

KfK 3195  
Januar 1982

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

**Bericht über die Versuchsserie C**

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

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

HAUPTABTEILUNG INGENIEURTECHNIK  
PROJEKT NUKLEARE SICHERHEIT

KfK 3195

In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten  
beim Kühlmittelverluststörfall  
Bericht über die Versuchsserie C

---

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 C 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 C (2.500 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 C

### Abstract

This report describes the results of the Test Series C 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 C (2.500 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 C innerhalb der In-pile-Versuche zum LWR-Brennstabverhalten. Die In-pile-Versuche sind Bestandteil des LWR-Brennstabverhaltens-Programms des Projektes Nukleare Sicherheit (PNS). Die Experimente wurden im DK-Kreislauf des FR2-Reaktors im Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) durchgeführt.

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

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

Die Versuchsreihe C bestand aus fünf Einzelstab-Versuchen, die mit vorbestrahlten Prüflingen vom 24.4. bis 8.5.1979 durchgeführt wurden. Der Nominalabbrand der Stäbe betrug 2.500 MWd/t. Als Ausgangswerte für die Transienten wurden Innendrücker von 25 bis 111 bar (warm) eingestellt. Die fünf Einzelstäbe barsten während der Aufheizphase, die Berstdrücker betragen 46, 30, 98, 65 bzw. 22 bar, die Bersttemperaturen 900, 945, 749, 815 bzw. 916 °C (in der Reihenfolge der Versuche C1, C2, C3, C4 und C5.) Die größten Umfangsdehnungen betragen 51, 39, 37, 44 und 62 %.

Im Unterschied zu den Versuchen mit nicht vorbestrahlten Brennstabprüflingen /12/ zeigten die C-Versuchsstäbe, wie auch die Stäbe der Serien F /9/, G1 /10/, G2/3 /11/, 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 C-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 C

---

Summary

This report describes the results of the Test Series C, Tests C 1 through C 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 C tests were performed from April 24, 1979 to May 8, 1979. The nominal burnup of the test rods was 2500 MWd/t. The test rods were pressurized with helium to hot internal pressures between 25 and 111 bar and were subjected to rod powers between 36 and 50 W/cm (derived from heatup rates at 650 °C).

The test rods burst during the heatup phase at pressures of 46, 30, 98, 65 and 22 bar, respectively. The burst temperatures were determined to be 900, 945, 749, 815 and 916 °C for tests



C 1 through C 5. The maximum total circumferential elongations amount to 51, 39, 37, 44 and 62 %, respectively.

The C tests - like the previous tests with irradiated specimens /9/,/10/,/11/ - showed cracked fuel after the irradiation (prior to the transients) and a fragmentation of fuel pellets after the transient tests due to cladding ballooning. The posttest results indicated a reduction of the pellet stack length of the test rods caused by a redistribution of the fuel in the sections of major deformation.

The burst data of the C tests did not reveal any difference between tests with unirradiated fuel rods /12/ 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 C-Versuchsserie	10
4. Versuchsablauf	12
5. Versuchsdaten	13
5.1  Messung der Versuchsdaten	19
5.2  Kühlmitteldaten	21
5.3  Prüflingsleistung	21
5.4  Prüflingsinnendruck	25
5.5  Hüllrohrtemperaturen	25
5.6  Temperaturanstieg der Hülle	28
6. Zerstörungsfreie Nachuntersuchungen	29
6.1  Durchstrahlungen der Stäbe	29
6.2  Fotodokumentation	31
6.3  Vermessung der Prüflinge	31
7. Brennstoffzustand und -verhalten	41
8. Literatur	44
Abbildungen	46
Anhang: Meßwerte vor Auslösung der Transienten	154 - 158

<u>Verzeichnis der Abbildungen</u>	<u>Seite</u>
1. Vorbestrahlungseinsatz, vereinfacht	46
2. Axiale Abbrandverteilung im Brennstab C 6	47
3. Axiale Abbrandverteilung C6, E6, F6, G1.6, G3.6	48
4. Zur Messung des Stabinnendrucks	49
5. Nuklearprüfling vereinfacht	50
6.1 - Durchmesserabmaße und Einfüllspiel, Versuche 6.5 C 1 bis C 5	51 - 55
7. DK-Loop am FR2, Stark vereinfachtes Kreislauf- schema	56
8. Versuchsablauf, Schema	57
9. Cladding Thermocouple (Schematic)	58
10.1 - Prüflingsleistung NA und axiales Leistungsprofil 10.5 Versuche C 1 bis C 5	59 - 63
11. In-pile-Versuche C. Prüflingsleistungen Na und NKP im Vergleich zur Leistung der umgebenden Brennelemente	64
12.1 - Normierte Axialprofile am Prüfling, 12.5 Versuche C 1 bis C 5	65 - 69
13.1 - Druck im Prüflingsplenum, 13.5 Versuche C 1 bis C 5	70 - 74
14.1 - Axiales Temperaturprofil, 14.5 Versuche C 1 bis C 5	75 - 79
15.1 - Hüllrohrtemperaturen T 131 bis T 136 15.5 im Versuch C 1 bis C 5	80 - 84
16. Transiente Hüllrohrtemperaturen (Ausschnitt), Versuch C 4	85
17. Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck	86
18. Temperaturdifferenzen der Hüllthermoelemente mit unterschiedlicher Platinhülse bei 600 bis 900 °C (Transiente)	87

	<u>Seite</u>
19. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Burst Temperature vs. Burst Pressure	88
20. Neutronenradiografie C 5 vor Versuch	89
21.1- Neutronenradiografie und Winkellagen C 1 21.3 nach Versuch	90 - 92
22.1- Neutronenradiografie und Winkellagen C 2 22.3 nach Versuch	93 - 95
23.1- Neutronenradiografie und Winkellagen C 3 23.3 nach Versuch	96 - 98
24.1- Neutronenradiografie und Winkellagen C 4 24.3 nach Versuch	99 - 101
25.1- Neutronenradiografie und Winkellagen C 5 25.3 nach Versuch	102 - 104
26. View of the Ruptured Zone Test C 1	105
27. View of the Ruptured Zone, Test C 2	106
28. View of the Ruptured Zone, Test C 3	107
29. View of the Ruptured Zone, Test C 4	108
30. View of the Ruptured Zone, Test C 5	109
31. Views of the Ruptured Zone, Test C 1	110
32. Views of the Ruptured Zone, Test C 2	111
33. Views of the Ruptured Zone, Test C 3	112
34. Views of the Ruptured Zone, Test C 4	113
35. Views of the Ruptured Zone, Test C 5	114
36. FR2 In-pile Tests Cladding Length Change vs. Burst Temperature	115
37.1- Circumferential Cladding Thickness Distribution 37.5 (as Received) Presented as Differences from the Nominal 0,725 mm, Test C 1 - C 5	116 - 120
38. Circumferential Strain and Axial Power Profiles of the Tests C1 through C5	121

	<u>Seite</u>
39.1- Axial Profile of Circumferential Strain.	
39.5 Tests C 1 - C 5	122 - 126
40. Typical spiral profile; posttest measured rod diameters of test A 2.2	127
41.1 Versuch C 1, Polarmessung 1 (149 mm von UKF)	128
41.2 Versuch C 1, Polarmessung 2 (188 mm von UKF)	129
42.1 Versuch C 2, Polarmessung 1 ( 74 mm von UKF)	130
42.2 Versuch C 2, Polarmessung 2 (107 mm von UKF)	131
43.1 Versuch C 3, Polarmessung 1 (137 mm von UKF)	132
43.2 Versuch C 3, Polarmessung 2 (177 mm von UKF)	133
44.1 Versuch C 4, Polarmessung 1 (160 mm von UKF)	134
44.2 Versuch C 4, Polarmessung 2 (210 mm von UKF)	135
45.1 Versuch C 5, Polarmessung 1 ( 60 mm von UKF)	136
45.2 Versuch C 5, Polarmessung 2 ( 79 mm von UKF)	137
46.1- FR2 In-Pile Tests C 1 through C 5	
46.5 Cross Section, Max. Circumferential Strain	138 - 142
47. FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam Max. Circumferential Elongations vs. Burst Temp.	143
48. FR2 In-Pile Tests, Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation	144
49. FR2 In-Pile Tests, Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop	145
50.1 Cross Section of the C 6 Fuel Rod	146
50.2 Cross Section of the C 2 Fuel Rod	147
50.3 Longitudinal Section of the C 6 Fuel Rod	148
51. View of the Fuel Condition of the C 6 Fuel Rod	149
52. Fuel Rod Pellet Fragments from C 6 Fuel Rod	150
53.1- FR2 In-Pile Tests, Series C	
53.2 Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses	151 - 152

<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 C-Stäbe	11
4.1 - Daten der Versuche C 1 bis C 5 4.5	14 - 18
5. Anordnung der Hüll-TE in den Versuchen C 1 bis C 5	20
6. Kühlmitteldaten der C-Versuche	21
7. Max. Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe C	26
8. Hülltemperaturgradienten an den Beulstellen, Versuche C 1 bis C 5	28
9. Längenänderung der Brennstoffsäule durch die C-Versuche	30
10. Längenänderung und Rißlage der C-Stäbe	31
11. Circumferential Strain Data from Rod Diameter Measurement, C 1 through C 5	34
12. Ovalität im Beulbereich der C-Versuchsstäbe	36
13. Umfangsdehnung im Beulbereich der C-Versuchsstäbe	36
14. Exzentrizität der Beule bei den C-Versuchsstäbe	37
15. Krümmung der C-Versuchsstäbe	37
16.1 - Tabelle der Meßwerte vor Auslösung der Transienten, 16.5 C 1 bis C 5 (Anhang)	153- 158

## 1. Einführung

### 1.1 Berichtsziel

Neben einer generellen Beschreibung des Versuchsprogramms, der Prüflinge und der Versuchsdurchführung dient der vorliegende Bericht der Dokumentation der Soll- und Ist-Daten der ungebaulten Prüflinge der Serie C, 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 C 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 C sollte das Verhalten von vorbestrahlten Prüflingen untersucht werden. Von den sechs bis zu einem Abbrand von 2.500 MWd/t bestrahlten Stäben C 1 bis C 5 waren fünf einer Transiente auszusetzen, der Stab C 6 für die radiochemische Abbrandbestimmung sowie zur Untersuchung des Brennstoffzustandes nach der Bestrahlung zu verwenden.

### 1.3 Versuchsprogramm

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

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

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

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



TABLE 1

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

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

## 2. Versuchsvorbereitung

### 2.1 Vorbestrahlung der Prüflinge

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

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

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

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

Als Grundlage der angegebenen Abbrandwerte dienten die kalorimetrisch ermittelten Leistungen des Einsatzes. Als Endabbrand ergab sich daraus ein Wert von 2.410 MWd/t. Der entsprechende Wert aus der radiochemischen Abbrandanalyse des Stabes C 6 beträgt als axialer Mittelwert 0,28 at-% /4/, siehe Abb. 2. Das entspricht 2.556 MWd/t ( $1 \text{ at-\%} \hat{=} 9.130 \text{ MWd/t}$ ). Dieser Abbrand wird als gleich für alle sechs bestrahlten Stäbe angesehen. Das axiale Abbrandprofil beruht auf vier

axialen Abbrandproben, die radiochemisch untersucht wurden. Abb. 3 zeigt das Abbrandprofil des Stabes C 6 zusammen mit den Profilen der Stäbe E 6, F 6, G 1.6 und G 3.6.

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

- Der Leistungsreaktor wird bis zum Erreichen eines Abbrandes von ca. 35 Gwd/t<sub>U</sub> nur zwei- bis dreimal gezielt abgeschaltet. Die Vorbestrahlungsbündel im FR2 erleben dagegen aus verschiedenen Gründen eine ganze Reihe von Abschaltungen, die häufig mit Umladungen von Brennelementen und damit auch mit Leistungsänderungen verbunden sind. Während der kurzen Bestrahlungszeit (37,2 d) des C-Bündels wurde der Reaktor allerdings nicht abgeschaltet.
- Kühlmitteldruck und -temperatur liegen im FR2 niedriger als im DWR (FR2: 2,4 bar und 58 °C, DWR: 155 bar und 315 °C als mittlere Werte zwischen Eintritt und Austritt).
- Die äußere Hüllwandtemperatur des DWR-Stabes liegt um 200 bis 300 K höher als die des FR2-Versuchsstabes.
- Da der Helium-Einfülldruck des FR2-Versuchsstabes zu 3 bar festgelegt wurde (DWR: 22,5 bar bei Raumtemperatur), ist im Gegensatz zum DWR-Stab der Stabinnendruck des FR2-Versuchsstabes während der ganzen Vorbestrahlungszeit geringfügig höher als der Kühlmitteldruck.

## 2.2 Stabmontage

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

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

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

Die am Probenträger installierten Thermolemente 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 Dampfführungrohr ist der Prüfling (s. Abb. 5) einsatzbereit. Es folgt die neutronenradiografische Dokumentation des Zustandes nach der Vorbestrahlung, vor dem Versuch.

### 2.3 Neutronenradiografie

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

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

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

### 3. Prüflingsdaten

#### 3.1 Allgemeine Daten

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

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

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

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

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

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

Table 2: Nominal Test Fuel-Rod Data

---

Cladding

Material	Zircaloy-4
Outside diameter, mm	10.75
Inside diameter, mm	9.3
Wall thickness, mm	0.725

Fuel pellets

Material	UO <sub>2</sub>
Diameter (nominal gap), mm	9.11
Diameter (small gap), mm	9.15
Length, mm	11
Enrichment (active zone), %	4.7
Enrichment (end pellets), %	0.3
Height of pellet stack (active zone), mm	500
Density, g/cm <sup>3</sup>	10.35
Density, %T.D.*	94.4

Insulating pellets

Material	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diameter, mm	9.15
Length, mm	8

Void Volumes

Dishing per pellet, mm <sup>3</sup>	16
Gap Volume (nominal gap), cm <sup>3</sup>	1.57
Plenum (excl. spring), cm <sup>3</sup>	15.87
End plug, Capillary tube, and pressure transducer, cm <sup>3</sup>	12.25
Fillgas composition	100 % Helium

---

\*) T.D. = theoretical density

### 3.2 Daten der Prüflinge für die Versuchsserie C

Die verwendeten sechs Prüflinge haben die folgende Bezeichnung

Stab Nr. 56 → C 1  
Stab Nr. 57 → C 2  
Stab Nr. 59 → C 3  
Stab Nr. 60 → C 4  
Stab Nr. 63 → C 5  
Stab Nr. 62 → C 6 (Abbrandstab: keine Transiente,  
Untersuchung Abbrand usw.)

Die Prüflinge der C-Serie haben die Spaltweite "1", d.h. einen Nennwert des diametralen Einfüllspiels von 190  $\mu\text{m}$ .

Die wichtigsten gemessenen Prüflingsdaten der sechs Stäbe sind in Tabelle 3 zusammengefaßt; zusätzlich zeigen die Abb. 6.1 bis 6.5 die statistische Verteilung der gemessenen Hüllen- und Pelletdurchmesser, deren Mittelwerte sowie das daraus errechnete mittlere Einfüllspiel  $s_E$  für die in den Versuchen C 1 bis C 5 eingesetzten Stäbe.



Tabelle 3: Gemessene Prüflingsdaten C-Stäbe

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	
Brennstablänge (mm)	972,9	972,9	972,9	972,8	972,9	972,9	
Länge der aktiven Zone (mm)	497,7	497,9	497,0	497,5	497,1	498,3	
Länge des Brennstabplenums (mm)	312,5	312,5	313,5	313,0	312,5	314,0	
Plenumvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	16,02	16,02	16,15	16,11	16,03	16,17	
Dishingvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	0,745	0,754	0,741	0,759	0,741	0,764	
Spaltvolumen (cm <sup>3</sup> ) (a)	1,543	1,532	1,616	1,617	1,582	1,640	
Hüllaußendurchmesser (mm)	max.	10,764	10,767	10,767	10,763	10,760	10,765
	mittel	10,760	10,759	10,758	10,755	10,753	10,759
	min.	10,755	10,753	10,752	10,749	10,748	10,753
Hüllinnendurchmesser (mm)	max.	9,304	9,309	9,319	9,323	9,308	9,317
	mittel	9,295	9,297	9,309	9,308	9,299	9,306
	min.	9,288	9,288	9,300	9,295	9,289	9,296
Wandstärke (mm)	max.	0,746	0,746	0,736	0,733	0,735	0,736
	mittel	0,732	0,731	0,720	0,724	0,727	0,726
	min.	0,718	0,715	0,712	0,712	0,718	0,717
Brennstoffdichte (g/cm <sup>3</sup> )		10,47	10,45	10,42	10,44	10,42	10,45
	max.	9,109	9,110	9,114	9,114	9,108	9,108
Tablettendurchmesser (mm)	mittel	9,107	9,107	9,112	9,111	9,106	9,106
	min.	9,103	9,103	9,105	9,104	9,102	9,105
mittleres diametrales Einfüllspiel (mm) (a)		0,188	0,190	0,197	0,197	0,193	0,200

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

Im Versuch C 4 wurde die Datenerfassung bei etwa 100 sec nach Auslösung der Transiente wegen einer Störung abgebrochen. Zu diesem Zeitpunkt war die gewünschte Maximaltemperatur des Teststabes erreicht, und der Reaktor wurde 101 sec nach Transientenbeginn abgeschaltet.

## 5. Versuchsdaten

Die Tabellen 4.1 bis 4.5 zeigen als Übersicht ("Quick-look-Blatt") wichtige Meßdaten der Versuche C 1 bis C 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	11,0	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,009	Abbrand	2.500 MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	45,04 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		42,6 bis 48,5 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		41,5 bis 49,5 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	27,68 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	55,35
Maximum	26,0	56,05
beim Temperaturmaximum von T 133	44,0	50,27
BERSTDRUCK	47,0	45,72 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		380	385	397	418	403	384	
bei max. Innendruck nach 26,0 sec		757	753	743	743	737	739	
rel. Maximum nach 44,0 bis 47,8 sec		-	-	864	856	-	878	
beim Bersten nach 47,0 sec		885	878	859	848	869	878	
abs. Maximum nach 71,0 bis 73,0 sec		1007	979	872	881	987	971	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		890 + 10 K					900 °C	

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	16,8	cm
--	------	----

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 131 bei 433 °C nach	5,5	sec
	24,4	K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	12,0 bis 14,0 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	20,0 bis 23,8 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 131	51,9 sec

DATEN DES VERSUCHS C 1 VOM 24.4.1979

TABELLE 4.1

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	8,4	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,033	Abbrand	2.500 MWD/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	47,07 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		36,8 bis 44,4 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		37,0 bis 43,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	27,31 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	33,03
Maximum	40,0	33,65
beim Temperaturmaximum von T 131	58,0	30,15
BERSTDRUCK	58,0	30,15 bar

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C								
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136	
Meßebeine in cm von UK Brennstoff		20,0	25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		370	371	379	380	382	377	
bei max. Innendruck nach 40,0 sec		851	844	847	827	806	785	
rel. Maximum nach 58,0 sec		927	-	-	901	885	873	
beim Bersten nach 58,0 sec		927	923	920	901	885	873	
abs. Maximum nach 58,0 bis 64,0 sec		927	940	934	904	885	873	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		935 + 10 K					945 °C	

BEULE Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	9,0	cm
--	-----	----

TEMPERATURANSTIEG		
Maximum T 131 bei 415 °C nach	5,5 sec	21,1 K/s
bei 650 °C	T 131 bis T 136	10,0 bis 12,6 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K	T 131 bis T 136	22,8 bis 26,7 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C	bei T 131	55,5 sec

DATEN DES VERSUCHS: C 2 VOM 26.4.1979

TABELLE 4.2

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	8,4	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,035	Abbrand	2.500 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	47,10 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		41,2 bis 46,1 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		40,2 bis 44,7 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	28,72 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	111,17
Maximum	20,20	112,13
beim Temperaturmaximum von T 131	30,90	102,33
<b>BERSTDRUCK</b>	31,90	<b>98,22 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C								
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136	
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45	
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		374	373	381	382	378	378	
bei max. Innendruck nach 20,2 sec		650	644	649	646	635	633	
rel. Maximum nach 30,9 bis 32,4 sec		747	763	752	744	-	754	
beim Bersten nach 31,9 sec		<b>739</b>	763	752	744	745	751	
abs. Maximum nach 33,4 bis 42,5 sec		747	763	752	747	742	754	
<b>BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)</b>		<b>739 + 10 K</b>					<b>749 °C</b>	

<b>BEULE</b> Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	15,8 cm
---	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 131 bei 408 °C nach 5,0 sec	22,2 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	11,5 bis 13,2 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	22,1 bis 24,5 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T -	- sec

DATEN DES VERSUCHS: C 3 VOM 2.5.1979

TABELLE 4.3

LEISTUNG			
Reaktorleistung	NR	8,3	MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max} / \bar{\phi}_{Pr}$	1,034	Abbrand	2.500 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	47,76 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		36,5 bis 43,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		36,5 bis 43,6 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	28,30 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	79,67
Maximum	20,30	80,55
beim Temperaturmaximum von T 133	37,20	74,95
BERSTD RUCK	41,20	65,41 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		356	364	372	377	379	392	
bei max. Innendruck nach 20,30sec		628	635	645	636	624	628	
rel. Maximum nach 37,2 bis 41,2 sec		802	791	784	772	782	787	
beim Bersten nach 41,20sec		802	787	777	780	782	783	
abs. Maximum nach 99,1 bis 100,6 sec		912	930	965	1001	981	930	
BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)		805 + 10 K					815 °C	

BEULE Mitte RiB von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	18,6 cm
--	---------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 133 bei 410 °C nach 5,0 sec	21,1 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	9,9 bis 12,1 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	22,6 bis 27,0 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 134	64,1 sec

DATEN DES VERSUCHS: C 4 VOM 4.5.1979

TABELLE 4.4

LEISTUNG			
Reaktorleistung		NR	10,0 MW
Flußdichteformfaktor $\phi_{Pr \max}/\bar{\phi}_{Pr}$		1,032	Abbrand 2.500 MWd/t
spezifische Stableistung	mittlere thermische	NTH	40,93 W/cm
	aus Temperaturanstieg bei 650 °C		32,7 bis 35,0 W/cm
	aus Aufheizung um 300 K		32,8 bis 36,0 W/cm
	mittlere reaktorphysikalische	NKPM	27,94 W/cm

INNENDRUCK P74	Laufzeit (s)	Druck (bar)
bei Beginn der Transiente	0	24,72
Maximum	50,0	25,33
beim Temperaturmaximum von T 131	72,5	23,67
<b>BERSTDRUCK</b>	78,0	<b>21,92 bar</b>

HÜLLROHRTEMPERATUR in °C							
Meßstelle	T	131	132	133	134	135	136
Meßebene in cm von UK Brennstoff		20	25	30	35	40	45
Temperatur bei Transientenbeginn 0 sec		346	348	349	349	<del>350</del>	361
bei max. Innendruck nach 50,0 sec		824	833	825	827	<del>828</del>	806
rel. Maximum nach 72,5 bis 78,5 sec		909	905	894	902	<del>898</del>	888
beim Bersten nach 78,0 sec		<b>906</b>	902	895	900	<del>896</del>	886
abs. Maximum nach 110,0 bis 122,0 sec		887	968	993	987	<del>981</del>	929
<b>BERSTTEMPERATUR (extrapoliert und korrigiert)</b>		906 + 10 K				<b>916 °C</b>	

<b>BEULE</b> Mitte Riß von UK Brennstoff (aus Neutr. Radiografie)	7,1 cm
---	--------

TEMPERATURANSTIEG	
Maximum T 131 bei 388 °C nach 6,0 sec	17,8 K/s
bei 650 °C T 131 bis T 136	8,6 bis 9,4 K/s
Dauer der Aufheizung um 300 K T 131 bis T 136	27,4 bis 30,1 sec
Dauer der Aufheizphase bis 920 °C bei T 133	94,8 sec

DATEN DES VERSUCHS: C 5 VOM 8.5.1979

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 Ø mit Inconel 600-Mantel und an der TE-Spitze aufgehämmerter Platinhülle; da die direkte Schweißverbindung Inconel/Zry problematisch ist. Bei den Versuchen C wurde die Platinhülle der Thermoelemente ohne überstehenden Teil direkt aufepunktet (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 HOLL-THERMOELEMENTE IN DEN VERSUCHEN C1 - C5

TE-Bez.	axiale Lage <sup>(a)</sup> (Soll-Maße)	axiale Lage (Ist-Maße) und Umfangslage <sup>(b)</sup>				
		C1	C2	C3	C4	C5
T 131	200 mm	196/159 <sup>0</sup>	198/232 <sup>0</sup>	199/292 <sup>0</sup>	199/226 <sup>0</sup>	199/310 <sup>0</sup>
T 132	250 mm	247/99 <sup>0</sup>	248/172 <sup>0</sup>	249/232 <sup>0</sup>	249/166 <sup>0</sup>	248/250 <sup>0</sup>
T 133	300 mm	298/39 <sup>0</sup>	298/112 <sup>0</sup>	299/172 <sup>0</sup>	299/106 <sup>0</sup>	298/205 <sup>0</sup>
T 134	350 mm	348/339 <sup>0</sup>	348/52 <sup>0</sup>	349/112 <sup>0</sup>	349/46 <sup>0</sup>	349/130 <sup>0</sup>
T 135	400 mm	399/279 <sup>0</sup>	398/352 <sup>0</sup>	399/52 <sup>0</sup>	399/346 <sup>0</sup>	399/70 <sup>0</sup>
T 136	450 mm	449/219 <sup>0</sup>	449/292 <sup>0</sup>	449/352 <sup>0</sup>	448/286 <sup>0</sup>	449/10 <sup>0</sup>

(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 C 1 bis C 5 unmittelbar vor Auslösung der Transiente gibt Tabelle 6 wieder. Die Gesamtheit aller gemessenen Daten kurz vor Transientenbeginn ist im Anhang, S. 153 ff., eingetragen.

Tabelle 6 Kühlmitteldaten C-Versuche

Versuch	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Kühlmittelintrittstemperatur T 115 (°C)	314	314	315	313	307
Kühlmittelaustrittstemperatur T 116 (°C)	336	336	336	335	325
Kühlmitteldruck in der Teststrecke <sup>[a]</sup> (bar)	63	63	63	63	59
Kühlmittelmengenstrom (kg/h)	117	117	118	117	115

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

## 5.3 Prüflingsleistung

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

- Thermische Leistung
- Leistung aus Temperaturanstieg
- Reaktorphysikalische Leistung.

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

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

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

Die mittlere thermische Leistung ergab sich in den Versuchen C1 bis C5 zu

NTH = 45,0 W/cm (C1), 47,1 W/cm (C2), 47,1 W/cm (C3),  
47,8 W/cm (C4), bzw. 40,9 W/cm (C5).

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

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

---

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

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

- c) "Reaktorphysikalische Leistung NKP": Mit der Annahme, daß die Prüflingsleistung proportional der Leistung entsprechender Abschnitte der die Teststrecke umgebenden Reaktorbrunnenelemente ist, kann von der gemessenen Gesamtleistung dieser Brennelemente mit reaktorphysikalischen Methoden auf die Prüflingsleistung geschlossen werden. Aufgrund der bei allen C-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 C-Versuche wurde er mittels Rechnung abgeschätzt zu

$$k = 0,55 [(W/cm)/kW] \quad (a)$$

Die Korrelation der Leistung der umgebenden Brennelemente (NBE) und der mittleren Leistung aus den Temperaturanstiegen (NA) liefert einen 55. % höheren k-Wert, nämlich 0,84 (W/cm)/kW. Beide k-Verläufe sind in Abb. 11 eingetragen.

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

---

(a)  $k = f \cdot (\varphi_{Pr.,max.} / \bar{\varphi}_{Core}) = f \cdot \varphi$   
abgeschätzt wurde  $f = 0,43$  gemessen wurde  $\varphi \sim 1,3$

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

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

Die beiden Beiträge zum axialen Leistungsprofil,

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

sind als normierte auf den Mittelwert bezogene Kurven zusammen mit dem daraus resultierenden Leistungsprofil (oberste Kurve  $L(z)/\bar{L}$ ) in den Abb. 12.1 bis 12.5 für die Versuche C 1 bis C 5 dargestellt. Das Spaltstoffprofil darin ist aus den Werten von vier Einzelproben des Stabes C 6 (7, 73, 128 und 469 mm von UKF) ermittelt worden. Es hat sich als konstant über der Länge ergeben. Die Konzentration der U- und Pu-Kerne wurde mit dem Röntgenfluoreszenzverfahren bestimmt, die Anteile der U- und Pu-Isotope massenspektrometrisch ermittelt<sup>(a)</sup>.

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

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

---

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

in den Abb. 10.1 bis 10.5 (Versuche C 1 bis C 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.

#### 5.4 Prüflingsinnendruck

Die zeitlichen Verläufe des Innendrucks der Prüflinge zeigen Die Abb. 13.1 bis 13.5. Daraus ergeben sich die Berstzeitpunkte zu 47 s, 58 s, 32 s, 41 s und 78 s in der Reihenfolge der Versuche C 1 bis C 5.

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

#### 5.5 Hüllrohrtemperaturen

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

Bei 0 s unterscheiden sich die Anzeigen der verschiedenen TE eines Prüflings bis zu 38 K. Der kurze Temperaturabfall bei  $t = 2$  s resultiert aus dem kurzfristig zunehmenden Kühlmittelstrom beim Entspannen des Kreislaufs. Die fortschreitende

Deformation zeigt sich meist am verlangsamten Temperaturanstieg. Bei  $t = 47, 58, 32, 41$  und  $78$  (C1 bis C5) platzten die Stäbe (siehe Druckverlauf in den Abb. 13.1 bis 13.5). Mit Erreichen der Maximaltemperatur wurde die Leistung zurückgenommen.

Der Temperatureinbruch nach dem Bersten der Hülle erklärt sich daraus, daß es beim Platzen der Hülle zu einer Strömung von relativ kaltem Füllgas vom Stabplenum zur Rißstelle kommt und außerdem die starke Vergrößerung des Spalts zwischen Brennstoff und Hülle den thermischen Widerstand verstärkt hat. Auch plötzliche, durch das Bersten verursachte Veränderungen der Lage des Stabs relativ zum kühleren Dampfrohr können zur Hülltemperaturänderung beitragen. Da die meisten dieser Ursachen sich lokal sehr unterschiedlich auswirken können, ist die Größe des Temperatureinbruchs von Stab zu Stab sehr verschieden, wie Tabelle 7 zeigt, in der die maximalen Einbrüche der C-Versuche aufgelistet sind. Darüberhinaus liegt bei allen C-Versuchen die Beulstelle unterhalb der instrumentierten Zone, der Abstand zum nächsten Thermoelement, dessen Temperatureinbruch hier betrachtet wird, ist zum Teil also recht groß.

Zur beispielhaften Illustration sind die Temperatureinbrüche aller TE des Stabs C4 in Abb. 16 vergrößert, d.h. als Ausschnitt aus Abb. 15.3 dargestellt.

Tabelle 7

Maximale Temperatureinbrüche nach dem Bersten der Versuchsstäbe

Versuch	Temp. Meßst.	Zeitpunkt (s)	Temp. abfall (K)	Abst. Meßstelle/Rißmitte	
				(mm)	Grad <sup>[a]</sup>
C 1	T131	47,0	0	32	6
C 2	T131	58,5	16	110	100
C 3	T131	32,4	89	44	58
C 4	T131	41,2	59	14	118
C 5	T131	78,5	84	129	98

[a] kleinster Winkel



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 Bersttemperaturen aller FR2-In-pile-Versuche mit nuklear beheizten Stäben sind in Abb. 19 über dem Berstdruck aufgetragen. Zum Vergleich sind Ergebnisse der "Multi Rod Burst Tests" (MRBT) des ORNL <sup>[a]</sup> /6/ eingezeichnet, welche mit elektrisch beheizten Brennstab-Simulatoren durchgeführt wurden. Diese Ergebnisse sind typisch für alle bekannten Out-of-pile-Experimente mit indirekt beheizter Hülle, auch wenn die Definitionen von Bersttemperatur und -druck teilweise recht unterschiedlich sind.

Die Ergebnisse der Versuche C 1 bis C 5 liegen im Streubereich dieser Out-of-pile-Resultate und der übrigen FR2-In-pile-Versuche.

---

[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 C 1 bis C 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)
C 1	14,0
C 2	12,6
C 3	13,2
C 4	12,1
C 5	9,3

## 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 C 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. 21.3, 22.3, 23.3, 24.3 und 25.3 wiedergegeben.

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

Aus den Aufnahmen (Abb. 21.1 und 21.2), für C 1, bis zu Abb. 25.1 und 25.2 für C 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).

Tabelle 9

Längenänderung der Brennstoffsäule

Versuch	Montagemaß [a] (mm)	Länge nach Versuch (mm)	Längendiffe- renz (mm)
C 1	498	454	44
C 2	498	482	16
C 3	497	458	39
C 4	497	439	58
C 5	497	463	34

[a] wird gleichgesetzt mit dem Maß nach der Bestrahlung

## 6.2 Fotodokumentation

Auf den Abb. 26, 27, 28, 29 und 30 ist ein Stab-Abschnitt mit der Ansicht der Rißstelle zu sehen. Die weiteren Abb. 31, 32, 33, 34 und 35 zeigen Detailaufnahmen der Beul- bzw. Rißstellen

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 C-Versuchsstäbe sowie die Rißlage 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

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Gesamtlänge vor der Transiente (mm)	973,4	973,5	973,3	973,2	973,4
nach der Transiente (mm)	977,1	978,0	971,4	973,6	981,0
Bleibende Längung des Stabes (mm)	3,7	4,5	- 1,9	0,4	7,6
Riß-Anfang (mm von UKF)	153	78	139,5	164,5	60,5
Riß-Ende (mm von UKF)	184	103	172	206	78,5
Riß-Länge (mm)	31	25	32,5	41,5	18,0
Riß-Breite max. (mm)	6,9	7,6	10,5	9,0	2,1
Riß-Winkellage zur Kerbe	165 <sup>0</sup>	135 <sup>0</sup>	185 <sup>0</sup>	275 <sup>0</sup>	212 <sup>0</sup>

\*) nicht meßbar

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

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

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

#### Durchmesseränderung und Umfangsdehnung

Die Ergebnisse der Durchmesseränderungen und Umfangsdehnungen der C-Stabhüllen sind in den Abb. 38 und 39.1 bis 39.5 dargestellt. Dabei sind die Dehnprofile aus den Versuchen C 1 bis C 5 zusammen in Abb. 38, die Einzelkurven der C-Stäbe in den Abb. 39 wiedergegeben.

Die bleibende Durchmesserzunahme erstreckt sich über den gesamten Bereich angereicherten Brennstoffs. Die Beulen liegen alle im unteren Stabbereich außerhalb der mit Thermoelementen instrumentierten Zone. Die Lage der Beulen wurde wohl vorwiegend durch die axialen Leistungsprofile (Abb. 12) bestimmt.

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 C 1 zu erkennen.

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

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

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

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

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

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

FR2 IN-PILE TESTS C 1 THROUGH C 5  
CIRCUMFERENTIAL STRAIN DATA FROM ROD DIAMETER MEASUREMENTS

KIK IT 1981

Test C 1		Test C 2		Test C 3		Test C 4		Test C 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
20	5	20	5	22	5	15	5	15	5
32	10	35	10	50	10	27	10	27	10
52	15	50	15	82	15	42	15	35	15
90	20	68	20	110	20	75	20	40	20
120	25	72	25	122	25	127	25	45	25
145	30	78	(35)	140	(30)	148	30	48	30
152	35	103	(30)	172	(31)	160	35	50	35
153	(30)	107	25	87	25	165	(38)	53	40
184	(35)	153	20	200	20	206	(37)	55	45
190	30	170	15	245	15	220	35	58	50
195	25	230	10	285	15	240	30	61	(53)
245	25	370	5	350	10	298	25	79	(56)
342	20	500	0	450	5	335	20	80	55
390	15			500	0	355	15	85	50
490	5					398	10	90	45
500	0					470	5	95	40
						500	0	108	35
								120	30
								130	25
								150	20
								185	15
								240	10
								395	5
								500	0
max.at 171	51 %	max.at 86	39 %	max.at 156	37 %	max.at 187	44 %	max.at 72	62 %

[a] UKF = bottom of fuel stack  
 [b]  $U_0 = \pi \cdot d_0$ , where  $d_0 = 10,75$  mm  
 [c] rupture opening between the two elevations in parentheses



und der prozentualen Umfangszunahme  $\Delta U/U_0$  sind in Tabelle 13 zusammengestellt. Die maximal ermittelten Umfangszunahmen der Stäbe C 1 bis C 5 sind demnach: 51 %, 39 %, 37 %, 44 % und 62 %. Sie sind außerdem in den Abbildungen 46.1 bis 46.5 veranschaulicht.

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

#### Exzentrizität der Beule und Krümmung des Stabes

Zur Feststellung der Beulenlage in Bezug auf die Stablängsachse wurden die Mantelschriebe der verformten Stäbe an drei Umfangswinkelpaaren ( $0^0/180^0$ ,  $60^0/240^0$ ,  $120^0/300^0$ ) verwendet. Die daraus ermittelten Stabachsen im Beulbereich wurden mit den Stabachsen außerhalb der Beulbereiche verglichen. Die Differenz der beiden jeweiligen Werte wird als Exzentrizität der Beule angegeben. Für die Versuche der C-Reihe sind die Werte in Tabelle 14 aufgelistet. Die Exzentrizität der Beule ist meist zur Krümmungsaußenseite gerichtet, während die Rißstelle gegenüber, also an der Innenseite liegt (siehe Schema, S. 38).

Ebenfalls aus den Mantelschrieben wird die Stabkrümmung abgeleitet. Sie wird als Auslenkung der Stablängsachse von der geraden Verbindungslinie ihrer Endpunkte verstanden (s.a. Schema). Die Maximalwerte liegen bei 130 bis 480 mm von UK aktiver Zone. Die Auslenkung beträgt 1,9 bis 3,7 mm (siehe Tabelle 15).

---

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

Tabelle 12:

Ovalität im Beulbereich

Versuch		C1		C2		C3		C4		C5	
Stab	Nr.	56		57		59		60		63	
Polarschrieb	Nr.	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Abstand von UKF	mm	149	188	74	107	136	177	160	210	60	79
D <sub>min</sub>	mm	12,9	13,2	13,1	13,1	13,5	13,5	14,1	14,1	15,8	16,3
D <sub>max</sub>	mm	15,2	15,2	14,2	13,9	14,2	14,2	15,0	15,3	16,9	17,2
Ovalität	mm	2,28	2,06	1,04	0,78	0,68	0,72	0,94	1,20	1,08	0,93

Tabelle 13:

Umfangsdehnung im Beulbereich

Versuch			C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Stab	Nr.		56	57	59	60	63
unteres RiBende	U	mm	46,8	45,7	43,5	45,8	51,3
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	38,5	35,2	28,6	35,4	52,0
Mitte RiB	U	mm	51,1	46,9	46,2	48,8	54,8
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	51,2	38,8	36,7	44,4	62,2
Oberes RiBende	U	mm	44,7	42,5	43,4	46,2	52,6
	$\frac{\Delta U}{U_0}$	%	32,3	25,8	28,4	36,5	55,7

Tabelle 14:

Exzentrizität der Beule

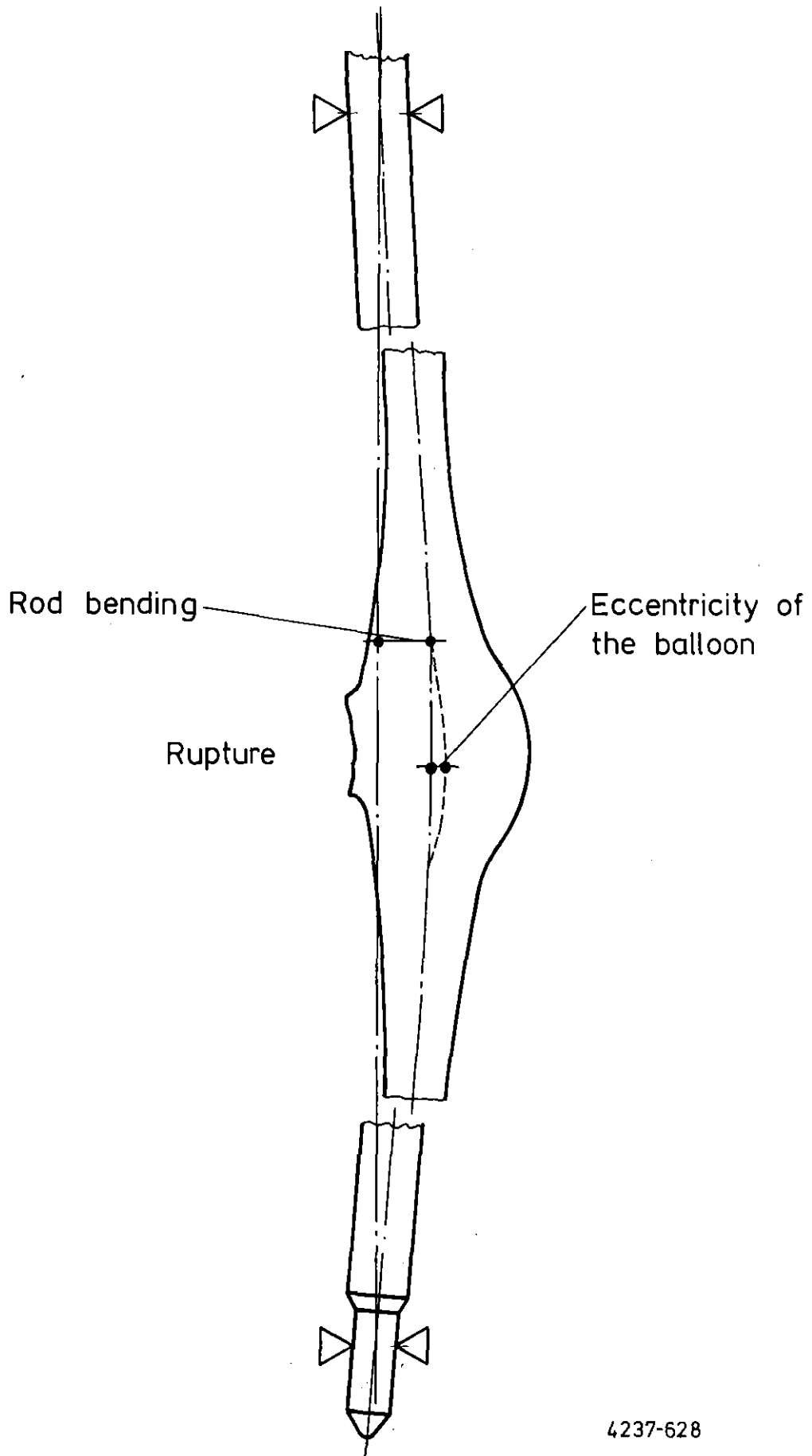
Versuch		C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Stab	Nr.	56	57	59	60	63
Abstand von UKF	mm	175	90	156	185	70
Lage zum Riß	Grad	165	165	175	170	8
zur Nullmarke	Grad	0	300	10	105	220
Exzentrizität	mm	0,3	0,4	1,3	0,4	0,2

Tabelle 15:

Krümmung der Stäbe

Versuch		C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Stab	Nr.	56	57	59	60	63
max. Krümmung	mm	2,2	2,0	2,2 <sup>x</sup>	1,9	3,7
Abstand von UKF	mm	470	460	400	280	480
Lage zur Nullmarke	Grad	60	115	210	200	235
Krümmung im Beulbereich	mm	1,9	0,4	2,5	1,6	1,1
Abstand von UKF	mm	175	90	130	185	70
Lage zum Riß	Grad	160	180	10	150	0

<sup>x</sup> Maximum liegt im Beulbereich (siehe unten)



4237-628



Im Beulbereich zeigen vier C-Stäbe etwa die gleichen Auslenkungen der Stablängsachse wie im Bereich der maximalen Krümmung. Die azimutale Lage der Krümmung zum Riß ist so wie bei der Exzentrizität der Beule beschrieben: die Krümmungsinneseite liegt bei vier Stäben am Riß ( $\sim 180^\circ$  zwischen Riß und Auslenkung des Stabs durch Krümmung). Die Umfangslage der Ausbeulung und der Stabkrümmung sind hier etwa gleich,

### 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 das Volumen von Hüllwand und Brennstoff wurden dabei die Ausgangswerte verwendet. Die Summe der Einzelvolumina stellt das vergrößerte Volumen  $V_1$  dar. Der relative Volumenzuwachs ergibt sich dann zu

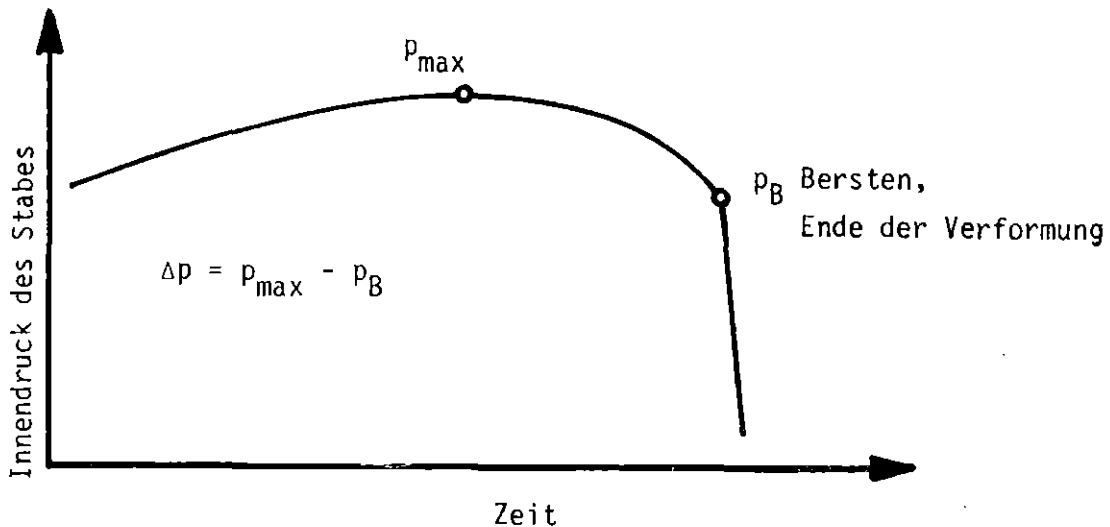
$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{V_1}{V_0} - 1$$

wobei  $V_1$  = Leervolumen des Stabes nach dem Versuch

$V_0$  = Leervolumen des Stabes vor dem Versuch.

In Abb. 48 ist der relative Volumenzuwachs über der maximalen Umfangsdehnung für die Versuche C 1 bis C 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, dessen Maximum am unteren Stabrand lag. Die Volumenzunahme wurde offenbar durch das relativ kalte Stabende außerhalb der beheizten Zone behindert. Eine ähnliche Tendenz zeigt Stab C5.

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



### Schema

Innendruckverlauf während der Hüllverformung

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

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

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

## 7. Brennstoffzustand und -verhalten

Zur Beurteilung des Brennstoffzustandes nach der Vorbestrahlung und möglicher Veränderungen des Brennstoffzustandes beim Transientenversuch wurde von den sechs vorbestrahlten Versuchsstäben der Serie C der Stab C 6 keinem Transientenversuch ausgesetzt.

Aus den Querschnitten des Stabes C 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 C 5. Einen Querschnitt des Stabes C 6 (196 mm von Unterkante Brennstoff) gibt Abb. 50.1 wieder. Abb. 50.3 zeigt einen Längsschnitt. Das Bruchmuster sieht in verschiedenen Brennstoffebenen im Prinzip gleich, im Detail unterschiedlich aus. Das verdeutlicht auch die Abb. 51. Das Aussehen des Brennstoffs im Stab C 6 wird als typisch für alle Stäbe der C-Serie angesehen, wie der Vergleich mit Abb. 50.2 des Stabes C 2 im wenig gebeulten Abschnitt (29 mm von UKF) zeigt.

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

Nach Längsteilung der Hülle eines Abschnitts von Stab C 6 (Abb. 52) fielen die Pelletbruchstücke auseinander bzw. konnten durch leichten mechanischen Druck von der Hüllwand an der sie hafteten, gelöst werden.

Durch die radiale Aufweitung der Hülle beim Transientenversuch wird dem Brennstoff zusätzlicher Raum gegeben, in den die Pelletbruchstücke hineinfallen. Dies führt im Bereich größerer Dehnung, an den Beulstellen, zum vollkommenen Verlust der Pelletform. Darüberhinaus füllt der Brennstoff den Beulraum in der Art einer lockeren Schüttung von Bruchstücken auf, was durch nachrutschen von Teilchen zu einer Verkürzung der Höhe der Brennstoffsäule führt. Das Maß dieser Verkürzung (s.a. Tabelle 9) wird bestimmt von der Größe der Beule, im Falle der C-Stäbe wurden bis zu 58 mm (C 4) gemessen.

Die Größe der Bruchstücke des Brennstoffs wurde durch den Transientenversuch im Mittel nicht geändert, wie die Auswertung der Siebanalysen für die Stäbe C in Abb. 53.1 und 53.2 darstellt. Hier sind die Teilchengrößen der Pelletbruchstücke des Stabes C 6 (ohne Transientenversuch) mit denen der übrigen C-Stäbe (mit Transienten-Versuch) verglichen. Die Werte des Referenzstabes C 6 liegen im Datenband der Siebproben der übrigen C-Stäbe. Die häufigste Bruchstückgröße liegt bei etwa 3 mm.

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

Der Effekt der Verkürzung der Brennstoffsäule wurde in zwei späteren Versuchen mit besonderer Instrumentierung, E3 und E4, als Indikator benutzt zur Bestimmung des Zeitpunkts im Verlauf eines Transientenversuchs, zu dem die Brennstoffumverteilung stattfindet. Letztlich sollte damit die Frage geklärt werden, ob die Brennstoffbewegung den Verformungsvorgang beeinflusst. Die 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 C-Versuche, da die Berstdaten wie Bersttemperatur,



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

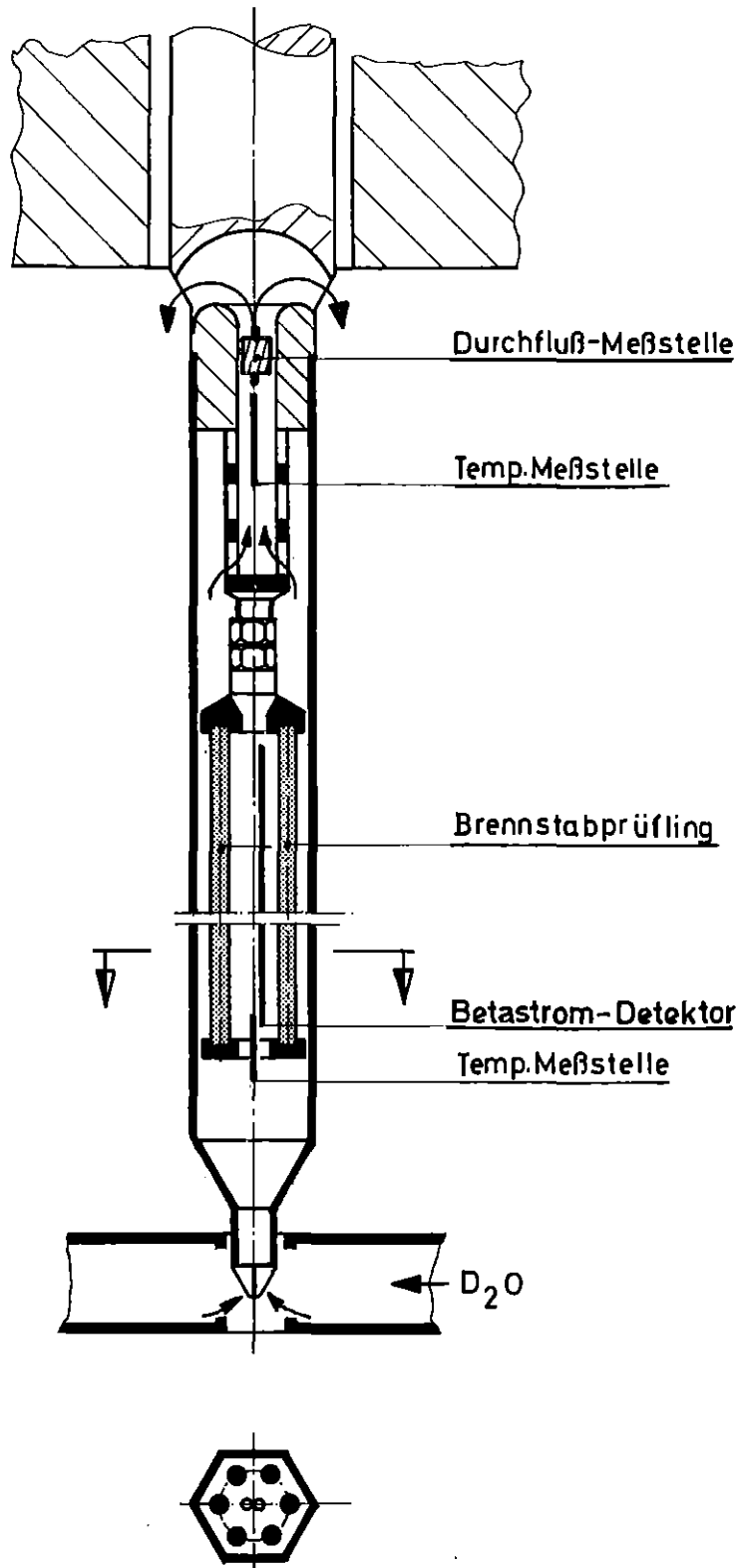
Die endgültige Beurteilung des Stabverhaltens muß allerdings einer vergleichenden Zusammenstellung der Resultate einer größeren Zahl von Versuchen nach Abschluß und Auswertung aller Nachuntersuchungen vorbehalten bleiben.

## 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 Specialist's Meeting on the Behavior of Water Reactor Fuel Elements under Accident Conditions, September 13-16, 1976, Spatind (Nord-Torpa), Norway, USERDA Report CONF-760977-2, NTIS, 1976
- /8/ Bauer, A.A. et al.:  
Evaluating Strength and Ductility of Irradiated Zircaloy, Quarterly Progress Report January - March 1978, NUREG / CR-0085, BMI-2000, June 1978
- /9/ Karb, E.; Prüßmann, M.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall. Bericht über die Versuchsserie F  
KfK 2956 (Mai 1980)
- /10/ Prüßmann, M.; Karb, E.H.; Sepold, L.:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim Kühlmittelverluststörfall. Bericht über die Versuchsserie G1.  
KfK 3061 (Febr. 1981)

- /11/ L.Sepold, E.H.Karb, M.Prüßmann:  
In-pile-Experimente zum Brennstabverhalten beim  
Kühlmittelverlust-Störfall,  
Bericht über Versuchsserie G2/3, KfK 3099 (Juli 1981)
- /12/ L.Sepold, E.H.Karb, M.Prüßmann:  
Ergebnisse der In-pile-Experimente zum LWR-Brennstab-  
verhalten beim LOCA mit nicht vorbestrahlten Brenn-  
stäben, KfK 3098 (Juni 1981)

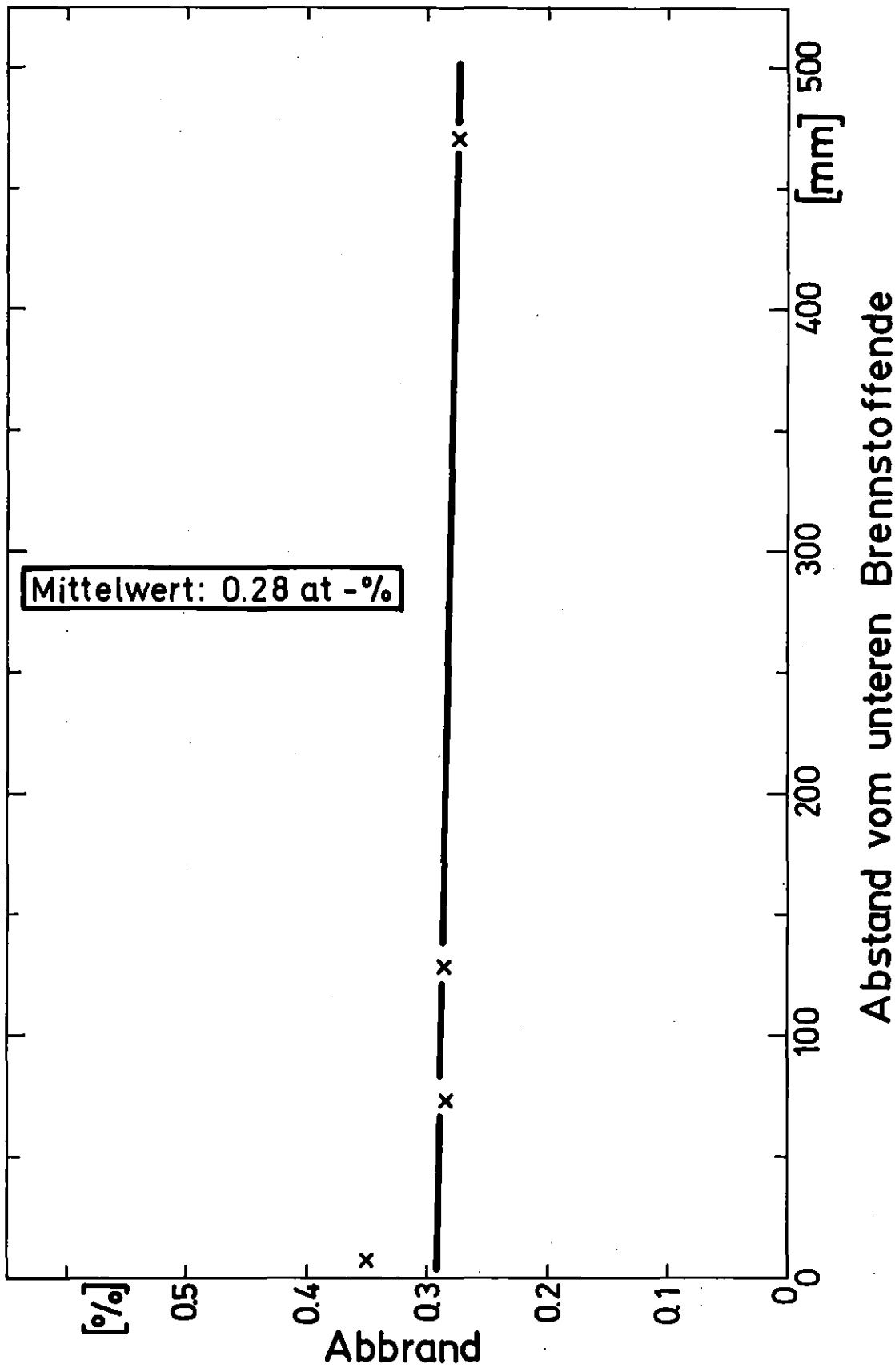


**KfK** IT 78  
PNS 4237-147

# Vorbestrahlungseinsatz

vereinfacht

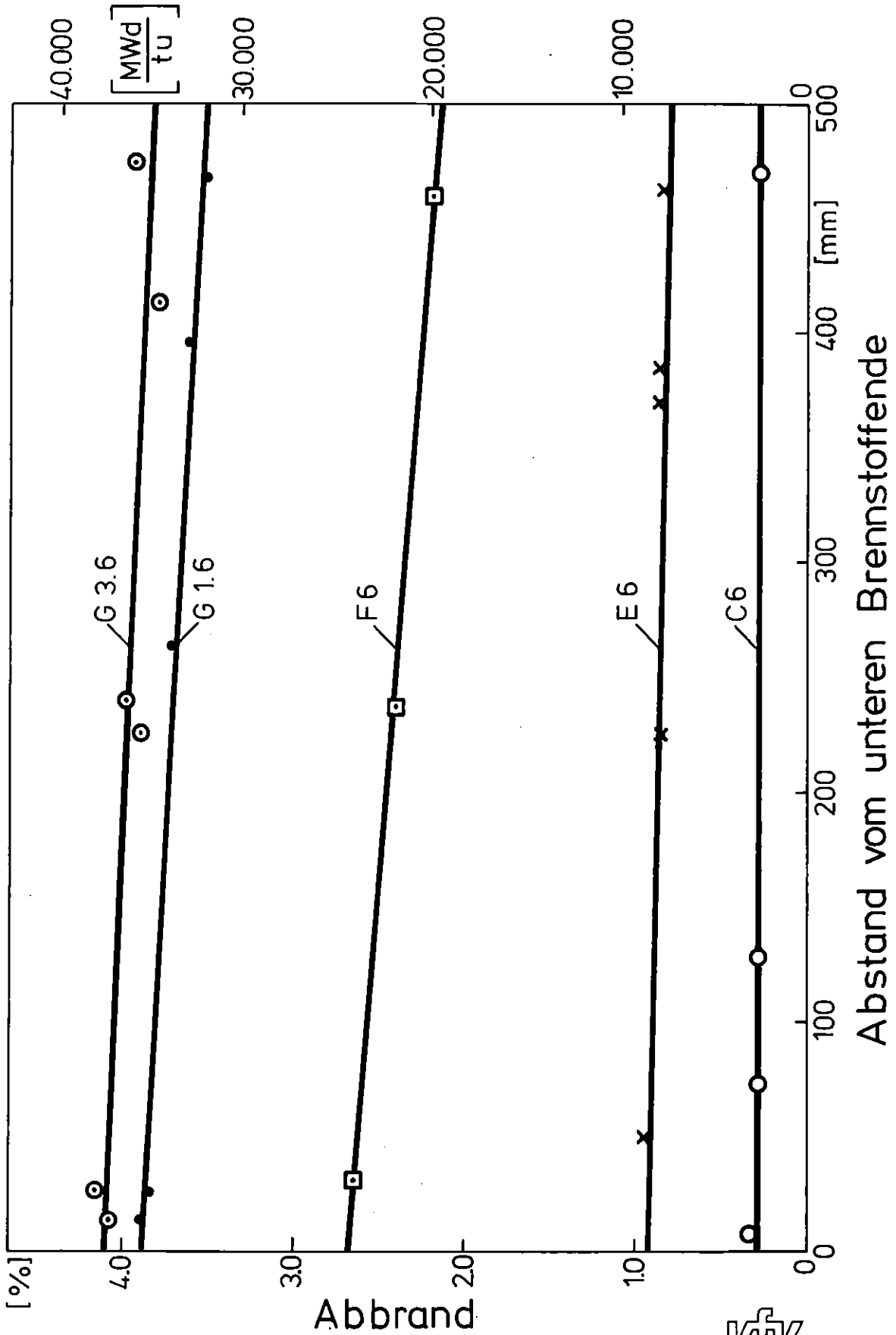
Abb.1



IT 81  
PNS 4237-554

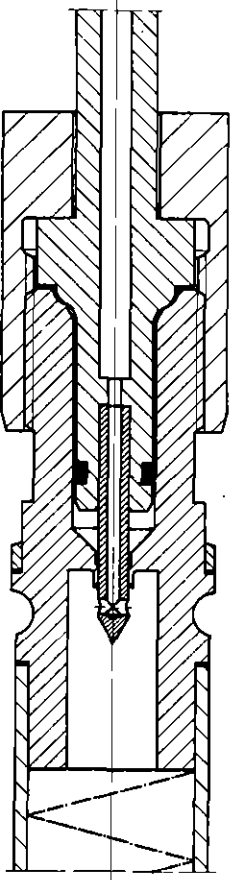
Axiale Abbrandverteilung im Brennstab C6

Abb.: 2

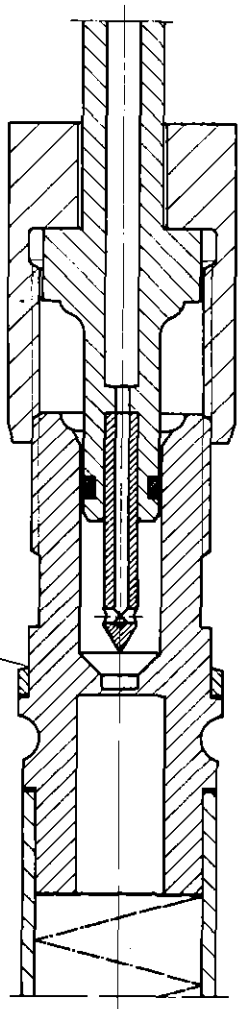


KfK IT 81  
PNS 4237-574

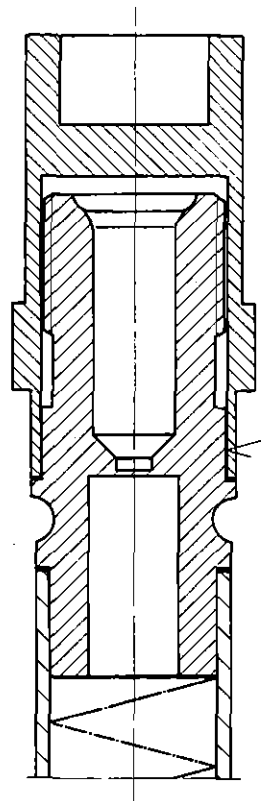
Axiale Abbrandverteilung C6, E6, F6, G 1.6, G 3.6  
Abb: 3



Ankopplung Prüflingsendstopfen nach Membrandurchstich



Ankopplung Prüflingsendstopfen vor Membrandurchstich



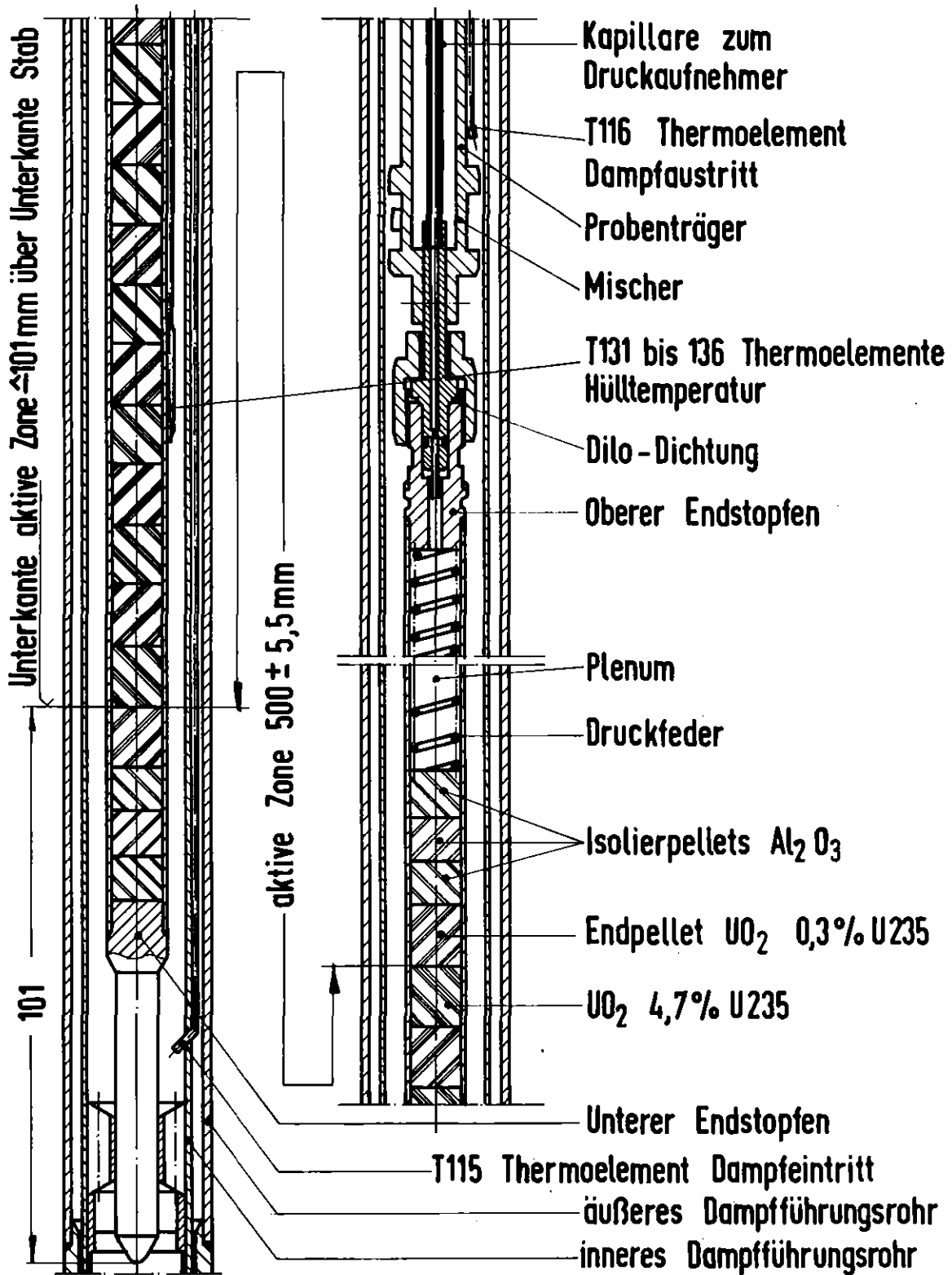
Prüfling mit Schutzkappe für Vorbestrahlung

Trennstelle Schutzkappe

**KfK**  
IT 78 PNS 4237-18

Zur Messung des Stabinnendruckes

Abb.: 4

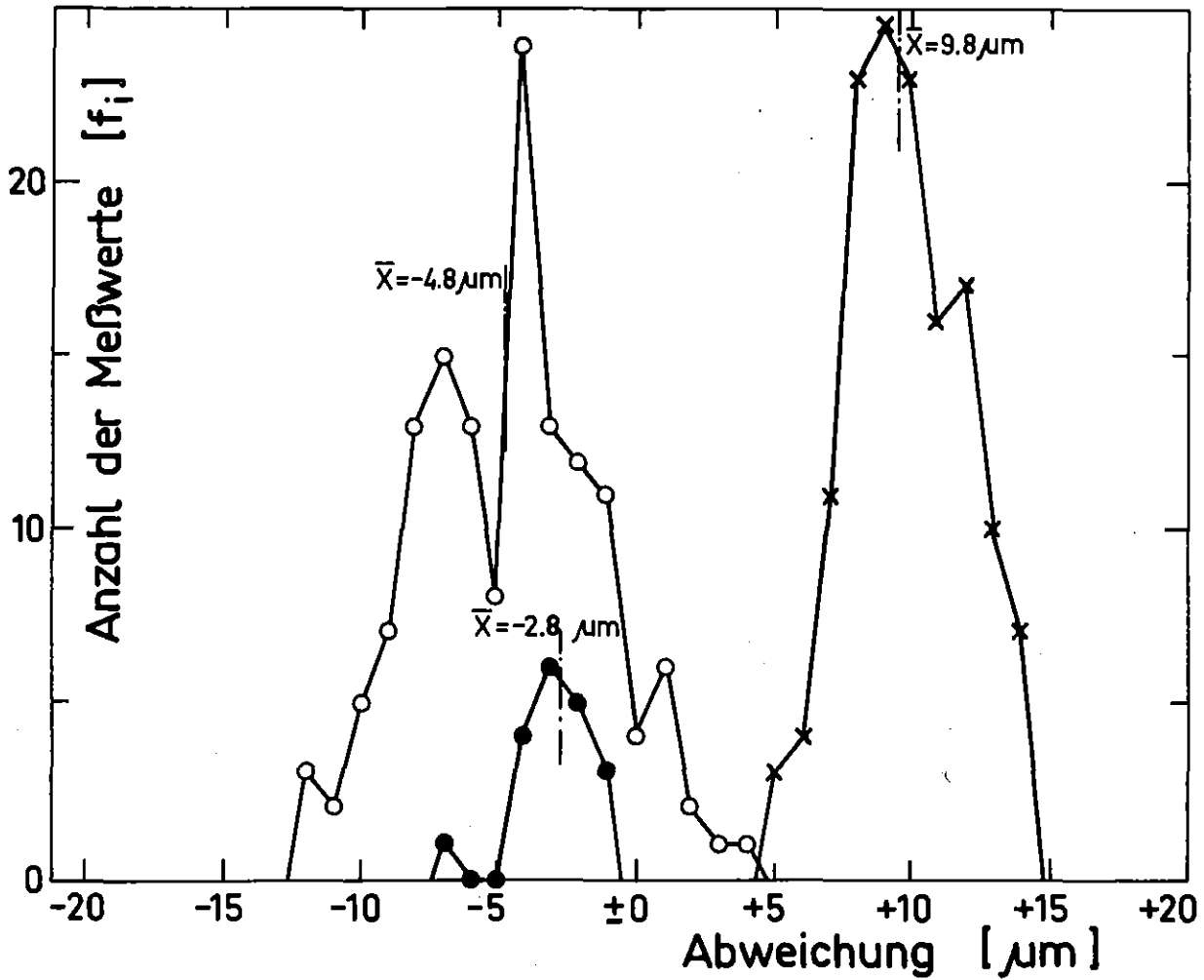


RBT/IT-1977  
PNS 4237-88

## Nuklear-Prüfling vereinfacht

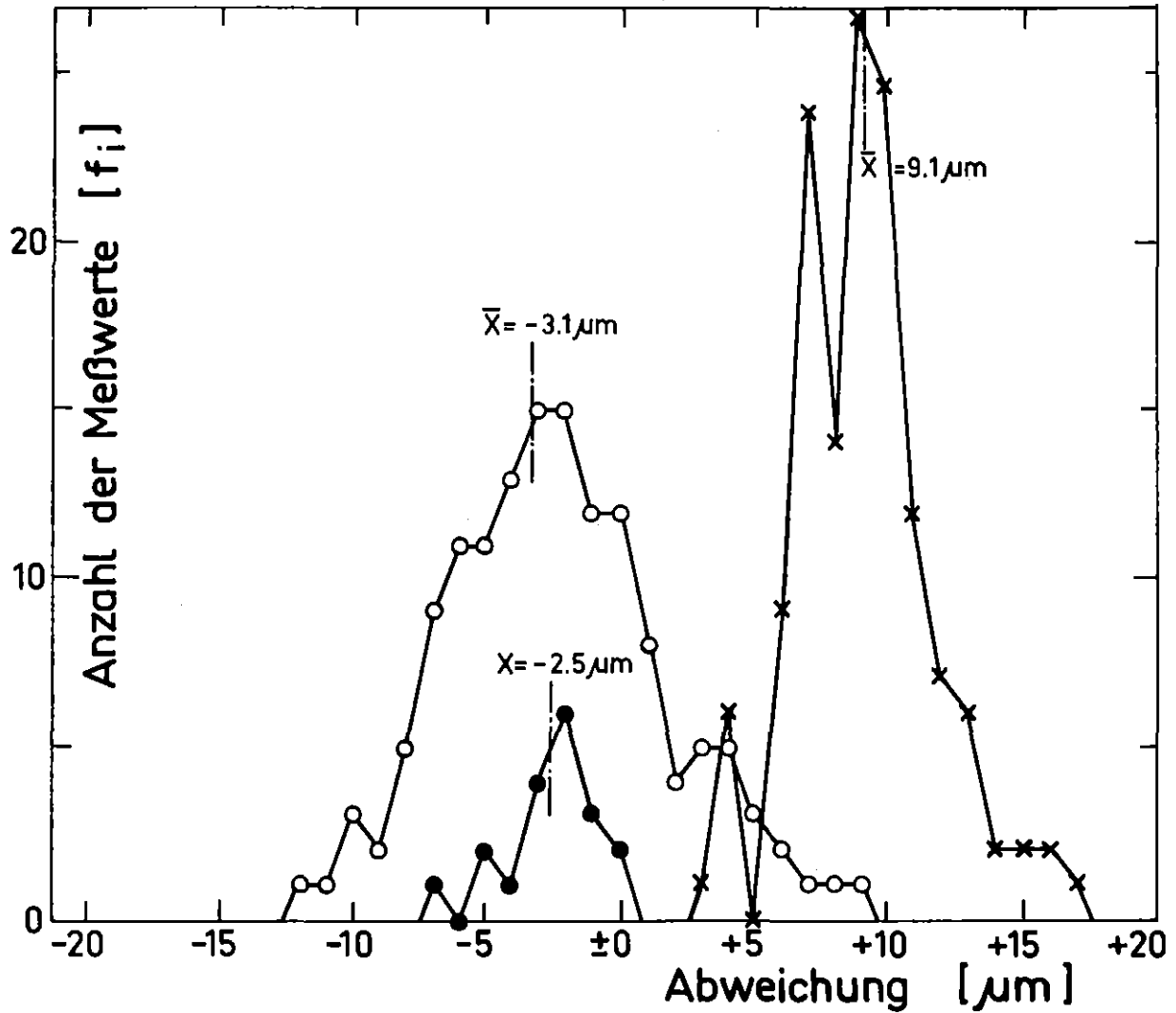
Abb.: 5





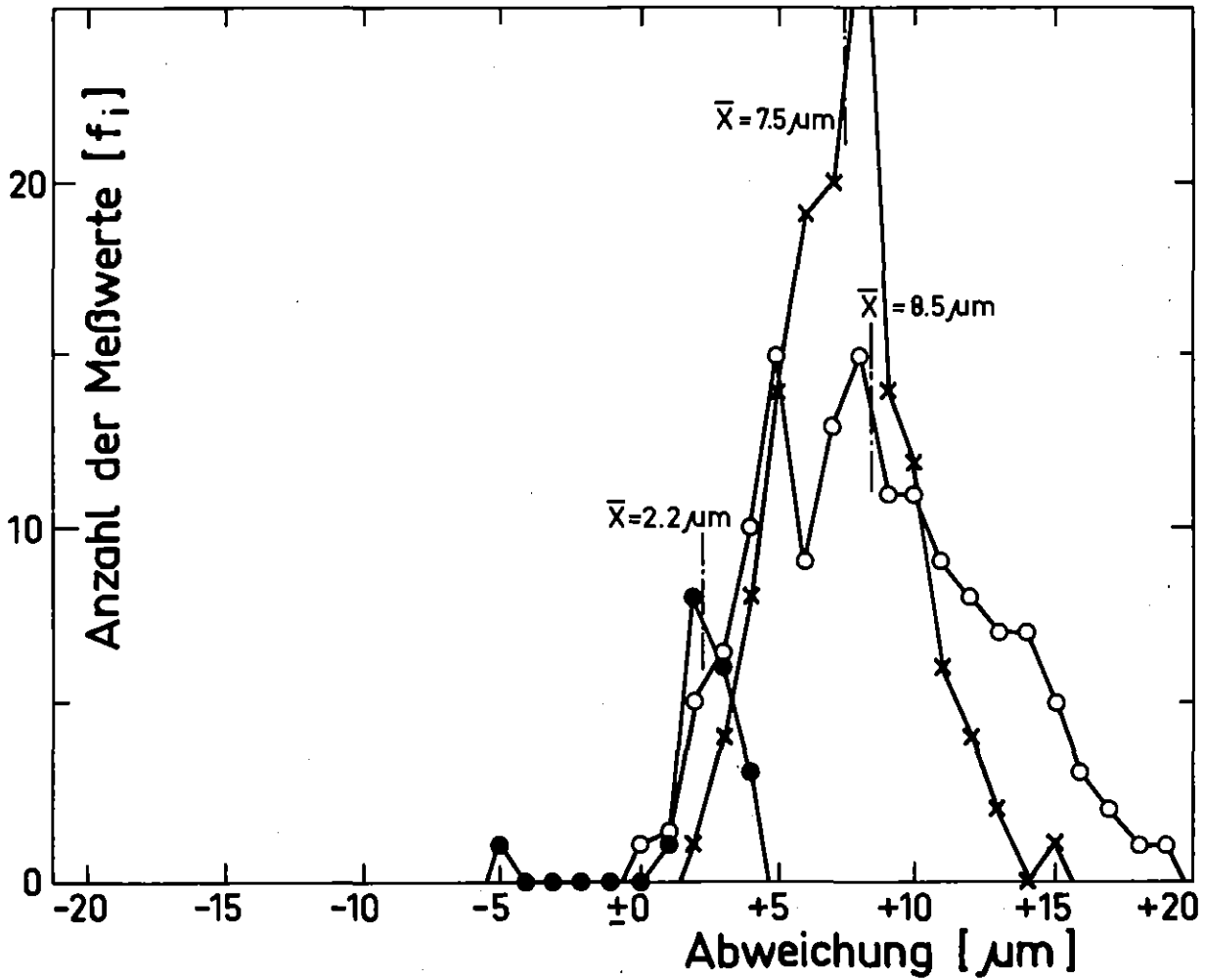
<u>Hüllrohr</u>	x <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert : 10.760 mm
	o <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert : 9.295 mm
<u>Pellet</u>	• <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm Mittelwert : 9.107 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.295 - 9.107 = 0.188 \text{ mm}$



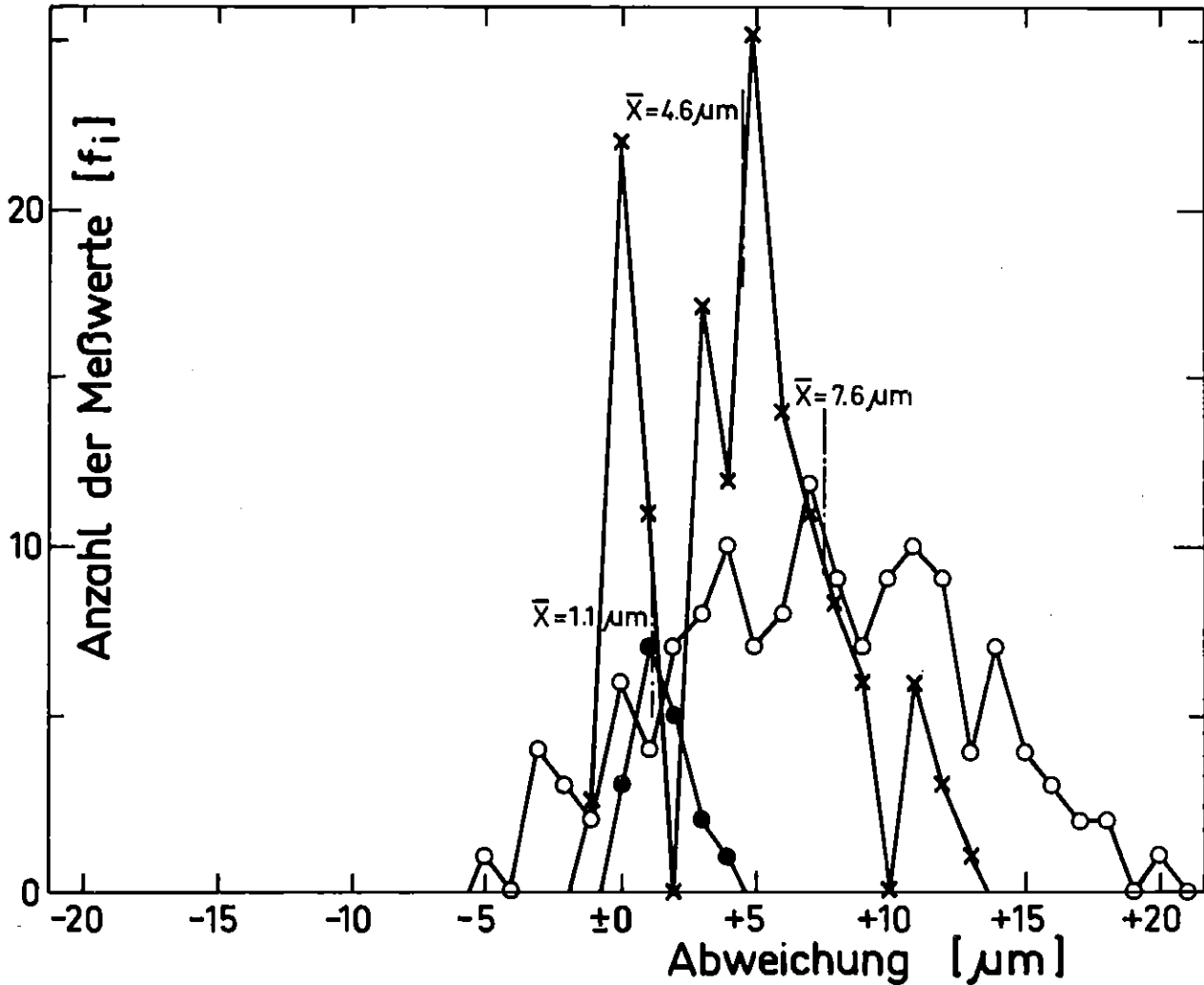
<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm Mittelwert: 10.759 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm Mittelwert: 9.297 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm Mittelwert: 9.107 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.297 - 9.107 = 0.190 \text{ mm}$



<u>Hüllrohr</u>	× <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
		Mittelwert : 10.758 mm
	○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
		Mittelwert : 9.309 mm
<u>Pellet</u>	● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm
		Mittelwert : 9.112 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.309 - 9.112 = 0.197 \text{ mm}$

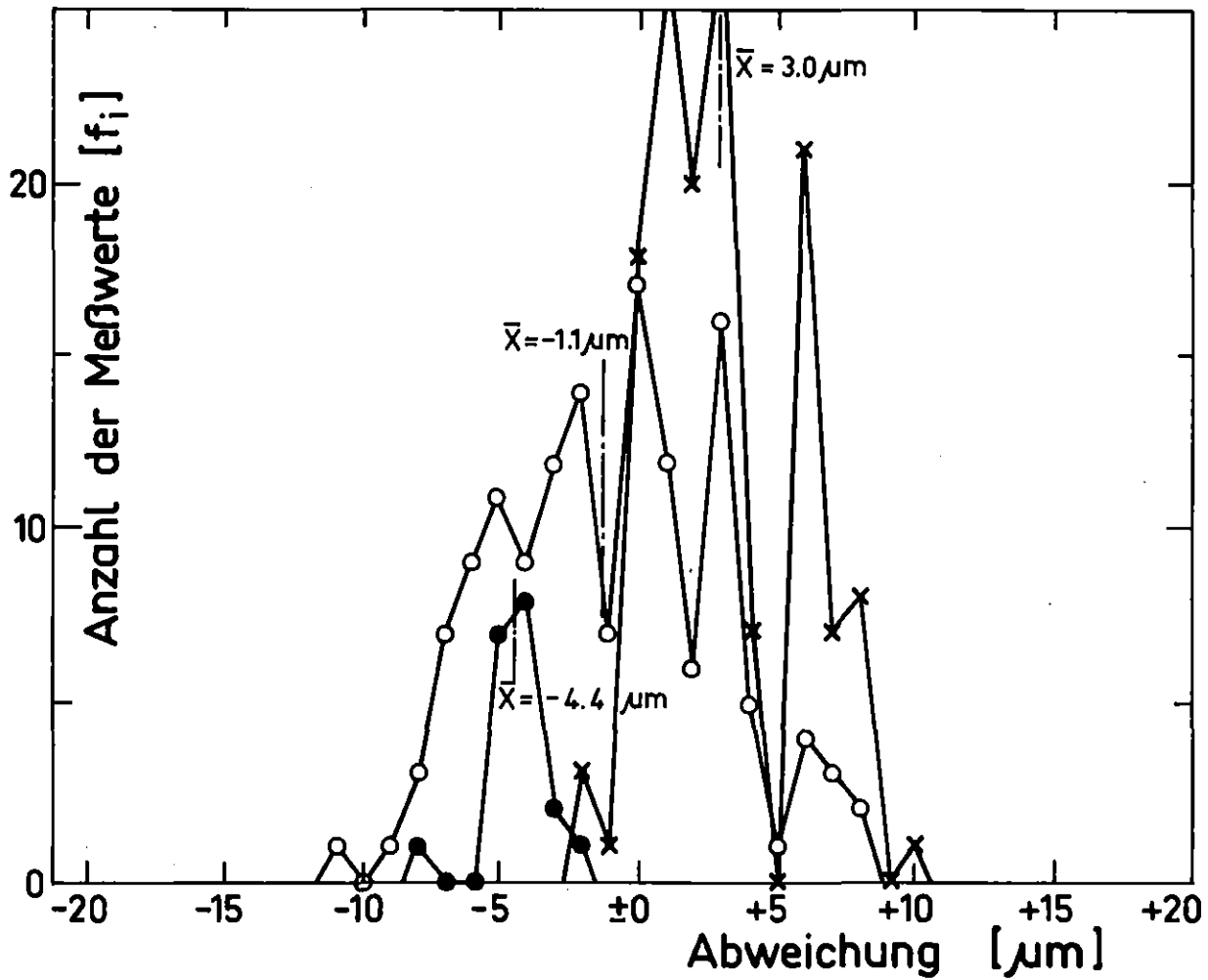


Hüllrohr × Außendurchmesser : Nennmaß : 10.750 mm  
Mittelwert : 10.755 mm

○ Innendurchmesser : Nennmaß : 9.300 mm  
Mittelwert : 9.308 mm

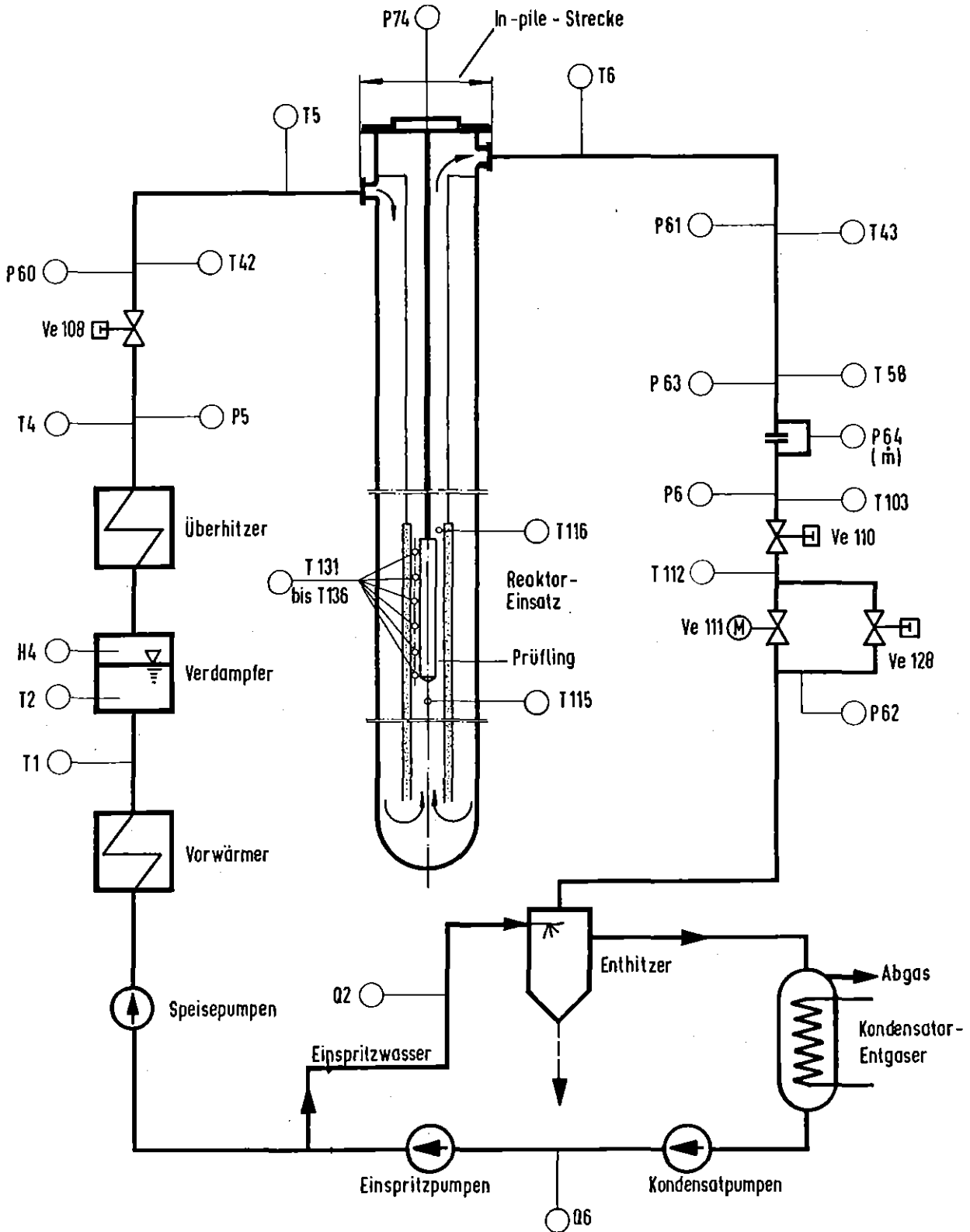
Pellet ● Außendurchmesser : Nennmaß : 9.110 mm  
Mittelwert : 9.111 mm

Einfüllspiel :  $S_E = 9.308 - 9.111 = 0.197 \text{ mm}$



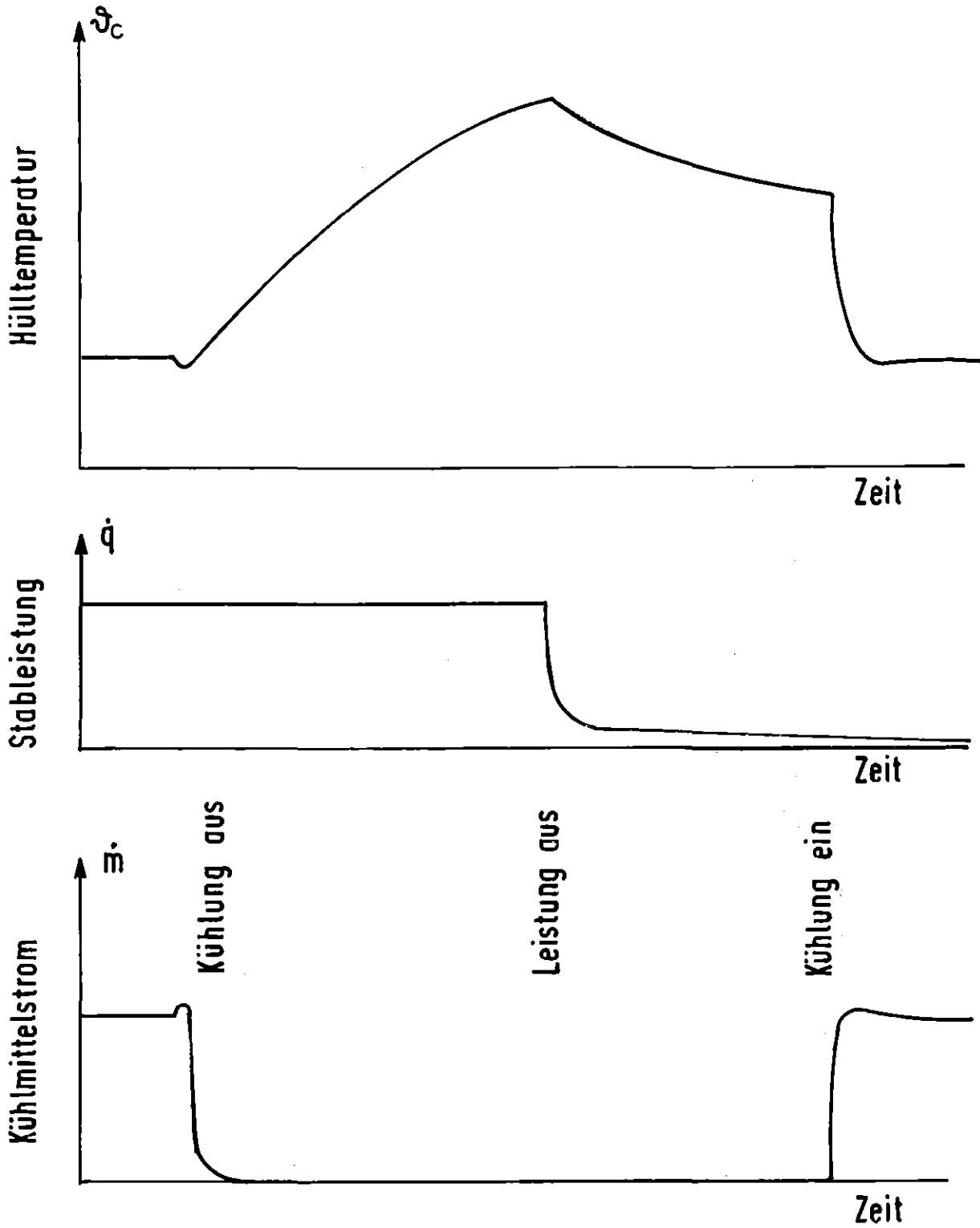
<u>Hüllrohr</u> × <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 10.750 mm
	Mittelwert: 10.753 mm
○ <u>Innendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.300 mm
	Mittelwert: 9.299 mm
<u>Pellet</u> ● <u>Außendurchmesser</u> :	Nennmaß : 9.110 mm
	Mittelwert: 9.106 mm

Einfüllspiel:  $S_E = 9.299 - 9.106 = 0.193 \text{ mm}$



IT-1977  
PNS 4237-87

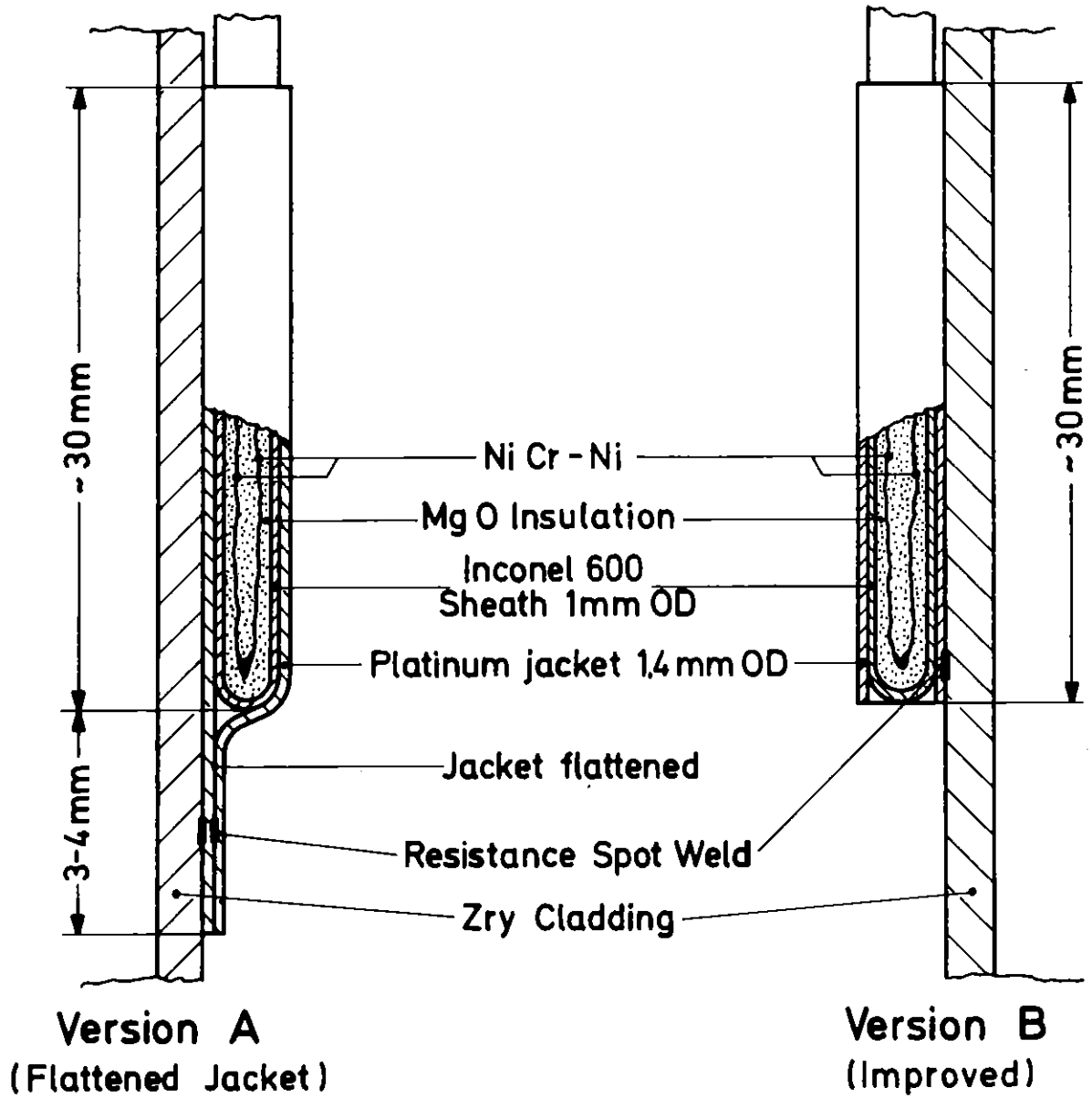
DK-Loop am FR2. Stark vereinfachtes Kreislauf-  
schema Abb.: 7



IT-1977  
PNS 4237-59.1

# Versuchsablauf, Schema

Abb.: 8

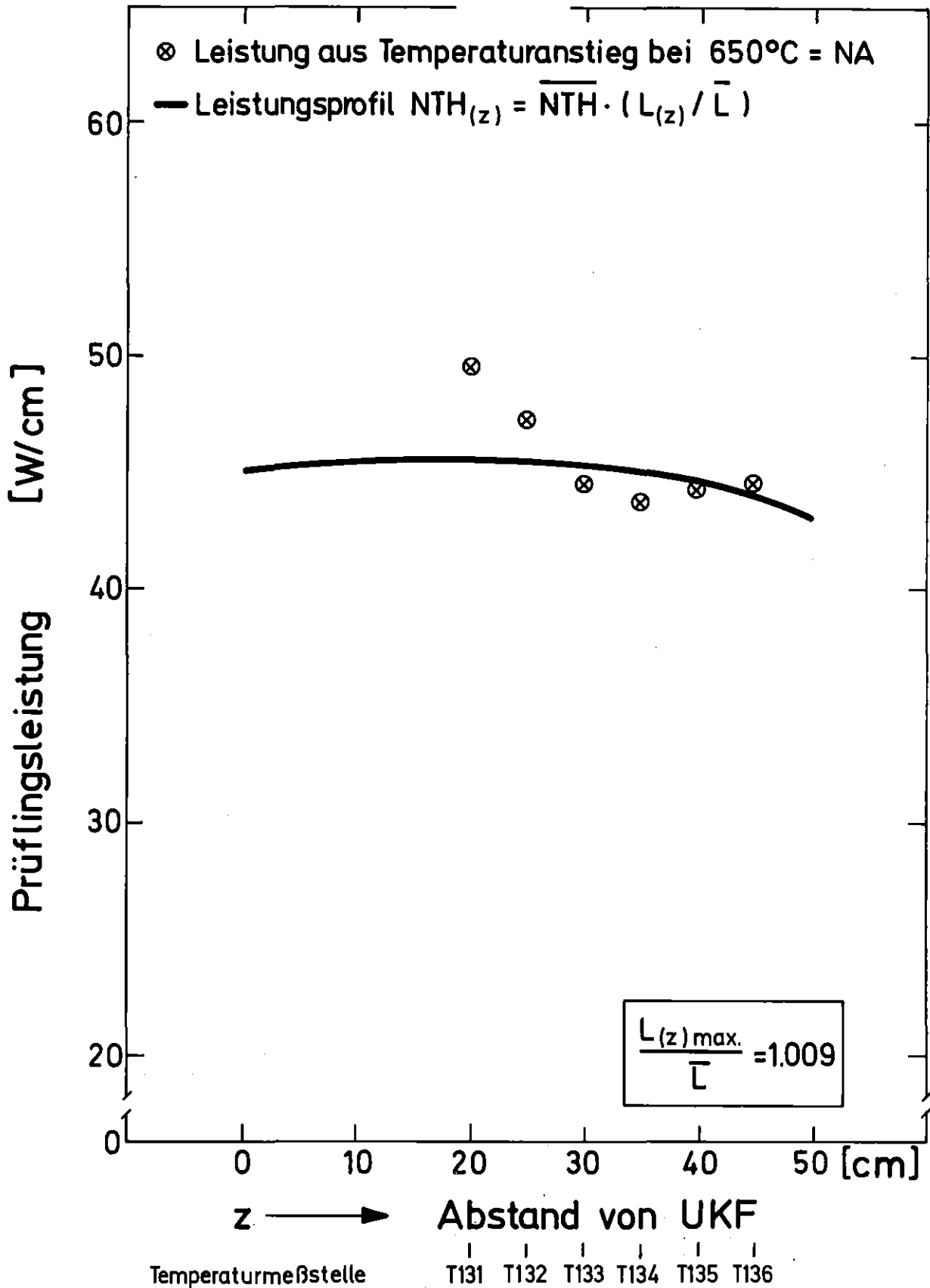


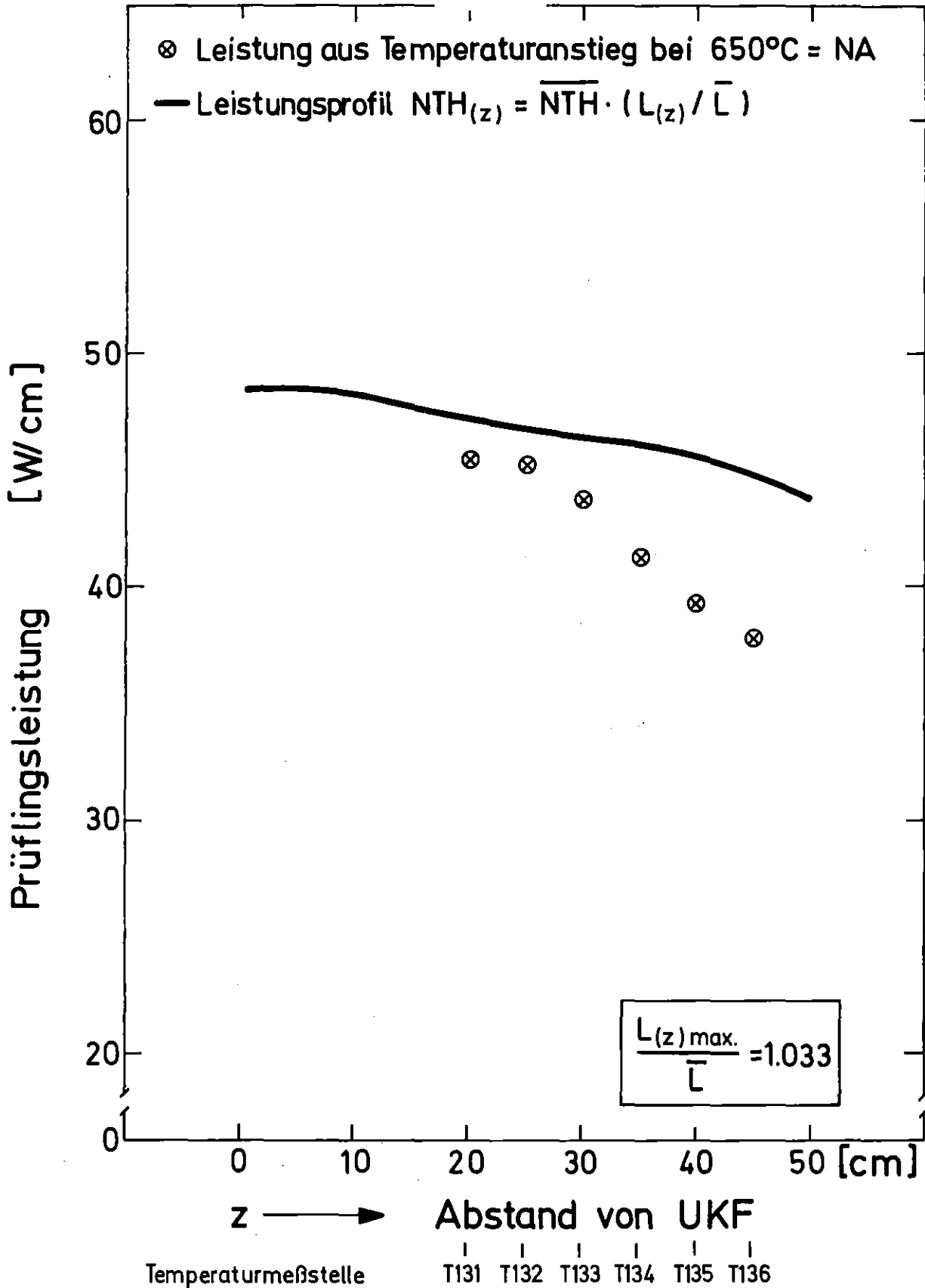
**KIK** IT-80  
PNS4237-300

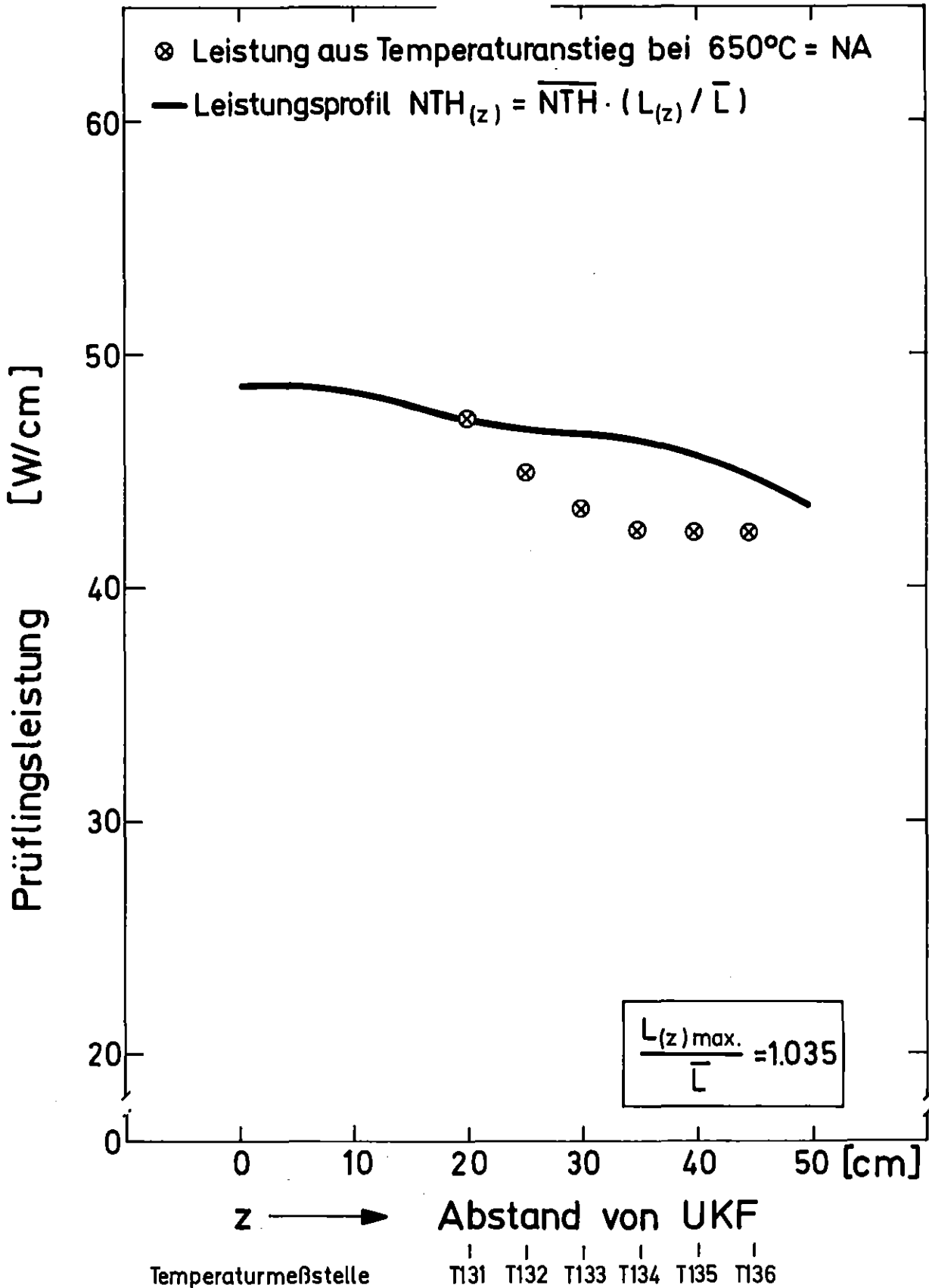
**FR2 In-Pile Tests:**  
Cladding Thermocouple (Schematic)

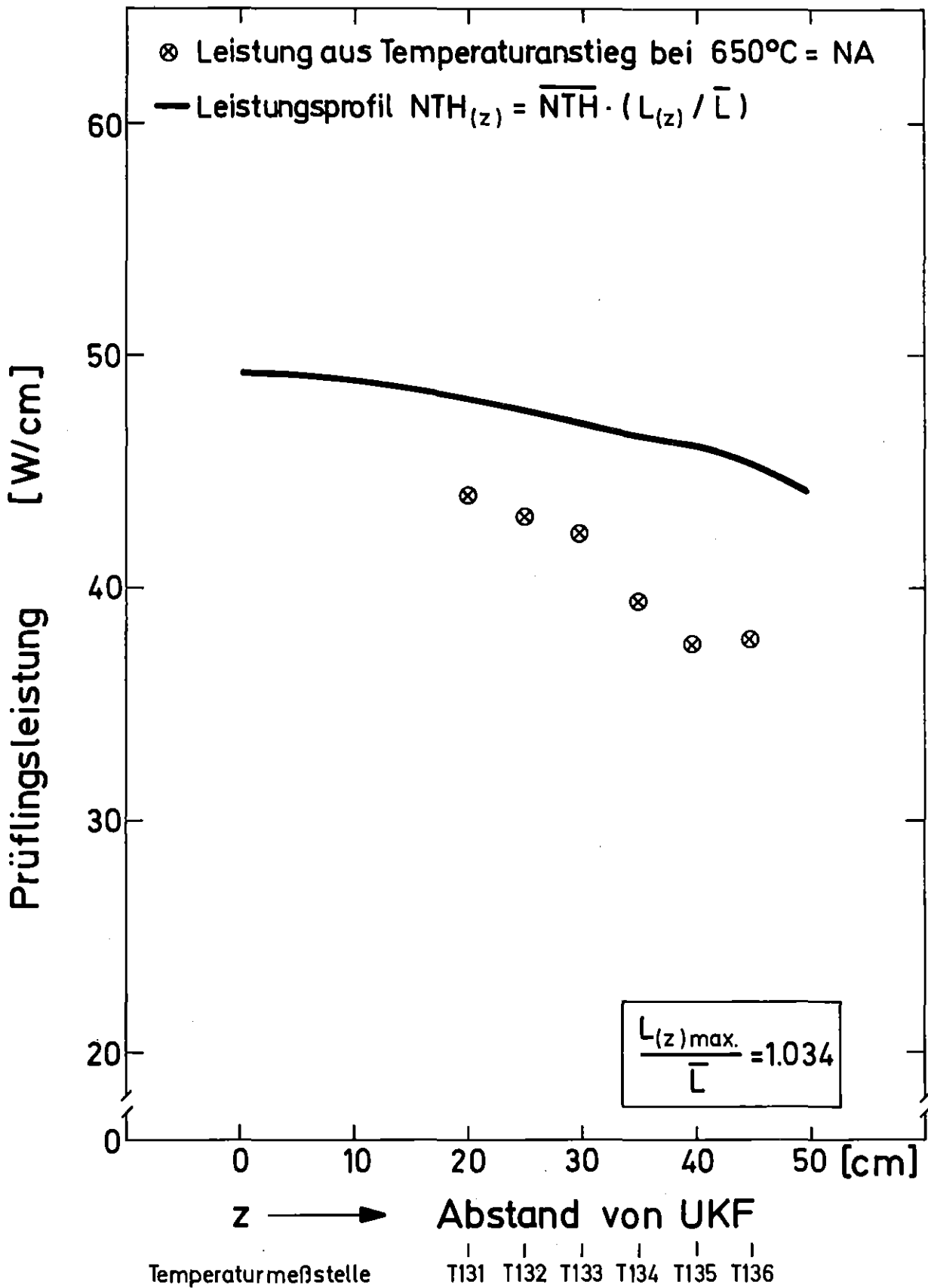
Abb.: 9

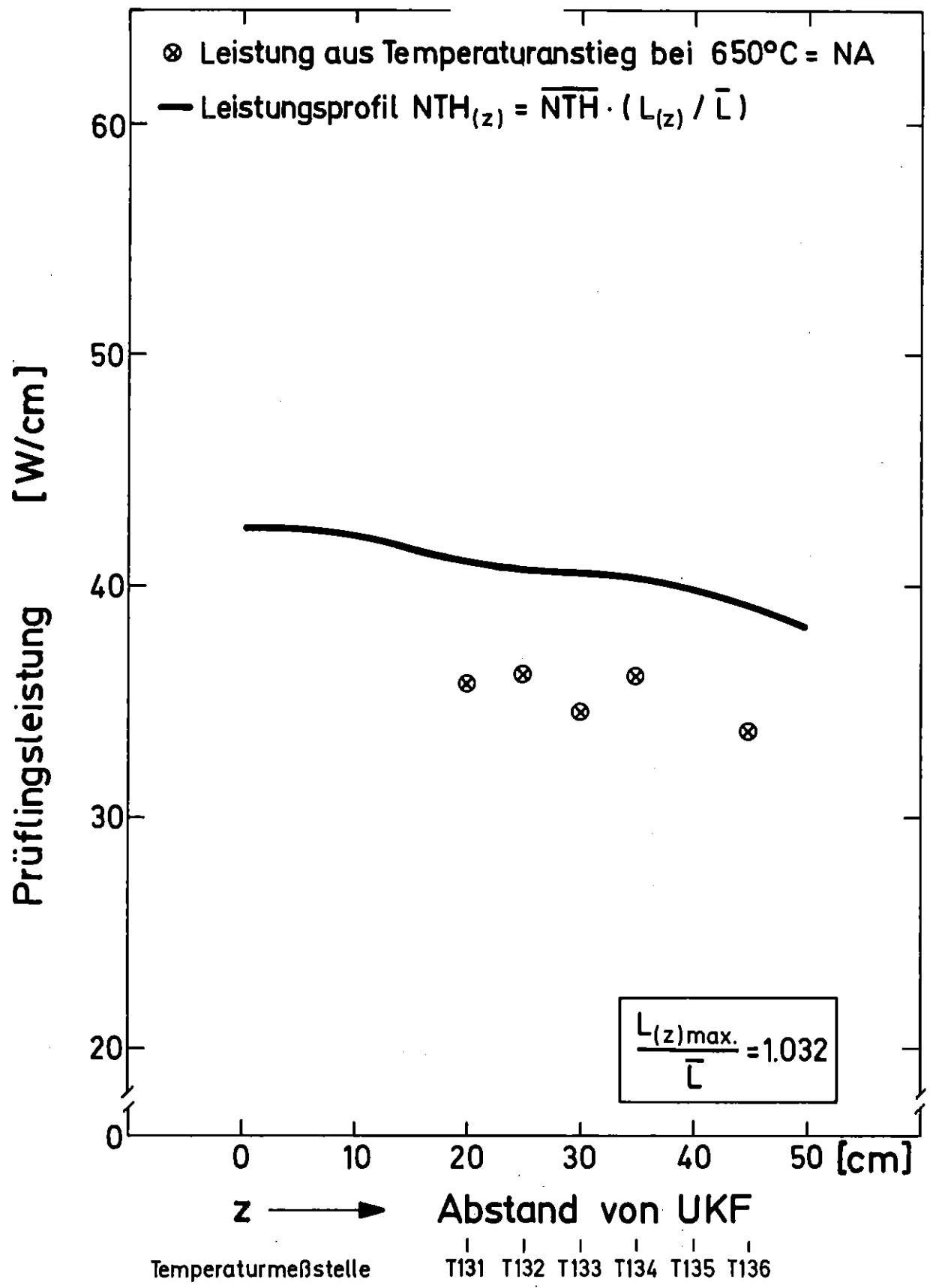


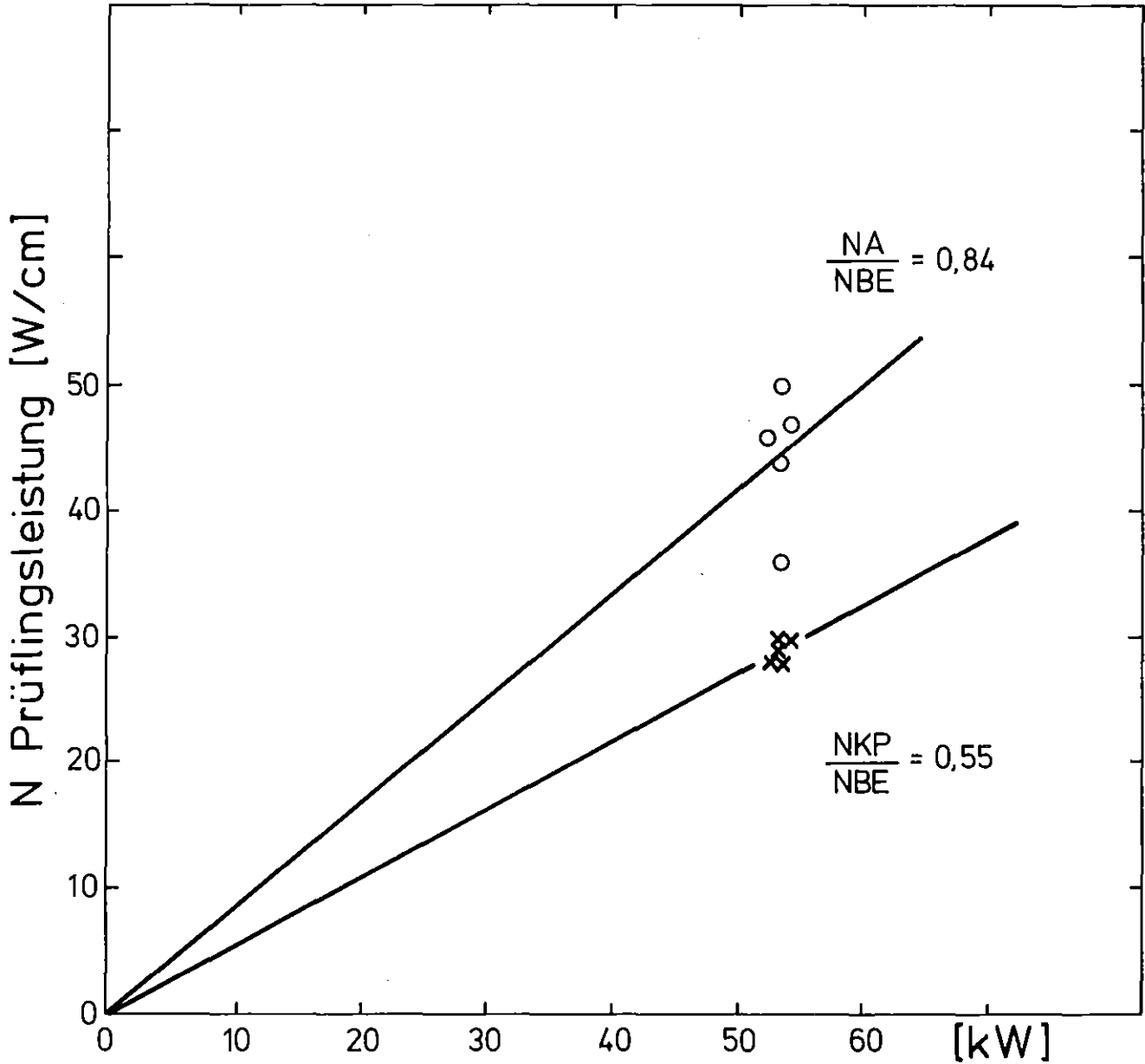








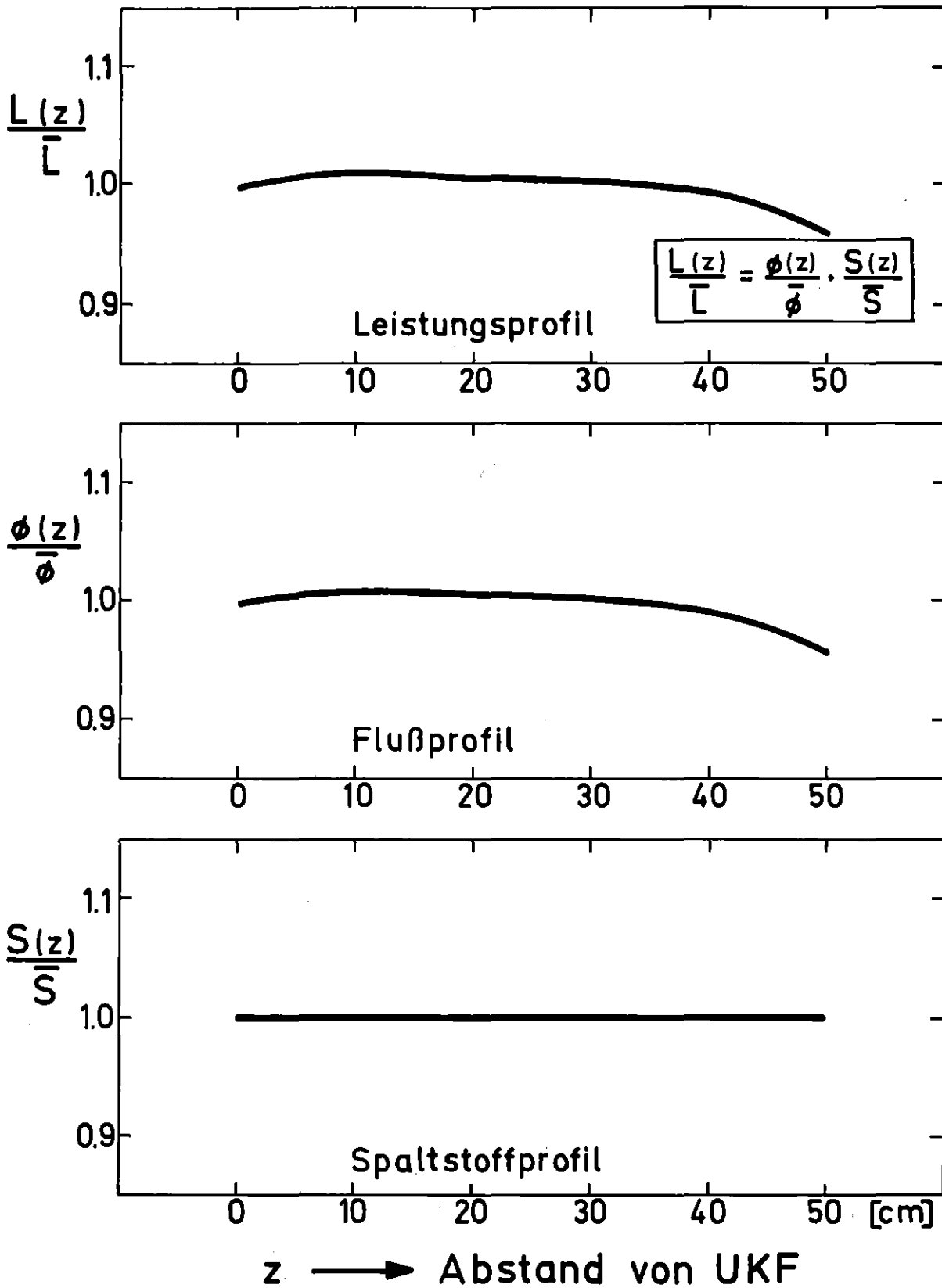


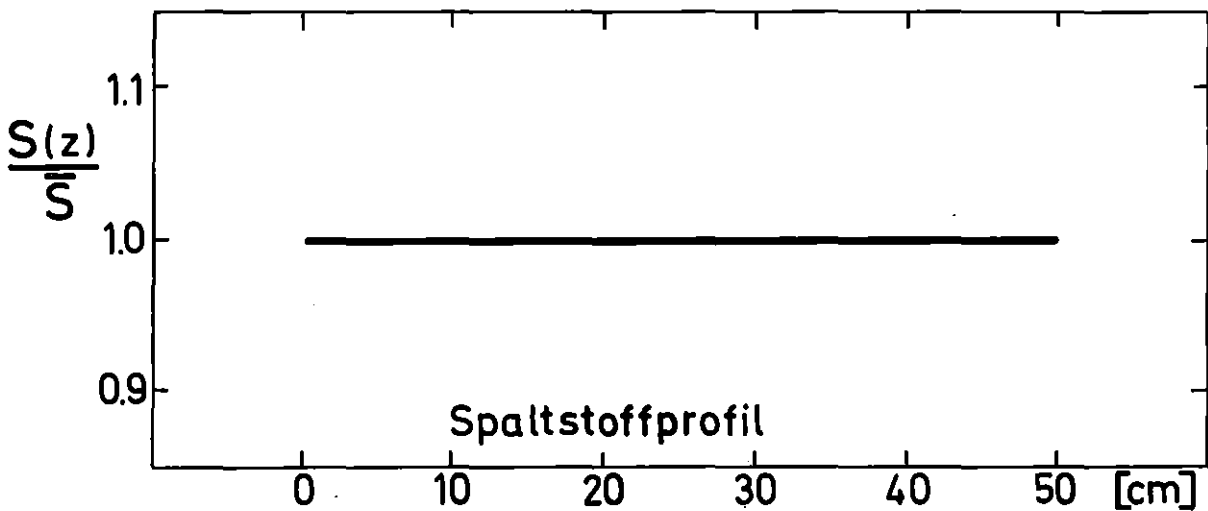
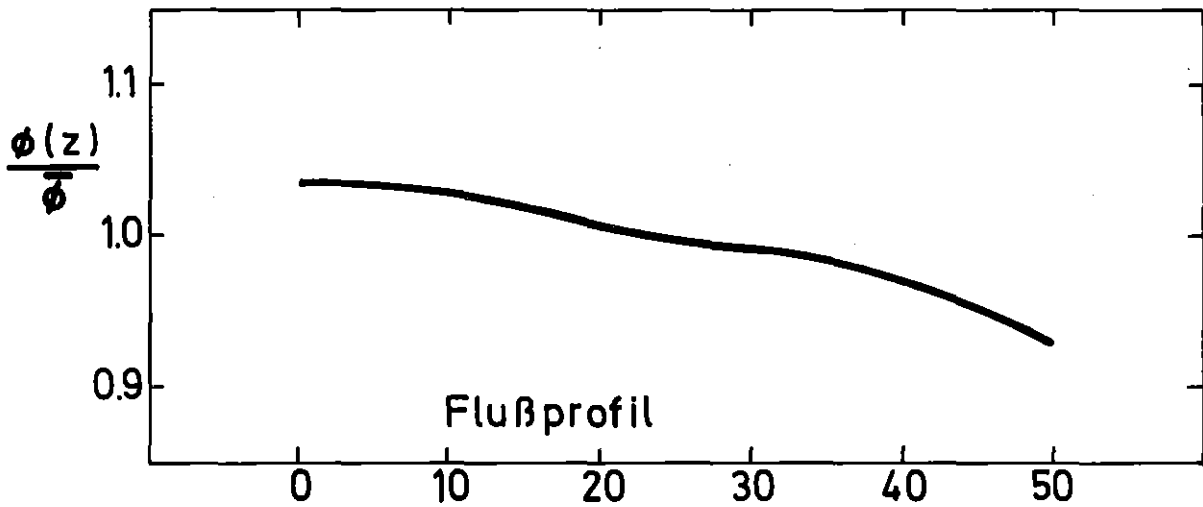
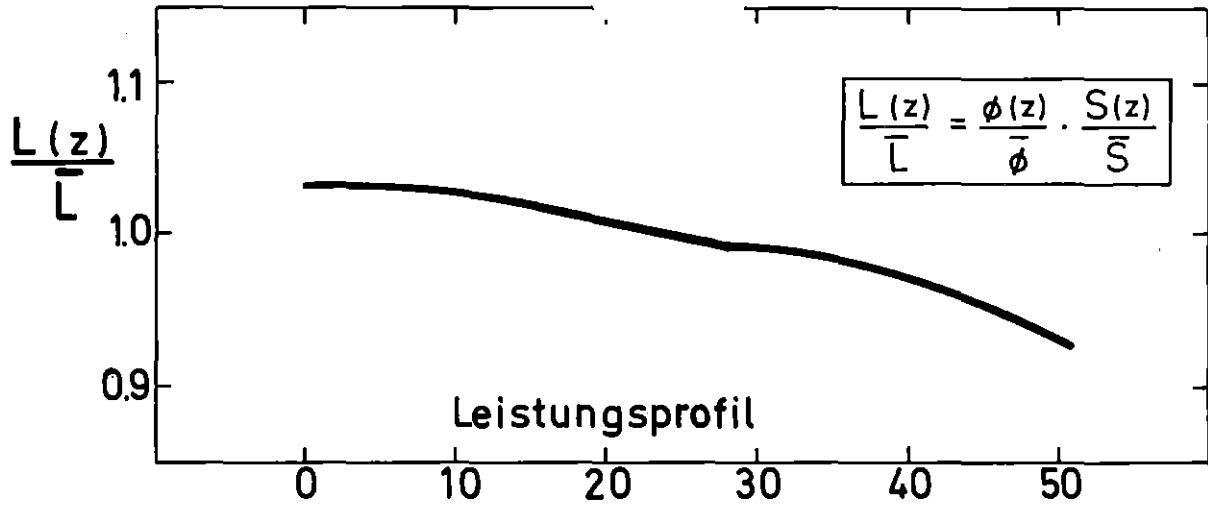


NBE = Leistung der umgebenden Brennelemente

○ NA = Prüfungsleistung aus Temperaturanstieg

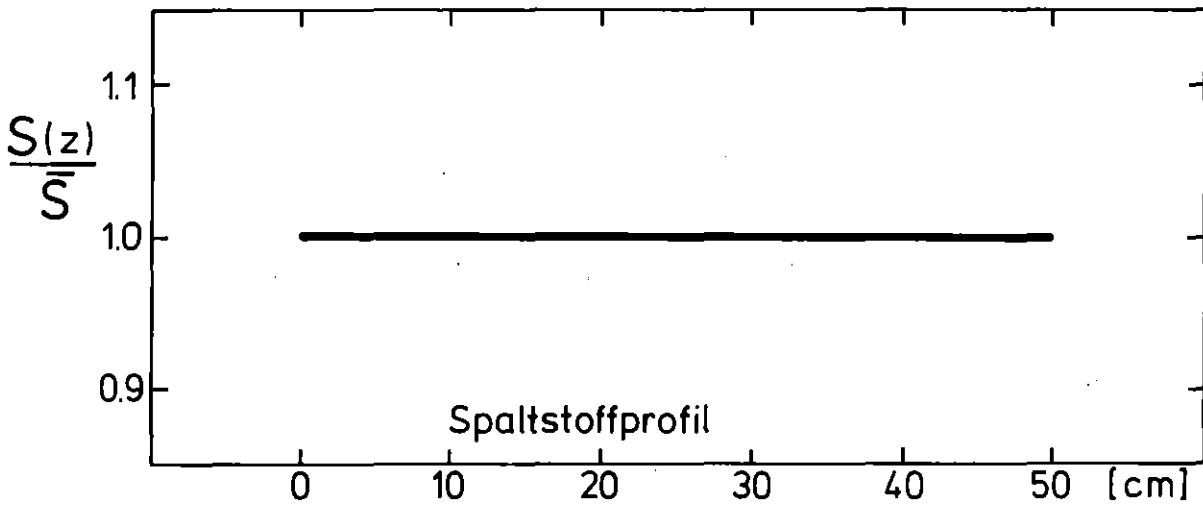
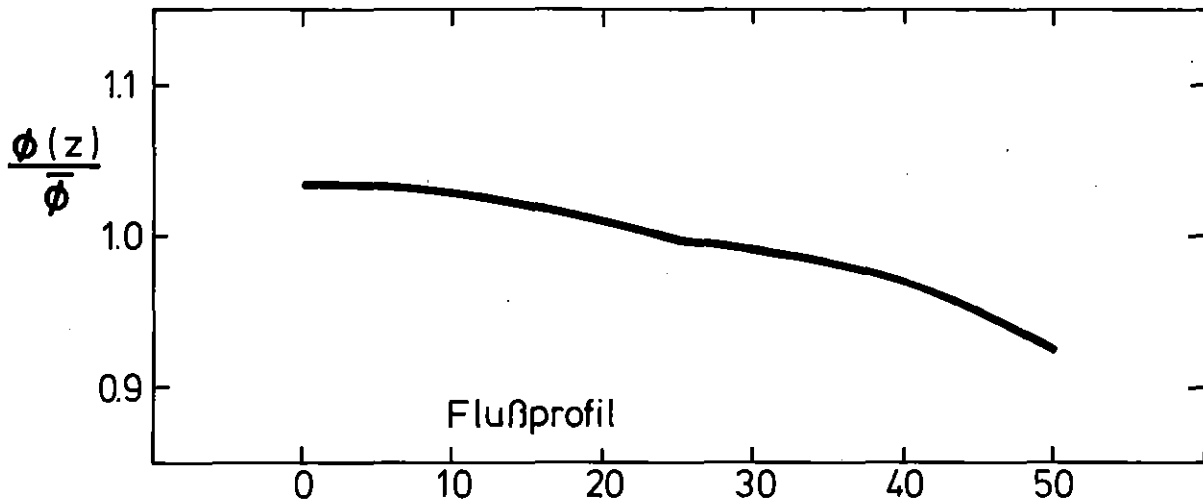
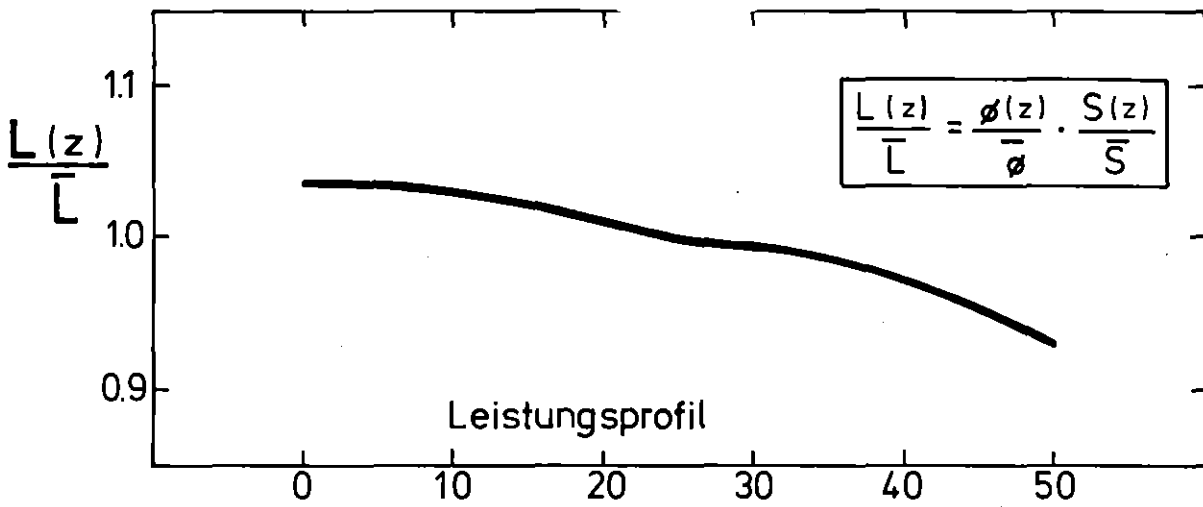
× NKP = „reaktorphysikalische“ Prüfungsleistung



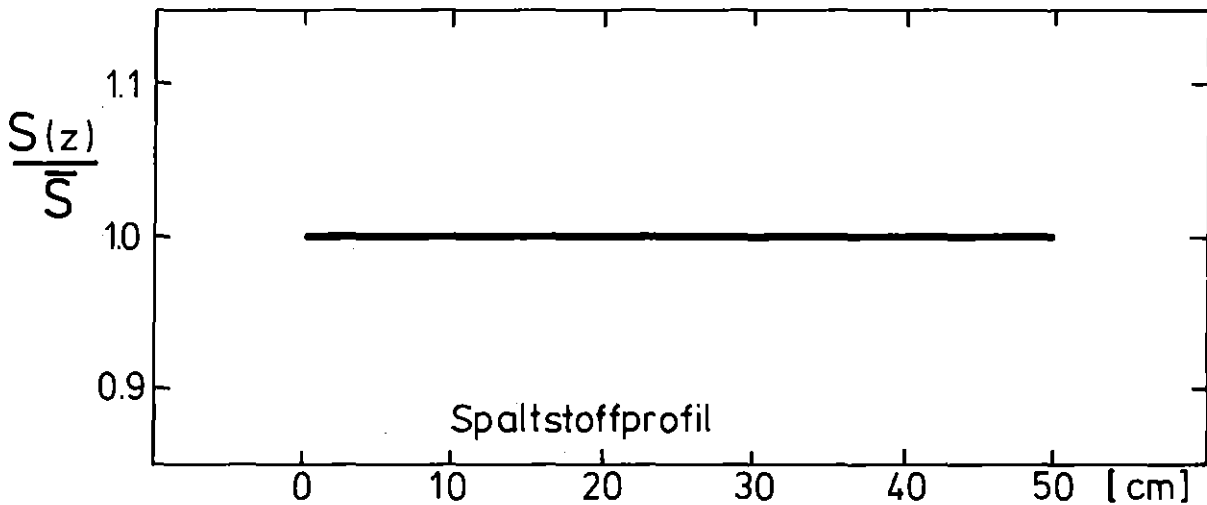
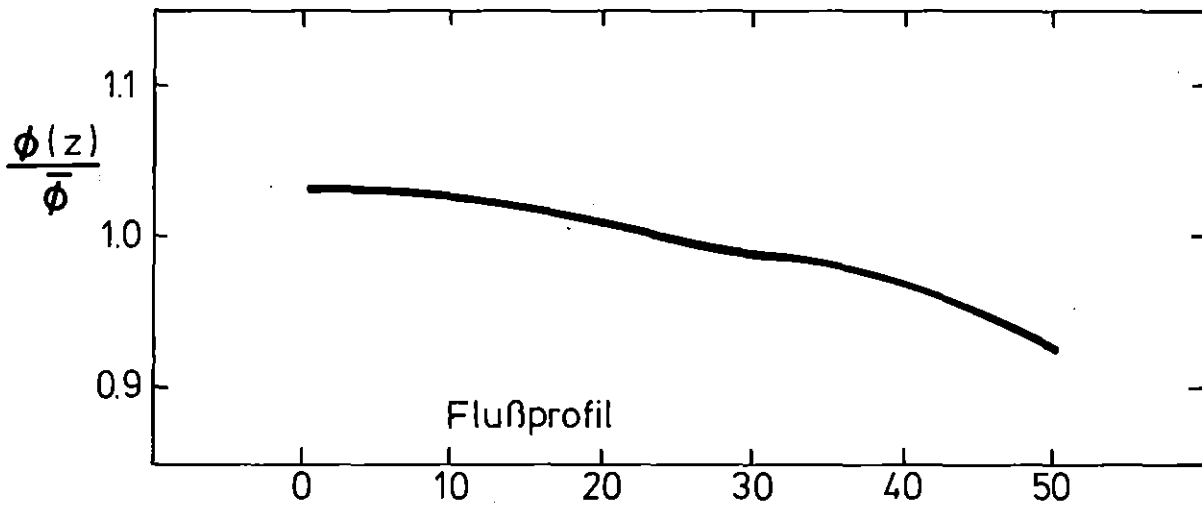
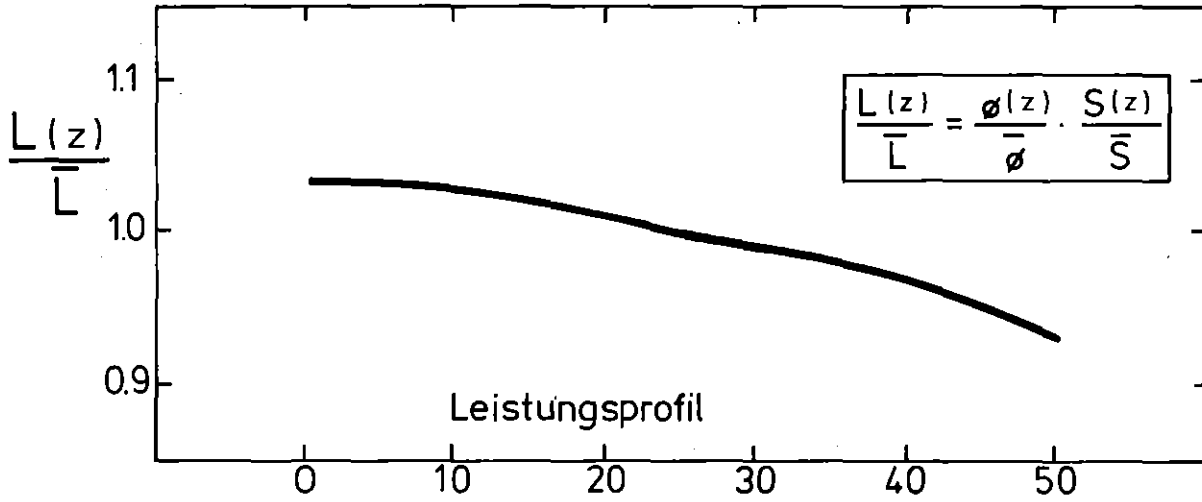


z → Abstand von UKF

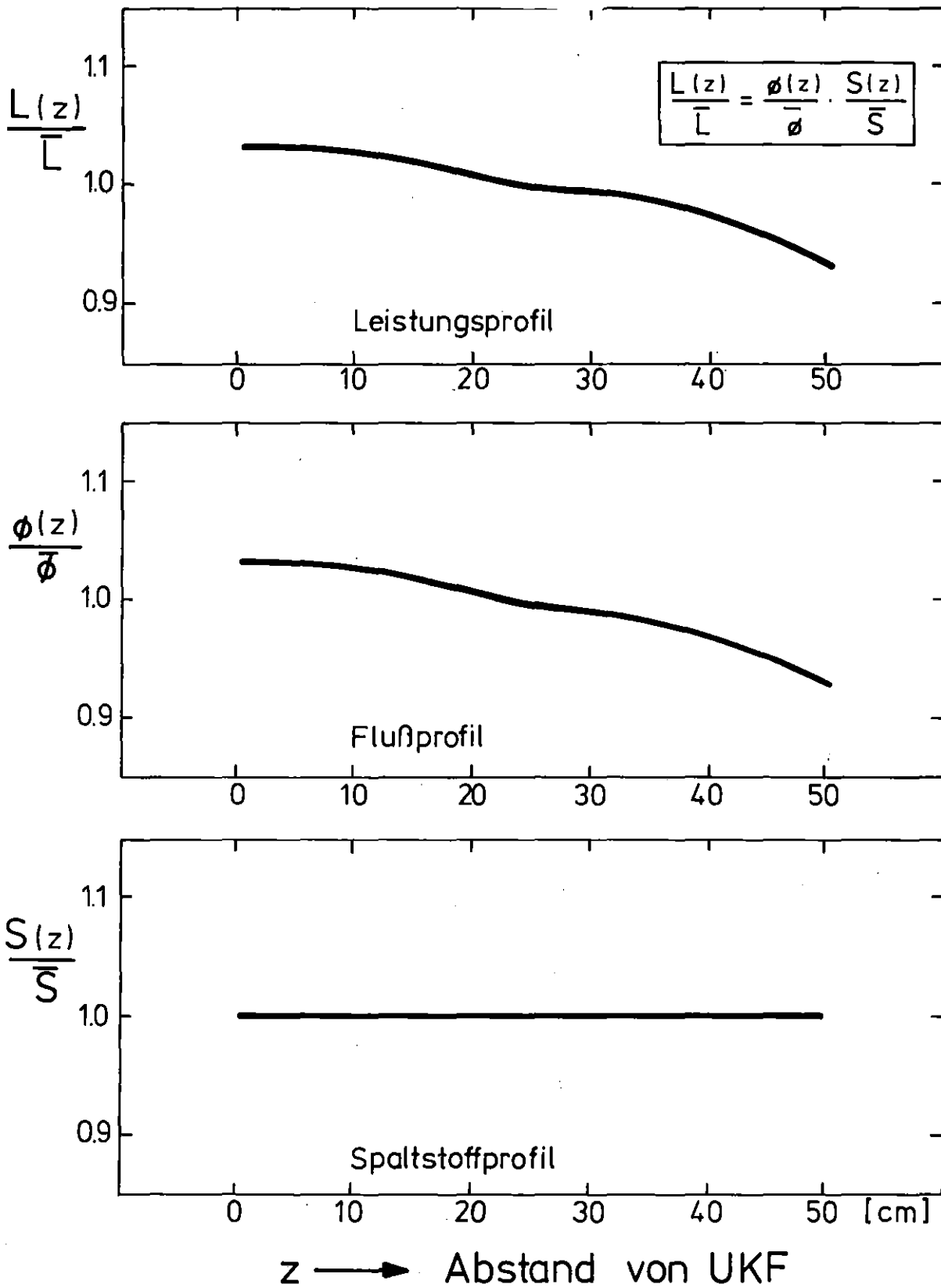




$z \longrightarrow$  Abstand von UKF



$z \longrightarrow$  Abstand von UKF



Normierte Axialprofile am Prüfling

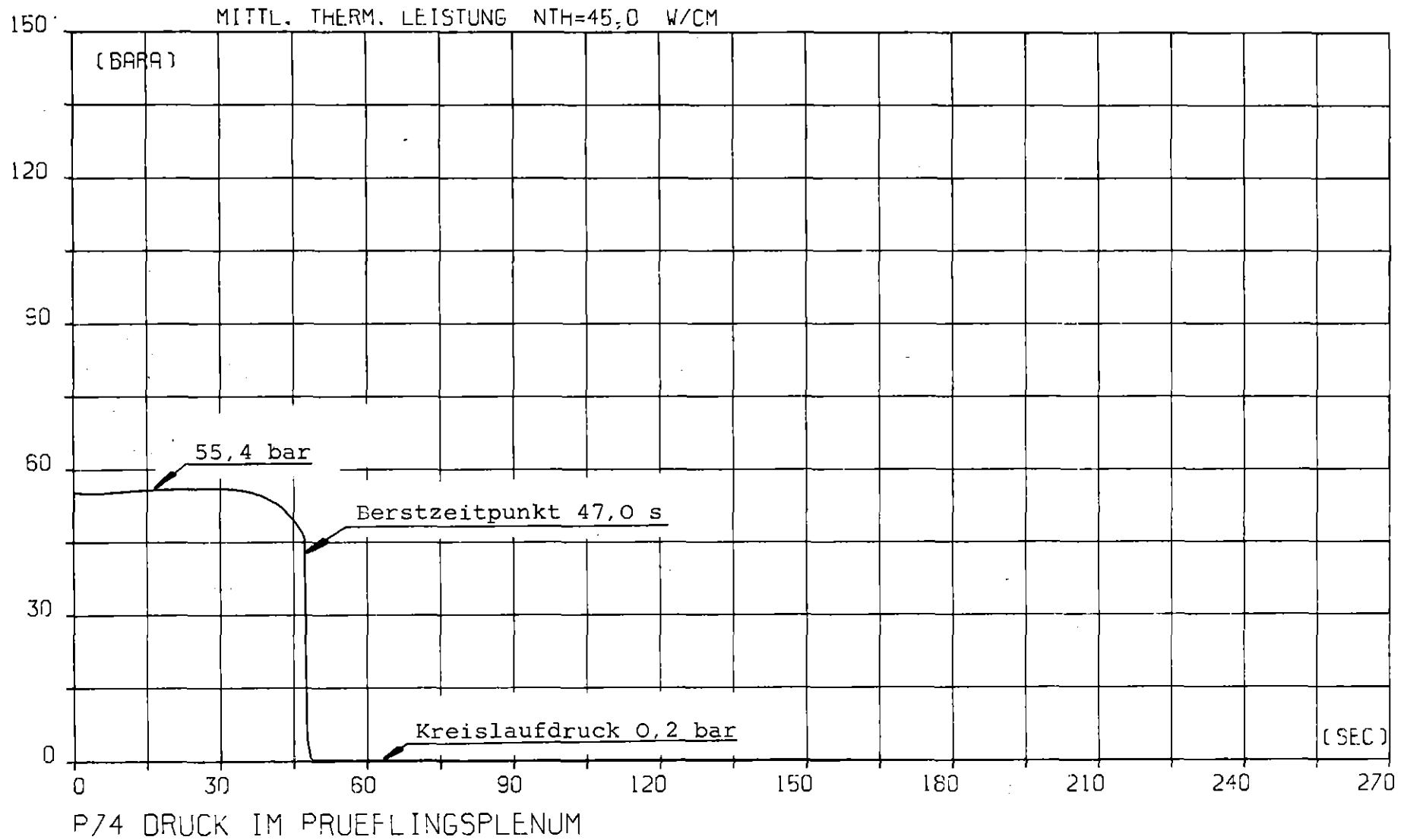
Versuch: C 5

Stab Nr.: 63

Abb.: 12.5

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH C 1  
ABB. 13.1

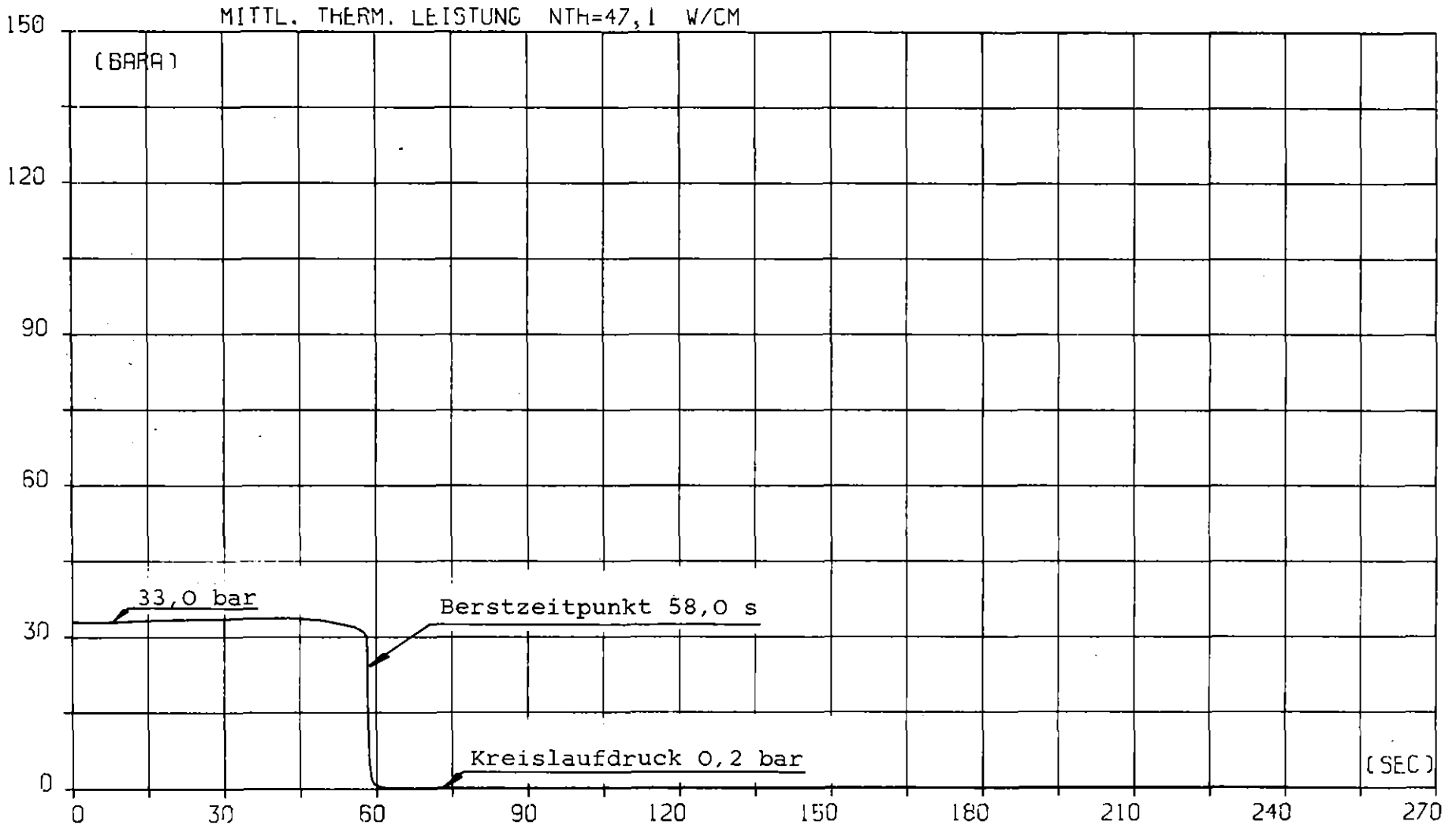
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 1  
VOM 24.04.79 ZEIT 12H13M54S



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : C 2  
VOM 26.04.79 ZEIT 11H47M46S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH C2

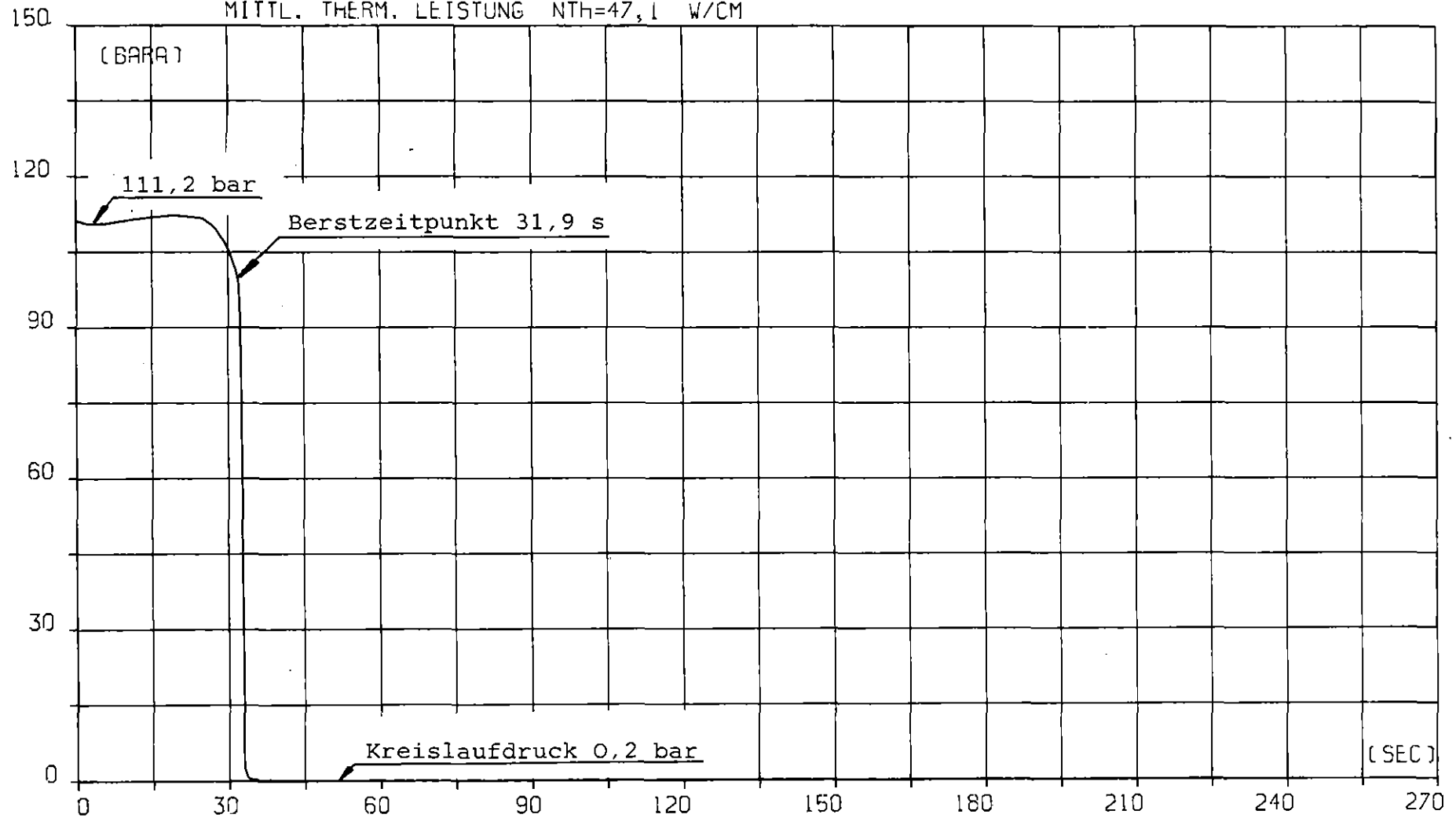
ABB. 13.2



P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 3  
VOM 02.05.79 ZEIT 12H00M47S

MITTL. THERM. LEISTUNG  $N_{Th}=47,1$  W/CM



P74 DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM

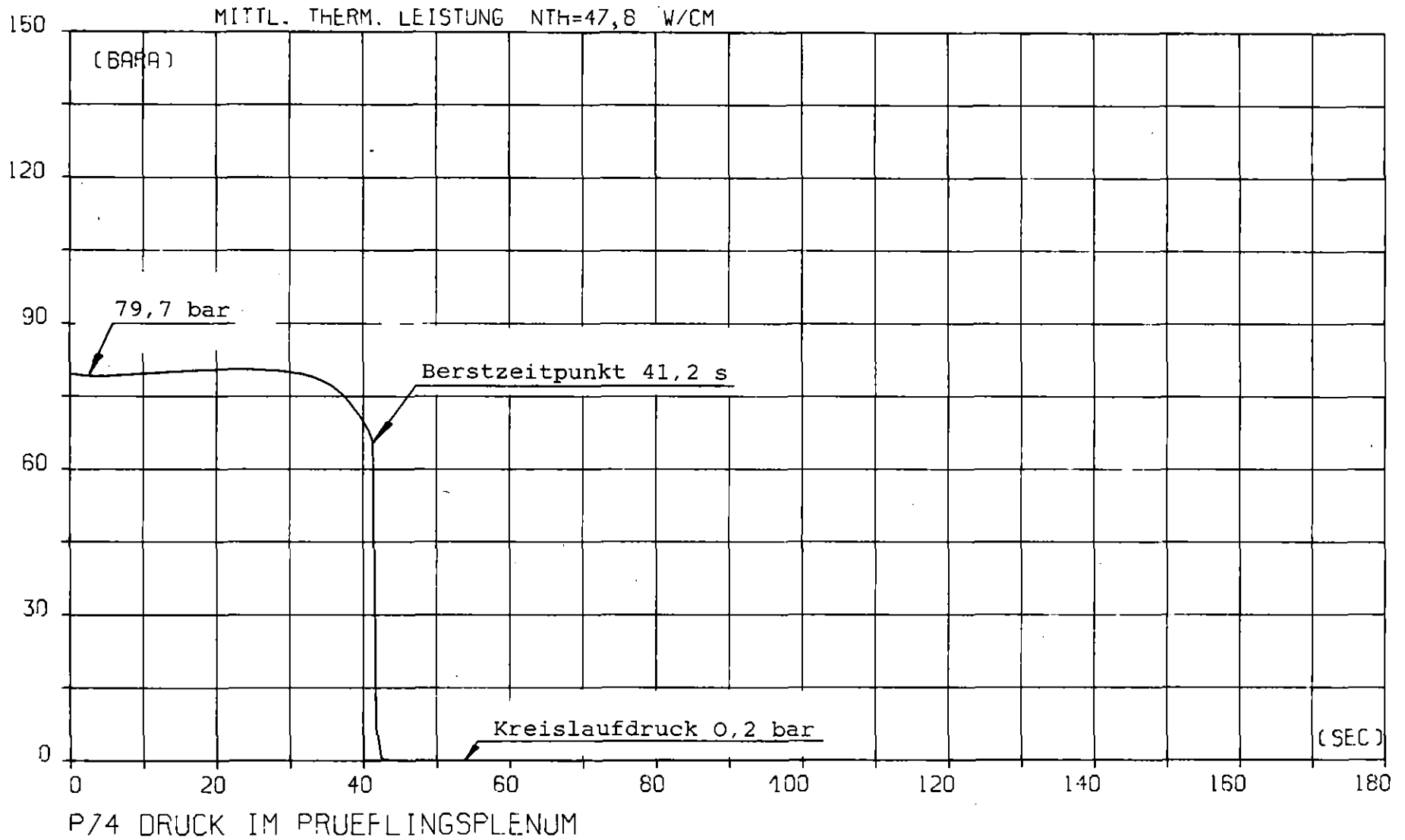
DRUCK IM PRUEFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH C3

ABB. 13.3

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 4  
VOM 04.05.79 ZEIT 11H29M46S

DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) IM VERSUCH C4

ABB. 13.4

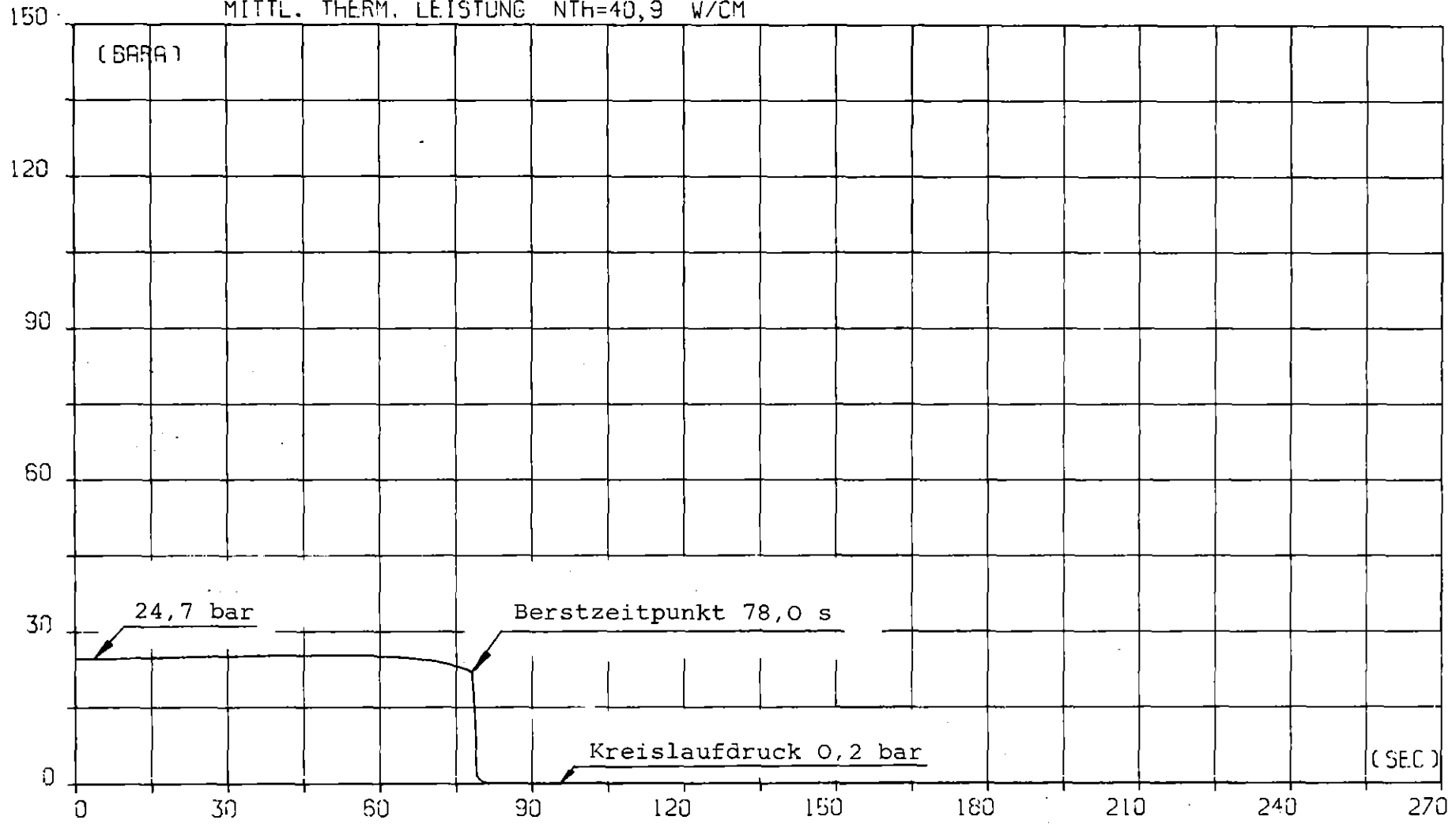


DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM (P74) - IM VERSUCH C 5

ABB. 13.5

PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 5  
VOM 08.05.79 ZEIT 11H36M27S

MITTL. THERM. LEISTUNG  $N_{th}=40,9$  W/CM

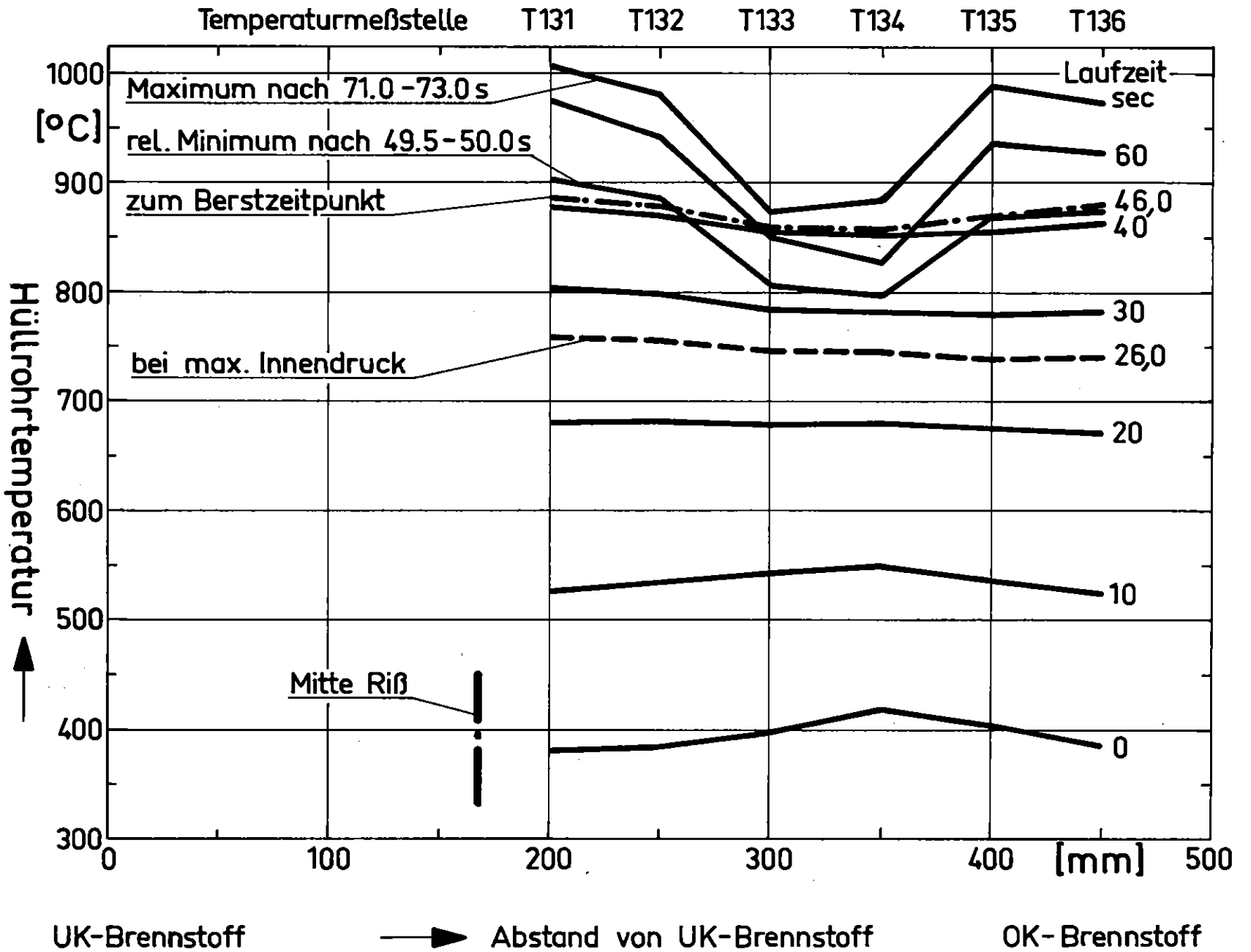


P74 DRUCK IM PRÜFLINGSPLENUM



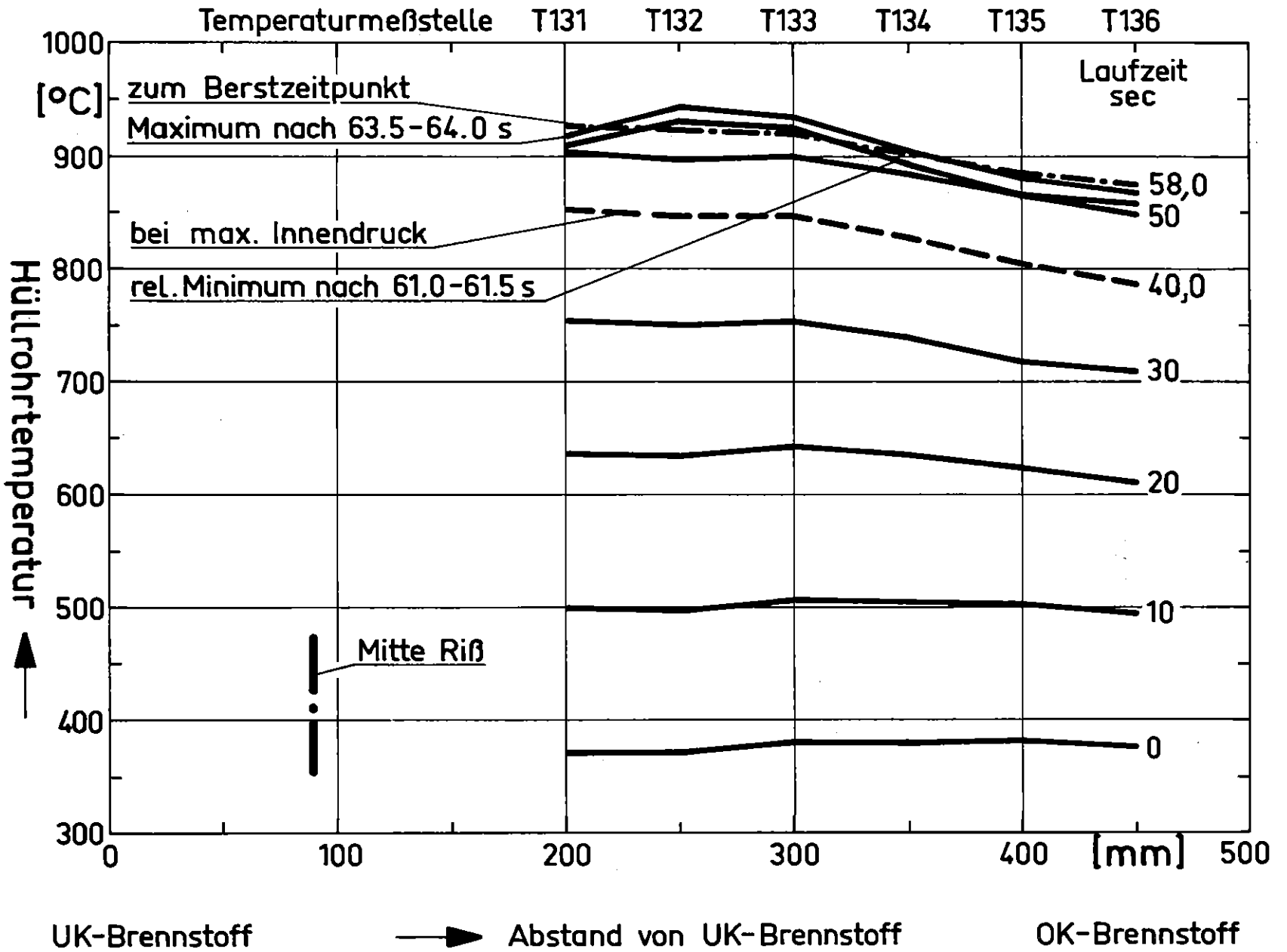
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: C1 Abb.: 14.1

KIK IT 1979  
 PNS 4237-84.31



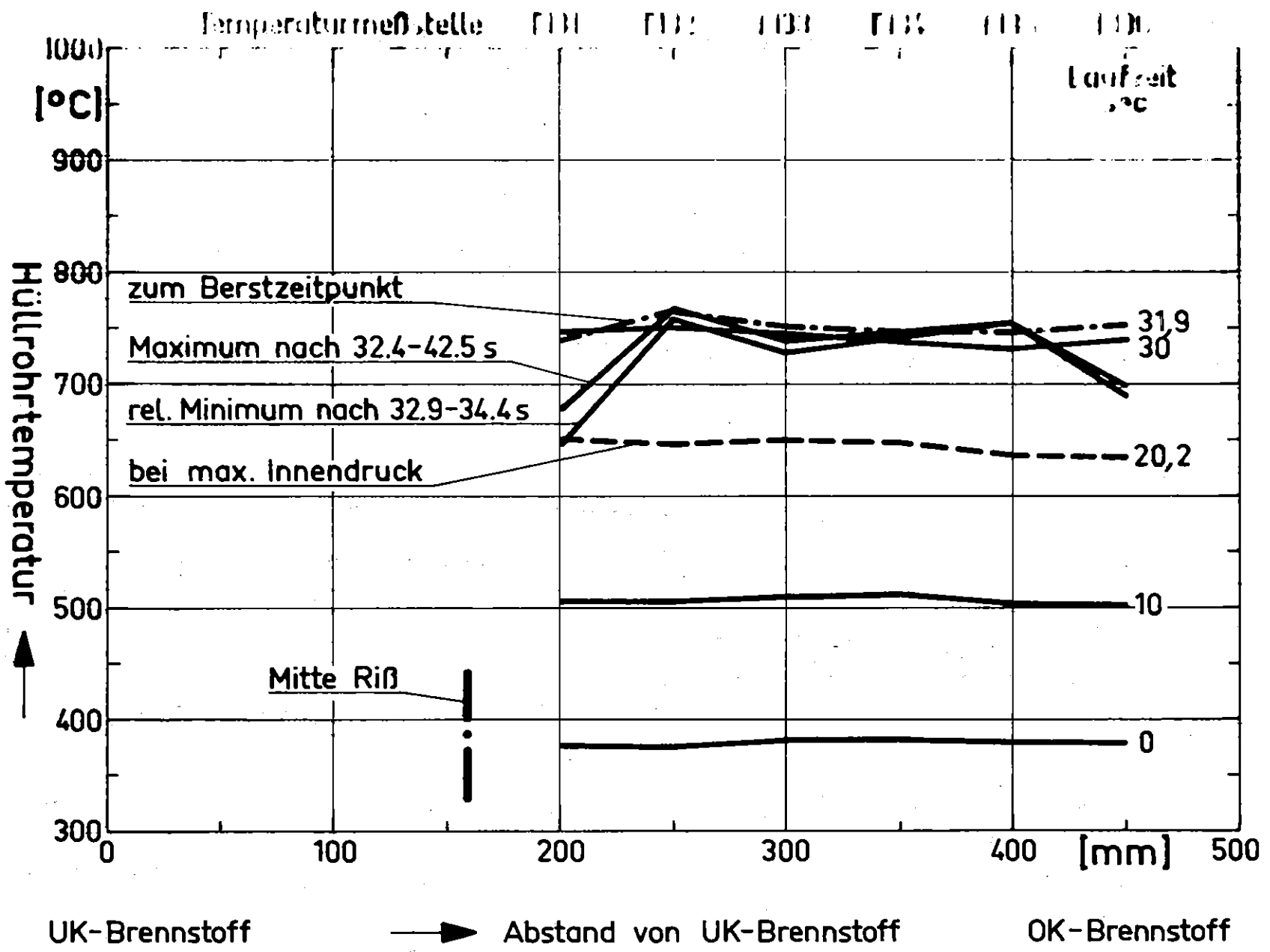
In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: C2 Abb.: 14.2

KfK IT 1979  
 PNS 4237-84.32



Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Typisches Temperaturprofil Versuch: C3 Abb.: 14.3

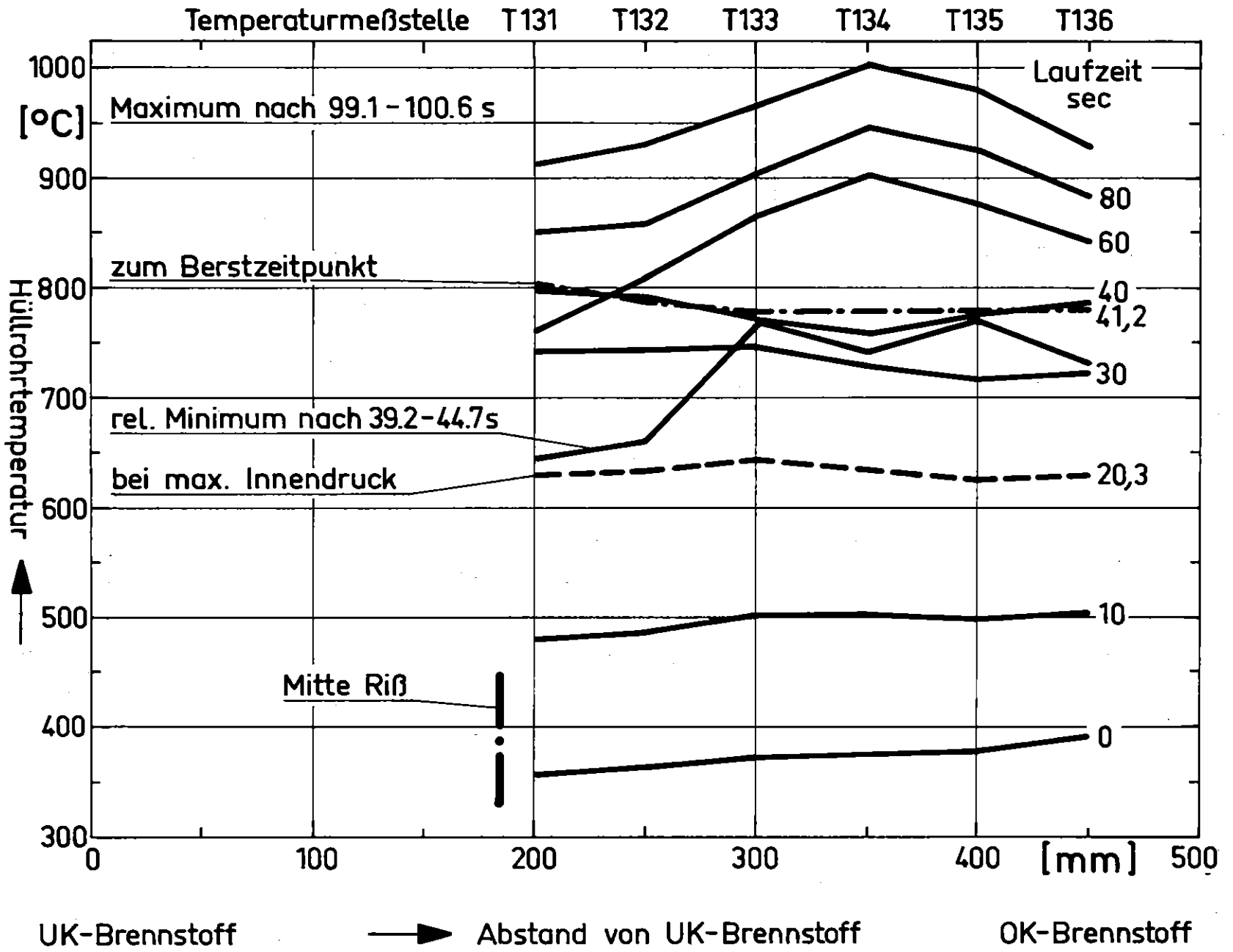
KfK IT 1979  
 PNS 4237-84.33



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: C4

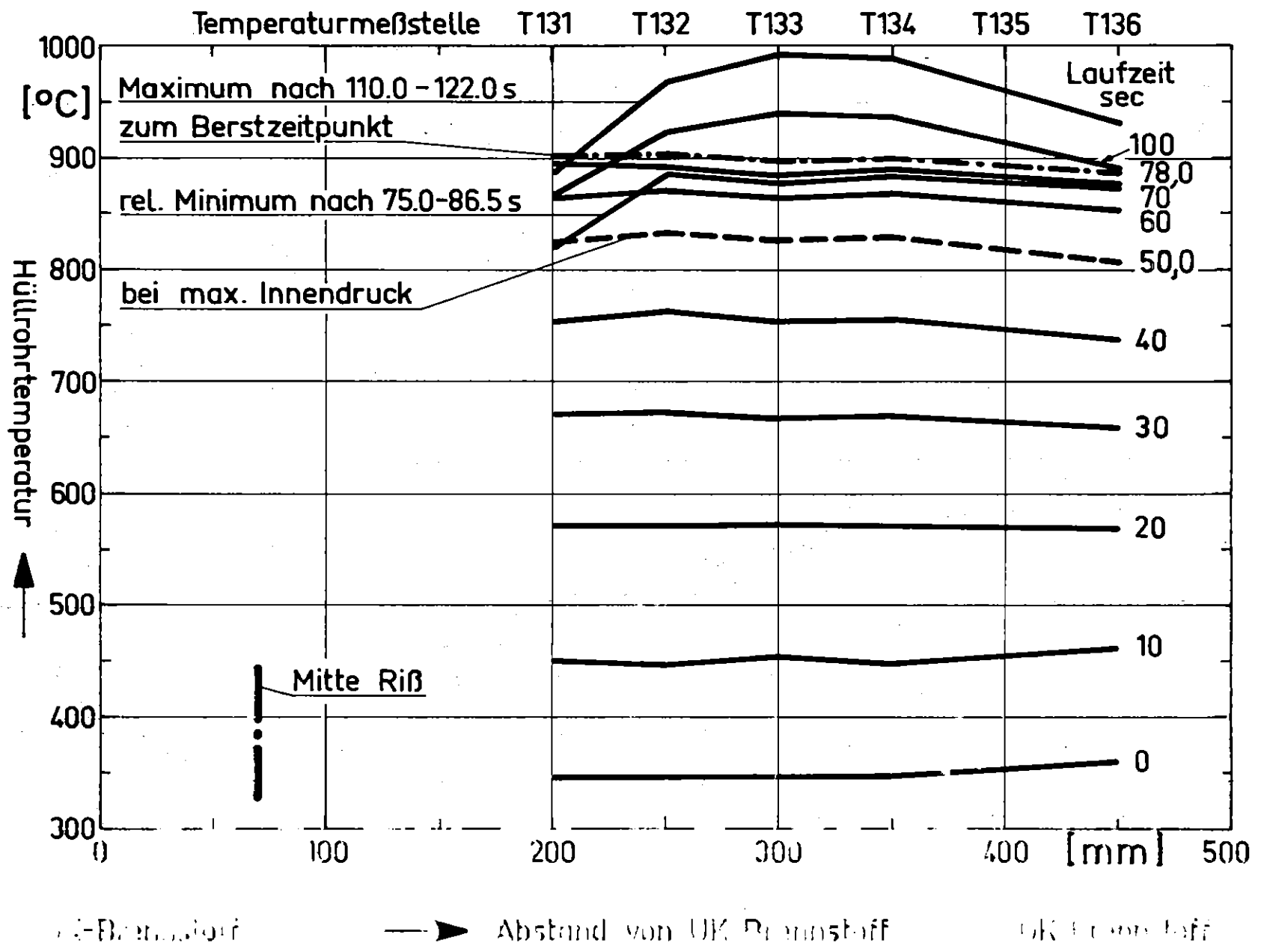
Abb.: 14.4

KfK IT 1979  
 PNS 4237-84.34



In-Pile-Versuche zum Brennstabversagen  
 Axiales Temperaturprofil Versuch: C5 Abb.: 14

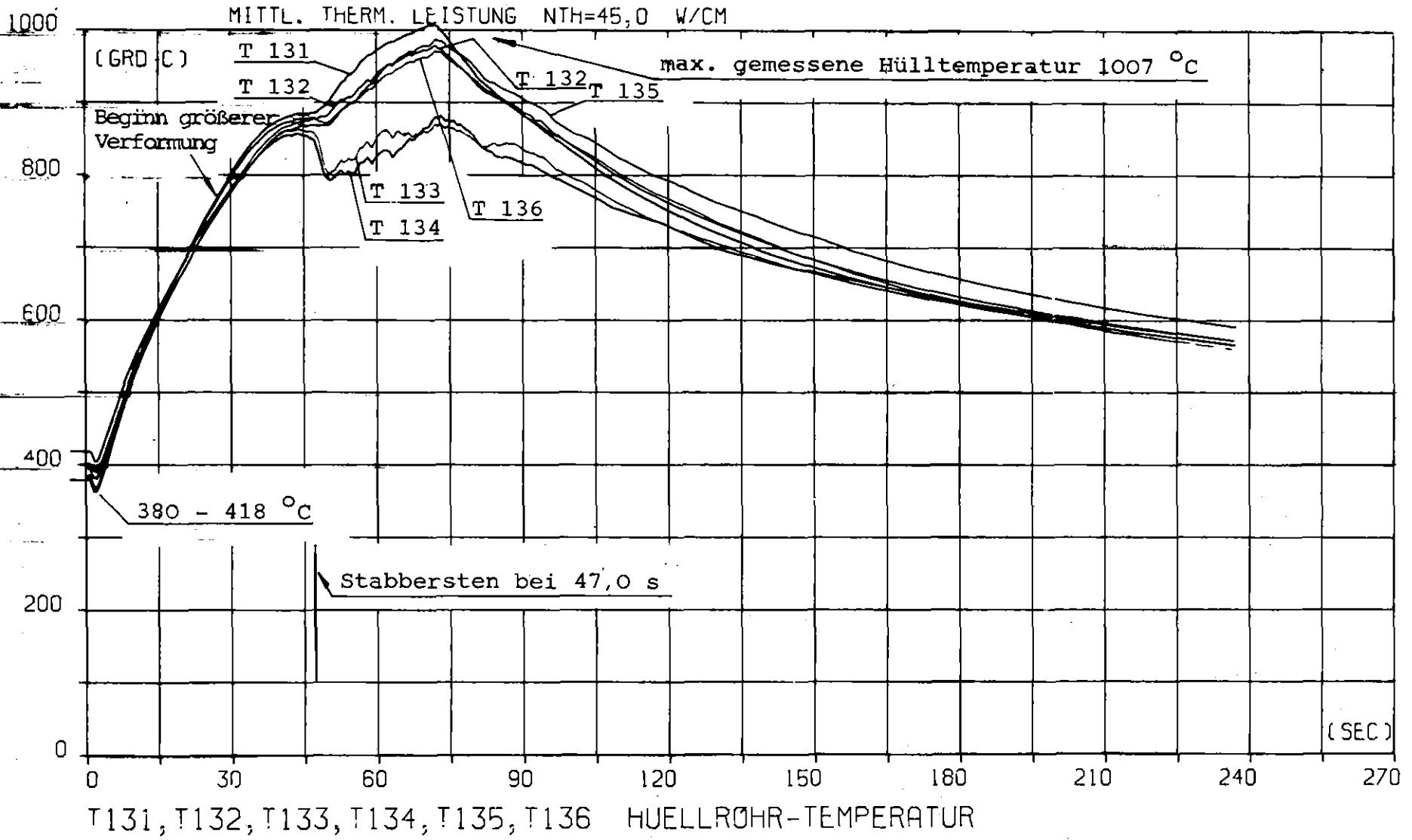
KIK  
 IT 1379  
 PNC 4287-001



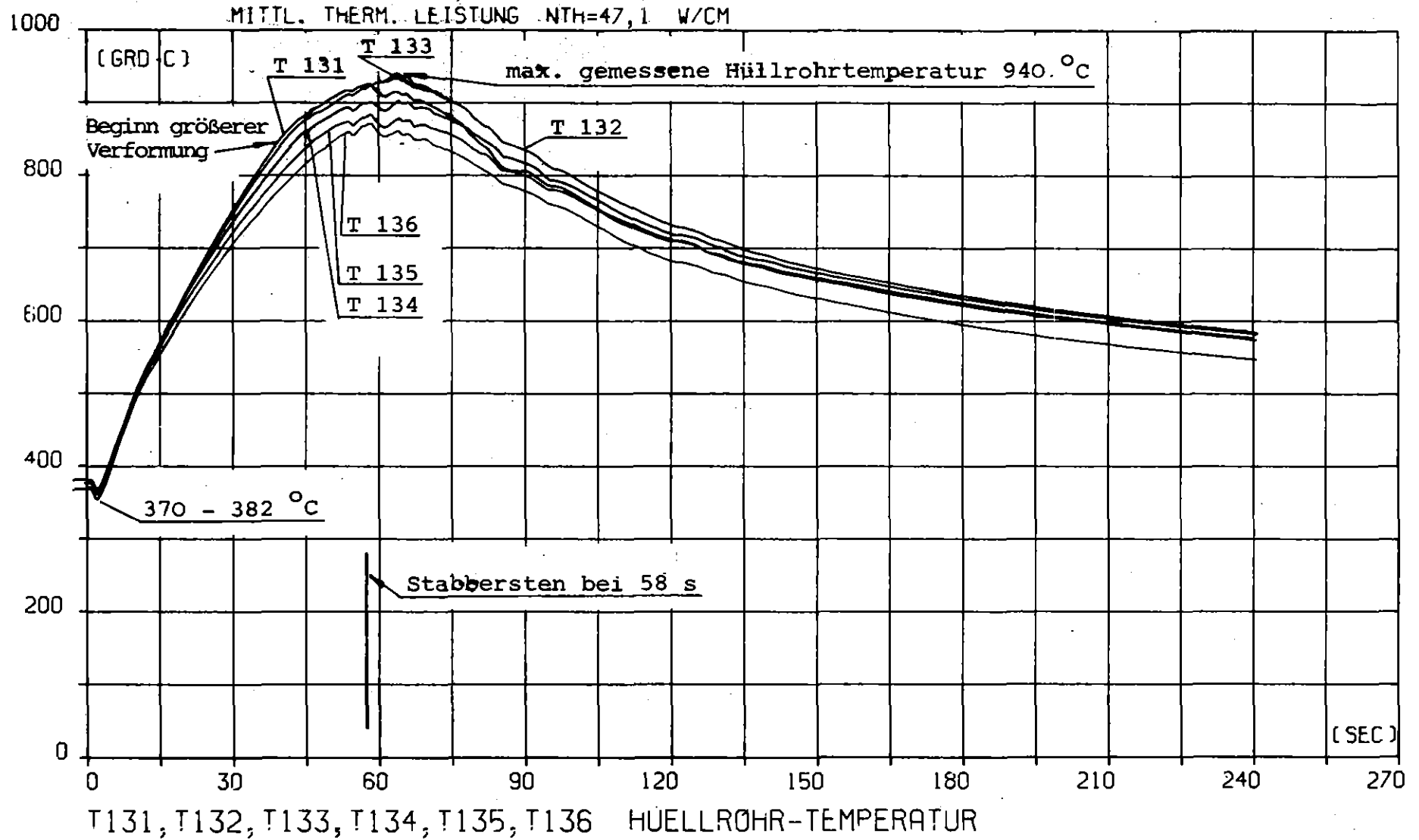
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 1  
 VOM 24.04.79 ZEIT 12H13M54S

HÜLLTEMPERATUREN T131 - T136 IM VERSUCH C1

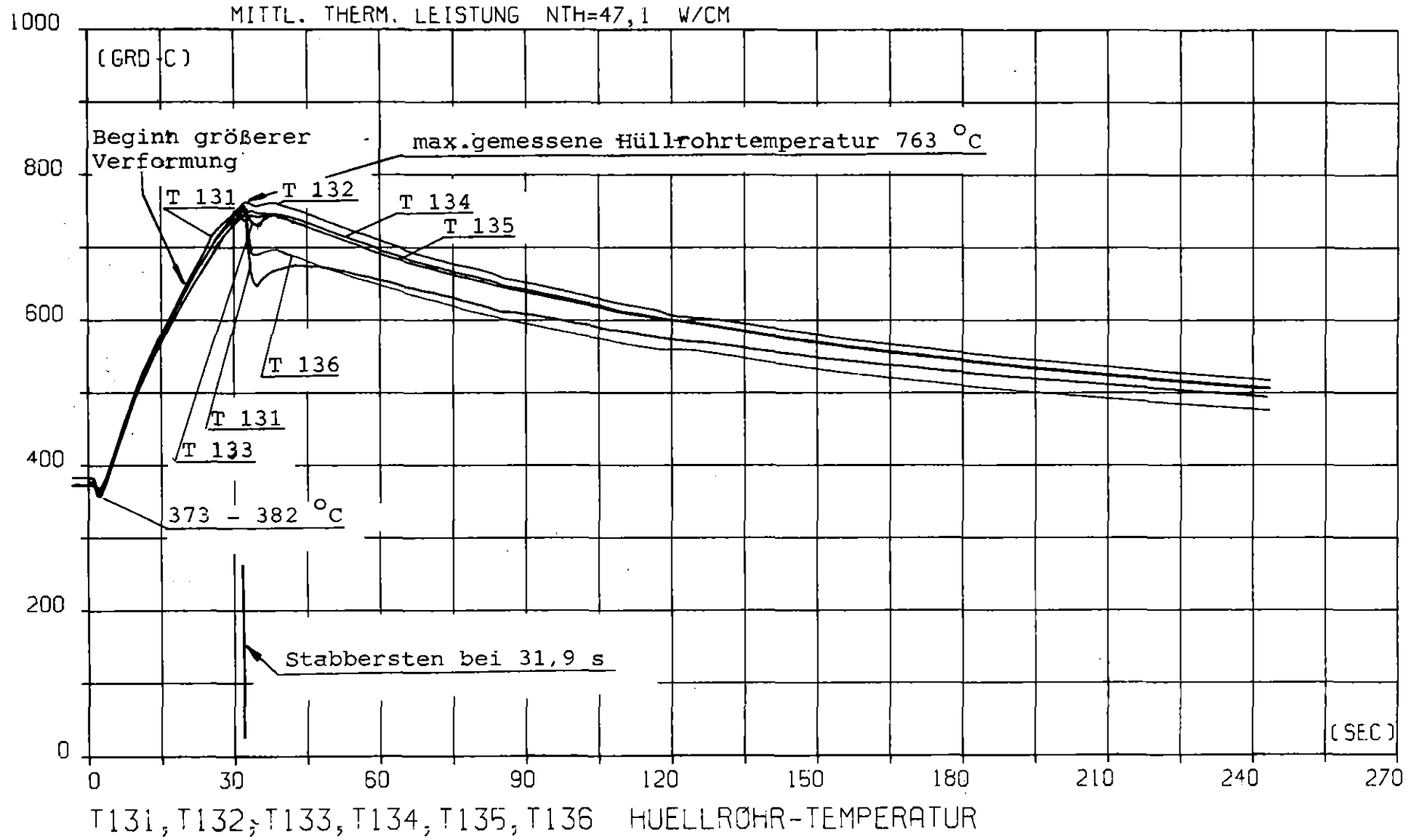
ABB. 15.1



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 2  
 VOM 26.04.79 ZEIT 11H47M46S



PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. : C 3  
 VOM 02.05.79 ZEIT 12H00M47S

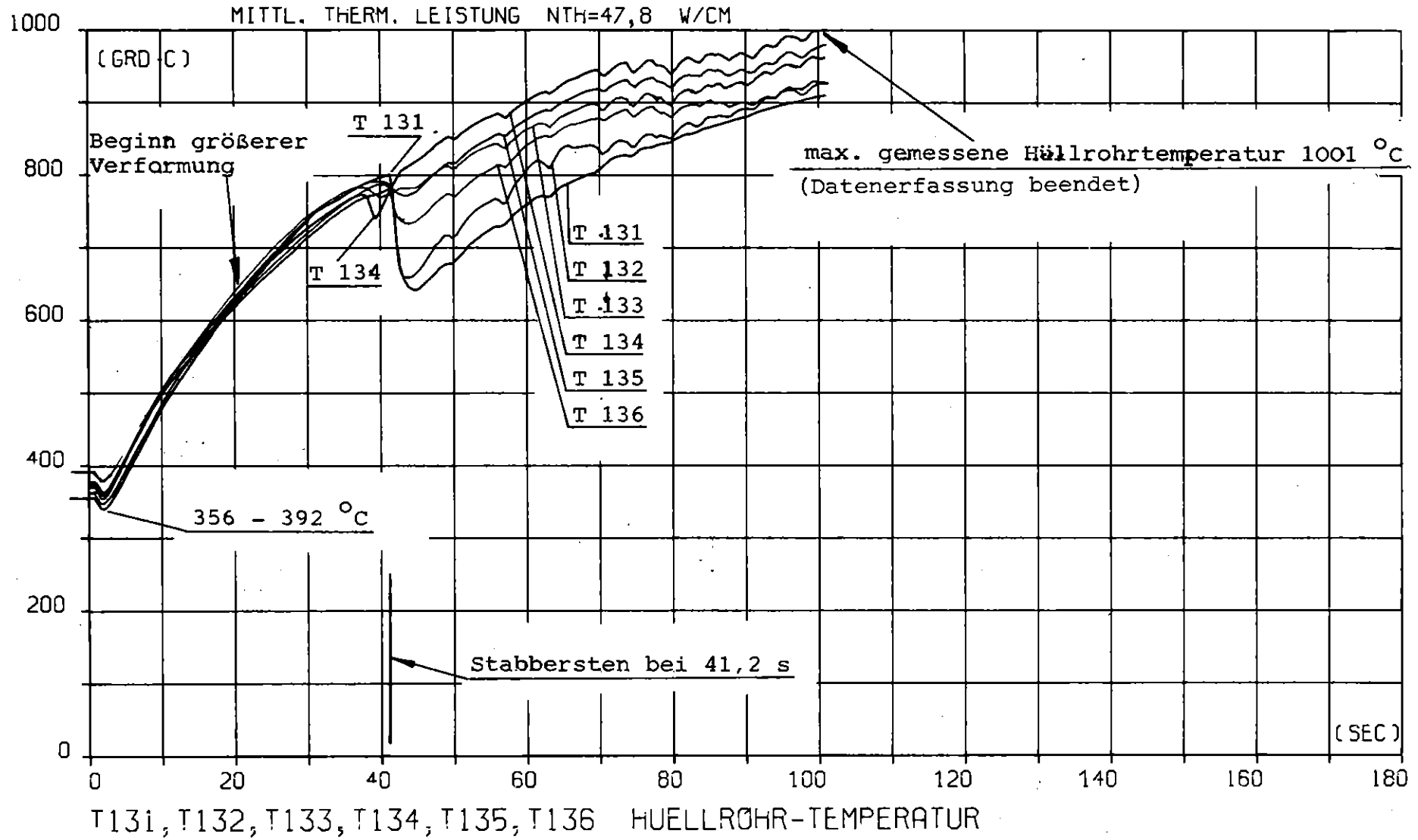


HÜLLTEMPERATUREN T131 - T136 IM VERSUCH C3

ABB. 15.3

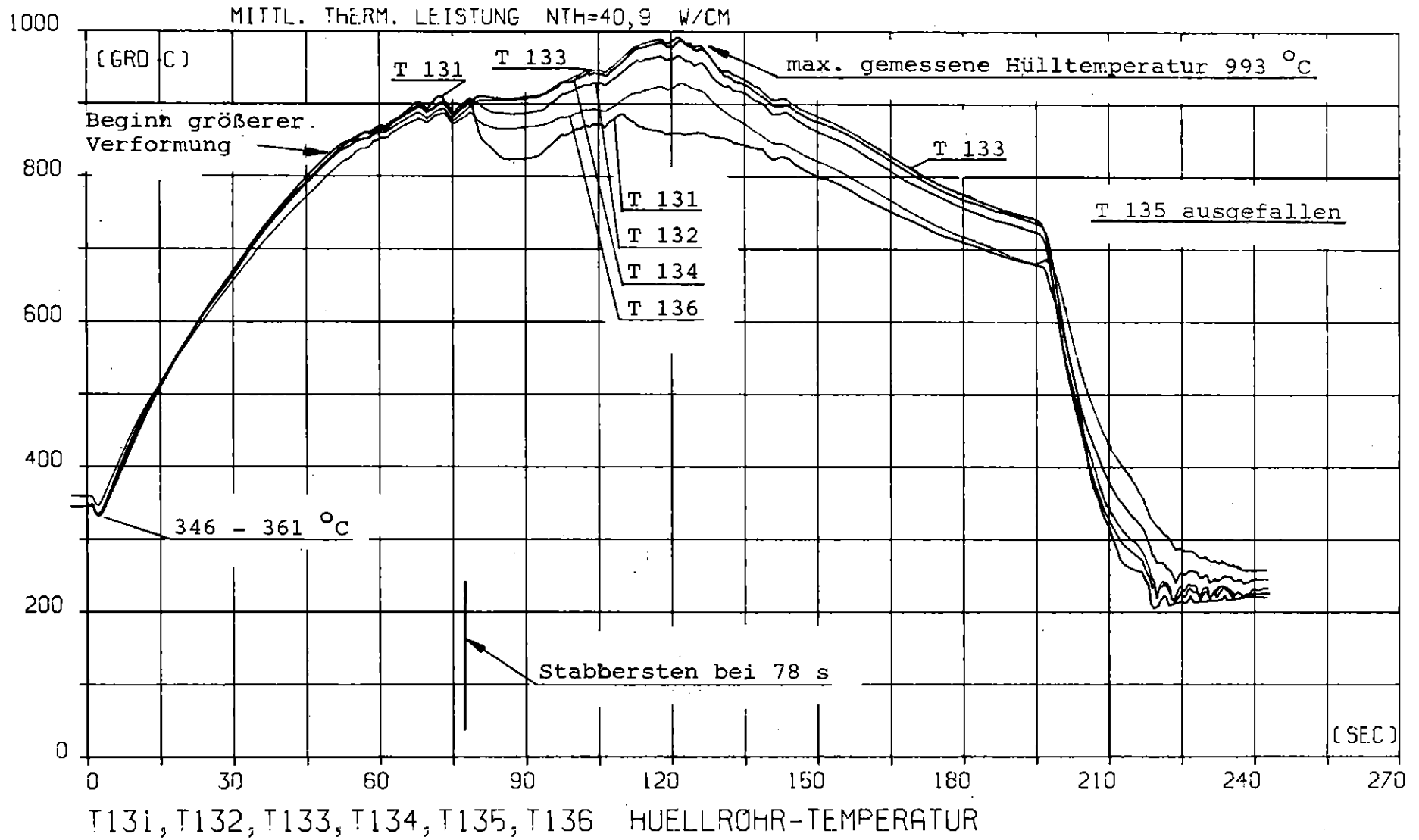


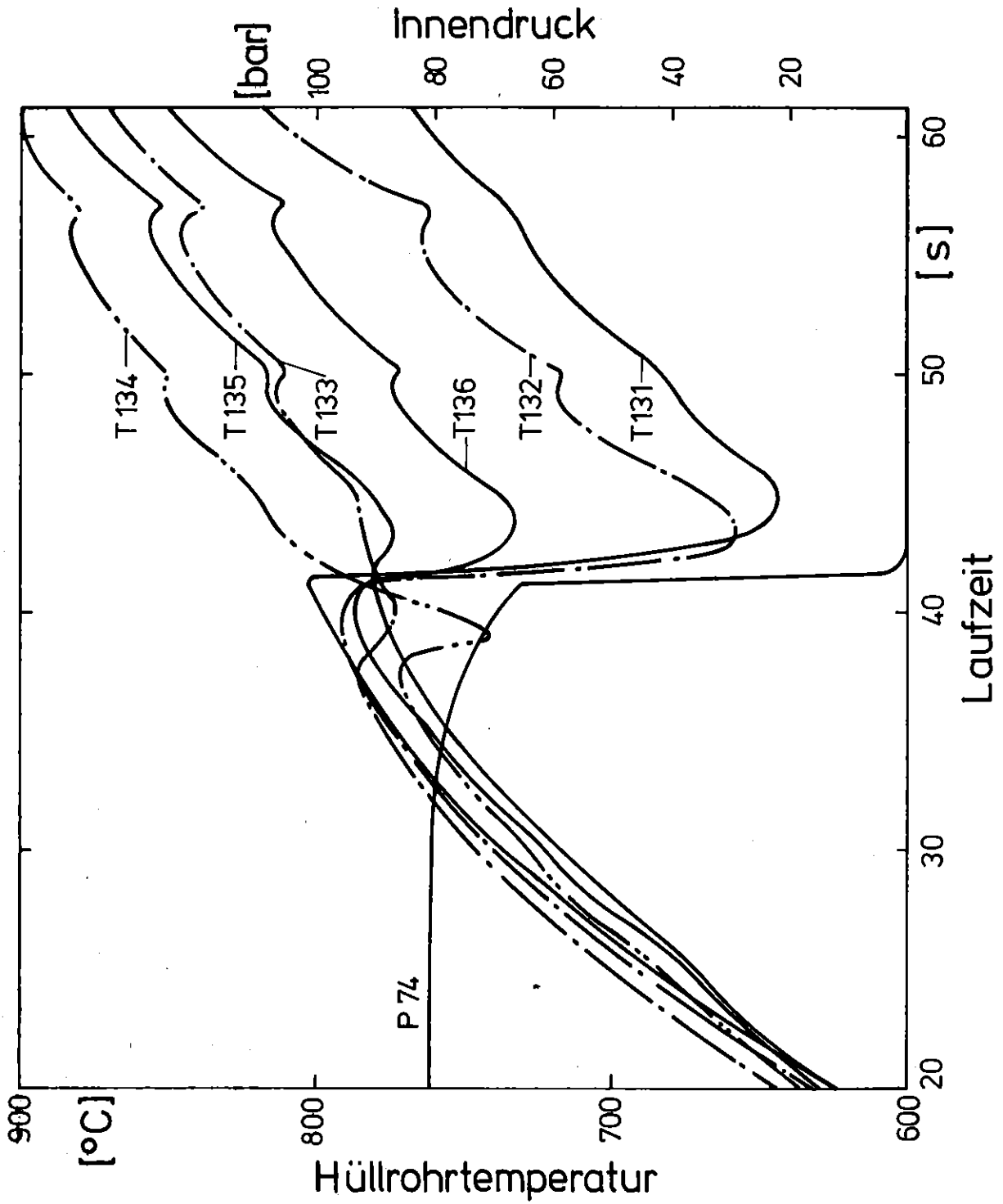
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 4  
 VOM 04.05.79 ZEIT 11H29M46S



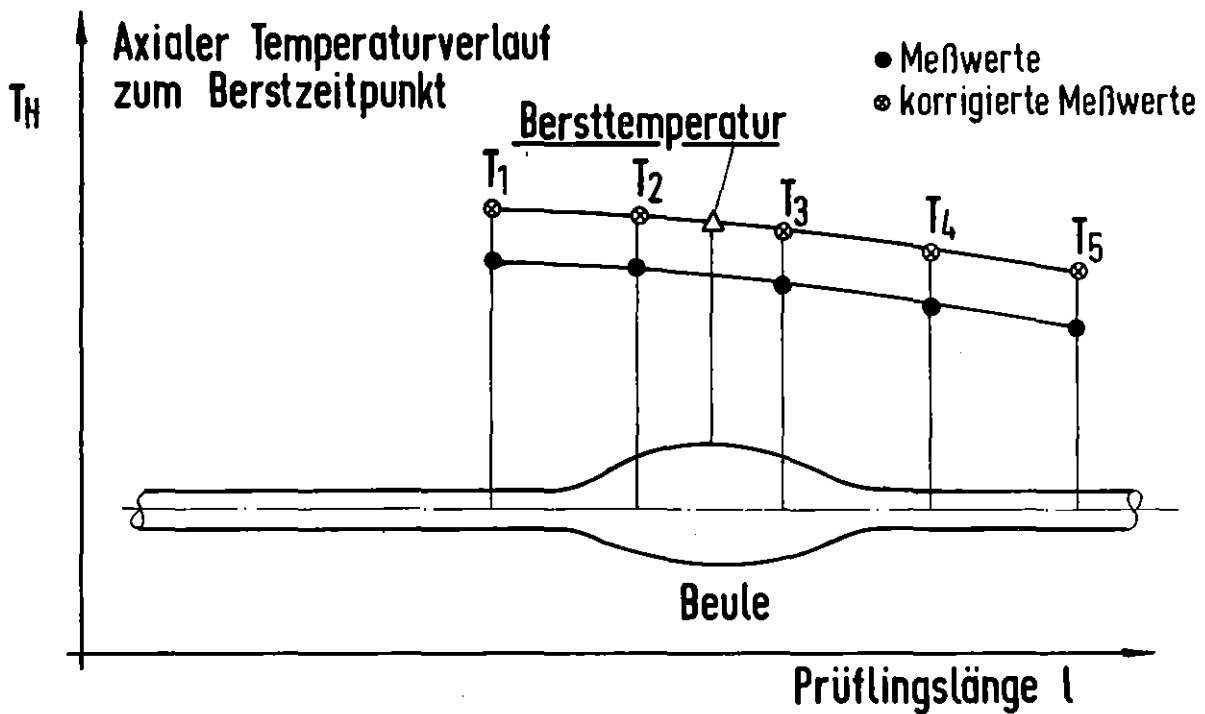
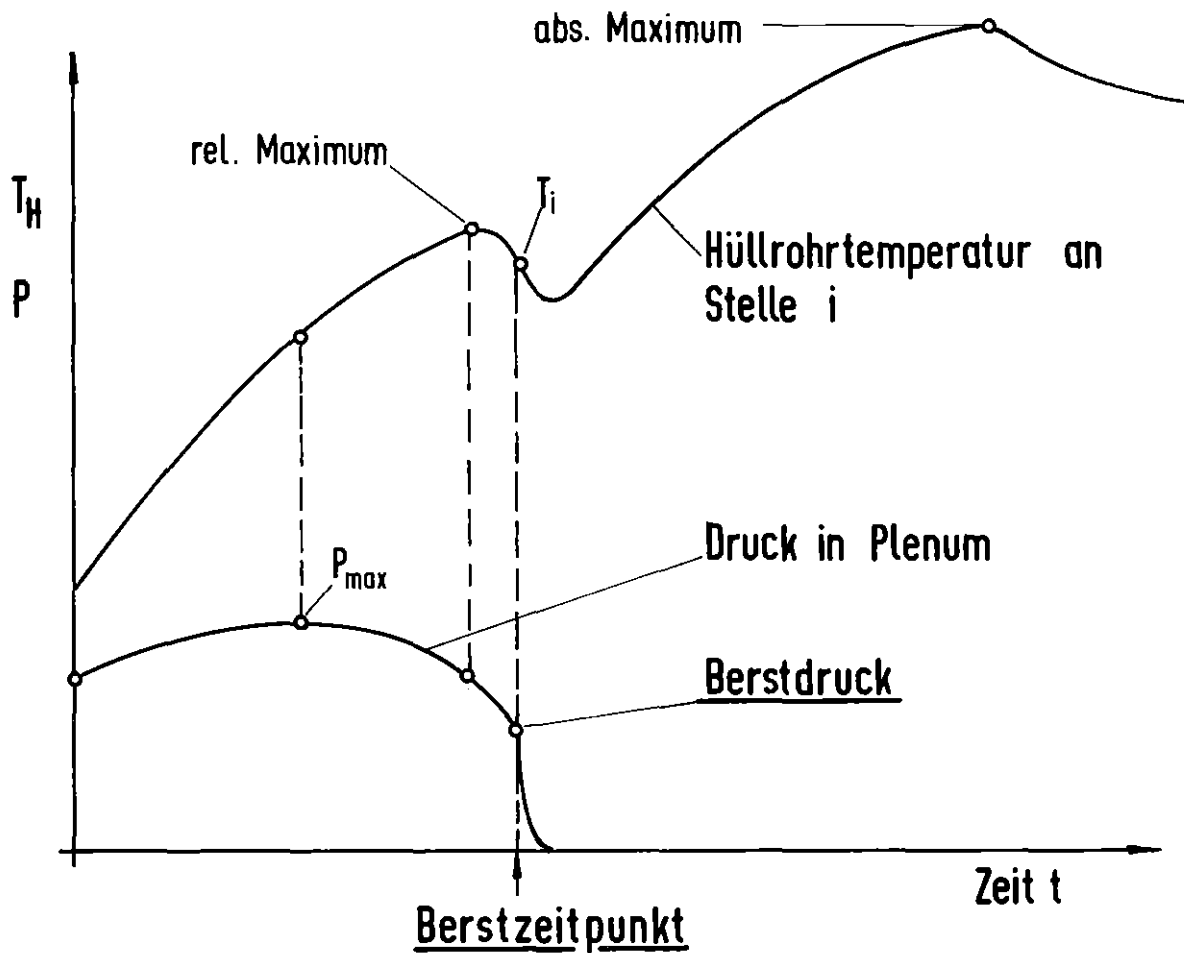
PROJEKT PNS 4237 - VERS. NR. C 5  
 VOM 08.05.79 ZEIT 11H36M27S

HÜLLROHRTEMPERATUREN T131 - T136 IM VERSUCH C 5  
 ABB. 15.5





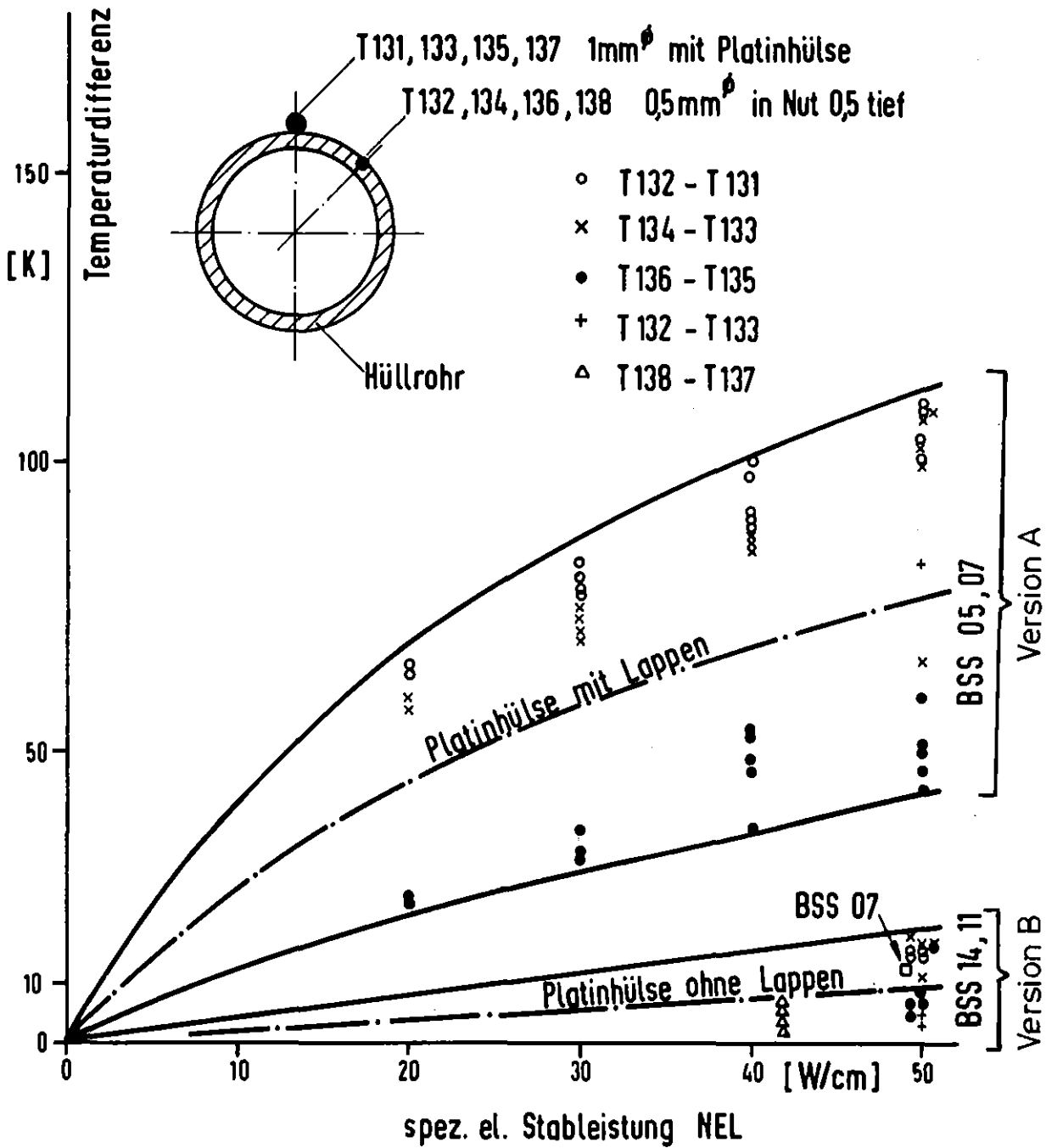
**KfK** IT 81  
PNS 4237-602



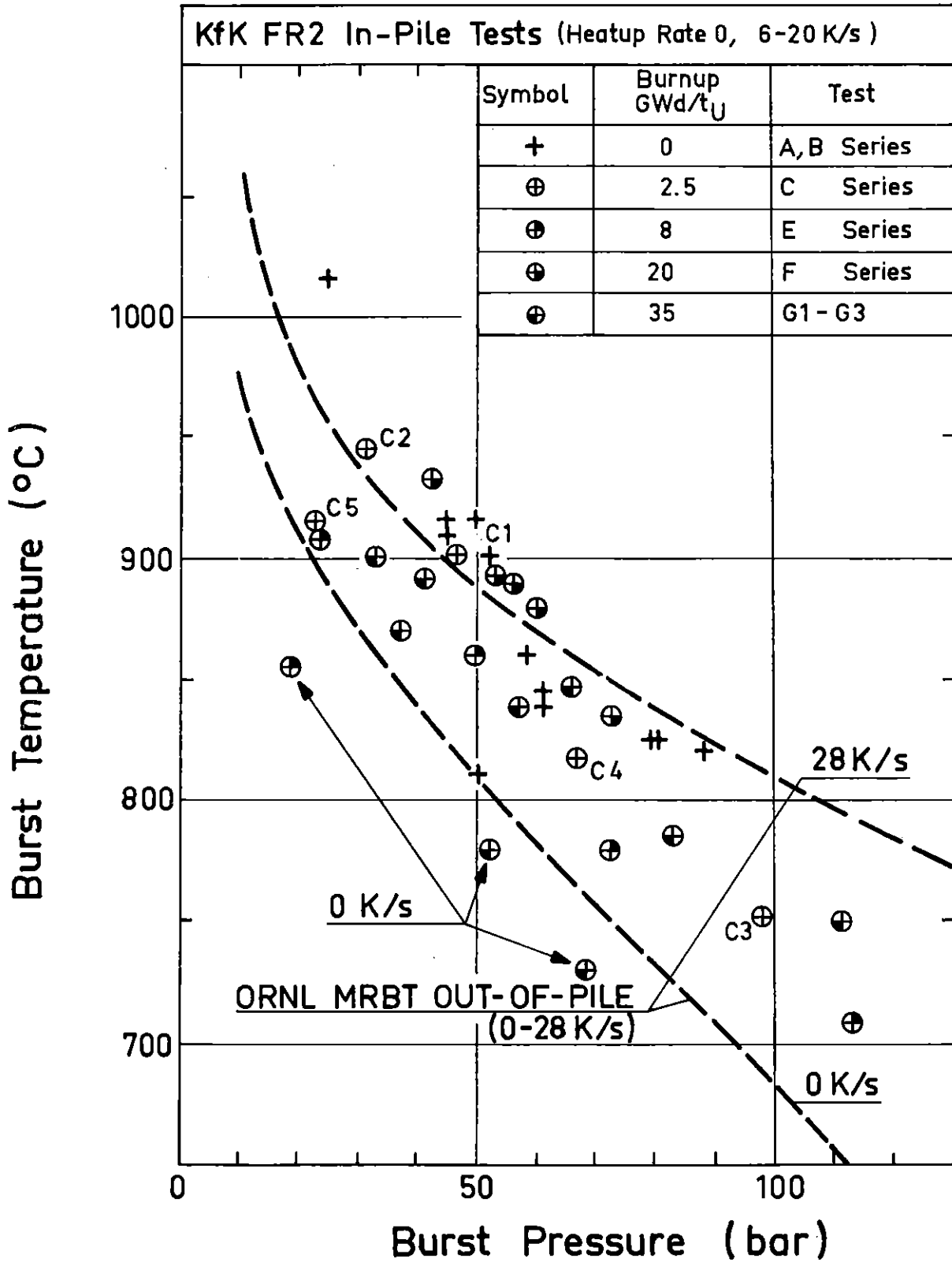
RBT/IT-1977  
PNS-4237-91,1

Schema zur Definition von Bersttemperatur und Berstdruck

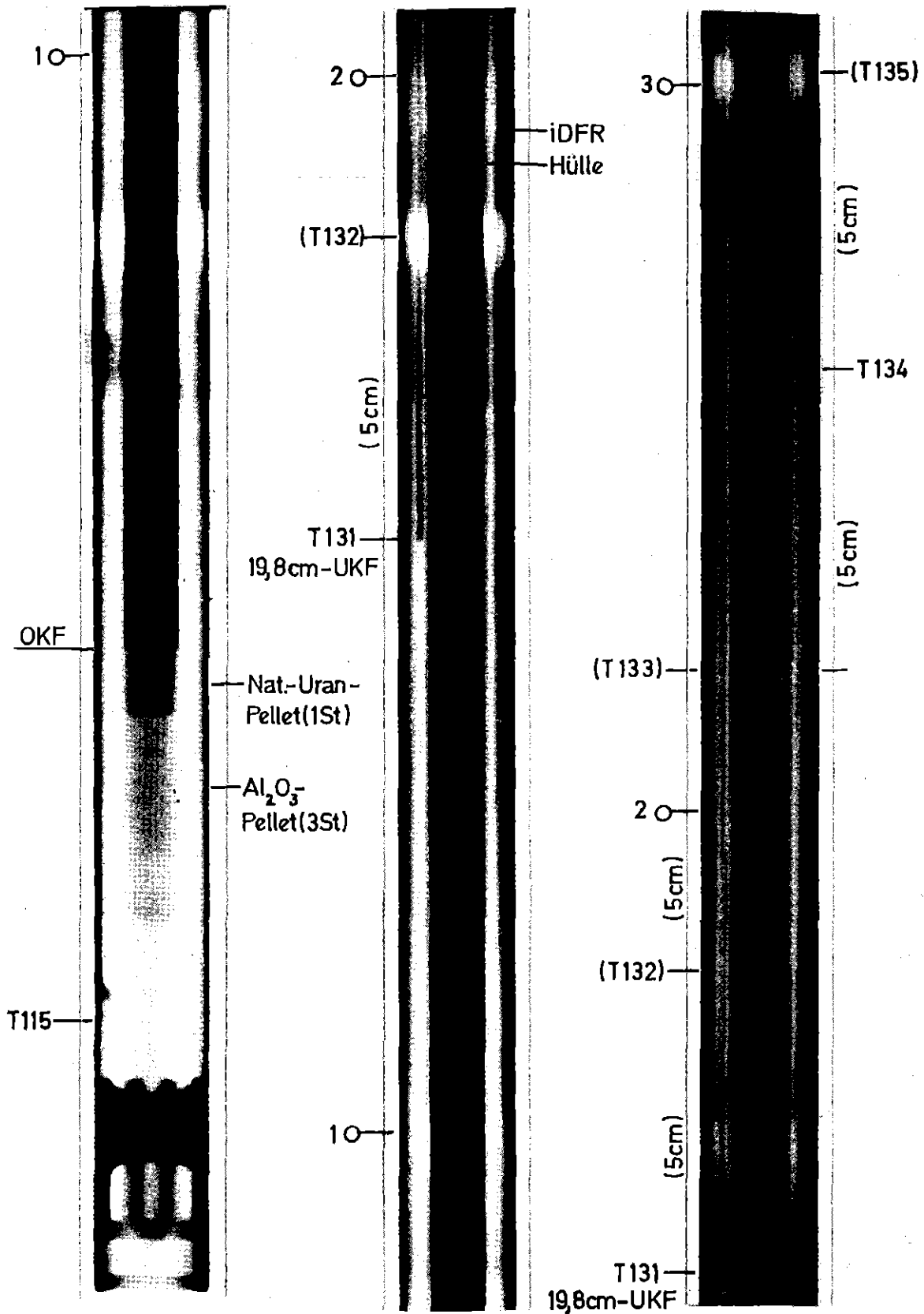
Abb.:17



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



**FR2 In-Pile Single Rod Test in Steam**  
**Burst Temperature vs. Burst Pressure Abb.: 19**

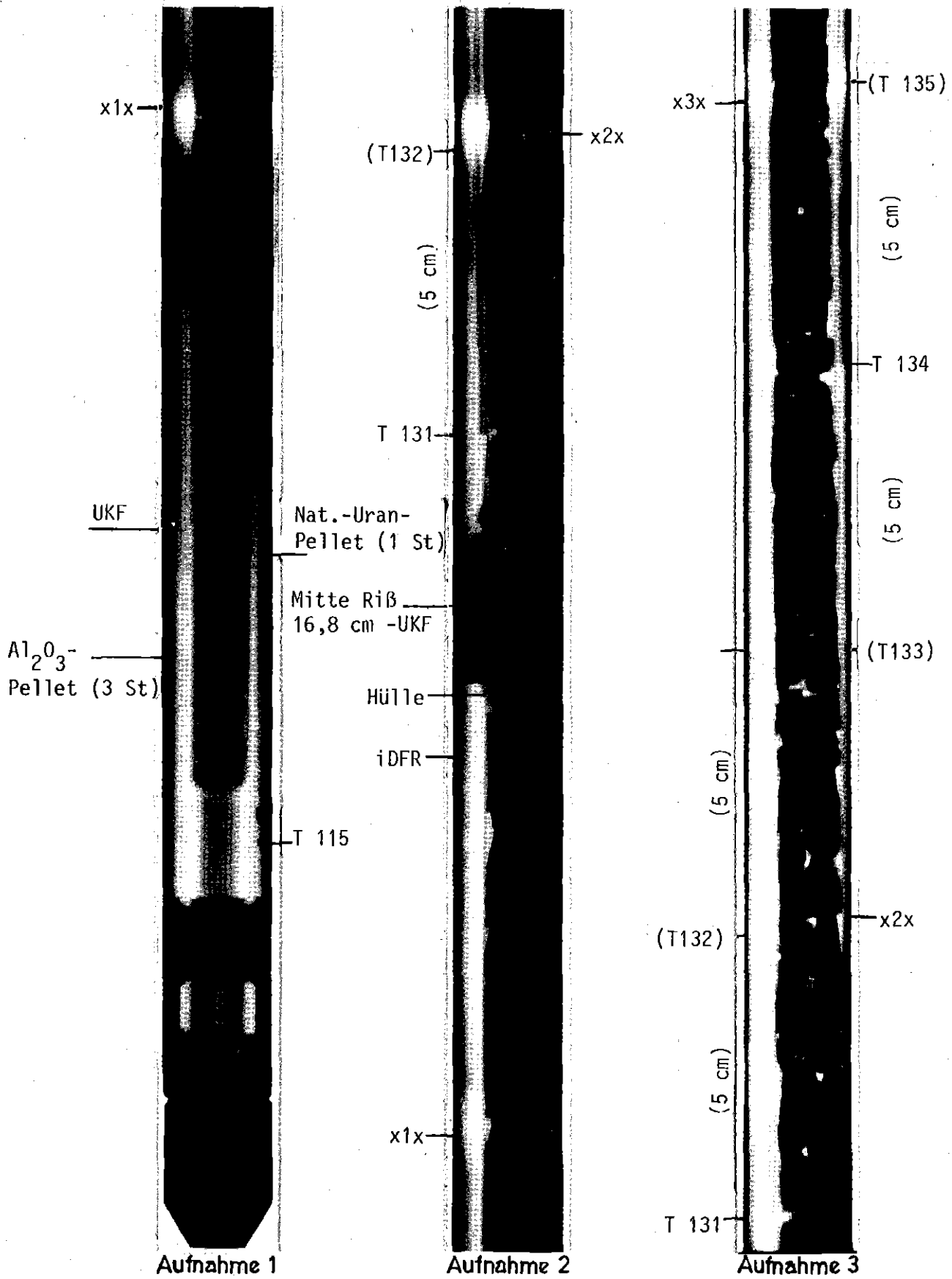


Aufnahme 1

Aufnahme 2

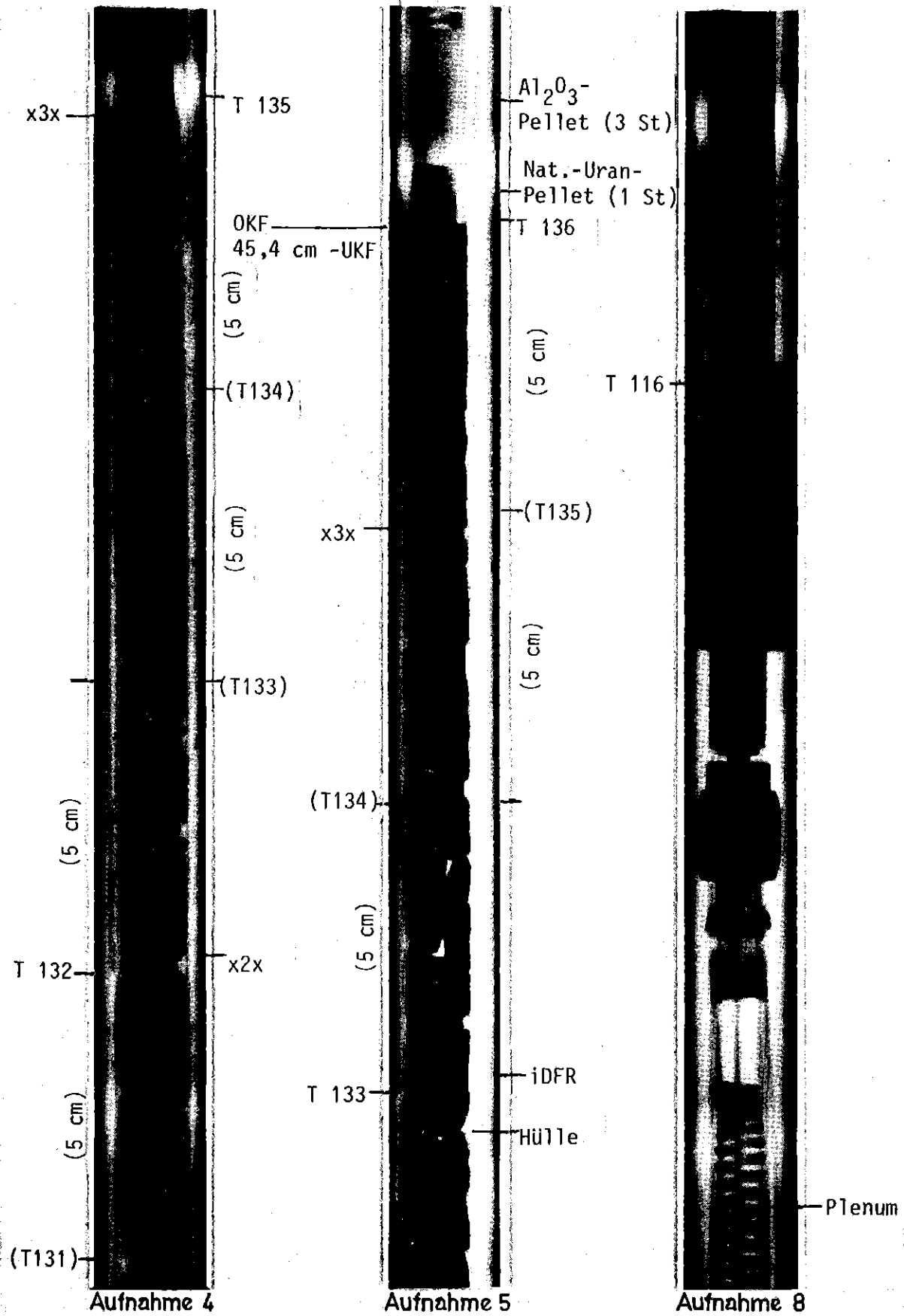
Aufnahme 3

**KfK** IT-80  
PNS4237-498

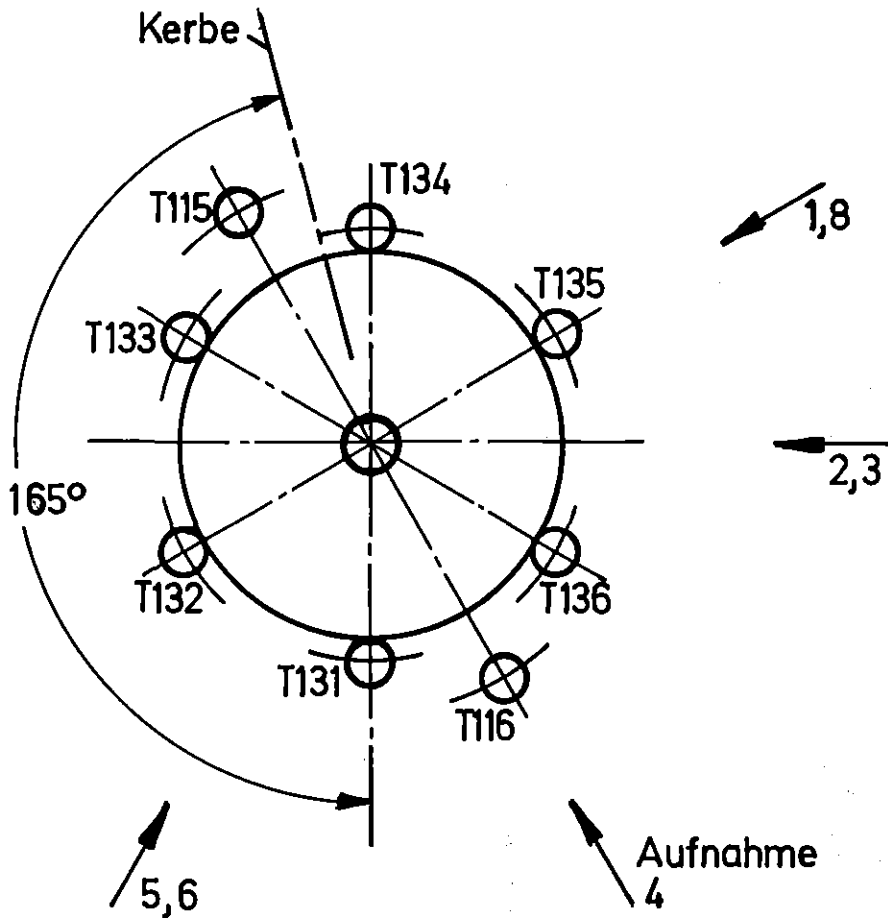


**KIK**  
KIT-80  
PNS4237-499

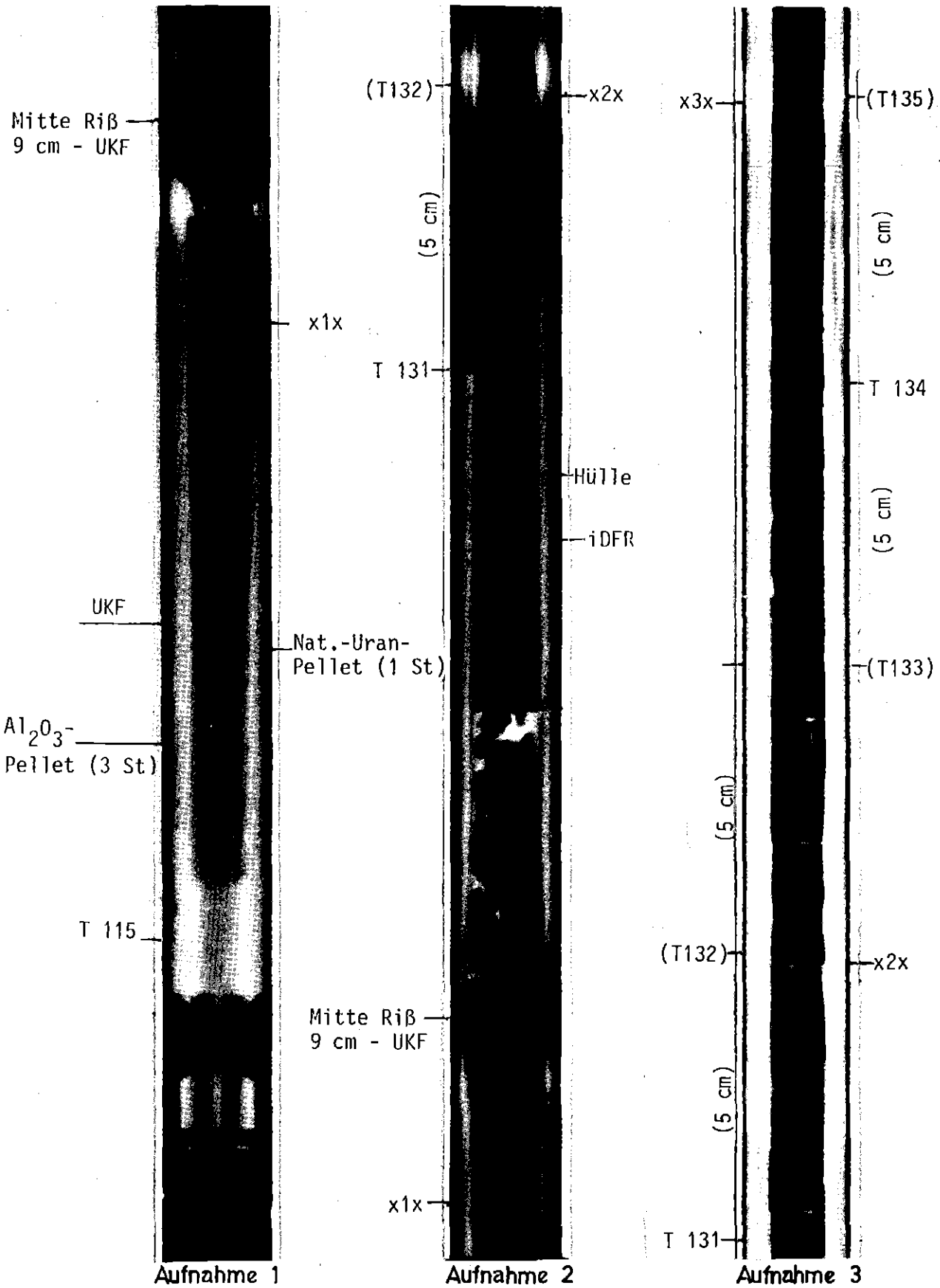




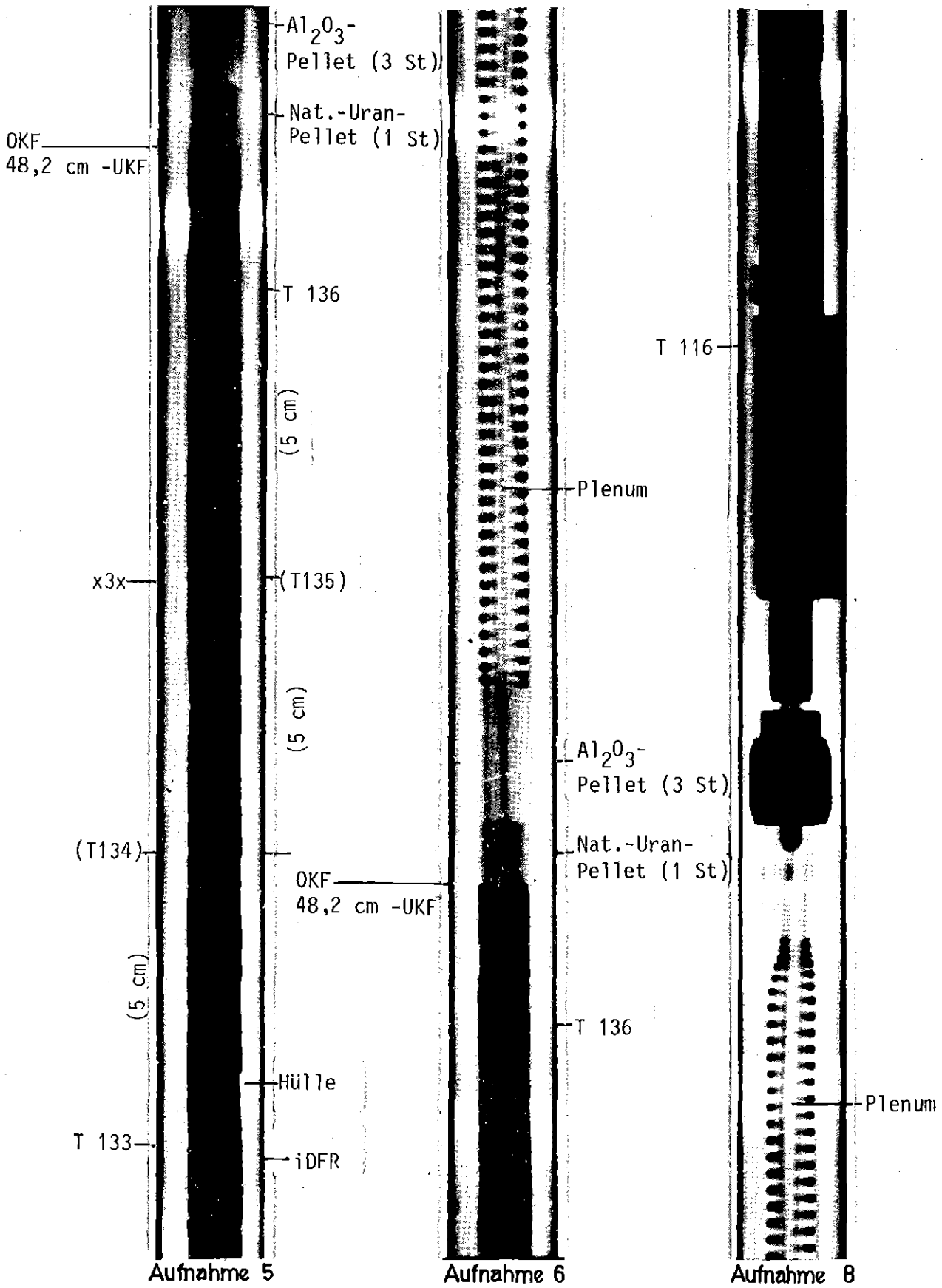
**KfK** IT-80  
PNS4237-500



Ansicht von oben



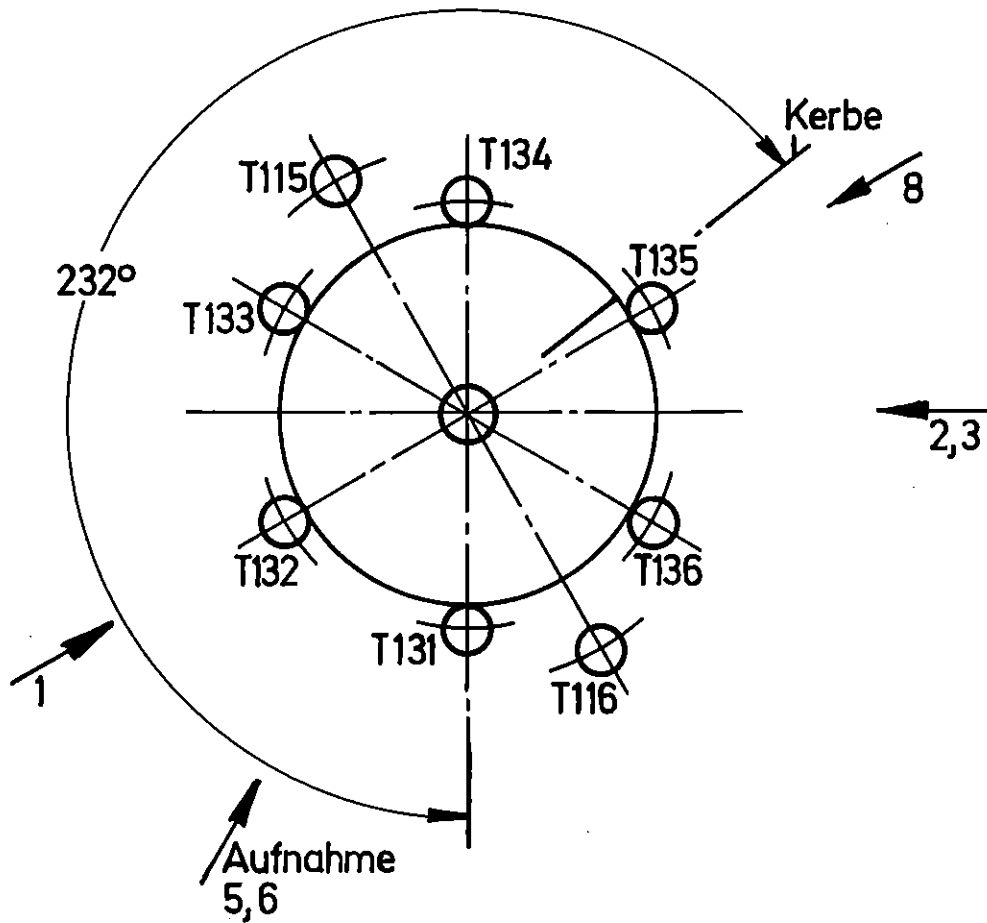
**KIK**  
ИТ-80  
PNS4237-501



**KIK** П-80  
PNS4237-502

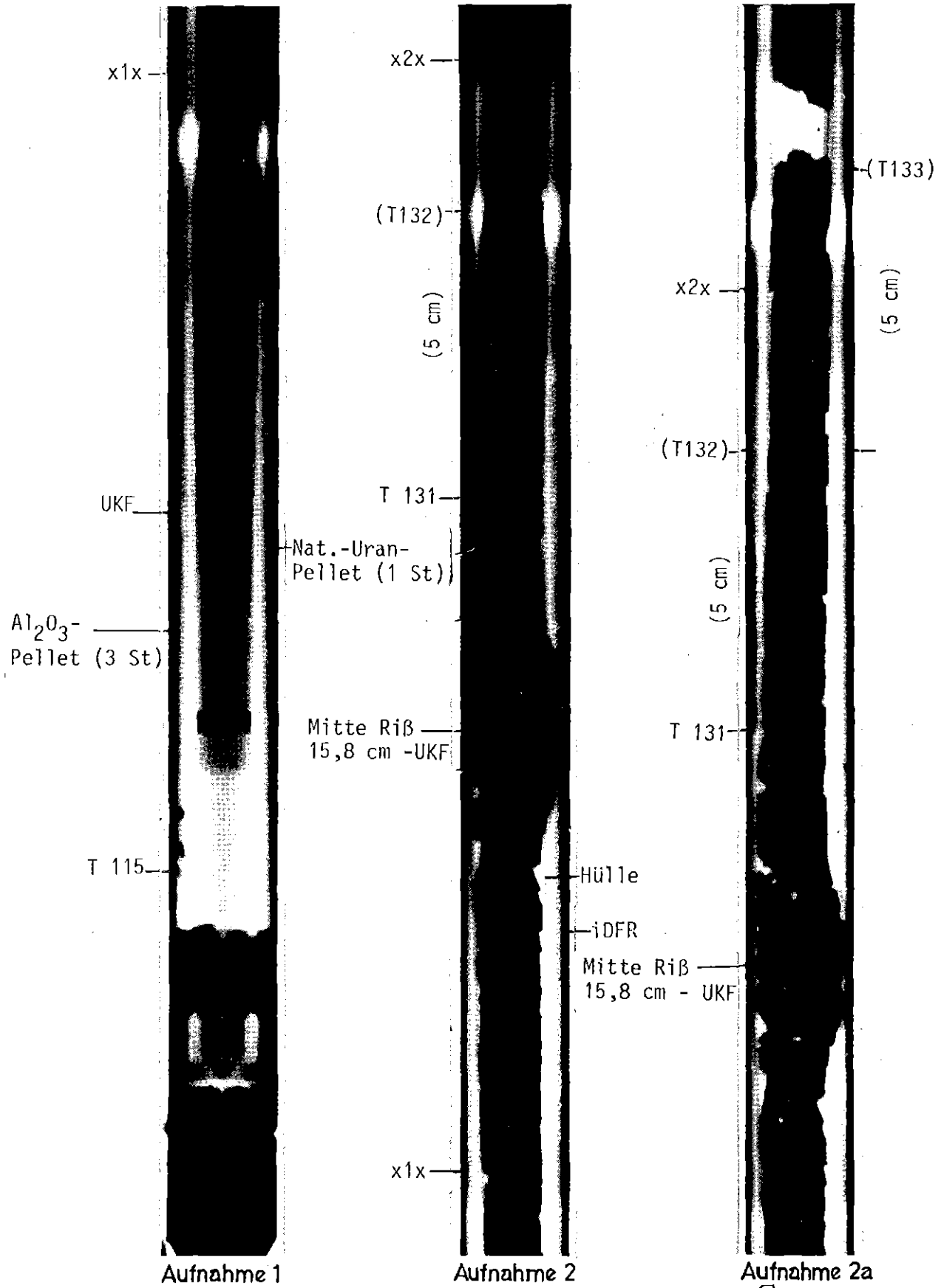
FR2 In-pile Versuche. C2  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.2  
Abb.: 22.2

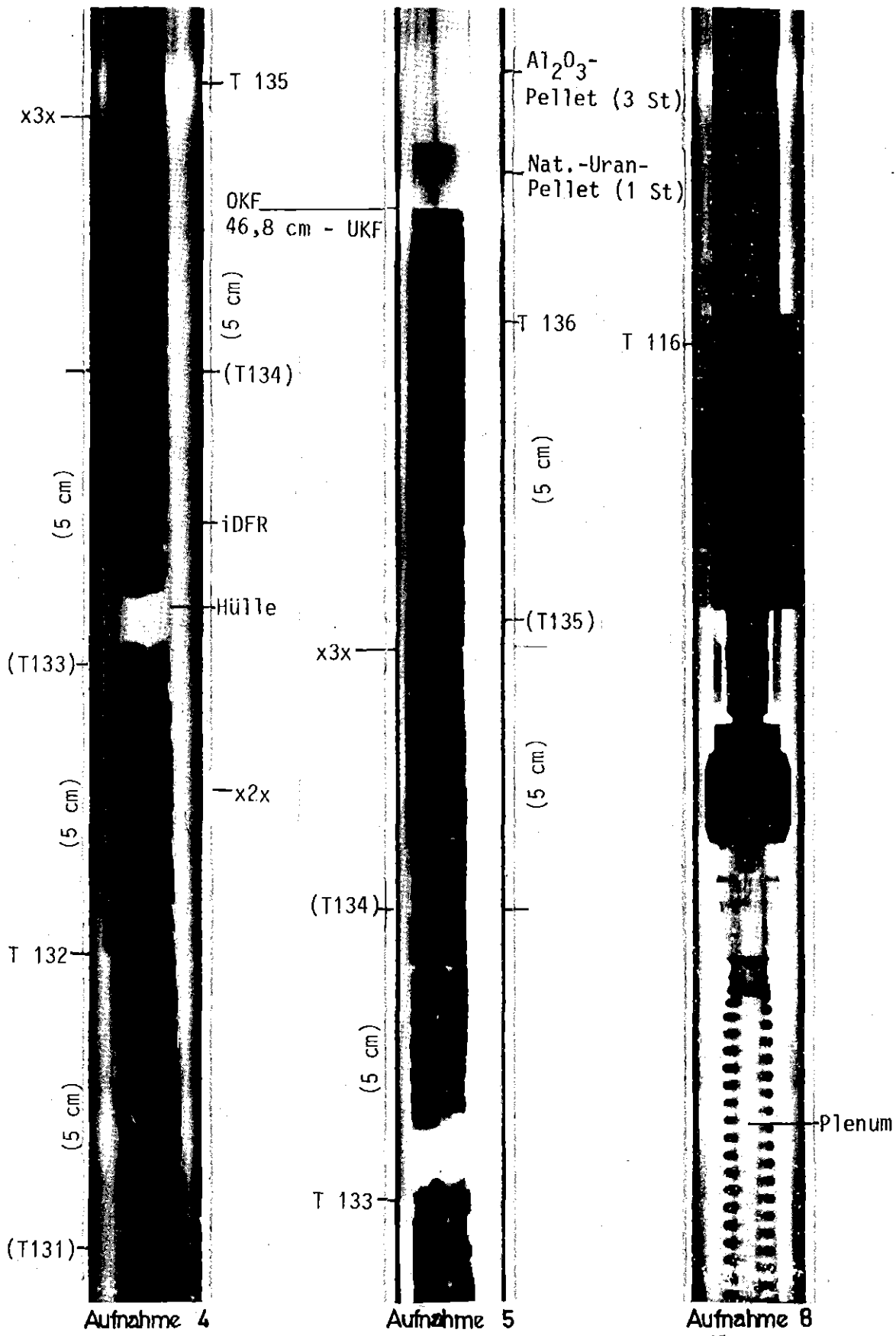


Ansicht von oben

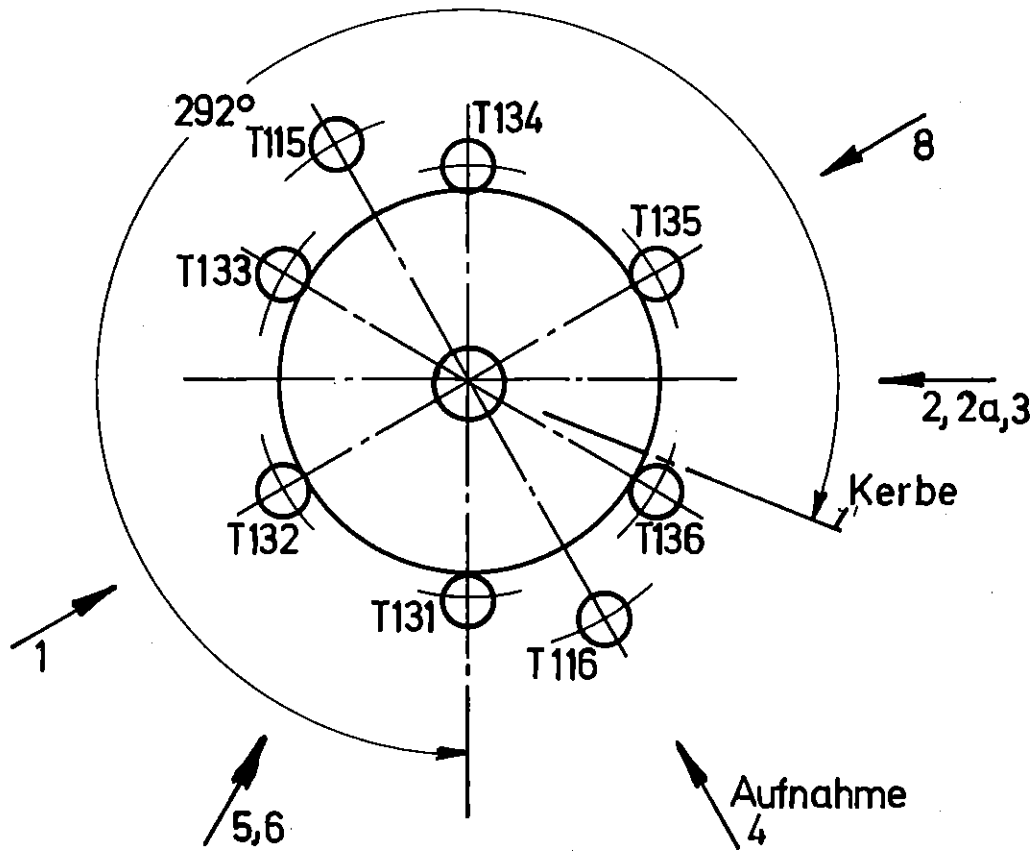
**KIK**  
T-80  
PNS/237-476.32



KIK IT-80  
PNS4237-503



KIK IT-80  
PNS4237-504



Ansicht von oben

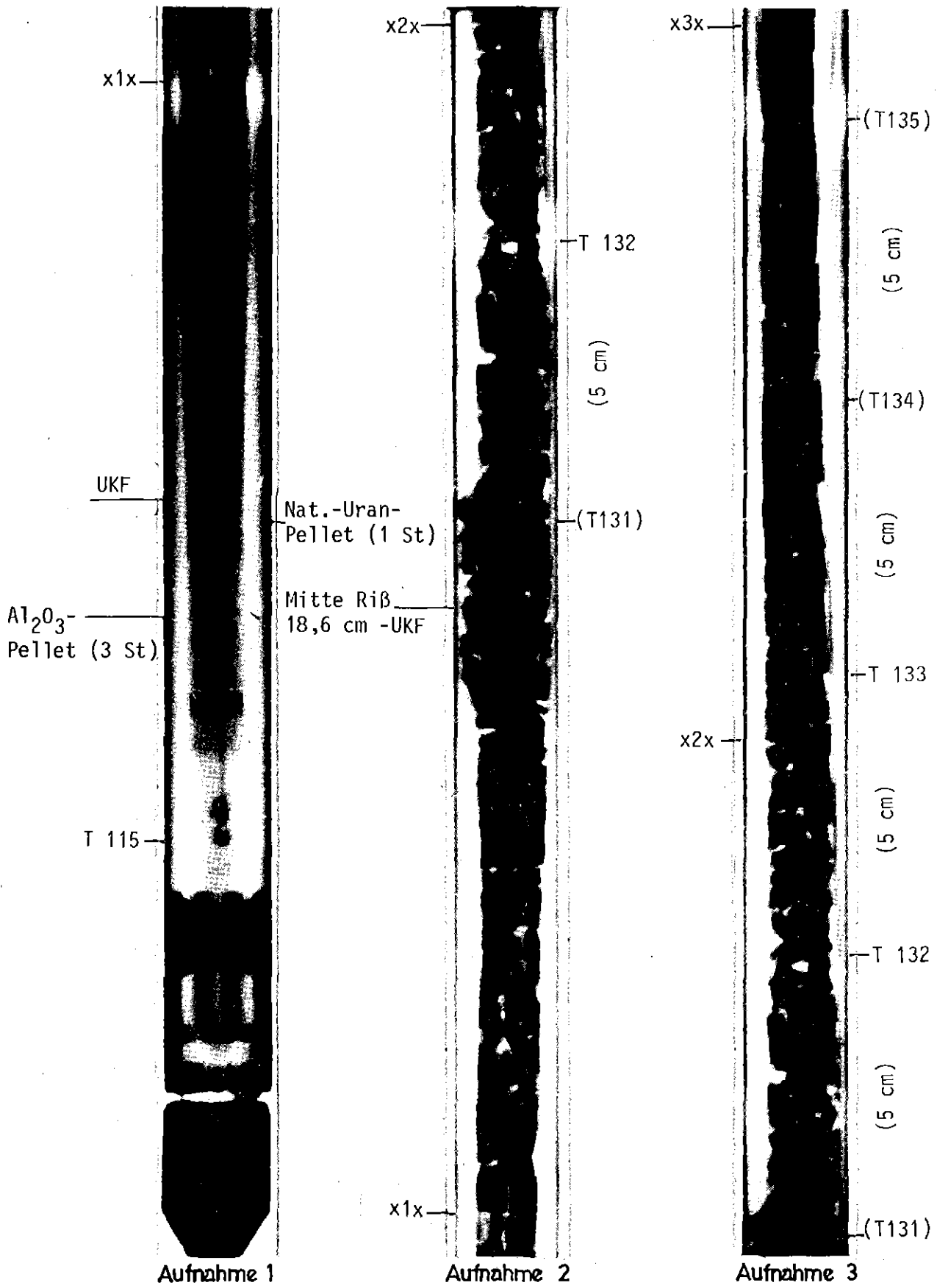
**KIK** IT-80  
PNS4237-476.33

# FR 2 In-Pile Versuche. C 3

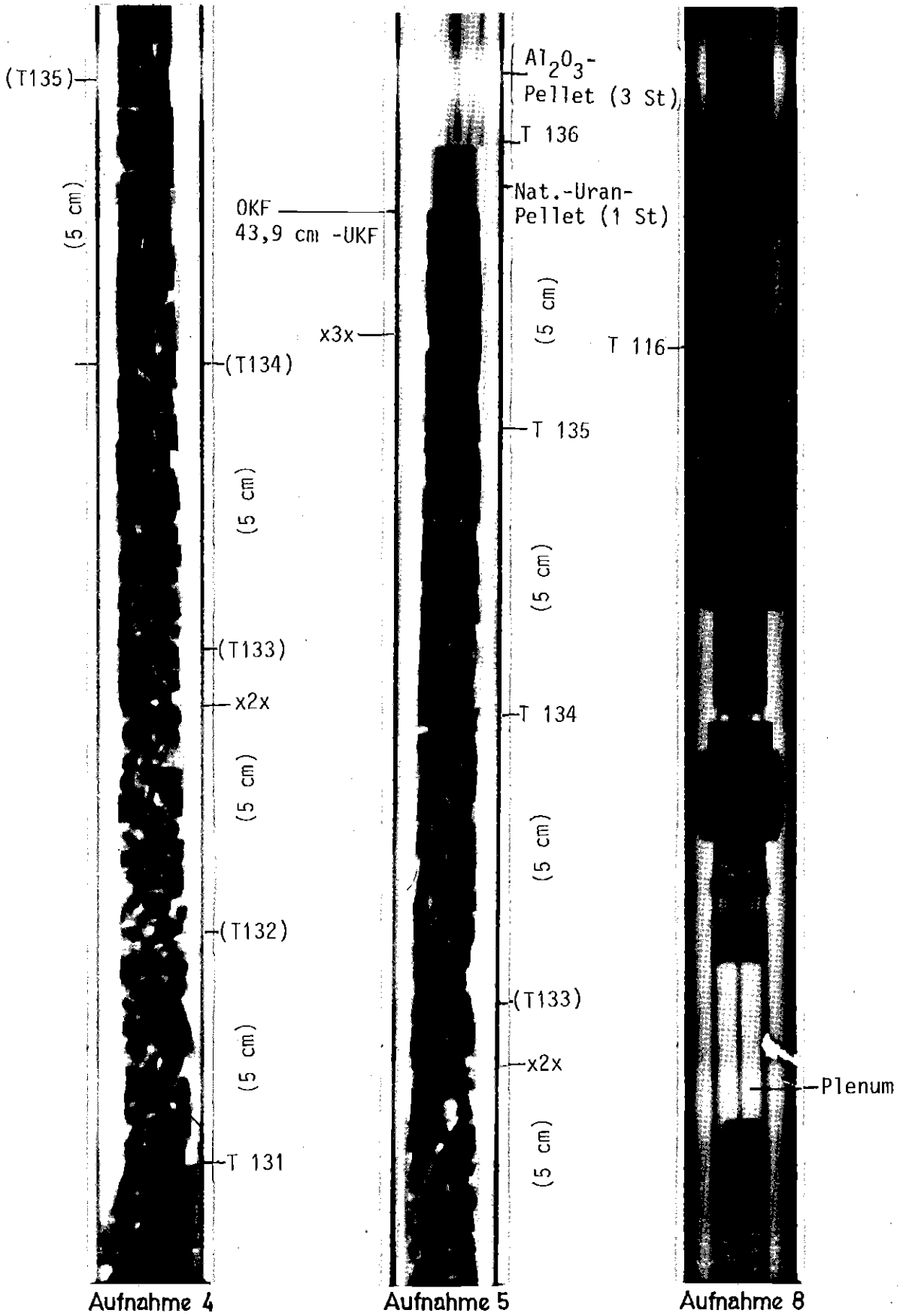
Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

Abb.: 23.3





KJK IT-80  
PNS4237-505

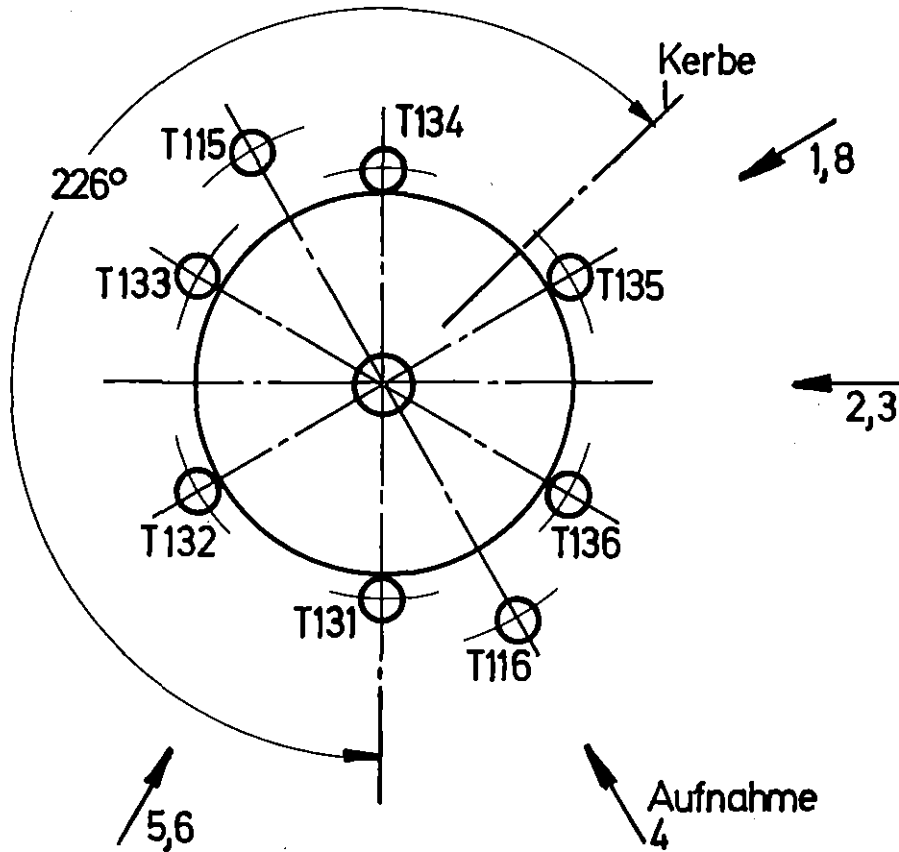


Aufnahme 4

Aufnahme 5

Aufnahme 8

**KIK** IT-80  
PNS4237-506

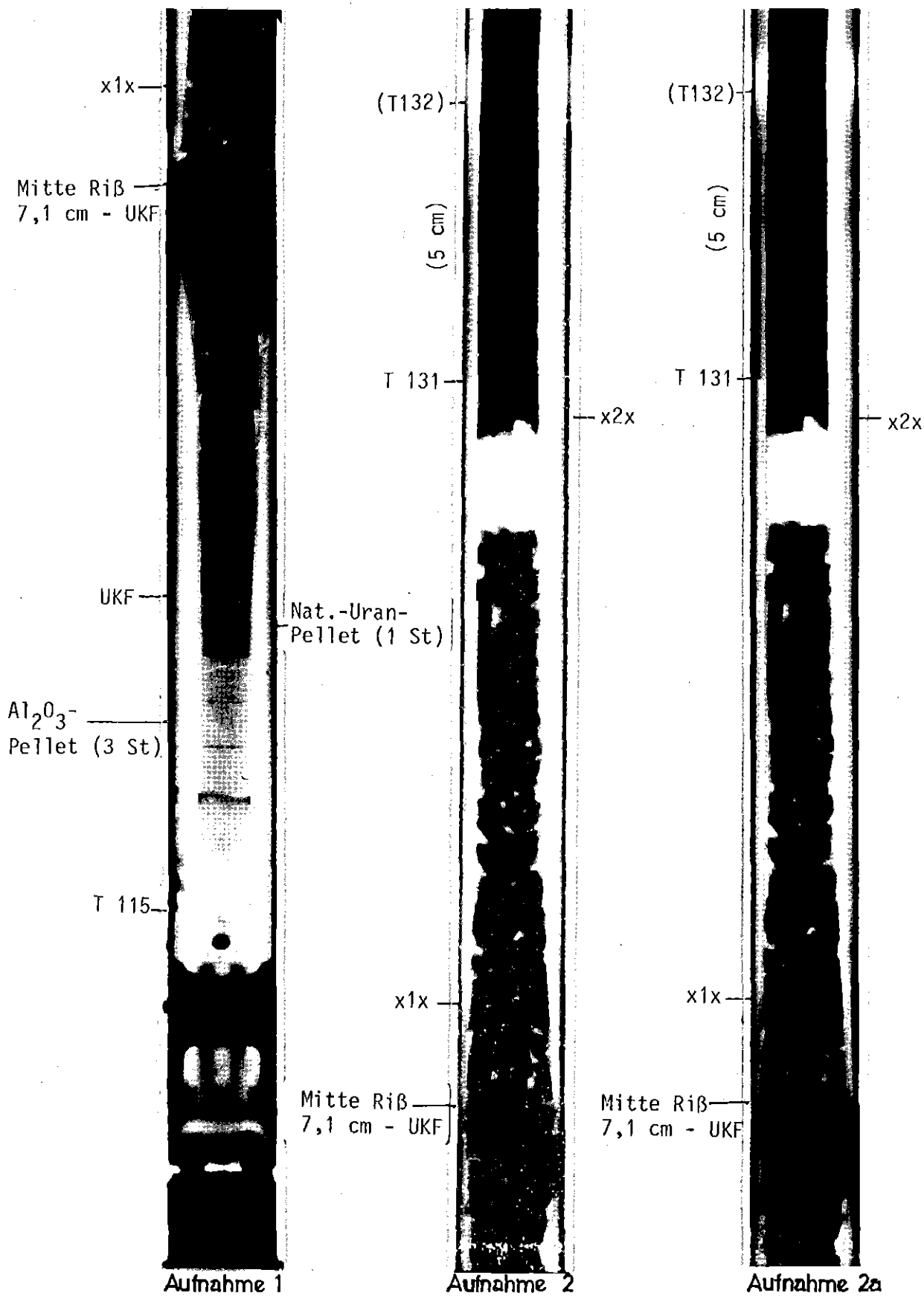


Ansicht von oben

**KIK** IT-80  
PNS4237-476.34

FR 2 In-Pile Versuche. C4  
Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

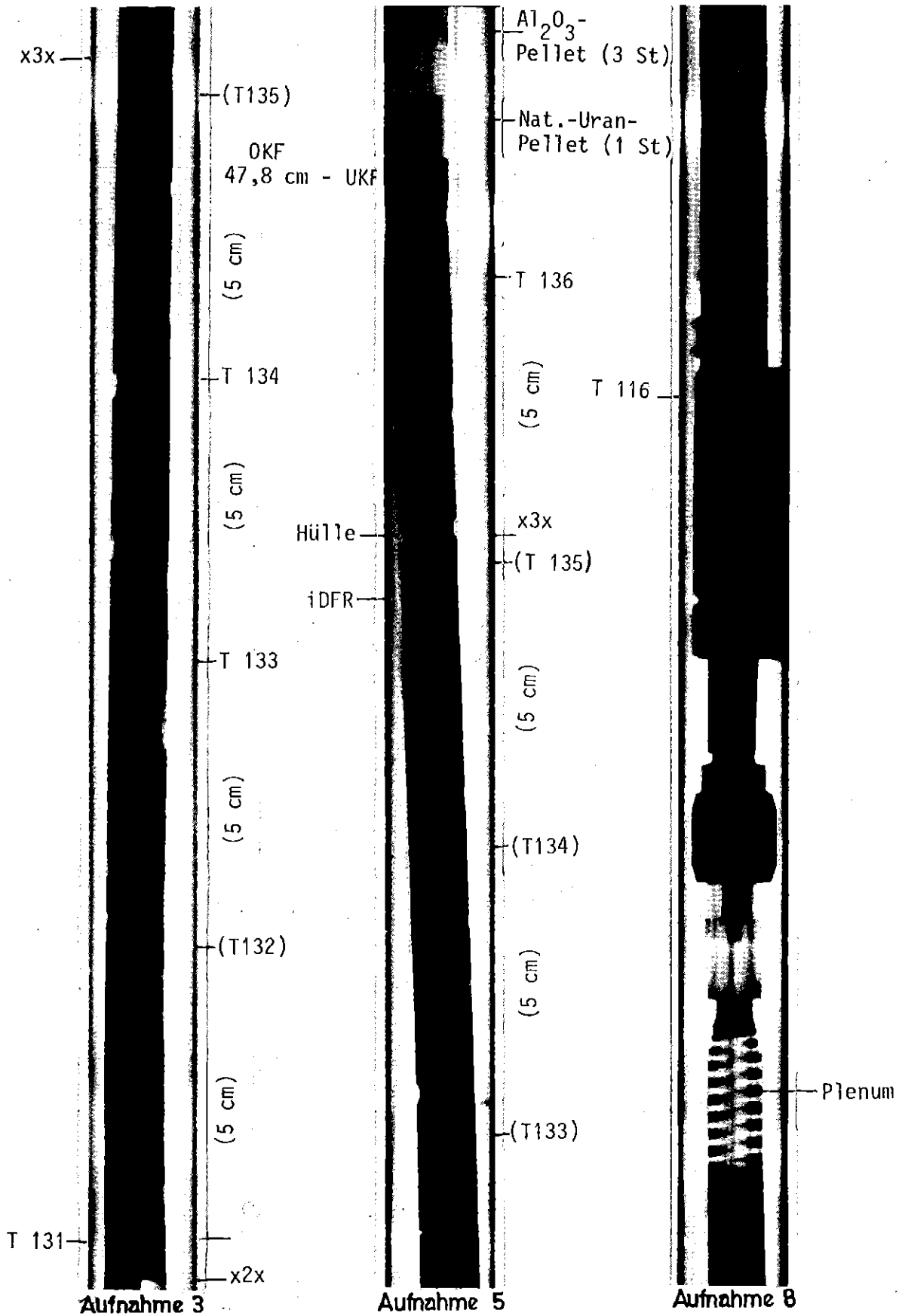
Abb.: 24.3



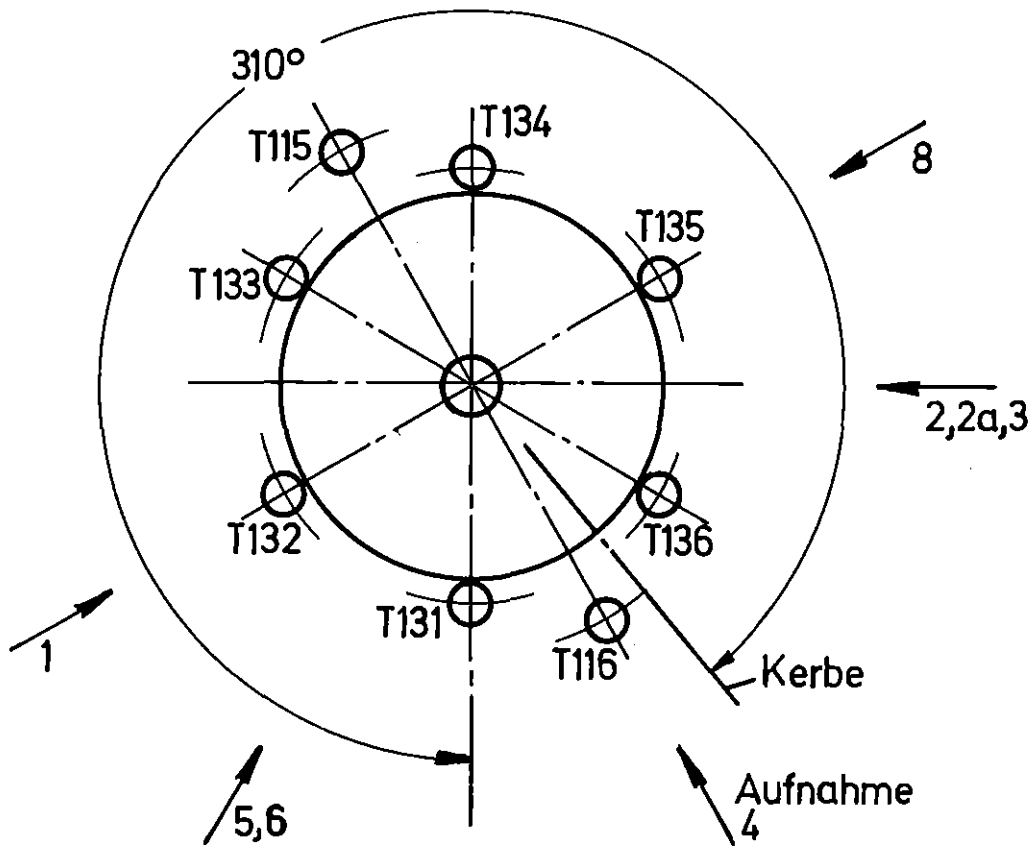
**KIK** T-80  
PNS4237-507

FR2 In-pile Versuche. C 5  
Neutronenradiografie nach Versuch

Bl.1  
Abb.: 25.1



**KfK** IT-80  
PNS4237-508



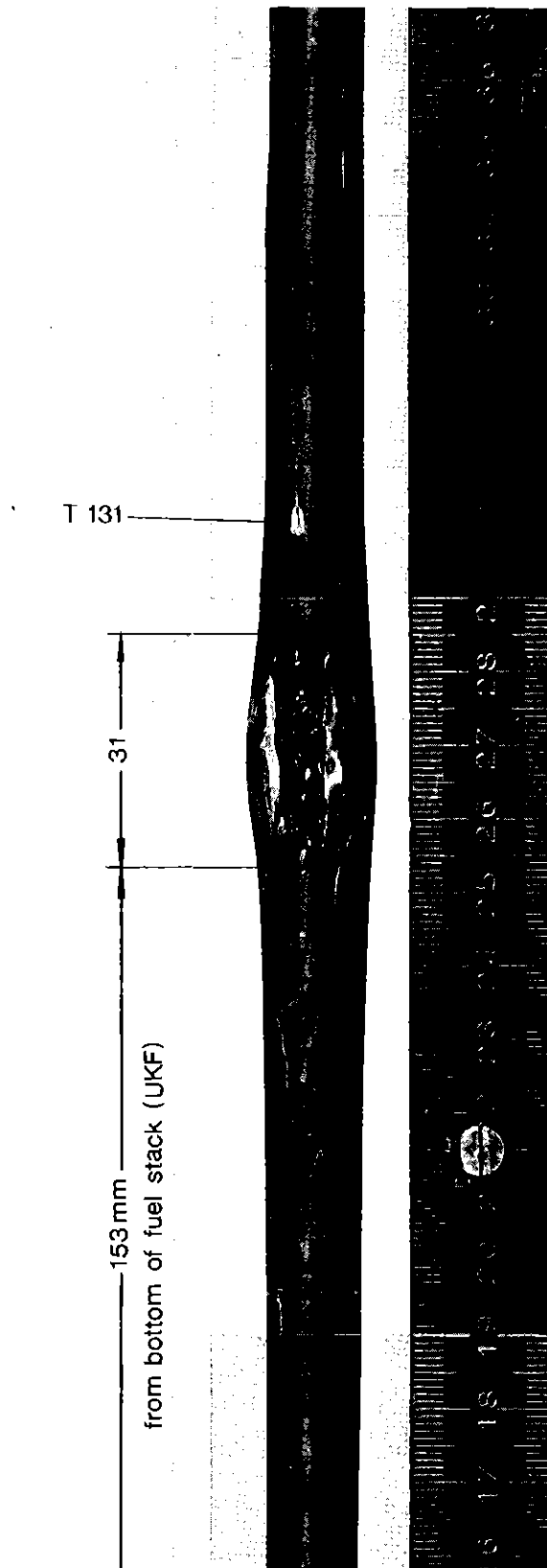
Ansicht von oben

**KIK** IT-80  
PNS4237-476.35

# FR 2 In-Pile Versuche. C 5

Winkellagen der Neutronenradiografie-Aufnahmen

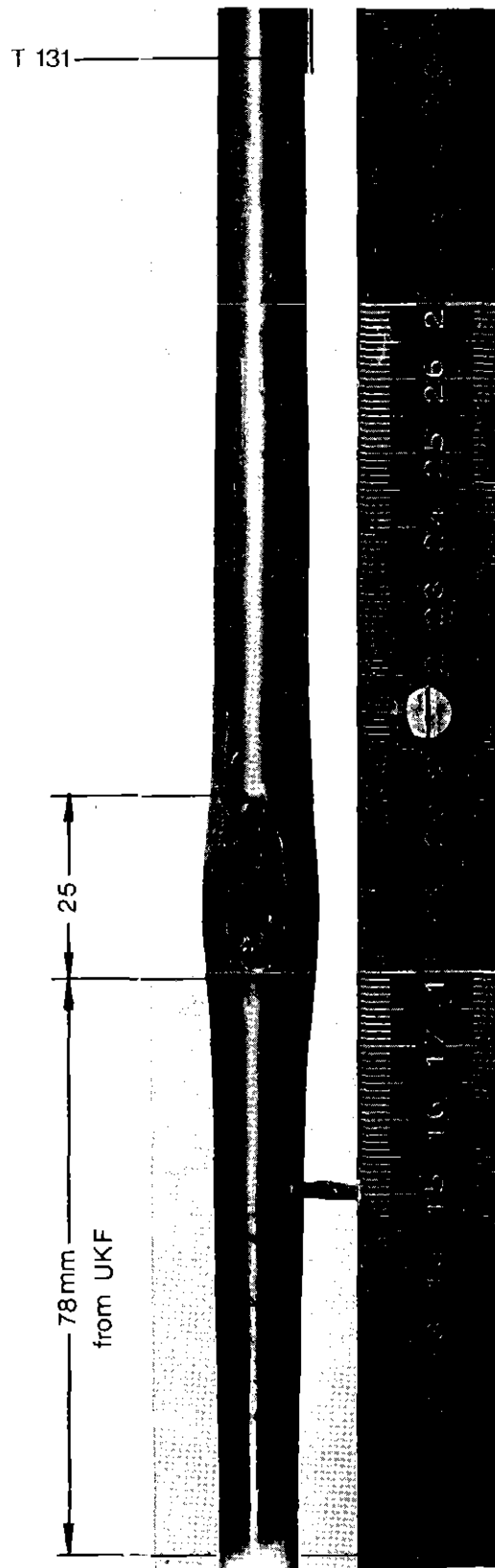
Abb.: 25.3



IT 1981  
PNS 4237-612

FR 2 In-Pile Tests. Test C1  
View of the Ruptured Zone

Abb.:26

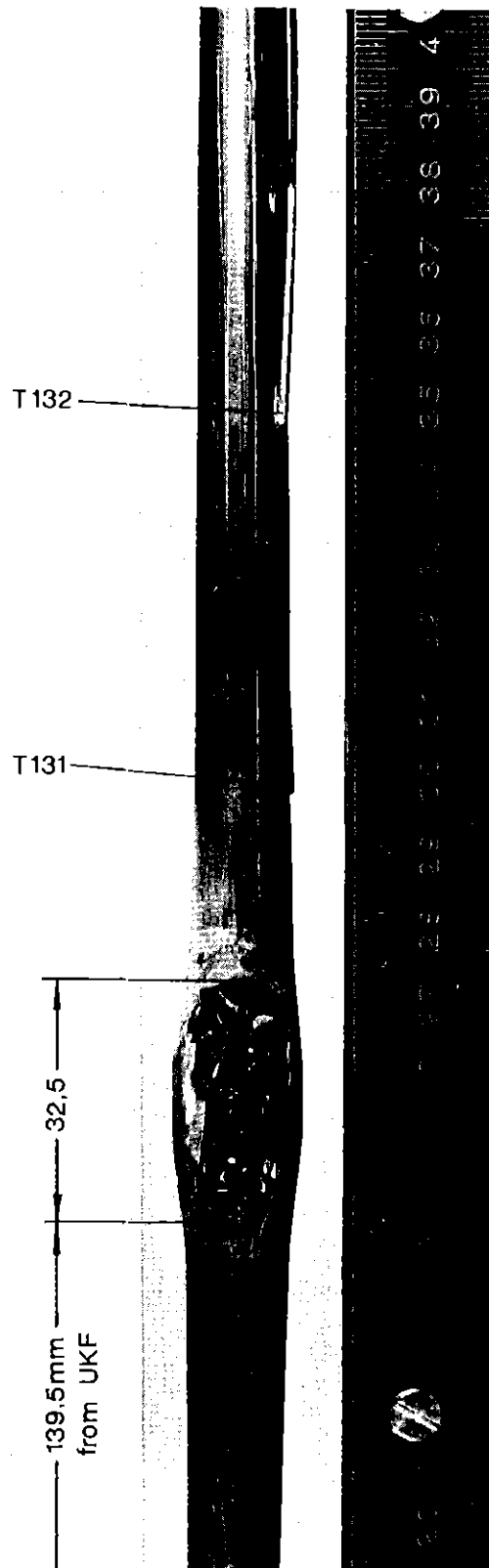


IT 1981  
PNS 4237-613

FR 2 In-Pile Tests. Test C2  
View of the Ruptured Zone

Abb.:27

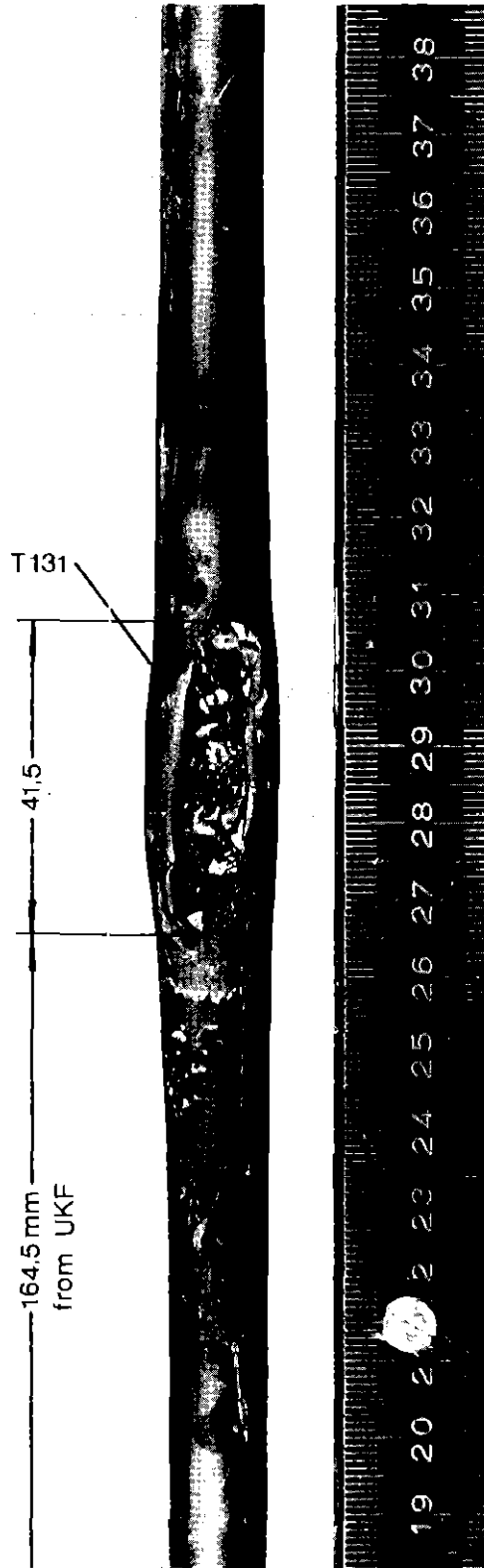




IT 1981  
PNS 4237-614

FR 2 In-Pile Tests. Test C3  
View of the Ruptured Zone

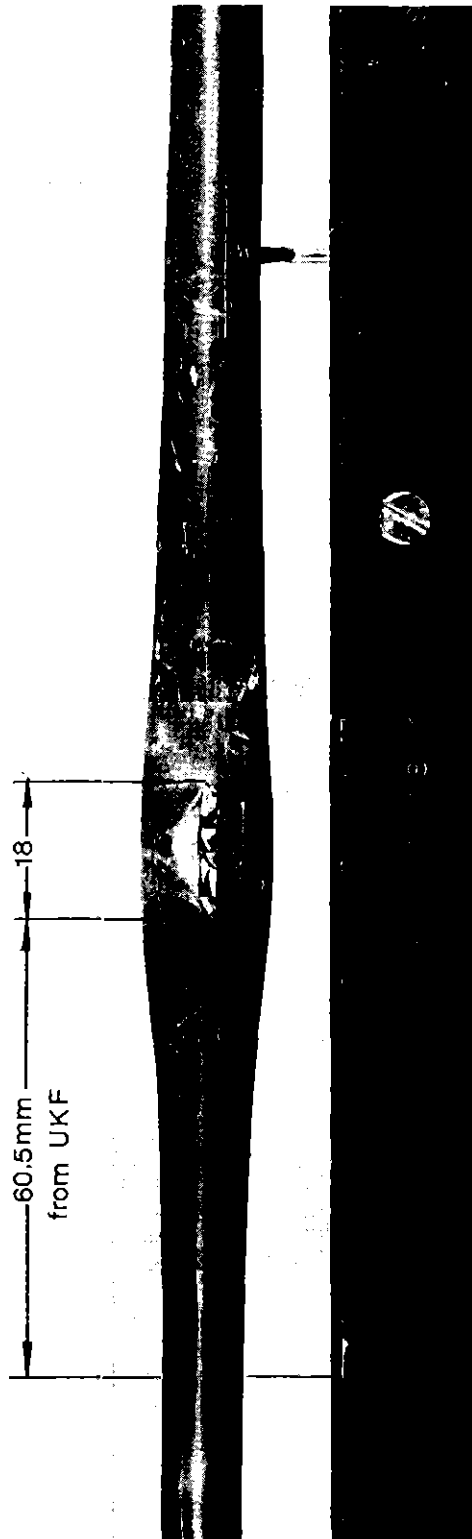
Abb.:28



IT 1981  
PNS 4237-615

FR 2 In-Pile Tests. Test C4  
View of the Ruptured Zone

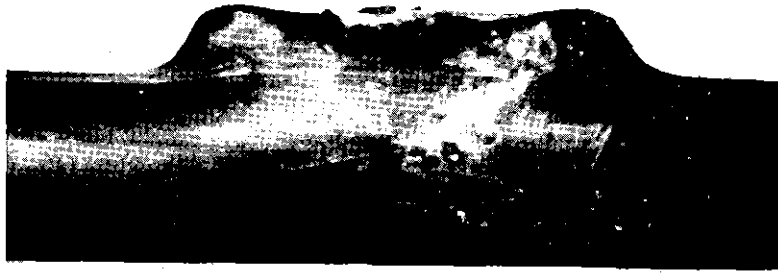
Abb.:29



IT 1981  
PNS 4237-616

FR 2 In-Pile Tests. Test C5  
View of the Ruptured Zone

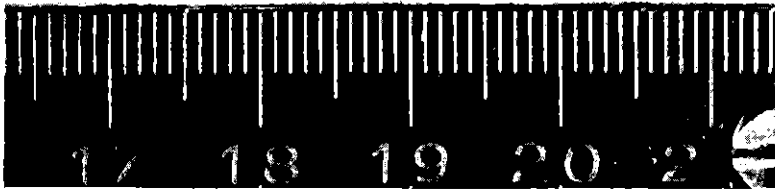
Abb.:30



IT 1981  
PNS 4237-617

FR 2 In-Pile Tests. Test C1  
Views of the Ruptured Zone

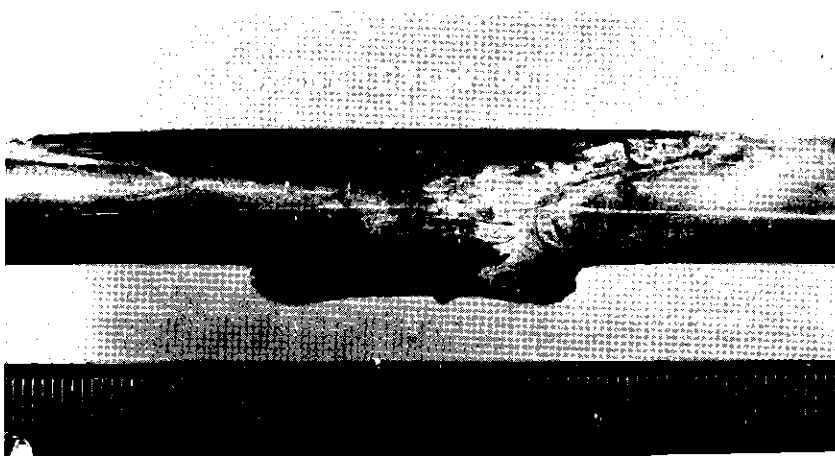
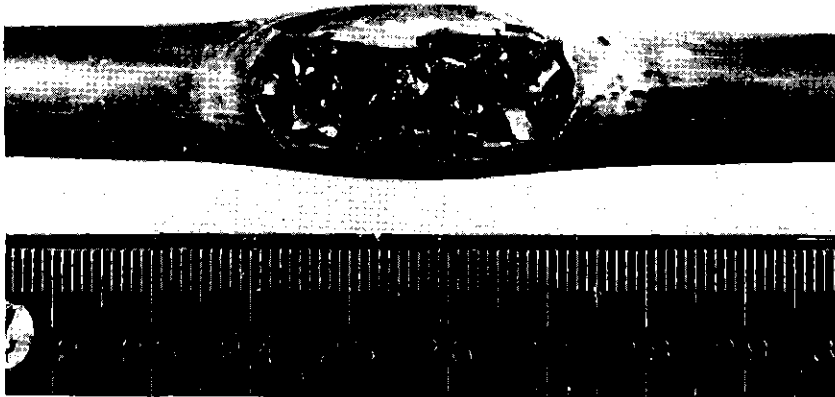
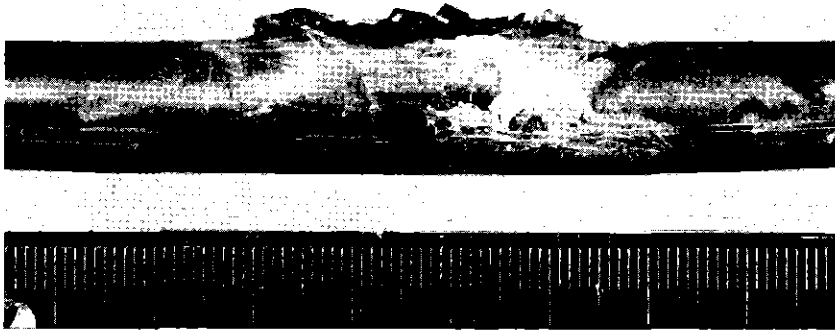
Abb.: 31



IT 1981  
PNS 4237-618

FR 2 In-Pile Tests. Test C2  
Views of the Ruptured Zone

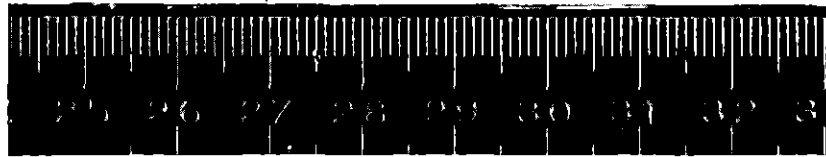
Abb.:32



IT 1981  
PNS 4237-619

FR 2 In-Pile Tests. Test C 3  
Views of the Ruptured Zone

Abb.:33

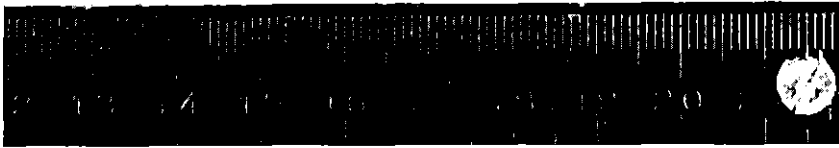


IT 1981  
PNS 4237-620

FR 2 In-Pile Tests. Test C4

Views of the Ruptured Zone

Abb.: 34

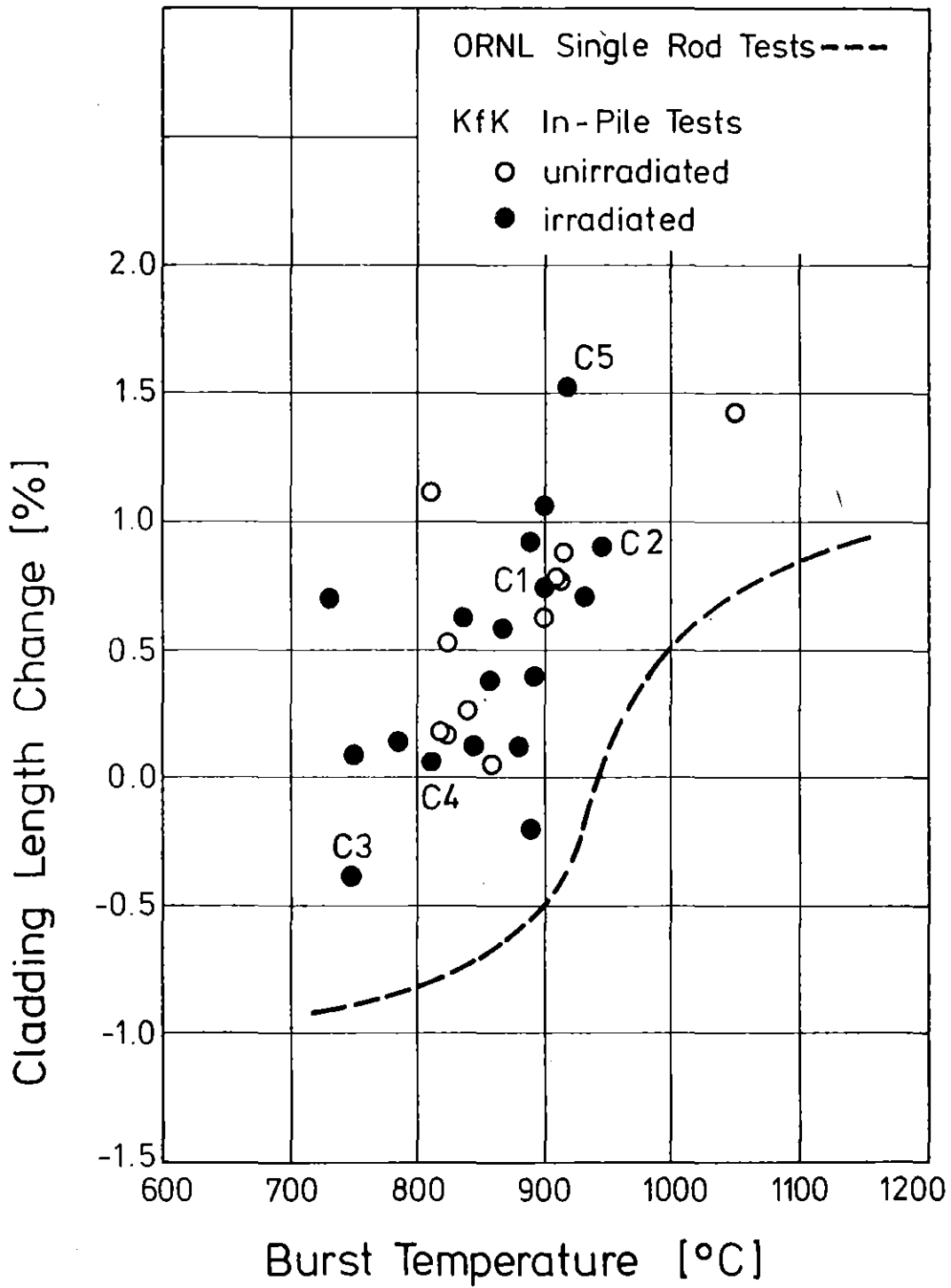


IT 1981  
PNS 4237-621

FR 2 In-Pile Tests. Test C5  
Views of the Ruptured Zone

Abb.:35



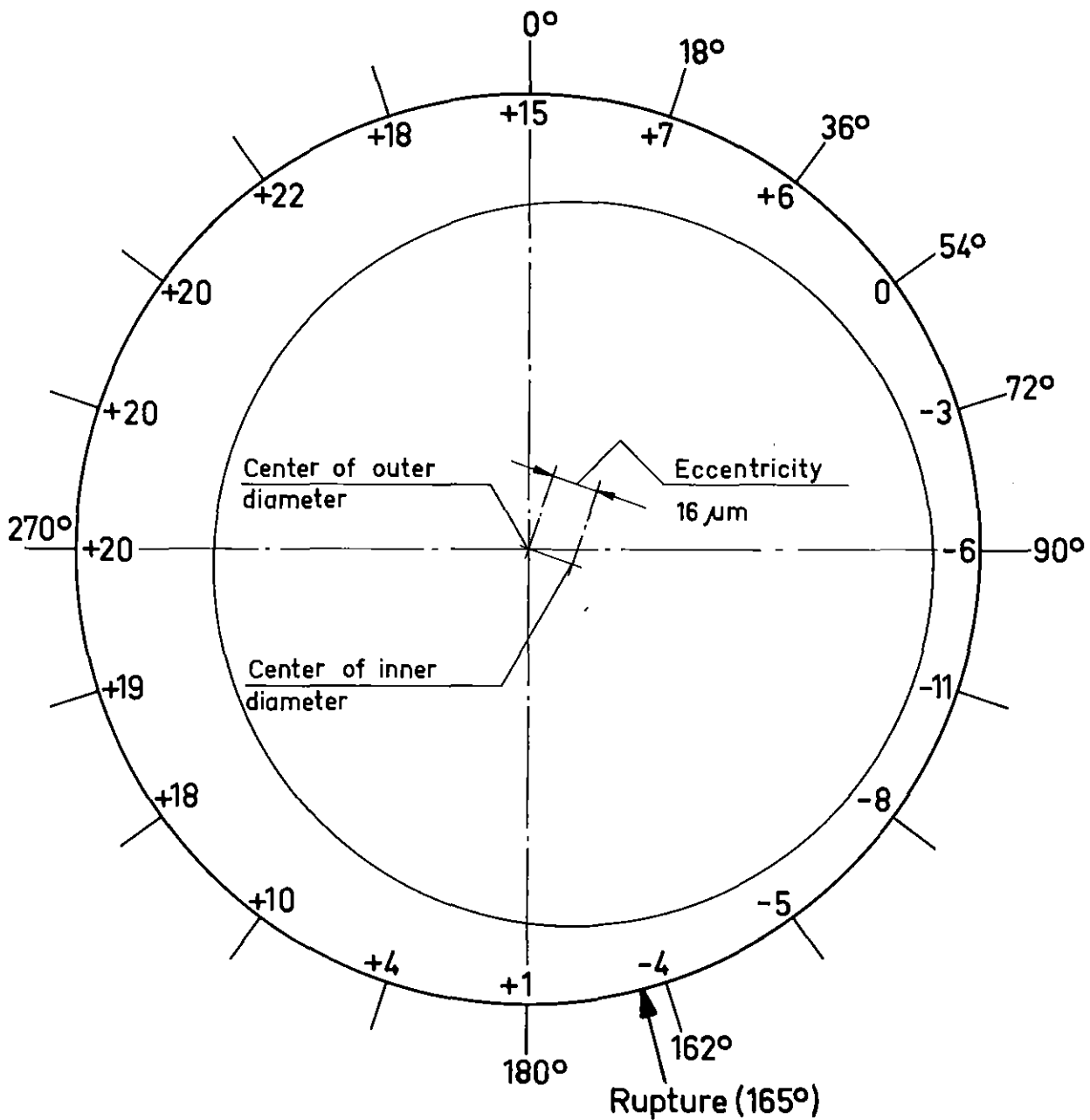


IT 81  
PNS 4237-238.31

## FR 2 In - Pile Tests

Cladding Length Change vs. Burst Temperature

Abb.: 36



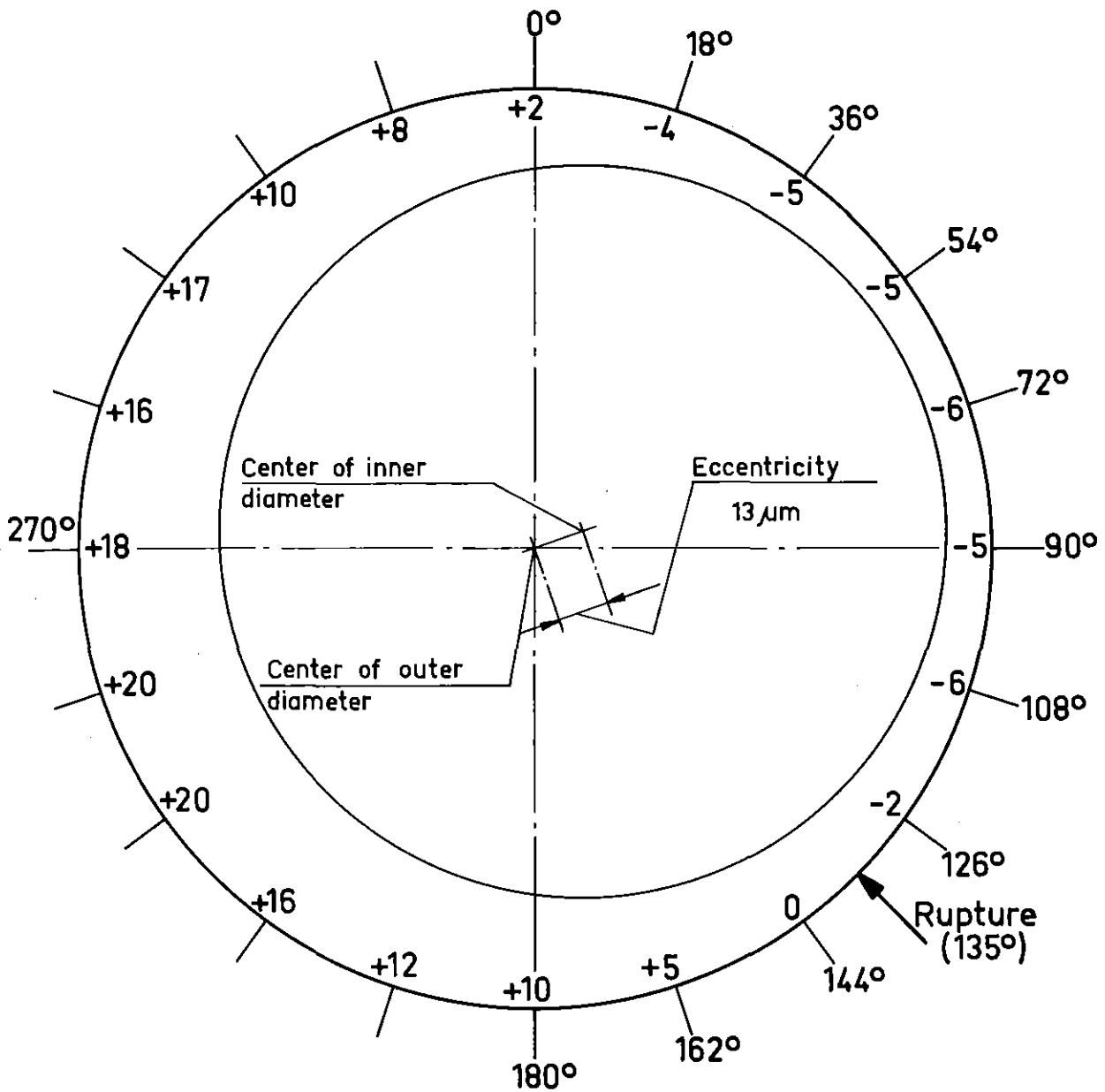
Bottom view

Measuring plane No.13  
Measuring plane : 170mm from UKF  
Rupture midplane: 168mm from UKF

TEST C1; ROD 56

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm Abb.:371



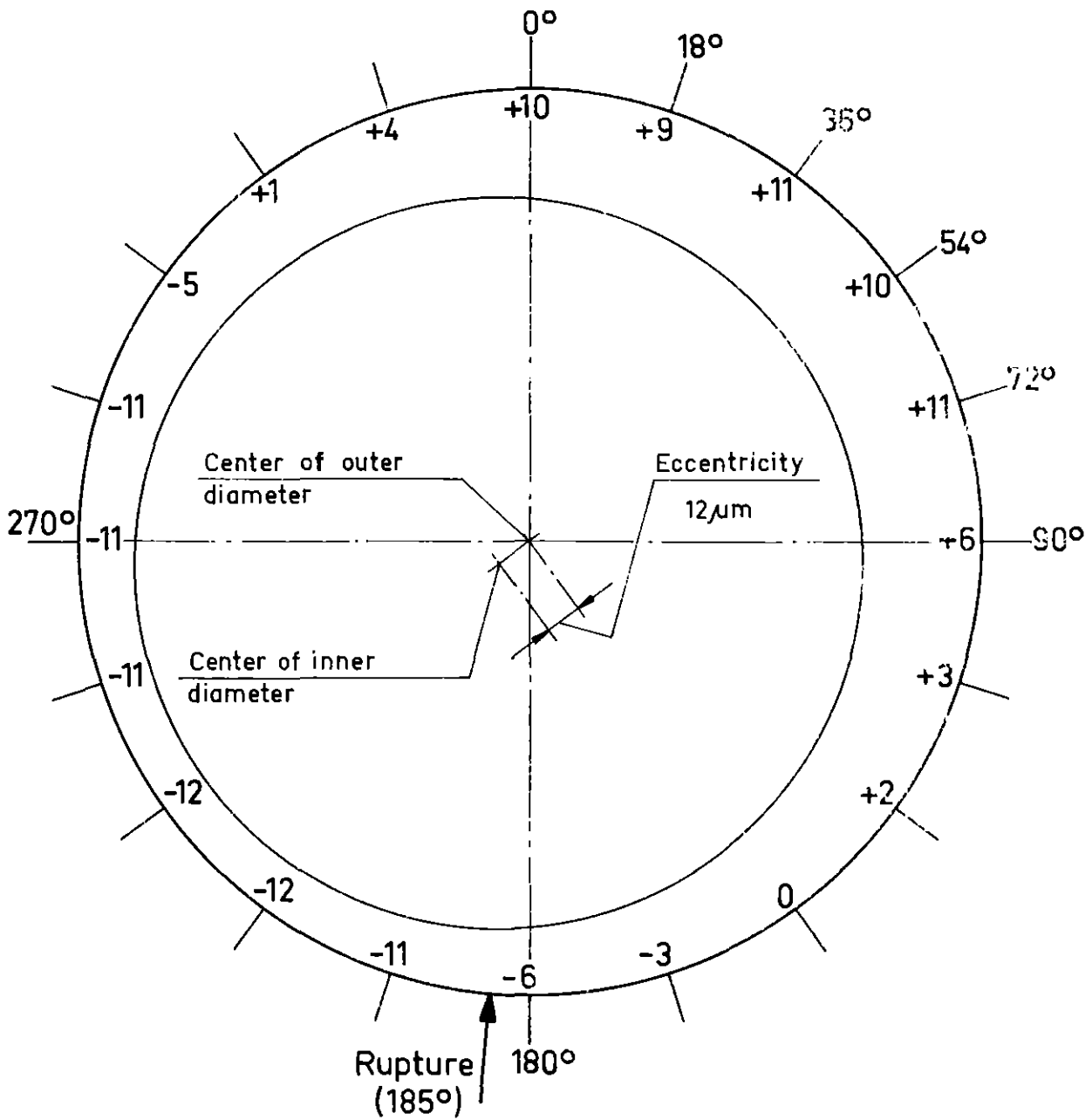
Bottom view

Measuring plane No.14  
Measuring plane : 155 mm from UKF  
Rupture midplane: 90 mm from UKF

TEST C2; ROD 57

## FR 2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm Abb.:37.2



Bottom view

Measuring plane No.14

Measuring plane : 155 mm from UKF

Rupture midplane: 158 mm from UKF

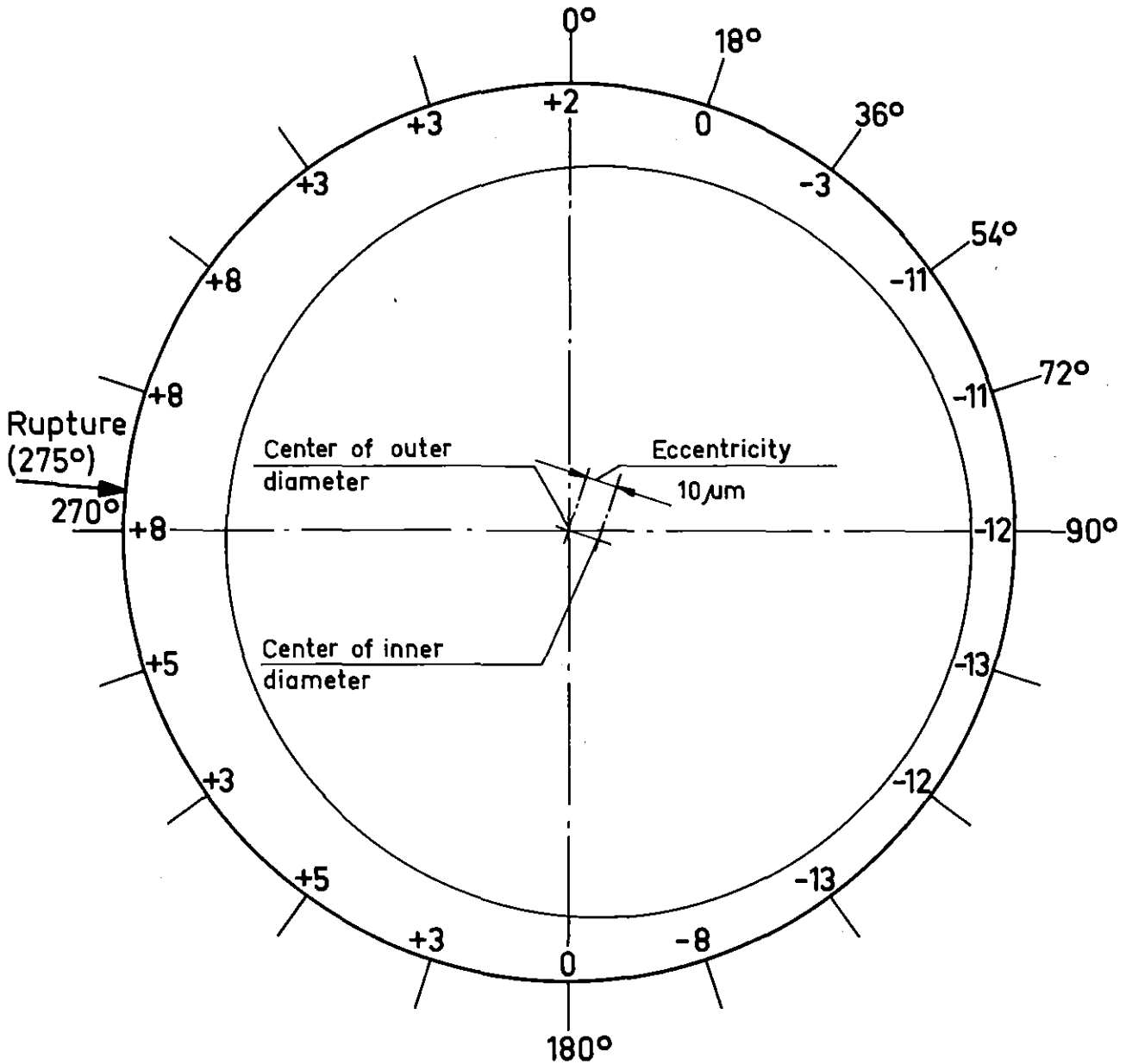
TEST C3; ROD 59



IT 1980  
PNS 4237-359.33

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm Abb.:37.3



Bottom view

Measuring plane No.12

Measuring plane: 185 mm from UKF

Rupture midplane: 186 mm from UKF

TEST C4; ROD 60

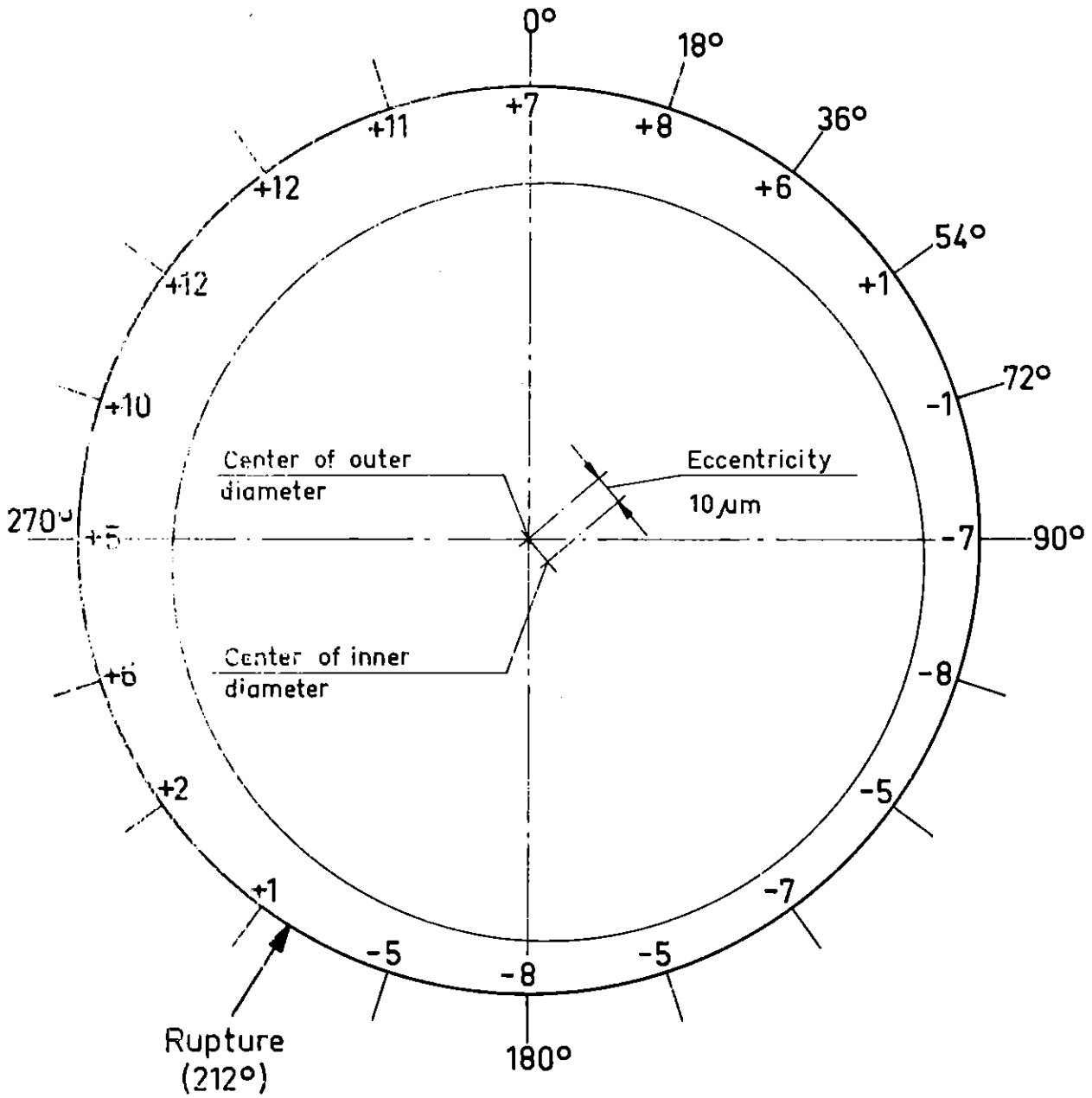
**KIK**  
IT 1980  
PNS 4237-359.34

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)

presented as differences from the nominal 0.725 mm

Abb.:37.4



Bottom view

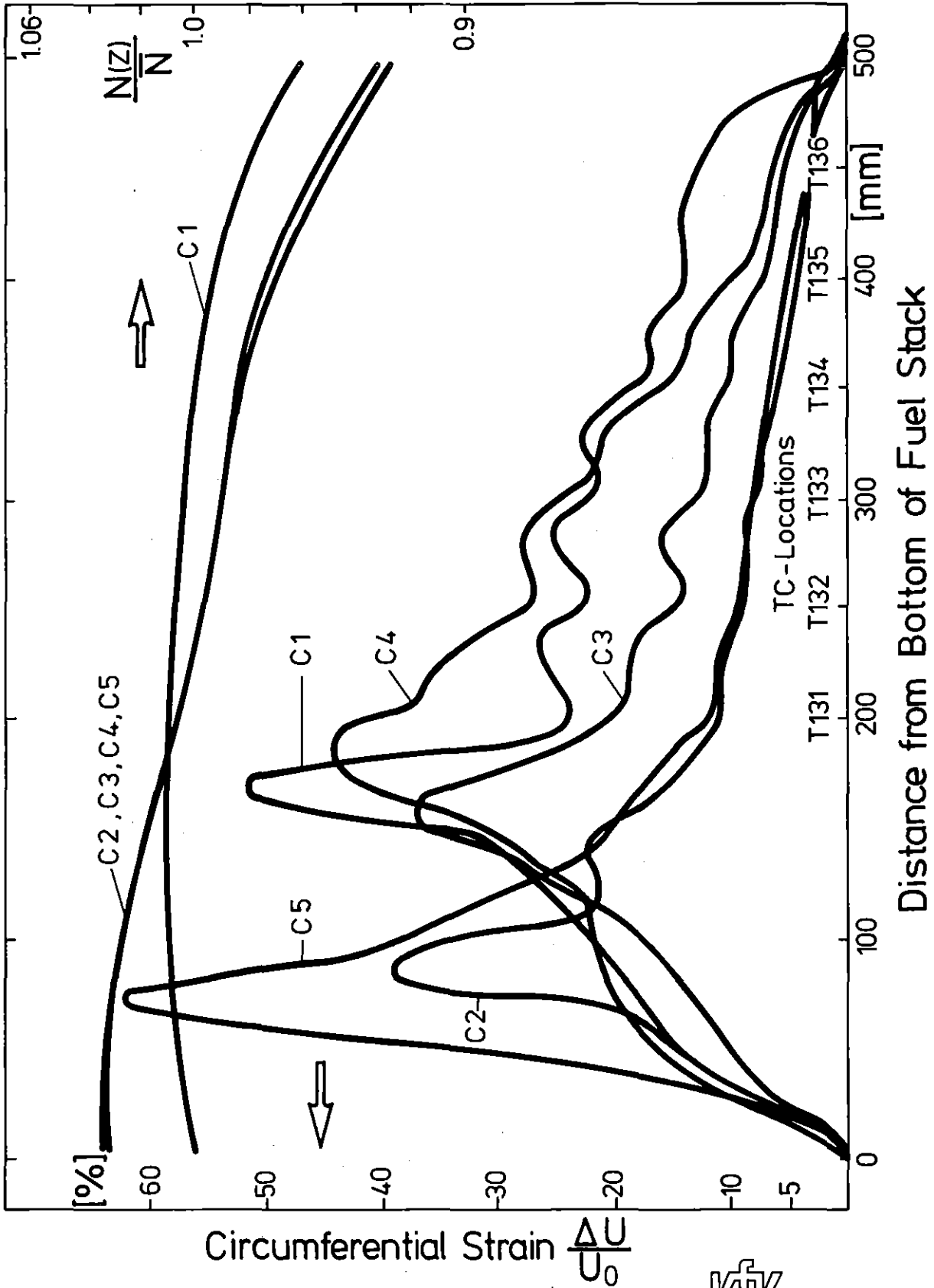
Measuring plane No.14  
Measuring plane : 155mm from UKF  
Rupture midplane: 80mm from UKF

TEST C5, ROD 63

**KIK** IT 1980  
PNS 4237-359.35

## FR2 In-pile tests

Circumferential cladding thickness distribution (as received)  
presented as differences from the nominal 0.725 mm Abb.:37.5

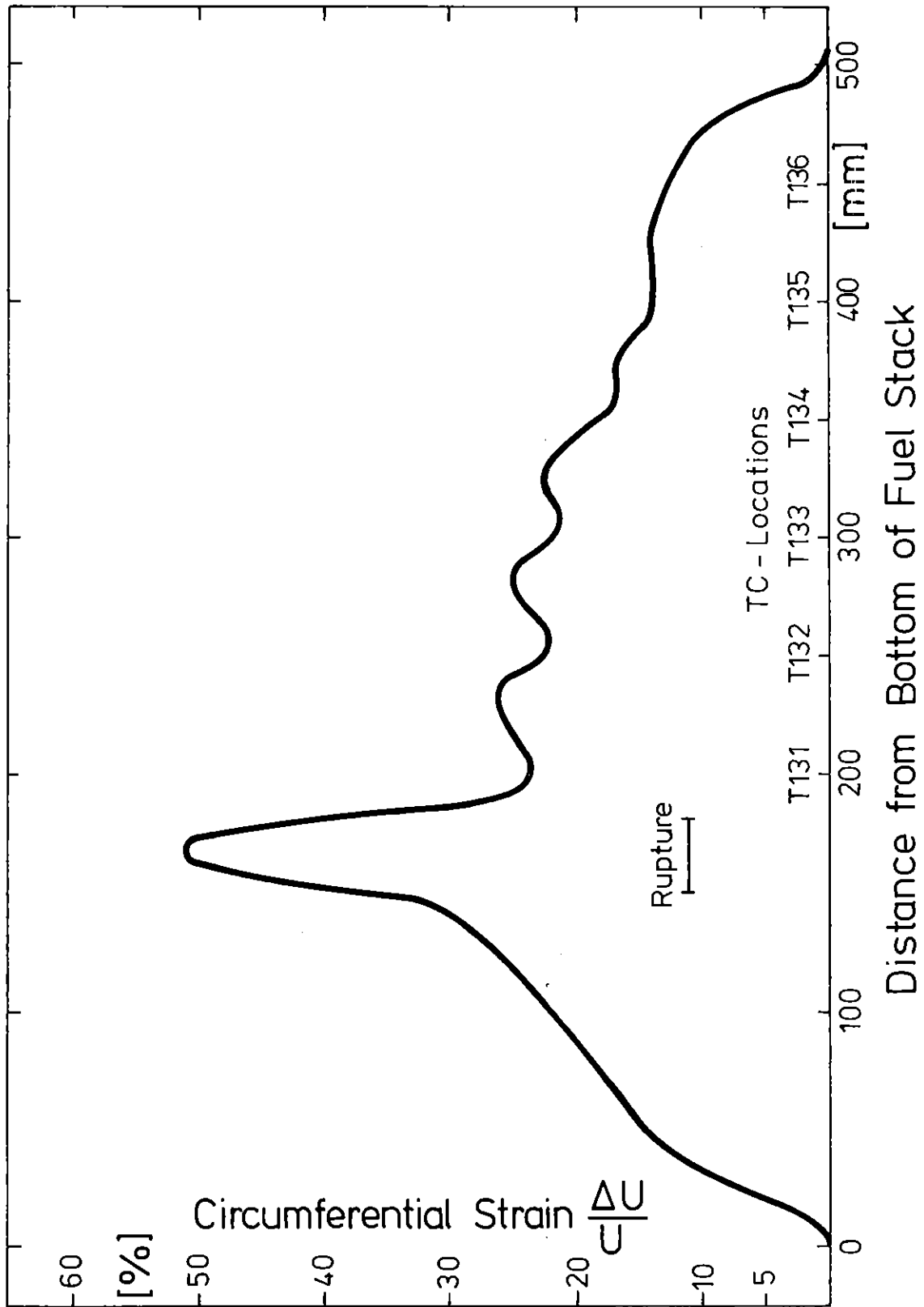


KfK  
IT 81  
PNS 4237-603 a

### FR 2 In-Pile Tests

Circumferential Strain and Axial Power Profiles of the Tests C1 through C5

Abb.: 38



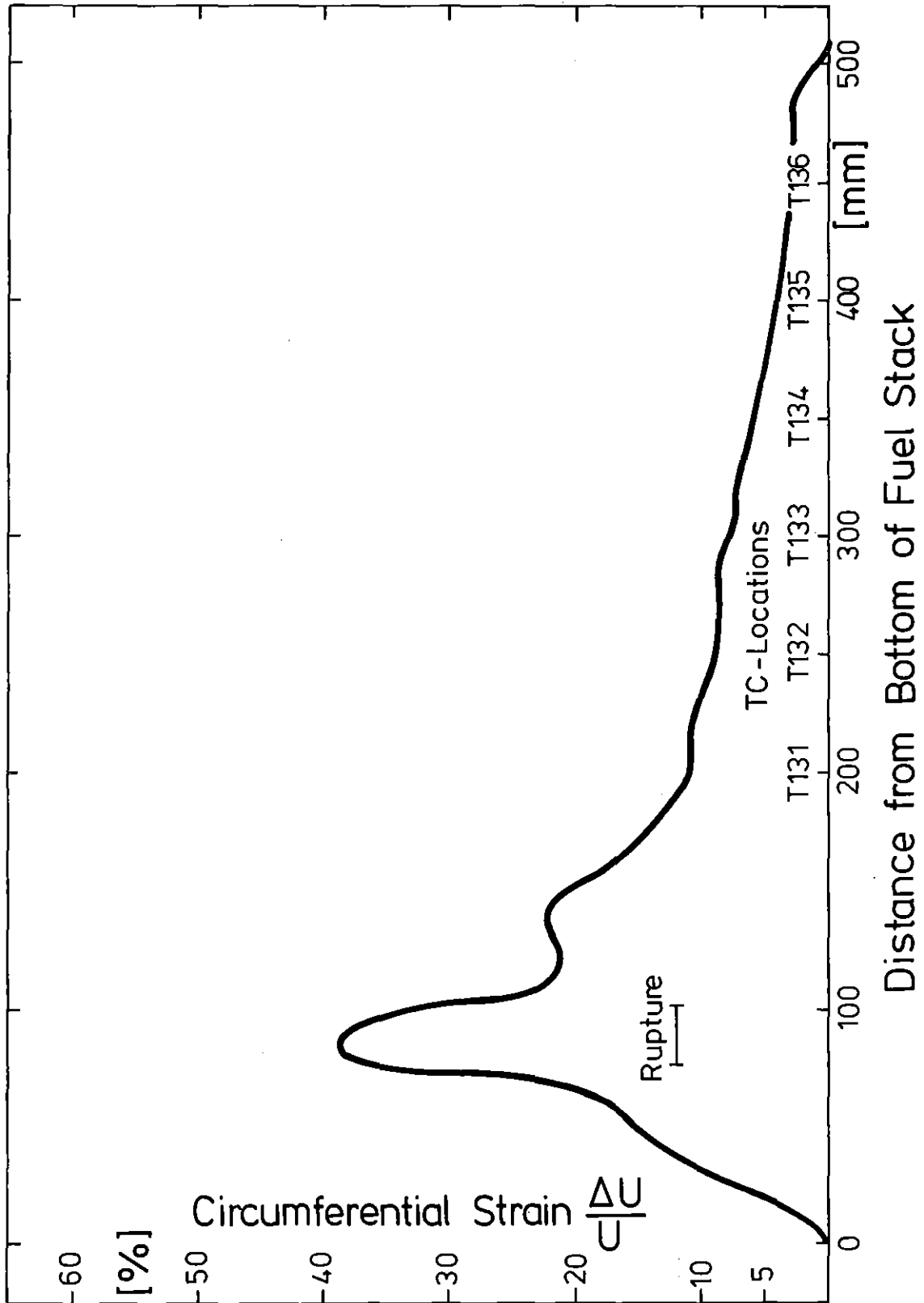
IT 81  
PNS 4237-95.31

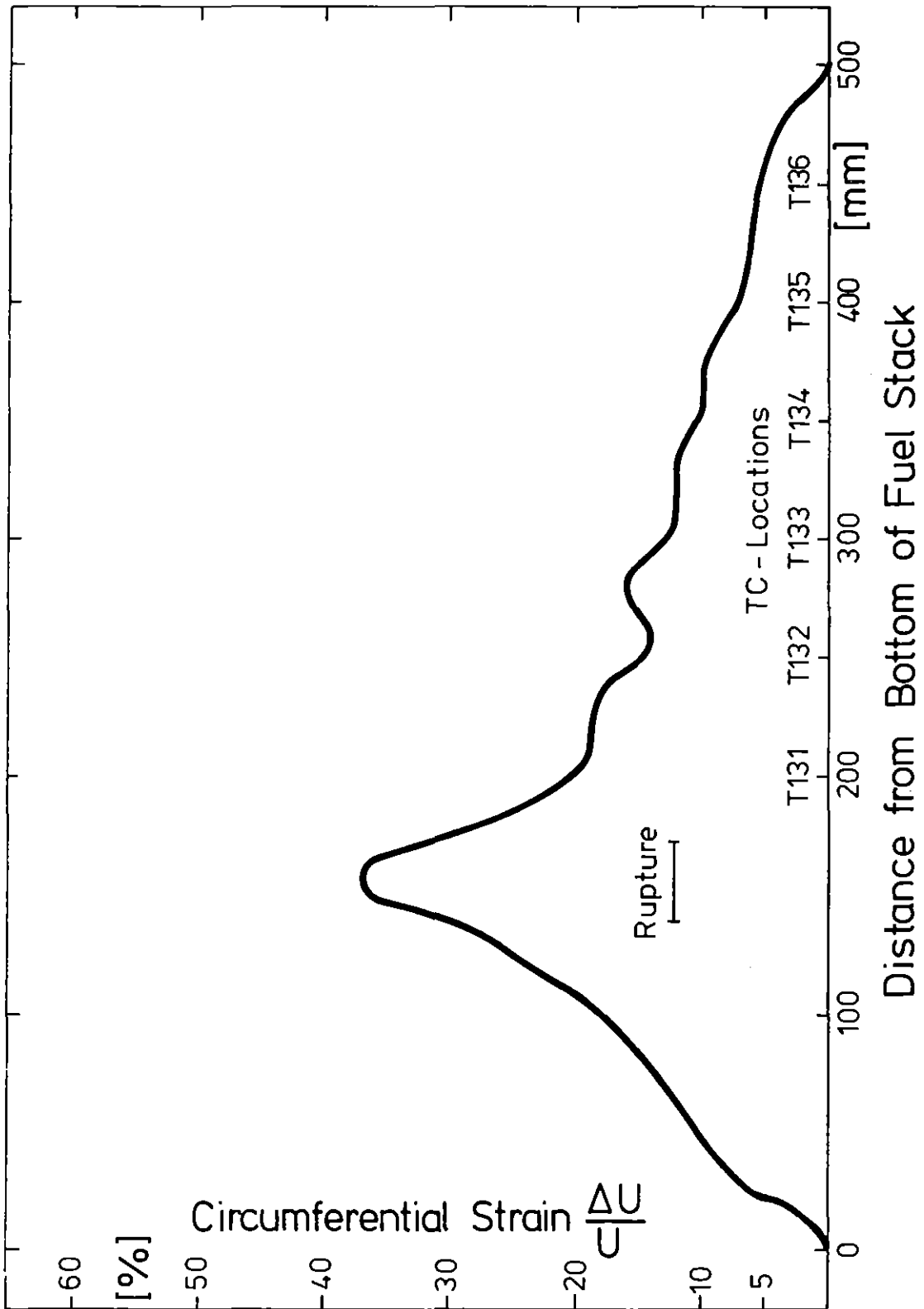
## FR2 In - Pile Tests

Axial Profile of Circumferential Strain, Test C1

Abb.: 39.1





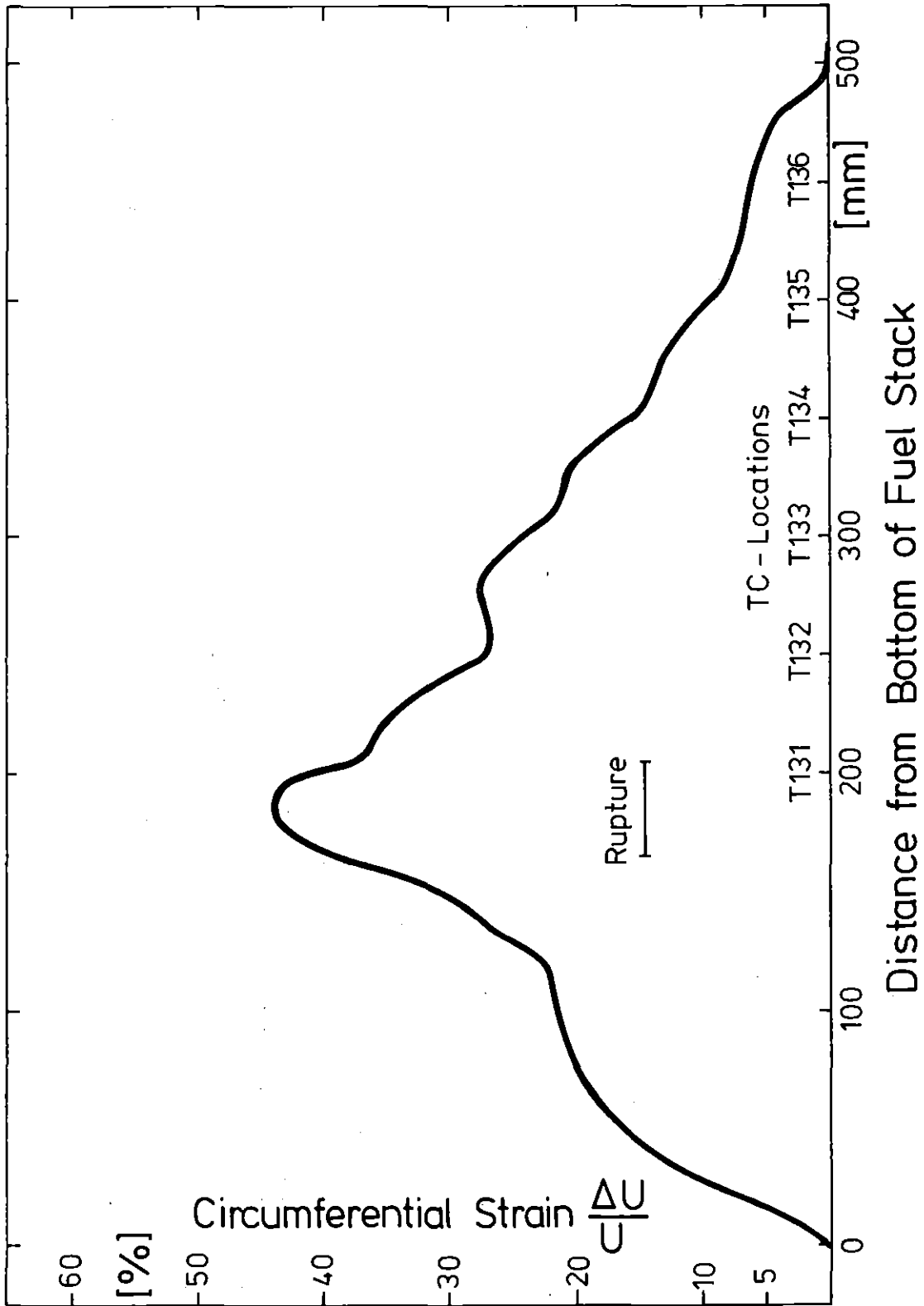


IT 81  
PNS 4237-95.33

## FR2 In - Pile Tests

Axial Profile of Circumferential Strain, Test C3

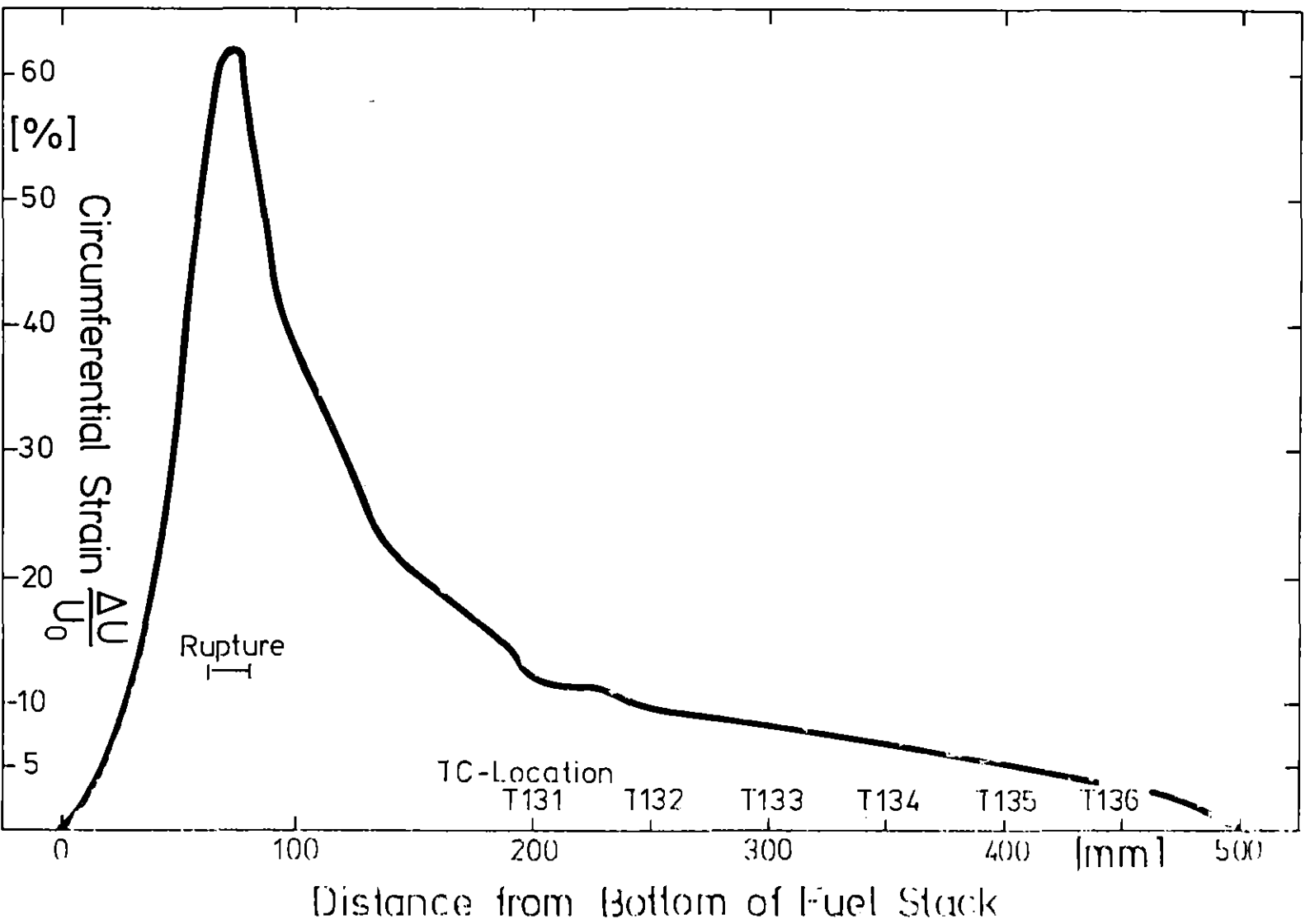
Abb.: 39.3



## FR2 In - Pile Tests

Axial Profile of Circumferential Strain, Test C4

Abb.: 39.4

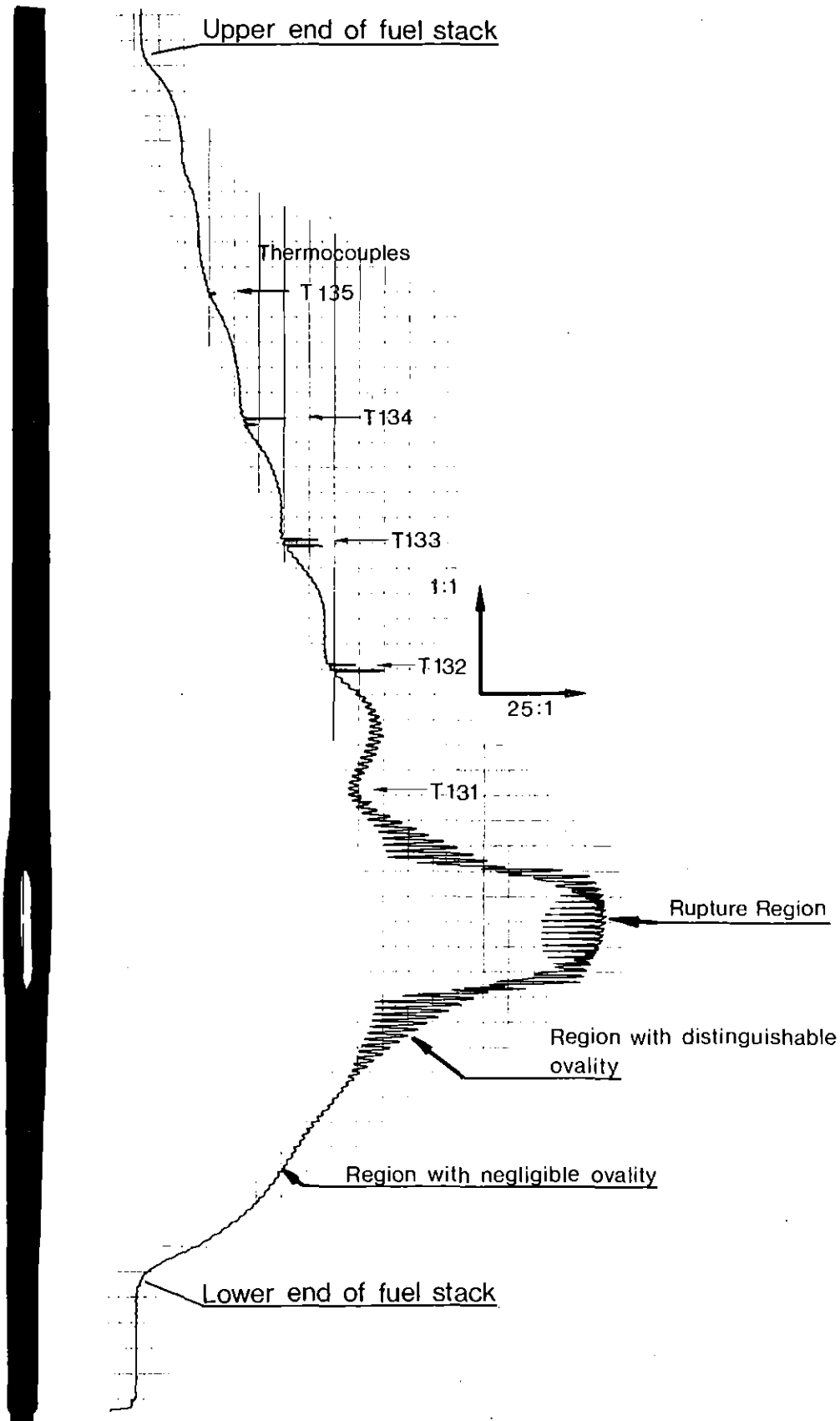


IT 81  
PNS 4.137-95.3E

### FR2 In - Pile Tests

Axial Profile of Circumferential Strain, Test C5

Abc.: 355

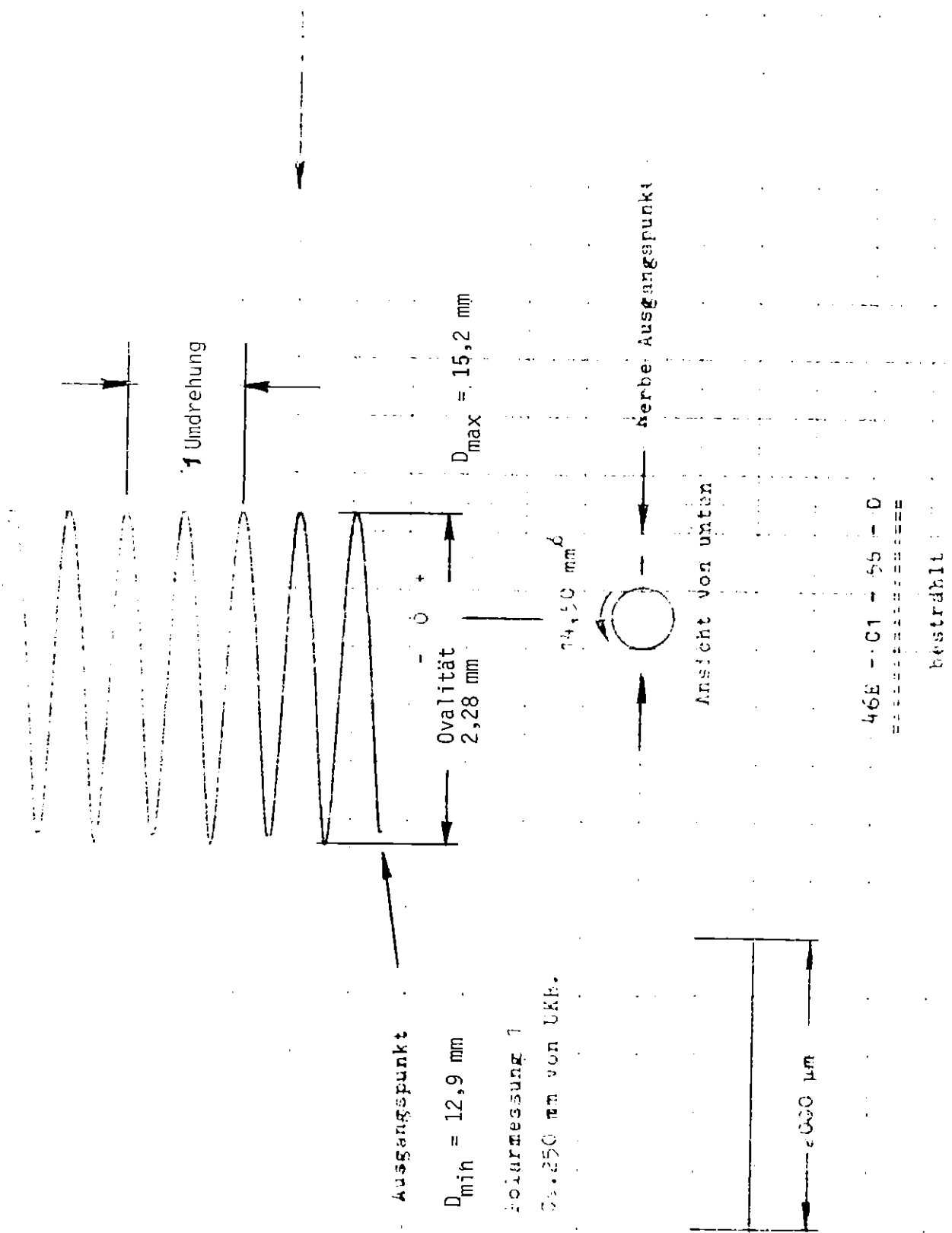


## FR 2 In-Pile Tests.

Typical spiral profile;

posttest measured rod diameters of test A2.2 Abb.: 40

9.6.80 R...

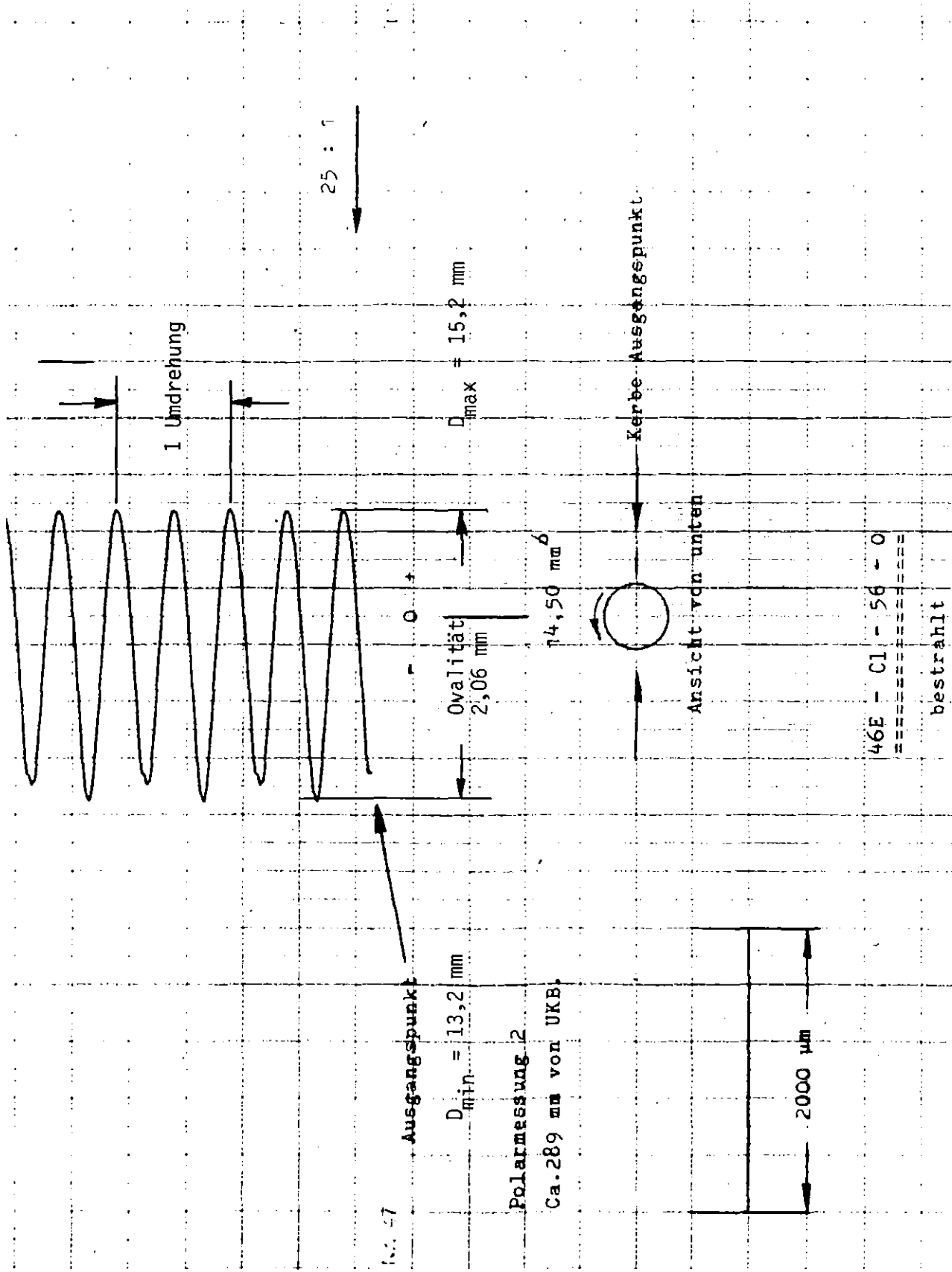


IT - 1981

POLARMESSUNG 1 (149 MM VON UKF)

VERSUCH C1 STAB NR. 56

Abb.: 41.1



*Reid*

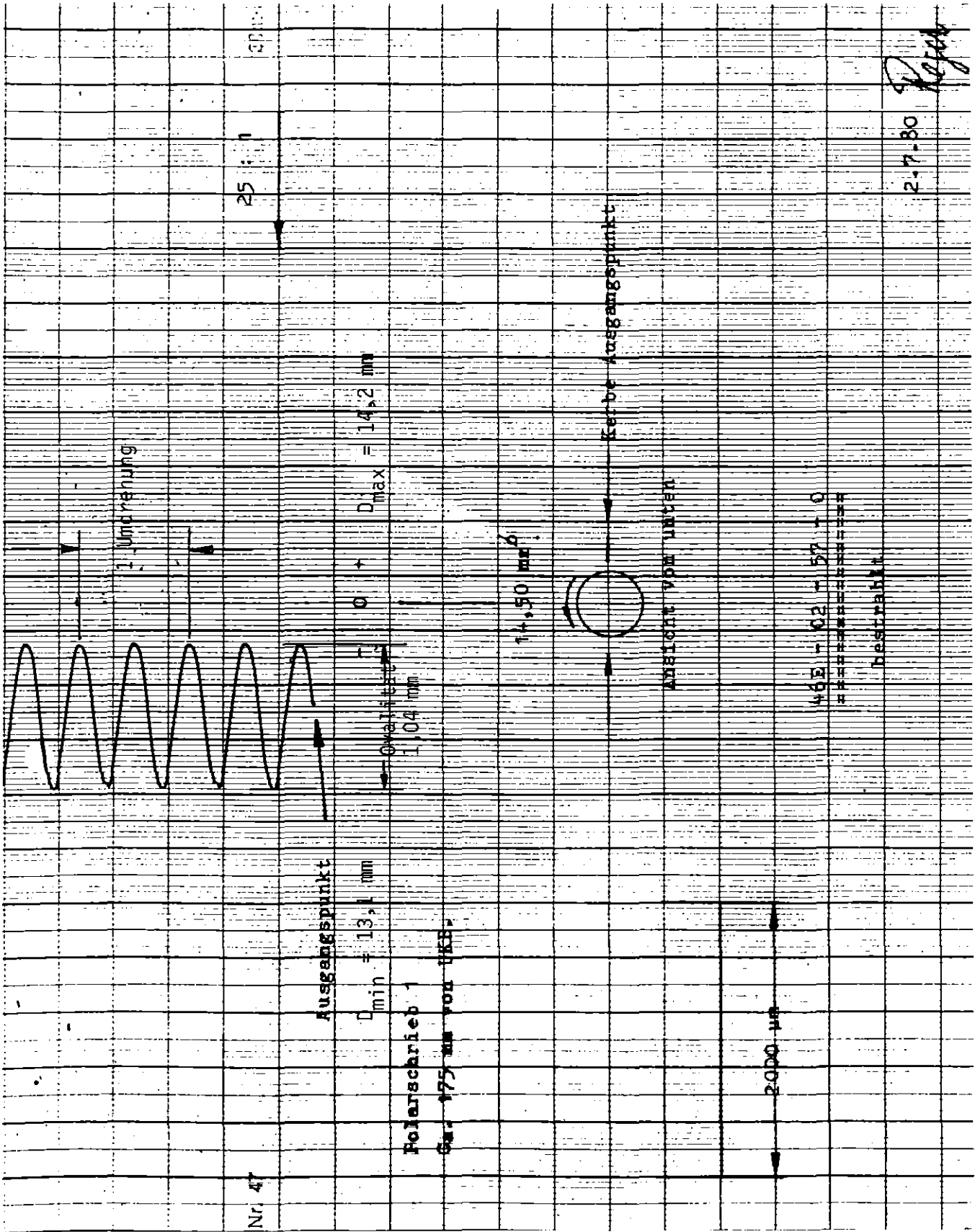
9.6.80



IT - 1981

POLARMESSUNG 2 (188 MM VON UKF)  
VERSUCH C 1 STAB NR. 56

Abb.: 41.2



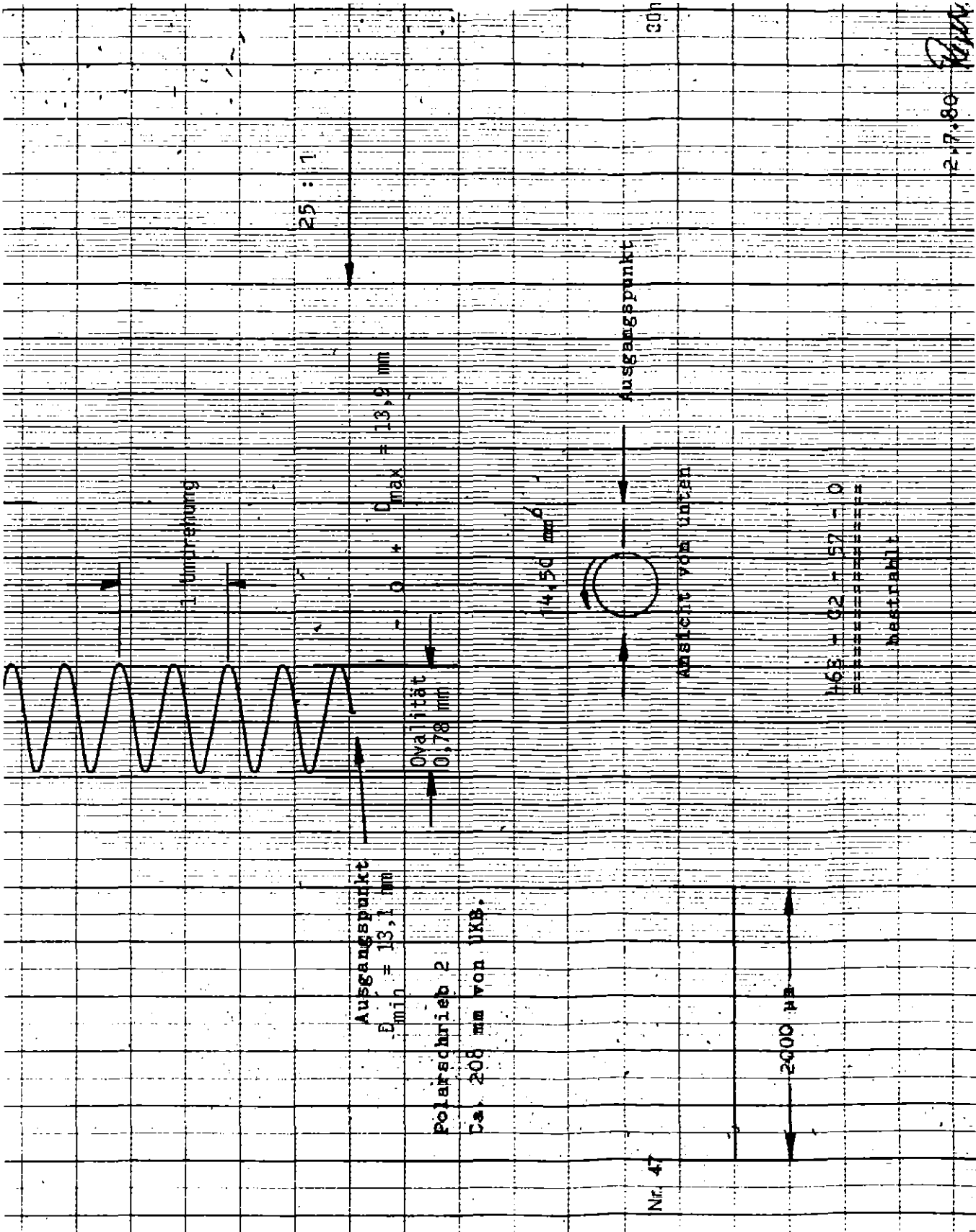
IT - 1981

POLARMESSUNG 1 (74 MM VON UKF)

VERSUCH C 2 STAB NR. 57

Abb: 42.1





IT - 1981

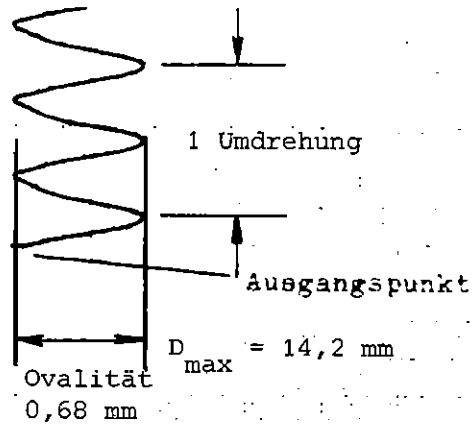
POLARMESSUNG 2 (107 MM VON UKF)

VERSUCH C 2 STAB NR. 57

Abb:42.2



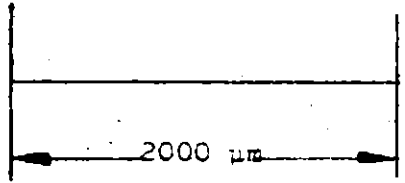
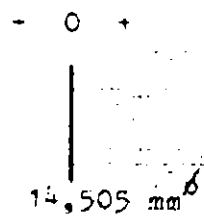
$D_{\min} = 13,5 \text{ mm}$



25 : 1



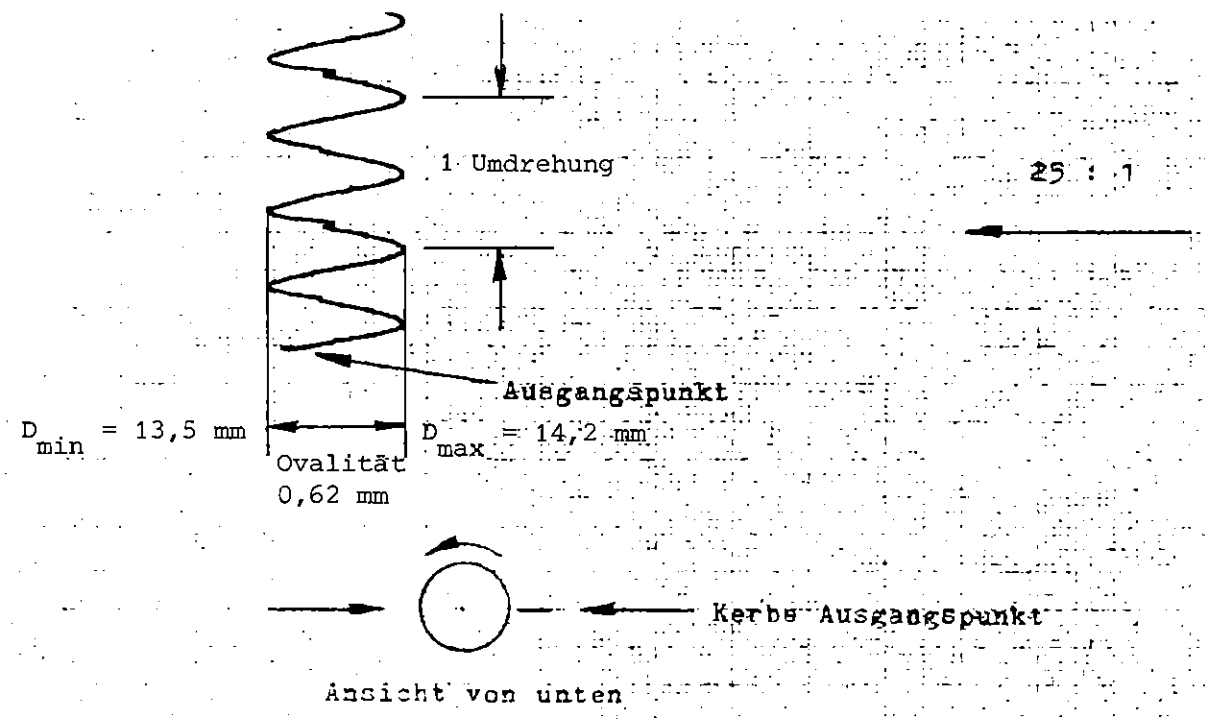
Polarmessung 1  
 236,5 mm von UKF.



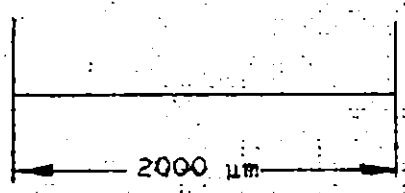
46E - C3 - 59 - 0

bestrahlt

30.4.81 *Perrin*



Polarmessung 2  
277,5 mm von UKF.

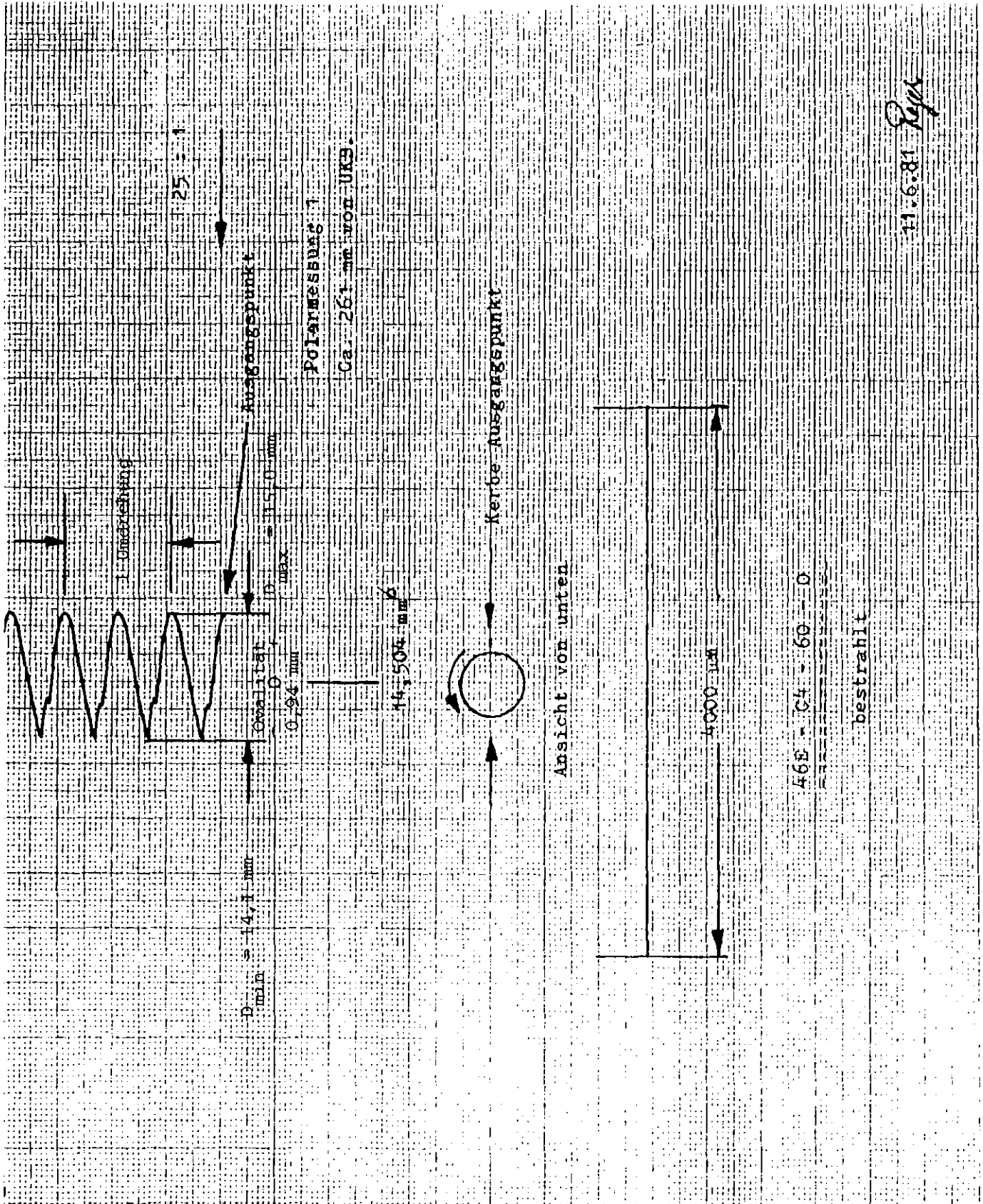


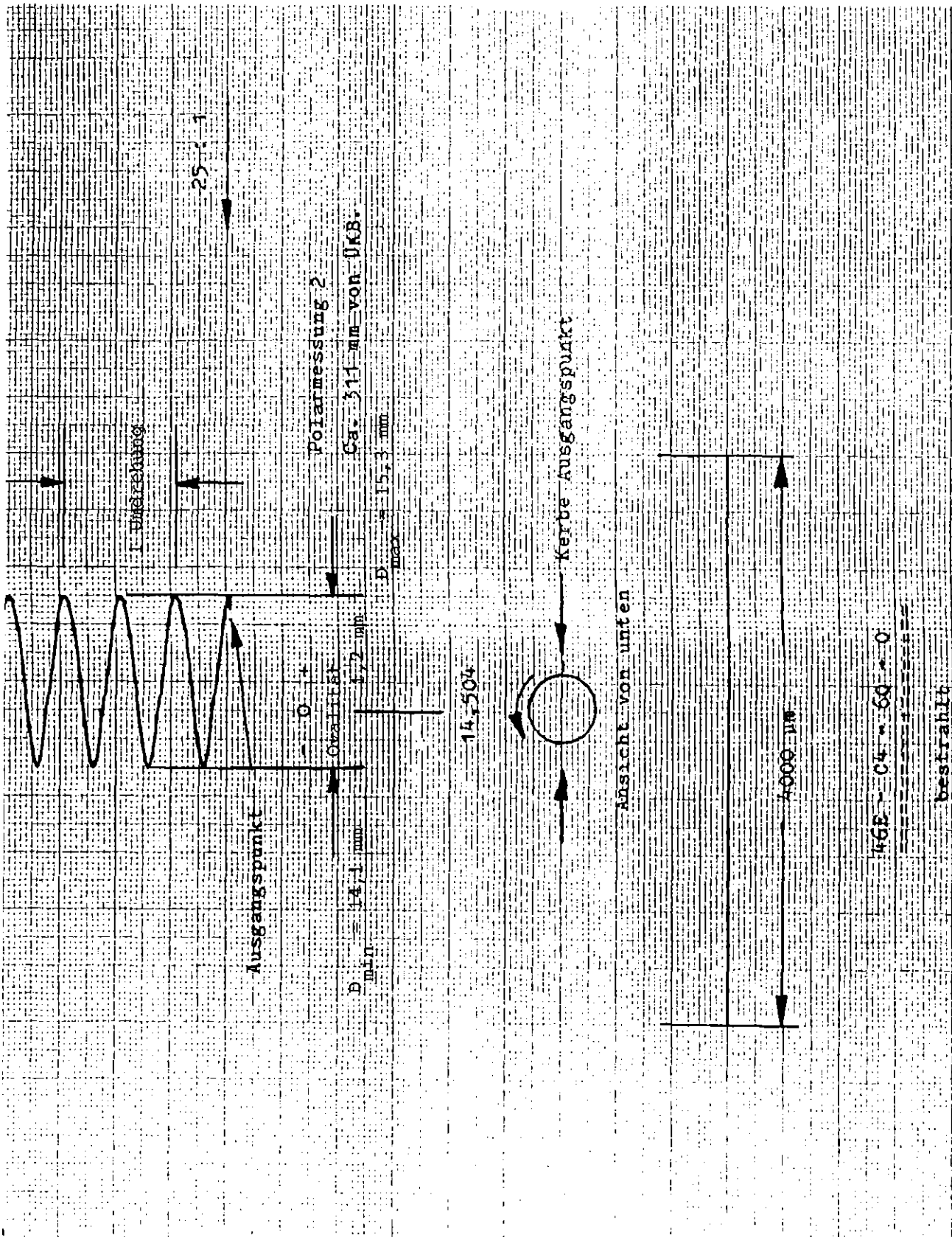
14,505 mm

46E - 63 - 59 - 0

bestrahlt

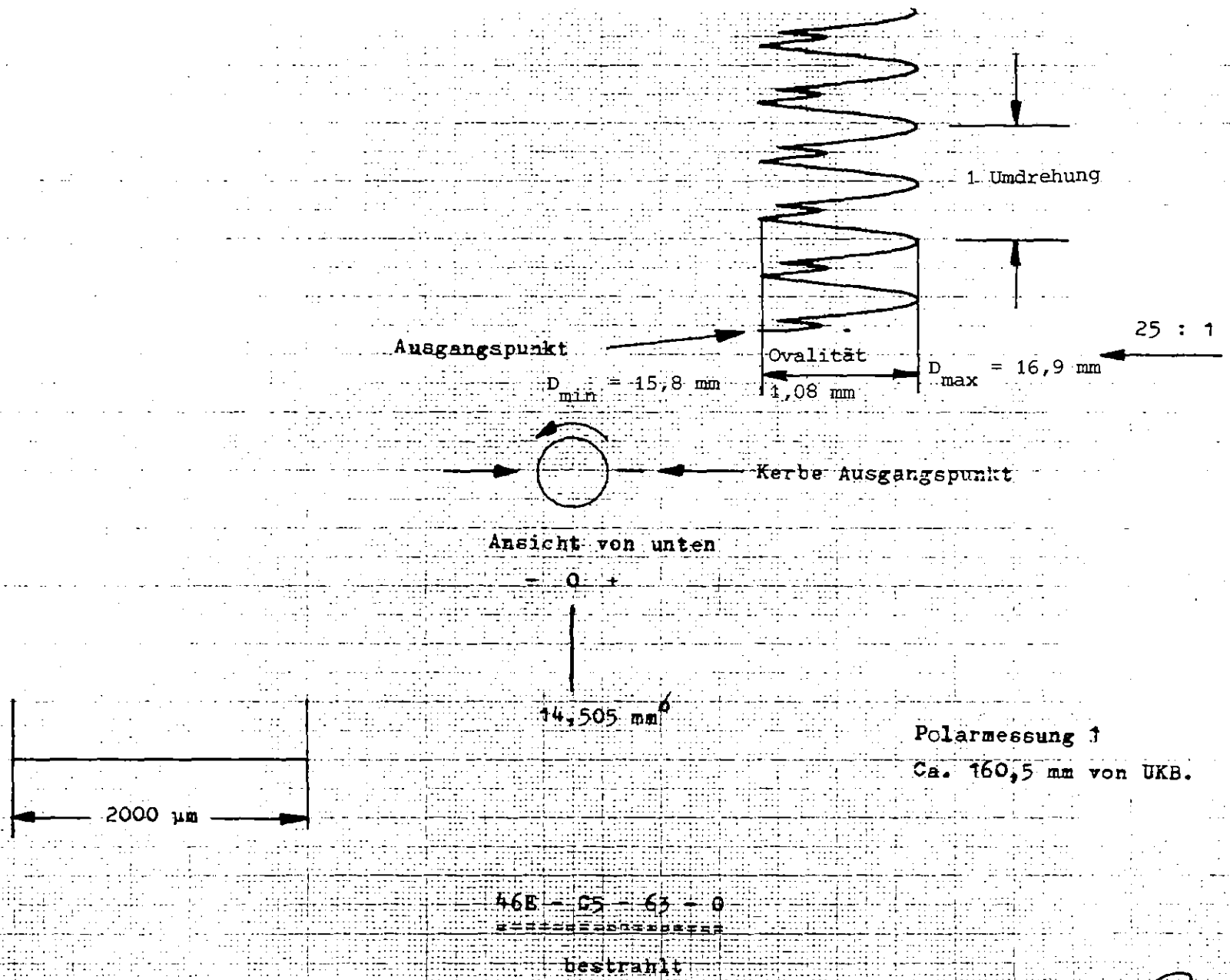
30.4.81





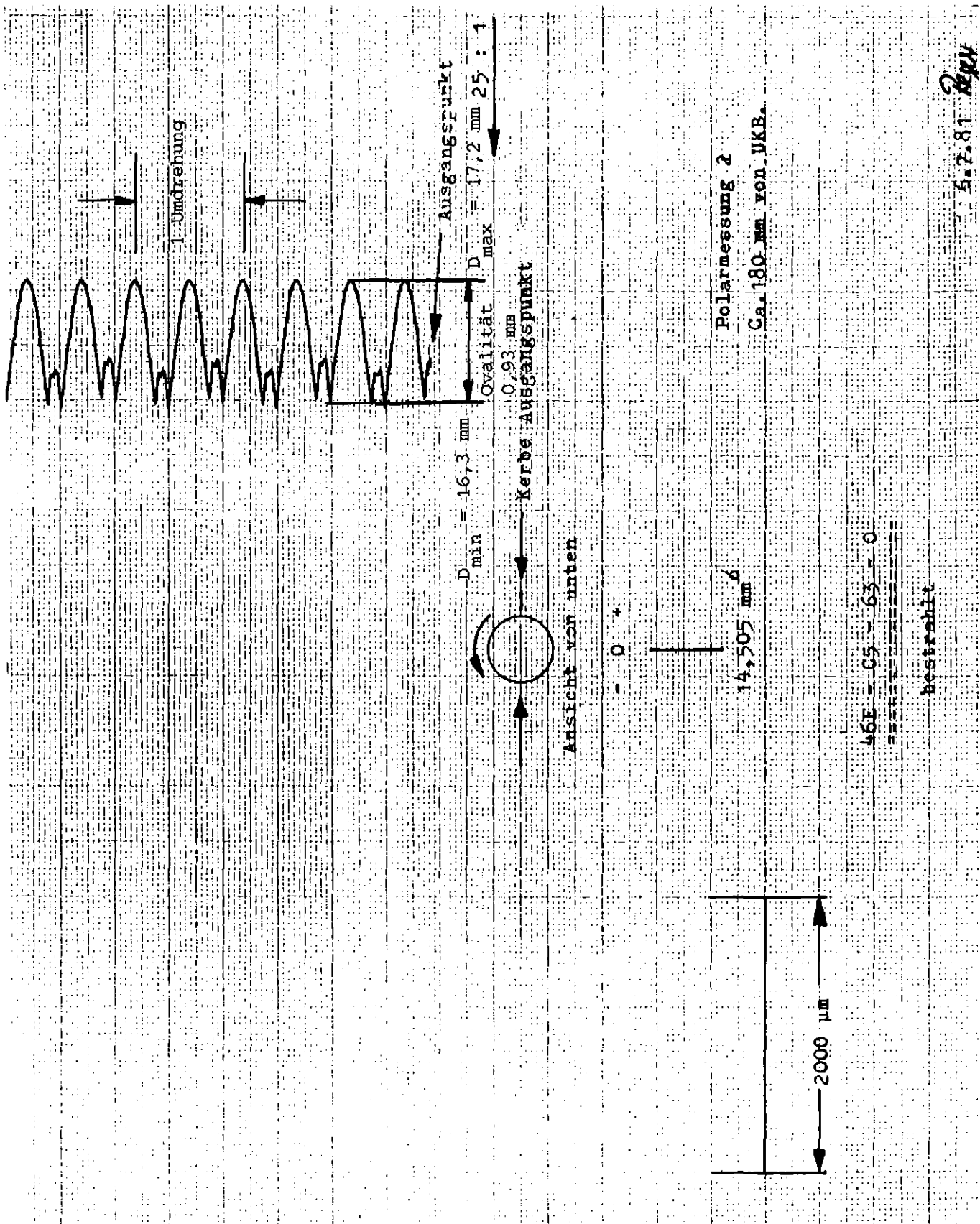
11.6.81 *Recht*

KJK IT 1981



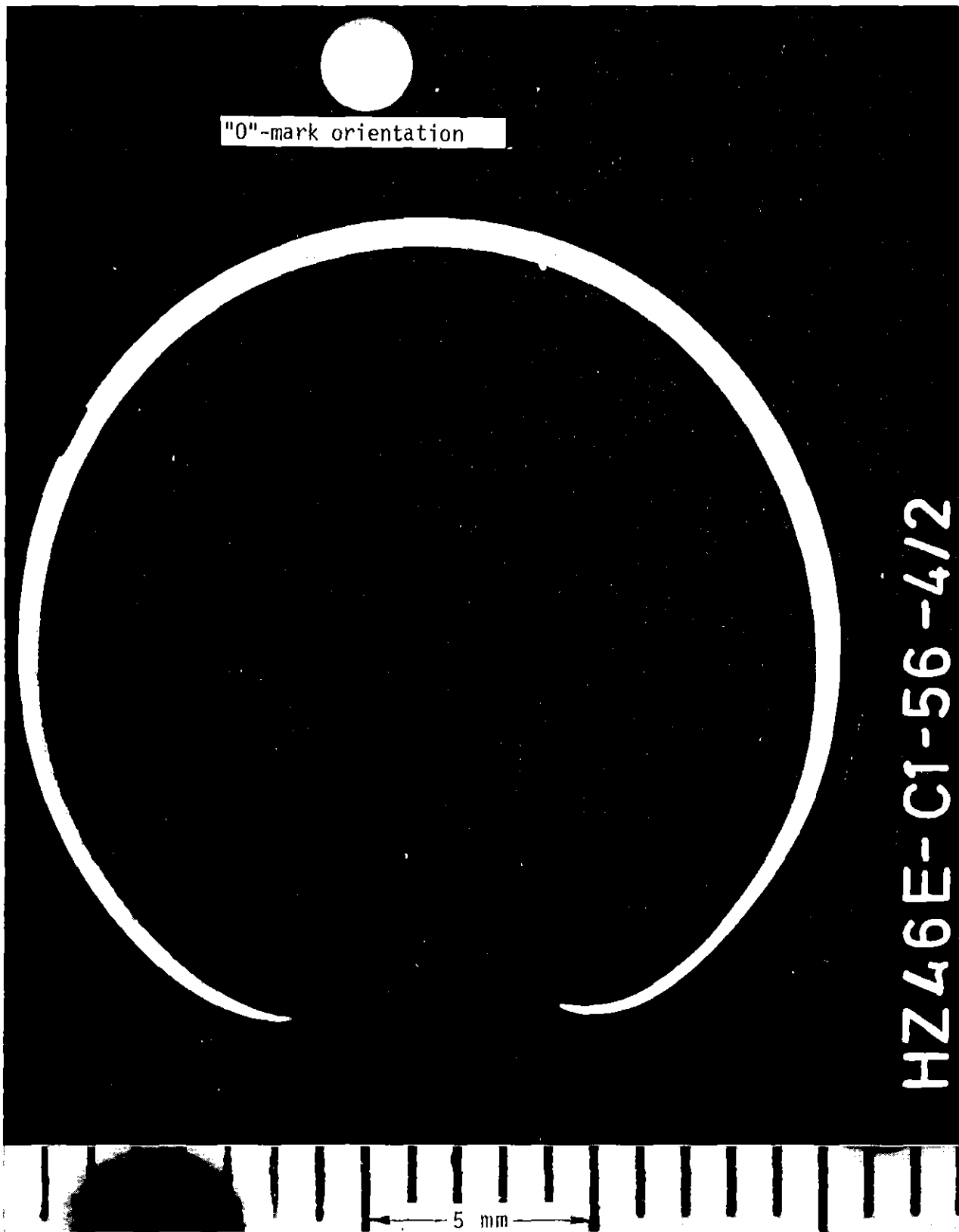
Polarmessung 1  
Ca. 160,5 mm von UKB.

6.2.81 *Reyer*



POLARMESSUNG 2 (79 MM VON UKF)  
VERSUCH C5 STAB NR. 63

Abb.: 45.2



IT 1981  
PNS 4237-644

FR 2 In-Pile Tests. Test C 1

Cross Section, Max. Circumferential Strain Abb.:46.1





HZ46E-C2-57-512

88 mm from UKF

5 mm



IT 1981  
PNS 4237-645

FR 2 In-Pile Tests. Test C2

Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.: 46.2



HZ 46E-C3-59-3/2

159 mm from UKF

5 mm



IT 1981  
PNS 4237-636

FR 2 In-Pile Tests. Test C3

Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.:46.3



187 mm from UKF

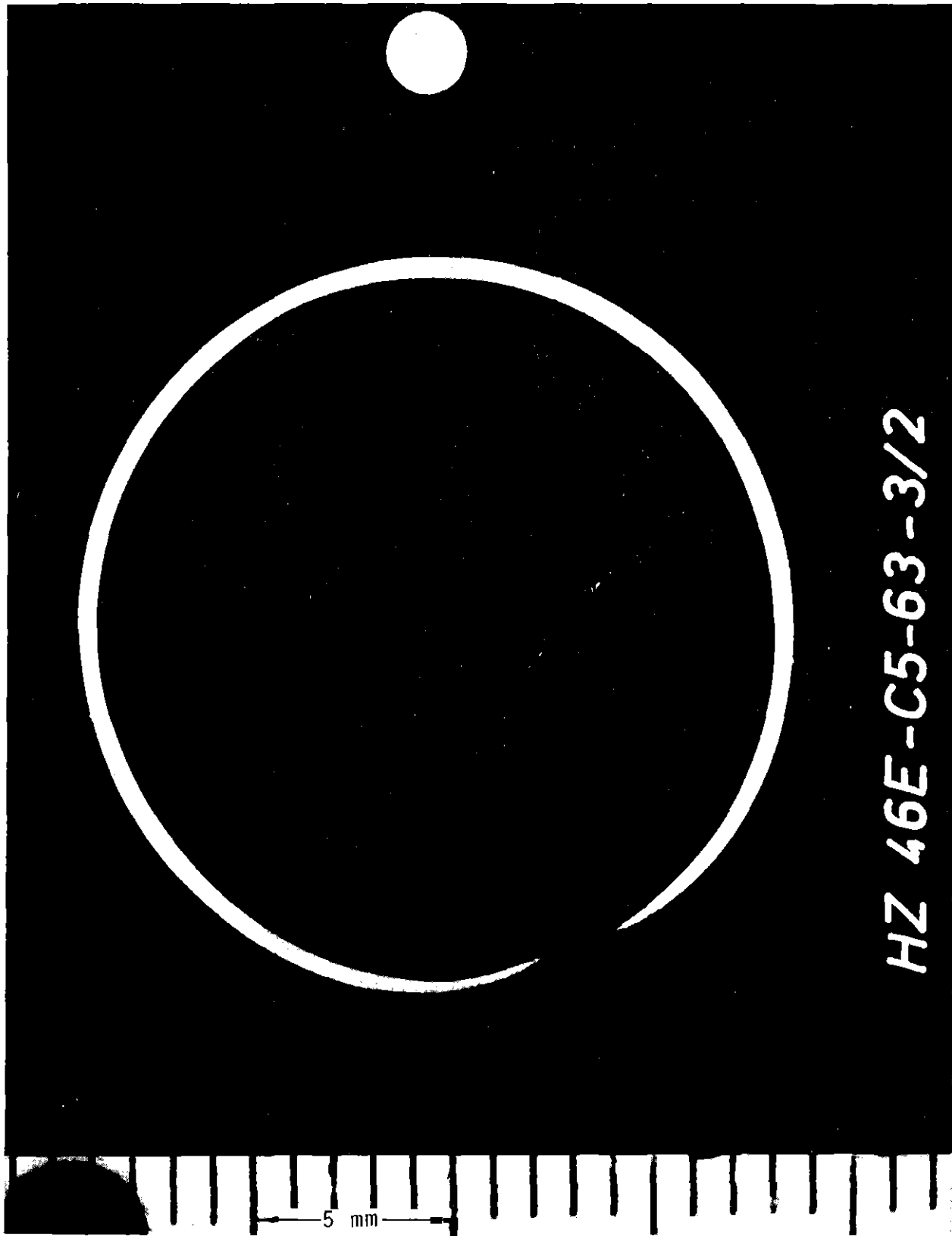


IT 1981  
PNS 4237-637

FR 2 In-Pile Tests. Test C4

Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.: 46.4



69 mm from UKF

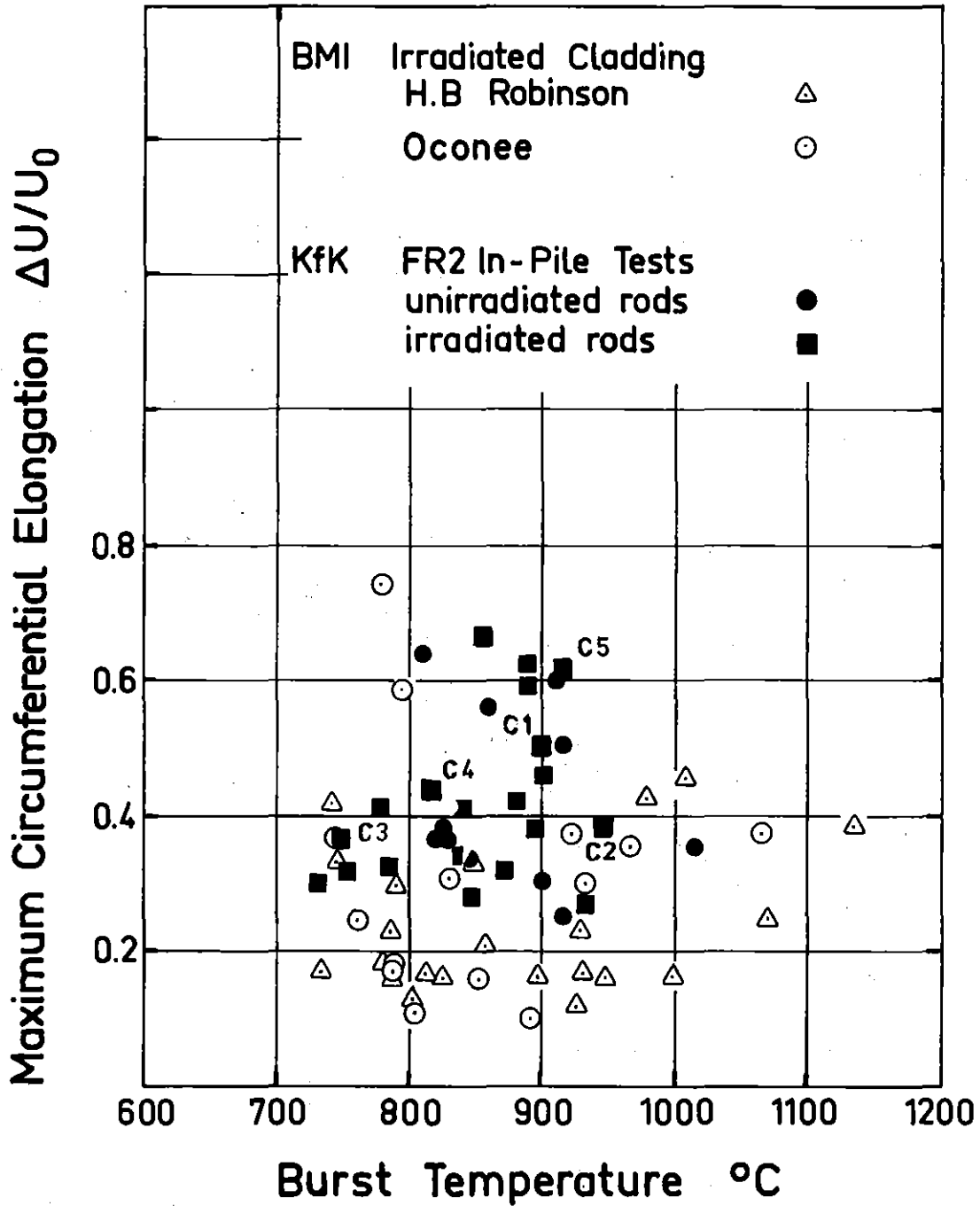


IT 1981  
PNS 4237- 638

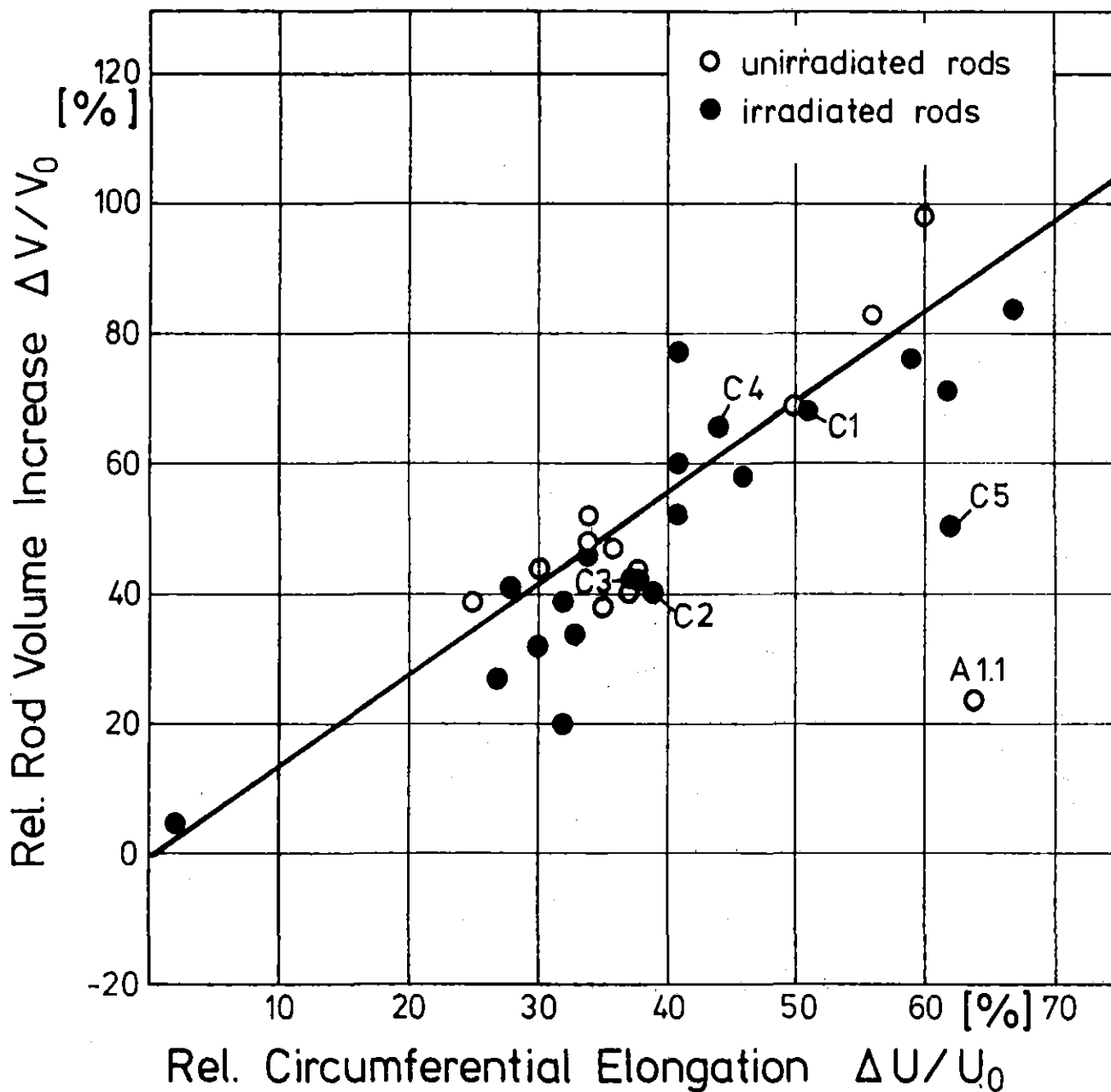
FR 2 In-Pile Tests. Test C5

Cross Section, Max. Circumferential Strain

Abb.:46.5



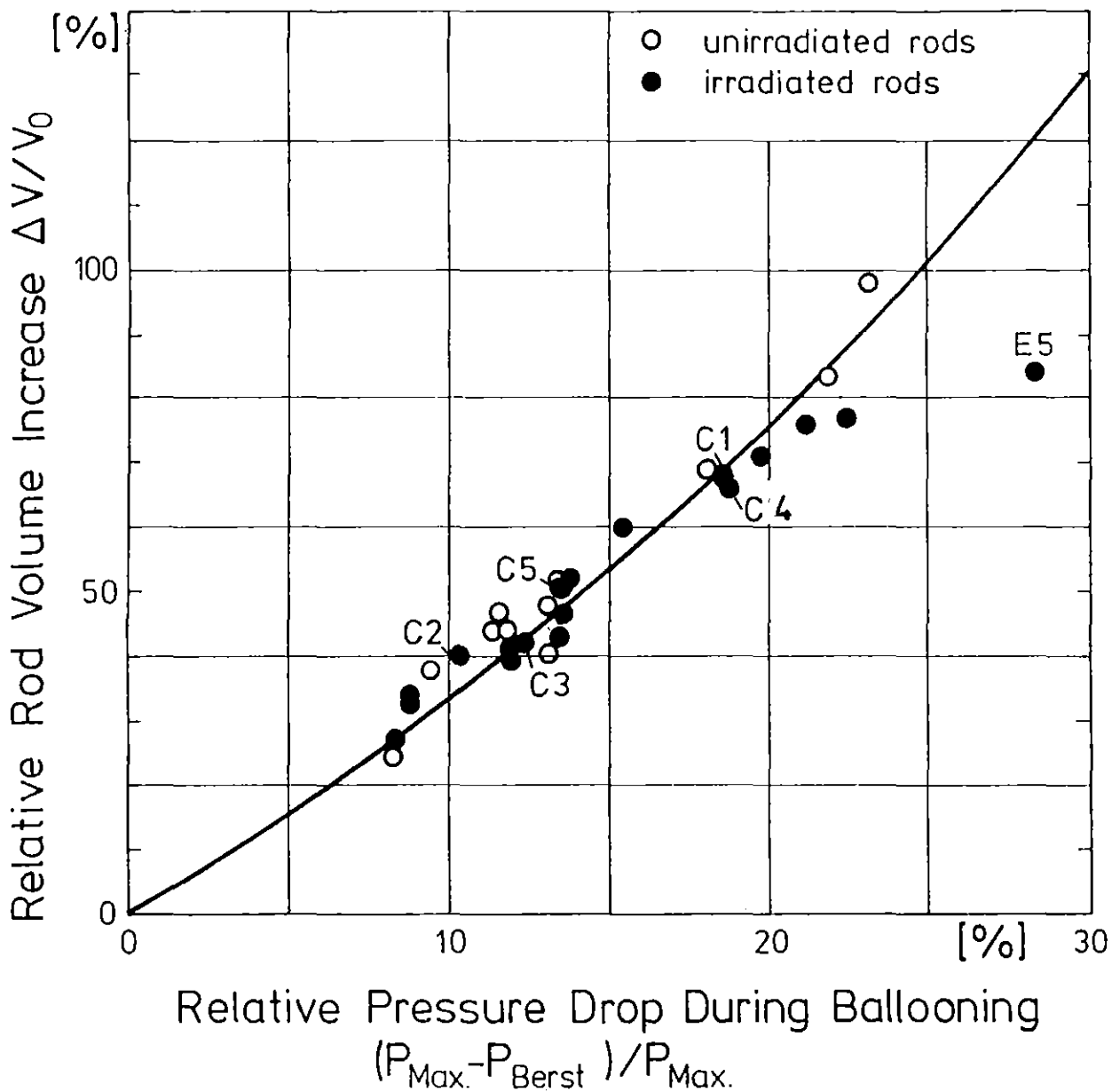
FR2 In-Pile Single Rod Tests in Steam      Abb: 47  
Max. Circumferential Elongation vs. Burst Temperature



### FR 2 In-Pile Tests

Abb.: 48

Relative Volume Increase of Burst Rods vs. Relative Circumferential Elongation

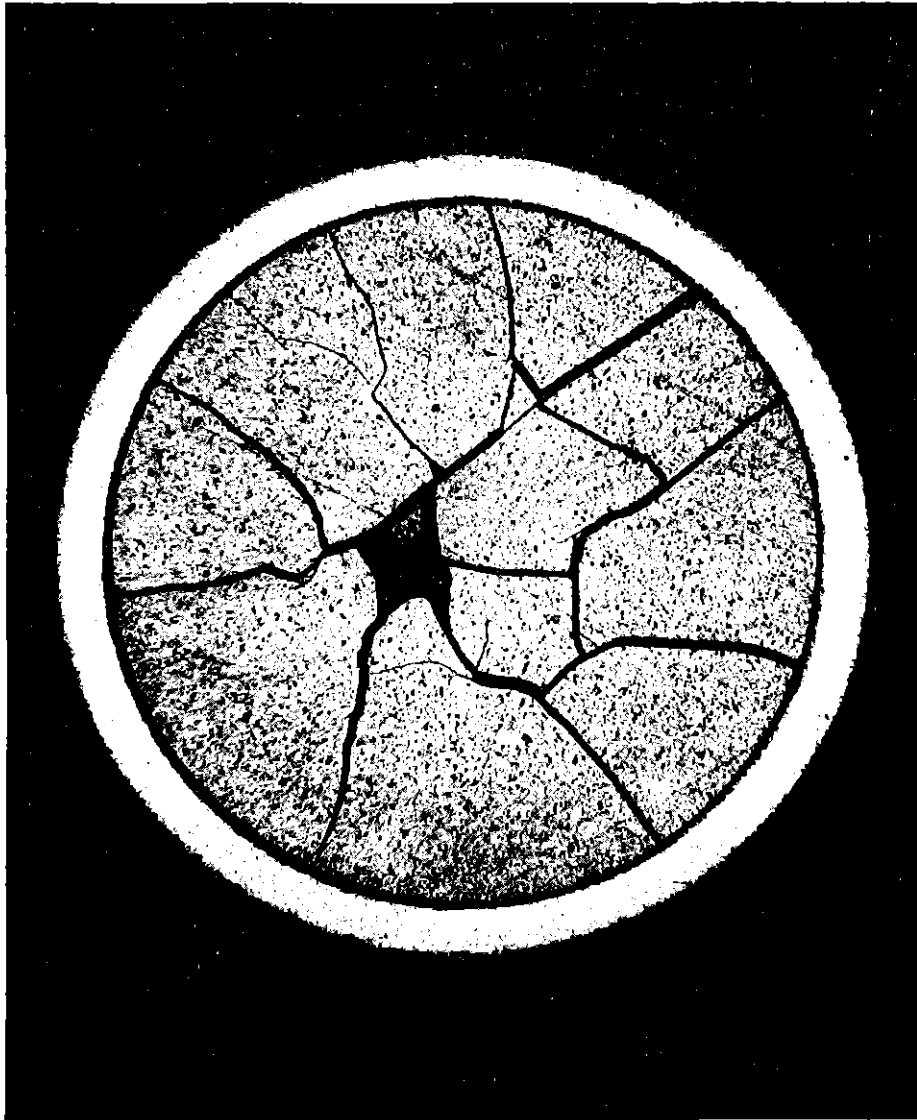


IT 81  
PNS 4237-232.31

## FR2 In-Pile Tests

Rod Volume Increase vs. Internal Rod Pressure Drop

Abb.: 49



*HZ-46E-C6-62-6/24 10x geätzt*

2 mm

Sample 6; 196 mm from UKF

2 500 MWd/t burnup,

not transient-tested



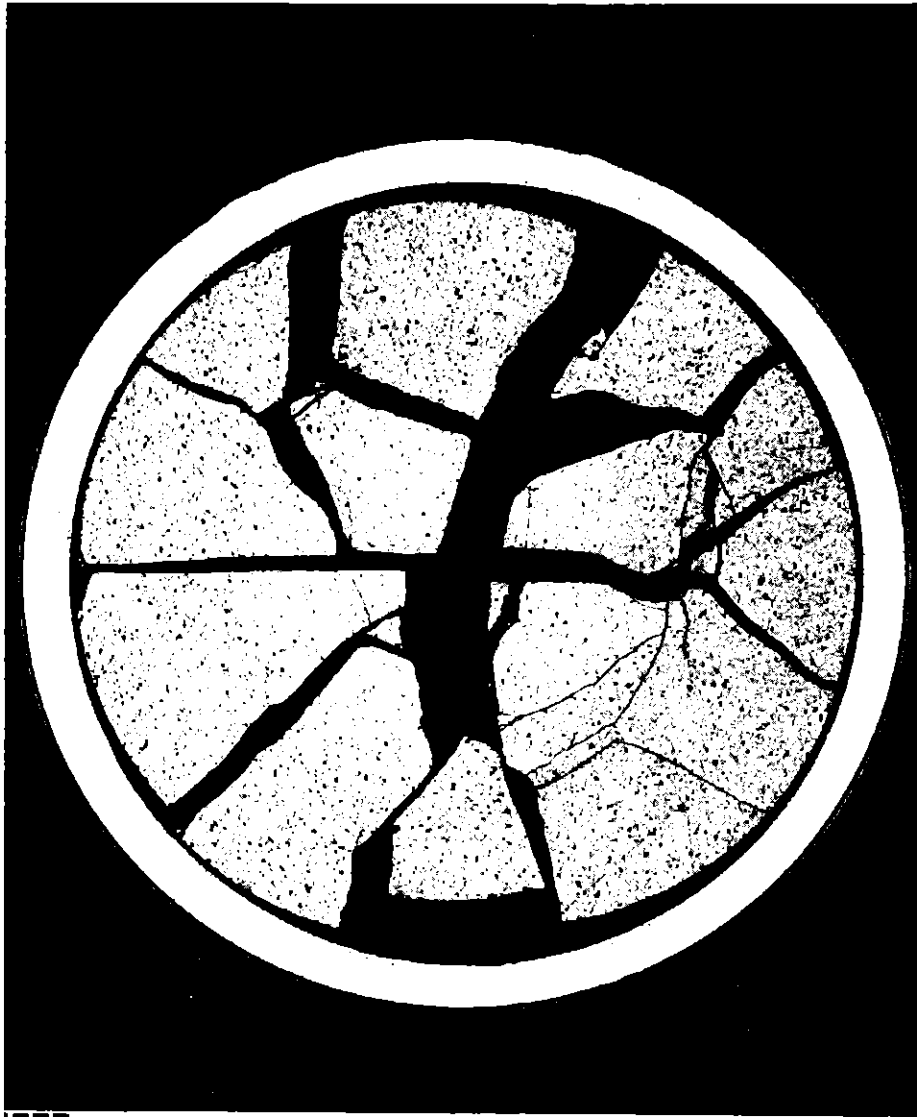
IT 1981  
PNS 4237-639

FR 2 In-Pile Tests.

Cross Section of the C6 Fuel Rod

Fig. 50.1





*HZ-46B-C2-57-7/14 10x geätzt*

2 mm

Sample 7; 29 mm from UKF

2500 MWd/t burnup

transient-tested,

local circumferential elongation 8%

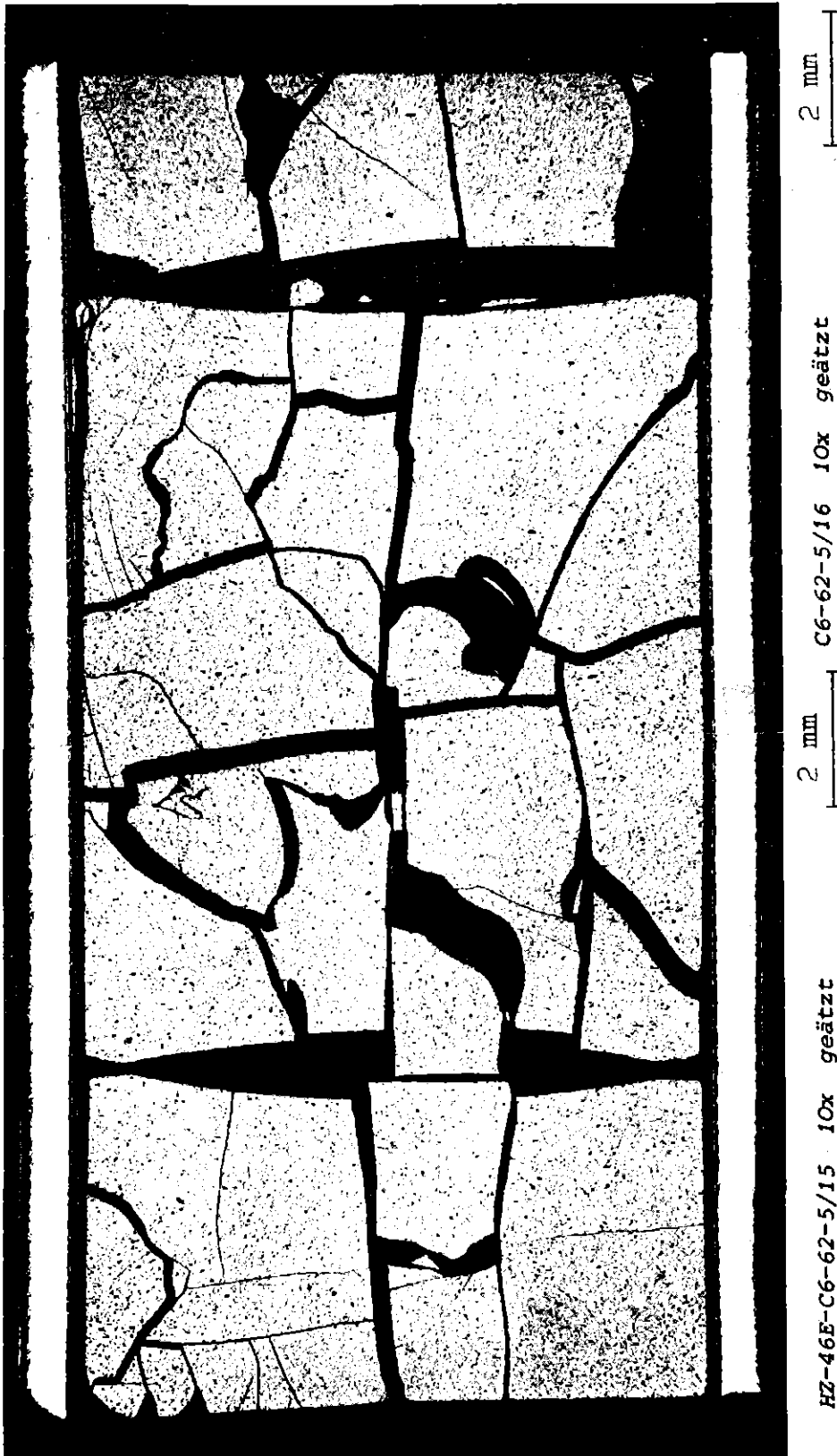


IT 1981  
PNS 4237-640

## FR 2 In-Pile Tests.

Cross Section of the C2 Fuel Rod

Fig. 50.2



IT 1981  
PNS 4237-641



## FR 2 In-Pile Tests

### Longitudinal Section of Test Rod C6

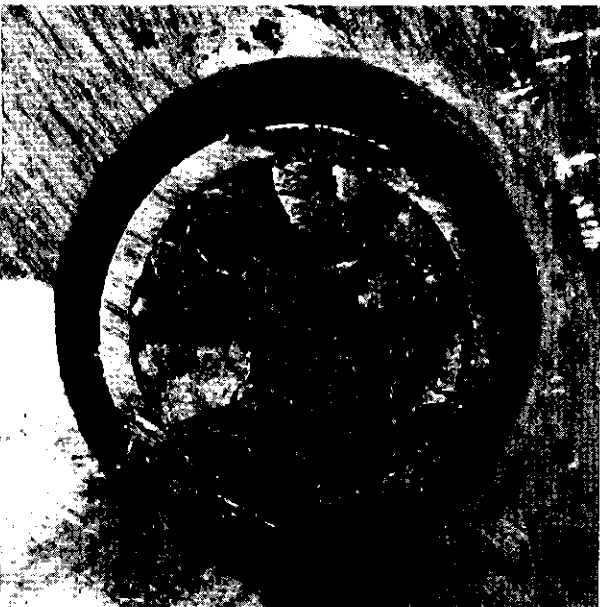
Fig. 50.3



Sample 3; 79 mm from UKF



66mm from UKF



Sample 4; 15mm from UKF



UKF



IT 1981  
PNS 4237-642

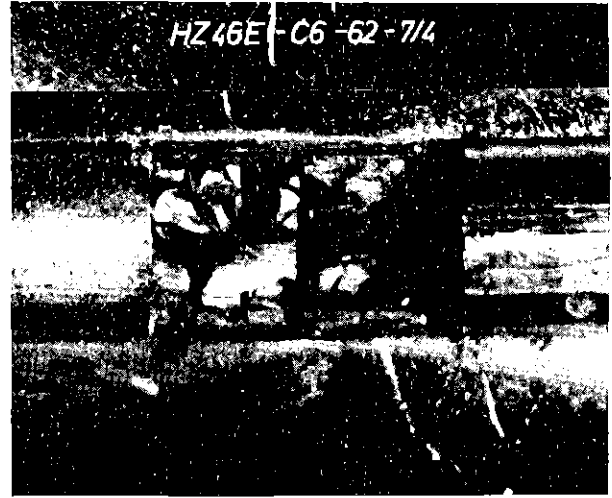
## FR 2 In-Pile Tests.

View of the Fuel Condition of the C 6 Fuel Rod

Fig. 51



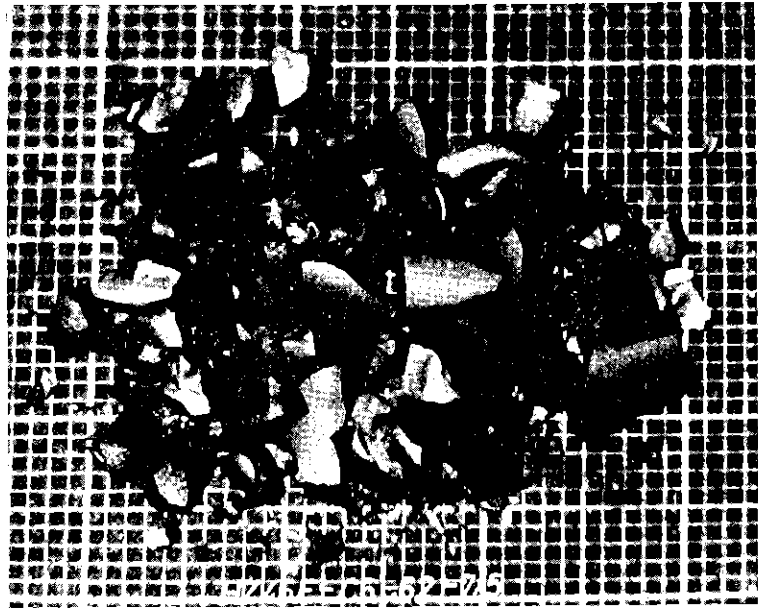
cut-away of cladding section



rod section emptied of fuel except for fragments bonded to the cladding



piece of cladding cut away with fuel bonding



fuel fragments

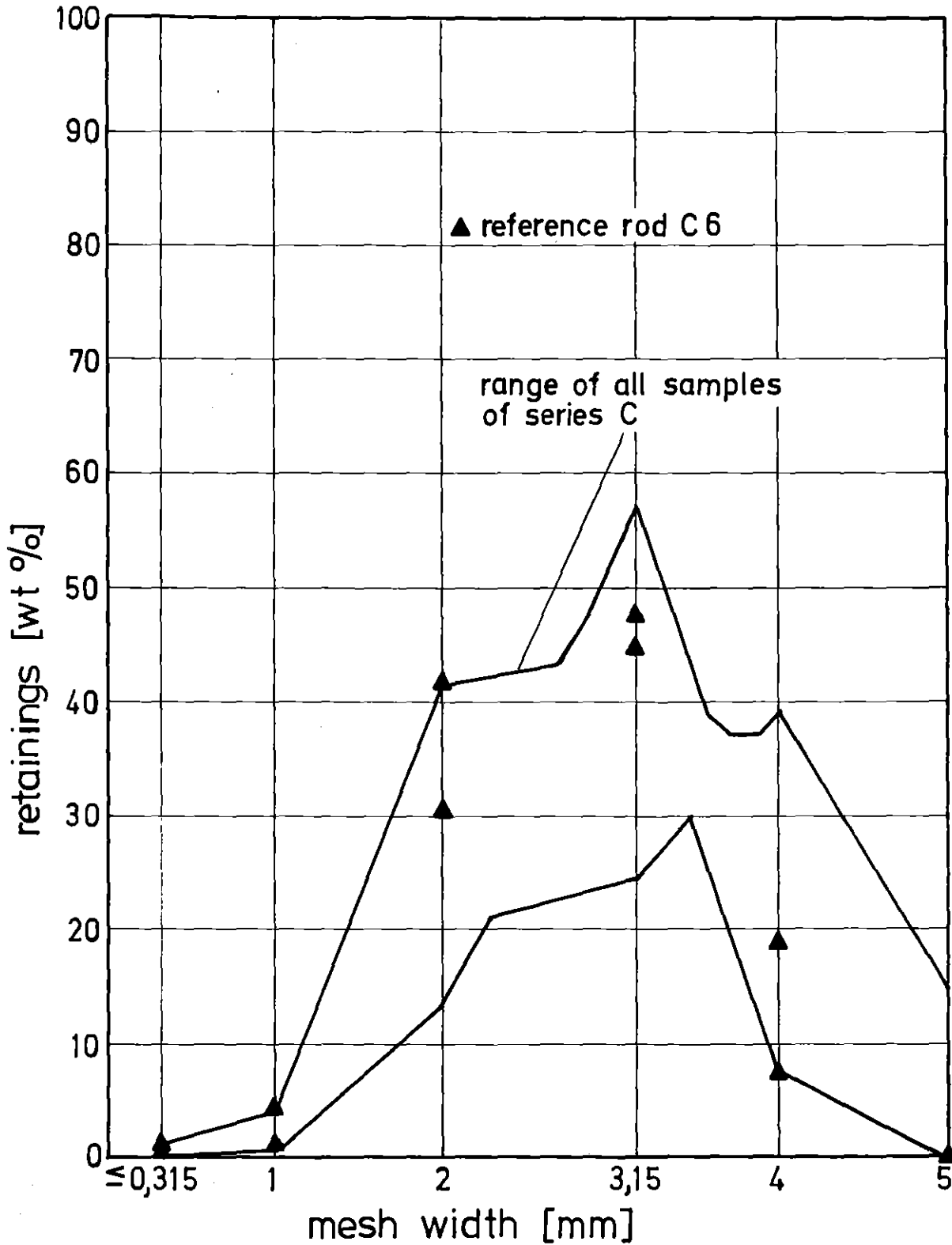


IT 1981  
PNS 4237-643

## FR 2 In-Pile Tests.

Fuel Pellet Fragments from C6 Fuel Rod

Fig. 52

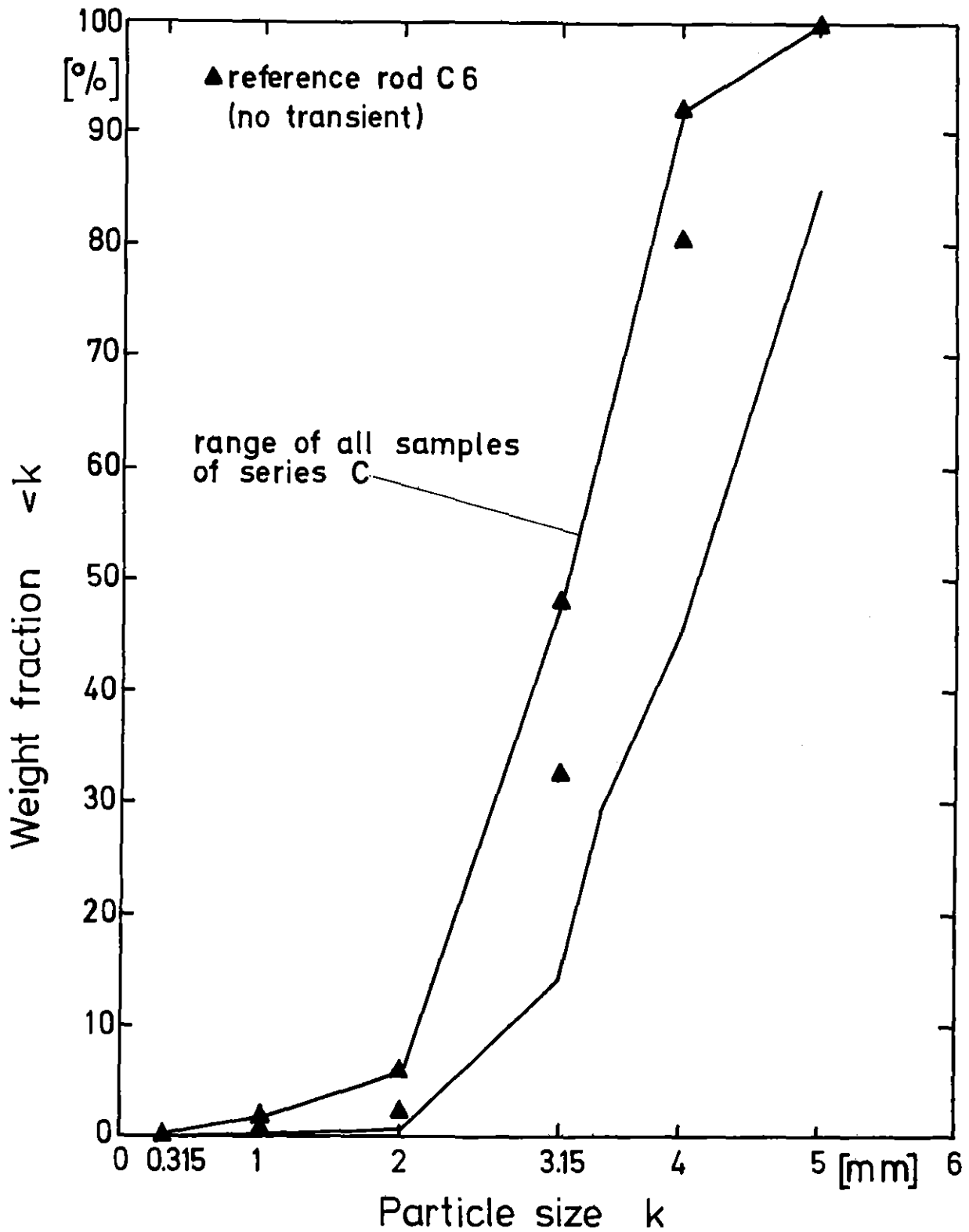


**KfK**  
IT-81  
PNS4237-634

## FR2 In-Pile Tests: Series C

Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses

Abb.:531



KfK  
IT 81  
PNS/237-635

## FR 2 In-Pile Tests: Series C

Fuel Particle Size Distribution, Sieve Analyses

Abb.: 53.2

A N H A N G

Meßwerte vor Auslösung der Transienten,  
Versuch C1 bis C5

Tabelle 16.1: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: C 1

Datum: 24.4.1979

Uhrzeit: 12.13.54

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	512 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	501 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	320 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	377 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	346 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	355 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	350 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	293 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	380 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	385 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	397 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	418 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	403 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	384 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	65 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	61 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	1,24 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	55 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	289 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	543 °C
35	T115/T116 NBE	Temperaturdiff. Prüfling mittl. Leistung der umgeb. BE's	20,9 K 54 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	49 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	52 - 53 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	67 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	781 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h



Tabelle 16.2: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: C 2

Datum: 26.4.1979

Uhrzeit: 11.47.46

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	501 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	319 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	314 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	375 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	345 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	353 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	348 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	290 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	370 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	371 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	379 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	380 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	382 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	377 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	65 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	61 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	61 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,27 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	33 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	289 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	21,9 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	52 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	51 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	54 - 55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	783 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

Tabelle 16.3: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: C 3

Datum: 2.5.1979

Uhrzeit: 12.00.47

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	319 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	315 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	336 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	377 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz.	345 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	354 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	349 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	291 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	374 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	373 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	381 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	382 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	378 °C
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	378 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	65 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	61 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	61 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,26 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	111 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	281 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	288 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	21,8 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	55 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	54 - 55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	67 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	801 mbar
	m	Dampfmengenstrom	118 kg/h

Tabelle 16.4: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: C 4

Datum: 4.5.1979

Uhrzeit: 11.29.46

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	500 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	318 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	313 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	335 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	375 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	344 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	352 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	348 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	289 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	356 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	364 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	372 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	376 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	379 °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	61 bar
18	P 63	Druck vor Blende	60 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	61 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,27 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	80 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	282 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	289 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	542 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	22 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	56 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	49 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	53 - 54 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	66 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	786 mbar
	m	Dampfmengenstrom	117 kg/h

Tabelle 16.5: Meßwerte vor Auslösung der Transiente

Versuch Nr.: C5

Datum: 8.5.1979

Uhrzeit: 11.36.27

CALAS-Adresse	Meß-stelle	Meßstellenbezeichnung	CALAS-Meßwert
0	T 42	Temp. hinter Ve 108, vor RE	511 °C
1	T 5	Temp vor Reaktoreinsatz	498 °C
2	T 114	Temp. im Reaktoreinsatz	311 °C
3	T 115	Temp. vor Prüfling	307 °C
4	T 116	Temp. hinter Prüfling	325 °C
5	T 6	Temp. hinter Reaktoreinsatz	366 °C
6	T 113	Temp. im Reaktoreinsatz	338 °C
7	T 58	Temp. vor Blende	345 °C
8	T 103	Temp. hinter Blende	341 °C
9	T 117	Druckrohrtemperatur	281 °C
10	TX 1	Versuchstemperatur 1	346 °C
11	TX 2	Versuchstemperatur 2	348 °C
12	TX 3	Versuchstemperatur 3	349 °C
13	TX 4	Versuchstemperatur 4	349 °C
14	TX 5	Versuchstemperatur 5	-
15	TX 6	Versuchstemperatur 6	361 °C
16	P 60	Druck hinter Ve 108, vor RE	61 bar
17	P 61	Druck hinter Reaktoreinsatz	57 bar
18	P 63	Druck vor Blende	56 bar
19	P 6	Druck hinter Blende	57 bar
20	P 62	Druck nach Entspann-Ve 111	1,28 bar
21	P 74	Druck im Prüflingsplenum	25 bar
32	T 1	Temperatur hinter Vorwärmer	278 °C
33	T 2	Temperatur im Verdampfer	285 °C
34	T 4	Temperatur hinter Überhitzer	543 °C
35	T115/T116	Temperaturdiff. Prüfling	19,9 K
	NBE	mittl. Leistung der umgeb. BE's	57 kW
37	TEI	D <sub>2</sub> O-Eintrittstemperatur	50 °C
38-45	TBE 1-8	D <sub>2</sub> O-Temp. Brennelement 1 - 8	54 - 55 °C
46	P 5	Druck hinter Überhitzer	63 bar
48	P 64	Differenzdruck Dampfblende	791 mbar
	m	Dampfmengenstrom	115 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.