

- 06.01.09 Brennstabverhalten in der Wiederauffüll- und Flutphase
 eines Kühlmittelverluststörfalles
- 06.01.09/04A Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden
PNS 4238 Zircaloy-Hüllen und einsetzender Kernnotkühlung
 (REBEKA-Programm)
- (K. Wiehr, A. Emling, F. Erbacher, U. Harten, W. Just,
H.J. Neitzel, P. Schäffner, He.Schmidt, E. Wogel; IRB)

Zielsetzung des Vorhabens ist die Erarbeitung experimenteller Informationen über den Aufblähvorgang von Zircaloyhüllen während der Niederdruckphase eines Kühlmittelverluststörfalles. Einzelstab- und Bündelexperimente liefern Meßwerte zur Überprüfung und Weiterentwicklung von Rechenprogrammansätzen des Codesystems SSYST zur Beschreibung des Brennstabverhaltens.

Im Berichtszeitraum lagen die Schwerpunkte auf der Durchführung folgender Arbeiten:

- Auswertung der Thermoelementbündelversuche REBEKA-TE 8-14
- Einzelstabversuche unter Heliumatmosphäre bei konstanter Temperatur und konstantem Innendruck.
- Verformungsrechnungen mit dem Berstmodell.
- Thermoelementeichversuche, um Genauigkeit und Streubreite von TE-Messungen zu ermitteln.
- Durchführung und Auswertung eines REBEKA-Materialtests.
- Montage der Meßstrecke für 49-Stabbündel
- Fertigung und Instrumentierung der Brennstabsimulatoren mit kontinuierlichem, cosinusförmigen, axialen Leistungsprofil.
- Inbetriebnahme der 49-Stab-Teststrecke mit Transduktorstromversorgung und neuem Datenerfassungssystem.

1. Einleitung

1.1. Problemstellung

Bei einem Kühlmittelverluststörfall mit doppelndigem Bruch im kalten Strang einer Hauptkühlmittelleitung, dem Auslegungsstörfall eines Druckwasserreaktors, können die Brennstabhüllen je nach Größe und Lage einer Bruchstelle im Primärkreis Temperaturen erreichen, bei denen sie unter der Wirkung des inneren Überdruckes aufblähen, bzw. bersten und somit zu einer lokalen Verengung der Kühlkanäle führen können.

Vier bisher im Rahmen des REBEKA - Programmes (Reaktortypische Bündel - Experimente Karlsruhe) durchgeführte Bündelversuche unter thermohydraulischen Randbedingungen, wie sie in der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles erwartet werden, haben zu Kühlkanalversperrungen geführt, für die nachgewiesen worden ist, daß sie zu keinerlei Beeinträchtigung der Notkühlung führen.

Der unter dem Namen "REBEKA-Materialtest" geführte Bündelversuch wurde gezielt unter nicht reaktortypischen Randbedingungen durchgeführt und ist als reines Materialuntersuchungsexperiment anzusehen.

2.1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Experimentes bestand darin, zu untersuchen, ob sich Zircaloyhüllrohre unter extrem ungünstigen Randbedingungen in einem Bündel durch mechanische Stab zu Stab-Wechselwirkung so stark verformen können, daß "quadratische Hüllrohre" und große Kühlkanalversperrungen über eine längere axiale Erstreckung möglich sind.

Dazu wurden Versuchswandbedingungen gewählt, die im Reaktor zwar nicht auftreten können, von denen man jedoch aus Einzelstabexperimenten weiß, daß sie zu größtmöglichen Dehnungen führen.

Folgende Versuchsrandbedingungen werden gewählt:

- ein nahezu konstanter Hüllrohrtemperaturverlauf bei 750°C über mehr als 7 min.
- dabei nahezu adiabate Verhältnisse, d.h. die Heizleistung beträgt weniger als 5% der Nachwärmeleistung und dient nur zur Deckung der Wärmeverluste einer gut isolierten Teststrecke,
- Der Innendruckverlauf der Stäbe wird während der Verformung der Hüllen nahezu konstant gehalten.

Eine unter vereinfachenden Modellannahmen durchgeführte rechnerische Abschätzung des verbleibenden Kühlkanalquerschnitts in einem Bündel sich verformender Zircaloyhüllrohre ergab, daß es "theoretisch" unter gewissen Annahmen zu einer fast völligen Kühlkanalversperrung kommen könnte.

2. Versuchsablauf

Das in die REBEKA-Teststrecke eingesetzte Stabbündel besteht aus 25 Brennstabsimulatoren mit original DWR+Abmessungen und Abstandshaltern mit von Innendruck beaufschlagten Zircaloy - 4 - Hüllen.

Das Bündel wird von überhitztem Wasserdampf (180°C , 4,5 bar) von oben nach unten durchströmt, bis das Bündel und die gesamte übrige Teststrecke auf konstante Temperatur gebracht ist.

Der Versuch wird durch Abstellen der Dampfströmung durch das Bündel eingeleitet. Gleichzeitig wird die Wasserzufuhr zum unteren Plenum der Teststrecke unterbrochen. Ein Teil des unteren unbeheizten Bündelabschnitts steht nun in ruhendem Wasser von nahezu Siedetemperatur und die gesamte beheizte Bündellänge ist von stagnierendem Wasserdampf umgeben. Durch Zuschaltung der Stromversorgung auf das Bündel wird die Hüllrohrtemperatur in der Bündelmittenebene auf etwa 500°C aufgeheizt und die Leistung wieder abgeschaltet. (s. Abb. 1)

Temperaturunterschiede auf dem Hüllrohrumfang, die sich möglicherweise in der Aufheizphase ausgebildet haben können, haben etwa 1 min. Zeit sich wieder auszugleichen. Durch nochmalige Leistungszuschaltung (spez. Stableistung im höchstbelasteten axialen Mittelbereich des Bündels beträgt 20 W/cm) wird die Hüllrohrtemperatur in Bündelmitte auf 750°C erhöht und nun die spez. Stableistung auf etwa 1 W/cm heruntergeschaltet, um das bei 750°C angestrebte Temperaturplateau bei praktisch stagnierender Dampf Atmosphäre ein-

stellen zu können. Etwa 20 sec. nach Erreichen des Plateaus erfolgt die Innendruckaufgabe mit 69 bar. Die Hüllrohrtemperaturen und der Innendruck werden während der gesamten Versuchsdauer nahezu konstant gehalten. Nach dem Bersten aller Stäbe wird die Leistung vom Bündel abgeschaltet. Der Versuch wird durch einen Fluttest abgeschlossen und der Druckverlust über das Bündel gemessen.

2.1 Druckaufgabesystem

Abb. 2 zeigt schematisch das modifizierte Druckaufgabesystem für die Brennstabsimulatoren für den REBEKA-Materialtest. Vor Versuchsbeginn stehen die Brennstabsimulatoren (BSS) unter einem He- Innendruck von 5 bar. Die Ventile 8.4.1 - 8.4.25 sind geschlossen. Über ein Druckreduzierventil wird der Druck der He-Flasche von 200 bar auf 70 bar abgesenkt und steht im gesamten Gaszuführungssystem einschließlich in den 25 Behältern zu je 1,2 l Inhalt an.

Jedem BSS ist in diesem Experiment ein kleiner Druckbehälter von 1,2 l vorgeschaltet. Der vorgeschaltete Druckbehälter hat die Aufgabe, den Stabinnendruck jedes einzelnen Stabes während der plastischen Verformung seiner Hülle bis zum Bersten praktisch konstant zu halten.

Bei Druckaufgabe auf die BSS werden die Ventile 8.4.1 - 8.4.25 geöffnet. Aus Platzgründen mußten die Druckmeßsysteme (DMS) jedes einzelnen BSS zwischen den Magnetventilen 8,1... und den Behältern, statt zwischen 8.4 und den BSS angeordnet werden. Die Folge davon ist, daß bei Druckaufgabe auf die BSS der Stabinnendruck nur auf etwa 68.5 bar ansteigt.

Die Druckmeßsysteme (DMS) zeigen dabei einen Druckabfall von 70 bar auf etwa 68.5 bar an. (s.Abb. 3)

Der Zeitpunkt der Druckaufgabe ist auf der Abzisse der Meßplots mit 0 sec. angegeben.

Bei zwei Außenstäben blieben die Hüllen unverformt. Stab 76 hatte eine Undichtigkeit an einer Schweißverbindung, und der Druck fiel bei Druckaufgabe in diesem System relativ rasch ab.

Stab 60 blieb drucklos, da Ventil 8.4.23 nicht öffnete.

3. Ergebnis

Das Ergebnis des Tests läßt sich zusammenfassen:

- a) Die Verformungszeiten von der Druckaufgabe bis zum Bersten liegen

zwischen 3,5 und 7 min.

- b) Es sind relativ große Berstumfangsdehnungen bis zu 89 % aufgetreten.
- c) Die maximale Kühlkanalversperrung der 9 inneren Stäbe beträgt 84 %
- d) Es liegt eine ausgebildete Koplanarität der maximalen Dehnungen bei 8 von den 9 inneren Stäben vor.

3.1 Diskussion der Ergebnisse

Die deutlichen Unterschiede in den Verformungszeiten (s. Abb. 3) sind aufgetreten, obwohl die Temperaturverläufe der inneren 9 Stäbe im Mittel nur etwa 15 K voneinander abweichen. (s. Abb. 4). Dies zeigt, daß selbst relativ kleine Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Zircaloyhüllen zu erheblichen Unterschieden in den Verformungsgeschwindigkeiten führen, d.h. es zeigt den großen Temperatureinfluß auf das plastische Verformungsverhalten des Zircalloys. Bei derartigen Unterschieden in den Verformungsabläufen und den Berstzeiten ist jedoch eine Verformung zu "quadratischen Hüllrohren" und damit zu 100 % Kühlkanalblockade nicht möglich.

In Abb. 4 sind die Hüllrohrtemperaturverläufe der 9 inneren Stäbe in axialer Bündelmitte geplottet. Die Temperaturverläufe sind ohne jede Korrektur wiedergegeben. Dabei zeigt die Hülle des Stabes 40 einen etwas ungewöhnlichen Verlauf. In Abb. 5 sind die charakteristischen Daten des Stabes 40 dargestellt. In der Phase abgeschalteter Leistung bis etwa - 75 sec. sinkt die Hüllrohrtemperatur von einem höheren Niveau stärker ab als die der übrigen Stabhüllen. Mit Leistungszuschaltung steigt sie dann stärker an, um bei Leistungsreduktion wieder schneller abzusinken. Bei Druckaufgabe zur Zeit 0 sec. fällt die Hüllrohrtemperatur steil ab, um sich dann bei einsetzender Hüllrohrverformung auf der gewünschten Temperatur zu befinden. Ursache hierfür war ein klemmendes Ringpellet, welches genau in der axialen Ebene der Thermoelementposition einen Spalt in der Pelletsäule verursachte. Durch das verschobene Pellet und damit die fehlende Masse zwischen dem heißeren Heizstab und der Hülle reagierte die Hüllrohrtemperatur rascher auf Leistungsänderungen. Im Moment der Druckaufgabe rutschte die Pelletsäule in ihre Sollposition, was den plötzlichen Temperatureinbruch verursachte. Der weitere Temperaturverlauf zeigt keine Abnormitäten. Bei Stab 131 (Abb. 6) lag ebenfalls ein klemmendes Pellet vor. Der Spalt war jedoch kleiner. Er konnte nach Versuchsende mittels einer Röntgenaufnahme nachgewiesen werden. Dieses Pellet rutschte bei Gasaufgabe nicht wieder in die richtige Position, die Temperatur blieb daher etwas höher und zeigte auch nur eine langsam fallende Tendenz. Die

Folge war daher ein frühzeitiges Bersten.

Abb. 7 zeigt die Hüllrohrtemperatur in axialer Bündelmitte, sowie den Innendruck- und den Leistungsverlauf des Zentralstabes. Nach Erreichen der Plateautemperatur wurde die Leistung für diesen Stab auf Null zurückgeschaltet. Der Zentralstab, der auf seinem Hüllrohrumfang eine sehr gleichmäßige Temperatur hatte, benötigte eine der längsten Verformungszeiten bis zum Bersten und weist auch die größte Berstumfangsdehnung auf. Bis etwa 260 sec. nach Druckaufgabe zeigt der Hüllrohrtemperaturverlauf einen fallenden Verlauf, um in den darauffolgenden etwa 150 sec. verhältnismäßig stark anzusteigen.

Die charakteristischen Hüllrohrtemperatur-, Innendruck- sowie Leistungsverläufe der übrigen 6 Innenstäbe zeigen die Abb. 8-13.

Jeweils 4 Stäbe wurden parallel von einer Stromversorgungsquelle (Thyristor) mit Leistung versorgt. Nur der Zentralstab 15 wurde von einem eigenen kleineren Thyristor ("L 7") versorgt. Der innere Ring von Stäben lag auf den Thyristoren "L 5 und L 6". Der Leistungssprung auf 6,6 KW/ Stab zur Aufheizung auf 750 °C, sowie das Zurückschalten der Leistung auf etwa 0,37 KW/Stab nach Erreichen des Temperaturplateaus erfolgte über eine gemeinsame Zentralsteuerung.

Der weitere Leistungsverlauf der einzelnen Thyristoren mußte von Hand gesteuert werden, und zwar nach Maßgabe des Hüllrohrtemperaturverlaufes eines aus jeder Leistungsgruppe ausgewählten Brennstabsimulators. Dies ist die Ursache für den geringfügig unterschiedlichen Leistungsverlauf zwischen den einzelnen Leistungsgruppen.

Die verhältnismäßig großen Berstdehnungen sind das Ergebnis relativ gleichmäßiger Temperaturverteilungen auf dem Hüllrohrumfang während der plastischen Verformung. Abb. 14 zeigt das axiale Deformationsprofil der 9 inneren Stabhüllen im Bereich zwischen den beiden mittleren Abstandshaltern. Relativ große Berstdehnungen führen zu einer maximalen Kühlkanalversperrung von 84 % . Dieser Wert wurde ermittelt, indem aus den gemessenen einzelnen Hüllrohrumfangsdehnungen an der Stelle maximaler Kühlkanalversperrung, die versperrten Querschnittsflächen für jeden einzelnen Unterkühlkanal errechnet wurden. Bis 33 % Umfangsdehnung werden die Querschnittsflächen als wachsende Kreisflächen gerechnet. Bei größeren Umfangsdehnungen nehmen die Flächen immer mehr quadratische Form mit entsprechenden kreisförmigen Ecken an, um bei Erreichen einer Umfangsdehnung von 69,4 % , das entspricht einer

100 % Blockade eines Unterkühlkanales, eine reine quadratische Fläche an - zunehmen. Mit Überschreiten der Umfangsdehnung von 69,4 % wächst das Quadrat weiter, und für den entsprechenden Unterkühlkanal ergibt sich ein Versper - rungsgrad, der größer als 100 % werden kann.

Die Aufsummierung der versperreten Unterkühlkanäle ergibt die Gesamtkühl - kanalversperrung. Da jedoch zusätzlich bei Errechnung der maximalen Kühl - kanalversperrung der 9 inneren Stäbe die Stabachsenmittelpunkte wieder in ihre ursprüngliche Gitterposition zurückversetzt werden, ergibt die errechnete Kühlkanalversperrung von 84 % einen zu hohen Wert, verglichen mit der im Bündel tatsächlich entstandenen Kühlkanalversperrung (s Abb. 16 und 17).

Abb. 14 zeigt ferner eine auffallende " Koplanarität " der Berststellen bei 8 von 9 der inneren Stäbe. Auf dieses Phänomen wird später näher eingegangen. In Abb. 15 sind die Berstdehnungen und ihre axialen Positionen in |mm | (oberes beheiztes Bündelende = 0 mm, unteres beheiztes Ende = 3900 mm) sowie die Richtungen der Berstöffnungen der einzelnen Stäbe angegeben. Darüber hin - aus sind die Winkelpositionen der Thermoelemente in axialer Bündelmitte (1950 mm) an den einzelnen Stabhüllen eingezeichnet. Die an dieser Position zum Berstzeitpunkt gemessenen Hüllrohrtemperaturen sind in Tab. 1 angegeben. Bei Betrachtung der Winkelrichtung der Berstöffnungen auf Abb. 15 fällt auf, daß alle Berstöffnungen der äußeren Stabreihe nach ins Bündel gerichtet sind. Dieses Bild ist auch in der zweiten Stabreihe noch zu erkennen. Ursache hierfür sind Temperaturverteilungen auf dem Hüllrohrumfang während der plastischen Verformung. Der Grund hierfür liegt in dem Umstand, daß die Kastenwand selbst nicht beheizt ist, sondern durch das Bündel mit erwärmt werden und während des Versuches eine niedrigere Temperatur als die Stäbe aufweist (s. Abb. 18 - K 2). Da die Kastenwände kälter sind als die Hüll - rohroberflächen der Stäbe, entsteht ein radiales Temperaturprofil vom Zen - tralstab zur Kastenwand hin. Die Wärmeabgabe der Stäbe erfolgt durch Strah - lung und über Naturkonvektion des Dampfes an die kältere Wand.

Da die konvektive Kühlung bei quasi stagnierender Dampfatmosfera (geringe Naturkonvektion ist nicht zu vermeiden) bei einer derartigen Versuchsfüh - rung nur relativ klein ist, wird der radiale Wärmestrom als dominante Größe wirksam, und das sich ausbildende radiale Temperaturprofil führt zu Tem - peraturunterschieden auf dem Hüllrohrumfang, die umso größer werden, je weiter außen sich die Stäbe im Bündel befinden. Je größer azimutale Tem - peraturunterschiede jedoch werden, desto geringer werden die Berstumfangs - dehnungen.

Der Zentralstab weist 89 % Berstdehnung auf. Bildet man den Mittelwert der Berstdehnung aus der inneren Stabreihe, so erhält man etwa 60 %, und errechnet man den Mittelwert für die Hüllen des äußeren Ringes unter Ausschluß der beiden unverformten Stäbe, so erhält man einen Wert von etwa 50 %. Dieses Ergebnis zeigt deutlich den Einfluß von azimutalen Hüllrohrtemperaturverteilungen auf die Berstumfangsdehnungen.

In den Ansichten der Bündelquerschnitte der Abb. 16 und 17 ist dieser Einfluß ebenfalls deutlich zu erkennen. Hüllrohre in der äußeren Stabreihe weisen nach außen eine viel größere Wandstärke auf als die Teile der Hüllrohre, die zur Bündelmitte hingerrichtet sind. Etwas abgeschwächt ist diese Bild auch noch in der inneren Bündelreihe zu erkennen. Eine viel gleichmäßigere Hüllrohrwandstärke auf dem Umfang weist der Zentralstab auf. Die gemessene Temperaturverteilung auf dem Umfang des Eckstabes 82 zeigt Abb. 19. Die azimutale Temperaturverteilung eines Stabes der inneren Stabreihe (Stab 132) ist deutlich geringer (s. Abb. 20).

Schlußfolgerung bezüglich der Berstumfangsdehnung:

Die mittlere Berstumfangsdehnung bei Hüllrohrverformungsexperimenten mit schwacher konvektiver Kühlung und nicht selbst beheizter, kühlerer Kastenvand wächst bei sonst gleicher Prozeßführung mit der Bündelgröße.

Die in Abb. 14 zu erkennende Koplanarität der maximalen Dehnungen von 8 der 9 inneren Stabhüllen, ist ebenfalls auf den Einfluß des kühleren Kastens zurückzuführen, d.h. sie ist versuchsbedingt und bündelgrößenabhängig. Durch Wärmeleitung über die Abstandshalter an die kühlere Kastenvand entsteht ein geringes axiales Temperaturprofil. Im Bereich der Abstandshalter wird die Hüllrohrtemperatur heruntergezogen und durch Naturkonvektion des Dampfes in Bündelmitte die maximale Hüllrohrtemperatur etwa aus der Bündelmitte nach oben verschoben. Auf Grund der hohen Empfindlichkeit der Zircaloyverformung gegenüber der Temperatur beginnt die Verformung im heißesten Bereich etwas oberhalb der axialen Bündelmitte. Durch die sich verschwächende Wandstärke nimmt die Spannung bei konstantem Innendruck zu. Da die Temperatur der sich verformenden Hüllen konstant bleibt, nimmt die Dehnungsgeschwindigkeit und damit die Dehnung lokal an der Stelle einmal begonnener Verformung weiter zu. Es entsteht eine ausgeprägte lokale Hüllrohraufblähung. Ursache hierfür ist die fehlende Kühlung. In einem Bündelverformungsexperiment mit ähnlichem integralen Hülltemperaturverlauf, jedoch bei repräsentativer Wärmeleistung und Kühlung führt eine lokal sich vergrößernde Hüllrohroberfläche auch lokal zu einer Hüllrohrtemperaturabsenkung. Dieser negative Temperatur -

rückkopplungseffekt über eine sich vergrößernde Hüllrohroberfläche fehlt jedoch beim REBEKA - Materialtest. Das axiale Temperaturprofil zusammen mit dem beschriebenen Verstärkungseffekt ist die Ursache für diese koplanare Dehnung im inneren Bereich des Bündels.

Bei größeren Bündelanordnungen und sonst gleichen Randbedingungen verringert sich die Koplanarität der Stellen maximaler Dehnung, da der Wand-Abstandshaltereffekt schwächer wird und dann fertigungsbedingte Wandstärkenunterschiede und lokale Heißstellen verstärkt wirksam werden. Die ganz kurze ballonförmige Form der Beule ändert sich jedoch nicht, da der negative Rückkopplungseffekt der Kühlung auf die Verformung auch hier fehlen würde. Die axiale Verteilung der Berststellen der Stabhüllen in der äußeren Reihe sieht deutlich anders aus (Tab. 1). Der größere Teil der Außenstäbe ist etwa 50 cm tiefer geborsten als Hüllen im mittleren Bündelbereich. Ursache hierfür ist wahrscheinlich eine kühlere bündelabwärtsgerichtete Dampfströmung im Bereich der kühleren Wand (Naturkonvektion: im Bündelwandbereich teilweise abwärtsgerichtete Strömung, im Bündelmittenbereich aufwärtsgerichtete Strömung).

Nach Erkalten des verformten Stabbündels wurde ein Fluttest durchgeführt. Bei einer kalten Flutwassersteiggeschwindigkeit von 15 cm/s bezogen auf unverformte Kühlkanalquerschnitte betrug der gemessene Strömungsdruckverlust über die volle Bündelhöhe weniger als 100 mm WS. Dies bedeutet, daß die Kühlbarkeit durch den erzielten Grad der Verformung in diesem Materialtest in keiner Weise beeinträchtigt war.

4. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen:

Das Ergebnis des Tests läßt sich zusammenfassen:

- a) Die Verformungszeiten von der Druckaufgabe bis zum Bersten liegen zwischen 3,5 und 7 Minuten.
- b) Es sind relativ große Berstumfangsdehnungen bis zu 89 % aufgetreten.
- c) Die maximale Kühlkanalversperrung der 9 inneren Stäbe beträgt 84 %.
- d) Es liegt eine ausgebildete Koplanarität der maximalen Dehnungen bei 8 von 9 inneren Stäben vor.

Der Versuch bestätigt die hohe Empfindlichkeit des Zircalloys bei plastischer Verformung gegenüber der Temperatur (große Unterschiede in den Verformungszeiten der einzelnen Hüllrohre trotz verhältnismäßig kleiner Abwei -

chungen in ihren Hüllrohrtemperaturverläufen untereinander).

Die großen Unterschiede in den Verformungszeiten verhinderten die maximal mögliche mechanische Wechselwirkung der Hüllrohre miteinander und damit die Erzeugung von "quadratischen Hüllrohren" und einer Kühlkanalversperrung nahe 100 %.

Trotz guter Wärmeisolierung der Teststrecke führte das sich ausbildende radiale Temperaturprofil zur Entstehung azimuthaler Temperaturunterschiede und zu einer Verminderung der maximal möglichen Hüllrohrverformung.

Die aufgetretene Koplanarität der kurzen ballonförmigen Beulen von 8 der 9 inneren Stabhüllen war versuchsbedingt und ist völlig untypisch für Hüllrohrverformungen unter thermohydraulischen Verhältnissen der Wiederauffüll- und Flutphase eines Kühlmittelverluststörfalles.

Das Experiment hat gezeigt, daß es praktisch nicht möglich ist, Hüllrohrverformungen in Bündeln zu erzeugen, die die freien Kühlkanäle so weit verengen, daß es zu einer schwerwiegenden Beeinträchtigung der Notkühlbarkeit führen könnte.

T A B E L L E 1

Stab-Nr.	Berstzeit sec	Berstfolge	Temp. in ax. Mitte %	Dehnung in axial. Mitte %	Bersteinene Abst. von ob. beh. Ende %	Berstdehnung %
73	186,7	3	700	15,1	1894	42,1
74	376,2	16	738	15,0	1880	58,4
69	348,7	11	751	12,9	2375	59,9
71	361,7	12	743	10,3	2390	50,4
167	420,2	21	759	9,7	2095	45,4
129	412,2	19	735	19,7	1913	51,6
29 x	282,2	8	747	39,2	1920	58,4
132 x	221,2	5	754	37,9	1905	65,8
40 x	284,2	9	753	14,6	1902	73,8
61	372,2	13/15	745	8,4	2407	48,1
76	—	—	—	—	—	0
137 x	214,7	4	740	29,0	1913	62,9
15 xx	413,7	20	775	45,1	1924	88,9
126 x	149,2	2	755	25,4	1913	57,5
103	344,2	10	739	13,1	2425	40,1
122	446,2	23	750	14,7	1890	55,2
22 x	256,7	7	747	15,3	2398	69,9
131 x	134,2	1	755	37,1	1930	53,9
136 x	250,2	6	754	38,7	1925	42,7
67	372,2	13/15	740	14,1	1900	56,3
146	429,2	22	755	9,3	2385	37,7
140	380,7	17	735	12,2	2460	49,5
60	—	—	—	—	—	0
94	372,2	13/15	749	11,6	2465	52,5
82	385,7	18	760	6,9	2452	45,1

xx Zentralstab

x Innerer Ring von Stäben

Literatur :

- / 1 / Erbacher, F. : LWR Fuel Cladding Deformation in a LOCA and its Interaction with Emergency Core Cooling. Topical Meeting on Reactor Safety Aspects of Fuel Behavior, Sun Valley, Idaho (USA) , Aug. 2-6, 1981.
- / 2 / Wiehr, K. ; et al. : Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen aufblähenden Zircaloy-Hüllen und einsetzender Kernnotkühlung (REBEKA-Programm).
In : Projekt Nukleare Sicherheit.
Jahresbericht 1980, KfK - 2950 (August 81) ; S. 4200/155-4200/183
- / 3 / Erbacher, F. : REBEKA - test results.
9th Water Reactor Safety Research Information Meeting
Gaithersburg, Md., October, 26-30, 1981
- / 4 / Erbacher, F., Neitzel, H.J. , Wiehr, K. : Kühlmittelverluststörfall. Experimente zur Notkühlung in der Anlage REBEKA. Atomwirtschaft, Nr. 10, Okt. 1981
- / 5 / Erbacher, F. : Das Deformationsverhalten von Zircaloy-Hüllrohren beim Kühlmittelverluststörfall und seine Wechselwirkung mit der Kernnotkühlung.
8. Jahreskolloquium des Projektes Nukleare Sicherheit des Kern - forschungszentrums Karlsruhe. Karlsruhe, 16.-17. November 1981
KfK-3270 (November 81)

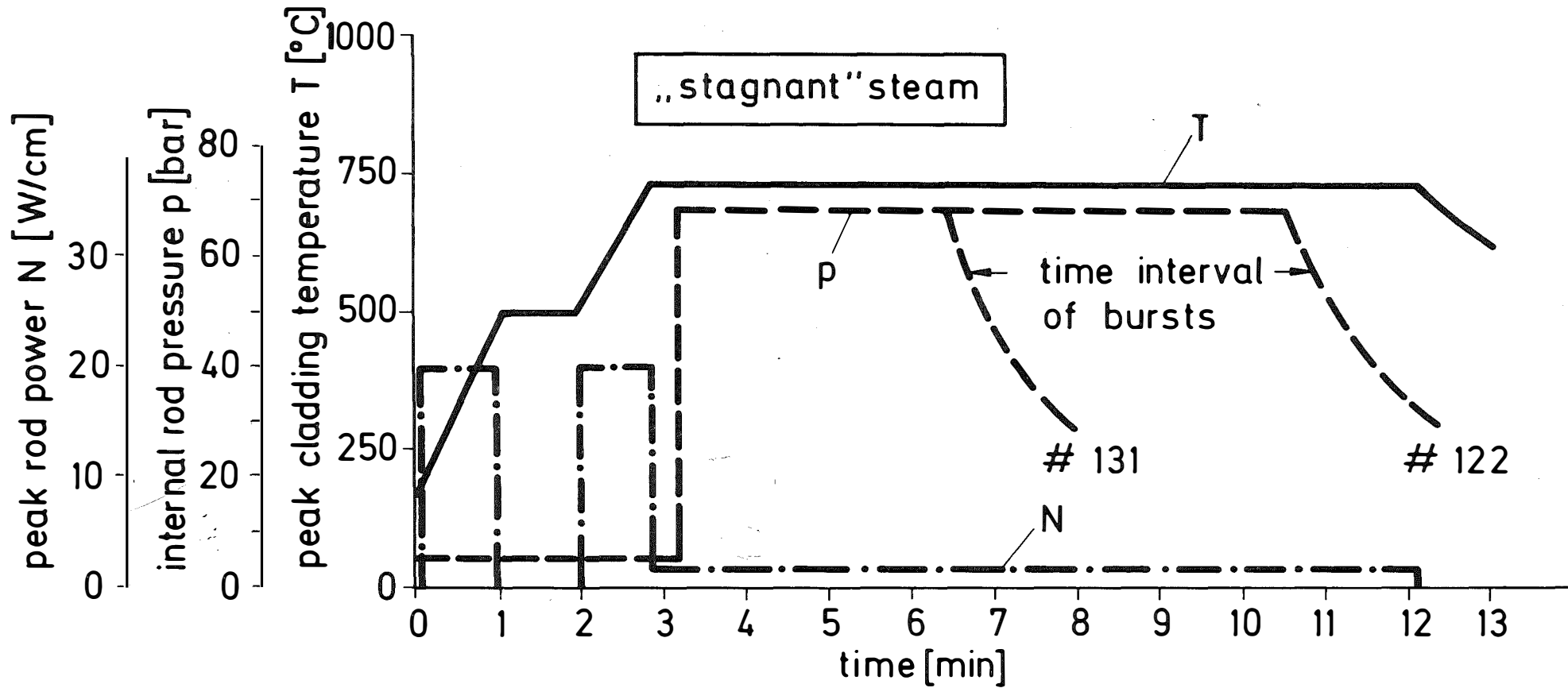


Abb. 1 REBEKA material test
test procedure (schematic)

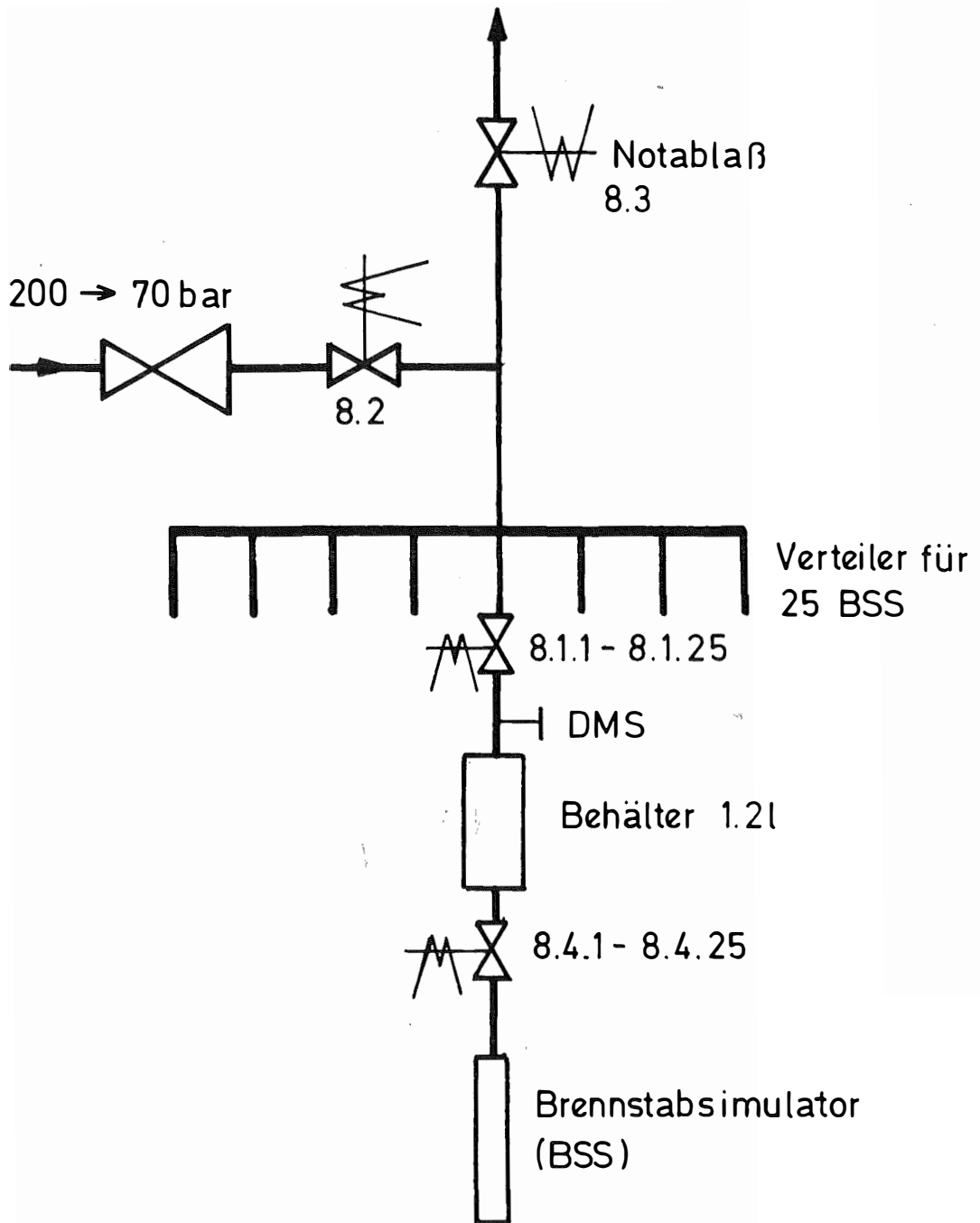


Abb. 2 Druckaufgabesystem für REBEKA "M"

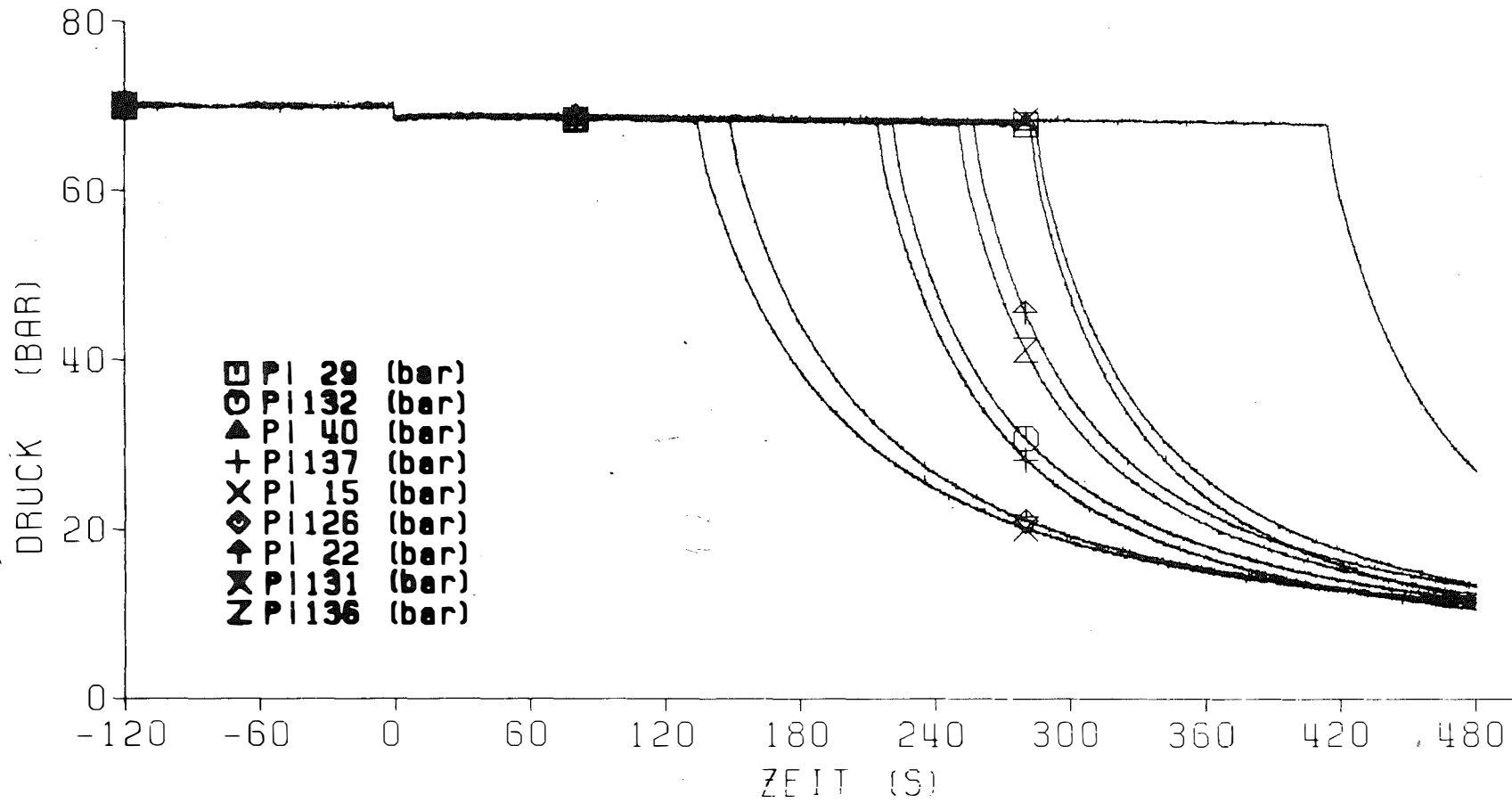


Abb. 3 REBEKA Materialtest
 Innendruckverläufe der 9 Innenstäbe

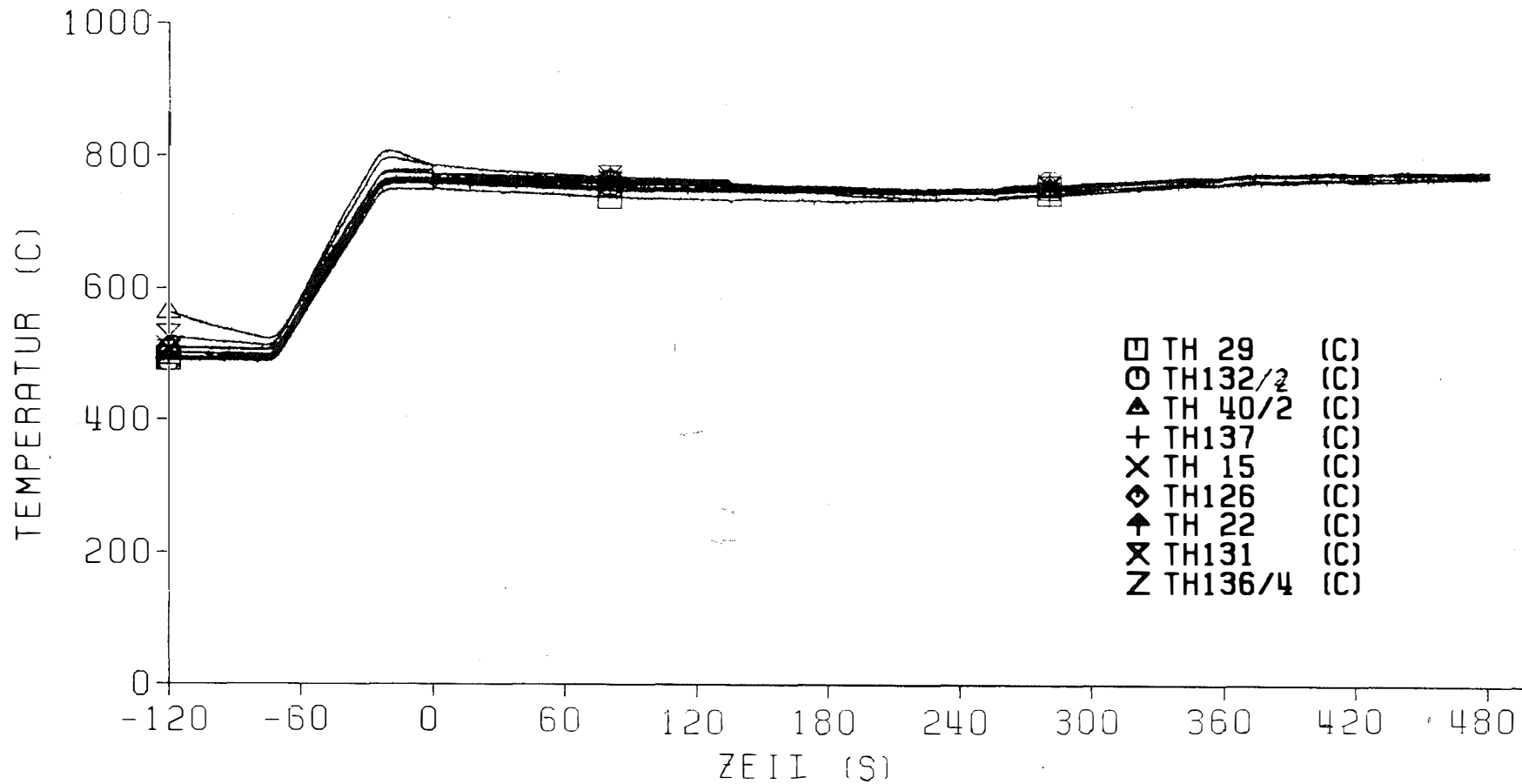
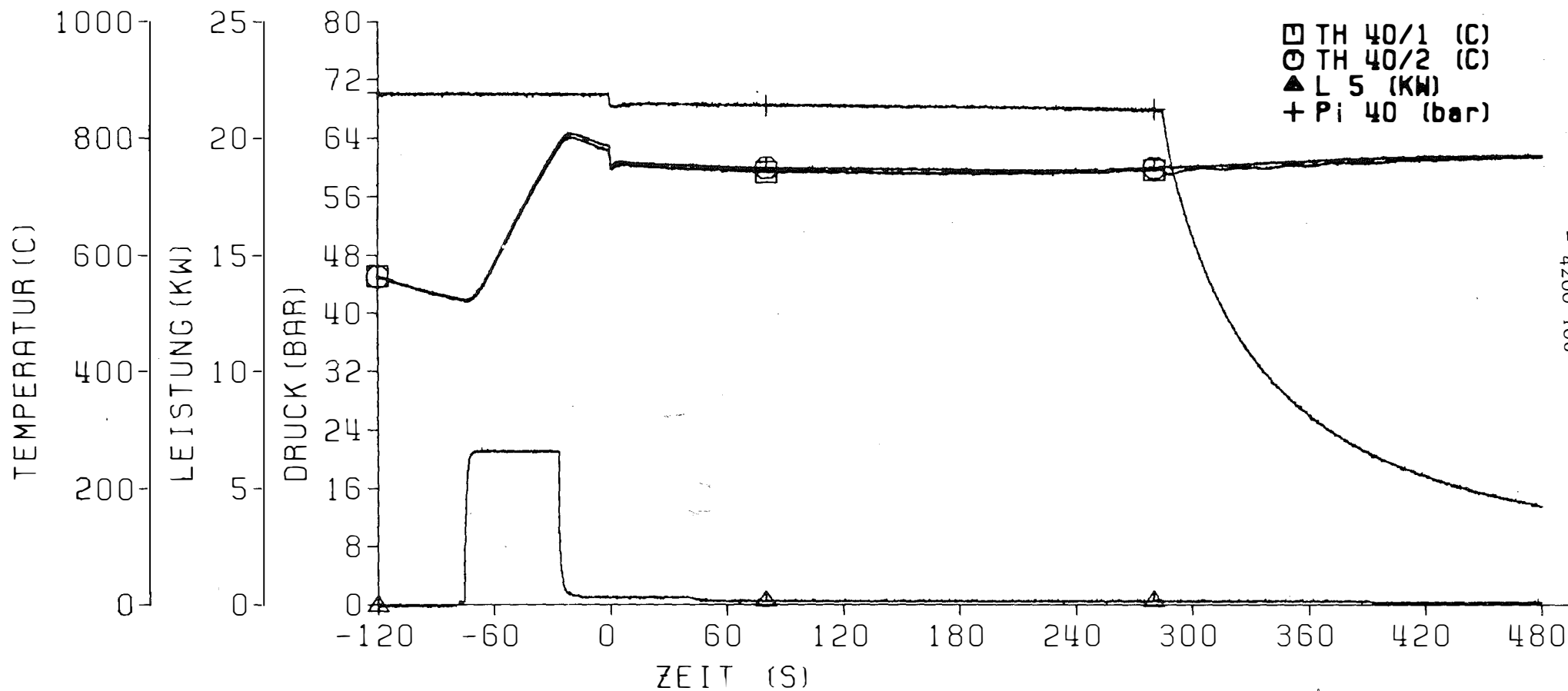


Abb. 4 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen in axialer Mitte



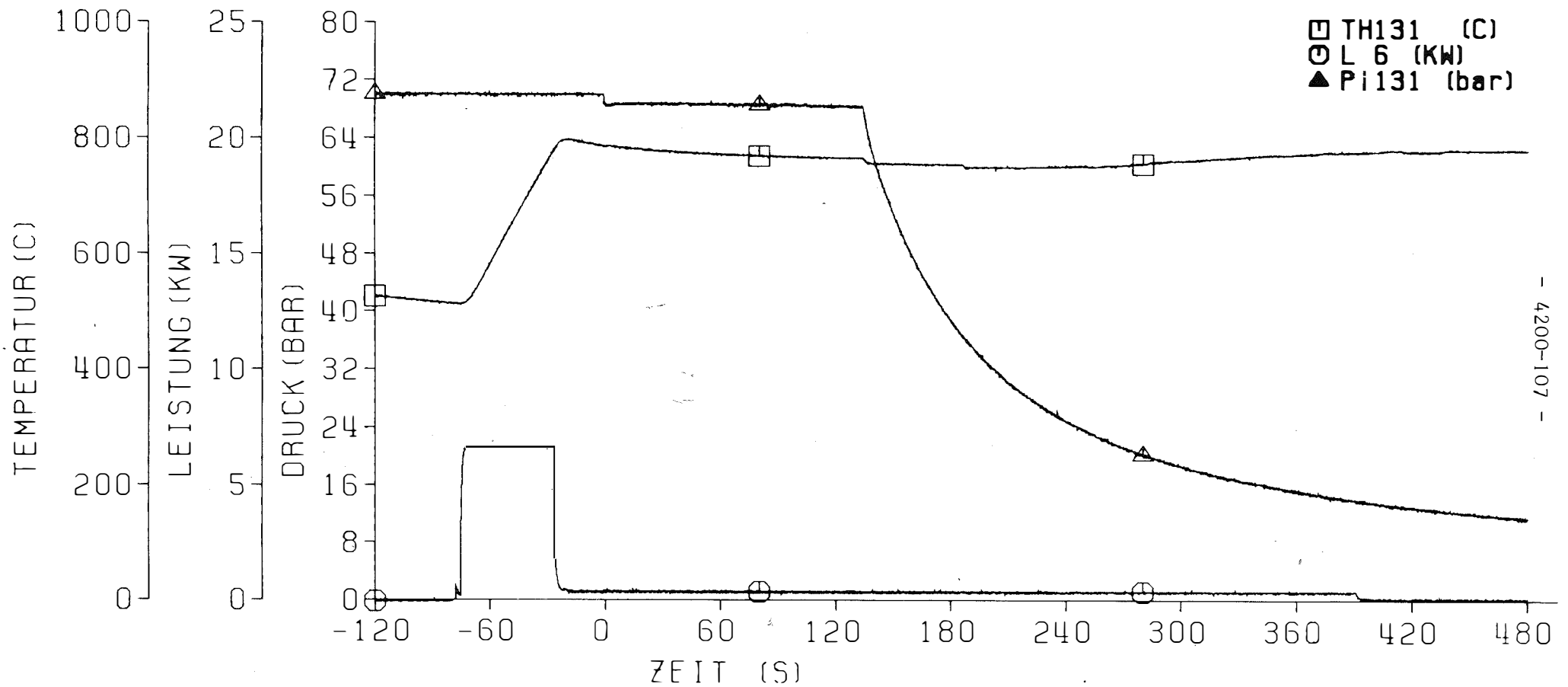


- 4200-106 -



Abb. 5 REBEKA Materialtest

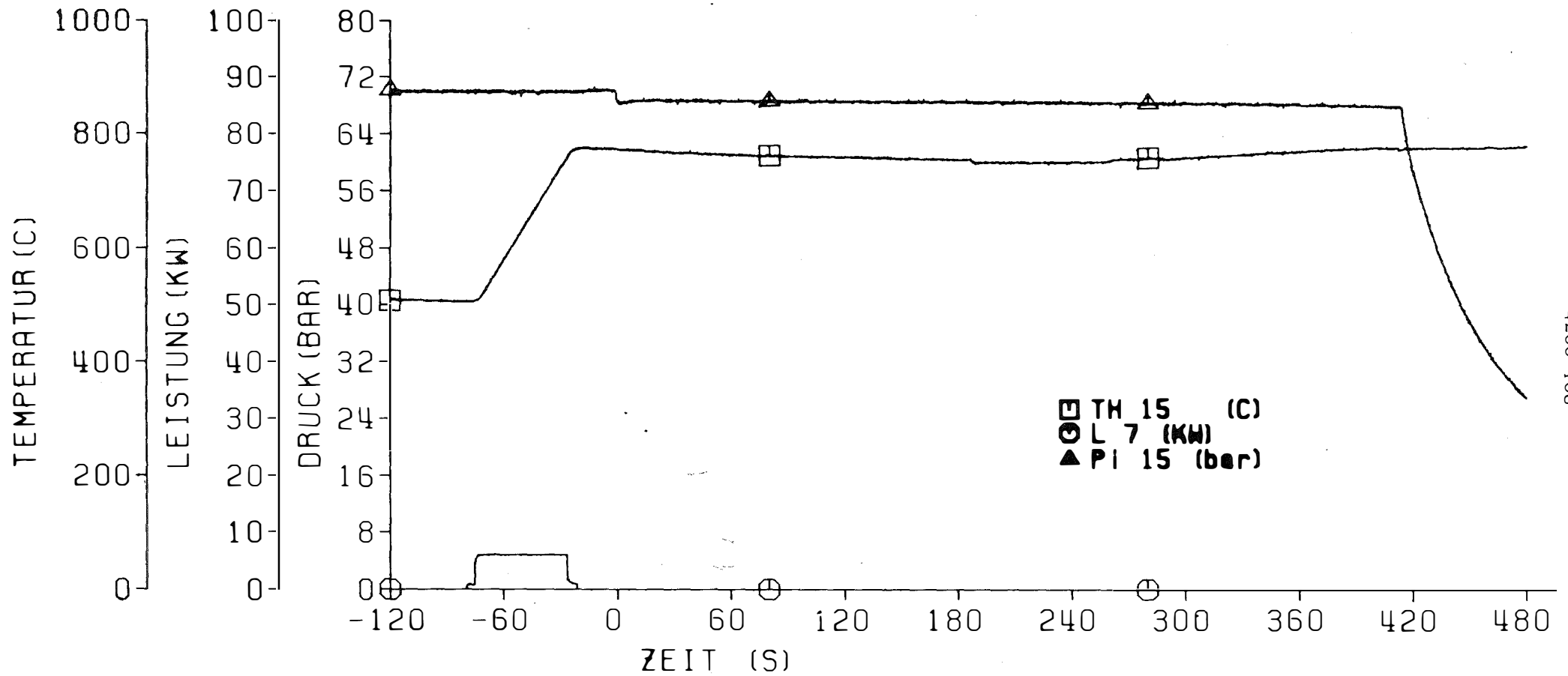
Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-107 -

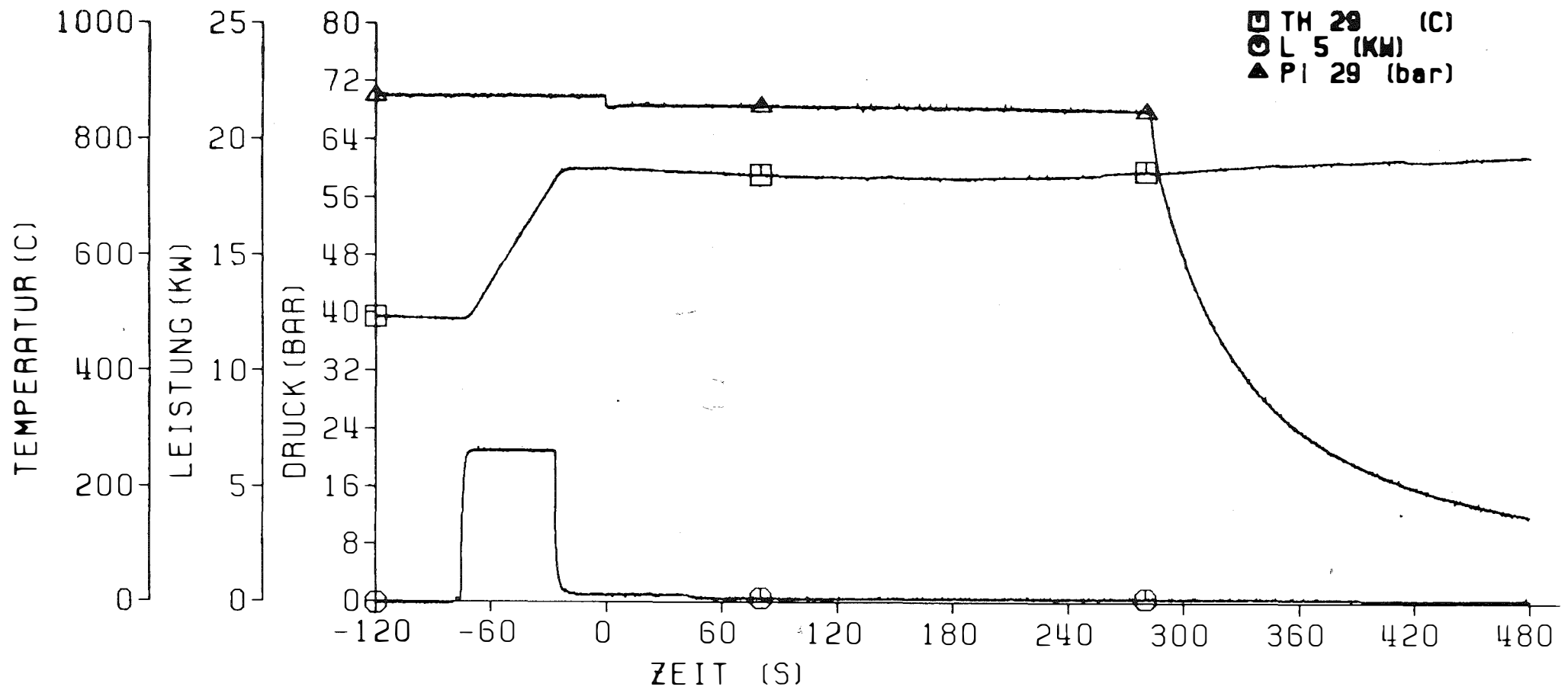


Abb. 6 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-108 -

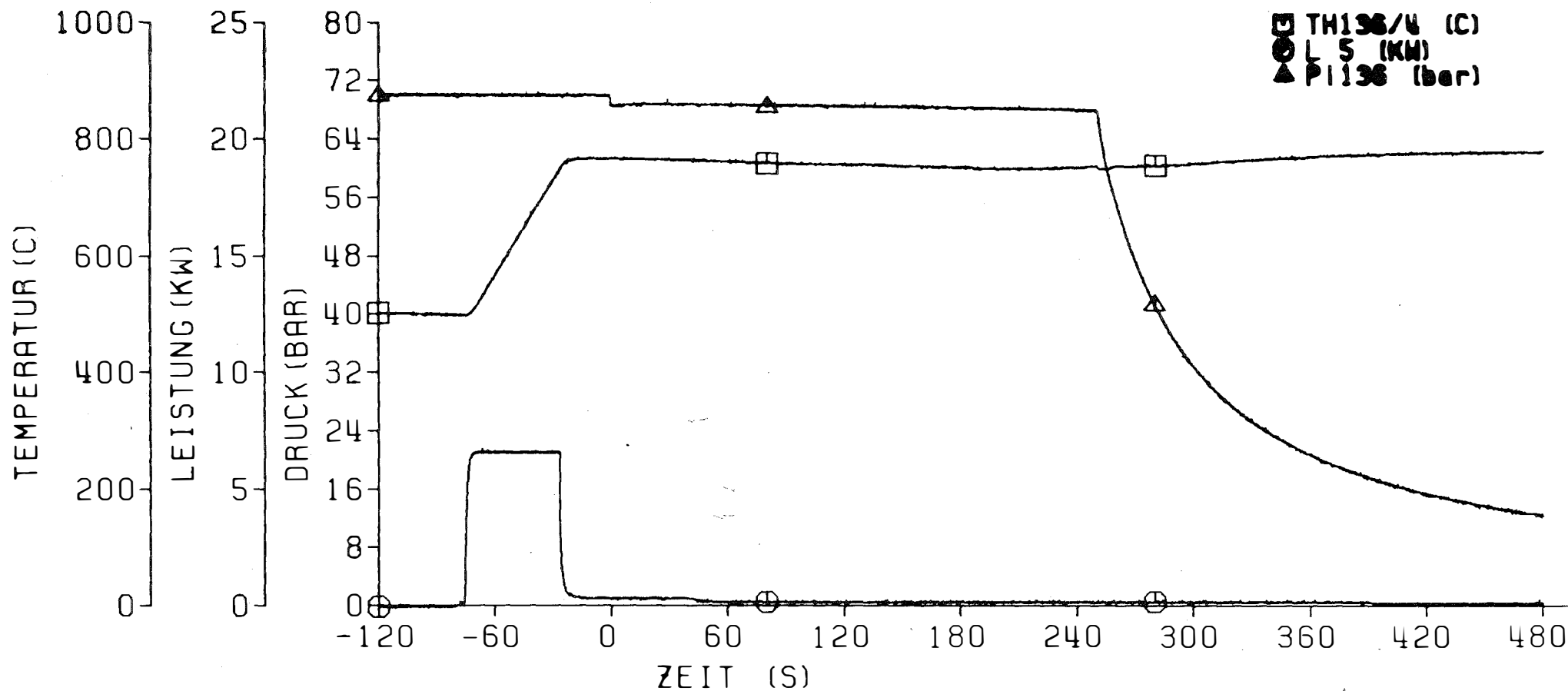
Abb. 7 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-109 -



Abb. 8 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-110 -



Abb. 9 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf

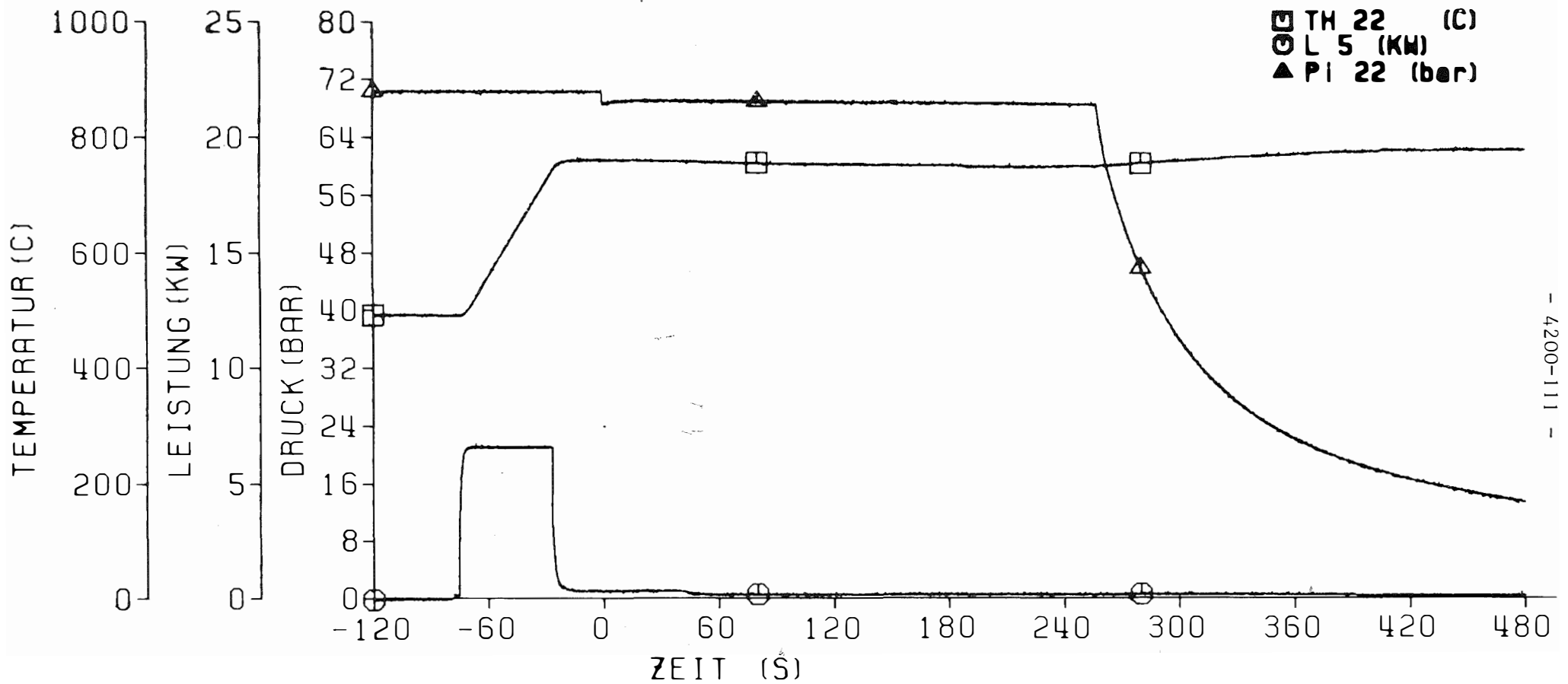
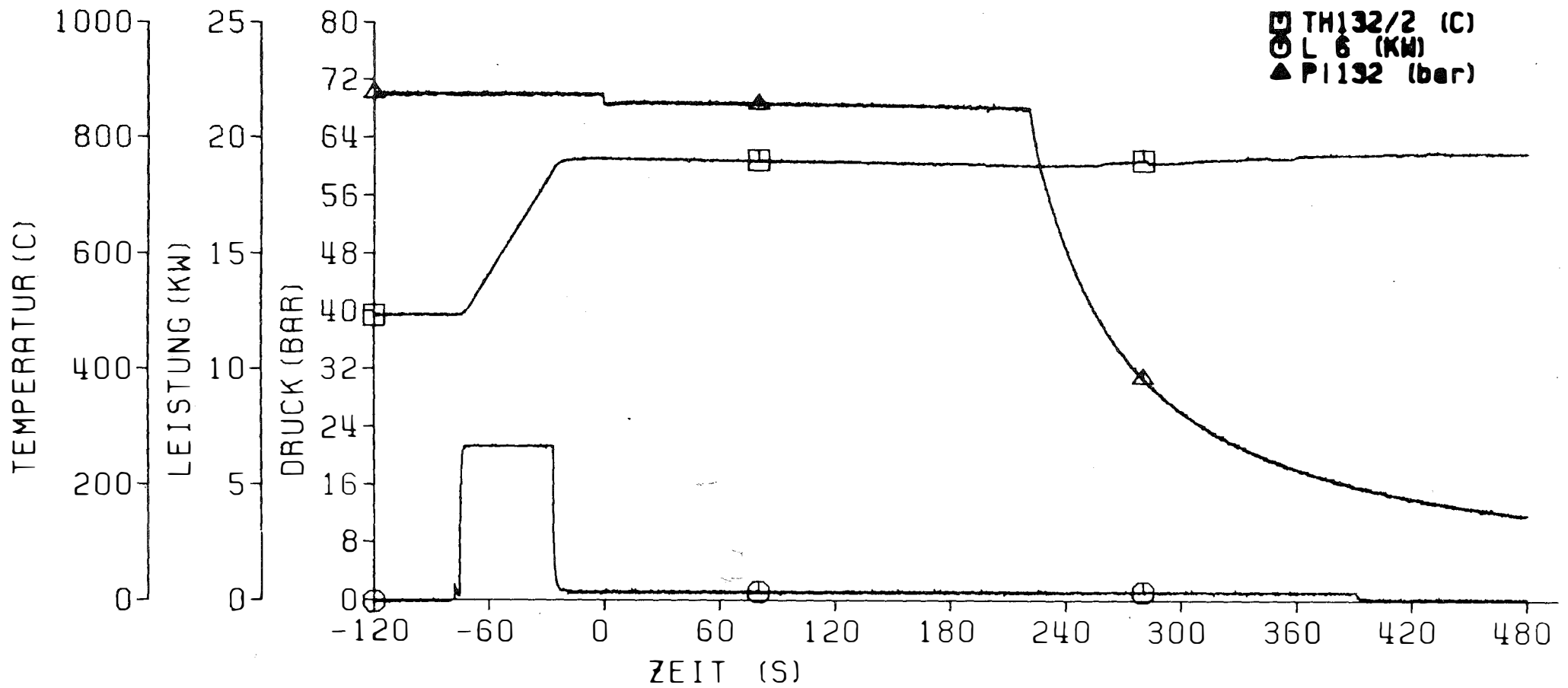


Abb. 10 REBEKA Materialtest

Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-111 -

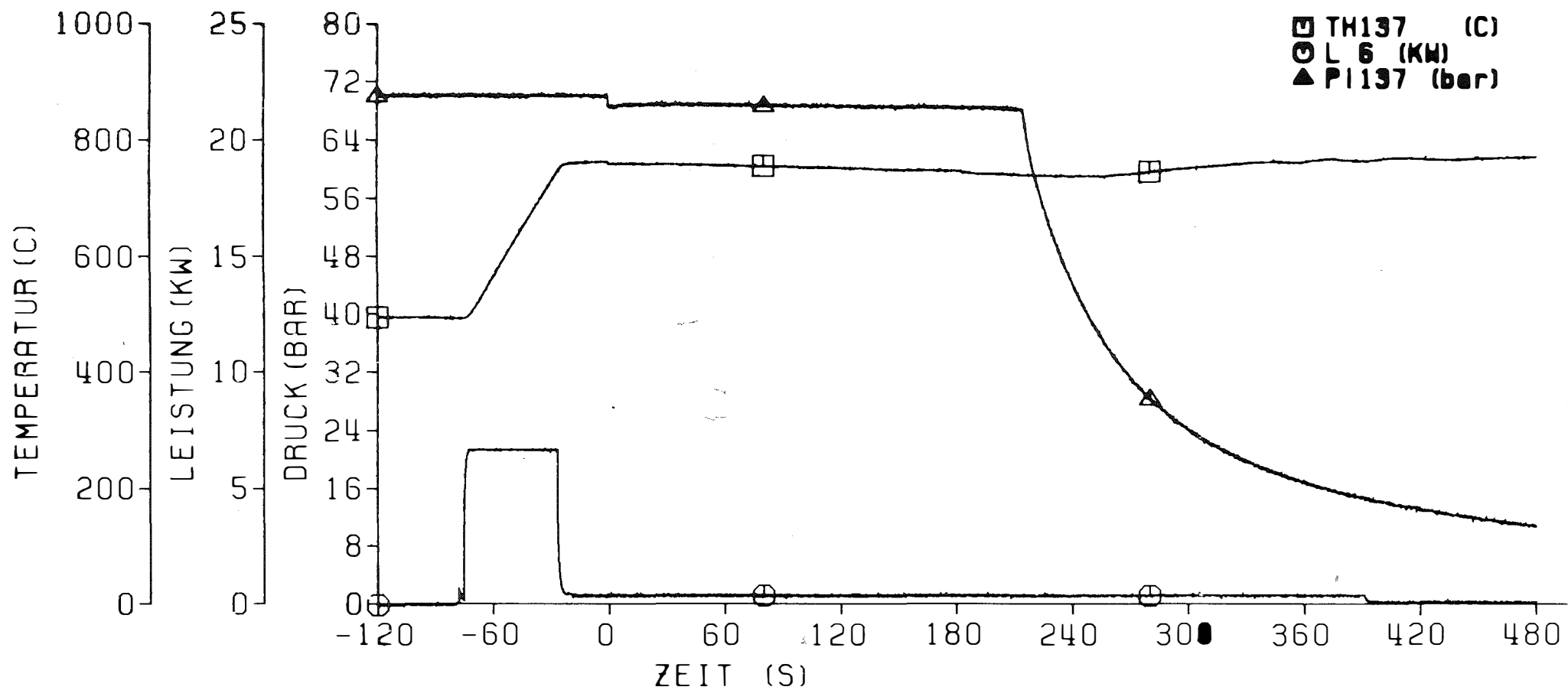


- 4200-112 -



Abb. 11 REBEKA Materialtest

Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf

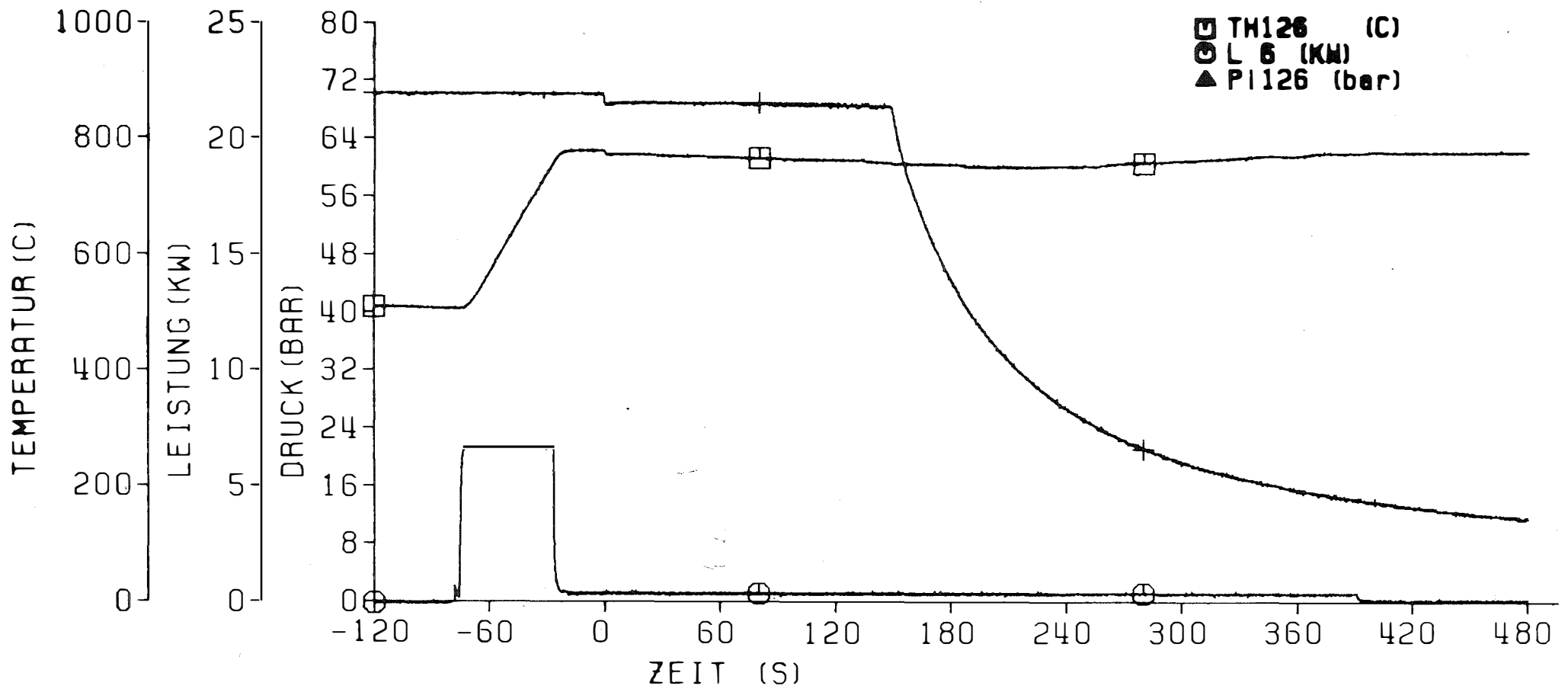


- 4200-113 -



Abb. 12 REBEKA Materialtest

Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf



- 4200-114 -



Abb. 13 REBEKA Materialtest
 Hüllrohrtemperaturen-, Innendruck- und Leistungsverlauf

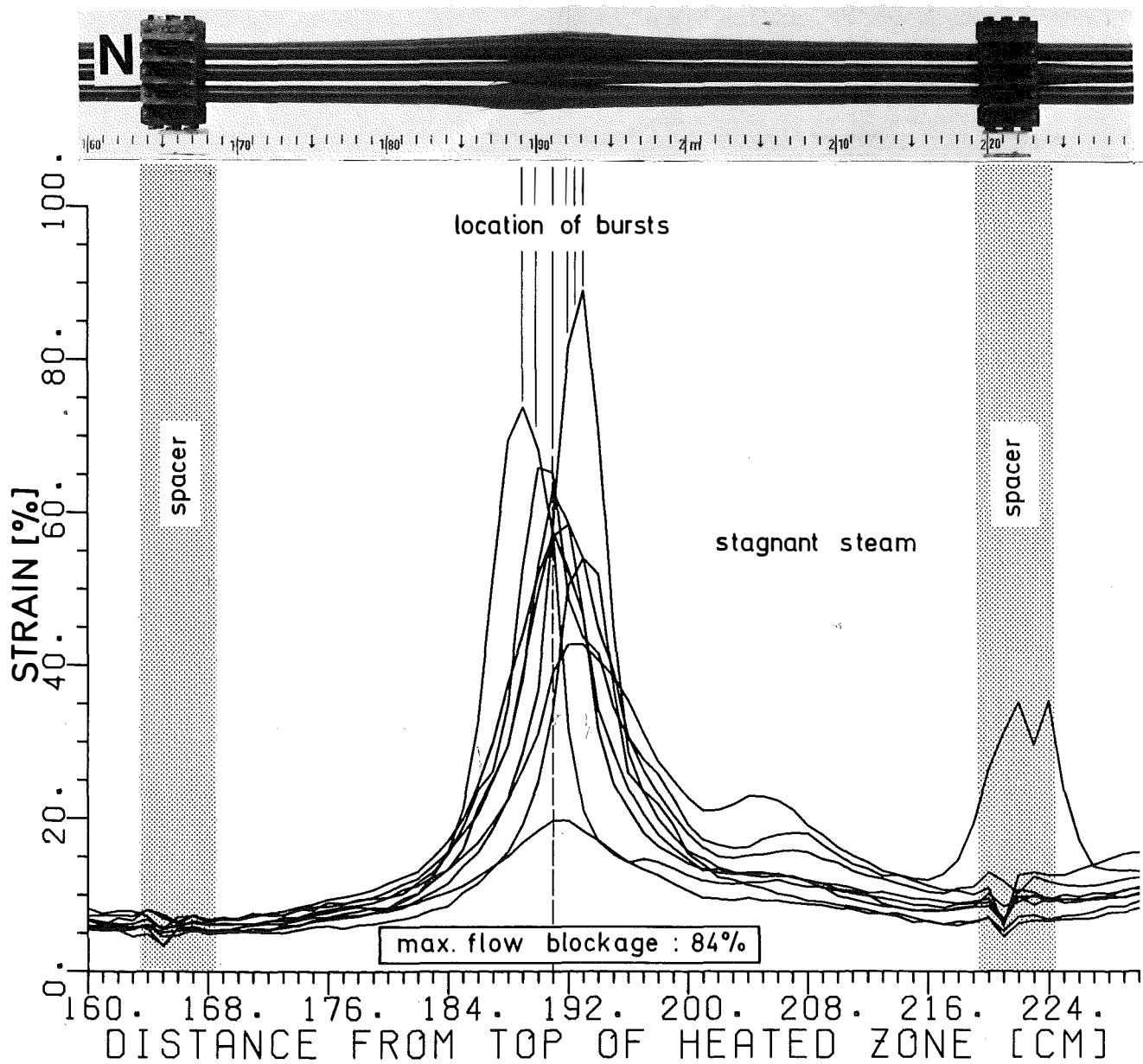
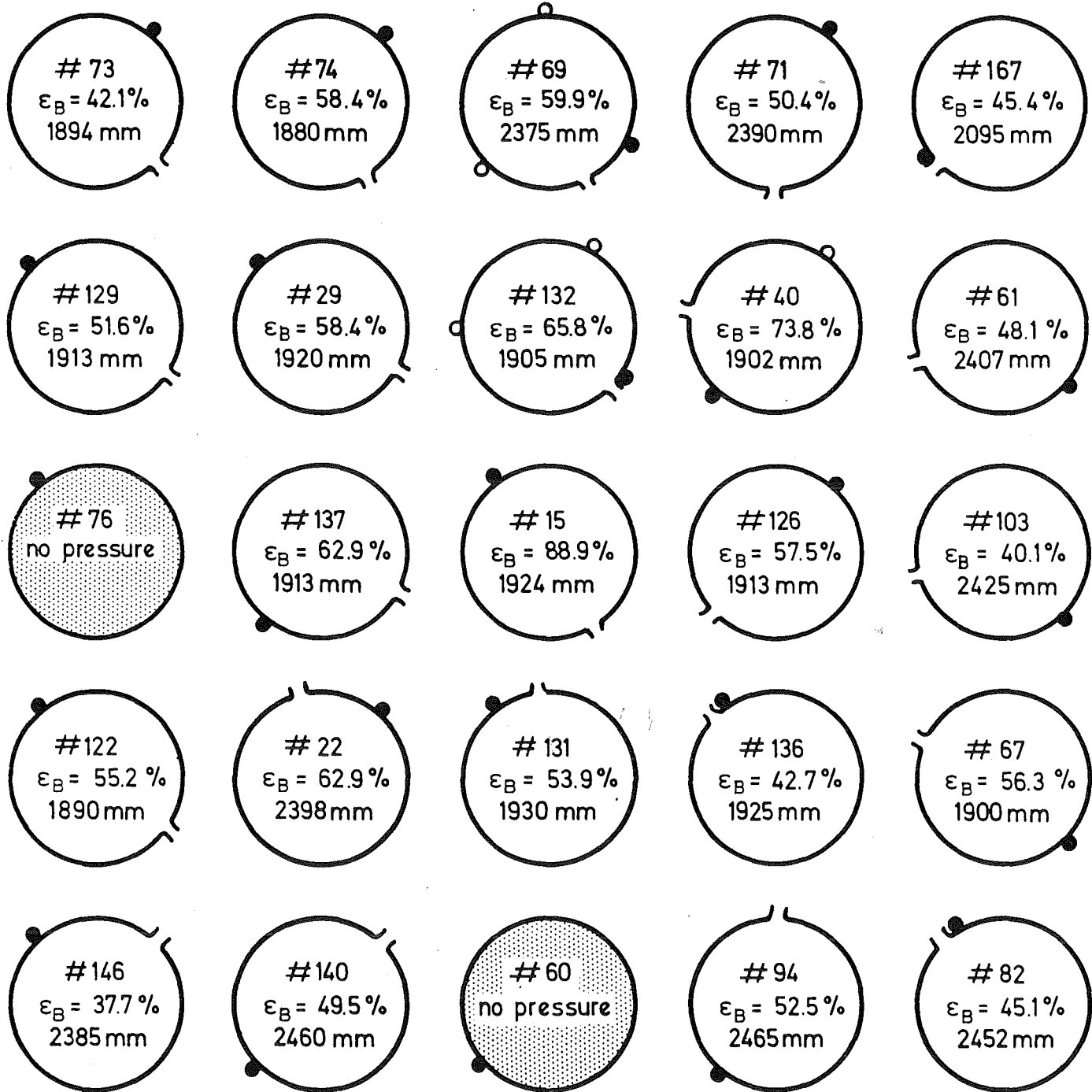


Abb. 14 REBEKA material test
axial deformation profile of the
Zircaloy claddings

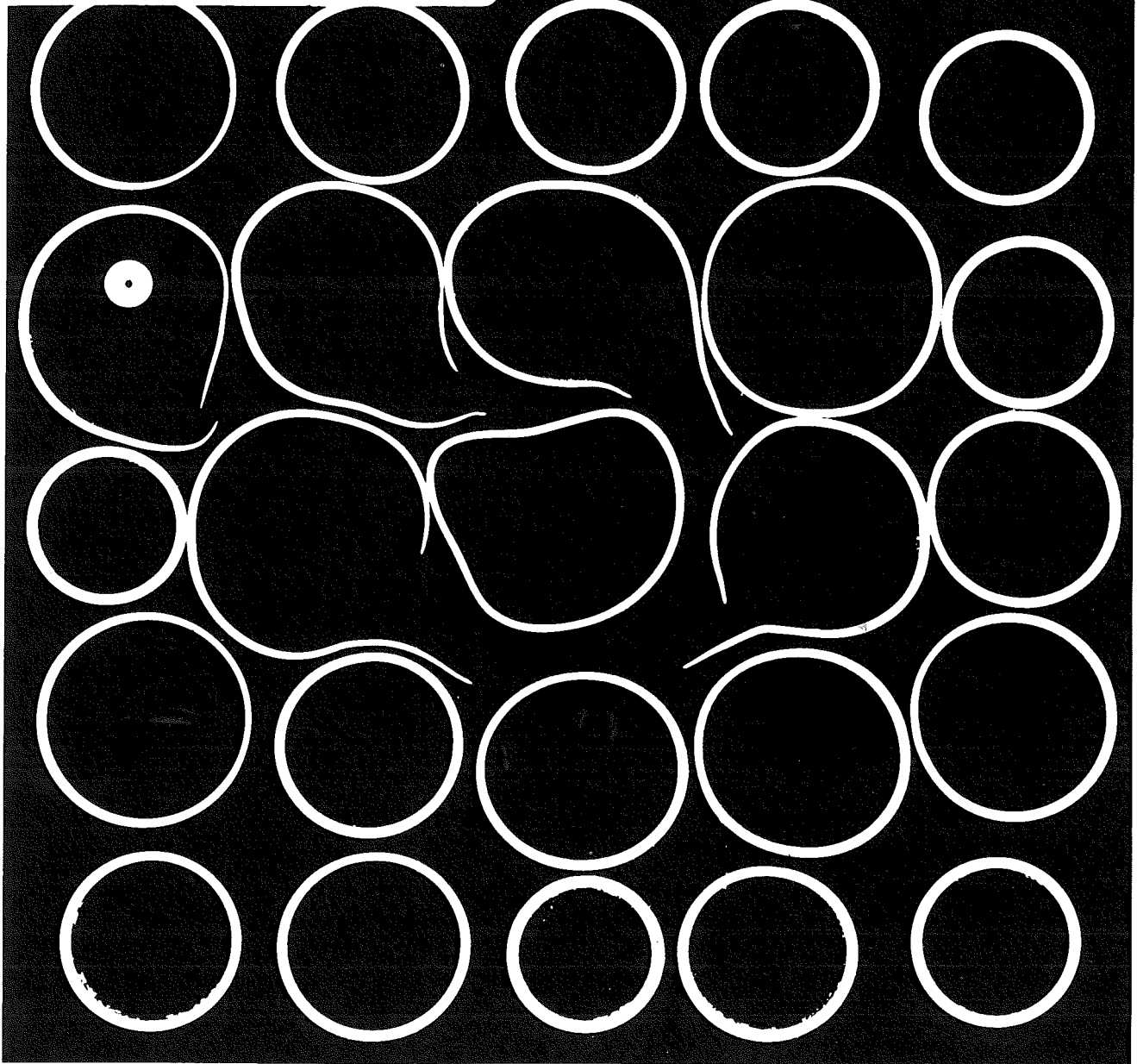


KIK

Abb. 15 REBEKA material test
burst strain and burst location

axial plane of max. flow blockage : 1910mm

M - 1910



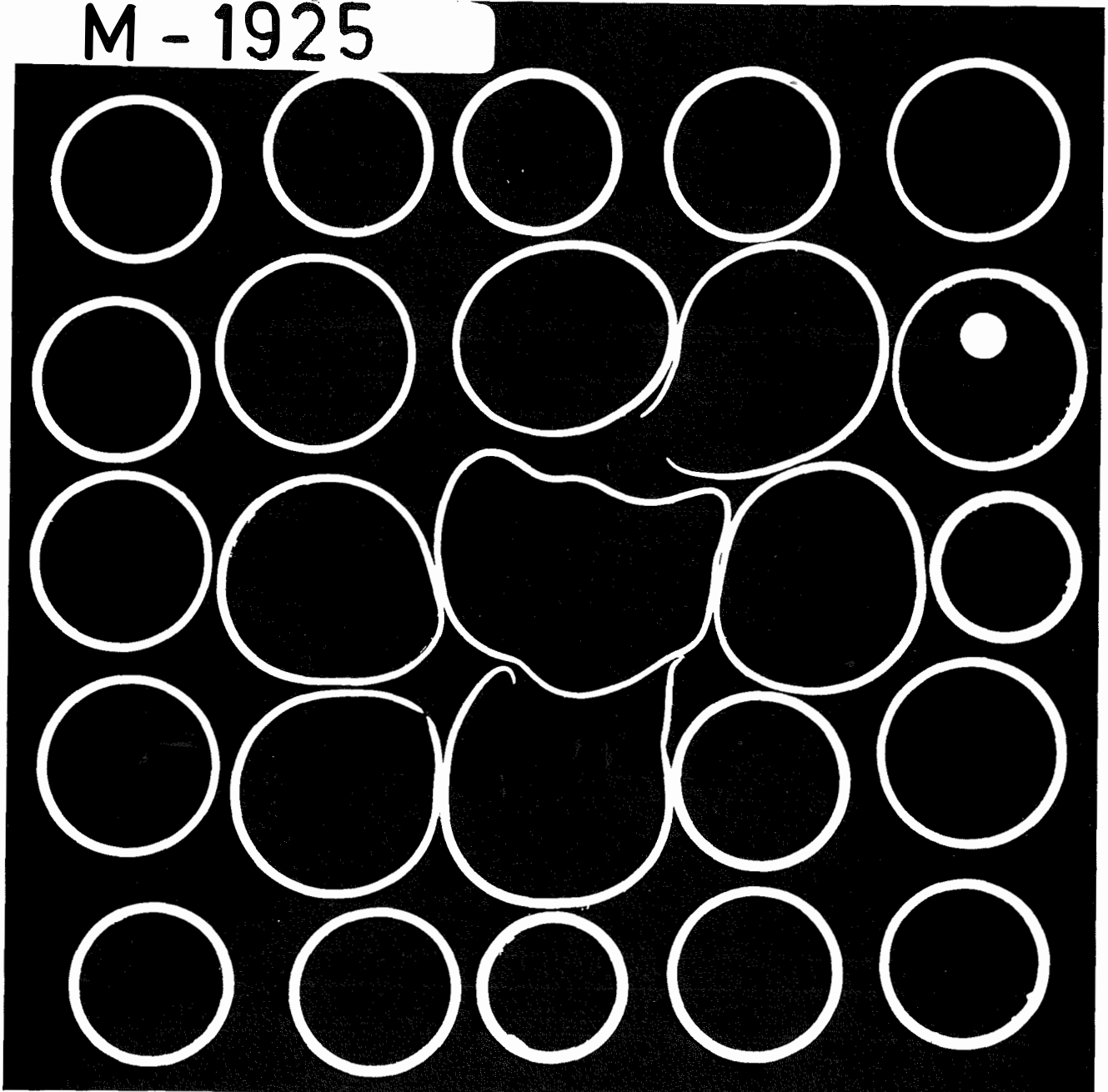
flow blockage at inner 3x3 : 84%



Abb.16 REBEKA material test
bundle cross - section

axial plane : 1925 mm

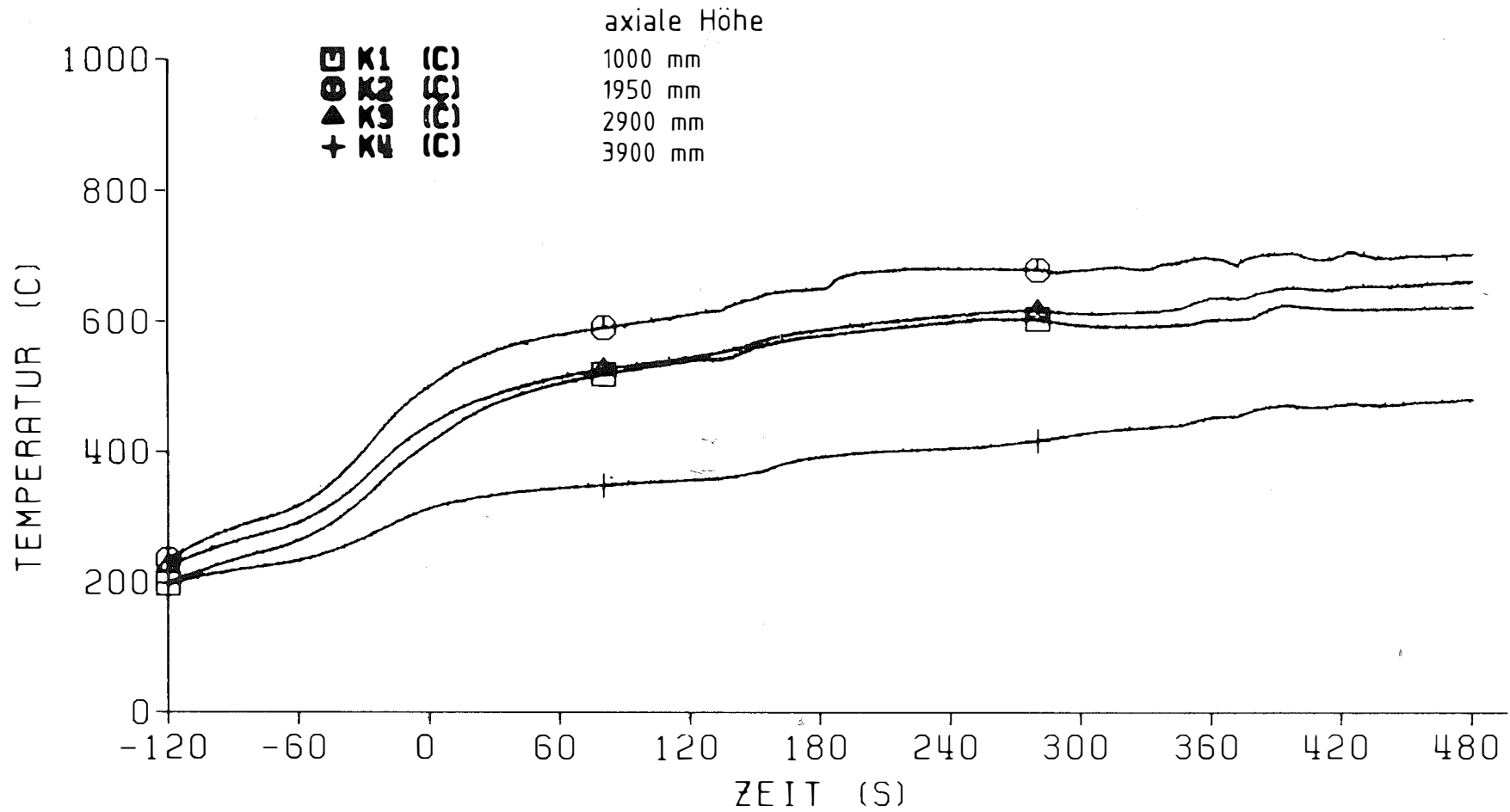
M - 1925



flow blockage at inner 3x3 : 79 %

KfK

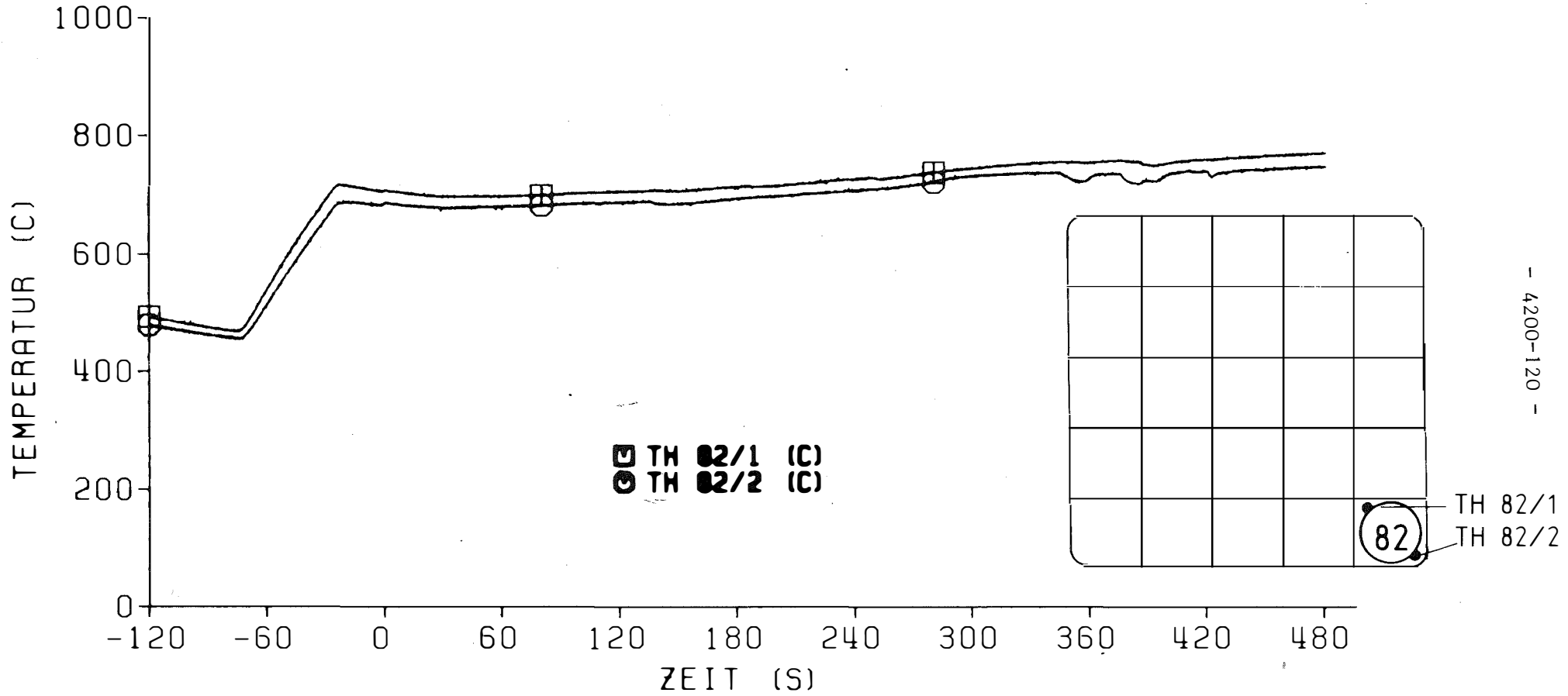
Abb.17 REBEKA material test bundle cross-section



- 4200-119 -

KfK

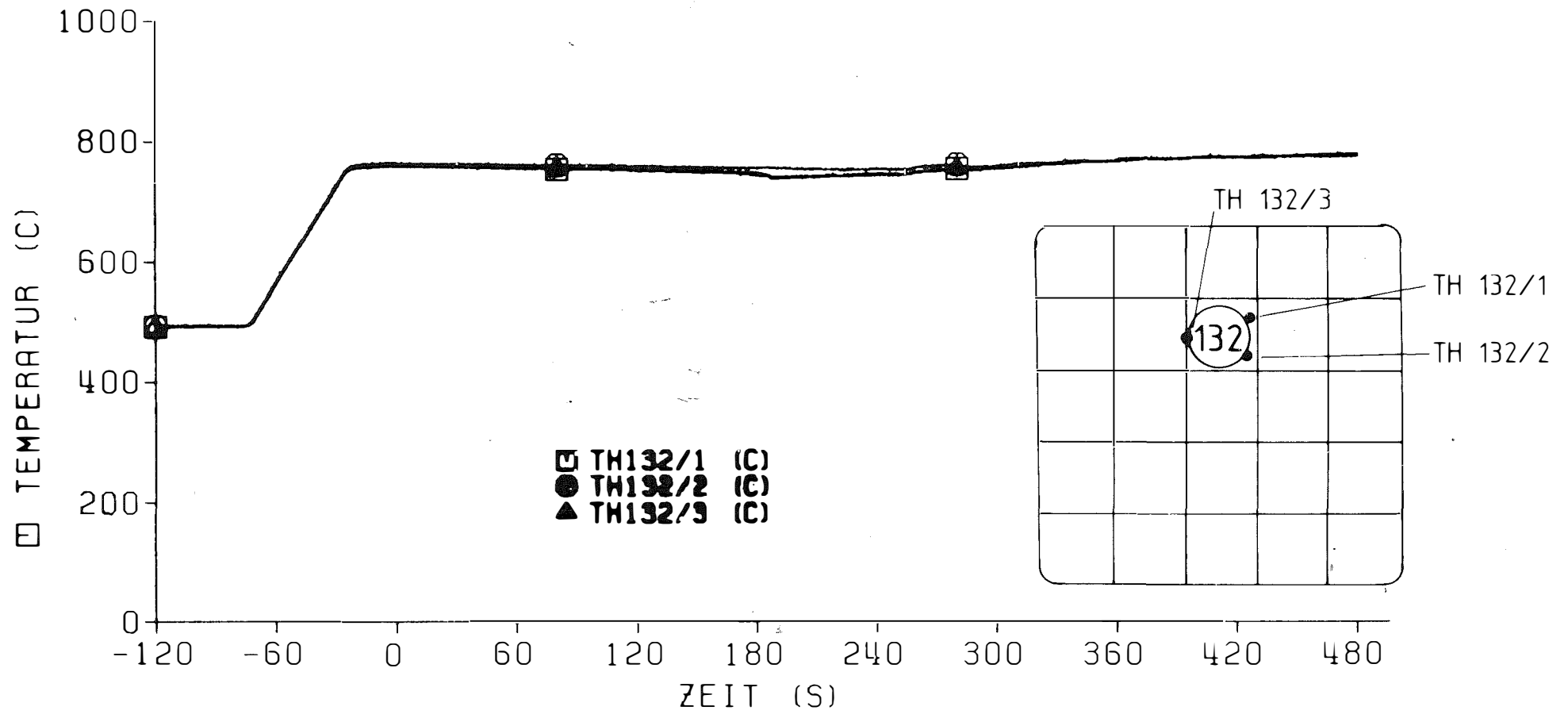
Abb. 18 REBEKA Materialtest
Kastenwandtemperaturen



- 4200-120 -



Abb. 19 REBEKA Materialtest
 Azimutale Hüllrohrtemperaturen eines Eckstabes



- 4200-121 -



Abb. 20 REBEKA Materialtest
Azimutale Hüllrohrtemperaturen eines Innenstabes