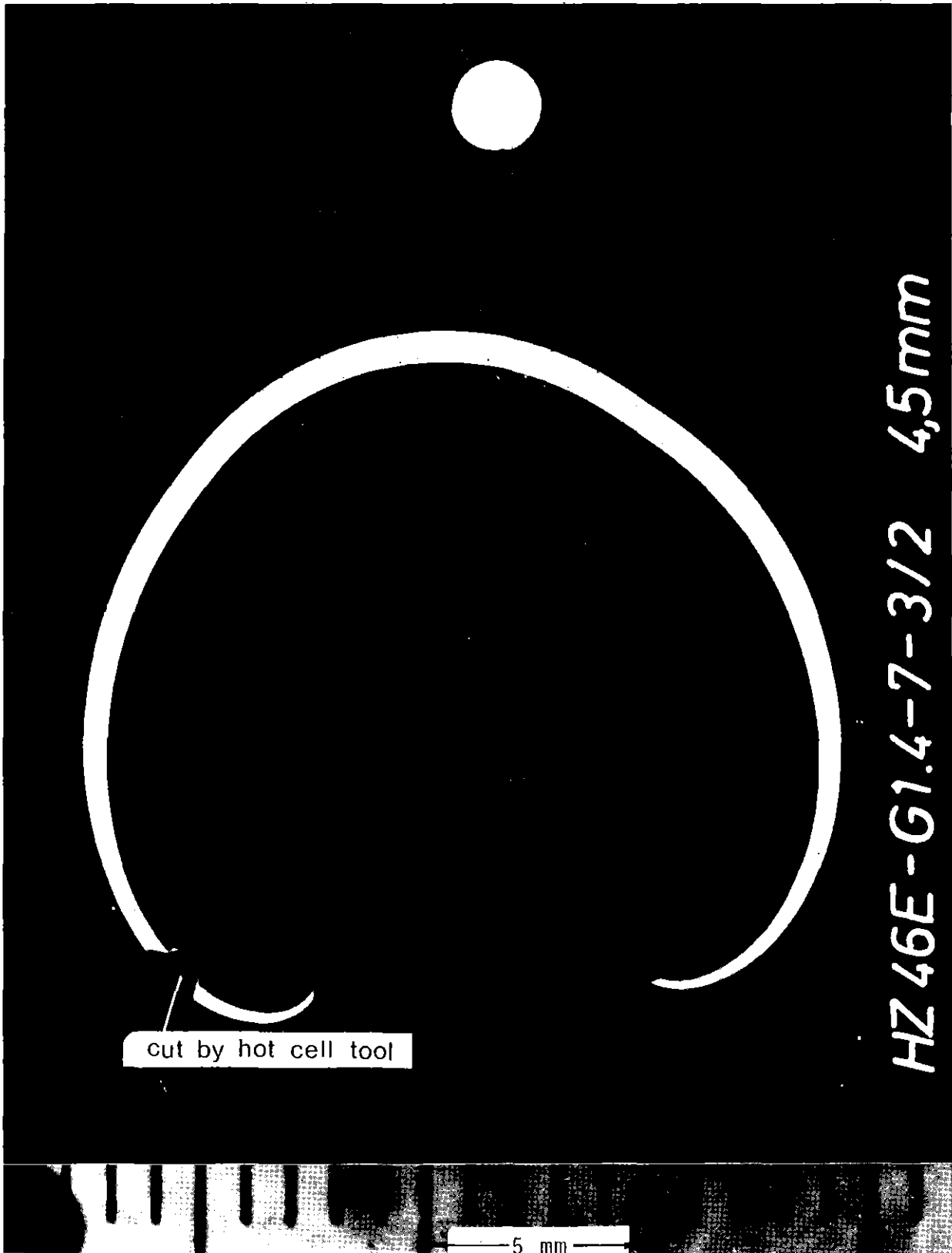
FR 2 In-Pile Tests. Test G 1.3

Cross Section, Max. Circumferential Strain



IT 1980
PNS 4237-389

Fig. 49.3



IT 1980
PNS 4237-390

FR 2 In-Pile Tests. Test G1.4

Fig.49.4

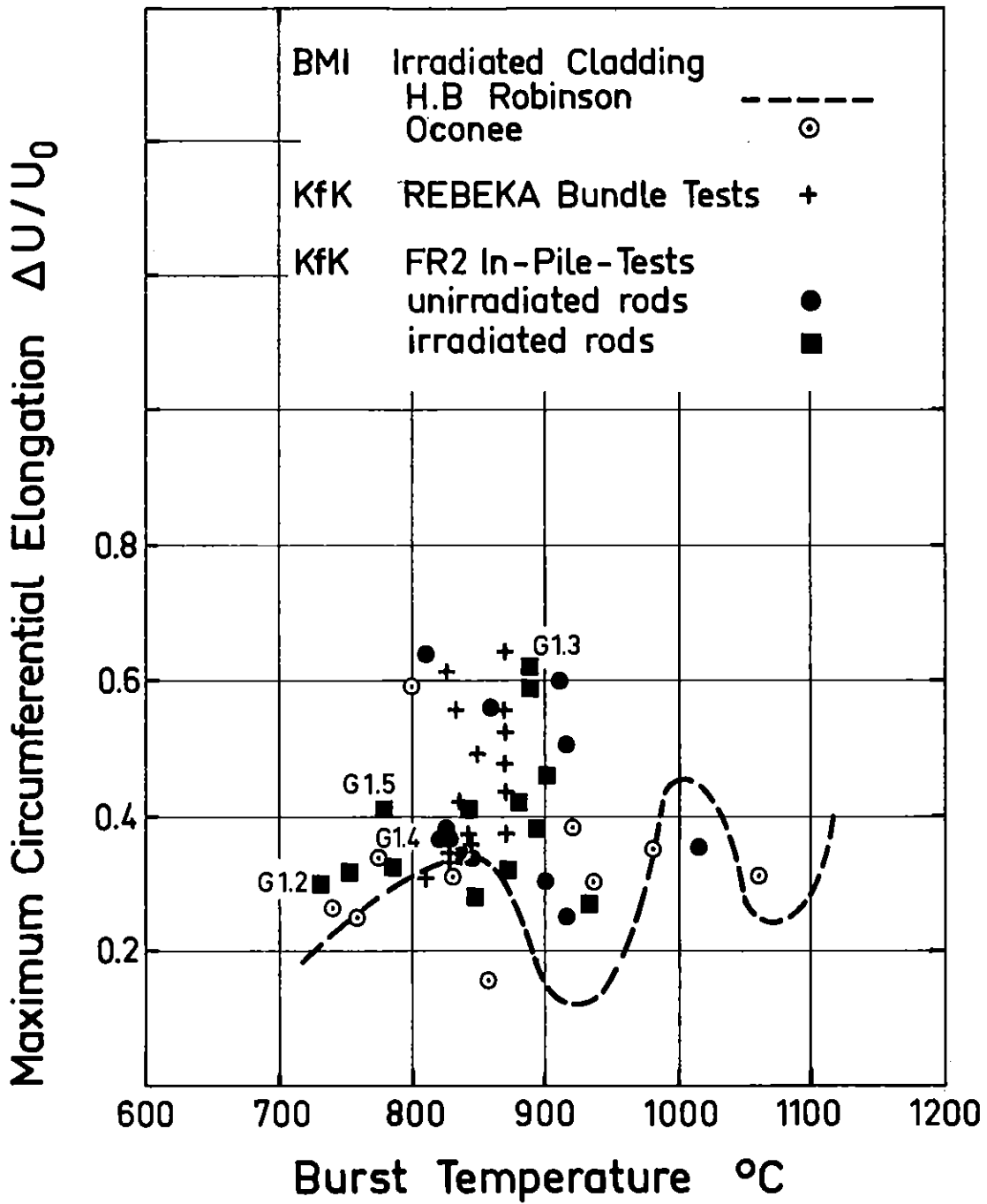
Cross Section, Max. Circumferential Strain

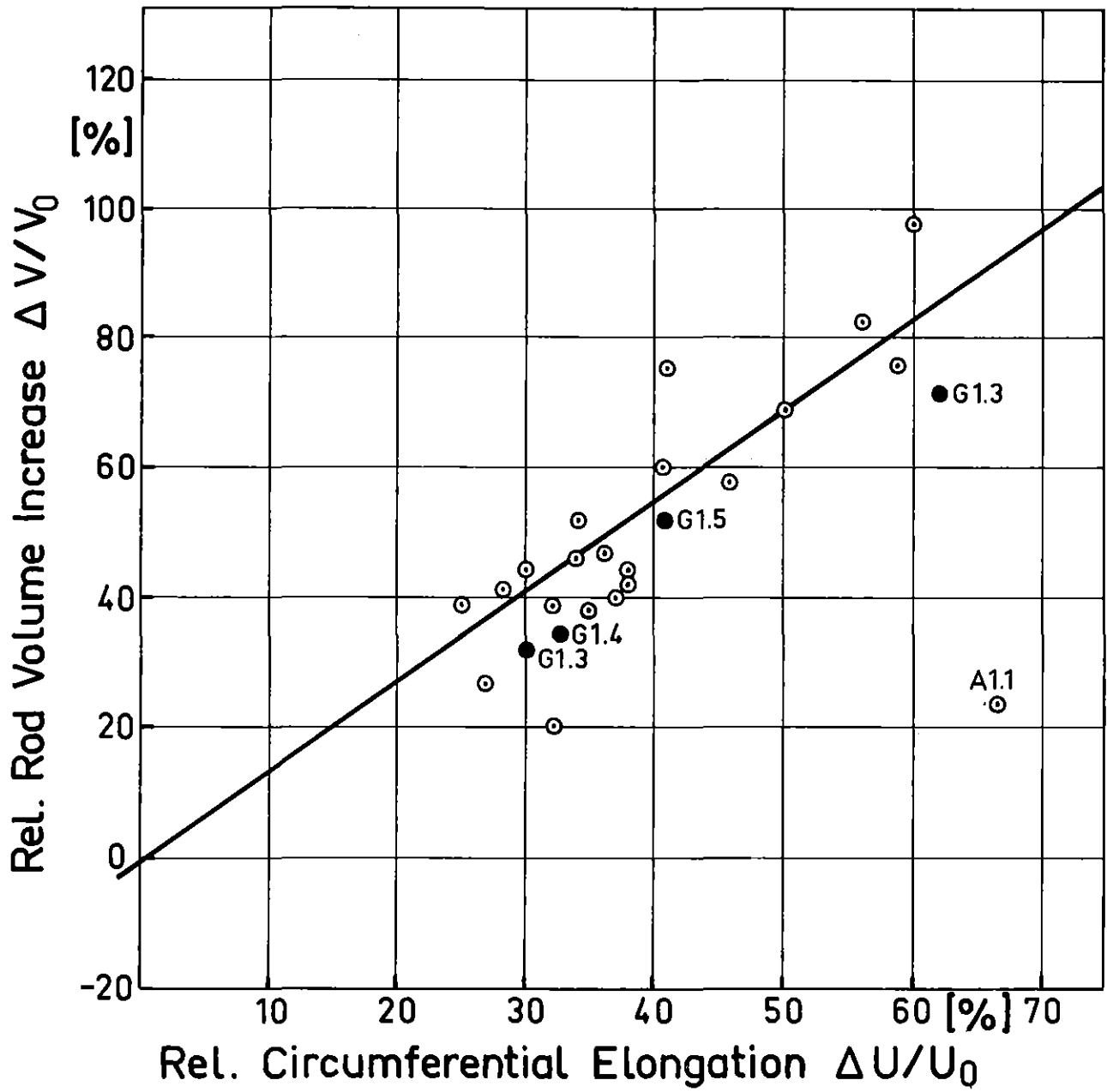


kfk

IT 1980
PNS 4237-391

FR 2 In-Pile Tests. TEST G 1.5 Fig. 49.5
Cross Section, Max. Circumferential Strain

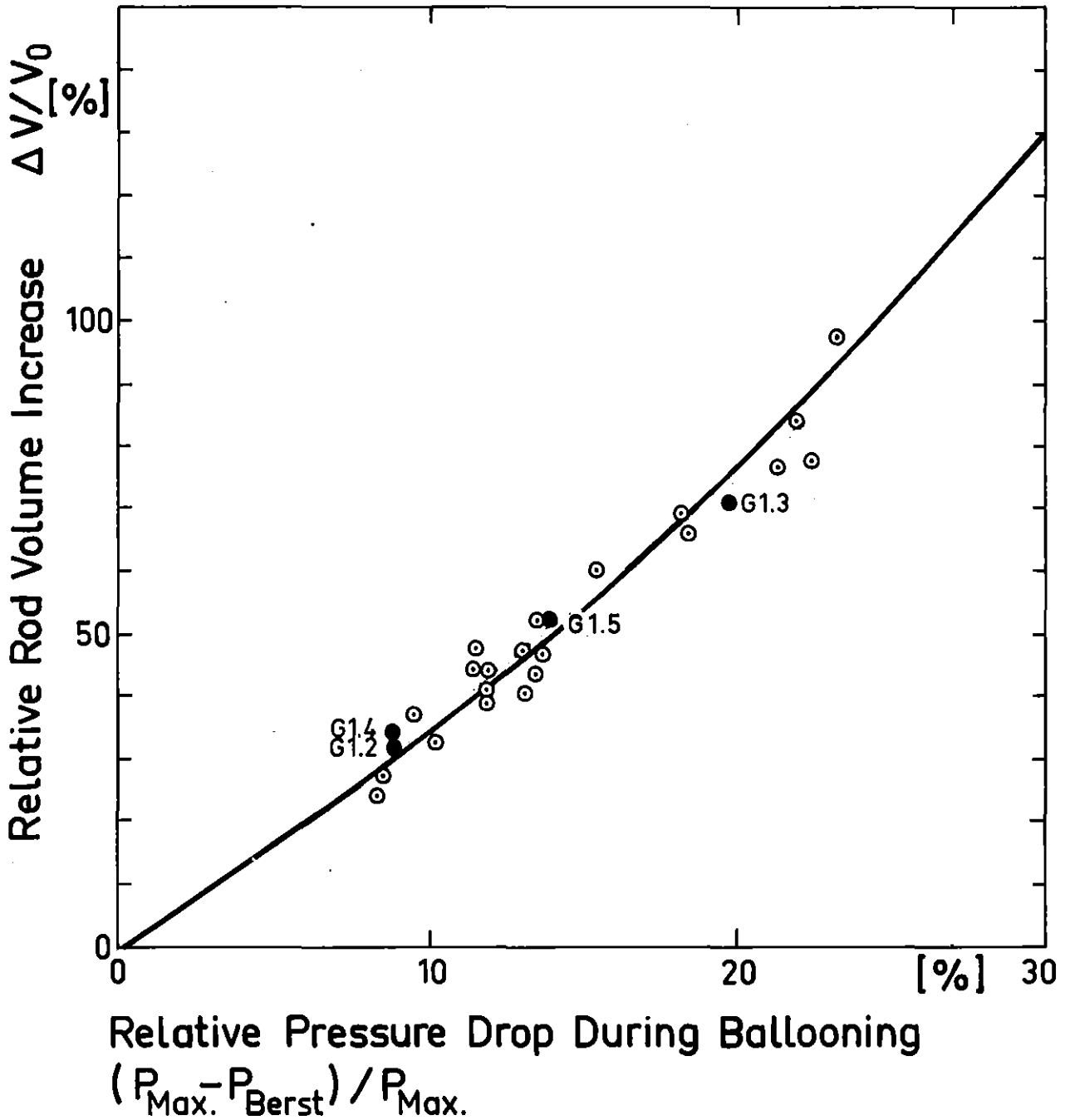




FR2 In-Pile Tests

Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation

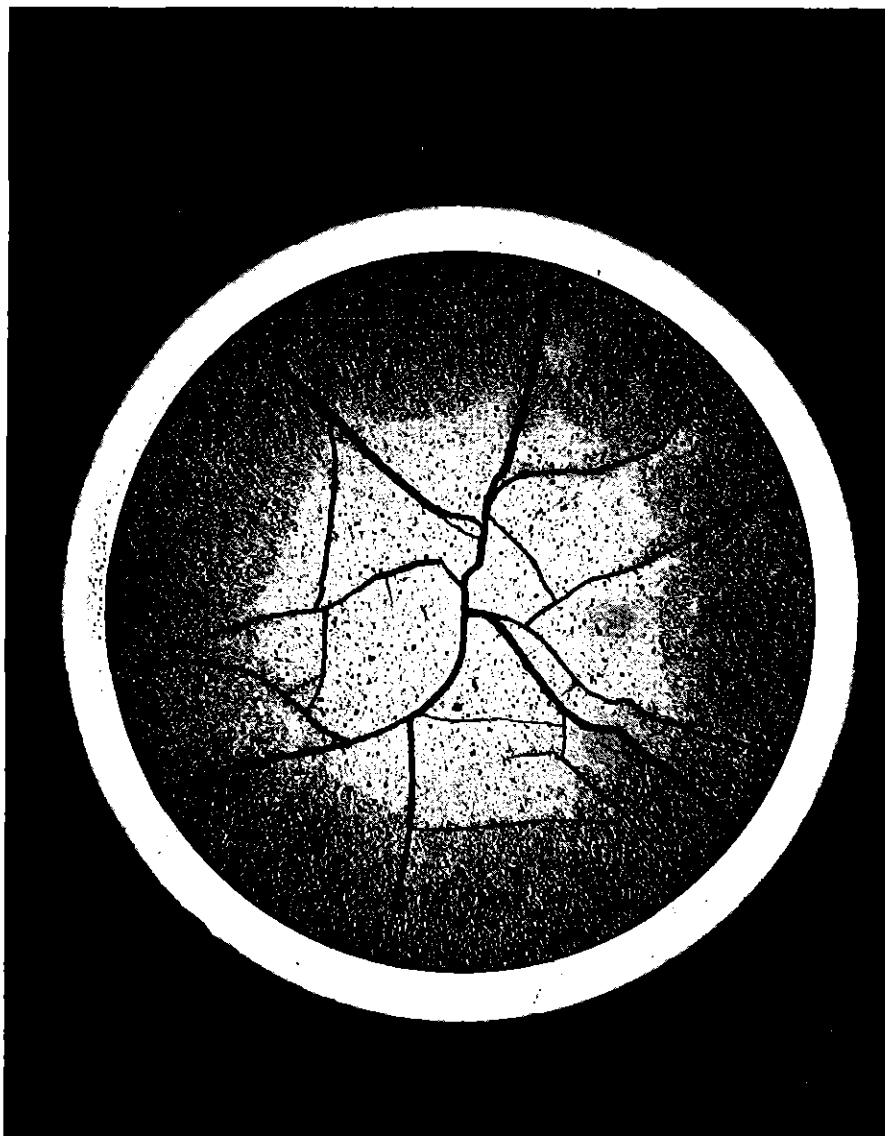
Fig. 51



FR 2 In-Pile Tests

Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop

Fig. 52



HZ-46E-G1.6-8-5/8 10x

2 mm

Sample 5, 195 mm from UKF

35 000 MWd/t burnup,
not exposed to transient test

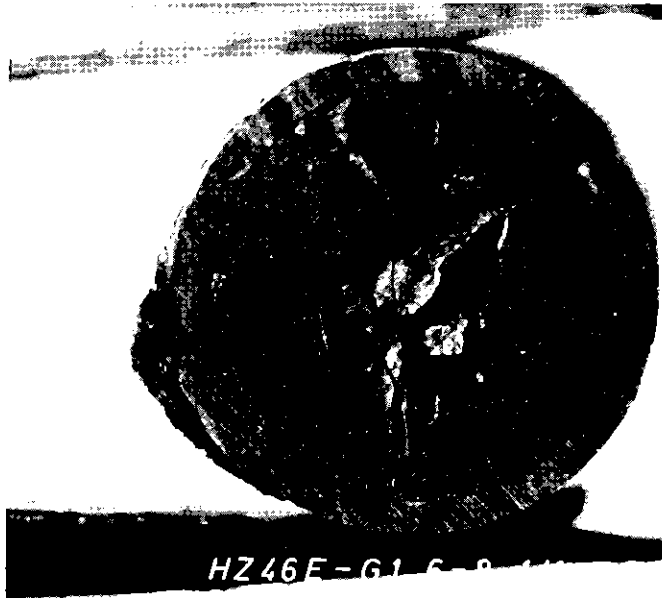


IT 1980
PNS 4237-396

FR 2 In-Pile Tests.

Cross Section of the G 1.6 Fuel Rod

Fig. 53



Sample 1, 466 mm from UKF

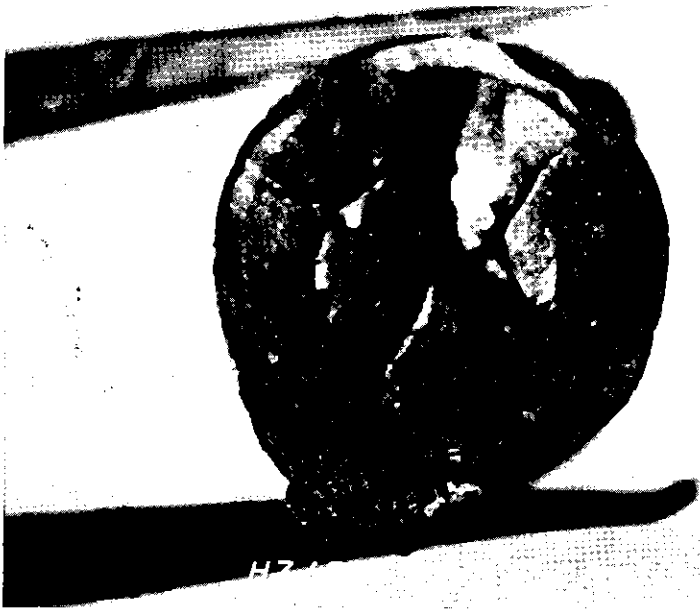


IT 1980
PNS 4237-392

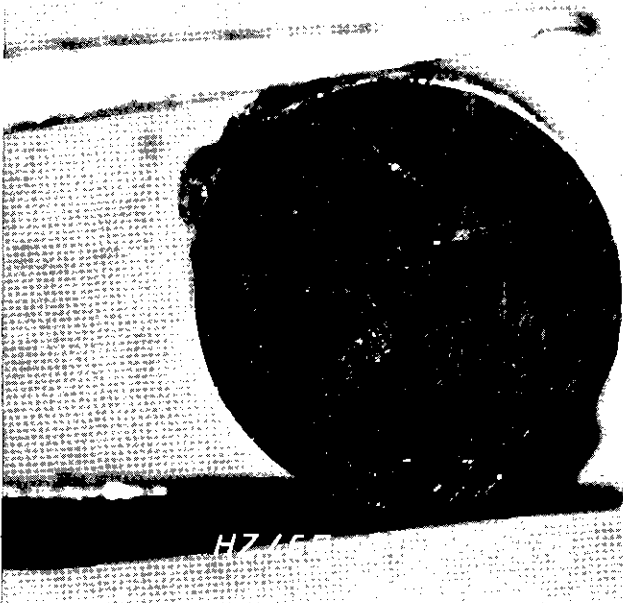
FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the G1.6 Fuel Rod

Fig. 54.1



Sample 2, 224 mm from UKF



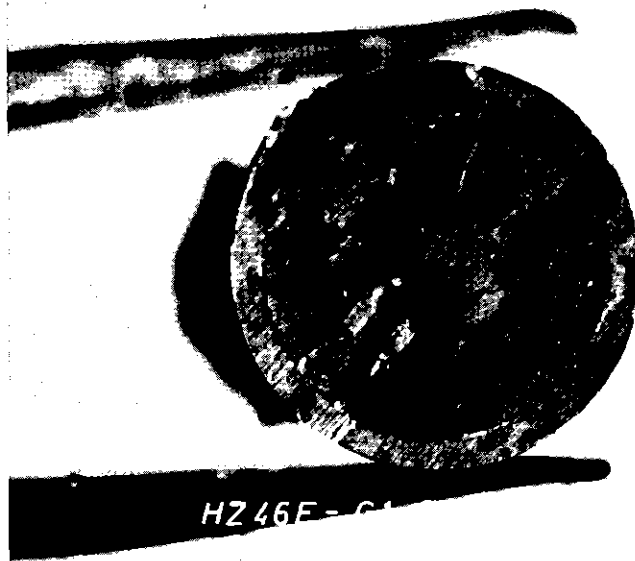
FR 2 In-Pile Tests.



IT 1980
PNS 4237-393

View of the Fuel Condition of the G1.6 Fuel Rod

Fig.54.2



Sample 3, 27 mm from UKF

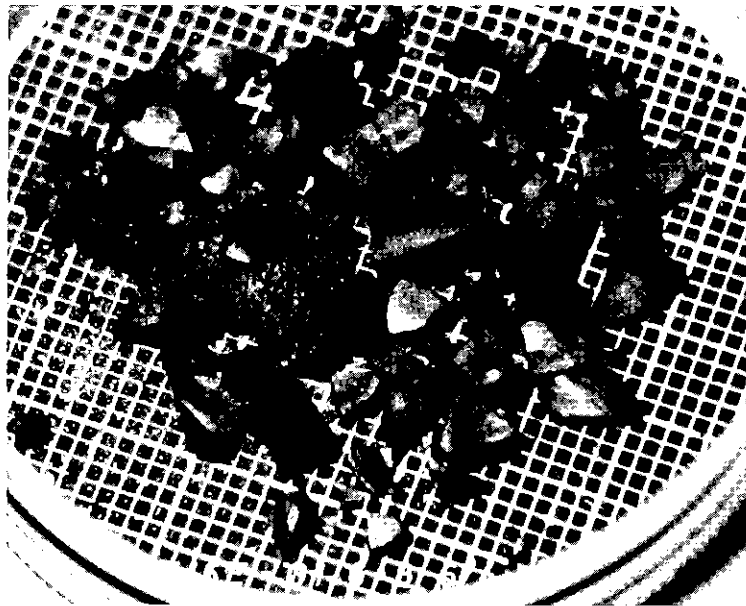
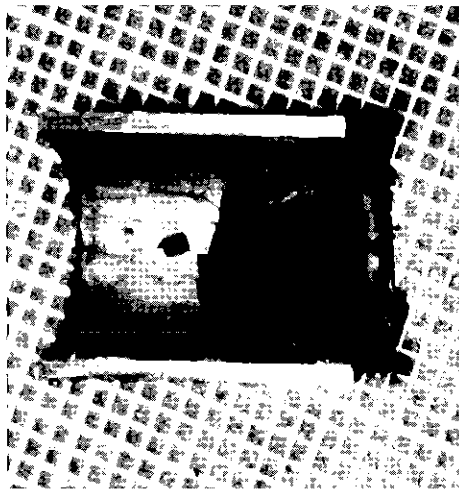


IT 1980
PNS 4237-394

FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the G1.6 Fuel Rod

Fig. 54.3



Sample 6, 172 mm from UKF

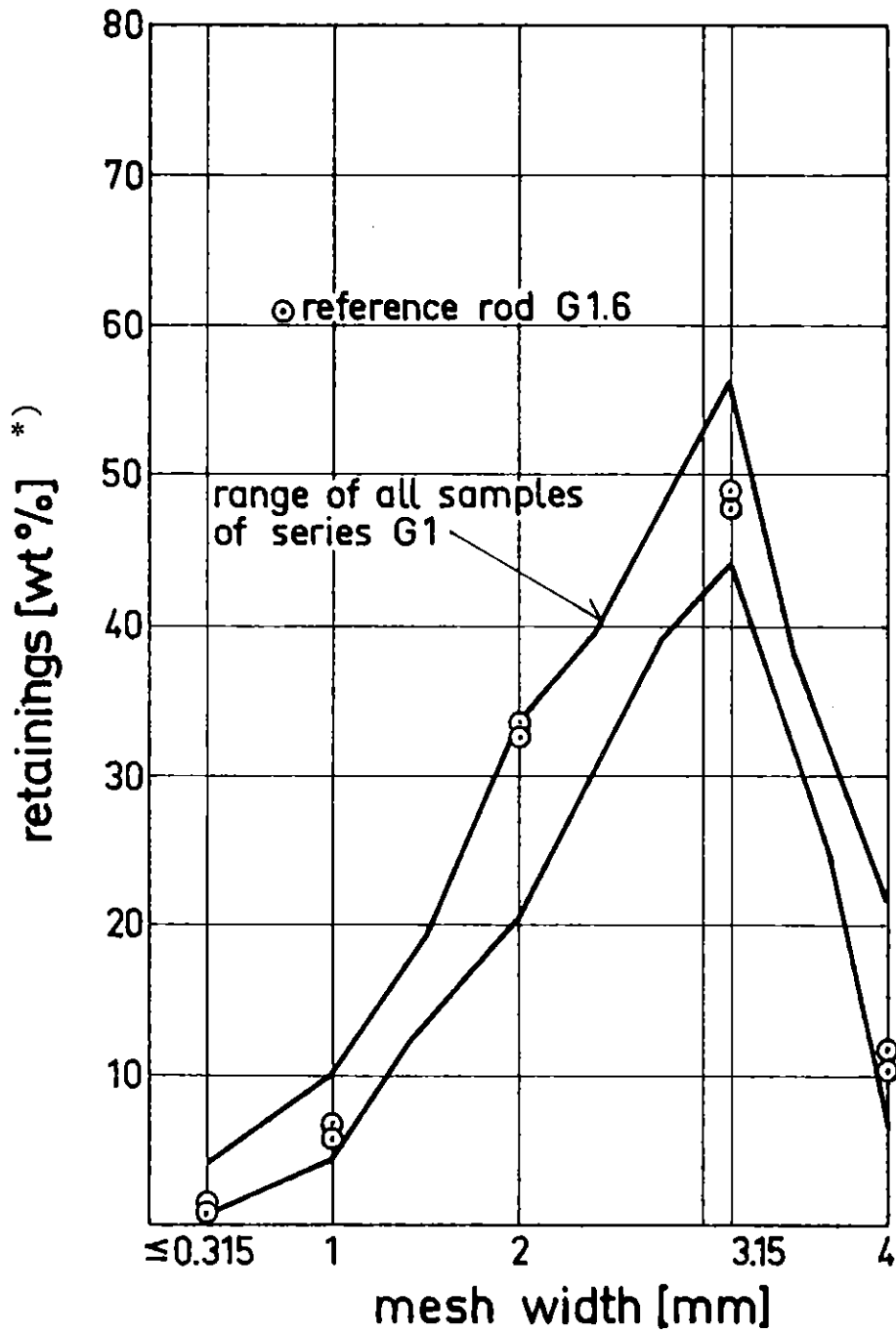


IT 1980
PNS 4237-395

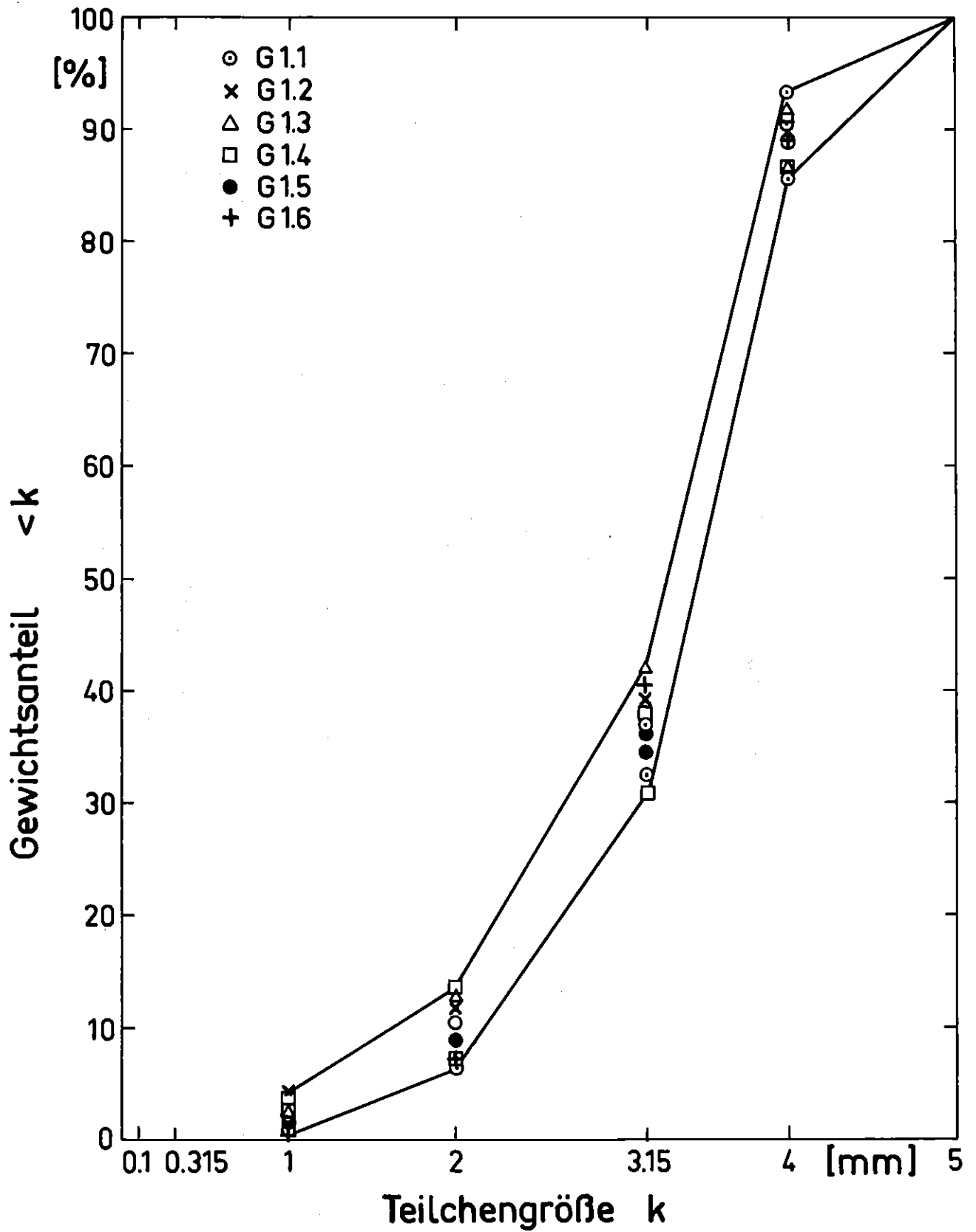
FR 2 In-Pile Tests.

Fuel Pellet Fragments from G I.6 Fuel Rod

Fig. 55



*) Rückstand auf dem jeweiligen Sieb (Gew.-%)



A N H A N G

Meßwerte vor Auslösung der Transienten,
Versuch G 1.1 bis G 1.5.

A N H A N G

Tabelle 16.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 1.1

Datum: 22.2.78

Uhrzeit: 12.03.45

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	460 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	456 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	323 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	343 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	370 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	345 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	342 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	338 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	370 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	367 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	370 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	376 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	375 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	392 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	65 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	62 bar
18	P 63	Druck vor Blende	61 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	61 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	62 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	279 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	287 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	485 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	19,2 K
	NBE	Mittl. Leistung der umgeb. BE's	118 kW
37	TEI	D ₂ O-Eintrittstemperatur	51 °C
38-45	TBE 1-8	D ₂ O-Temp. Brennelement 1 - 8	60-61 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	67 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	753 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

A N H A N G

Tabelle 16.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 1.2

Datum: 24.2.78

Uhrzeit: 16.28.38

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	461 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	460 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	335 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	358 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	385 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	359 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	355 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	351 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	391 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	376 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	383 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	390 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	396 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	380 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	63 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	60 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	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	73 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	280 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	486 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	22,7 K
	NBE	Mittl. Leistung der umgeb. BE's	149 kW
37	TEI	D ₂ O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D ₂ O-Temp. Brennelement 1 - 8	62-64 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	887 mbar
	m	Dampfmengenstrom	122 kg/h

A N H A N G

Tabelle 16.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 1.3

Datum: 1.3.78

Uhrzeit: 14.44.43

CALAS-Adresse	Meßstelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	508 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	498 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	334 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	355 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	387 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	365 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	364 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	359 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	376 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	383 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	381 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	384 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	386 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	388 °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	-
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	50 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	T 115/116	Temperaturdiff. Prüfling	19,5 K
	NBE	Mittlere Leistung der umgeb. BE's	112 kW
37	TEI	D ₂ O-Eintrittstemperatur	48 °C
38-45	TBE 1-8	D ₂ O-Temp. Brennelement 1 - 8	56-57 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	65 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	830 mbar
	ṁ	Dampfmengenstrom	117 kg/h

A N H A N G

Tabelle 16.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 1.4

Datum: 3.3.78

Uhrzeit: 15.02.16

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	509 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	495 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	320 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	333 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	371 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	350 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	350 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	344 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	345 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	356 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	366 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	374 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	375 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	360 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	60 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	56 bar
18	P 63	Druck vor Blende	56 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	-
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	90 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	276 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	283 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	541 °C
35	T115/116	Temperaturdiff. Prüfling	11,8 K
	NBE	Mittlere Leistung der umgeb. BE's	86 kW
37	TEI	D ₂ O-Eintrittstemperatur	47 °C
38-45	TBE 1-8	D ₂ O-Temp. Brennelement 1 - 8	53-54 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	61 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	792 mbar
	m	Dampfmengenstrom	113 kg/h

A N H A N G

Tabelle 16.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: G 1.5 Datum: 23.2.78 Uhrzeit: 13.01.15

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	457 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	455 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	-
3	T 115	Temp. vor Prüfling	330 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	351 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	380 °C
6	T 43	Temp. bei P 61	354 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	352 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	346 °C
9	T 112	Temp. vor Entspann-Ve 111	-
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	382 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	383 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	403 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	424 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	450 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	410 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	62 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	58 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	1,4 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	58 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	280 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	286 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	482 °C
35	T 115/116	Temperaturdiff. Prüfling	19,5 K
	NBE	Mittlere Leistung der umgeb. BE's	140 kW
37	TEI	D ₂ O-Eintrittstemperatur	53 °C
38-45	TBE 1-8	D ₂ O-Temp. Brennelement 1 - 8	63-64 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	64 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	854 mbar
	m	Dampfmengenstrom	119 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.