

KfK 2572

Juli 1979

Betontiegelversuche mit Thermitschmelzen

D. Perinić, B. Kammerer, H. Knauß, A. Mack, B. Stuka
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Nukleare Sicherheit

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Projekt Nukleare Sicherheit

KfK 2572

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

D. Perinić

B. Kammerer

H. Knauß

A. Mack

B. Stuka

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

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

Kurzfassung

Im Rahmen der Untersuchungen zum Studium hypothetischer Kernschmelzunfälle verbunden mit einer Wechselwirkung zwischen Beton und Kernschmelze wurden Betontiegelversuche mit Thermitschmelzen durchgeführt. In einer Versuchsreihe bestehend aus neun Versuchen wurden Betontiegel mit Thermitschmelzenmassen zwischen 100 und 300 kg bei Anfangstemperaturen über 2500°C beaufschlagt.

Zur Erhaltung der äußeren Formstabilität wurden die Tiegel mit Bewehrungsstahl oder mit Glasfasergewebe bewehrt. Mit Hilfe einer umfangreichen Instrumentierung konnte der Verlauf der Reaktion meßtechnisch erfaßt werden.

Aufgrund der heftigen Wechselwirkung der Schmelze mit dem Tiegelmateriale wurden die Anfangsinnengeometrien in ihrem unteren Teil radial und axial ausgebuchtet. Die so entstandenen, charakteristischen Schmelzkavernen weisen vorwiegend eine Birnenform auf. Sie wurden nach dem Trennen in der Meridianschnittebene vermessen.

Experiments with Thermite Melts Performed in Concrete Crucibles

Abstract

Within the frame of studies of hypothetical core meltdown accidents, combined with the interaction between concrete and the core melt, experiments were performed with thermite melts contained in concrete crucibles. In a test series comprising nine tests between 100 kg and 300 kg of thermite melt mass were given into concrete crucibles at initial temperatures of more than 2500°C.

To maintain the inherent stability the crucibles were reinforced by concrete steel or by a fiber glass fabric. The course of the reaction was recorded by measuring technology using an extensive instrumentation.

As a result of the violent interaction between the melt and the crucible material the initial inner geometries got bulged radially and axially in the bottom part. The characteristic melting cavities so formed are mainly pear shaped. After separation they were measured in the meridional plane.

I. Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1-1
2. Aufgabenstellung	2-1
3. Beschreibung der Versuchstechnik	3-1
3.1 Betontiegel	3-1
3.1.1 Betonspezifikation	3-1
3.1.2 Betonalterung	3-2
3.1.3 Tiegelkonstruktion	3-2
3.1.4 Tiegelbewehrung	3-2
3.2 Schmelze	3-4
3.3 Versuchsaufbau	3-5
3.4 Meß- und Überwachungstechnik	3-6
3.4.1 Eingebettete Thermoelemente	3-6
3.4.2 Pyrometer	3-8
3.4.3 Eintauchthermoelemente	3-9
3.4.4 Körperschallmessung	3-9
3.4.5 Dampfdetektion	3-10
3.4.6 Gasprobenahme	3-10
3.4.7 Filmaufzeichnung	3-11
3.4.8 Video-Aufzeichnung	3-11
4. Beschreibung des Versuchsablaufes	4-1
4.1 Tiegel A	4-1
4.2 Tiegel B	4-3
4.3 Tiegel C	4-4
4.4 Tiegel D	4-6
4.5 Tiegel E	4-8
4.6 Tiegel F	4-11
4.7 Tiegel G	4-12
4.8 Tiegel H und I	4-14
5. Auswertung und Ergebnisse	5-1
5.1 Äußerliche Begutachtung der Tiegel	5-1
5.1.1 Tiegel A	5-1
5.1.2 Tiegel B	5-2
5.1.3 Tiegel C	5-2

5.1.4	Tiegel D	5-2
5.1.5	Tiegel E	5-3
5.1.6	Tiegel F	5-3
5.1.7	Tiegel G	5-3
5.1.8	Tiegel H	5-4
5.1.9	Tiegel I	5-4
5.2	Tiegeltrennen, Untersuchung der Tiegelschnitte	5-4
5.2.1	Tiegeltrennen	5-4
5.2.2	Untersuchung der Tiegelschnitte - Regulusformen, Eindringtiefen der Schmelzen, Dehydrierte Zonen	5-5
5.2.2.1	Tiegel A	5-7
5.2.2.2	Tiegel B	5-8
5.2.2.3	Tiegel C	5-8
5.2.2.4	Tiegel D	5-9
5.2.2.5	Tiegel E	5-10
5.2.2.6	Tiegel F	5-11
5.2.2.7	Tiegel G	5-12
5.2.2.8	Tiegel H	5-12
5.2.2.9	Tiegel I	5-13
5.3	Temperaturverläufe	5-14
5.3.1	Tiegel A	5-14
5.3.2	Tiegel B	5-14
5.3.3	Tiegel C	5-15
5.3.4	Tiegel D	5-17
5.3.5	Tiegel E	5-18
5.3.6	Tiegel F	5-19
5.3.7	Tiegel G	5-20
5.3.8	Tiegel H	5-21
5.3.9	Tiegel I	5-22
5.4	Fortschrittsgeschwindigkeit der Isothermen und der Schmelzfront	5-23
5.5	Massenbilanzen	5-23
5.6	Körperschallmessung	5-27
5.7	Dampfdetektion	5-27
5.8	Gasprobenahme	5-27

II. Abbildungen

- 1 Chemische Analyse des Betons
- 2 Tiegel A - Maßskizze
- 3 Tiegel B - Maßskizze
- 4 Tiegel C - Maßskizze
- 5 Tiegel D - Maßskizze
- 6 Tiegel E - Maßskizze
- 7 Tiegel F - Maßskizze
- 8 Tiegel G - Maßskizze
- 9 Tiegel H - Maßskizze
- 10 Tiegel I - Maßskizze
- 11 Tiegel I - Bodensegment mit Glasfaserbewehrung
- 12 Stahlbewehrung von Tiegel C
- 13 Stahlbewehrung von Tiegel C
- 14 Chemische Analyse der Thermitmischung im Ausgangszustand
- 15 Versuchshalle, Schmelzanlage
- 16 Schmelzanlage, Prinzipskizze
- 17 Schwenkbare Eingießrinne
- 18 Tabellarische Übersicht der Meß- und Überwachungsgeräte
- 19 Meß- und Überwachungstechnik: Prinzipskizze
- 20 Der Meßplatz
- 21 Pyrometer
- 22 Eintauchlanze für Temperaturmessung, Tauch-Meßkopf
- 23 Tauch-Meßkopf: Maßskizze
- 24 Beschleunigungsaufnehmer im Tiegelboden für Körperschallmessung
- 25 Gasprobenahmeeinrichtung - Prinzipskizze
- 26 Gasprobenahmeeinrichtung während der Probenahme
- 27 Technische Daten zu den Versuchen
- 28 Tiegel E: Blasen Filmsequenzen 24 Hz
- 29 Tiegel E: Blasen Filmsequenzen 24 Hz
- 30 Tiegel H, I - Eingießvorgang
- 31 Tiegel H, I - Eingießvorgang
- 32 Tiegel H, I - Eruptionen

- 33 Tiegel A - Vorderansicht
- 34 Tiegel A - Draufsicht
- 35 Tiegel A - Erstarrter Auswurf
- 36 Tiegel B - Vorderansicht und Draufsicht
- 37 Tiegel B - Erstarrter Auswurf
- 38 Tiegel C - Vorderansicht
- 39 Tiegel C - Draufsicht
- 40 Tiegel C - Erstarrter Auswurf
- 41 Tiegel D - Vorderansicht
- 42 Tiegel D - Draufsicht
- 43 Tiegel D - Kruste, Auswurf an Innenwand
- 44 Tiegel D - Auswurf auf oberer Planfläche
- 45 Tiegel E - Vorderansicht
- 46 Tiegel E - Draufsicht
- 47 Tiegel E - Aufgebrochene obere Kruste und Auswurf
- 48 Tiegel F - Vorderansicht
- 49 Tiegel F - Draufsicht
- 50 Tiegel F - Auswurf
- 51 Tiegel G - Vorderansicht
- 52 Tiegel G - Draufsicht
- 53 Tiegel G - Auswurf
- 54 Tiegel H, I - Vorderansicht
- 55 Tiegel H, I - Draufsicht
- 56 Trenneinrichtung
- 57 Regulusspalt, Graue Schmelzschicht
- 58 Kieselsteine und Metalleinschlüsse in der Oxidschmelze, tropfenartiges, metallisches Granulat
- 59 Tiegel A - Schnittansichten
- 60 Tiegel A - Regulusansichten
- 61 Tiegel A - Detailaufnahmen
- 62 Tiegel A - Skizze des Tiegelschnittes
- 63 Tiegel B - Schnittansichten
- 64 Tiegel B - Regulusansichten
- 65 Tiegel B - Detailaufnahmen
- 66 Tiegel B - Skizze des Tiegelschnitts
- 67 Tiegel C - Schnittansichten
- 68 Tiegel C - Regulusansichten
- 69 Tiegel C - Detailaufnahmen
- 70 Tiegel C - Detailaufnahmen
- 71 Tiegel C - Skizze des Tiegelschnitts

- 72 Tiegel D - Schnittansichten
- 73 Tiegel D - Regulusansichten
- 74 Tiegel D - Detailaufnahmen
- 75 Tiegel D - Skizze des Tiegelschnitts
- 76 Tiegel E - Schnittansichten
- 77 Tiegel E - Regulusansichten
- 78 Tiegel E - Detailaufnahmen
- 79 Tiegel E - Skizze des Tiegelschnitts
- 80 Tiegel F - Schnittansichten
- 81 Tiegel F - Regulusansichten
- 82 Tiegel F - Detailaufnahmen
- 83 Tiegel F - Skizze des Tiegelschnitts
- 84 Tiegel G - Schnittansichten
- 85 Tiegel G - Regulusansichten
- 86 Tiegel G - Detailaufnahmen
- 87 Tiegel G - Skizze des Tiegelschnitts
- 88 Tiegel H - Schnittansichten
- 89 Tiegel H - Regulusansichten
- 90 Tiegel H - Detailaufnahmen
- 91 Tiegel H - Skizze des Tiegelschnitts
- 92 Tiegel I - Schnittansichten
- 93 Tiegel I - Regulusansichten
- 94 Tiegel I - Detailaufnahmen
- 95 Tiegel I - Skizze des Tiegelschnitts
- 96 Tiegel B - Temperaturverläufe I
- 97 Tiegel B - Temperaturverläufe II
- 98 Tiegel C - Temperaturverläufe I
- 99 Tiegel C - Temperaturverläufe II
- 100 Tiegel D - Temperaturverläufe I
- 101 Tiegel D - Temperaturverläufe II
- 102 Tiegel E - Temperaturverläufe I
- 103 Tiegel E - Temperaturverläufe II
- 104 Tiegel F - Temperaturverläufe I
- 105 Tiegel F - Temperaturverläufe II
- 106 Tiegel G - Temperaturverläufe I
- 107 Tiegel G - Temperaturverläufe II
- 108 Tiegel H - Temperaturverläufe I
- 109 Tiegel H - Temperaturverläufe II

- 110 Tiegel I - Temperaturverläufe I
- 111 Tiegel I - Temperaturverläufe II
- 112 Tiegel G - Tauchsonden-Meßköpfe
- 113 Tiegel D - Tauchsonden
- 114 Schmelzgutmassen im Tiegel A
- 115 Schmelzgutmassen im Tiegel B
- 116 Schmelzgutmassen im Tiegel C
- 117 Schmelzgutmassen im Tiegel D
- 118 Schmelzgutmassen im Tiegel F
- 119 Schmelzgutmassen im Tiegel G
- 120 Schmelzgutmassen im Tiegel H
- 121 Schmelzgutmassen im Tiegel I
- 122 Daten aus Filmauswertung
- 123 Tiegel B - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 124 Tiegel C - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 125 Tiegel D - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 126 Tiegel E - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 127 Tiegel F - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 128 Tiegel G - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 129 Tiegel H - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 130 Tiegel I - Geschwindigkeit der Temperaturfronten im Beton
- 131 Geschwindigkeit der 100°C-Isotherme im Beton
- 132 Geschwindigkeit der 800°C-Isotherme im Beton
- 133 Geschwindigkeit der Schmelzfront im Beton
- 134 Eindringtiefen der Schmelze, dehydrierte Zonen
- 135 Geschmolzener und dehydrierter Beton: Volumen und Massen
- 136 Festlegungen zur Ausbreitungsgeometrie

1. Einleitung

Im Rahmen des Projektes Nukleare Sicherheit werden Untersuchungen zum Ablauf von hypothetischen Störfällen, die u.a. zum Schmelzen des Reaktorkerns führen können, durchgeführt. Die Experimente zur Simulation großer Kernschmelzen dienen der Erforschung der vierten Phase eines Kernschmelzunfalls, d.h. dem Zeitabschnitt ab dem ersten Kontakt der Kernschmelze mit dem Beton unterhalb des Reaktordruckgefäßes. Eine Studie über die technische Durchführbarkeit von Versuchen mit simulierten Kernschmelzen im 100 kg-Maßstab wird derzeit erstellt. Bereits seit 1975 werden bei der Abteilung Reaktorbetrieb und Technik/Ingenieurtechnik im Kernforschungszentrum Karlsruhe experimentelle Arbeiten zum Studium der Wechselwirkung Schmelze - Beton geleistet.

Früher wurden bereits Versuche mit induktiv beheizten sogenannten Coriumschmelzen (eine Mischung aus Urandioxid, Stahl und Zircaloy) mit Massen bis zu max. 0,5 kg sowie Eingießversuche mit Graugußschmelzen mit Massen bis zu 160 kg durchgeführt. Zur Untersuchung der Phänomenologie der Reaktion Schmelze - Beton und zur Entwicklung von betriebssicheren Betontiegeln wurde eine Versuchsreihe mit Thermitschmelzen im April und Mai 1977 durchgeführt. Diese Versuche werden im vorliegenden Bericht beschrieben.

2. Aufgabenstellung

Aufbauend auf den Ergebnissen aus den Versuchen mit Corium- und Graugußschmelzen sollten mit dieser Versuchsreihe folgende Einzelfragen geklärt werden:

- Untersuchung der Schmelzfrontausbreitung im Beton.
- Nachweis der Betriebssicherheit von Betontiegeln hinsichtlich ihrer späteren Verwendung für induktiv, direkt beheizte Schmelzen.
- Erfassung der Phänomenologie der Reaktion Schmelze - Beton als Basis zur Erstellung analytischer Rechenmodelle.

3. Beschreibung der Versuchstechnik

3.1 Betontiegel

3.1.1 Betonspezifikation

Die Betontiegel wurden in Anlehnung an die Spezifikation des Reaktorbetons für den Bereich unterhalb des Reaktordruckbehälters beim KKW Biblis hergestellt.

Zusammensetzung der Betonbestandteile vor dem Abbinden:

Portland Zement PZ 350 F	330 kg/m ³	Beton	... 14,3 %
Rheinsand 0...2 mm	750 kg/m ³	Beton	... 32,6 %
Rheinkies 2...8 mm	450 kg/m ³	Beton	... 19,6 %
Rheinkies 8...16 mm	600 kg/m ³	Beton	... 26,1 %
Wasser	170 kg/m ³	Beton	... 7,4 %

Der Beton wurde beim Eingießen in die Form mit einem elektromotorischen Vibrator verdichtet.

Ein Segment des Tiegelbodens (Tiegel E) wurde chemisch analysiert. Die Ergebnisse der Analyse können der Abb. 1 entnommen werden.

Die Betondichte wurde an einem Bodensegment des Tiegels I von rund 1 l Inhalt gemessen. Die Probe hatte nach einer Trockenlagerung von 2 Monaten die Dichte von 2,34 kg/l. Anschließend wurde die Probe ca. 3 h unter Wasser gelagert. Dabei ist die Dichte auf 2,43 kg/l angestiegen. Man kann von der Annahme ausgehen, daß die mittlere Betondichte bei allen Versuchen aufgrund der Alterung der Tiegel unter Wasser rund 2,4 kg/l betragen hat.

3.1.2_Betonalterung

Alle Tiegel wurden mindestens vier Wochen naßgelagert. Der Innenraum der Tiegel wurde mit Wasser gefüllt, wobei über die Tiegel Plastiksäcke gestülpt wurden. Damit konnte sichergestellt werden, daß die Tiegel bis zu Beginn der Versuche mit Wasser gesättigt waren.

3.1.3_Tiegelkonstruktion

Als Außengeometrie der Tiegel wurde im Hinblick auf die später vorgesehene induktive Beheizung der Schmelze eine stehende Zylinderform gewählt (Abbildungen 2 bis 10). Wegen des Ankoppelungswirkungsgrades soll dabei das Verhältnis des Induktorquerschnitts zum Schmelzbadquerschnitt nicht größer als 2 sein. Daraus folgen verhältnismäßig dünne Wandstärken. Zum Schutz des Induktors bei einem möglichen Ausbruch der Schmelze wurde eine Zweischalenkonstruktion verwendet. Der Betontiegel wird von einem Asbest-Zementrohr umgeben. Der Zwischenspalt (10 mm) wurde bei den Tiegeln B, E, F und G mit einer hochschmelzenden keramischen Watte (Saffil) ausgestopft. Die Watte soll gewisse Wärmedehnungen der Betontiegel nicht behindern und gleichzeitig als thermische Barriere dienen. Bei Tiegel A wurde der Spalt leer belassen. Der Tiegel D wurde ohne Spalt hergestellt, wobei jedoch das Asbestzementrohr zur Kompensation der Tangentialspannungen geschlitzt wurde. Die Tiegel C, H, und I wurden ohne Asbest-Zementrohre eingesetzt.

3.1.4_Bewehrung

Wegen der später vorgesehenen induktiven Ankoppelung der Schmelze kommt eine Stahlbewehrung nicht in Frage. Alle Tiegel (außer Tiegel C) wurden mit einem Glasfaser-Gittergewebe bewehrt. Die Bewehrung wurde in die äußere Randzone einbetoniert. Diese Bewehrungsart konnte bisher sowohl in Kleinversuchen mit Coriumschmelzen bis zu 500 g als auch bei den

Eingießversuchen mit Graugußschmelzen bis zu 160 kg z.T. erprobt werden. Die Glasfasergewebeschiicht wurde jedoch gegenüber den früheren Versuchen wesentlich verstärkt. Bei den Kleinversuchen wurden nur eine Lage, bei den Graugußversuchen vier Lagen und bei den Thermitversuchen zehn Lagen des Glasfasergitters einbetoniert.

Technische Daten des Gewebes:

Hersteller: Leuze & Rilling GmbH, Wannweil

Gewebe-Nr. 11229

Bahnbreite: 1600 mm

Maschenweite: 20 mm

Kett- und Schußfäden 3 x 0,5 mm, wobei der Kettfaden wesentlich geringere Dichte aufweist (Abb. 11).

Das Gewebe ist mit einem Acryl-Mischpolymerisat gegen Alkali- und Säureangriff imprägniert.

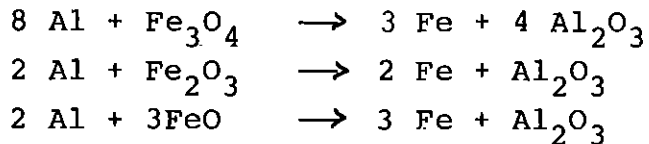
Das Gittergewebe wurde vor dem Eingießen des Betons in die Form kreuzweise eingelegt. Während der Verdichtung wurde darauf geachtet, daß deren ursprüngliche Lage weitgehend erhalten geblieben ist.

Die Abb. 11 zeigt das einbetonierte Gewebe in einer Bruchfläche des Tiegels I.

Der Tiegel C wurde mit Stahl bewehrt. Es wurden etwa die gleichen Bewehrungsstäbe und soweit möglich auch die gleichen Stababstände wie im Fundament des KKW Biblis eingehalten (Abb.12,13). Mit diesem Tiegel sollte der Einfluß der Stahlarmierung auf die Schmelzbadausbreitung untersucht werden, um festzustellen inwiefern sich der Versuchsablauf von demjenigen in glasfaserbewehrten Tiegeln unterscheidet.

3.2 Schmelze

Um möglichst hohe Temperaturen der Schmelzen zu erreichen, wurden die Schmelzen im Thermit-Verfahren dargestellt. Es handelt sich dabei um die aluminothermische Reaktion des Aluminiumpulvers mit einer Mischung aus verschiedenen Eisenoxiden:



In einem der Versuche wurde eine andere Reaktionsmischung mit Zusatz von Nickel und Chrom zur Simulation einer Edeldstahlschmelze verwendet. Ni und Cr wurden dabei in metallischer Form zugemischt. Nach Ablauf der Reaktion, bei welcher max. Temperaturen von 3 000° C erreicht wurden, erfolgt eine rasche Segregation aufgrund der großen Dichteunterschiede zwischen der oxidischen und metallischen Phase.

Bei Versuchen mit Ausgangsmassen von ca. 250 kg betrug die Zeitdauer zwischen Zünden des Thermitpulvers und Abstich des Reaktionstiegels etwa 30 s. Aufgrund der raschen Segregation fließt aus dem Tiegel zuerst die metallische Schmelze ($\rho_{fl} \approx 5,8 \text{ g/cm}^3$) und anschließend die spezifisch wesentlich leichtere oxidische Phase ($\rho_{fl} \approx 2,3 \text{ g/cm}^3$) heraus. Trotz der zum Zeitpunkt des Abstichs praktisch abgeschlossenen Segregation liegen weder die metallische noch die oxidische Phase in völlig reinem Zustand vor. Die metallische Phase beinhaltet Anteile des nichtoxidierten Aluminiums, wobei die oxidische Phase eine Mischoxidschmelze aus Al-, Fe-, Ni-, Cr- und Si-Oxiden darstellt.

Die chemische Analyse der beiden Thermitmischungen in Ausgangszusammensetzung ist aus der Abb. 14 ersichtlich.

3.3 Versuchsaufbau

Die Versuche wurden in der Halle, Bau 650, (Abb. 15) durchgeführt. Die Halle hat eine freie Grundfläche von rund 64 m² und eine Höhe von rund 6 m. Sie ist mit Schwenk- und Schiebetüren an drei Seitenwänden zu öffnen. Zwei große Axialgebläse sorgen zusätzlich für schnellen Wechsel der Hallenluft. Die Halle ist damit für Versuche mit extremer Rauch- und Wärmeentwicklung gut geeignet.

Alle Tiegel (außer Tiegel E) wurden mit heißer Thermit-Schmelze gefüllt, die zuvor in dem höher angeordneten Reaktionstiegel aus Thermitpulver dargestellt wurde. Der Reaktionstiegel mit dem kompletten Aufbau wurde von der Firma Elektro-Thermit GmbH, Essen leihweise zur Verfügung gestellt.

Aus der Abb. 15 ist die Aufstellung der Versuchsanordnung ersichtlich. Auf zwei Böcken (3220 mm hoch) aus 100/120 \emptyset mm Stahlrohr sind Querträger mit Gabelenden höhenverstellbar fixiert. Darauf liegen - zwischen den Böcken angeordnet - zwei 5800 mm lange 160 x 160 mm Doppel-T-Träger. Zwischen diesen Trägern hängt - über einen Aufsatz Tisch axial abgestützt - der Reaktionstiegel. Die Prinzipskizze, Abb. 16, verdeutlicht den Querschnitt des Tiegels. Zunächst ist der Stahlblechmantel mit einer Schicht aus gestampftem Klebsand ausgekleidet. Darauf ist das eigentliche Tiegelfutter aus einer dicken Magnesit-Schicht (MgO) gestampft. Der obere Teil des Tiegels besteht aus gestampftem Klebsand.

Den unteren Tiegelabschluß bildet ein gesinterter keramischer Bodenstopfen, dessen Abstichbohrung vor jedem Versuch mit einem Stahlstift und etwas Klebsand mit Asbest verschlossen wird. Durch Einschlagen des Stahlstiftes wird der Tiegel abgestochen. Der Reaktionstiegel wiegt etwa 1900 kg. Er ist verwendbar für Thermitmassen bis zu 800 kg.

Über eine schwenkbare Rinne (Abb. 17) fließt die Schmelze in den tiefer angeordneten Versuchstiegel. Durch seitliches Schwenken der Rinne können bei einem Abstich zwei Versuchstiegel mit Schmelze beaufschlagt werden (Abb. 17).

Die Versuchstiegel stehen in einer Betonwanne, die zum Schutz gegen Schmelzenspritzer mit einer rund 10 cm dicken Sandschicht aufgefüllt wurde.

3.4 Meß- und Überwachungstechnik

Die bei den Versuchen eingesetzten Meß- und Überwachungsgeräte wurden in den Abb. 18 und 19 zusammengestellt. Im folgenden werden die einzelnen Meß- und Überwachungsgeräte detailliert beschrieben:

3.4.1 Eingebettete Thermolemente

Zur Verfolgung der Schmelzfrontausbreitung und zur Überwachung der Temperaturfelder im Betontiegel während des Versuchs wurden in jeden Tiegel mindestens 6 Mantelthermolemente einbetoniert. Davon sind drei axial und drei radial untergebracht, die jeweils zusammengefaßt sind. Die Meßpunkte dieser Thermolemente sind, bezogen auf die innere Tiegelfläche, folgendermaßen angeordnet worden: radiale Positionen 10, 20 und 50 mm, axiale Positionen 20, 40 und 100 mm (Abbildungen 2 bis 10). Die Thermolemente wurden in vorgegossene Kernlöcher \varnothing 8 mm in die fertig abgebundenen Betontiegel mit Zementmilch einbetoniert.

Zusätzlich wurden im Tiegel C drei Thermolemente direkt in Bohrungen der Stahl-Bewehrungsstangen gesteckt (Abb. 13).

Technische Daten der Thermoelemente:

- Mantelrohrdurchmesser	1 mm
- Mantelwerkstoff	Inconel
- isolierte Meßstelle	ja
- Isolationsmaterial	MgO
- Aderndurchmesser	0,15 mm
- Adermaterial	NiCr - Ni
- Thermoelementlänge	5 m
- Stecker	LEMO
- Ausgleichskabel	NiCr - Ni

Die axialen Thermoelemente wurden vom Tiegelboden herausgeführt. Die radialen Thermoelemente wurden auf kürzestem Weg radial durch den Beton nach außen und dann im Spalt zwischen Tiegel und Asbest-Zementrohr bis zum Boden heruntergeführt. Von dort aus wurden die Thermoelemente über Ausgleichsleitungen in einem dickwandigen Asbest-Zementrohr, das zusätzlich mit Schamottziegeln überbaut wurde, bis auf die Schreiberbuchsen geführt. In diesem Tunnel war auch die Übergangsstelle Thermodraht/Ausgleichsleitung untergebracht.

Die Aufzeichnung erfolgte mit zwei Kompensationsschreibern:

a) Type: W + W RECORDER, Modell 314

- Schreibbreite 250 mm
- Klasse 0,3
- Meßbereich 1 mV ... 10 Volt
- Papiervorschub 1 cm ... 60 cm/min, cm/h

b) Type: 6-Kanal-Multicorder - Waternabe

- Schreibbreite 250 mm
- Klasse 0,3
- Meßbereich 10 mV ... 100 V
- Papiervorschub 0,75 ... 60 cm/min, cm/h

Der Aufbau des Meßplatzes ist aus der Abb. 20 ersichtlich.

3.4.2 Pyrometer

Die Oberflächentemperatur der Schmelze wurde mit zwei Quotientenpyrometern überwacht (s. Abb. 21).

Gerätedaten:

Lieferfirma: Günther Schmidt, Labor-Meßgeräte, Hamburg
 Typ: Chopper-Q2-Pyrometern 500
 Meßbereich: ca 900 - 3100° C
 Genauigkeit: 1000 - 1400° C \pm 10° C
 1400 - 3100° C \pm 5° C
 Einstellzeit: 250 ms
 Geräte Nr. 107 538, 057 205

Die Geräte tragen auf einem mit 50 Hz umlaufenden Chopper zwei Interferenzfilter, welche aus dem Gesamtspektrum zwei Wellenlängen ausfiltern. Die effektiven Wellenlängen liegen bei 500 und 580 nm mit einer Halbwertsbreite von 20 nm. Die ausgefilterte und durch den Chopper zerhackte Strahlung trifft auf einen Photomultiplier, der die Lichtintensitäten in Spannungswerte umwandelt. Ein nachgeschaltetes elektronisches Netzwerk bildet den temperaturproportionalen Quotienten.

Die Schmelzenoberfläche wird mit einem Objektiv (1 : 4,5/105) auf den Eintrittsquerschnitt eines Lichtleiters mit 6 mm Durchmesser abgebildet. Der Objektabstand war auf 5 m, der Bildabstand auf 107 mm festgelegt. Der Meßfleckdurchmesser beträgt 280 mm. Die Blickrichtung war ca. 30° gegen die Vertikale geneigt. Um Fremdlichteinflüsse weitgehend auszuschalten, war der Strahlengang mit geschwärzten Rohren ($\varnothing = 250$ mm) bis auf 1 m Abstand von der Schmelzenoberfläche abgeschirmt (Abb. 21) Die Meßwerte wurden mit einem Zweilinienschreiber registriert.

Gerätedaten:

Lieferfirma: W + W Electronic Inc., CH-4002 Basel
 Typ: W + W Recorder 600 Tarkan
 Klasse: 0,3
 Meßbereich: 1mV - 10 V
 Vorschub: 1 - 30 cm/min, cm/h
 Schreibbreite: 250 mm

3.4.3 Eintauchthermoelemente

Für die Temperaturmessung der Metallschmelze wurde eine "Tauchmeßblanze" der Fa. Elektro-Nite, die sich in Stahlwerken und Giessereien bewährt hat, eingesetzt. Die Tauchmeßeinrichtung besteht aus dem Tauchmeßkopf, der an die Meßblanze aufgesteckt wird, dem Verlängerungsrohr (ca. 2m) und dem Haltegriff (Abb. 22). Der Tauchmeßkopf besteht aus einer dünnwandigen Stahlschutzkappe für das Quarzglasröhrchen, in dem das W/Re-Thermopaar untergebracht ist (Abb. 23). Die Enden des Thermodrahtes sind auf Cu-Stifte aufgepreßt, die als Steckkontakte für den Anschluß an die Tauchmeßblanze dienen.

Die Tauchmeßblanze besteht aus einem Stahlrohr 16 mm ϕ 420 mm lang mit Steckkontakt für den Tauchmeßkopf und Anschlußgewinde für das Verlängerungsrohr. Vom Steckkontakt der Tauchmeßblanze wird das W/Re-Thermoelement über Ausgleichsleitungen auf den in Punkt 3.4.1 beschriebenen Kompensationsschreiber aufgeschaltet. Der Steckkontakt des Tauchmeßkopfes und die wiederverwendbare Tauchmeßblanze sind durch ein schwerbrennbares Papprohr mit 5 mm Wandstärke, das über die Tauchmeßblanze geschoben wird, geschützt. Der Tauchmeßkopf und das Papprohr werden für jede Temperaturmessung erneuert.

3.4.4 Körperschallmessung

Zur Erfassung der Geräusche beim Einwirken der Schmelze auf den Tiegelbeton wurde von außen in den Boden der Tiegel C, D, E, G, H und I je ein Beschleunigungsgeber eingeschraubt (Abb. 24).

Das Körperschallspektrum wurde während des Versuches beobachtet und gleichzeitig auf Magnetband aufgezeichnet.

3.4.5 Dampfdetektion

Zur Erfassung des Wasserdampfdurchbruchs durch die Tiegelwand nach außen wurde beim Tiegel F ein Dampfdetektor spezieller Bauart in den Spalt zwischen dem Tiegel und Asbestzementrohr eingebaut.

Bei Auftreten von Feuchtigkeit in der Umgebung des Detektors leuchtet eine Signallampe auf.

3.4.6 Gasprobenahme

Die Gasprobenahmeeinrichtung (Abb. 25) besteht aus einem einseitig geschlossenen Glasrohr \varnothing 10 mm mit einer Sollbruchstelle, das über ein Edelstahlrohr mittels Kleinflansch (KF 10, Schraub-Quetsch-Verschluß) mit einer beidseitig durch Hähne absperrbaren Gasmaus (1 l) verbunden war. Dieses System konnte über einen Wellschlauch NW 15 mittels einer zweistufigen Drehschiebervakuumpumpe evakuiert werden. Die Gastemperatur während der Probenahme wurde über zwei Thermoelemente (Pt/PtRh 10%), die in das Edelstahlrohr ca. 550 mm hinter der Probenahmestelle eingelötet waren, gemessen. Die Thermoelemente waren auf einen 2-Linien-Kompensationsschreiber aufgeschaltet. Mit Hilfe eines durch Seilzug zu betätigenden Hebelschlagwerkes konnte zur Probenahme das Glasrohr an der Sollbruchstelle abgeschlagen werden.

Funktionsbeschreibung

Das gasdichte System Probenahmerohr - Gasmaus wurde mit geöffneten Absperrhähnen vor Beginn der Probenahme 10 min lang evakuiert. Zur Probenahme wurde die Lanze mit dem Probenahmerohr in die Flammenzone ca. 200 - 300 mm über dem Tiegel eingeschwenkt (Abb. 26). Anschließend wurde das fingerhutartige Ende des Glasrohres abgeschlagen, so daß das Gas in das evaku-

ierte System einströmen konnte. Die Absaugdauer durch die Vakuumpumpe betrug 10 Sekunden. Danach wurde zuerst der Hahn am Glasmausaustritt, dann der Hahn am Eintritt abgesperret.

3.4.7 Filmaufzeichnung

Der Versuchsablauf wurde mit zwei 16 mm Filmkameras zum Teil synchron aufgenommen. Eine fernbedienbare Kamera (Type BOLEX 16 PRO 100) war auf einem Gerüst etwa 4 m oberhalb des Tiegels befestigt. Sie lief rund 10 Minuten lang ab dem Zündzeitpunkt des Thermitpulvers. Damit konnte der gesamte Versuchsverlauf bis zur Erstarrung synchron aufgezeichnet werden.

Aus einer Seitenansicht wurde der Tiegel drei Minuten lang synchron zu der fernbedienten Kamera mit einer handgesteuerten 16 mm-Filmkamera (Type BEAULIEU R 16) aufgenommen. Anschließend wurden noch einige kürzere Nahaufnahmen mit einer Gesamtdauer von 5 min gedreht.

Als Filmmaterial wurde ein Spezialfarbfilm der Type EKTACHROME, Video News Film 7240, verwendet.

3.4.8 Video-Aufzeichnung

Die Versuche C und D wurden mit einer Fernsehkamera aufgenommen und auf Videoband aufgezeichnet. Die Entfernung zur Schmelze betrug 5 m. Beobachtet wurde unter einem Winkel von ca 30° gegen die Vertikale. Die Anlage bestand aus einer Fernsehkamera mit Zoomobjektiv und Sucheraufsatz, Videorecorder, Monitor und Mischpult. Mit einem stufenlos einstellbaren Polarisationsfilter vor dem Zoomobjektiv konnte die Helligkeit manuell eingestellt werden. Die Uhrzeit wurde mittels Mischpult und einer zweiten Kamera ins Bildfeld eingeblendet. Auf dem Videoband wurde zusätzlich der akustische Ablauf aufgezeichnet.

Technische Daten:

Fernsehkamera:	Hersteller:	Sony
	Typ:	AVC-32 50 CEK mit Sucheraufsatz AVF-3250
Monitor:	Hersteller:	Sony
	Typ:	s/w CVM-2402 RM
Zoomobjektiv:	Hersteller:	Sony
	Typ:	VMC-10 P
Videorecorder:	Hersteller:	Sony
	Typ:	AV-3670 CE 1/2" s/w
Mischpult:	Hersteller:	Sony
	Typ:	CMW-100 CE

4. Beschreibung des Versuchsablaufes

Im Folgenden wird der Ablauf jedes einzelnen Versuchs phänomenologisch beschrieben. Die wesentlichen technischen Versuchsdaten können folgenden Abbildungen entnommen werden:

- Tiegelgeometrien und Lage der einbetonierten Thermoelemente, Abb. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13
- Massen und Zusammensetzung der Thermitchargen, Abb. 27
- Meß- und Überwachungstechnik, Abb. 18, 19

4.1 Tiegel A (Abb. 2, 33, 34)

Versuchsdatum: 18.4.1977

Thermitmasse im Reaktionstiegel: 500 kg

In den Tiegel wird nur Fe eingegossen. Der oxidische Anteil der Schmelze wird nach dem Schwenken der Rinne in ein Asbestzementrohr geleitet.

Tiegelinnendurchmesser: 380 mm

Tiegelinnenhöhe: 500 mm

Zeit

- 0" Zündung im Reaktionstiegel, Rauch steigt aus der Abdeckhaube. Einzelne Funken werden herausgeschleudert.
- 45" Abstich, Gießstrahl kurzzeitig erkennbar (sehr dünnflüssig, vergleichbar mit Wasser), dann starke Rauchentwicklung. Tiegel nicht mehr erkennbar.
- 1' 6" Tiegel ist gefüllt. Rinne wird geschwenkt. Restschmelze läuft in das Asbestzementrohr. Schmelze kocht. Nadelförmige Fontänen auf der gesamten Oberfläche. Starke Auswürfe die sich z.T. auf der Stirnfläche des Tiegels ablagern.

Zeit

- 1' 25" Keine Rauchentwicklung mehr. Schmelzenoberfläche ist gut sichtbar. Ihre Entfernung zur Tiegeloberkante beträgt ca. 20 cm.
- 1' 25" Ende der Eruptionen, nur noch vereinzelte Spritzer.
- 1' 55" Dunkler Film auf der Oberfläche, der zeitweilig aufgerissen und weggespült wird. Schmelze ist jetzt wesentlich zäher.
- 2' 10" Oberfläche pulsiert rhythmisch, keine Einzelblasen erkennbar.
- 2' 30" Amplitude und Frequenz der Schmelzbadbewegung werden größer.
- 3' Flammen über dem Schmelzbad ca. 50 cm hoch.
- 3' 30" Oberfläche pulsiert rhythmisch mit einer Periodendauer von $\approx 0,5$ sec.
- 4' Oberfläche wird ruhiger, Ausbildung einer Kruste, die von Rissen durchzogen ist. Aus den Rissen schlagen Stichflammen (ca. 30 cm hoch)
- 4' 30" Oberfläche wird in Zeitabständen von 3 - 5 sec angehoben (ca. 5 cm).
- 5' Stichflammen aus den Öffnungen in der Kruste.
- 5' 30" Durch Risse in der Kruste hell leuchtende Schmelze erkennbar, keine Bewegung der Oberfläche.
- 5' 45" Oberfläche ist erstarrt. Einzelne Stichflammen schlagen aus den Rissen am Rande der Schmelzenoberfläche.

4.2 Tiegel B (Abb. 3, 36)

Versuchsdatum: 19.4.1977

Thermitmasse im Reaktionstiegel: 250 kg

In den Betontiegel wird Fe- und Oxidschmelze eingegossen.

Tiegelinnendurchmesser: 380 mm

Tiegelinnenhöhe: 500 mm

Zeit

- 0" Zündung im Reaktionstiegel
- 35" Abstich. Nach dem Auftreffen des Gießstrahles steigen sofort dunkle Rauchschwaden auf, die den Tiegel einhüllen. (Tiegel nicht mehr sichtbar.)
- 45" Spritzer erkennbar.
- 50" Starker Rauch. Tiegel nur z.T. erkennbar.
- 58" Rauch ist abgesaugt.
- 59" Tiegel gefüllt. Nachlaufende Schmelze läuft über den Tiegelrand. Starkes Kochen und Auswurf von Schmelzgut.
- 1'12" Eingießvorgang beendet.
- 1'15" Schmelze kocht. Durch hochperlendes Gas entstehen Fontänen auf der Schmelzenoberfläche (Höhe ca. 50 cm $\varnothing \approx 3 - 5$ cm). Starker Auswurf.
- 1'30" Fontänenaktivität klingt ab. Schmelze wird dickflüssiger. Erste Blasen erkennbar.
- 2'5" Nur noch vereinzelte Spritzer, die wenig Masseverlust im Tiegel verursachen.
- 2'20" Oberfläche ist bis ca. 20 cm unter die Tiegeloberkante abgesunken. Keine nadelförmigen Spritzer mehr.
- 2'40" Gassonde wird 20 cm über die Tiegeloberkante eingeschwenkt.
- 2'55" Gassonde wird zurückgezogen.

Zeit

- 3'5" Starke Bewegungen auf der Schmelzenoberfläche.
- 3'20" Dunkle Schicht schwimmt auf der Schmelze.
- 3'45" Teigiger Zustand der Schmelze. Auf der Oberfläche pulsierende Blasen, die durch aufsteigendes Gas aufgebläht werden und bei einem maximalen Durchmesser von $d/2$ (d = Tiegelinnendurchmesser) zerplatzen. Beim Zerplatzen der Blasen entstehen gelbe Stichflammen bis zu 0,5 m Höhe.
- 4'45" Frequenz der Blasenpulsation 2 - 3 Hz. Flächenhafte Verbrennung über dem Schmelzbad.
- 4'50" Oberfläche wird ruhiger. Schwimmende Kruste bildet sich aus.
- 5'20" Auf der Oberfläche 4 - 5 pulsierende Blasen. Blasenentstehungsort bleibt konstant.
- 6'15" Keine Einzelblasen mehr. Gesamte Oberfläche wird rhythmisch hochgewölbt.
- 6'50" Kruste bildet sich stärker aus. Risse sind erkennbar.
- 7'35" Beim Aufreißen der Kruste entstehen Stichflammen.
- 8'5" Schmelze unter der Kruste ist noch flüssig.
- 10'5" Schwache Bewegung der Oberfläche. Vereinzelt Stichflammen.
- 10'40" Keine Bewegung der Oberfläche mehr erkennbar.
- 11'5" Schwache Flammen am Rande der Schmelzbadoberfläche.

4.3 Tiegel C (Abb. 4, 13, 38, 39)

Versuchsdatum: 2.5.1977

Thermitmasse im Reaktionstiegel: 250 kg

In den Betontiegel wird Fe- und Oxidschmelze abgegossen.

Tiegelinnendurchmesser: 380 mm

Tiegelinnenhöhe: 500 mm

Zeit	
0"	Zündung im Reaktionstiegel.
35"	Abstich. Gießstrahl gut erkennbar.
38"	Dichte Rauchwolken, die starke Helligkeitsschwankungen verursachen.
40"	Einzelne Spritzer.
45"	Starker Auswurf.
50"	Tiegel gefüllt.
55"	Starke Rauchentwicklung
1'	Wilde Badbewegung, nadelförmige Spritzer (1 m hoch), großer Massenverlust nach außen.
1'10"	Rauchschwaden verschwinden.
1'15"	Ende des Eingießvorganges.
1'25"	Gasprobsonde ein.
1'34"	Gasprobsonde aus.
1'45"	Heftige Schmelzbadbewegung. Spritzer, Eruptionen.
2'25"	Nur noch vereinzelte Spritzer.
2'35"	Schmelze wird teigig. In der Mitte dunkler Film. Einzelne Blasen.
2'47"	Temperatursonde wird eingetaucht. Schutzhülle brennt mit ca. 50 cm hoher Flamme ab.
2'51"	Temperatursonde aus.
3'20"	Keine Flammen erkennbar.
3'45"	Kruste bildet sich. Sie wird von aufsteigenden Blasen aufgerissen. Pulsierende Bewegung.
4'27"	2. Temperatursonde wird eingetaucht.
4'37"	Temperatursonde aus.
4'40"	Oberfläche wächst von der Mitte aus zu.
5'10"	Rhythmisches Aufwölben der Oberfläche. Am Außenrand Blasen. Beim Aufplatzen der Blasen entstehen Stichflammen.

- 6'5" Stichflammen am Rande.
- 7'5" Starkes Pulsieren der geschlossenen Oberfläche (ca. 20 mm). Beim Hochwölben bilden sich Risse.
- 7'50" Oberfläche wird mit Haken aufgerissen. Schmelze ist innen flüssig, sehr zäh (ein Teil haftet am Haken). Die aufgerissene Stelle erstarrt sofort wieder.
- 8'35" Einzelne Stichflammen am Rand. Geringe Bewegung.
- 9'40" Keine Bewegungen mehr erkennbar. Schmelze erstarrt. Noch vereinzelt Stichflammen am Rand.

4.4 Tiegel D (Abb. 5, 41, 42)

Versuchsdatum: 3.5.77

Thermitmasse im Reaktionstiegel: 250 kg

Das Thermit enthält 10% Cr und 5% Ni. Metall und Oxid wird abgossen.

Tiegelinnendurchmesser: 380 mm

Tiegelinnenhöhe : 500 mm

Das Asbestzementrohr ist axial geschlitzt (Abb. 41).

Zeit

- 0" Zündung. Aus dem Reaktionstiegel steigt Rauch, Funken werden ausgeschleudert. Flammen von ca. 1 m schlagen aus der Deckelöffnung.
- 23" Abstich. Gießstrahl gut sichtbar, Durchmesser ca. 5 cm. Nach Auftreffen im Tiegel steigen graue Wolken (Dampf und Aerosole) auf, die den Tiegel einhüllen. Tiegel nicht mehr sichtbar.
- 35" Schmelze hat die Oberkante des Tiegels erreicht, das noch weiterlaufende Schmelzgut läuft über. Schmelze sprudelt. Fingerförmige Spritzer werden über dem gesamten Oberflächenbereich hochgeschleudert.

- 53" Eingießvorgang beendet. Schmelze kocht. Die fingerförmigen Spritzer erreichen eine Höhe von 30 - 50 cm. Sie zerfallen an der Spitze in Tropfen. Große Schmelzgutmengen werden nach außen geschleudert. Über der Schmelze Flammen von ca. 2 m Höhe. Knallgeräusche.
- 1'3" Schmelzoberfläche ca. 5 cm unterhalb Tiegeloberkante. Keine nennenswerte Verluste mehr durch Spritzer. Schmelzenoberfläche wird ruhiger, sprudelt aber noch.
- 1'16" Gasprobenahme (10 s), Flammen bis 1,5 m hoch.
- 1'44" Schmelzenoberfläche bis ca. 10 cm unter Tiegeloberkante abgesunken. Kein Sprudeln mehr an der Oberfläche.
- 1'56" 1. Temperatursonde. Eintauchzeit 11 sec. Schutzhülle brennt mit heller Flamme ab.
- 2'19" Schmelzenoberfläche ca. 15 - 20 cm von Tiegeloberkante entfernt.
- 2'52" Erstes Auftreten von Blasen. Durchmesser ca. $d/2$. Schmelze wird zäher. Flammen ca. 30 cm hoch. Die Blasen werden aufgebläht. Beim Aufreißen entweichen Stichflammen von ca. 30 cm Länge.
- 3'5" 2. Temperatursonde. Eintauchzeit 17 sec.
- 4'30" Keine Einzelblasen mehr erkennbar. Die Oberfläche der Schmelze bewegt sich **rhythmisch** mit 2 - 3 Hz. Oberfläche ist überkrustet und ist ca. 30 cm von der Tiegeloberkante entfernt. Risse in der Kruste. An einzelnen Stellen entweicht Gas, das mit kontinuierlicher Flamme abbrennt.
- 6' Schmelzenoberfläche ruhig. Nur in der Mitte pulsierende Erhebung. Höhe ca. 1 cm.
- 6'7" 3. Temperatursonde. Eintauchzeit 16 sec.
- 6'40" Auf der Schmelzenoberfläche sind keine Bewegungen mehr erkennbar.
- 7'30" Kruste fest. Am Rande kontinuierliche Flammen. Dampf steigt an der Tiegelaußenwand vom Boden hoch.

- 9'30" Flammen aus der Randzone mit 20 cm Höhe. Dampf strömt aus dem Kanal der Thermoelemente.
- 12'40" Dampf strömt aus der Kreisringfläche zwischen Tiegel und Asbestzementrohr. Die Risse in der Kruste leuchten hellgelb. Farbe der Kruste hellrot. Flammen in der Randzone ca. 5 cm hoch.
- 17' Dampf entweicht mit konstanter Intensität aus dem Ringspalt zwischen Tiegel und Asbestzementrohr. Die ausgeworfene Schlacke besteht vorwiegend aus oxidischem Material. Die am Tiegelfuß angesammelte Schlacke wird abgetragen. Aus dem Ringspalt fällt etwa 1 Tropfen Wasser pro 2 Sekunden.
- 26'30" Aus dem Ringspalt, der sich aufgeweitet hat, steigt immer noch Dampf. Durch die Risse in der Kruste sieht man noch die heiße Schmelze. Farbe ist gelb, ca. 900 - 1000 °C. Immer noch schwache Flammen in der Randzone.

4.5 Tiegel E (Abb. Nr. 6, 45, 46)

Versuchsdatum: 10.5.1977

Thermitmasse: Im Betontiegel werden 60 kg gezündet.

8 Säcke à 5 kg werden im Abstand von ca. 20 sec nachgeworfen.

Tiegelinnendurchmesser: 400 mm

Tiegelinnenhöhe: 250 mm

Zeit

- 0" Zündung der Thermitmasse (60 kg) im Betontiegel, starke Rauchentwicklung, ca. 5 m hohe Flammen.
- 22" Reaktion beendet. Spritzer, Kochen.
- 30" 1. Sack wird eingeworfen, Schmelze schwappt über.
- 45" 1. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 55" 1. Temperaturmeßsonde wird gezogen. Schmelzbadbewegung torusförmig von außen nach innen.

- 59" 2. Sack wird eingeworfen. Einzelne Spritzer werden herausgeschleudert.
- 1'18" 3. Sack wird eingeworfen. Die Reaktion ist nach ca. 5 sec beendet.
- 1'25" Gasprobessonde ein.
- 1'35" Gasprobessonde aus.
- 1'59" 4. Sack wird eingeworfen, verkohlte Sackteile schwimmen längere Zeit auf der Oberfläche.
- 2'25" 2. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 2'32" 2. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 2'36" 5. Sack wird eingeworfen, Schmelze schwappt über.
- 2'55" Blasen auf der Oberfläche erkennbar.
- 2'58" 6. Sack wird eingeworfen, Flamme ca. 1 m hoch, Spritzer.
- 3'19" 3. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 3'30" 3. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 3'33" 7. Sack wird eingeworfen. Während der Reaktion färbt sich die Flamme über dem Schmelzbad weiß.
- 3'40" Dunkler Film auf der Oberfläche.
- 3'56" 4. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 4'4" 4. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 4'10" Schmelze sprudelt stark.
- 4'23" 8. Sack wird eingeworfen, Flamme bis 2 m hoch, wenig Verluste durch Spritzer
- 4'30" Schmelzbadoberfläche ca. 5 cm unter der Tiegeloberkante.
- 4'41" 5. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 4'52" 5. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 4'55" Schmelze wird zäher. Blasen auf der Oberfläche. Einzelne zusammenhängende Fladen und Spritzer bis zu 20 cm Höhe.

- 5'10" Große Blasen (30 - 40 cm Durchmesser), die pulsierend aufgebläht werden und beim Platzen Spritzer nach außen schleudern. (S. Abb. 28, 29) Das beim Platzen freigesetzte Gas verbrennt mit Stichflamme.
- 5'20" Schmelze steigt hoch und läuft über.
- 5'25" Die überlaufende Schmelze erstarrt und bildet einen vulkanartigen Kegelstumpf mit einer Höhe von 20 - 30 cm.
- 6'15" Im Krater des Kegelstumpfes sind 4 - 5 Blasenquellen erkennbar.
- 7'30" 6. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 7'40" 6. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 7'50" Beim Platzen der Blasen entstehen Stichflammen mit 20 - 30 cm Länge.
- 7'55" Außenfläche des Kegelstumpfes ist erstarrt. Bewegung nur noch im Krater erkennbar.
- 8' Im Krater keine Einzelblasen mehr erkennbar. Gesamte Fläche wird pulsierend angehoben.
- 8'10" Oberfläche ist erstarrt. Risse teilen die Oberfläche in ca. 5 Segmente.
- 8'20" Die Segmente werden angehoben. An den Rissen entstehen Stichflammen.
- 8'50" Oberfläche wird angehoben, ein Stück von ca. 5 cm Durchmesser fällt ab.
- 9' Immer noch Bewegung im Krater. Beim Aufreißen Stichflammen, die flackernd weiterbrennen.
- 9'40" Einzelne Risse mit kontinuierlich brennender Flamme.
- 10'45" Nur noch eine flackernde Flamme. Kaum noch Bewegung auf der Oberfläche erkennbar.
- 11' Oberfläche erstarrt, keine Bewegungen mehr.

4.6 Tiegel F (Abb. Nr.7, 48, 49)

Versuchsdatum: 20.4.1977

Thermitmasse: 250 kg, Metall und Oxid werden in den Betontiegel eingegossen.

Tiegelinnendurchmesser: 320 mm

Tiegelinnenhöhe: 650 mm

Zeit

- 0" Zündung der Thermitmasse im Reaktionstiegel.
- 35" Abstich, Gießstrahl kurzzeitig erkennbar, Rauchwolken
- 40" Rauch hat die gesamte Tiegelanordnung verdunkelt.
- 45" Leichte Aufhellung. Tiegel wieder sichtbar.
- 47" Tiegel gefüllt.
- 50" Restliche Schmelze läuft über, heftiges Kochen, wilde Eruptionen mit großen Massenverlusten.
- 58" Ende Einguß.
- 1'5" Schmelze ist dünnflüssig, sprudelt stark, pulsierender Auswurf.
- 1'10" Oberfläche befindet sich 10 cm unter der Tiegeloberkante.
- 1'25" Nadelförmige Spritzer (ca. 20 - 30 cm hoch).
- 1'38" Gasprobefsonde ein.
- 1'48" Gasprobefsonde aus.
- 1'55" Schmelze wird zäher, Auswurf wird geringer.
- 2'10" Fingerförmige Spritzer werden hochgeschleudert.
- 2'25" Schmelzenoberfläche ca. 30 cm unter der Tiegelkante. Nur noch wenig Massenverlust nach außen. Das hochgeschleuderte Schmelzgut benetzt die Tiegelinnenwand und läuft in die Schmelze zurück.
- 3'5" Flächenhafte Bewegung der Oberfläche.
- 3'15" Blasen mit dem halben Tiegelinnendurchmesser pulsieren auf der Oberfläche, beim Platzen werden Spritzer nach außen geschleudert. Dunkler Film schwimmt auf der Schmelze.

- 3'35" Schmelzenoberfläche steigt nach oben, d.h. die Kruste wird vom Gas angehoben, es bildet sich ein gewölbeartiger Hohlraum.
- 4'5" Schmelzenkruste wird weiter angehoben.
- 4'45" Entfernung der Kruste bis zur Tiegeloberkante ≈ 10 cm.
- 5'15" Schmelzkruste befindet sich auf der Höhe der Tiegeloberkante. Am Rande befindet sich ein kreisförmiger Riß, aus dem Stichflammen schlagen. Kruste ist schon stark abgekühlt.
- 5'45" Kruste wird ca. 20 mm hochgewölbt. Ein Riß teilt die Kruste in zwei Sektoren.
- 6'25" Oberfläche ruhig. Nur vereinzelte flächenhafte Pulsationen. Einzelne Stichflammen.
- 7'5" Keine Bewegungen mehr erkennbar.

4.7 Tiegel G (Abb.Nr. 8, 51, 52)

Versuchsdatum: 9.5.77

Thermitmasse: 100 kg Thermit werden im Reaktionstiegel gezündet. Eingegossen wird Metall- und Oxidschmelze.

Tiegelgeometrie: Zylinder mit $\varnothing = 400$ mm und $H_1 = 100$ mm. Boden ist als Kugelkalotte mit $R = 200$ mm ausgebildet.

Zeit

- 0" Zündung im Reaktionstiegel.
- 10" Feuer und Rauch aus dem Deckel des Reaktionstiegels.
- 25" Schwarzer Rauch.
- 41" Abstich
- 46" Rauch, Spritzer.
- 53" Flammen. Ausgeworfenes Schmelzgut wird im Umkreis von 2 m verteilt.
- 1" Tiegel gefüllt. Nachlaufendes Schmelzgut läuft über den Tiegelrand.

- 1'5" Einzelne Schichten des Asbestzementrohres platzen örtlich mit knallendem Geräusch ab.
- 1'14" Eingießvorgang beendet (Reaktionstiegel leer), Rauchentwicklung geht zurück.
- 1'20" Flammen bis 1,50 m Höhe.
- 1'20" 1. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 1'28" 1. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 1'41" Wenig Eruptionen
- 1'50" Einzelne Spritzer werden nach außen geschleudert. Auf der Schmelzenoberfläche steigen fingerförmige Spritzer hoch (ca. 30 cm), gelbe Flammen (50 cm hoch).
- 2'11" Gasprobsonde ein.
- 2'26" Gasprobsonde aus.
- 2'30" Nur noch wenig Spritzer nach außen.
- 2'51" Funkenregen wird ausgeschleudert.
- 3'25" Schmelzenoberfläche nicht mehr stark bewegt. Flammenhöhe ca. 20 - 30 cm.
- 3'51" 2. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 4'4" 2. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 4'10" Flammen noch 5 cm über Tiegelkante. Vereinzelt springen weitere Schichten vom Asbestzementrohr ab.
- 4'30" Kein Rauch und kein Dampf erkennbar.
- 5'28" 3. Temperaturmeßsonde wird eingetaucht.
- 5'41" 3. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 5'50" Die Schmelze erscheint als zähflüssiger Teig mit einzelnen hellen Streifen. Aus 2 - 3 Öffnungen mit ca. 10 mm \varnothing brennen Stichflammen bis 10 cm Länge. Die Schmelze pulsiert unregelmäßig, wobei die Oberfläche 2 - 3 cm hochgewölbt wird. Das Zentrum der Oberfläche ist stärker abgekühlt als der Rand.
- 7' Hellrote Oberfläche. Nur noch kleine Bewegungen der Kruste.
- 11'15" Schmelze und Schlacke sind schwarz, keine Bewegungen mehr erkennbar. Aus den Rissen züngeln noch vereinzelt Stichflammen.

4.8 Tiegel H und I (Abb.Nr. 9, 10, 54, 55)

Versuchsdatum: 11.5.1977

Thermitmasse: 400 kg Thermit werden im Reaktionstiegel gezündet. Der Metallanteil mit wenig Oxid wird in den Tiegel H, der restliche Oxidanteil in den Tiegel I gegossen.

Tiegelgeometrie H: Innendurchmesser: 320 mm
Innenhöhe: 500 mm

Tiegelgeometrie I: Innendurchmesser: 380 mm
Innenhöhe: 500 mm

Zeit

- 0" Zündung im Reaktionstiegel. Flammen bis an die Decke. Starker Rauch.
- 35" Abstich. Eingießen in den Tiegel H. Düninflüssiger Gießstrahl kurzzeitig erkennbar. Vom Gießstrahl werden Funken weggeschleudert (s. Abb. 30). Nach dem Auftreffen im Tiegel steigen dunkle Rauchwolken auf.
- 40" Blickfeld verdunkelt.
- 45" Tiegel H gefüllt (Abb. 31). Die nachlaufende Schmelze läuft über den Tiegelrand. Bis zu einem Umkreis von 5 m werden Funken geschleudert. Starkes Kochen. Aus der gesamten Oberfläche werden bis max. 2 m nadelförmige Spritzer geschleudert.
- 1'6" Eingießrinne wird geschwenkt.
- 1'7" Eingießen in den Tiegel I (Abb. 31). Keine Rauchentwicklung, nur wenig Verluste durch Auswürfe. Aus Tiegel H starke Eruptionen. Spritzer bis 1 m Höhe (Abb. 31).
- 1'17" Tiegel I gefüllt. Spritzer bis 1,50 m Höhe (Abb. 32).
- 1'19" Ende des Eingießvorganges.
- 1'20" Metallschmelze in Tiegel H kocht stark. Große Verluste durch Auswürfe. Gelbe Flamme über der Oberfläche ca. 1 m hoch.
- Oxidschmelze im Tiegel I ist viel weniger bewegt. Nur einzelne Spritzer werden herausgeschleudert, keine Flammen über der Oberfläche.

- 1'26" 1. Temperaturmeßsonde in Tiegel I
- 1'34" 1. Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 1'42" Schmelze in Tiegel H ist bis ca. 20 cm unter die Tiegeloberkante abgesunken.
- 1'51" 2. Temperaturmeßsonde in Tiegel I
- 2" Temperaturmeßsonde wird gezogen.
Immer noch wilde Bewegung in Tiegel H.
Oberfläche in Tiegel I ist ruhig, keine nennenswerte Badbewegung.
- 2'5" Gasprobe aus Tiegel H.
- 2'20" 3. Temperaturmeßsonde in Tiegel I.
- 2'31" Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 2'35" Pulsierende Blasen in Tiegel H und gelbe Flammen bis 50 cm hoch. In Tiegel I bildet sich auf der Oberfläche eine Kruste. Kleine vereinzelte Spritzer werden noch hochgeworfen.
- 3' 4. Temperaturmeßsonde in Tiegel I.
- 3'13" Temperaturmeßsonde wird gezogen. . .
- 3'30" Kleine Stichflammen in Tiegel I.
- 4' In Tiegel H Flammen bis 40 cm. Einzelne Eruptionen, kleine Funken.
- 4'10" Oberfläche in Tiegel I erstarrt. Keine Bewegungen mehr erkennbar.
- 4'16" 5. Temperaturmeßsonde in Tiegel I.
- 4'37" Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 4'45" In Tiegel H breiige Masse die noch bewegt wird.
- 5'37" 6. Temperaturmeßsonde in Tiegel I.
- 5'57" Temperaturmeßsonde wird gezogen.
- 6' Am Tiegel H Längs- und Querrisse erkennbar, aus denen Wasser austritt. Tiegel I zeigt ebenfalls Risse mit Wasserspuren.

- 8' Tiegel I hat in halber Höhe vorwiegend Querrisse (1 - 2 mm breit).
- 9' Die Kruste in H wird in regelmäßigen Abständen um ca. 1 cm angehoben. Stichflammen von ca. 20 cm Höhe brennen flackernd auf der Oberfläche.
In Tiegel I keine Flammen und keine Bewegungen.
- 10' Dampf und Wasseraustritt aus den Rissen beider Tiegelmantelflächen.
- 11' In Tiegel H keine Bewegung mehr. Am Rande brennen noch ca. 5 cm hohe Stichflammen.

5. Auswertung und Ergebnisse

5.1 Äußerliche Begutachtung der Tiegel

Im folgenden wird der äußerliche Zustand der Tiegel nach den Versuchen beschrieben:

Die Asbestzementrohre sind bei keinem der Versuche gerissen. Außen weisen sie aufgrund der Einwirkung von Schmelzenspritzern an verschiedenen Stellen schuppenartige Abplatzungen auf. Die Dicke der abgeplatzten Schichten beträgt max. 5 mm.

Die Betontiegel selbst sind an mehreren Stellen unregelmäßig gerissen. Die Querrisse verlaufen in Höhe der unteren Schmelzbadfront. Die Ribbreite beträgt an der äußeren Oberfläche des Tiegels max. 2 mm. In der Regel ist sie jedoch kleiner. An der Außenfläche ist der Beton durch Spritzer bzw. durch herunterlaufende Schmelze nur geringfügig - bis zu einer Tiefe von max. 3 mm - angegriffen.

Bei allen Tiegeln sind die obere Stirnfläche des Tiegels und die Innenwand mit erstarrtem Auswurf bedeckt. Die Oberfläche dieser Schicht ist vorwiegend oxidisch und vereinzelt mit gut erkennbaren Metallspritzern überdeckt.

Die Kruste des Schmelzbades selbst ist oxidisch, wobei auch hierin bei einigen Versuchen kleinere metallische Spritzer auszumachen sind. Die Form und die Beschaffenheit der Kruste variiert von Versuch zu Versuch sehr stark.

5.1.1 Tiegel A (Füllgut: nur Fe)

Die Oberfläche des an der oberen Stirnfläche und an der Innenwand erstarrten Auswurfs besteht vorwiegend aus metallischen Spritzern (Abb. 33, 34, 35).

Die Schmelzbadkruste ist oxidisch und liegt 250 bis 270 mm unterhalb der Tiegeloberkante (Abb. 34).

5.1.2 Tiegel B (Füllgut: Fe + Al₂O₃)

Die Oberfläche des erstarrten Auswurfs auf der oberen Stirnfläche und an der Innenwand des Tiegels ist vorwiegend oxidisch. Die Metallspritzer sind kleiner als die oxidischen (Abb. 36, 37).

Die Schmelzbadkruste ist oxidisch (Abb. 37). Sie liegt mit ihrem Rand rund 250 mm unterhalb der Tiegeloberkante. In der Mitte ist die Kruste aufgebläht. Sie ist dort um rund 45 mm höher als am Rande.

5.1.3 Tiegel C (Füllgut: Fe + Al₂O₃)

Die Außenwand des Betontiegels weist quer- und längsverlaufende Risse mit einer max. Breite von 1 mm auf. An der äußeren Tiegelmantelfläche hängen lange, tropfkerzenartige und 10 bis 50 mm breite Zungen und Zapfen aus erstarrtem Auswurf herab, die von der Ober- bis zur Unterkante des Tiegels reichen. Aufgrund der oxidischen Zusammensetzung und Porosität brechen sie bei leichter Berührung ab (Abb. 38, 39).

Die Oberfläche des erstarrten Auswurfs ist oxidisch und zum Teil mit großflächigen Metallspritzern bedeckt.

Die Schmelzbadkruste ist porös und liegt 260 bis 270 mm unterhalb der Tiegeloberkante.

5.1.4 Tiegel D (Füllgut: Fe + Cr + Ni + Al₂O₃)

Der Längsschlitz des Asbestzementrohres hat sich um rund 10 mm geweitet (Abb. 41).

Der Tiegelkrater hat ein anderes Aussehen als bei den anderen Versuchen. Die Beschaffenheit des an der Innenwand erstarrten,

vorwiegend metallischen Auswurfs ist stark zerklüftet (Abb. 43). Auf der oberen Stirnfläche des Tiegels mischen sich die Metall- und die Oxidspritzer, wobei die Metallspritzer im allgemeinen kleiner sind (Abb. 43, 44).

Die Schmelzbadkruste ist porös und stark zerklüftet. Sie ist zum großen Teil mit metallischen Spritzern bedeckt (Abb. 42) und liegt 285 bis 295 mm unterhalb der Tiegeloberkante.

5.1.5 Tiegel E (Füllgut: Fe + Al₂O₃)

Völlig andersartig ist hier die Form der Kruste. Sie ist aus dem Tiegel herausgequollen und bildet einen Dom von rund 250 mm Höhe (Abb. 45, 46). Die obere Schicht ist vorwiegend oxidisch (Abb. 47). Beim Transport brach die Kuppe des Krustendoms ab. Dabei zeigte es sich, daß unterhalb der nur 80 mm dicken Kruste ein großer Hohlraum entstanden ist (Abb. 47).

5.1.6 Tiegel F (Füllgut: Fe + Al₂O₃)

Die Kruste ist blasenartig bis zum oberen Tiegelrand aufgequollen (Abb. 49). Der erstarrte Auswurf auf der oberen Stirnfläche des Tiegels ist mit vorwiegend oxidischen Spritzern bedeckt (Abb. 50).

5.1.7 Tiegel G (Füllgut: Fe + Al₂O₃)

Die Innenwand und die obere Stirnfläche des Tiegels sind mit dem erstarrten Auswurf bedeckt, der eine vorwiegend metallische Oberfläche aufweist (Abb. 52 53). Außen hängen vom oberen Tiegelrand einzelne erstarrte Zungen und Zapfen von rund 20 mm Breite herab.

Die Kruste ist oxidisch und porös. Sie liegt rund 130 mm unterhalb der Tiegeloberkante (Abb. 52).

5.1.8 Tiegel H (Füllgut: vorwiegend Fe)

Die Innenwand und die obere Stirnfläche des Tiegels sind mit erstarrtem Auswurf bedeckt. Dessen Oberfläche ist vorwiegend oxidisch. Die Metallspritzer sind kleiner als die Oxidspritzer (Abb. 55).

An der äußeren Tiegelwand hängen erstarrte oxidische Zungen und Zapfen. Sie reichen bis zum Tiegelboden (Abb. 54, 55) und brechen bereits bei leichter Berührung ab. Ihre Breite beträgt oben bis 30 mm und unten bis 20 mm.

Die Kruste liegt zwischen 285 und 320 mm unterhalb der Tiegeloberkante. Sie ist porös.

5.1.9 Tiegel I (Füllgut: Al_2O_3)

Die Kruste des Schmelzbades liegt zwischen 250 und 290 mm unterhalb der Tiegeloberkante. Sie ist porös (Abb. 55).

Die obere Stirnfläche des Tiegels und die Innenwand sind mit erstarrtem Auswurf bedeckt (Abb. 55). Die Oberfläche ist oxidisch. Vereinzelt sind metallische Spritzer erkennbar, die vom Auswurf des vorher vorwiegend mit Eisen gefüllten Tiegels H stammen.

5.2 Tiegeltrennen, Untersuchung der Tiegelschnitte

5.2.1 Tiegeltrennen

Zur Herstellung von axialen Tiegelschnitten wurde die gleiche Technik angewandt, die bereits bei den früheren Graugußversuchen erprobt wurde. Dabei handelt es sich um eine mobile Trennanlage, die aus einem hydrostatischen Antriebsaggregat und der eigentlichen Trenneinheit besteht. Die Trenneinheit wird auf dem Tiegel mit Dübeln befestigt. Sie besteht aus einer hydrostatischen Vorschubeinrichtung und einer hydrostatisch angetriebenen diamantbestückten Trennscheibe (Abb. 56).

Mit dieser Trennscheibe kann der Beton, das Asbestzementrohr und der oxidische Schmelzkuchen ohne Schwierigkeiten getrennt werden. Die Trennung der Metallreguli ist jedoch nicht möglich, da die Diamant-Schneidkanten der Scheibe vom Metall verschmiert werden. Deshalb wird der Trennvorgang in Einzelschnitten um den Metallregulus herum durchgeführt, der selbst ganz erhalten bleibt.

5.2.2 Untersuchung der Tiegelschnitte - Regulusformen^{*}, Eindringtiefen der Schmelze, Dehydrierte Zonen

Nach der Trennung der Tiegel wurden die Schnitte durch direkte Messungen und anhand von Fotoaufnahmen quantitativ ausgewertet. Die axialen und radialen Eindringtiefen der Schmelze, der Verlauf der Schmelzfront sowie die Reguluskontur wurden am Schnitt direkt vermessen. Die dehydrierten und die zum Teil dehydrierten Zonen wurden mit Hilfe von Diapositiv-Projektionen im Maßstab 1 : 1 aufgezeichnet. Aus den in dieser Weise gewonnenen Zonen-grenzen- und Flächendarstellungen wurden unter Annahme einer rotationssymmetrischen räumlichen Geometrie die entsprechenden Volumen bestimmt.

Der Verlauf der Schmelzfront konnte mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ mm wiedergegeben werden.

Als dehydrierte Schicht wird hier die Betonschicht bezeichnet, die sich an die geschmolzene Zone anschließt und bei Berührung zerbröckelt. Sie hebt sich durch ihre graue Färbung deutlich von der nächsten Schicht des Betons ab. Die Genauigkeit der Bestimmung des Grenzflächenverlaufs beträgt ± 5 mm.

Als zum Teil dehydrierte Schicht wird hier diejenige Betonschicht bezeichnet, die noch eine gewisse Festigkeit aufweist, sich aber in ihrer Farbe deutlich von der dehydrierten Schicht und von dem restlichen Beton unterscheidet. Ihre Färbung ist gelb-bräunlich. Die Genauigkeit der Bestimmung ihres Grenzflächenverlaufs beträgt ± 10 mm.

*) Erstarrender Schmelzkörper bestehend aus Metall- und Oxidanteil.

Durch unterschiedliches Schrumpfverhalten ist zwischen Metallregulus und Beton ein Spalt von rund 5 mm entstanden. Nur bei Tiegel A ist der Spalt bis zu 10 mm breit, was möglicherweise auf die bei diesem Versuch eingefüllte größere Metallmasse zurückgeführt werden kann (Abb. 57).

Den Übergang von der Metallschmelze zum Beton bildet eine 2 - 3 mm dicke aufgeschmolzene, glasartige, anthrazitfarbene Schicht (Abb. 57).

Alle Betontiegel sind gerissen. Die Rißbreite in der Schmelzfrontfläche liegt immer unter 0,5 mm. An der Tiegelaußenwand erreicht die Rißbreite maximal 2 mm. Charakteristisch sind die Vorzugsrichtungen der ausgebildeten Risse im Beton. Sie verlaufen nach außen hin senkrecht zur Regulusfläche.

Die Metallreguli (außer Tiegel D) haben eine genarbte und glänzende, jedoch nicht metallisch blanke Oberfläche. Die Reguli zeigen lokal auch nach viermonatigem Witterungseinfluß keine Korrosionserscheinungen, da sich während der Erstarrung eine dichte oxidische Schutzschicht ausgebildet hat. Diese Schutzschicht ist in ihrer Oberflächenfärbung hellgrau.

Die Kontaktfläche des Metallregulus zum Beton stellt einen Negativabdruck des Betons mit der gut sichtbaren Kieselsteinstruktur dar - ein Anzeichen dafür, daß die Schmelzfront die Betonstruktur nicht gleichförmig angreift. Ein derartiges Fortschreiten der Schmelzfront erklärt sich möglicherweise daraus, daß zuerst die zementgebundene Sandschicht zwischen den einzelnen Kieselsteinen aufschmilzt und anschließend diese selbst durch die Schmelze herausgespült, hochgeschwemmt und aufgelöst werden.

Die Zahlenwerte für Eindringtiefen der Schmelze sowie über die dehydrierte und die zum Teil dehydrierte Zonen sind in den Tabellen Abb. 134, 135 dargestellt.

Die radialen bzw. axialen Eindringtiefen der Schmelze wurden in Form der maximalen Abstände der Schmelzfront von den ursprünglichen Tiegelkonturen eingetragen.

Die Stärken der dehydrierten bzw. zum Teil dehydrierten Zonen wurden senkrecht zur Schmelzfront gemessen und nach radialer und axialer Ausdehnungsrichtung gesondert ausgewiesen (Abb. 136).

5.2.2.1 Tiegel A

Der Regulus weist eine stark ausgeprägte, nach unten ausgeweitete Birnenform auf (Abb. 59). Die Oberfläche des Regulus erscheint im unteren Teil massiv metallisch (Abb. 60). Gut erkennbar sind die Abdrücke der Betonkieselsteine (Abb. 61). Seitlich ist der Tiegelraum mit einer dünnen Metallschicht belegt, die oben in eine oxidische Kruste übergeht (Abb. 60). Zum Teil ist der Schmelzenauswurf in den Spalt zwischen Tiegel und Asbestzementrohr eingedrungen (Abb. 61).

Die Oberfläche des Metallregulus ist mit einer grauen vor Korrosion schützenden Schicht überzogen. Rost ist nur an den Schnittflächen auszumachen.

Ein Aufbrechen der Oberfläche zeigte, daß die oxidische Kruste porös ist. Die Höhe des Metallregulus beträgt in der Mitte nur ca. 135 mm.

Der an der oberen Stirnfläche des Tiegels erstarrte Auswurf hat eine Stärke bis zu 25 mm. Die Dicke der an der Innenwand erstarrten Schmelze beträgt 5 - 10 mm (Abb. 61).

Bei diesem Versuch beträgt die größte radiale Eindringtiefe der Schmelze 52 mm, während die maximale axiale Eindringtiefe mit 42 mm gemessen wurde. Dieses Eindringtiefenverhältnis unterscheidet den Versuch A deutlich von den anderen Versuchen mit Metallschmelzen (Abb. 62).

5.2.2.2 Tiegel_B

Der Regulus hat keine stark ausgeprägte Birnenform, er ist jedoch im unteren Teil deutlich erweitert (Abb. 63). Die untere Oberfläche des Regulus ist metallisch, dagegen haftet der seitlichen Fläche eine Betonschicht an (Abb. 64). Die Kruste ist oxidisch (Abb. 64). Die Oberfläche des Metallregulus ist ungleichförmig genarbt, wobei die Kieselabdrücke gut erkennbar sind (Abb. 65).

Der erstarrte Auswurf auf der oberen Stirnfläche des Tiegels ist bis zu 35 mm und an der Innenwand bis zu 20 mm dick. In den Spalt zwischen Betontiegel und Asbestzementrohr ist ausgeworfene Schmelze bis auf 30 mm tief eingedrungen (Abb. 65).

Zwei seitliche Thermolemente sind fest in den Regulus eingeschmolzen. Sie liegen in der oxidischen Zone rund 90 mm oberhalb des Metallregulus.

Die Eindringtiefe beträgt axial 52 mm und radial 27 mm (Abb. 66).

5.2.2.3 Tiegel_C

Der Metallregulus ist hierbei mit der Stahlbewehrung verschweißt. Daher ist es erst nach teilweisem Ausspitzen des Betons und Trennung der Bewehrungsstäbe gelungen, den Tiegel selbst in zwei Hälften zu trennen (Abb. 67).

Der Regulus hat eine stark ausgeprägte Birnenform. Die untere Seite des Regulus ist massiv metallisch. Der metallische Regulusteil ist flach (75 mm hoch, 440 mm Durchmesser). Seine untere Oberfläche ist grob gewellt, mit Wellenhöhen bis zu 15 mm (Abb. 69).

Der oxidische Regulusteil ist hier sehr porös und wesentlich höher (220 mm) als bei anderen Versuchen. Die Oberfläche der Kruste ist oxidisch, glänzend mit grobem wulstigen Unebenheiten. Unterhalb der 30 bis 50 mm dicken Kruste hat sich ein breiter

Hohlraum von 20 mm Höhe ausgebildet (Abb. 70). In dem oxidischen Regulusteil sind ganze und gebrochene Kieselsteine zu erkennen (Abb. 70). Die obere Seite des Metallregulus ist stark zerklüftet und mit tropfenförmigem Metallgranulat überdeckt (Abb. 68). Dessen Korngröße liegt zwischen 5 und 10 mm. Innerhalb des Oxidregulus und in der Kruste finden sich stellenweise unregelmäßig verästelte metallische Einschlüsse. Sie haben eine Ausdehnung bis zu 30 mm, wobei die Dicke der Einzeläste nur 2 bis 5 mm beträgt.

Der an der oberen Stirnfläche und an der Innenwand erstarrte Auswurf ist in der Umgebung der Tiegelwandung oxidisch, während die oberste Schicht auf der oberen Stirnfläche des Tiegels überwiegend metallischen Charakter hat (Abb. 70). Die Dicke des Auswurfs beträgt auf der Stirnfläche bis zu 35 mm und an der Tiegelinnenwand bis zu 20 mm.

Die radialen (53 mm) und axialen (59 mm) Eindringtiefen der Schmelze sind bei diesem Versuch überdurchschnittlich groß (Abb. 71). Die Stahlbewehrung ist zum Teil mit dem Regulus verschweißt.

Der Verlauf der Schmelzfront und der dehydrierten und der zum Teil dehydrierten Front wurde nur in der unmittelbaren Umgebung der Stahlbewehrung beeinflusst (Abb. 71).

5.2.2.4 Tiegel D

Der Regulus hat eine weniger ausgeprägte Birnenform (Abb. 72). Die untere Oberfläche des Regulus ist metallisch. Sie ist im Unterschied zu anderen Versuchen nicht glänzend genarbt, sondern sehr rau und zerklüftet (Abb. 73). An der Unterseite des metallischen Regulus sind einzelne eingeschmolzene Kieselsteine erkennbar (Abb. 73). Der Mantelfläche des oxidischen Regulusteils haftet eine feste Betonschicht an (Abb. 74). In diesem Teil des Regulus finden sich sowohl größere tropfenförmige metallische Einschlüsse (bis zu 30 mm Durchmesser), als auch angeschmolzene Kieselsteine.

Die Kruste erscheint stark gewellt und porös. An der Innenwand und an der oberen Stirnfläche des Tiegels haftet oxidischer Auswurf, dessen oberste Schicht aber vorwiegend metallisch ist (Abb. 73). Die Schichtdicken des Auswurfs betragen auf der Stirnfläche bis zu 45 mm, an der Innenwand bis zu 32 mm.

Die Eindringtiefe der Schmelze beträgt radial 23 mm und axial 48 mm. Diese Werte entsprechen etwa dem Durchschnitt der durchgeführten Versuche (Abb. 75).

5.2.2.5 Tiegel E

Der Regulus hat keine ausgeprägte rotationssymmetrische Birnenform. Im Schnitt ist zu erkennen, daß der Regulus in axialer Richtung einseitig in den Beton eingedrungen ist (Unterschied der Eindringtiefe ca. 30 mm) (Abb. 76, 79).

Der metallische Regulus hat eine flache, fladenartige Konfiguration - unten konvex gewölbt, oben eben. Die untere Oberfläche ist genarbt und glänzend (Abb. 78). Die Oberfläche gibt in Negativform die grobe Betonstruktur mit den einzelnen Kieselsteinen, die aus dem Beton herausragen, wieder. Die obere Fläche des Metallregulus erscheint porös und fein verästelt, bedeckt mit einer Schicht aus tropfenförmigen Metallgranulat (5 - 10 mm). Die einzelnen Metalltropfen sind mit dem Regulus verschweißt.

Oberhalb des Tiegels ist die Tiegelöffnung mit einer konvex gewölbten Kruste domartig zugewachsen. Der Boden des so entstandenen Hohlraumes stellt eine zweite Kruste dar, die ihrerseits einen zweiten darunter liegenden Hohlraum bildet. Der obere Hohlraum hat eine Höhe von ca. 240 mm, der untere ist ca. 120 mm hoch. In ihrer äußeren Beschaffenheit sehen die Krusten ähnlich aus. Der an den Wänden erstarrte Auswurf hat eine Stärke von 30 bis 60 mm. In seiner schwammig-porösen Struktur unterscheidet er sich weder von den anderen Krusten noch von dem oxidischen Regulusteil selbst (Abb. 78).

Die axiale Eindringtiefe der Schmelze von 78 mm ist die größte von allen Versuchen. Dagegen beträgt die radiale Eindringtiefe nur 23 mm (Abb. 79).

5.2.2.6 Tiegel F

Im unteren Bereich des metallischen Regulusteils ist deutlich eine birnenförmige Ausweitung erkennbar (Abb. 80). Die obere Fläche des Metallregulus ist weitgehend plan und mit tropfenförmigen Metallgranulat belegt (5 bis 10 mm Durchmesser).

Die während des Versuchsablaufes hochgetriebene Schmelze ist beim Herunterlaufen an der Innenwand des Tiegels zu einer geschlossenen Kruste zusammengewachsen, so daß zwischen dem oxidischen Regulusteil und der Kruste ein flacher Hohlraum entstanden ist. Darüber erstreckt sich ein großer Hohlraum ($h = 430$ mm, $\varnothing = 235$ mm), dessen Meridiankontur - gebildet aus der herabfließenden Schmelze - an einen Rotationsparaboloid erinnert. Dieser Hohlraum ist in Höhe des oberen Tiegelrandes vollständig mit einer 3 bis 10 mm dicken Kruste verschlossen.

Die an den Wänden erstarrte, vorwiegend oxidische Schmelze ist stark mit großen Poren durchsetzt und weist eine scharfgratige, zerklüftete Oberfläche auf (Abb. 81).

Der gesamte Oxidregulus ist ebenfalls stark schwammig porös mit Porendurchmesser bis zu 30 mm. Darin eingeschlossen finden sich sowohl Kieselsteine (zum Teil geschmolzen) als auch Metalltropfen (Abb. 81).

Der erstarrte Auswurf auf der Stirnfläche ist max. 35 mm dick.

Die Eindringtiefen der Schmelze (axial 39 mm, radial 38 mm) entsprechen etwa den durchschnittlichen Werten der Versuchsreihe (Abb. 83).

5.2.2.7 Tiegel G

Der Regulus hat keine Birnenform (Abb. 84). In vertikaler Richtung weist er im Boden eine exzentrisch verlaufende Ausbuchtung auf (ca. 20 mm Höhendifferenz). Ansonsten ist das Aussehen des Regulus auch hier typisch: unten der metallische Teil ohne jegliche Betoneinschlüsse (Abb. 86), oben der oxidische Teil, auf dessen Mantelfläche eine Betonschicht haftet (Abb. 85).

An der inneren, zylindrischen Tiegelwand haftet eine vorwiegend oxidische Kruste. Die Oberfläche dieser Kruste ist stellenweise mit dünnen metallischen Fladen (bis 5 mm dick) und Tropfen bedeckt (Abb. 85).

Der an der Seitenwand erstarrte Auswurf ist an der dem Beton zugewandten Seite oxidisch, die äußere Haut dagegen besteht teilweise aus Metallspritzern. Die so gebildete Schicht ist 10 bis 15 mm dick.

Auf der Stirnfläche des Tiegels liegt eine Auswurfschicht von 30 mm Stärke (Abb. 86).

Die Eindringtiefe der Schmelze beträgt bis zu 45 mm (gemessen in 45°-Richtung zur Mittellinie) (Abb. 87).

5.2.2.8 Tiegel H

Der Regulus läßt eine ausgeprägte Birnenform (Abb. 88) erkennen. Sein metallischer Teil ist unsymmetrisch in den Beton eingedrungen. Im Boden wurden Erhebungen bis zu rund 30 mm gemessen (Abb. 89).

Am oxidischen Teil des Regulus haftet außen eine Betonschicht von rund 10 mm. Innen finden sich eingeschlossene Kieselsteine und Metalltropfen. Die eingeschlossenen Steine sind zum Teil angeschmolzen (Abb. 89). Der größte erkennbare Stein hat einen Durchmesser von 15 mm. Sowohl die Steine als auch die Metalleinschlüsse, deren max. Durchmesser 10 mm beträgt, sind

gleichmäßig in dem gesamten Regulus verteilt. Die Höhe des oxidischen Regulusteils beträgt an der höchsten Stelle 180 mm.

Der an der Innenwand haftende und 15 bis 20 mm dicke Auswurf ist vorwiegend oxidisch. Dessen Oberfläche ist jedoch mit großflächigen Metallspritzern bedeckt. An der Stirnfläche des Tiegels ist die Auswurfschicht bis zu 35 mm dick (Abb. 90).

In axialer Richtung ist die Eindringtiefe mit 61 mm überdurchschnittlich groß (36 mm). In radialer Richtung beträgt sie 36 mm (Abb. 91).

5.2.2.9 Tiegel I

Der Regulus hat keine ausgeprägte Birnenform (Abb. 92). In diesem Tiegel wurde nur der oxidische Anteil der Thermit-schmelze eingegossen.

Der relativ kompakte Regulus ist makroskopisch mit verschiedenen großen Blasen (\varnothing 1 - 10 mm) nicht sehr dicht durchsetzt (Abb. 94). Dagegen ist die ca. 20 mm dicke Grenzschrift zum Beton sehr porös. Die Porendurchmesser betragen 2 bis 3 mm (Abb. 93).

Der erstarrte Auswurf ist an der Innenwand sehr unterschiedlich zwischen 5 und 35 mm dick (Abb. 94). An der oberen Stirnfläche beträgt seine Dicke bis zu 35 mm (Abb. 94).

Die Eindringtiefe der Schmelze in den Beton war bei diesem Versuch am geringsten (axial 5 mm, radial 12 mm). Die dehydrierte und die zum Teil dehydrierte Zonen sind dagegen in ihrer Stärke den anderen Tiegeln ähnlich (Abb. 95).

5.3 Temperaturverläufe,

5.3.1 Tiegel A:

Thermoelemente:

Überlaufende Schmelze überdeckt und beschädigt das Asbestzementrohr, in dem die TE-Zuführungsleitungen verlegt sind. Die Thermoelementleitungen werden abgeschmolzen, dabei entstehen Meßpunkte, die zu Schreiberausschlägen > 50 mV führen. Eine Auswertung der Tiegeltemperatur ist nicht möglich .

Pyrometer:

Wegen Ausfall des Schreibers keine Registrierung der Oberflächentemperatur.

5.3.2 Tiegel B (Abb. 96, 97)

Thermoelemente:

Die TE sprechen in der Reihenfolge 4, 1, 5, 2, 6, 3 an. Alle TE außer 4 zeigen ausgeprägte Haltestufen bei ca 100° C. Wegen der hohen Wärmestromdichte in Tiegelwandnähe wird die Haltestufe von TE 4 schnell überfahren. Die TE 4, 1, 5 und 2 steigen nach Überschreiten der 100° C-Stufe mit ca. 280° C/s bis zur Zerstörung zwischen $1300 - 1400^{\circ}$ C. TE 6 erreicht nach 30 min einen Maximalwert von 600° C, TE 3 nach 60 min einen Maximalwert von 550° C. TE 6 und 3 sind nach 11 h auf 30° C abgekühlt.

Pyrometer:

Beide Pyrometer zeigen synchronen Verlauf der Oberflächentemperatur an. Die durch Rauchwolken geschwächte Intensität des Gießstrahles (\varnothing ca. 15 mm) reicht für die Pyrometermessung in den ersten 20 s nicht aus.

Nach 20 s wird kurzzeitig eine Gießstrahltemperatur von max. 3000° C gemessen. Der sprungartige Abfall der Pyrometeranzeige wird durch Rauchschwaden verursacht.

Nach der Auswurfphase (90 s) sinkt die Temperatur auf 1400°C ab. Die Temperaturschwankungen werden durch dunkle Schichten auf der Schmelzenoberfläche verursacht, die zeitweise von den aufsteigenden Blasen weggespült werden. Beim Absinken der Schmelzenoberfläche (2 - 3 min) kühlt die Oberfläche auf 1200° C ab. Danach folgt eine lineare Temperatursenkung. 15 min nach Eingießbeginn wird die Ansprechgrenze des Quotientenpyrometers von 1100° C unterschritten.

5.3.3 Tiegel C (Abb. 98, 99)

Thermoelemente:

Zusätzlich zu den üblichen 3 radial und den 3 axial einbetonierten TE's sind an der Tiegelbewehrung weitere 3 TE befestigt (TE 7, 50 mm axial; TE 8, 100 mm axial; TE 9, 50 mm radial, Abb. 4). Die TE sprechen in der Reihenfolge 4, 7, 1, 9, 5, 8, 2, 6, 3, an. Die TE 1 und 7 überfahren die 100° C-Stufe, alle übrigen zeigen ausgeprägte Haltepunkte. Wegen der guten Wärmeleitung in der Stahlbewehrung steigt die Temperatur von TE 7, trotz größerer Entfernung zur Tiegelinnenwand, vor TE 1 und TE 2 bis zur Versagenstemperatur. TE 2 wird bei 120 s auf 1000° C aufgeheizt, sinkt aber bis 170 s auf 100° C ab und erreicht 1400° C nach 7 min. Dieses Verhalten wurde nur bei Tiegel C beobachtet und wird auf die Heizwirkung der vertikal in das Schmelzgut reichenden Bewehrungsstäbe zurückgeführt (Abb. 124), da diese schneller als der Beton aufgeheizt wurden (TE 7 und 8).

Von diesen "Heizstäben" breitet sich das Temperaturfeld horizontal aus. Bei 125 s erreicht die horizontale Wasserfreisetzungsfrent das TE 2 und kühlt den Beton entsprechend dem Temperaturverlauf ab. Nach dem Austräuben des Betonwassers wird TE 2 von der horizontalen und vertikalen Temperaturfront bis zum Versagen bei 7,8 min aufgeheizt.

Die übrigen TE werden nicht zerstört. TE 5 erreicht nach 25 min eine höchste Temperatur von 800° C. Die TE 3, 6, 8, 9 erreichen bei 5 h Temperaturmaxima zwischen 400 und 500° C. Sie fallen bis 11 h auf Werte zwischen 10 und 25° C ab.

Pyrometer:

Beide Pyrometer sprechen 4 s nach Eingießbeginn an. Sie zeigen max. Gießstrahltemperaturen von 3200° C an. Aufsteigende Rauchschwaden bewirken sprungartigen Abfall auf 1540° C. Bis zum Eingießende bei 40 s schwankt die Temperatur zwischen 1600 und 1200° C. Ab 45 s fällt die Temperatur linear auf 1100° C nach 7 min ab.

Tauchsonde:

Es werden 2 Sonden bis zum Tiegelboden eingetaucht.

Sonde Nr.	1	2
Eintauchzeitpunkt nach Abstich (s)	167	267
Eintauchdauer (s)	4	8
Zeit bis zum Erreichen der Asymptote (s)	Asymptote wird nicht erreicht	3
Asymptotentemperatur (°C)	--	1350
Pyrometertemperatur (°C)	--	1220
Temperaturdifferenz (°C)	--	130

5.3.4 Tiegel D (Abb. 100, 101)

Thermoelemente:

Die Thermoelemente sprechen in der Reihenfolge 4, 1, 5, 6, 2, 3 an. Die TE 4 und 1 überfahren schnell die 100° C-Marke, alle anderen TE zeigen bei 100° C ausgeprägte Haltestufen. TE 4, 1 und 2 versagen zwischen 1300° C und 1400° C. Die Temperaturen von TE 1 und TE 2 sinken bei 1100° C kurz ab und steigen dann sprunghaft bis zur Versagensgrenze. TE 5 steigt von 100 bis 900° C mit 26° C/s an und bleibt 18 min lang zwischen 800 und 1000° C stehen. Nach 20 min erfolgt linearer Abfall auf 500° C bei 5 h. TE 6 und 3 erreichen maximale Temperaturen von 450° C nach 90 bzw. 170 min.

Pyrometer:

Die Pyrometer sprechen 14 s nach Eingießbeginn an. Die höchste Gießstrahltemperatur liegt bei 3200° C. Starke Rauchentwicklung verhindert ein frühzeitiges Ansprechen und verursacht bis 38 s starke Meßwertschwankungen. Nach dem Verschwinden der Schwankungen, 8 s nach Eingießende, wird eine Temperatur von 1700 ° C angezeigt. Zwischen 38 und 57 s fällt die Oberflächentemperatur mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 16° C/s auf 1400° C ab. Bis 157 s bleibt die Temperatur etwa konstant. Danach erfolgt linearer Abfall. 7,6 min nach Eingießbeginn wird die Ansprechgrenze des Pyrometers von 1100° C unterschritten.

Tauchsonde:

Es werden 3 Tauchsondenmessungen durchgeführt. (Abb. 113). Dabei wird die Sonde bis zum Tiegelboden eingetaucht und anschließend 3 - 5 cm angehoben.

Sonde Nr.	1	2	3
Eintauchzeitpunkt nach Ab- stich (s)	93	162	345
Eintauchdauer (s)	11	16	16
Zeit bis zum Erreichen der Asymptote (s)	4	8	Asymptote wird nicht erreicht
Asymptotentemperatur (°C)	1640	1610	--
Pyrometertemperatur (°C)	1410	1360	--
Temperaturdifferenz (°C)	230	250	--

5.3.5 Tiegel E (Abb. 102, 103)

Thermoelemente:

Die TE sprechen in der Reihenfolge 1, 4, 2, 5, 3, 6 an. TE 1 steigt mit 7,5 ° C/s auf 100° C und "schießt" dann mit 2200°C/s bis 1200° C. An diesem Punkt wird das TE zerstört. Durch Zurückschmelzen und Abkühlung der TE-Meßstelle sinkt die Temperatur auf 900° C. Nach 51 s wird die Meßstelle erneut aufgeschmolzen. Die TE-Spannung läuft an den Meßbereichsendwert (≥ 100 mV). TE 2 hat ausgeprägten Haltepunkt bei 100° C und steigt ab 93 s steil bis zum Versagenspunkt an. Danach zeigt TE 2 ähnliches Verhalten wie TE 1. Die übrigen TE bleiben bis Versuchsende funktionsfähig. Abweichendes Verhalten zeigt TE 6, das ab 130 min auf 800° C, d.h. über die Werte von TE 4 und 5 ansteigt.

Pyrometer:

Die Pyrometer erreichen 3,5 s nach der Zündung die Ansprechgrenze von 1100° C. Nach 10 s erreicht die Oberflächentemperatur den Maximalwert von 3180° C. Danach wird die

Strahlung durch Rauchschwaden geschwächt, die Anzeige sinkt unter die Abgleichgrenze. Nach 20 s pendelt sich die Temperatur zwischen 1400 und 1500° C ein. Während des Nachheizens bleibt die Temperatur annähernd konstant. Von 5 bis 9,5 min sinkt die Temperatur um 200° C auf 1200° C ab.

Tauchsonden:

Die Sonden werden bis zum Tiegelboden eingeführt und anschließend 3 - 5 cm angehoben. Die Ergebnisse sind in untenstehender Tabelle zusammengefaßt.

Sonde Nr.	1	2	3	4	5	6
Eintauchzeitpunkt nach Abstich (s)	45	145	199	234	281	450
Eintauchdauer (s)	10	8	11	8	11	10
Zeit bis zum Erreichen der Asymptote (s)	3	4	7	4	7	4
Asymptotentemperatur (°C)	1790	1620	1660	1680	1640	1500
Pyrometertemperatur (°C)	1420	1400	1400	1400	1390	1240
Temperaturdifferenz (°C)	370	220	260	280	250	260

5.3.6 Tiegel F (Abb. 104, 105)

Thermoelemente:

Die TE sprechen in der Reihenfolge 4, 1, 5, 2, 3, 6 an. Von den TE 4, 1 und 5 wird die 100° C-Grenze schnell überfahren, alle übrigen zeigen ausgeprägte Haltepunkte. Die TE 4, 1 und 2 versagen bei 1400° C. TE 5 erreicht nach 3 min eine Maximaltemperatur von 800° C. TE 3 wird durch die Wasserdampffront auf 100° C erwärmt. Nach Auskondensieren des Wasserdampfes

wird das TE durch die kalte Betonaußenwand wieder auf 30° C abgekühlt. Die Temperaturfront erreicht erst nach 3 min TE 3 und bewirkt die weitere Aufheizung. TE 6 und 3 erreichen zwischen 100 und 150 min Maximaltemperaturen von 400 bzw. 500° C.

Pyrometer:

Das Pyrometer mißt bei 6 s eine Gießstrahltemperatur von 2400° C. Rauchschwaden verhindern eine kontinuierliche Messung und verursachen die sprungförmigen Schwankungen. Erst nach dem Eingießen bei 23 s ist ein definierter Meßwert von 1450° C vorhanden.

Tauchsondenmessungen wurden bei Tiegel F nicht durchgeführt.

5.3.7 Tiegel G (Abb. 106, 107)

Die TE sprechen in der Reihenfolge 4, 1, 5, 2, 6, 3 an. TE 1 überfährt das 100° C-Plateau und steigt steil bis 850° C an. Nach einem "Einbruch" von 150° C steigt die Temperatur bis 1150° C und schwenkt in eine Asymptote ein. Nach 140 s versagt TE 1. Ein ähnliches Verhalten zeigt TE 4. Nach einer kurzen Haltestufe bei 100° C steigt die Temperatur auf 1100° C und läuft in eine Asymptote ein. Ab 60 s fällt die Temperatur wieder ab, ohne daß es zur Zerstörung des TE kommt. TE 5 zeigt kein Halteplateau bei 100° C. Wegen der relativ kleinen Schmelzmasse liegen die Maximaltemperaturen nicht so hoch wie bei den übrigen Versuchen.

Pyrometer:

Im Gießstrahl wird eine Maximaltemperatur von 2200° C gemessen. Sie liegt deutlich unter den Gießstrahltemperaturen von Versuchen mit größeren Reaktionsmassen. Danach folgt starker Temperaturabfall durch Rauchschwaden. Nach Beendigung des Eingießvorganges (14 s) wird eine Oberflächentemperatur von 1600° C angezeigt.

Tauchsonden:

Es werden 3 Tauchmessungen durchgeführt. Der Sondenmeßpunkt liegt ca. 3 - 5 cm oberhalb der Schmelzfront. Der Meßkopf der Sonde 1 ist zum größten Teil abgeschmolzen (Abb. 112), dagegen ist der Meßkopf der Sonde 2 nur zum Teil angeschmolzen.

Sonde Nr.	1	2	3
Eintauchzeitpunkt nach Abstich (s)	40	190	287
Eintauchdauer (s)	8	13	13
Zeit bis zum Erreichen der Asymptote (s)	6	Asymptote wird nicht erreicht	Asymptote wird nicht erreicht
Asymptotentemperatur (°C)	1720	--	--
Pyrometertemperatur (°C)	1510	--	--
Temperaturdifferenz (°C)	210	--	--

5.3.8 Tiegel H (Abb. 108, 109)

Die TE sprechen in der Reihenfolge 4, 1, 5, 2, 6, 3 an. Alle TE haben ausgeprägte Haltestufen bei 100° C. Nach dem Durchlaufen der 100° C-Stufe steigen die TE 4, 1 und 2 steil an und versagen bei 1400° C. TE 5 erreicht nach 85 s 1200° C, es erreicht seine Maximaltemperatur nach 180 s und fällt, ohne den Versagenspunkt zu erreichen, ab.

Pyrometer:

Die höchste Temperatur im Gießstrahl liegt bei 1800° C. Während des Eingießvorganges sinkt die Anzeige durch Rauchschwaden unter die Abgleichgrenze. Nach dem Eingießen (31 s) wird eine Temperatur von 1500° C angezeigt, die nach 7,5 min auf 1120° C abfällt.

Tauchsonden:

Messungen mit der Tauchsonde wurden im Tiegel H nicht durchgeführt.

5.3.9 Tiegel I (Abb. 110, 111)

Thermoelemente:

Die TE sprechen in der Reihenfolge 10, 7, 11, 8, 12, 9, an. Alle zeigen Haltestufen bei 100° C. Nur das 10 mm radial von der Tiegelinnenwand installierte TE 10 erreicht den Versagenspunkt bei 1400° C, alle anderen TE bleiben intakt.

Pyrometer:

Nach dem Eingießen (14 s) wird eine Oberflächentemperatur von 1800° C gemessen. Vorher kann der Meßschrieb wegen der Störeinflüsse von Tiegel H nicht interpretiert werden. Die für Metallschmelzen typischen Rauchwolken während der Eingießphase konnten hier nicht beobachtet werden. Der krasse Temperaturabfall tritt nicht auf. Nach 8 min ist die Schmelzenoberfläche auf 1100° C abgekühlt.

Tauchsonden:

Sonde Nr.	1	2	3	4	5	6
Eintauchzeitpunkt nach Eingießbeginn in Tiegel I (s)	19	44	73	103	189	270
Eintauchdauer (s)	8	9	11	13	21	20
Zeit bis zum Erreichen der Asymptote (s)	5	5	8	TE wird vor Erreichen der Asymptote zerstört	17	19
Asymptotentemperatur (°C)	1900	1840	1800	--	1620	1580
Pyrometertemperatur (°C)	1830	1750	1640	--	1370	1300
Temperaturdiff. (°C)	70	90	160	--	250	290

5.4 Fortschrittsgeschwindigkeit der Isothermen und der Schmelzfront

Das Fortschreiten der 100° C- und 800° C-Isothermen sowie die Schmelzfrontgeschwindigkeiten sind in tabellarischer Form in den Abb. 123 bis 130 angegeben. Die Geschwindigkeiten der 100° C-, der 800° C- und der Schmelzfront sind als Funktion der Schmelzbadtemperatur in den Abb. 131 bis 133 aufgetragen.

Die Schmelzbadtemperatur wurde durch Bildung des integralen Mittelwertes aus der Oberflächentemperatur (Pyrometermessung) ermittelt. Aufgrund der Tauchsondenmessungen liegt die Schmelzbadtemperatur ca. 300° C über der pyrometrisch gemessenen Oberflächentemperatur. Bei der Ermittlung des integralen Temperaturmittelwertes wurden die Pyrometerkurven bis zum Abstichbeginn extrapoliert.

Für die Bestimmung der Schmelzfrontgeschwindigkeit wird der Versagenspunkt der im Beton eingebetteten CrNi-TE benutzt. Die Versagenstemperatur liegt zwischen 1300 - 1400° C. Sie wird von den TE mit steilem Temperaturanstieg durchfahren. Beim Abschmelzen der Meßstelle läuft die Thermospannung an die obere Grenze des Schreibermeßbereichs (100 mV).

5.5 Massenbilanzen

Eine eindeutige Bestimmung der Schmelzgutmassen im Tiegel als Funktion der Zeit war bei den Versuchen durch direkte Messung nicht möglich. Für die Anfangs- und Endzustände konnten nur folgende Massen durch direkte Messung bestimmt werden:

- Ausgangsmasse der Thermitmischung vor der Reaktion.
- Ausgangsmasse des Tiegels.
- Masse des Tiegels mit Schmelzgut nach dem Versuch.

Durch Planimetrierung der Tiegelschnitte konnte außerdem das Volumen des geschmolzenen - und des dehydrierten Betons und somit auch der Wasserverlust sowie die Masse des Schmelzkuchens annähernd bestimmt werden. Zur Aufstellung von genauen Massenbilanzen als Funktion der Zeit fehlen jedoch Angaben, wie z.B. zeitliche Massenzunahme während der Eingießzeit und Massenabnahme während der Versuchsdauer sowie eine genaue Kenntnis der eingegossenen Schmelzmasse und der Endmasse des Schmelzkuchens. Die Bestimmung der Masse des Schmelzkuchens (speziell des Metallregulus) kann später durch direkte Wägung nachvollzogen werden, sobald die Auswertung der Tiegelschnitte endgültig abgeschlossen ist.

Trotz der grundsätzlichen Schwierigkeiten wurde so genau wie möglich versucht, durch Auswertung des Filmmaterials und Rechnung eine Massenbilanz zu erstellen.

Die nachstehende Rechnung beschreibt die im Tiegel enthaltene Schmelzgutmasse als Funktion der Zeit. Es wird vorausgesetzt, daß sich die Thermitmelze im Reaktionstiegel in zwei getrennten Schichten ablagert. Dabei wird das spezifisch leichtere Al_2O_3 über dem Fe schwimmen. Der Eingießvorgang kann durch die unten stehenden Ausflußgesetz beschrieben werden. Für den Abfluß der Fe-Masse gilt:

$$\dot{m}_{\text{Fe}} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2g \left(h_{\text{Fe}} + \frac{\bar{h}_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\rho_{\text{Fe}}} \right)} \cdot \rho_{\text{Fe}} \quad (1)$$

μ = Ausflußzahl

F = Austrittsquerschnitt

h_{Fe} = Füllhöhe des Fe-Anteils

$\bar{h}_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ = Höhe der über dem Fe schwimmenden Al_2O_3 -Schicht

g = Erdbeschleunigung

$\rho_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ = Dichte der Al_2O_3 -Schmelze

ρ_{Fe} = Dichte der Fe-Schmelze

Nach dem Abgießen des Fe-Anteils befindet sich nur noch die Al_2O_3 -Schmelze im Reaktionstiegel, deren Massenstrom beschrieben wird durch:

$$\dot{m}_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (2)$$

$h_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ = Füllstandhöhe der Al_2O_3 -Schmelze.

Aus (1) und (2) ergibt sich:

$$\frac{\dot{m}_{\text{Fe}}}{\dot{m}_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = \sqrt{\frac{h_{\text{Fe}} + \frac{\bar{h}_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot S_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{S_{\text{Fe}}}}{h_{\text{Al}_2\text{O}_3}}} \cdot \frac{S_{\text{Fe}}}{S_{\text{Al}_2\text{O}_3}} \quad (3)$$

Es wird vereinfachend angenommen, daß die Füllstandshöhen und der Austrittsquerschnitt während des Auslaufens konstant bleiben und daß die beiden Schmelzphasen aus reinem Fe und reinem Al_2O_3 bestehen.

Für eine 250 kg Thermitschmelze erhält man das Verhältnis

$$\frac{\dot{m}_{\text{Fe}}}{\dot{m}_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = 2,52 \quad (4)$$

250 kg Thermit enthalten 150 kg Fe und 100 kg Al_2O_3 . Damit gilt

$$\frac{\dot{m}_{\text{Fe}} \cdot \Delta t_{\text{Fe}}}{\dot{m}_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3}} = 1,5 \quad (5)$$

mit (4):

$$\Delta t_{\text{Fe}} = 0,59 \cdot \Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3} \quad (6)$$

Für die Gießzeit gilt:

$$\Delta t_{\text{Fe}} + \Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \Delta t_{\text{ges}} \quad (7)$$

mit (6):

$$\Delta t_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{\Delta t_{\text{ges}}}{1,59} \quad (8)$$

Aus den Filmaufzeichnungen ergibt sich folgendes Bild des Eingießvorganges:

- 1.) Einlaufen des Fe (und Al_2O_3)-Anteils bis zur Füllung des Tiegels
- 2.) Überlaufen der Restschmelze (Fe und/oder Al_2O_3).
- 3.) Auswurf von Schmelzgut während der Überlaufphase mit Substitution des Fe-Verlustes durch Al_2O_3 .
- 4.) Ende des Eingießvorganges.
- 5.) Auswurf von Schmelzgut (Fe und Al_2O_3).

Die aus den Filmaufzeichnungen erhaltenen Meßwerte sind in Abb. 122 zusammengestellt. Durch Ausplanimetrieren der Tiegelschnitte erhält man die nach der Auswurfphase im Tiegel befindliche Fe-Regulusmasse.

Mit der bekannten Gesamteingießzeit wird aus (7) und (8) die Gießzeit für den Fe- und Al_2O_3 -Anteil ermittelt. Damit kann die bis zum Füllen des Tiegels einlaufende Schmelzmasse berechnet werden. Es wird angenommen, daß die Fe-Verluste einer linearen Gesetzmäßigkeit folgen und zeitlich zwischen Ende des Fe-Eingusses bis zum Ende der Auswurfphase liegen. Der im Tiegel verbleibende Fe-Anteil wird durch Ausplanimetrieren der Reguluschnittfladen ermittelt. Die nachlaufende Al_2O_3 -Schmelze füllt das Restvolumen der Tiegel auf, danach wird das ausgeschleuderte Fe durch einen volumengleichen Anteil Al_2O_3 ersetzt.

Der Al_2O_3 -Verlust von Eingußende bis Ende der Auswurfphase wird mit 50 % angenommen. Die für die Tiegel B, F, D, C, H und I aufgestellten Schmelzgutmassen im Tiegel sind in Abb. 114 bis 121 dargestellt.

5.6 Körperschallmessung

Die absolute Anzahl der "burst" Signale pro Zeiteinheit wurden bei den Tiegeln C, D und E mit etwa 1000 pro Sekunde gemessen. Die Signaldichte klingt mit einer Zeitkonstante von $\alpha = 0,0214 \text{ s}^{-1}$ ab. Bei Tiegel I, mit der rein oxidischen Schmelze, ist die Anfangsdichte der Signale kleiner und nimmt außerdem schneller ab als bei Versuchen mit der metallischen Schmelze.

5.7 Dampfdetektion

Der Dampfdetektor wurde nur im Tiegel F eingesetzt. Dabei sollte untersucht werden, wie schnell der Wasserdampf durch die Tiegelfwand dringt. Der Tiegel F hat mit 130 mm die größte Wandstärke aller eingesetzten Betontiegel.

Der Dampfdetektor hat bereits 11 s nach dem ersten Kontakt der Schmelze mit dem Tiegel angesprochen.


5.8 Gasprobenahme

Die auf Gasmäuse gezogenen Gasproben wurden gaschromatographisch analysiert. Die Meßgenauigkeit beträgt $\pm 3 - 5 \%$. Bei allen Proben wurde eine fast luftähnliche Zusammensetzung nachgewiesen. Der Anteil des Wasserstoffs betrug zwischen 0 % bei Tiegel B und 0,76 % bei Tiegel D. Der Kohlendioxidanteil wurde mit 0,0245 und 0,3600 % nachgewiesen.

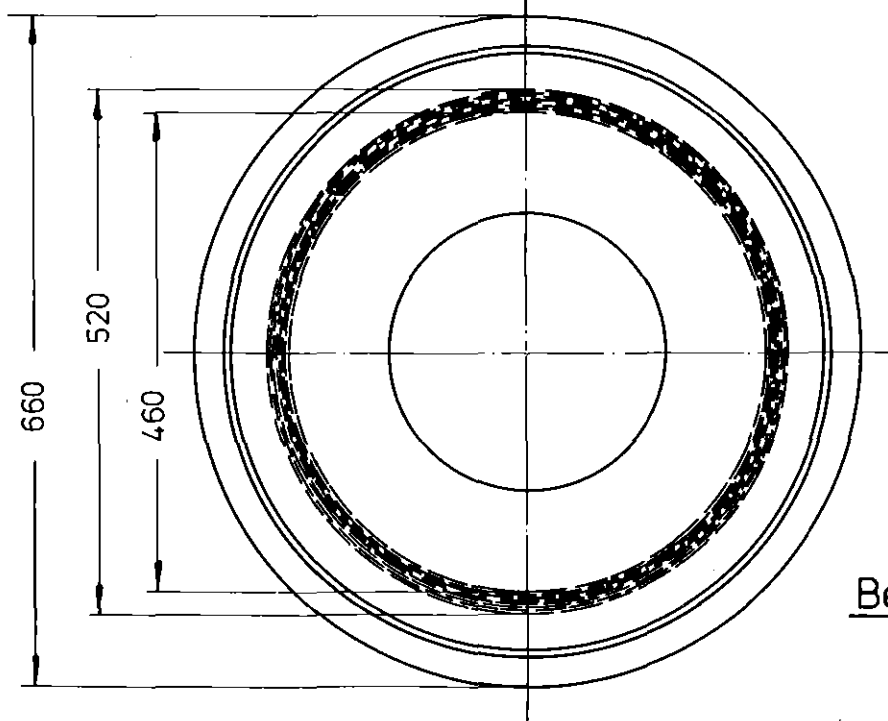
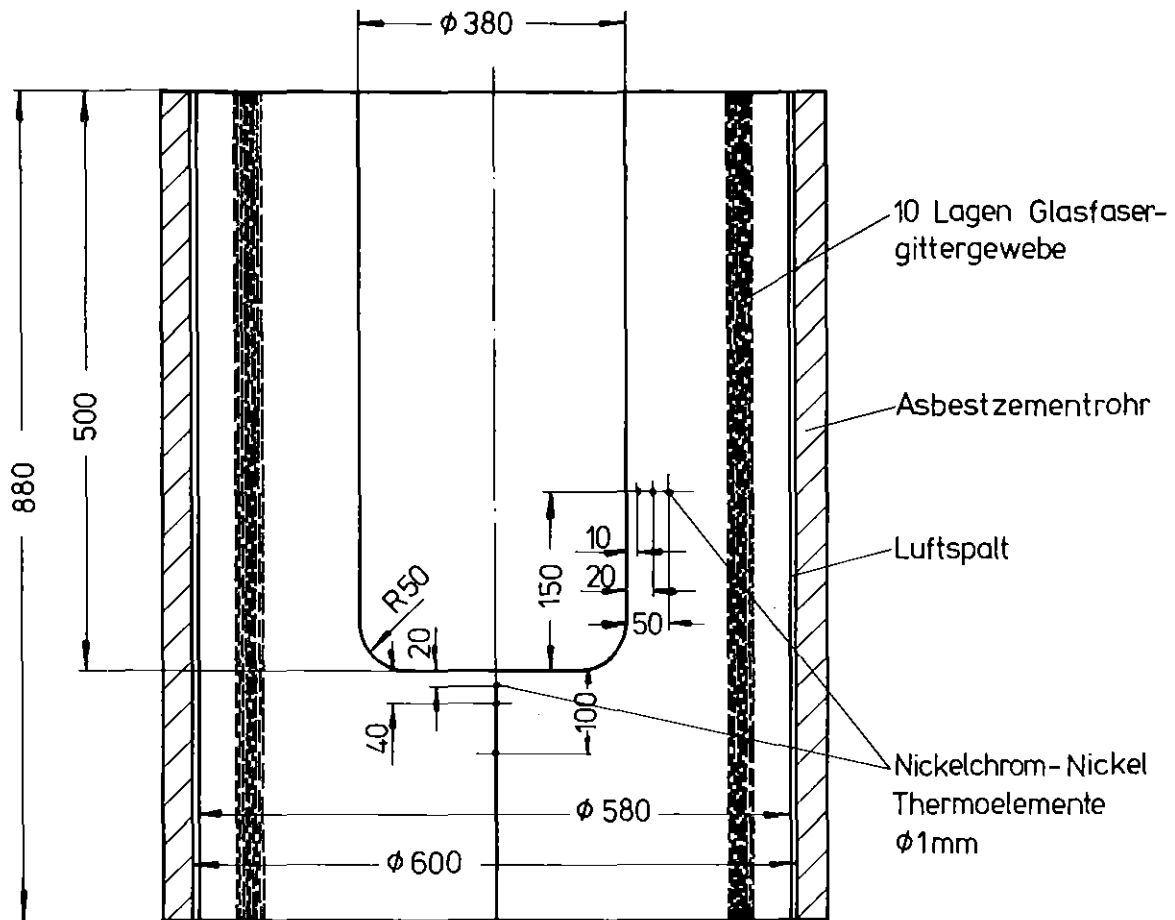
Trotz des geringen axialen Abstandes von 200 bis 300 mm der Gas-einlassöffnung von der Tiegeloberkante wurde offensichtlich bei allen Versuchen hauptsächlich Umgebungsluft eingesaugt. Vermutlich ist die Turbulenz der Konvektionsströmung der umgebenden Luft über dem Tiegel so intensiv, daß es bereits in einem Abstand von weniger als 300 mm zu einer Vermischung und Verdünnung der Abgase kommt.

Für spätere Versuche soll eine neue Gasprobenahmesonde entwickelt werden, die eine Absaugung der Abgase direkt über der Oberfläche der Schmelze im Tiegelinneren ohne Fremdluft ermöglicht. Die Peripherie, d.h. Gasmäuse mit Absperrarmaturen und Vakuumpumpe, haben einwandfrei funktioniert.

Mit den im Gasstrom des Probenahmesystems eingebauten Thermo-elementen wurden Gastemperaturen von max. 120° C gemessen.

	<i>Untersuchungsergebnis</i>	<i>Proben-Nr.</i>
<i>Datum:</i> 9.9.77	<i>Auftraggeber:</i> H.Perinic	<i>Bezeichnung der Probe:</i> Betonprobe E
Die Probe enthält:		
SiO_2	:	61,18 %
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaCO}_3$:	27,96 %
Fe_2O_3	:	1,54 %
Al_2O_3	:	4,06 %
MgCO_3	:	0,75 %
<i>Leopoldshafen, den</i> 16.9.77		<i>Ol</i>
	KERNREAKTOR Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H. Karlsruhe	FR2 RB/B

PNS 4323	BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN CHEMISCHE ANALYSE DES BETONS	GFK RBT/IT
-------------	---	---------------

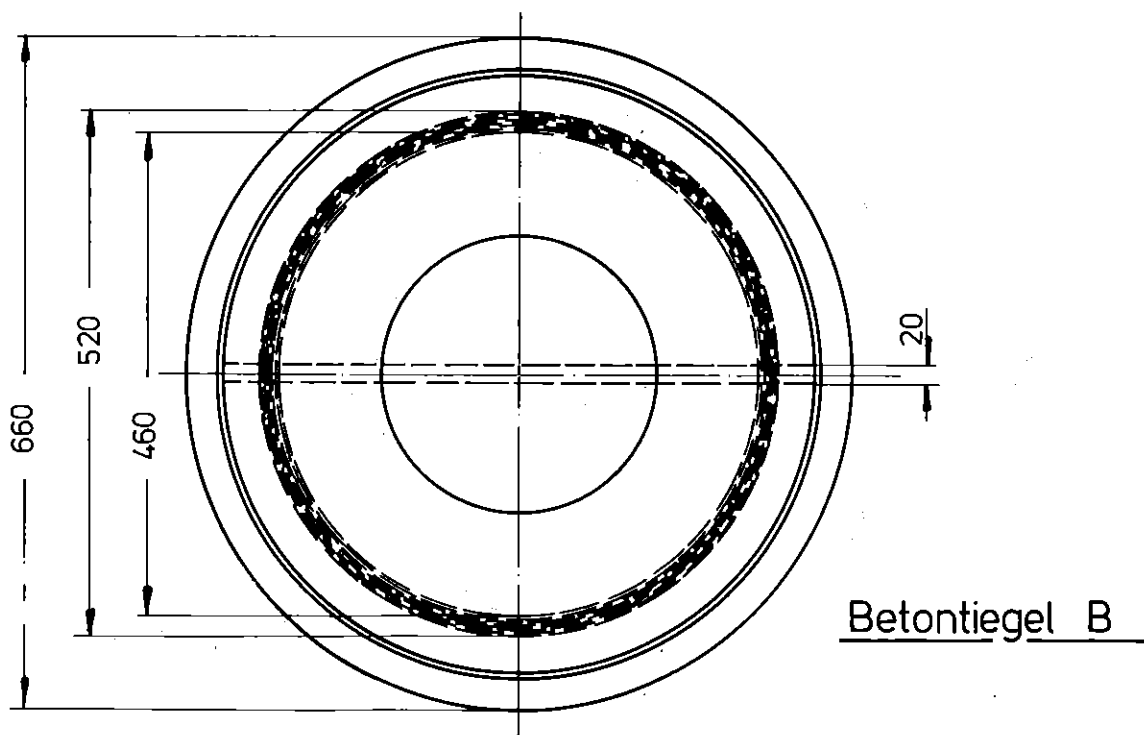
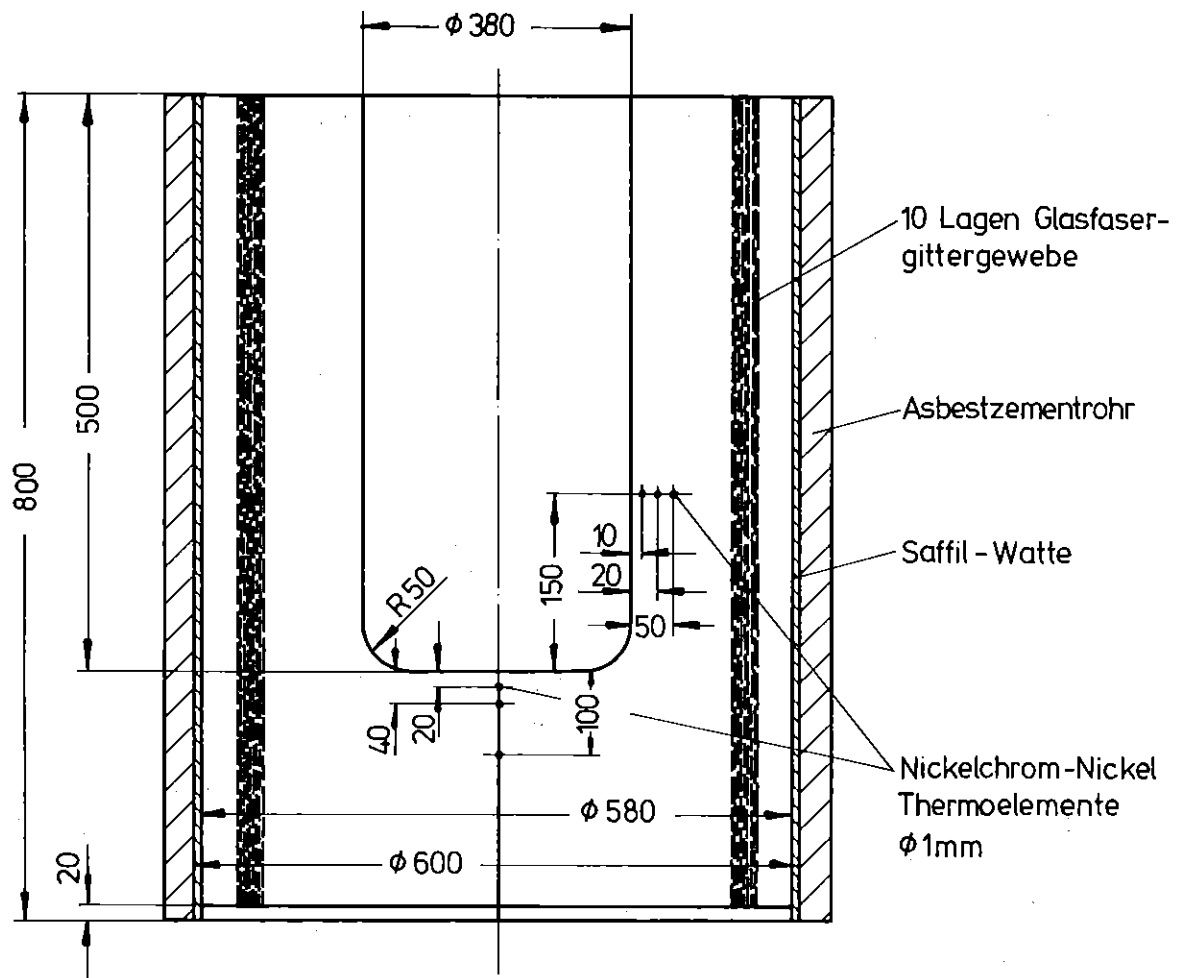


Betontiegel A

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL A - MASS-SKIZZE

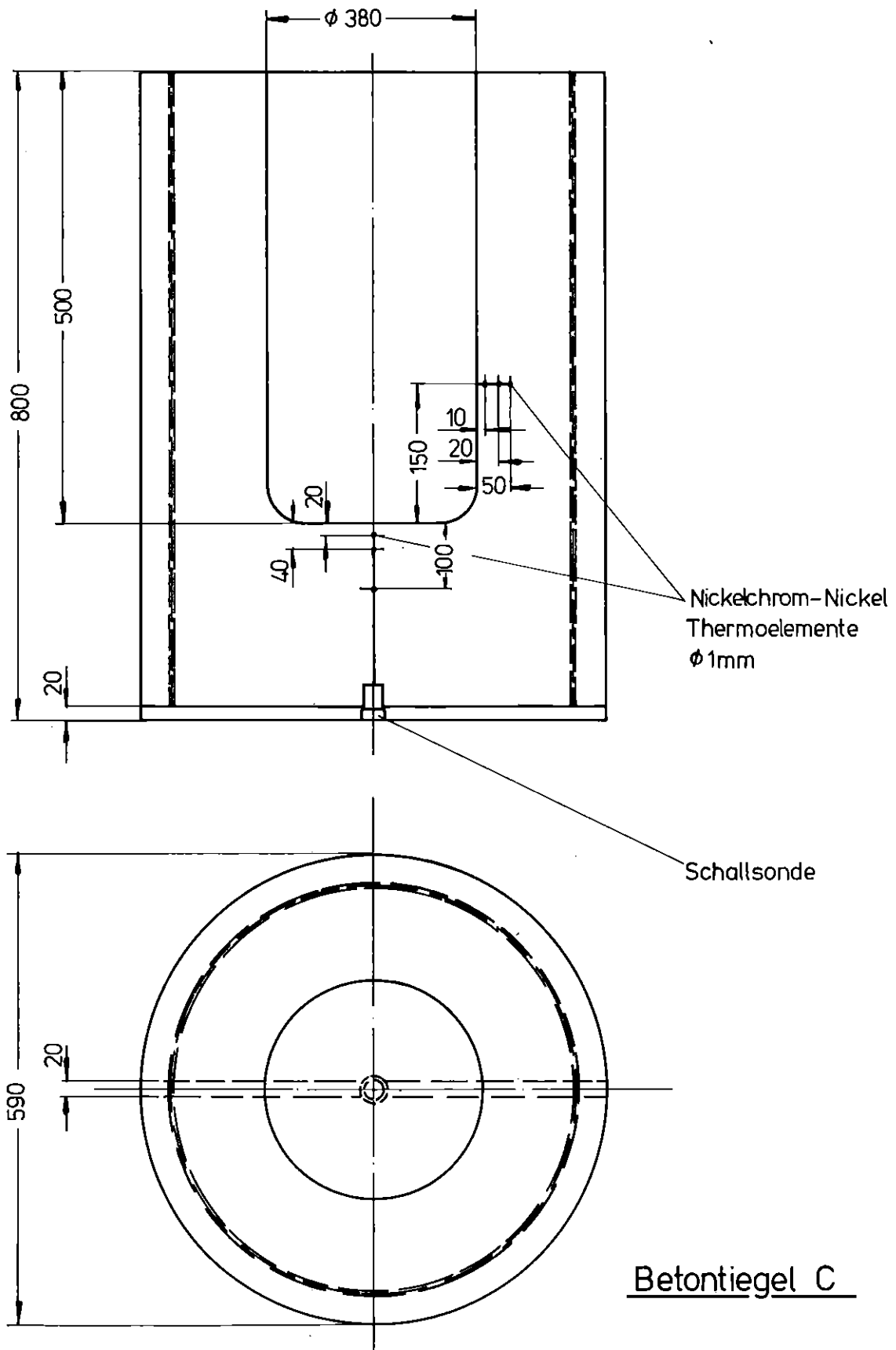
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - MASS-SKIZZE

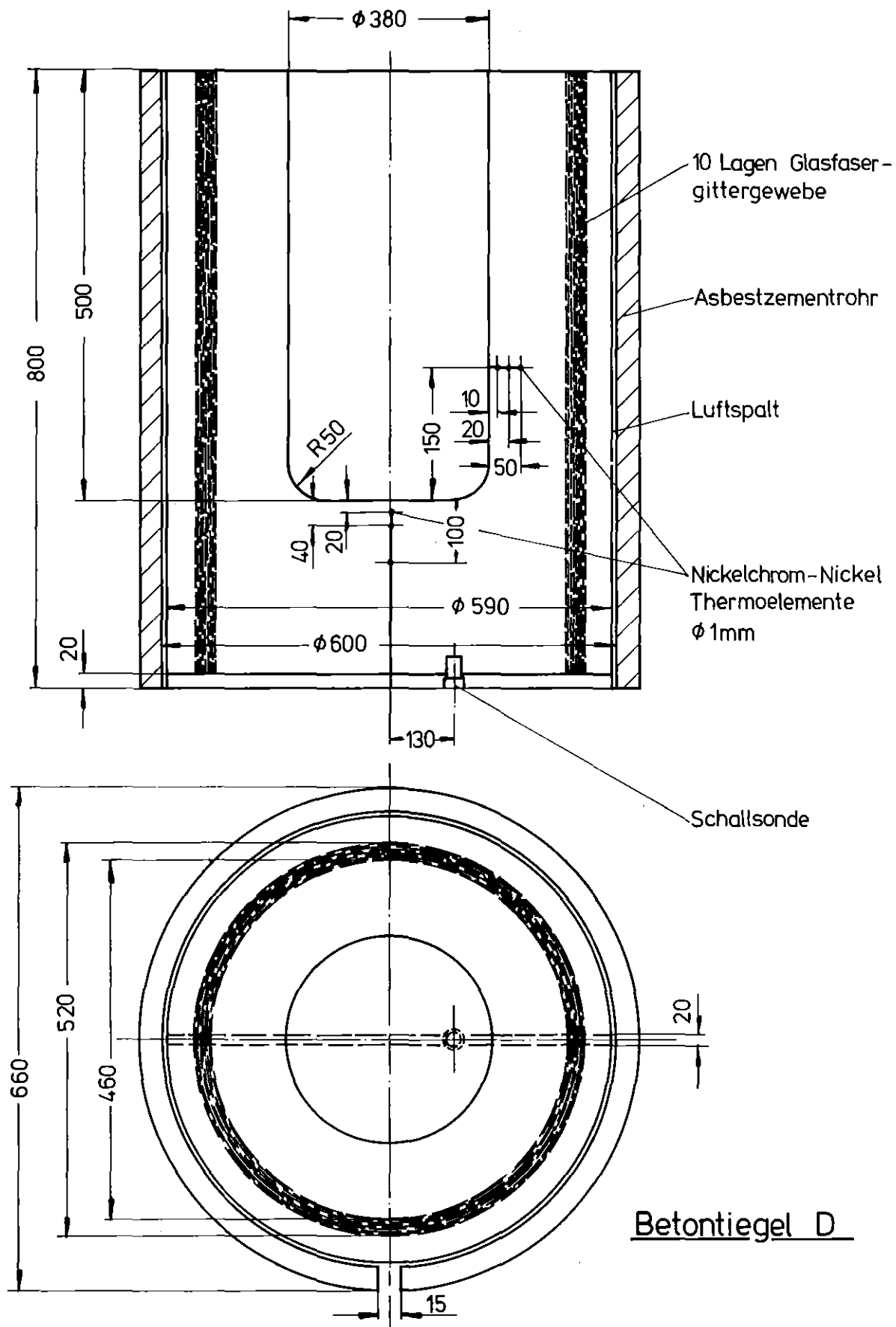
GFK
RBT/IT



PNS
4323

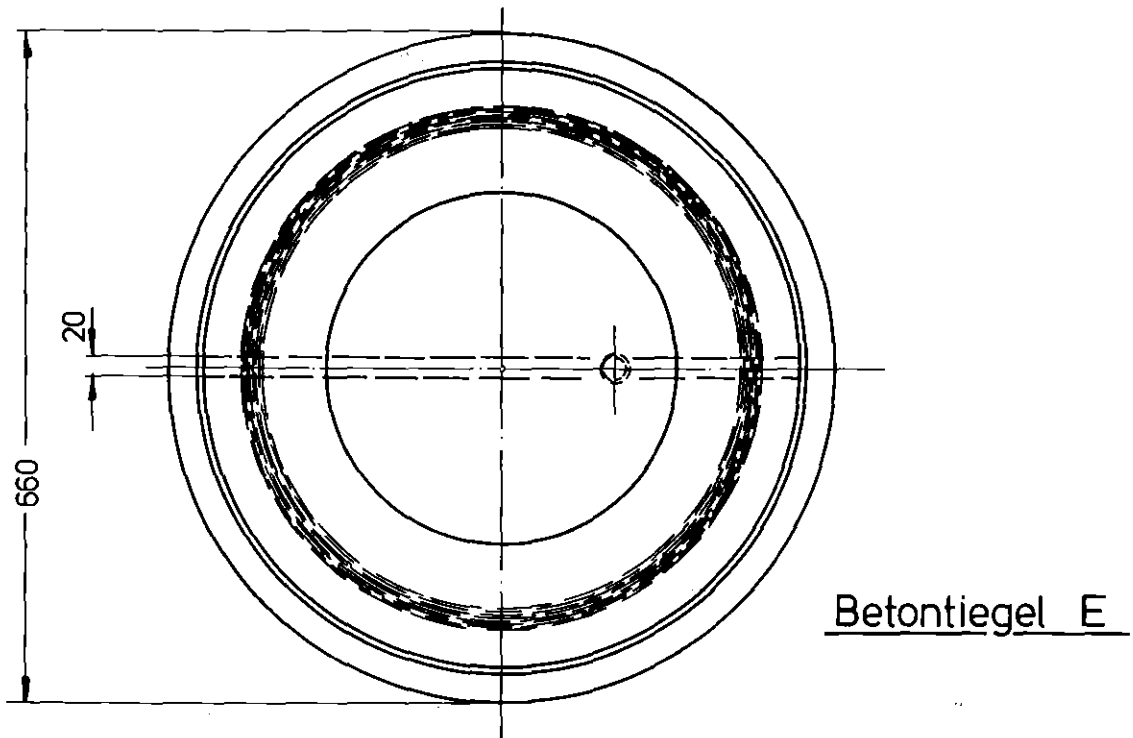
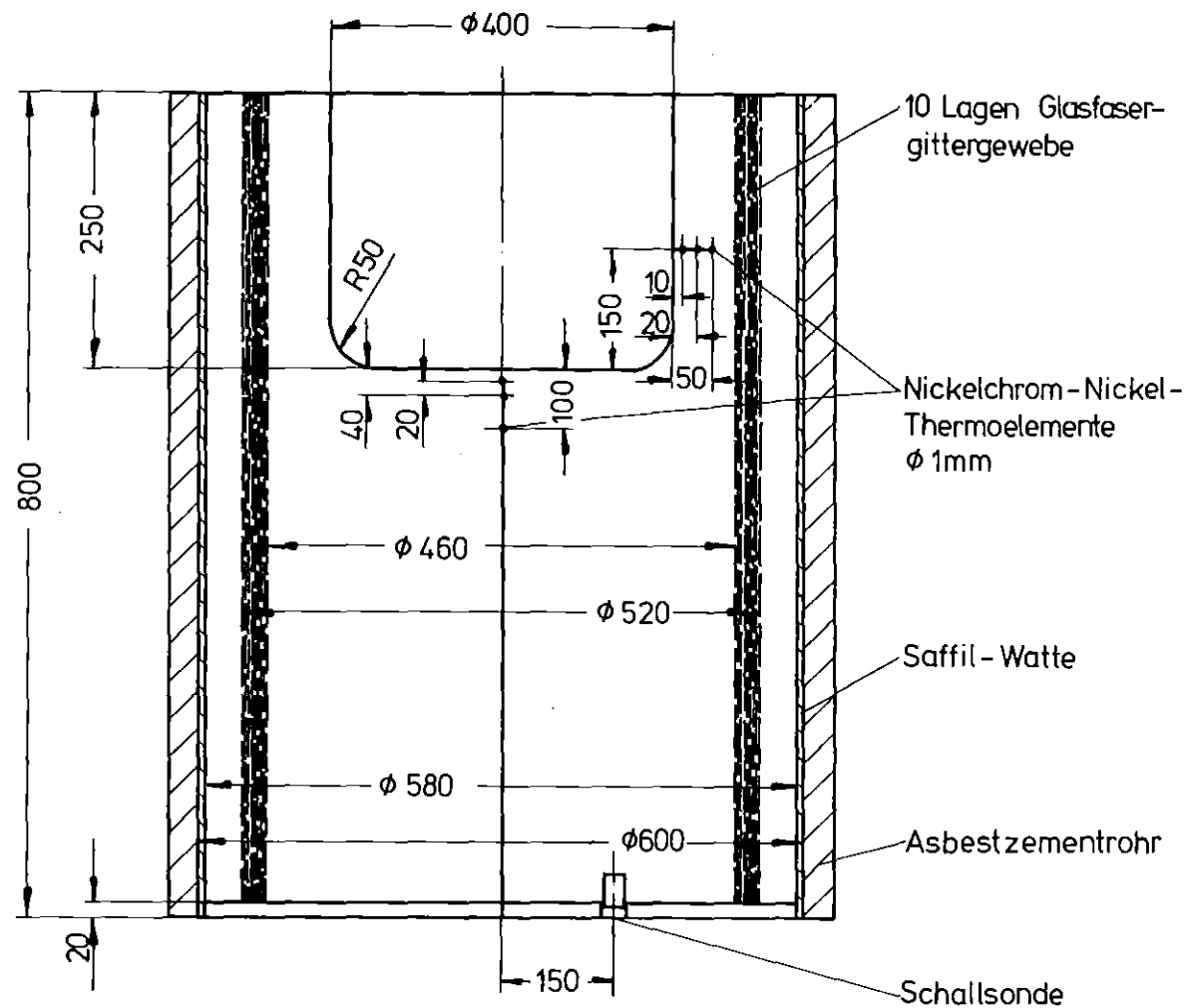
BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - MASS-SKIZZE

GFK
RBT/IT



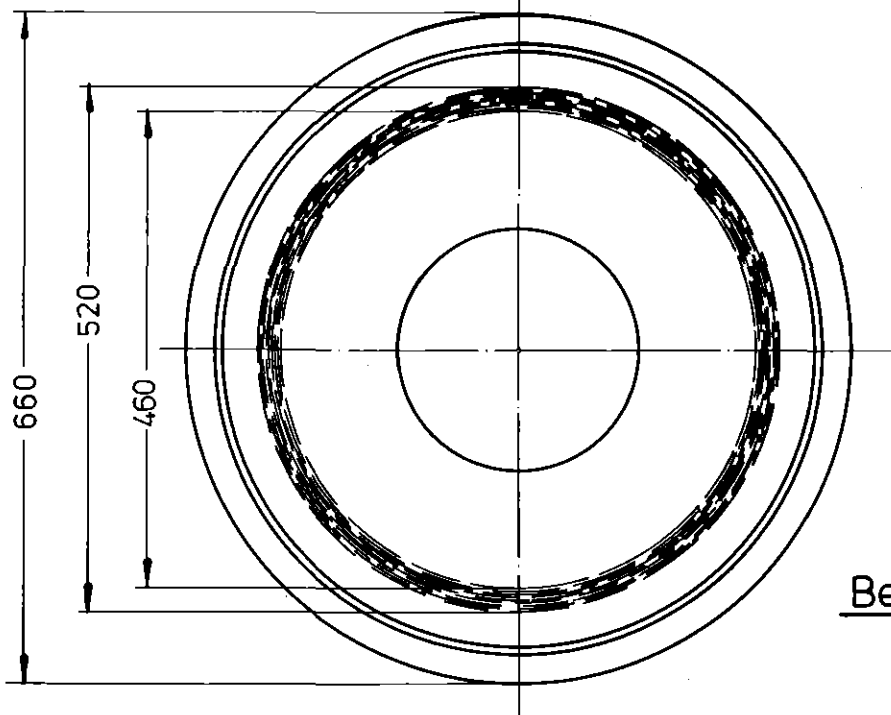
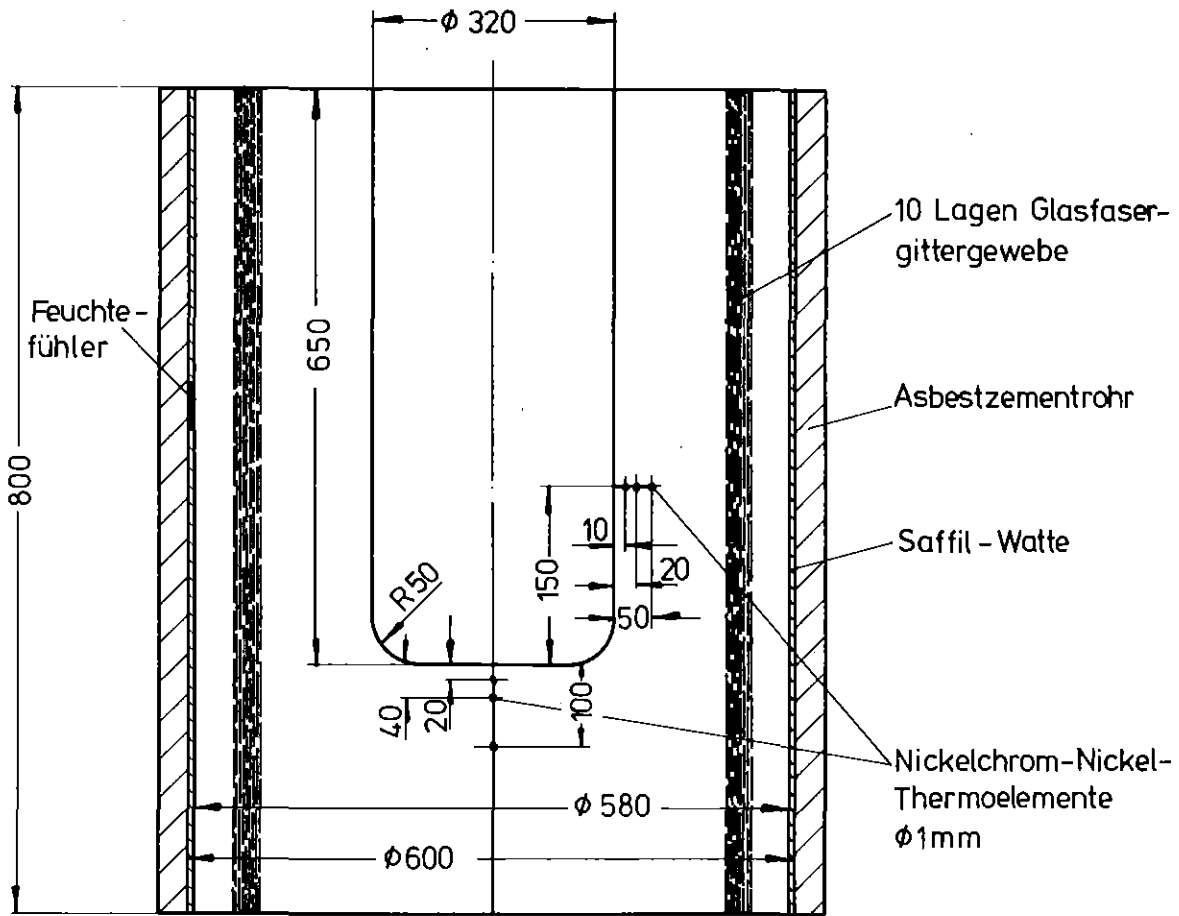
PNS 4323	BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN TIEGEL D - MASS-SKIZZE	GFK RPT/IT
-------------	---	---------------

Abb. 5



Betontiegel E

PNS 4323	BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN TIEGEL E - MASS-SKIZZE	GFK RBT/IT
-------------	---	---------------

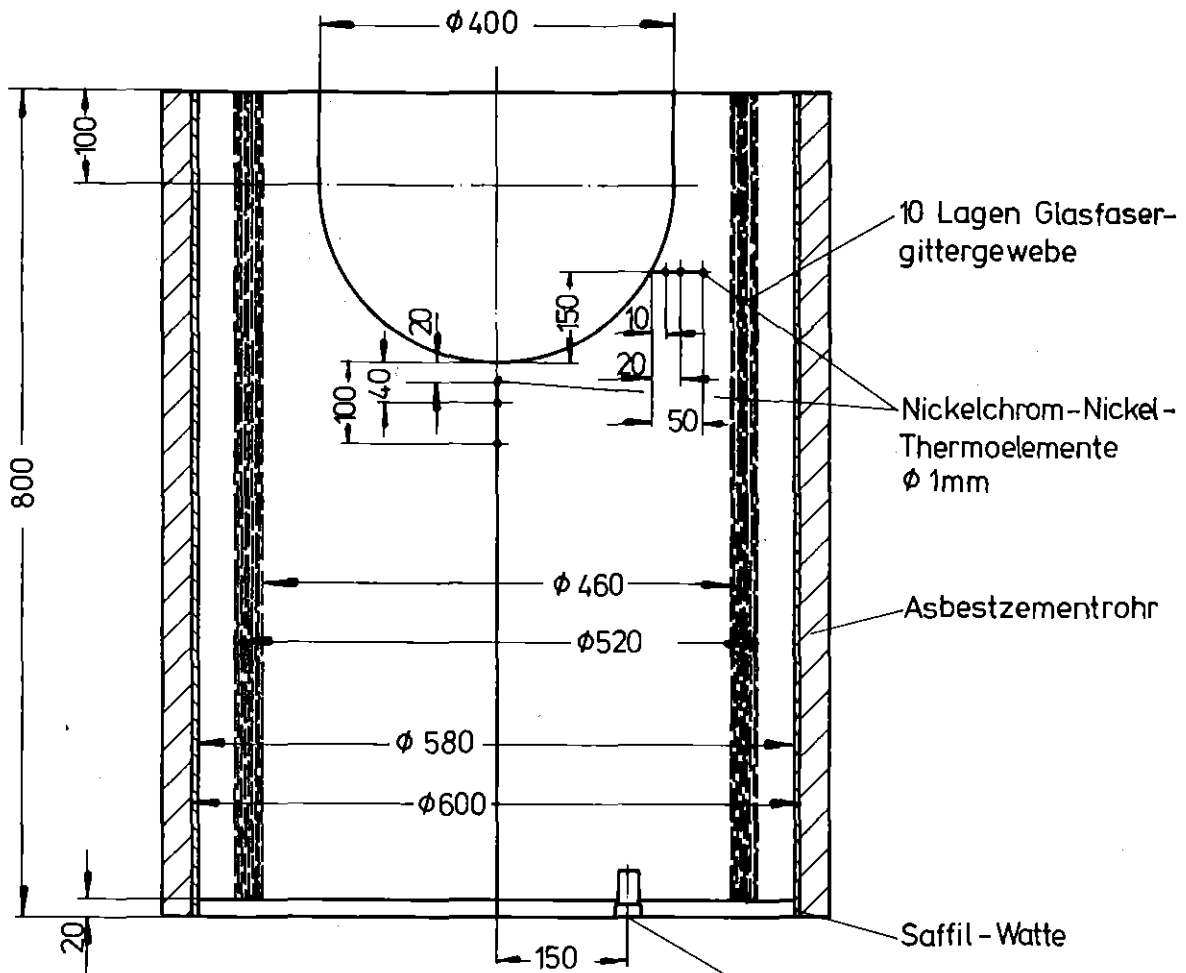


Betontiegel F

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - MASS-SKIZZE

GFK
RBT/IT

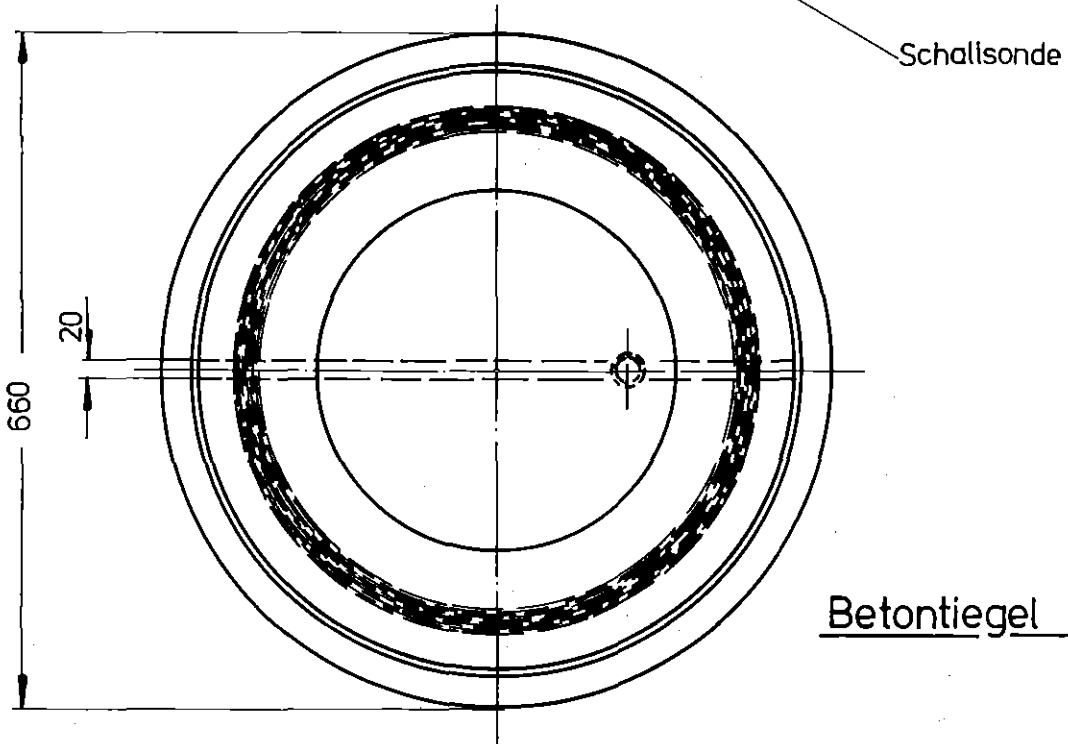


10 Lagen Glasfaser-
gittergewebe

Nickelchrom-Nickel-
Thermoelemente
 $\phi 1\text{mm}$

Asbestzementrohr

Saffil - Watte

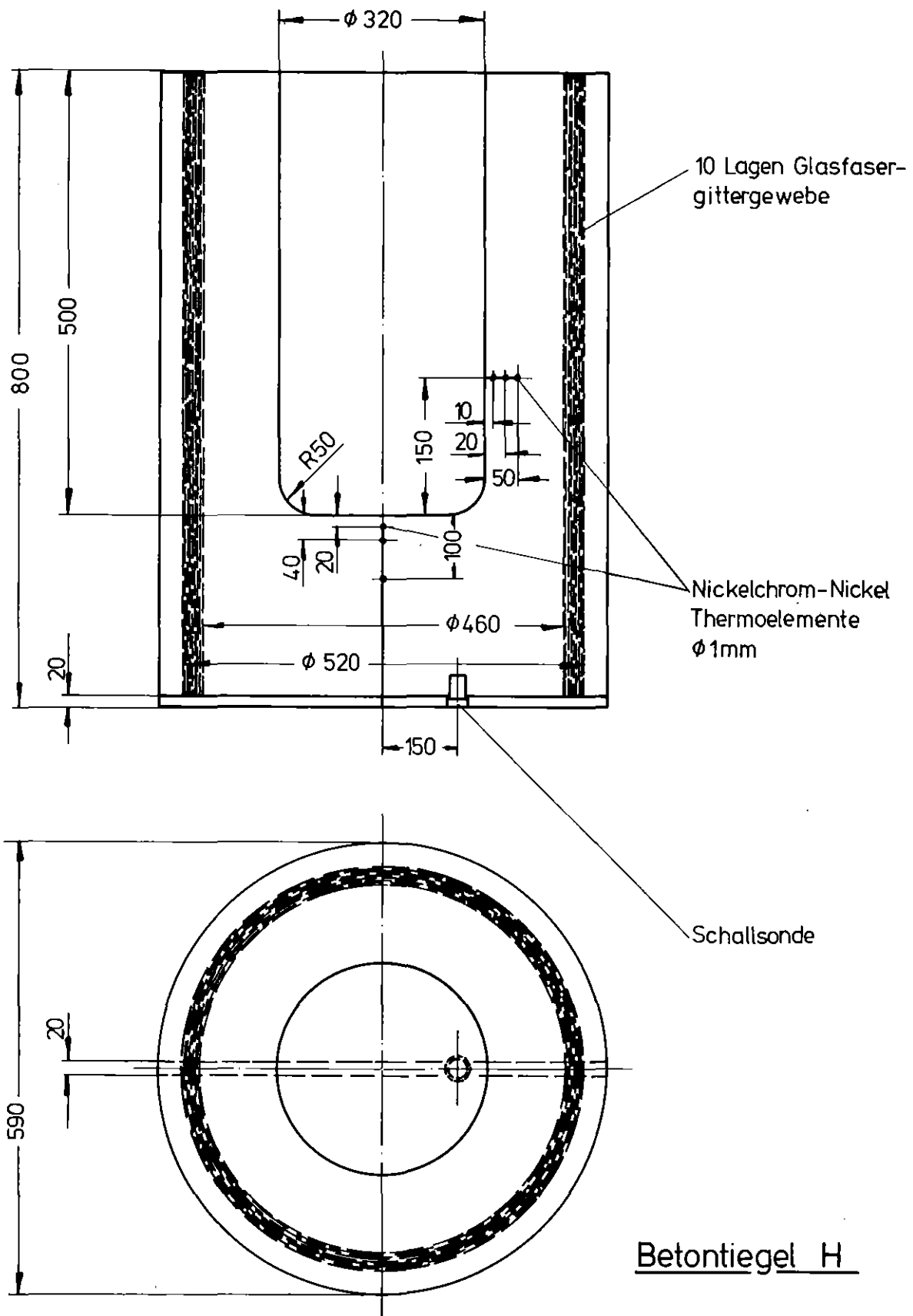


Betontiegel G

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - MASS-SKIZZE

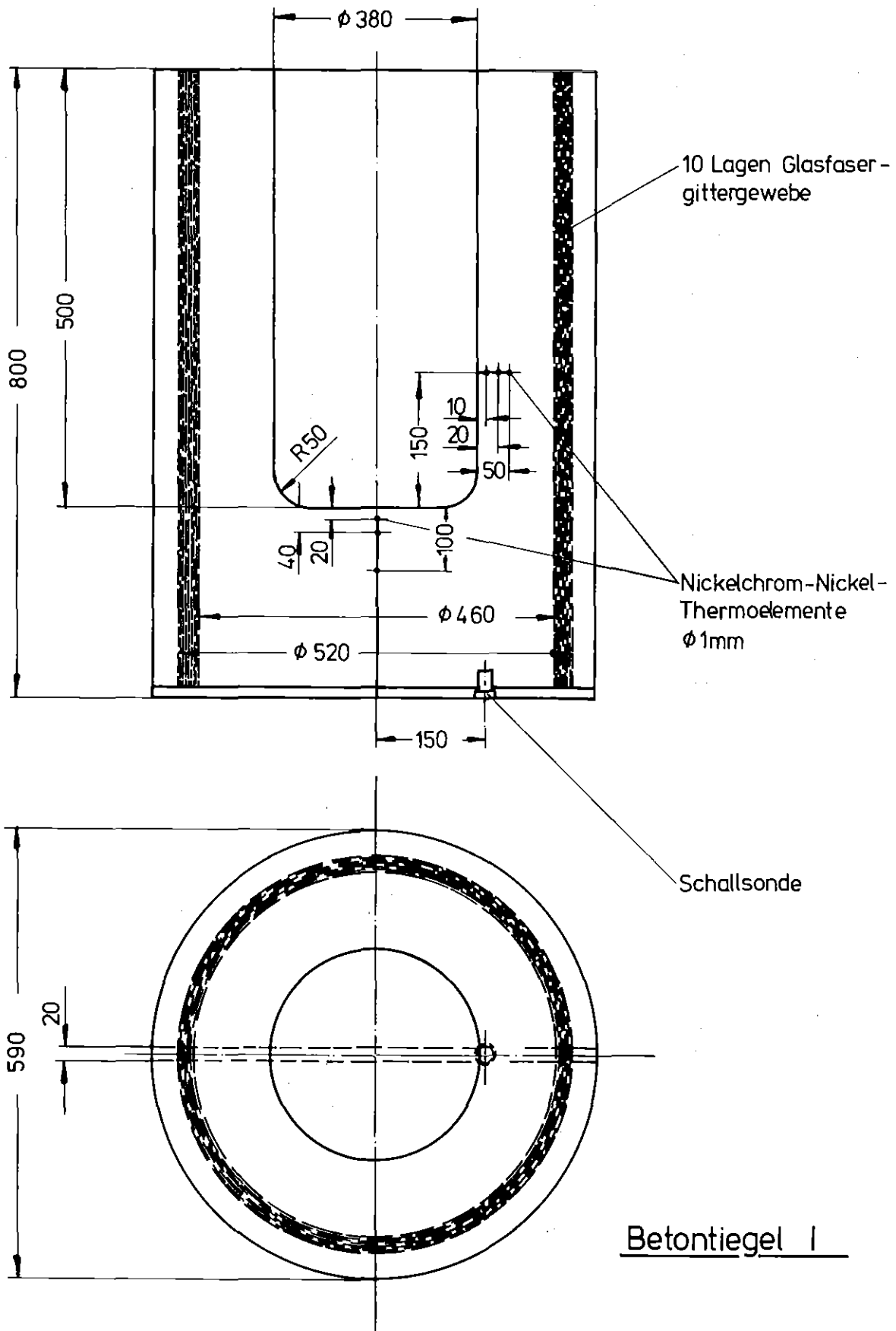
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL -VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H - MASS-SKIZZE

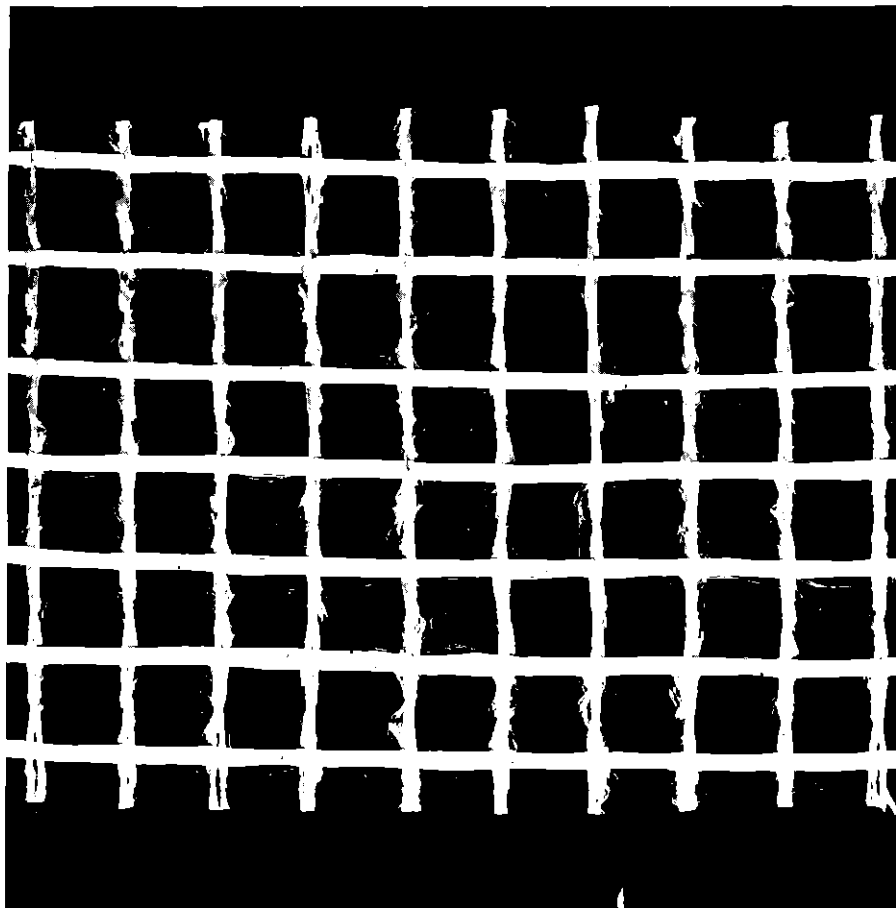
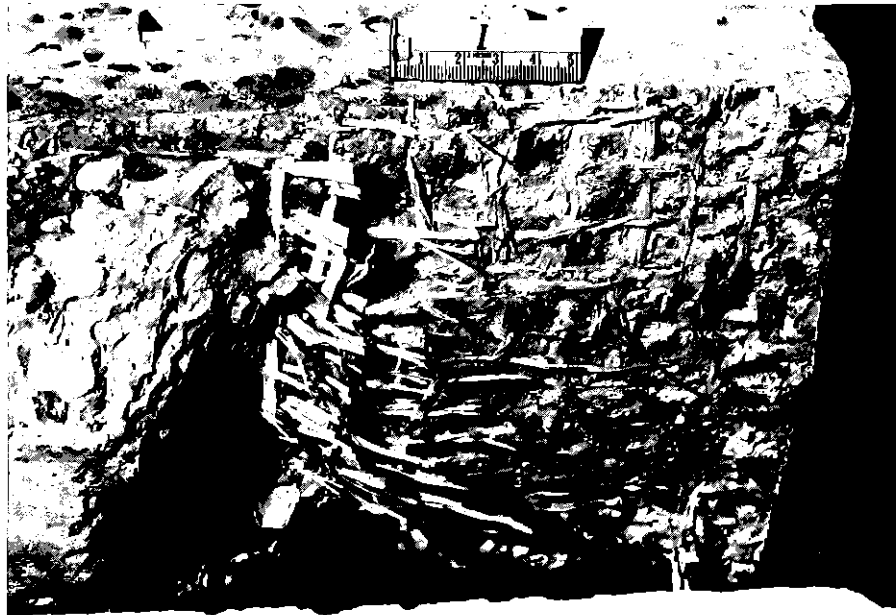
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - MASS-SKIZZE

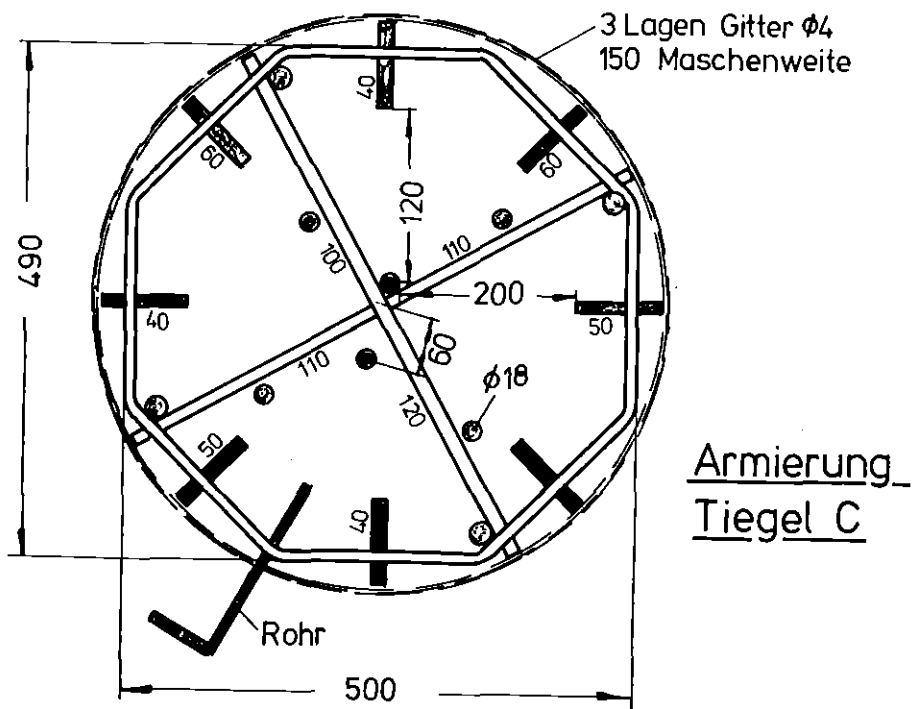
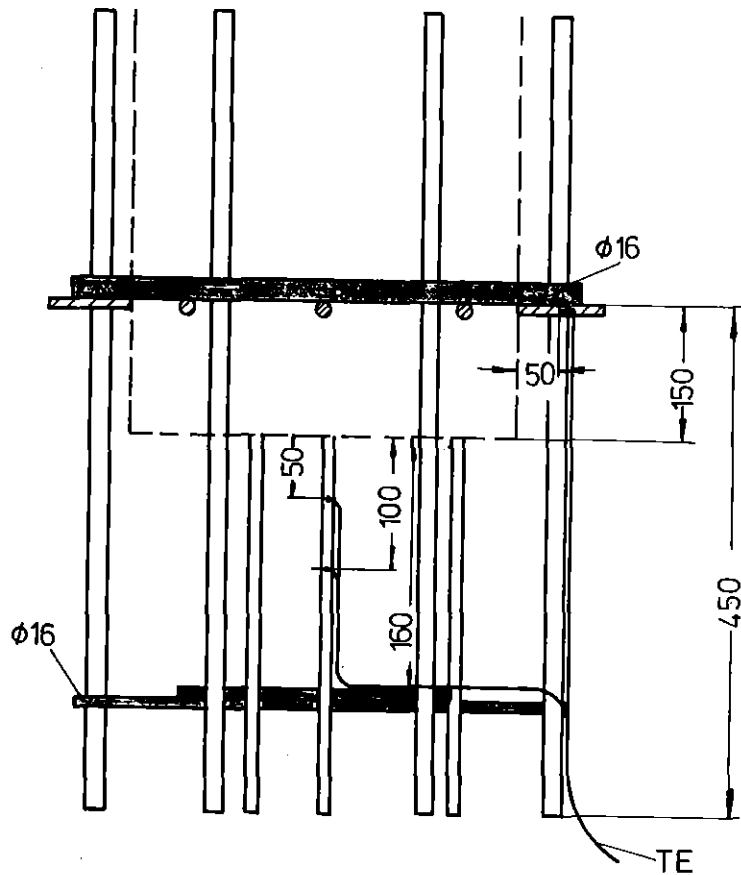
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - BODENSEGMENT MIT GLASFASERBEWEHRUNG

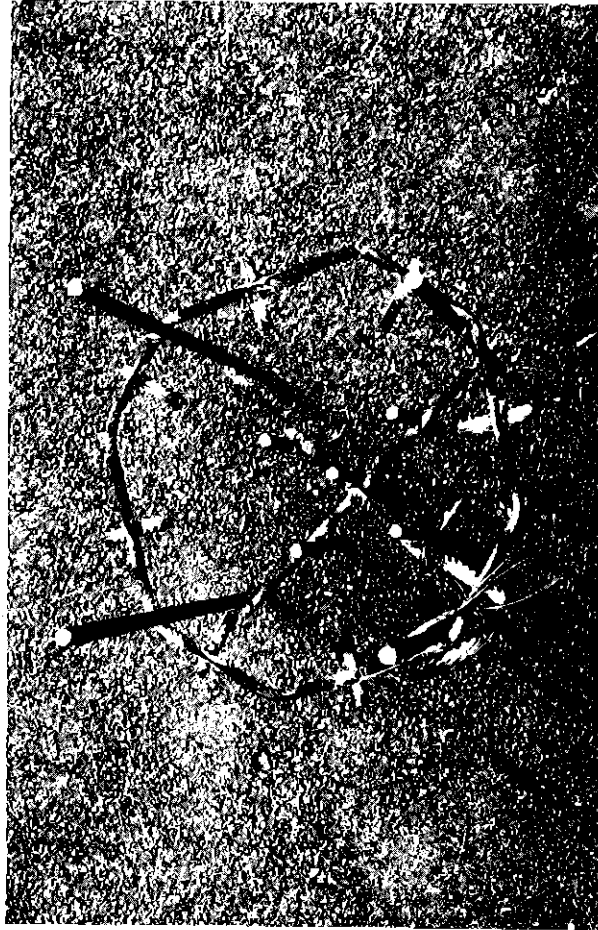
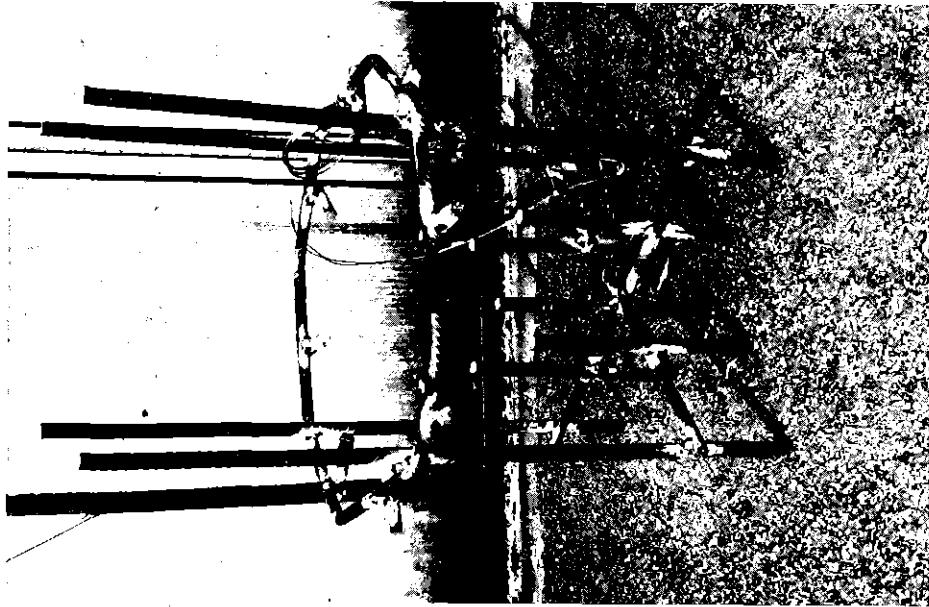
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
STAHLBEWEHRUNG VON TIEGEL C


GFK
RBT/IT



PNS
4323

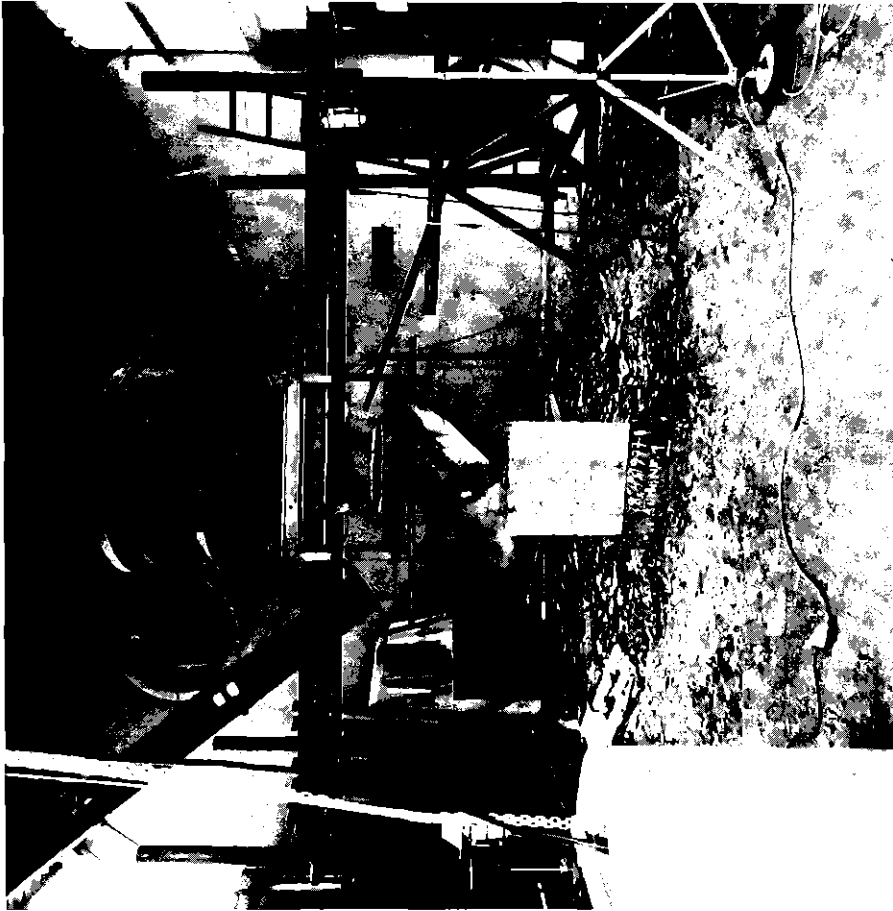
BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
STAHLBEWEHRUNG VON TIEGEL C

GFK
RBT/IT

	<i>Untersuchungsergebnis</i>		<i>Proben-Nr.</i>
<i>Datum:</i> 15.9.77	<i>Auftraggeber:</i> H.Perinio	<i>Bezeichnung der Probe:</i> Thermit-Proben	
	Thermit	Thermit (Ni,Cr)	
SiO ₂	2,50 %	0,14 %	
Fe (gesamt)	59,75 %	44,70 %	
Al	14,38 %	18,81 %	
Cr	-	16,11 %	
Ni	-	4,15 %	
<i>Leopoldshafen, den 23.9.77</i>			
	KERNREAKTOR Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H. Karlsruhe		FR2 RB/B

[Handwritten signature]

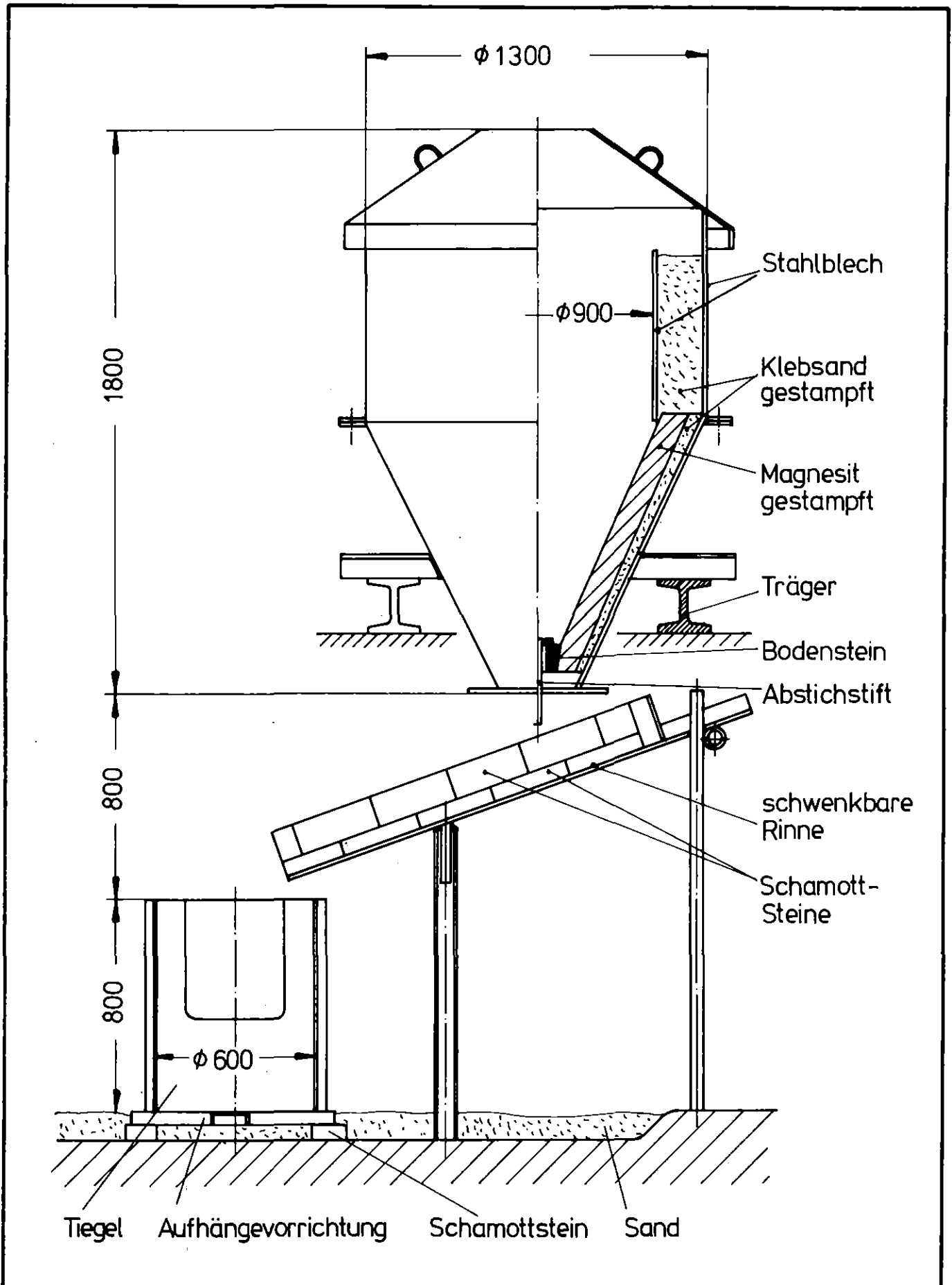
PNS 4323	BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN CHEMISCHE ANALYSE DER THERMITMISCHUNG IM AUSGANGSZUSTAND	GFK RBT/IT
-------------	--	---------------



GFK
RBT/IT

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
VERSUCHSHALLE, SCHMELZANLAGE

PNS
4323



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZANLAGE, PRINZIPSKIZZE

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHWENKBARE EINGIESSRINNE

GFK
RBT/IT

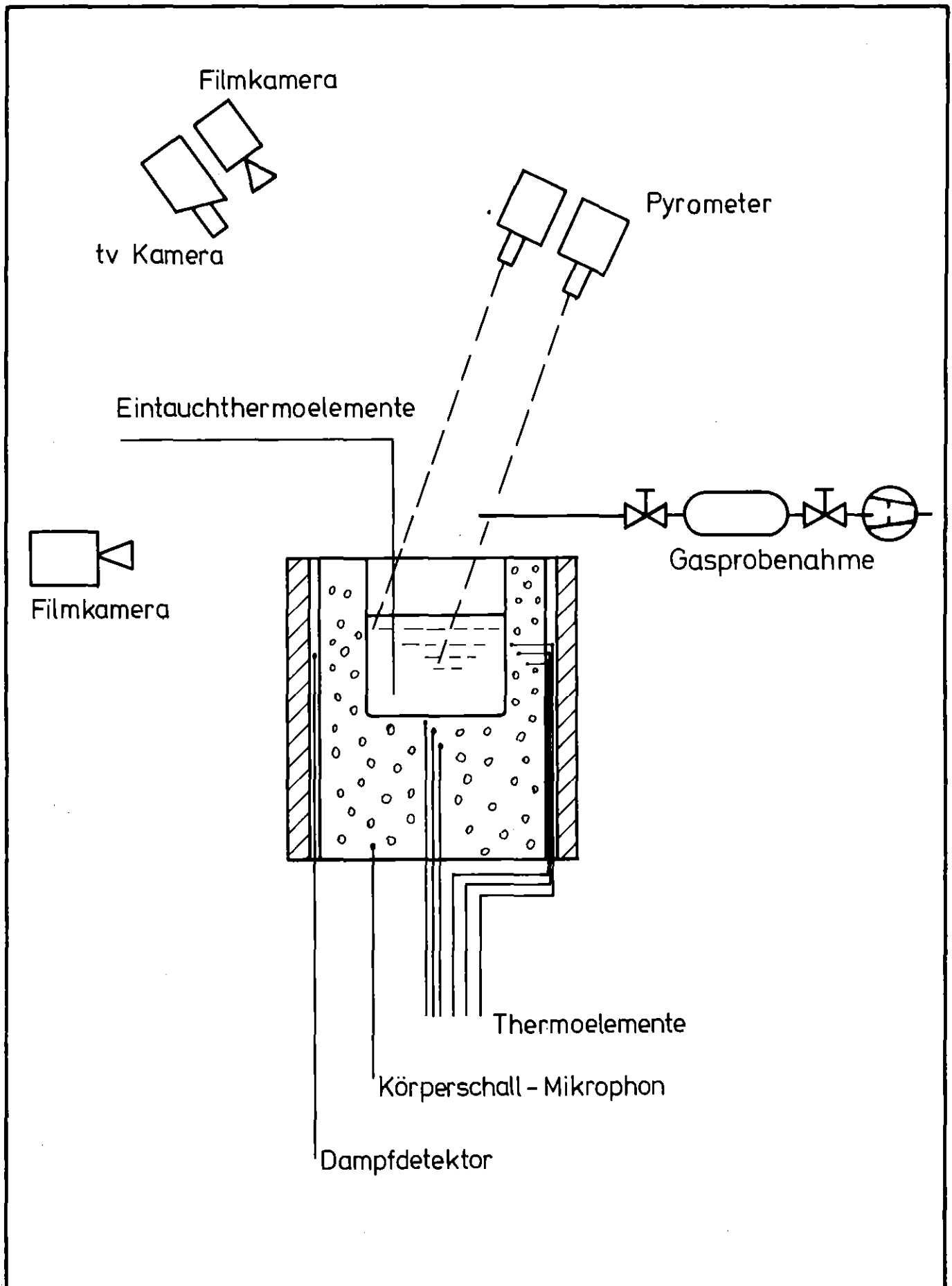
Tiegel	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Thermoelemente im Beton axial	3 *	3	3	3	3	3	3	3	3
Thermoelemente im Beton radial	3 *	3	3	3	3	3	3	3	3
Thermoelemente an der Bewehrung	--	--	3	--	--	--	--	--	--
Eintauchthermoelemente	--	--	--	1	5	--	3	--	4
Pyrometer	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Dampfdetektor	--	--	--	--	--	1	--	--	--
Körperschall-Aufnehmer	--	--	1	1	1	--	1	1	1
Gasprobe	--	1	1	1	1	1	1	1	--
Gasthermoelemente	--	2	2	2	2	2	2	2	--
Kinokamera	2	2	2	2	2	2	1	2	2
Fernsehkamera	--	--	1	1	--	--	--	--	--
Fotokamera	1	1	1	1	1	1	1	1	1

* wegen Durchschmelzen der Thermoelementleitungen ausgefallen

PNS
4323

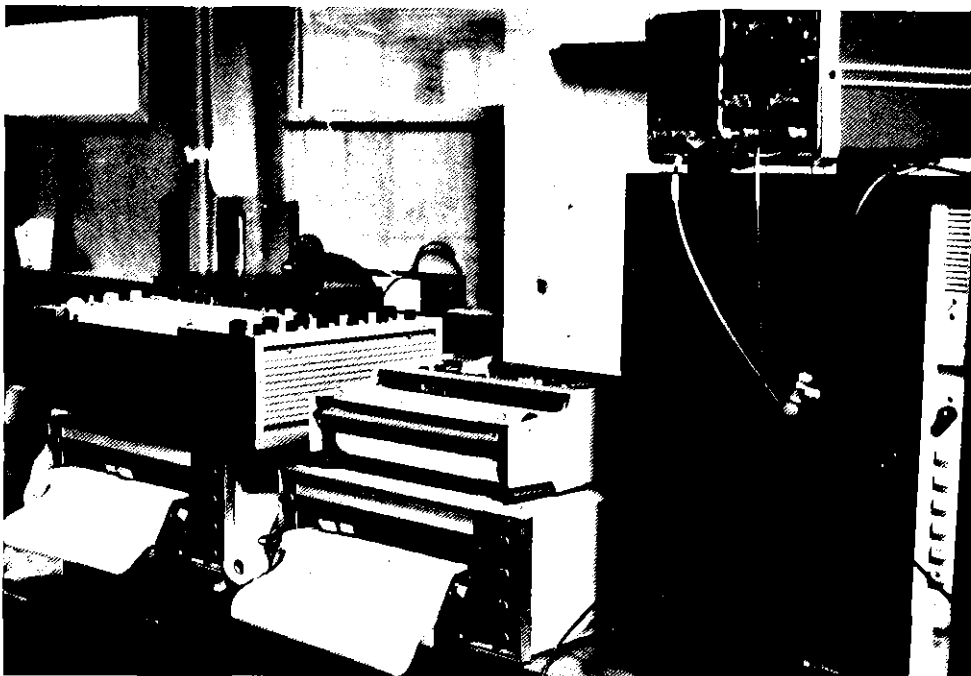
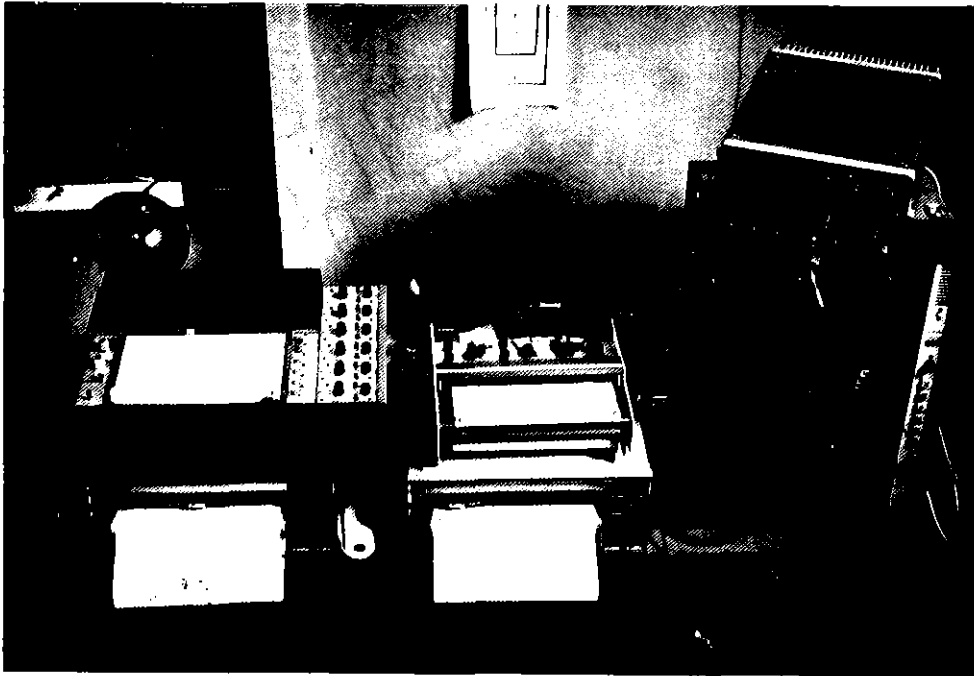
BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TABELLARISCHE ÜBERSICHT DER MESS- UND ÜBERWACHUNGSGERÄTE

GFK
RBT/IT



PNS 4323	BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN MESS- UND ÜBERWACHUNGSTECHNIK: PRINZIPSKIZZE	GFK RBT/IT
-------------	---	---------------

Abb. 19



PNS
4323

BETONTEIGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
DER MESSPLATZ

GFK
RBT/IT



GFK

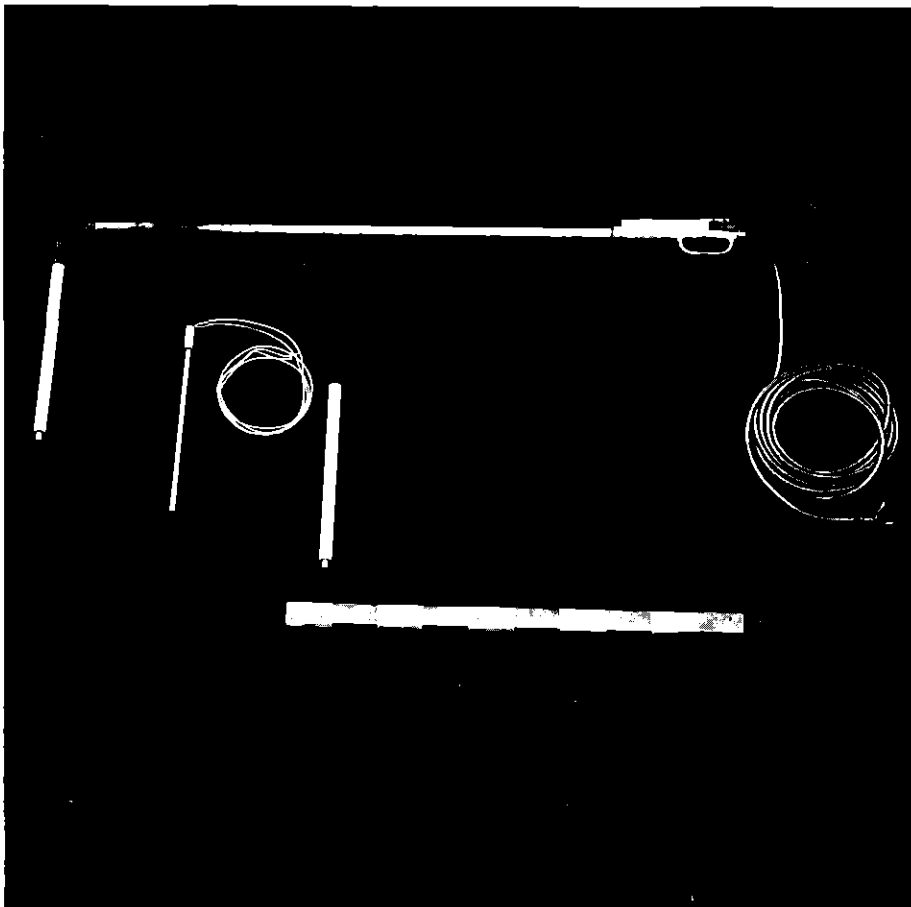
RBT/IT

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

PYROMETER

PNS

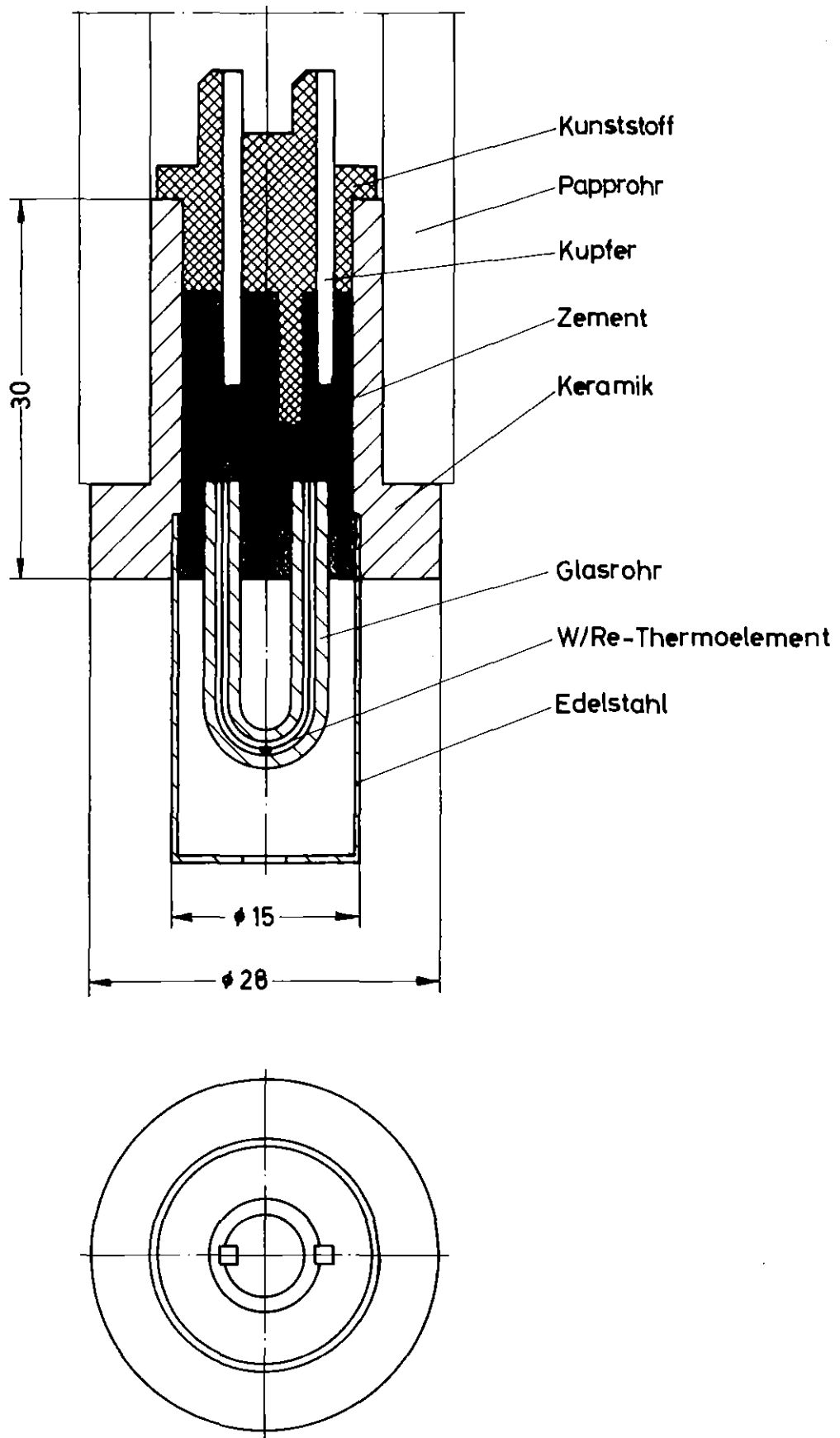
4373



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
EINTAUCHLANZE FÜR TEMPERATURMESSUNG,
TAUCH-MESSKOPF

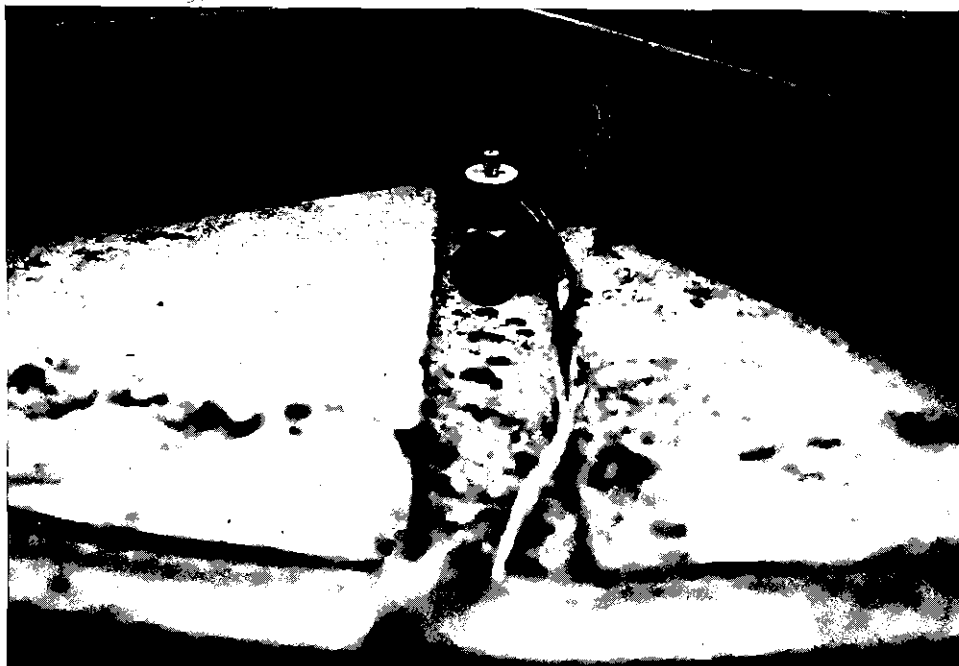
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TAUCH-MESSKOPF: MASS-SKIZZE

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
BESCHLEUNIGUNGS-AUFNEHMER IM TIEGELBODEN FÜR
KÖRPERSCHALLMESSUNG

GFK
RBT/IT

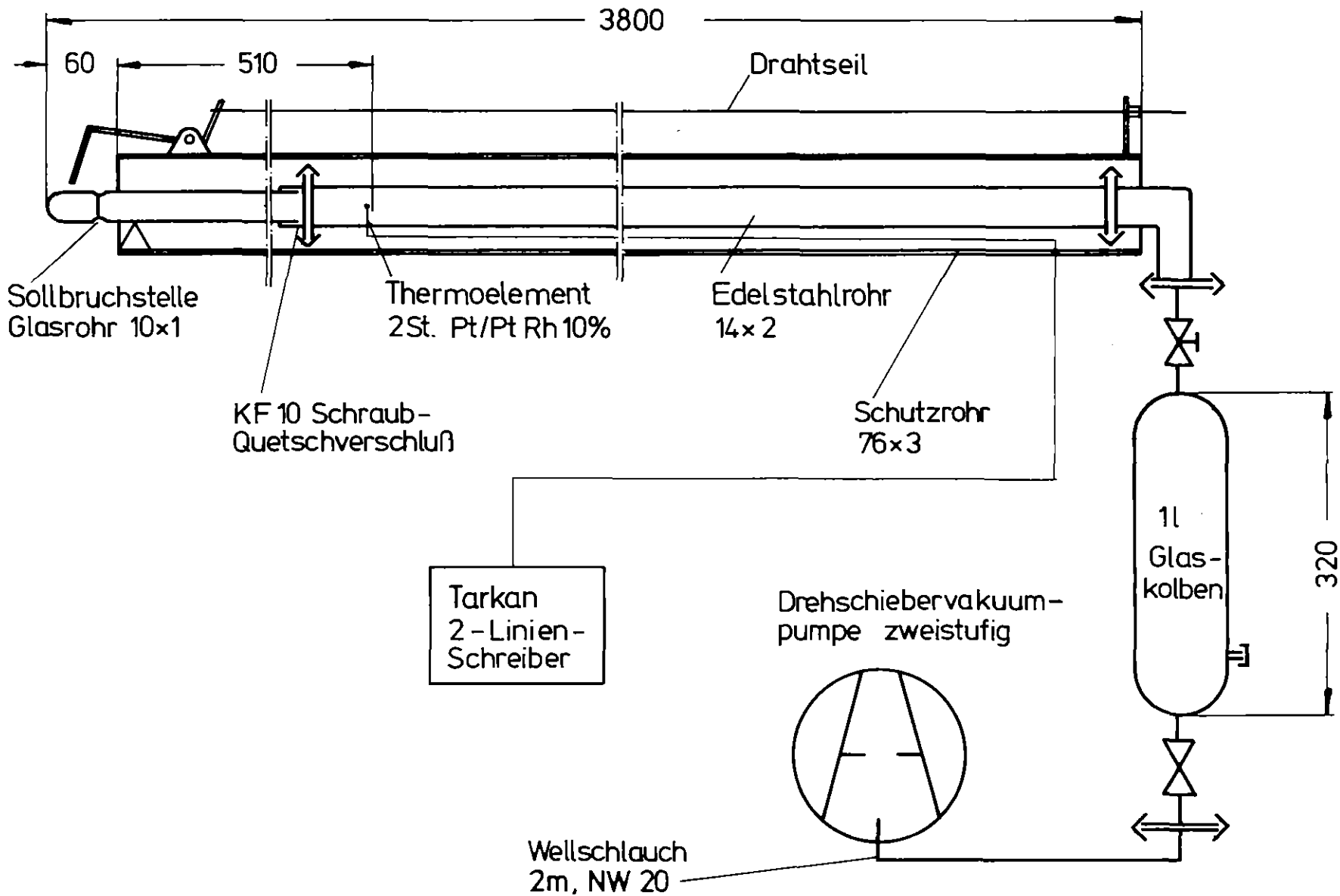


Abb. 25

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
GASPROBENAHMEEINRICHTUNG - PRINZIPIKIZZE

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
GASPROBENAHMEEINRICHTUNG WÄHREND DER PROBENAHMME

GFK
RBT/IT

Tiegel	Versuchstag	Bewehrung	Asbestzement- rohr	Spaltfüllung	Schmelze	Innere Form	Zündmasse / kg /
A	18.4.1977	Glasfaser	ja	Luft	Eisen	Zylinder	500
B	19.4.1977	Glasfaser	ja	SAFFIL	Eisen, Schlacke	Zylinder	250
C	2.5.1977	Stahl	nein	--	Eisen, Schlacke	Zylinder	250
D	3.5.1977	Glasfaser	ja	ohne Spalt, Rohr getrennt	Eisen, Chrom, Nickel, Schlacke	Zylinder	250
E	9.5.1977	Glasfaser	ja	SAFFIL	Eisen, Schlacke	Zylinder flach	60 + 40
F	20.4.1977	Glasfaser	ja	SAFFIL	Eisen, Schlacke	Zylinder tief	250
G	10.5.1977	Glasfaser	ja	SAFFIL	Eisen, Schlacke	Halbkugel	100
H	11.5.1977	Glasfaser	nein	--	Eisen, Schlacke	Zylinder	400
I	11.5.1977	Glasfaser	nein	--	Scklacke	Zylinder	

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TECHNISCHE DATEN ZU DEN VERSUCHEN

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E: BLASEN FILMSEQUENZEN 24 HZ

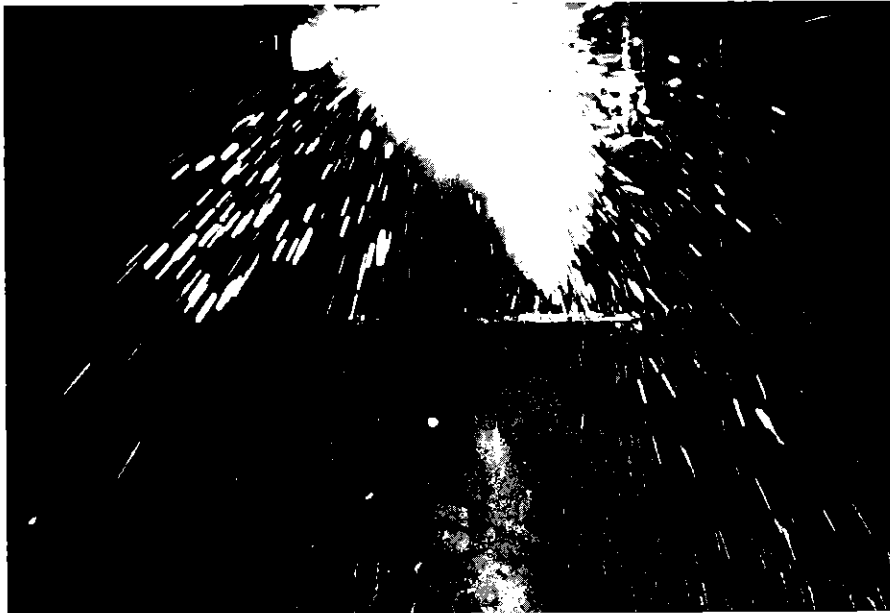
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E: BLASEN FILMSEQUENZEN 24 HZ

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H, I - EINGIESSVORGANG

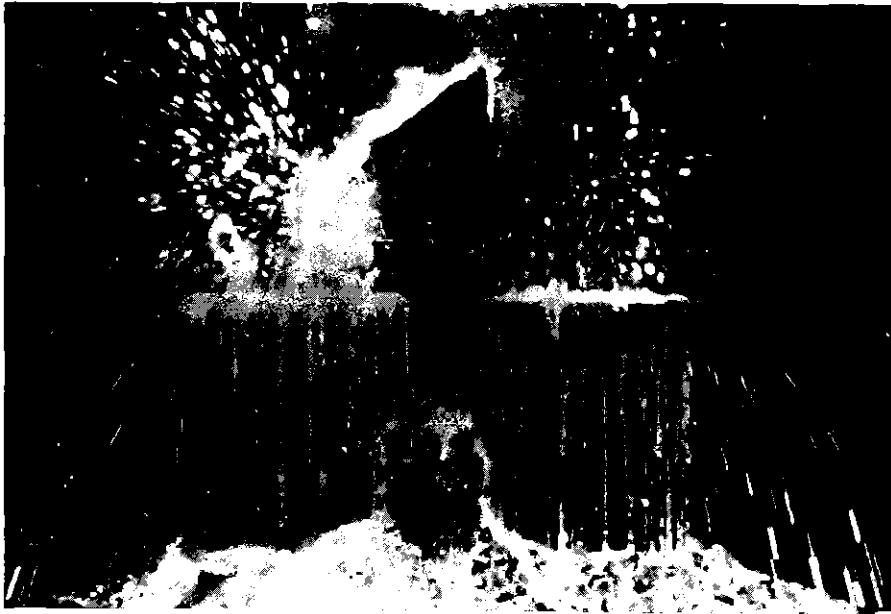
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H, I - EINGIESSVORGANG

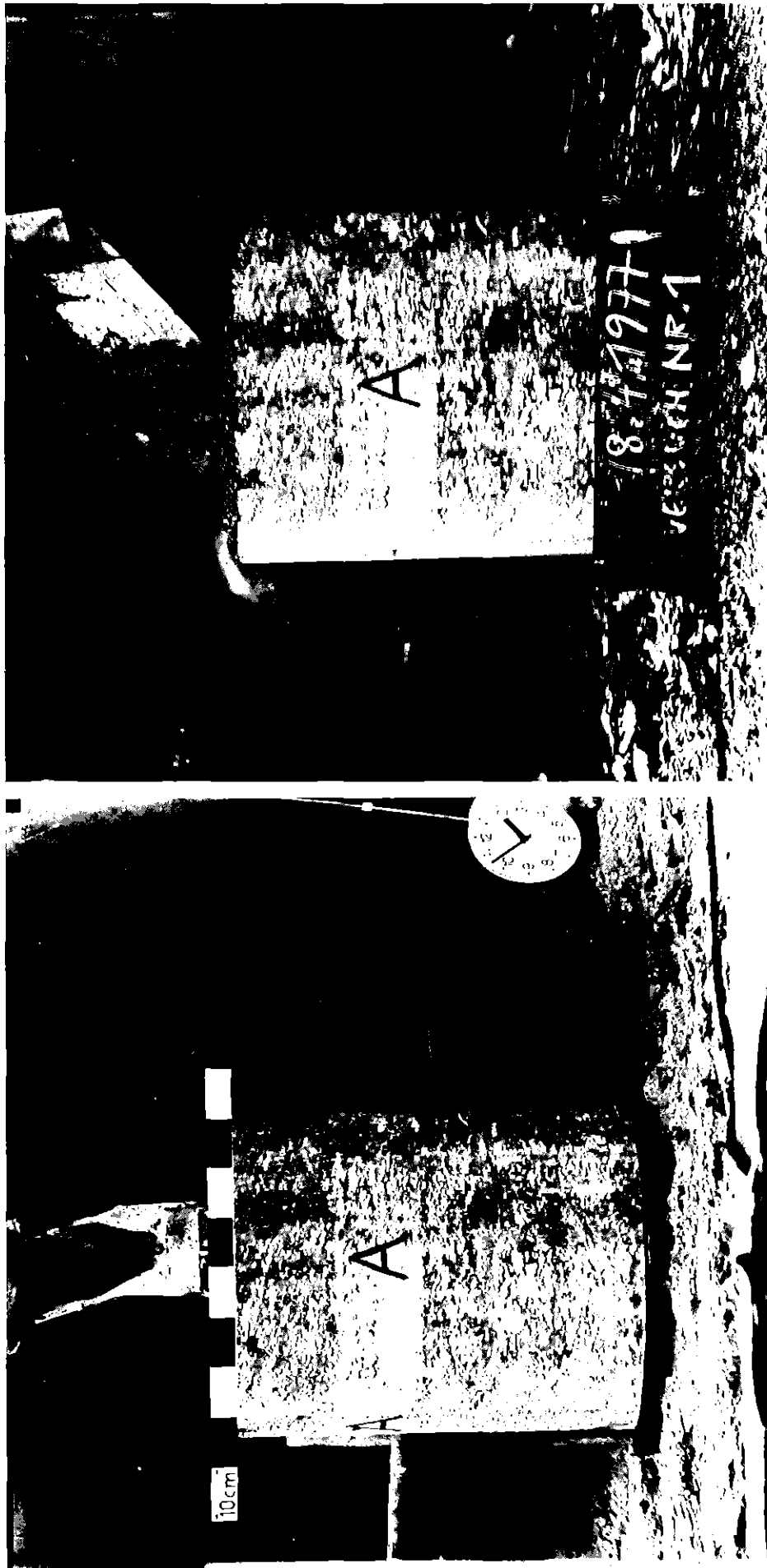
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H, I - ERUPTIONEN

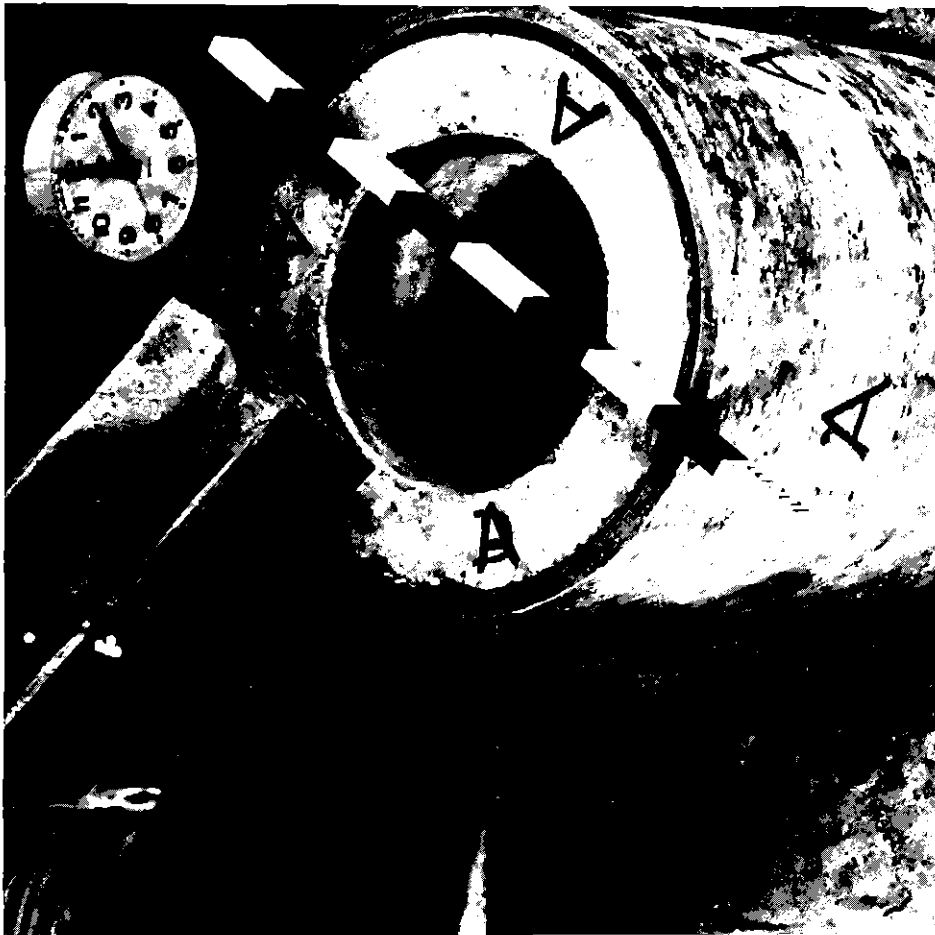
GFK
RBT/IT



BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL A - VORDERANSICHT

PNS
 4323

GFK
 RBT/IT



PNS

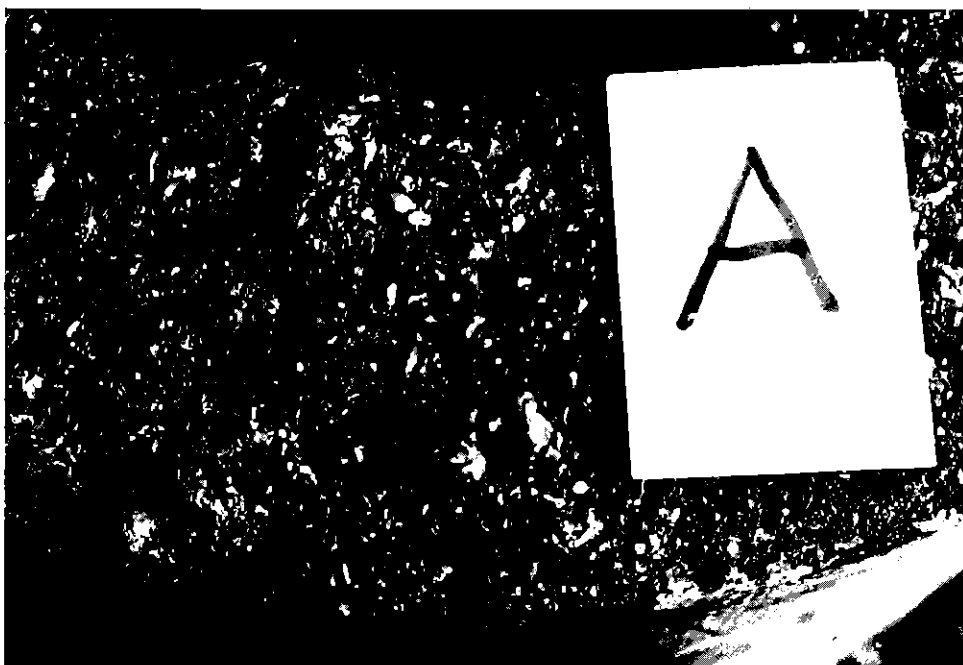
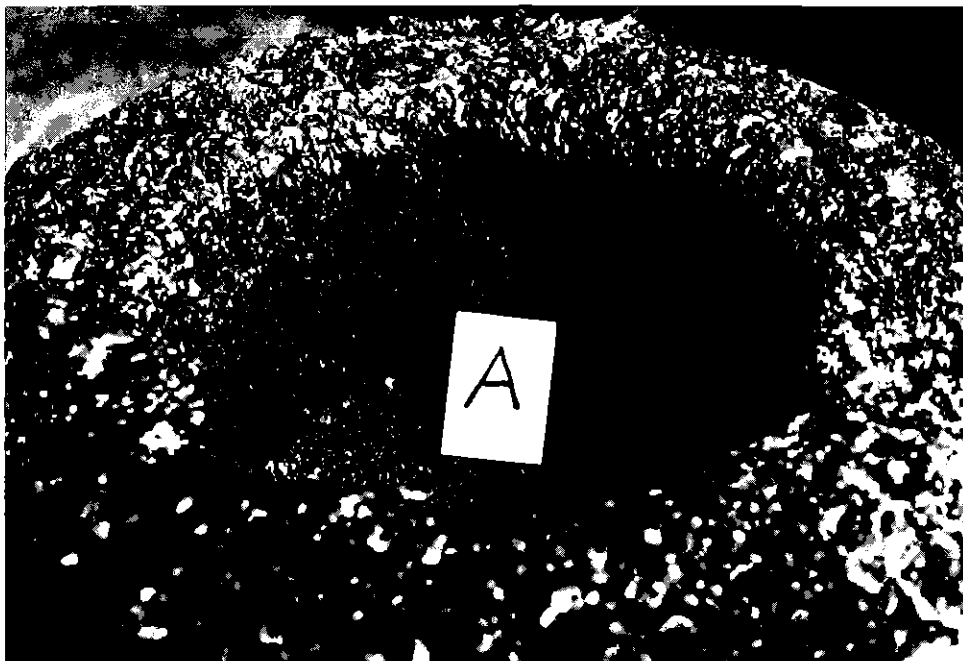
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

TIEGEL A - DRAUFSICHT

GFK

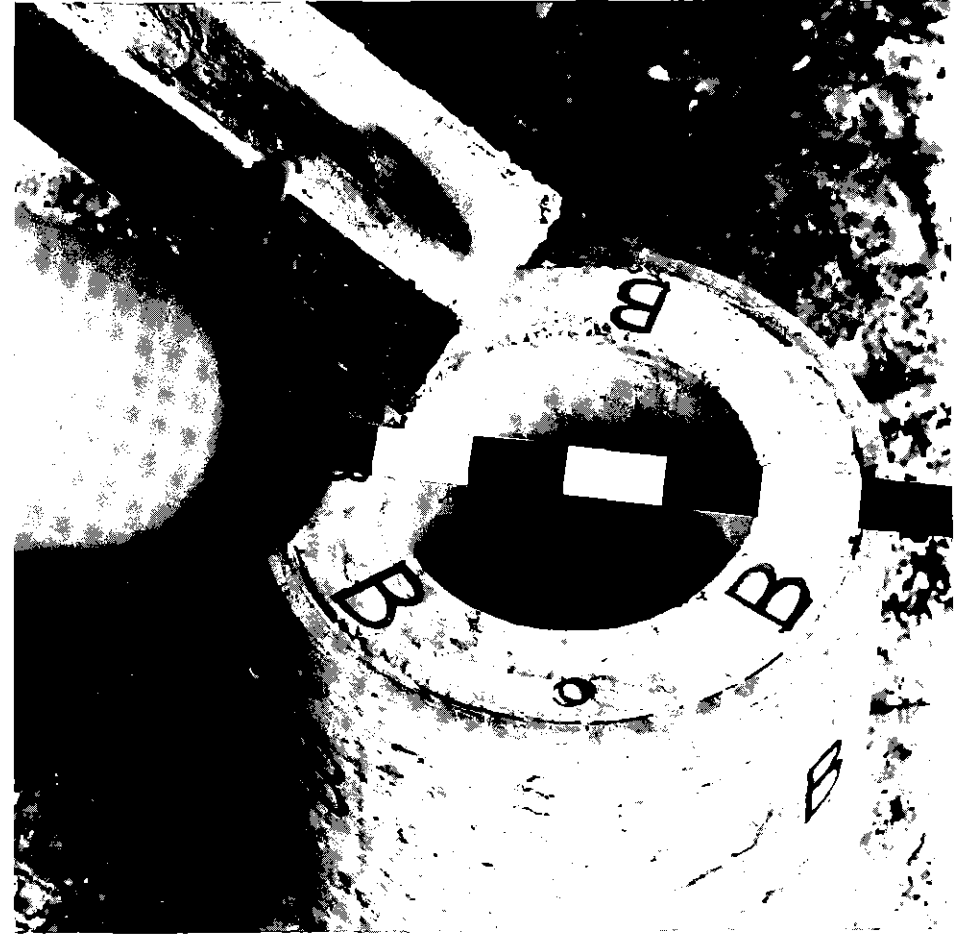
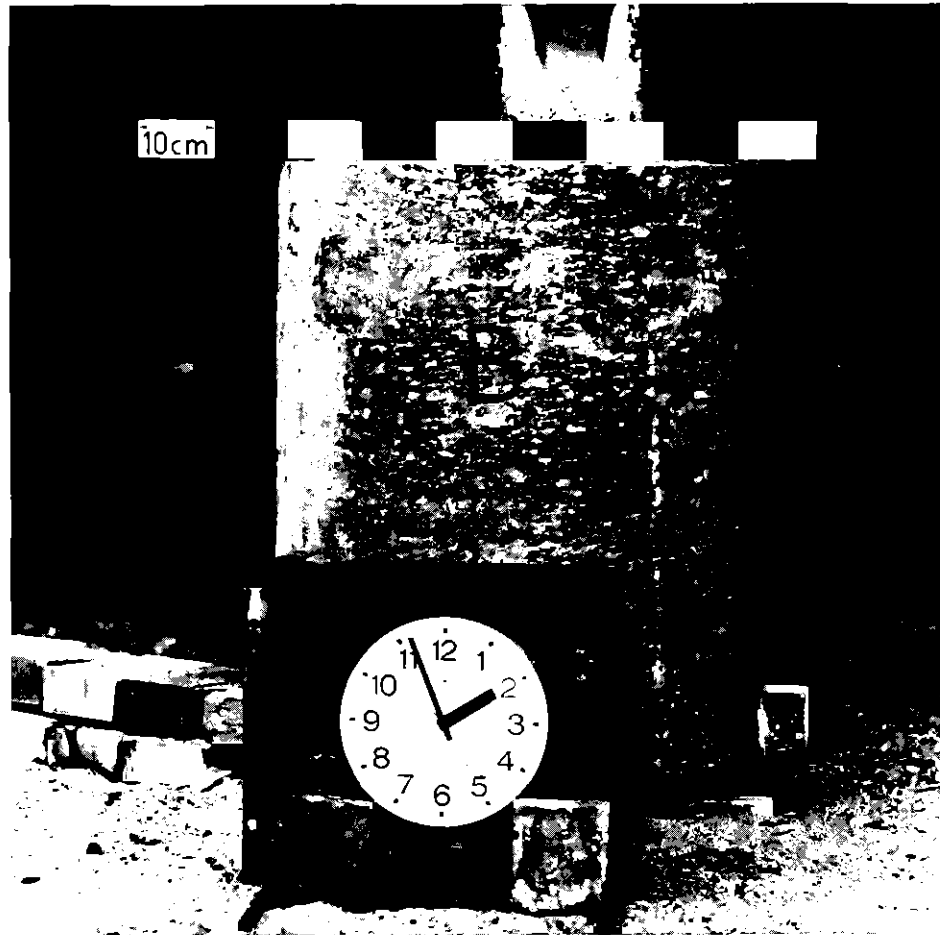
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL A- ERSTARRTER AUSWURF

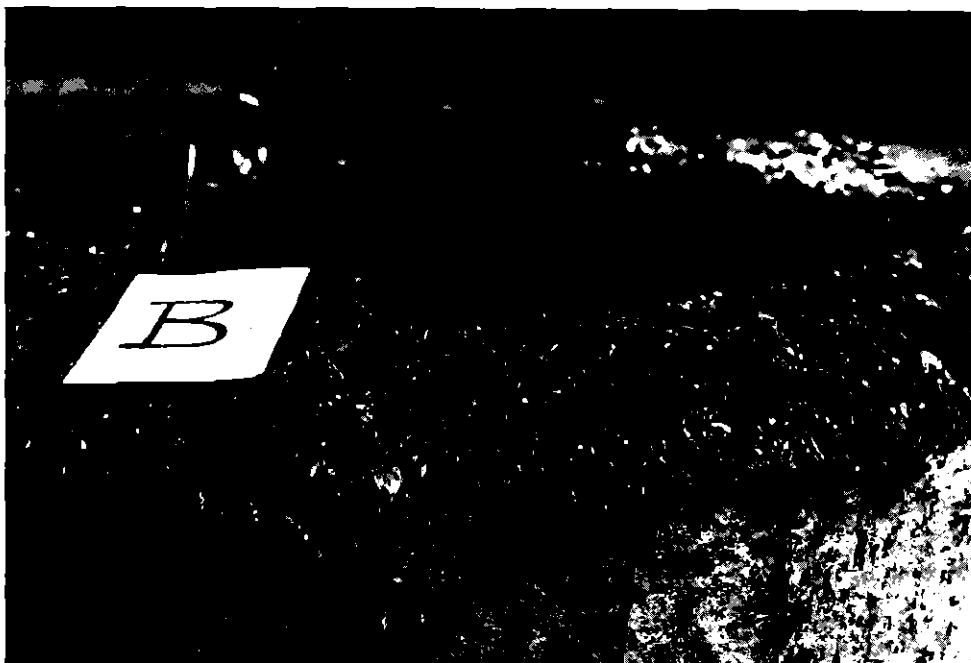
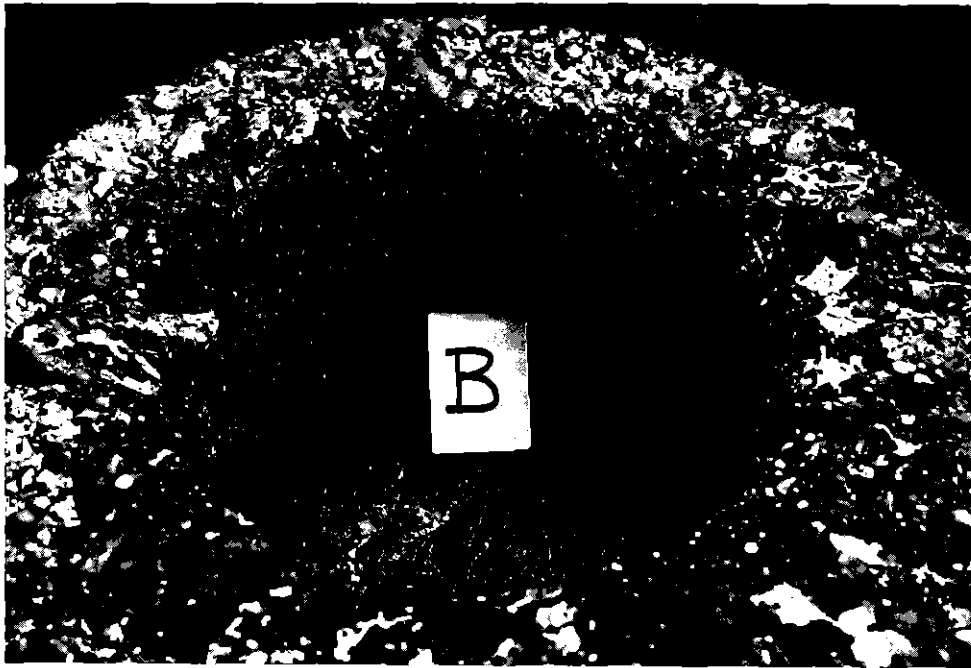
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - VORDERANSICHT UND DRAUFSICHT

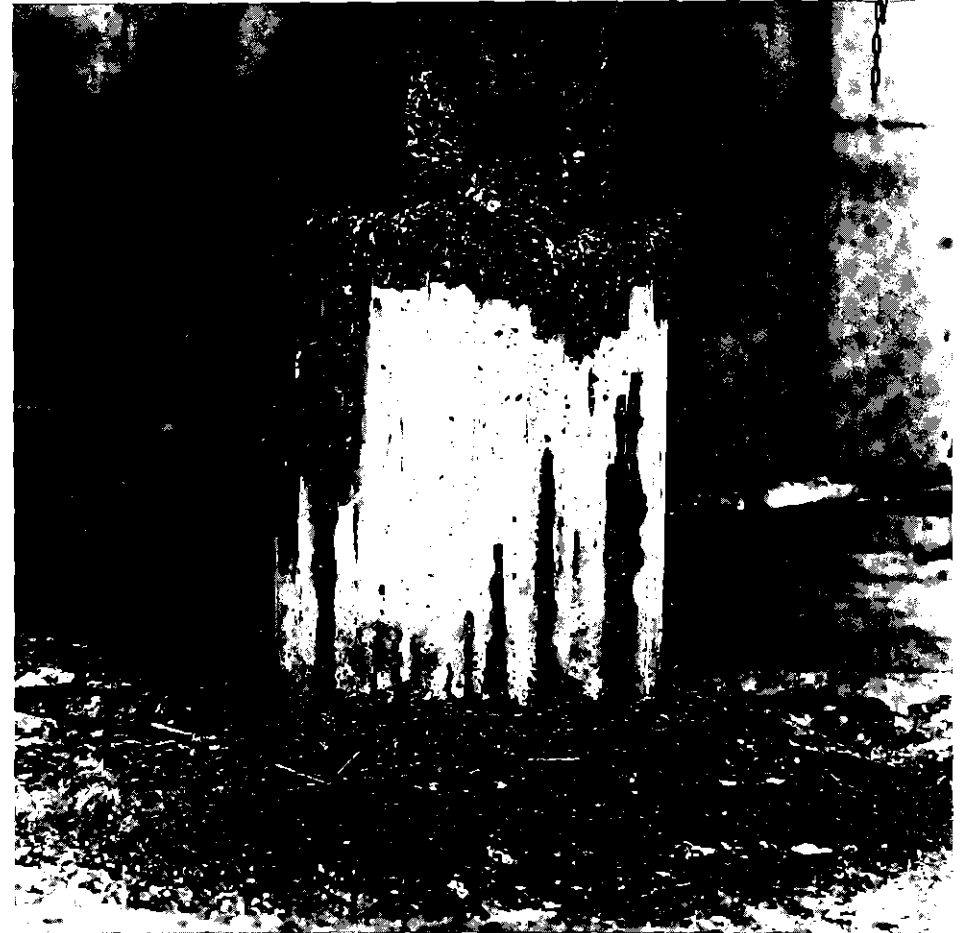
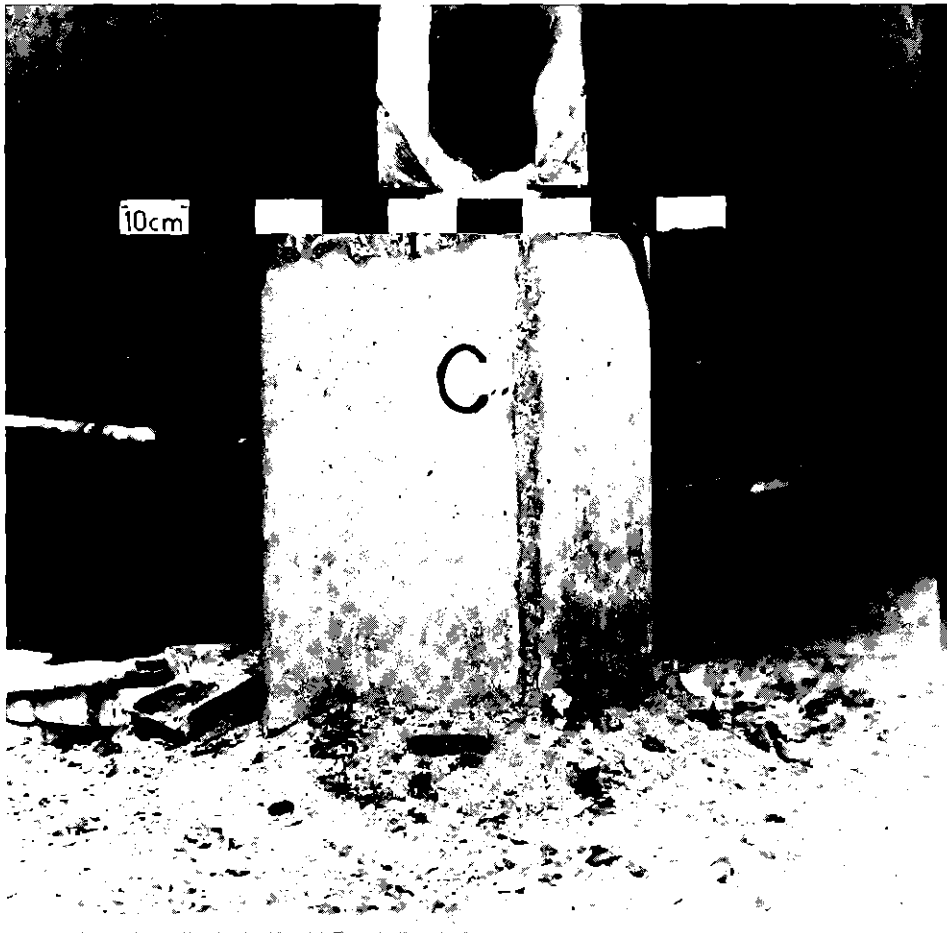
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - ERSTARRTER AUSWURF

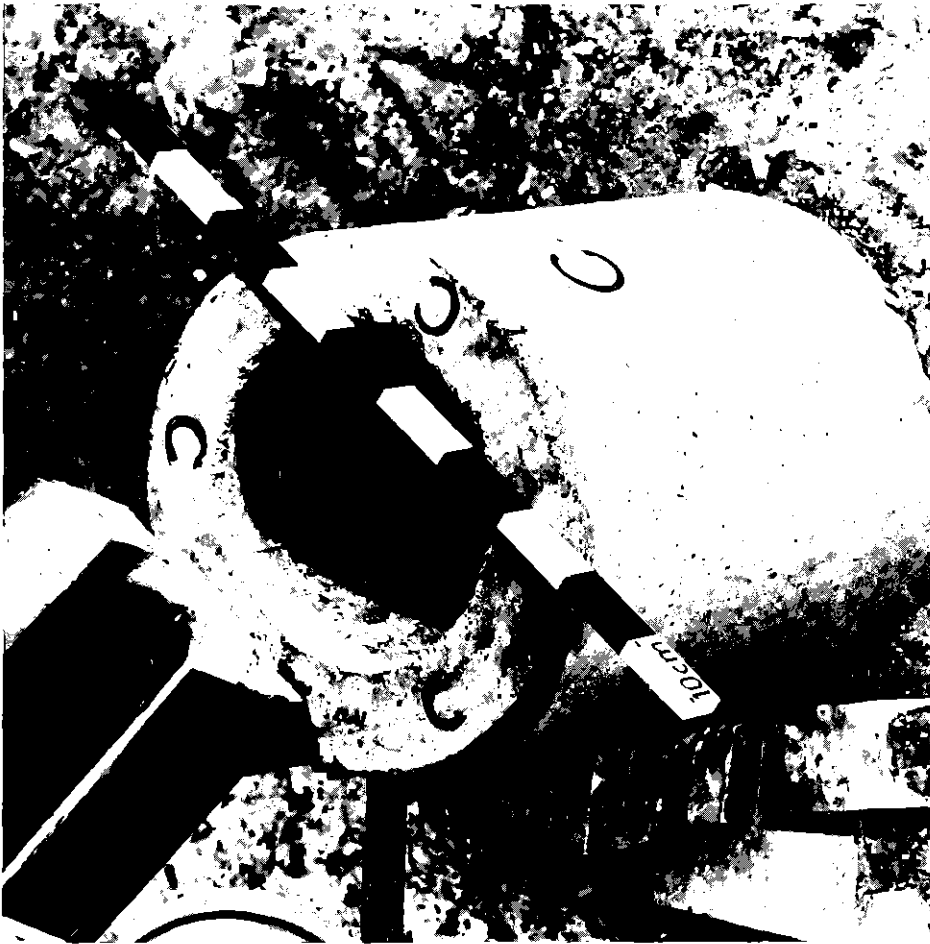
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - VORDERANSICHT

GFK
RBT/IT



GFK
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - DRAUFSICHT

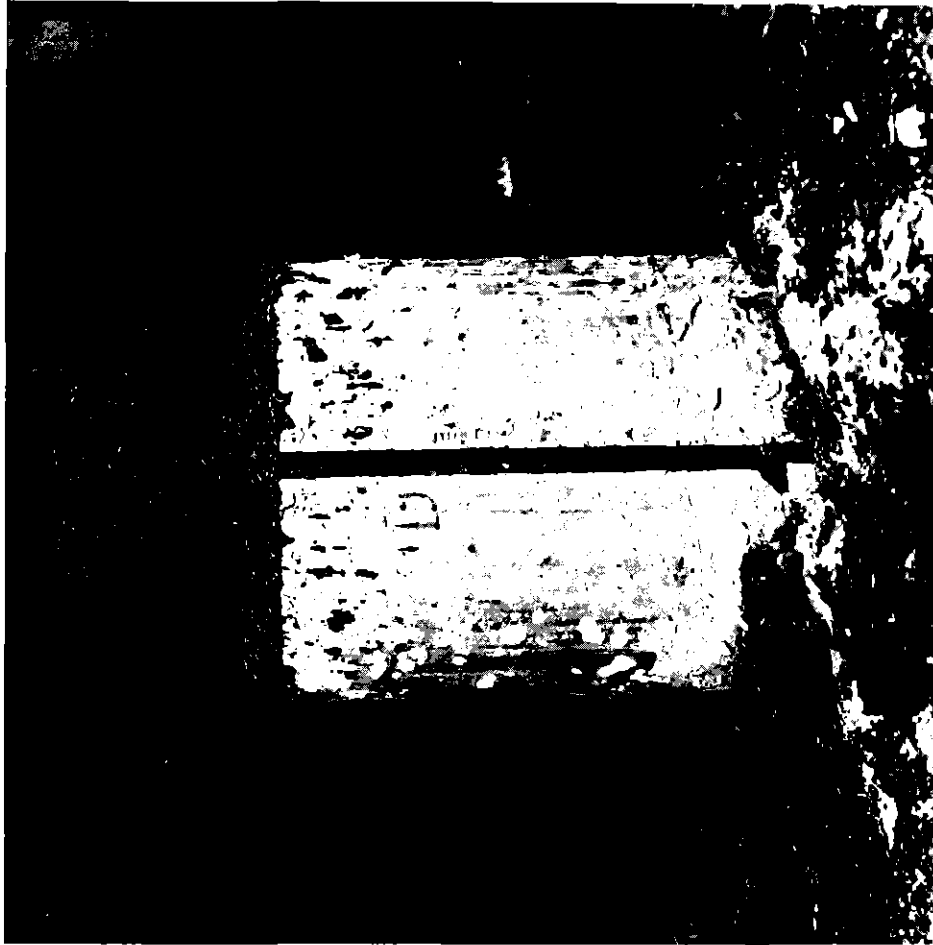
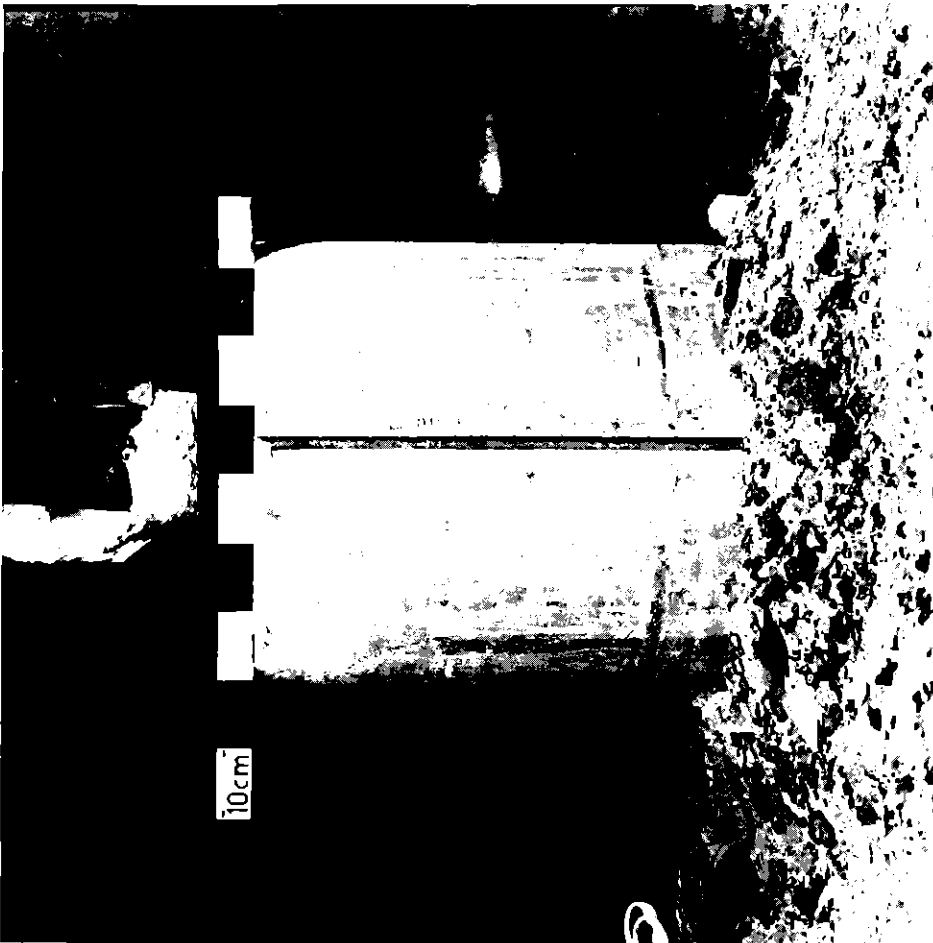
GFK



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - ERSTARRTER AUSWURF

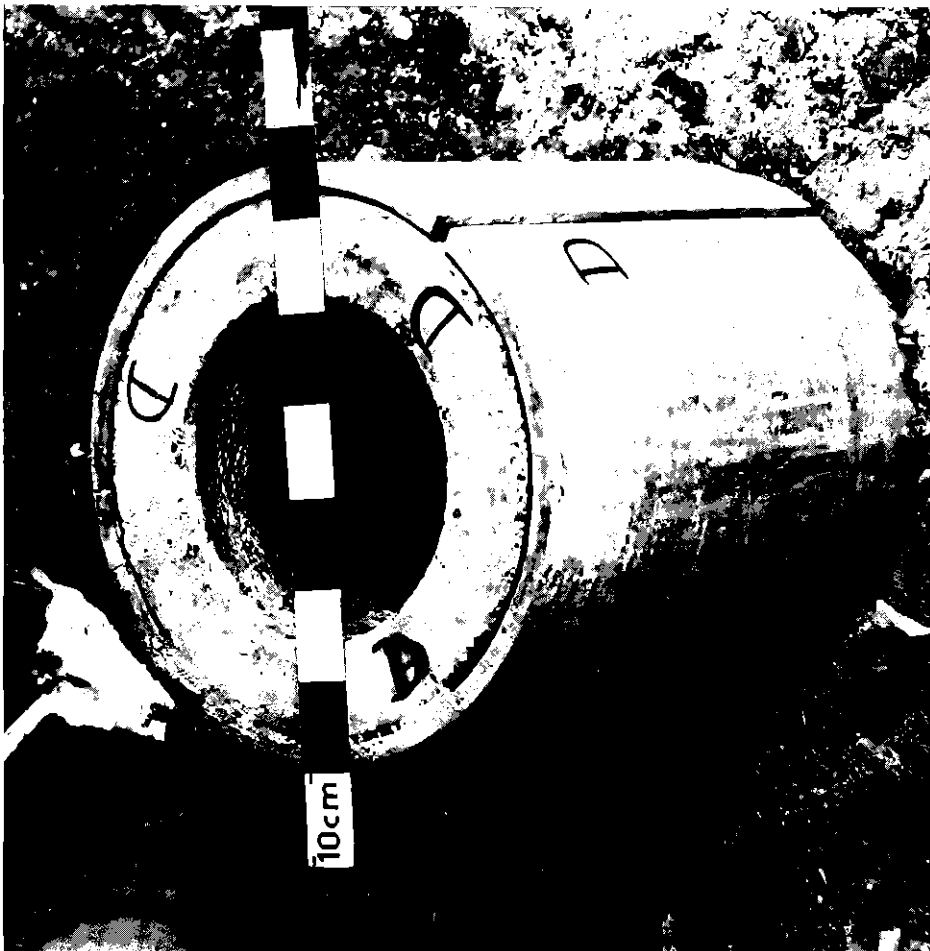
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - VORDERANSICHT

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - DRAUFSICHT

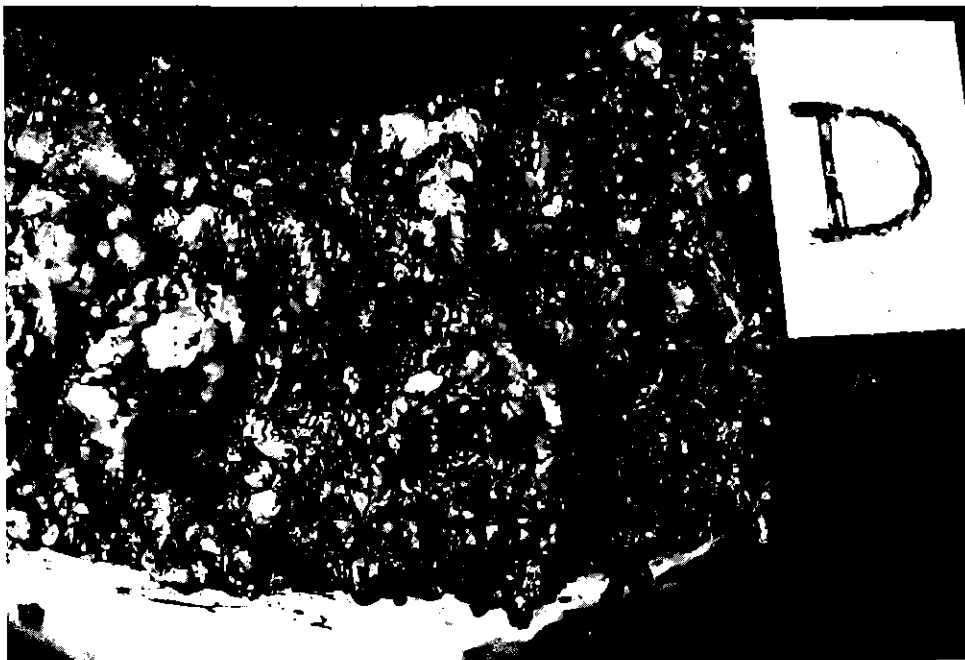
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - KRUSTE, AUSWURF AN INNENWAND

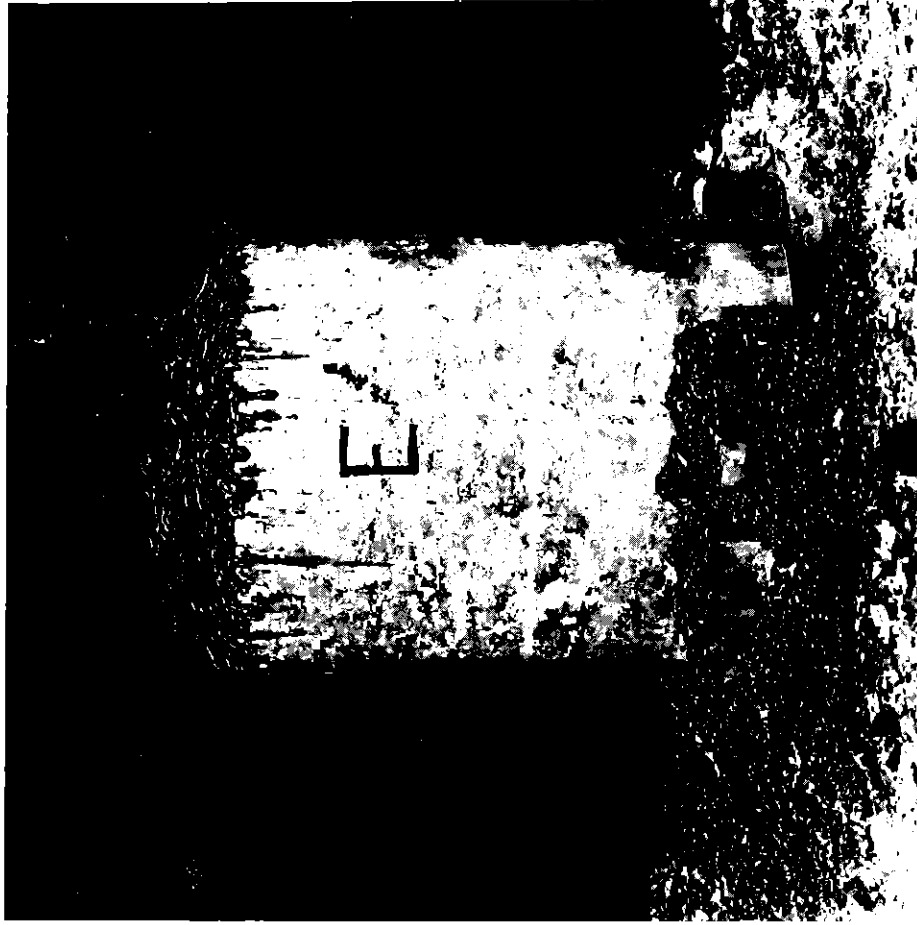
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - AUSWURF AUF OBERER PLANFLÄCHE

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - VORDERANSICHT

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - DRAUFSICHT

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - AUFGEBROCHENE OBERE KRUSTE UND
AUSWURF

GFK
RBT/IT

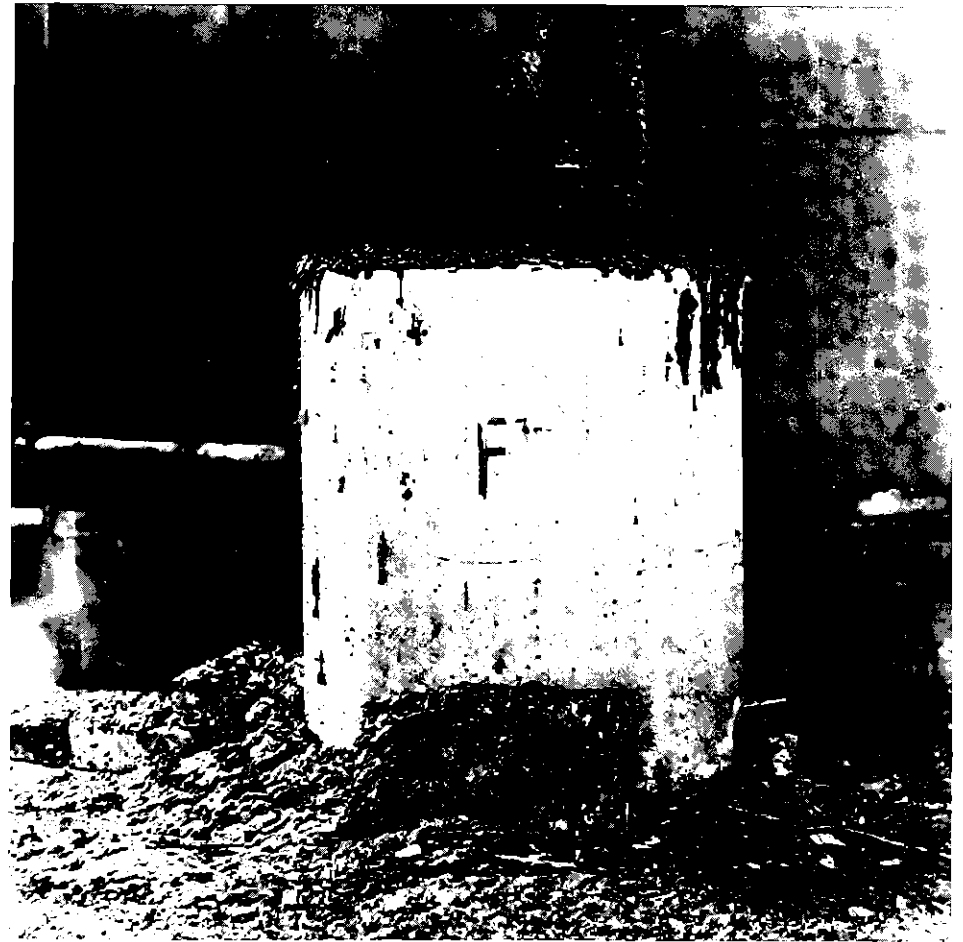


Abb. 48

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - VORDERANSICHT

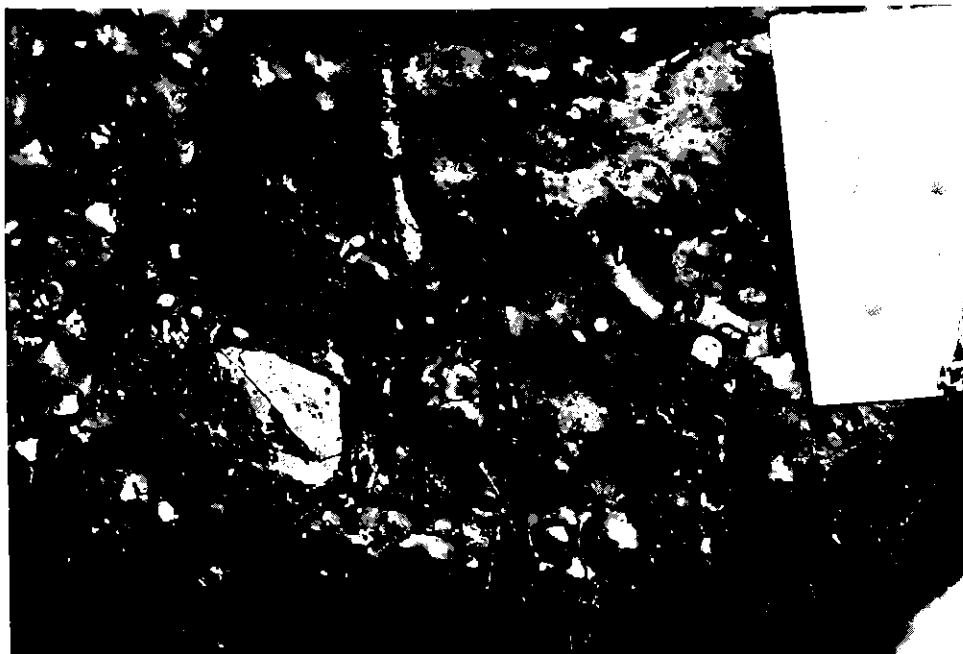
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - DRAUFSICHT

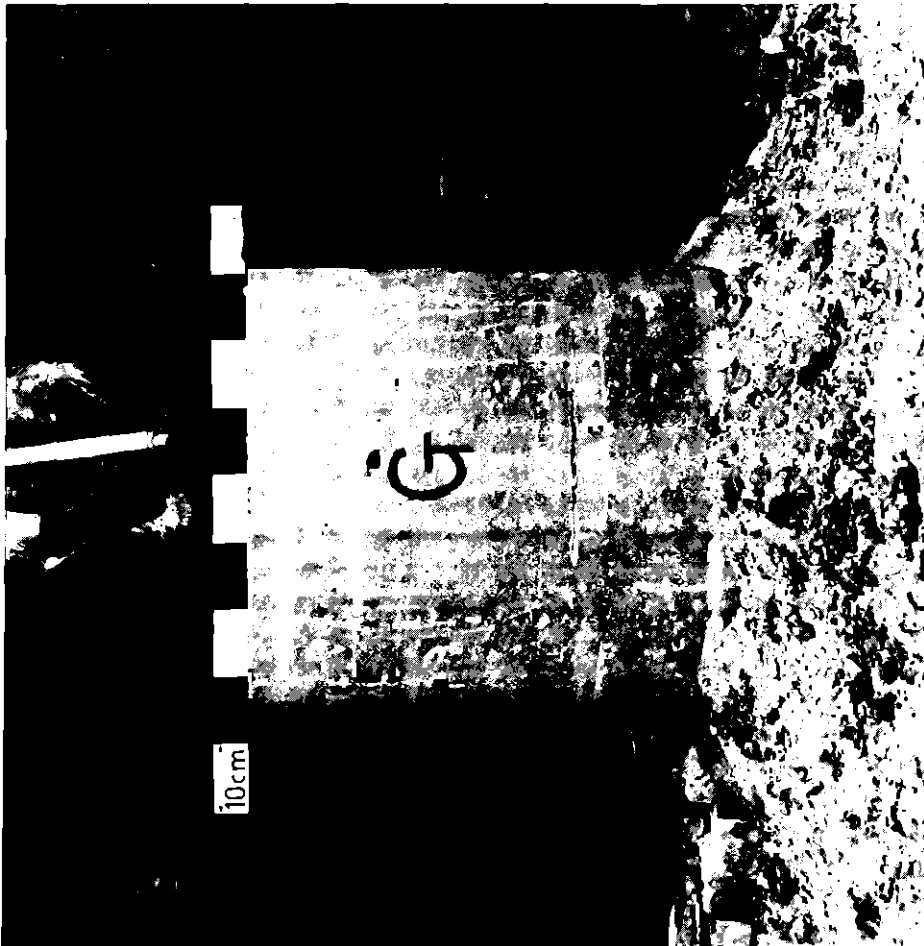
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - AUSWURF

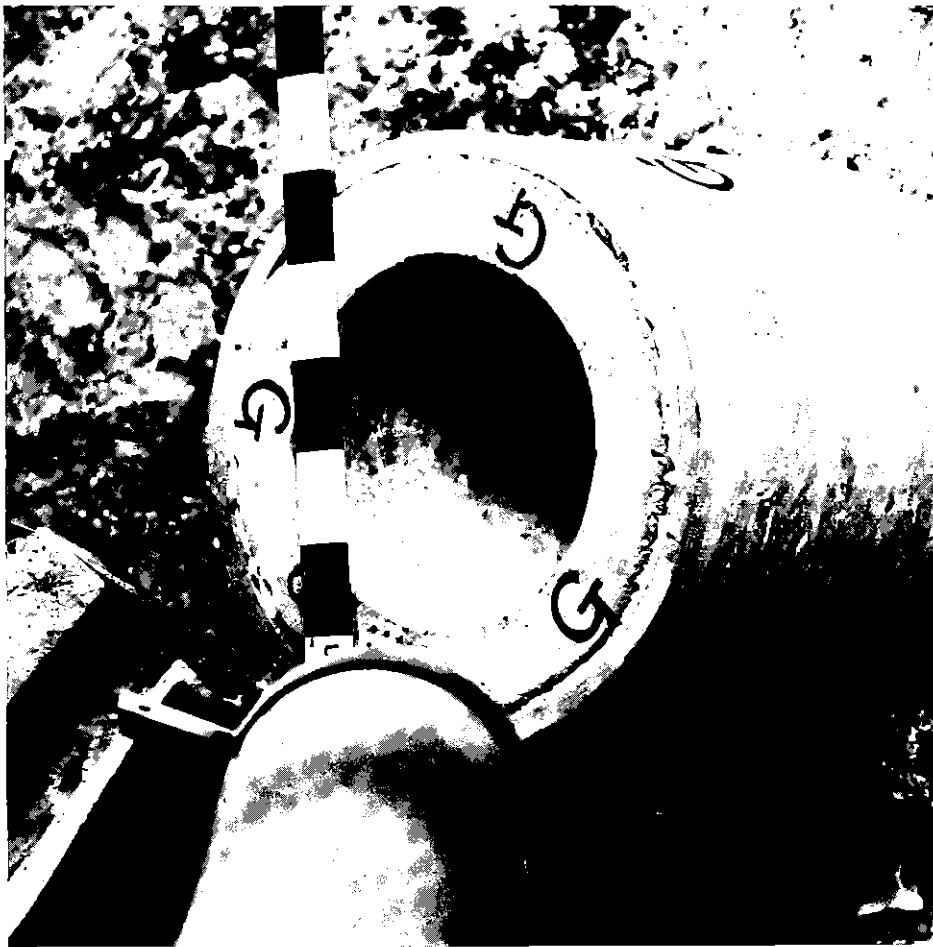
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - VORDERANSICHT

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - DRAUFSICHT

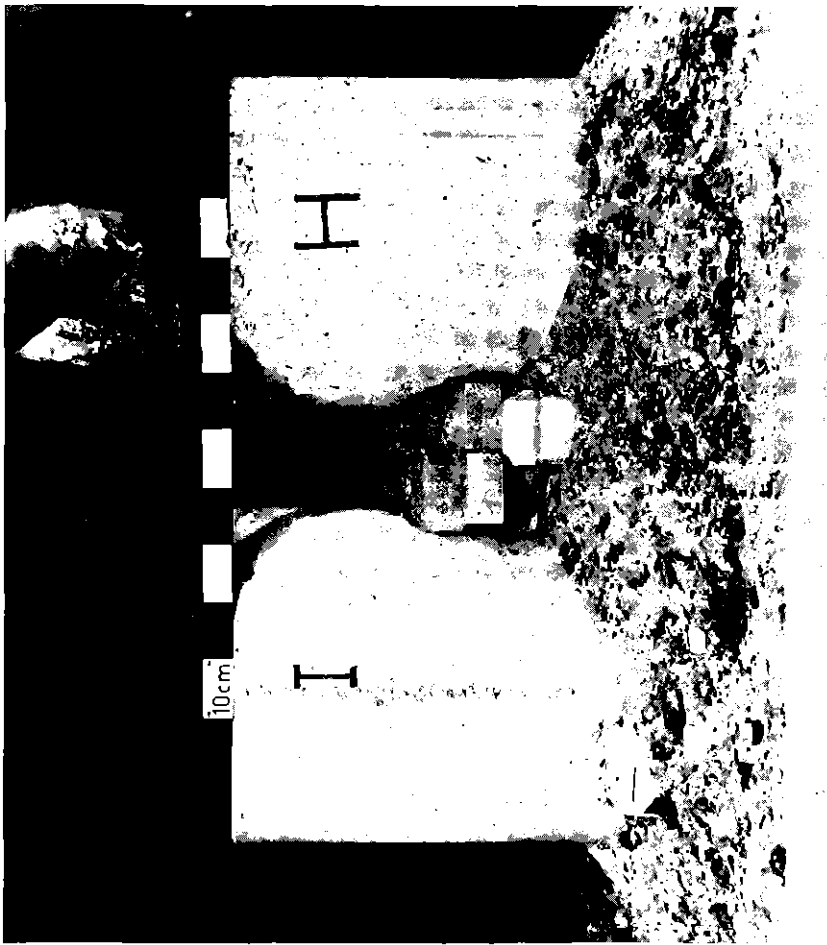
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - AUSWURF

GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H, I - VORDERANSICHT

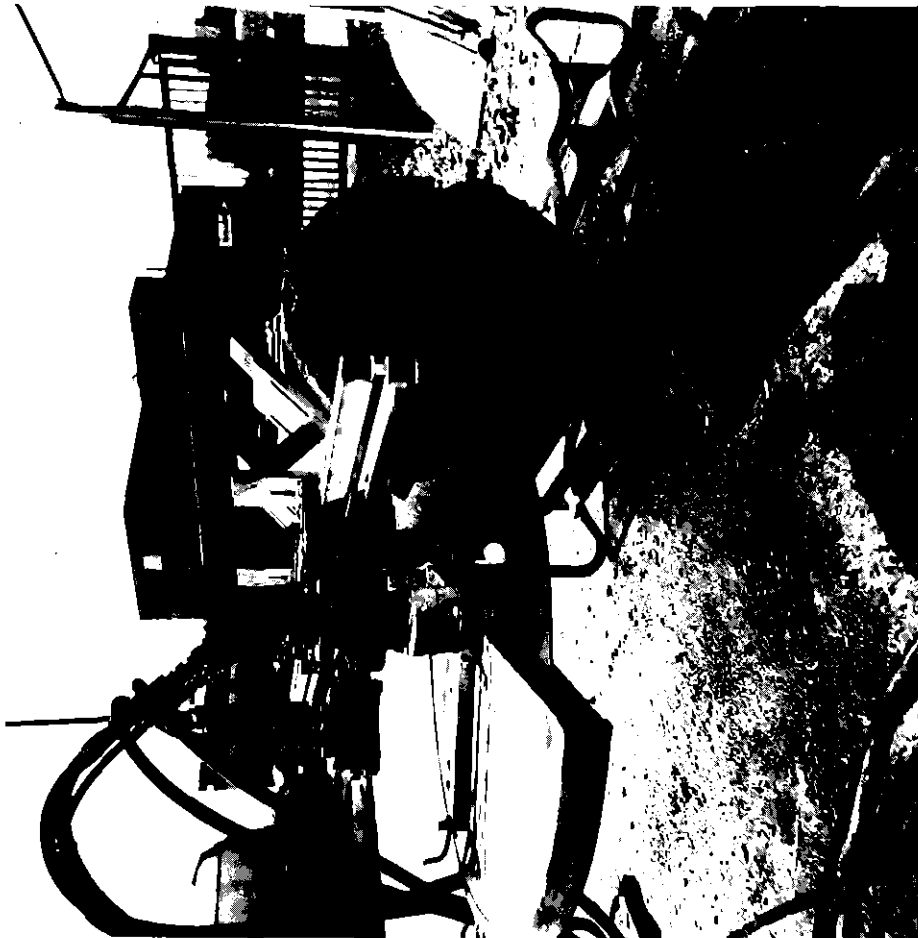
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H, I - DRAUFSICHT

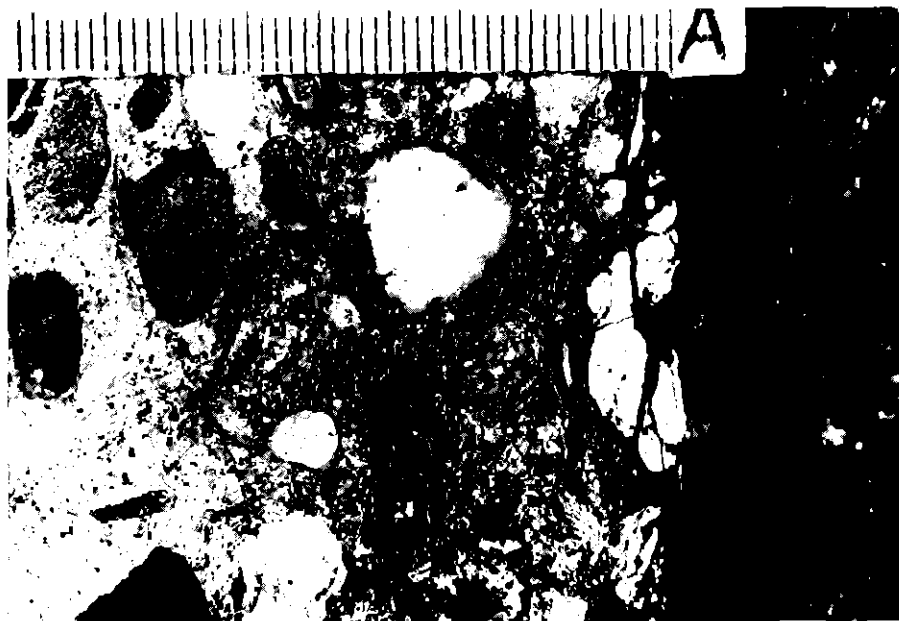
GFK
RBT/IT



GFK
RBT/IT

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TRENNEINRICHTUNG

PNS
4323



ANTHARZITFARBENE SCHMELZSCHICHT

REGULUSSPALT



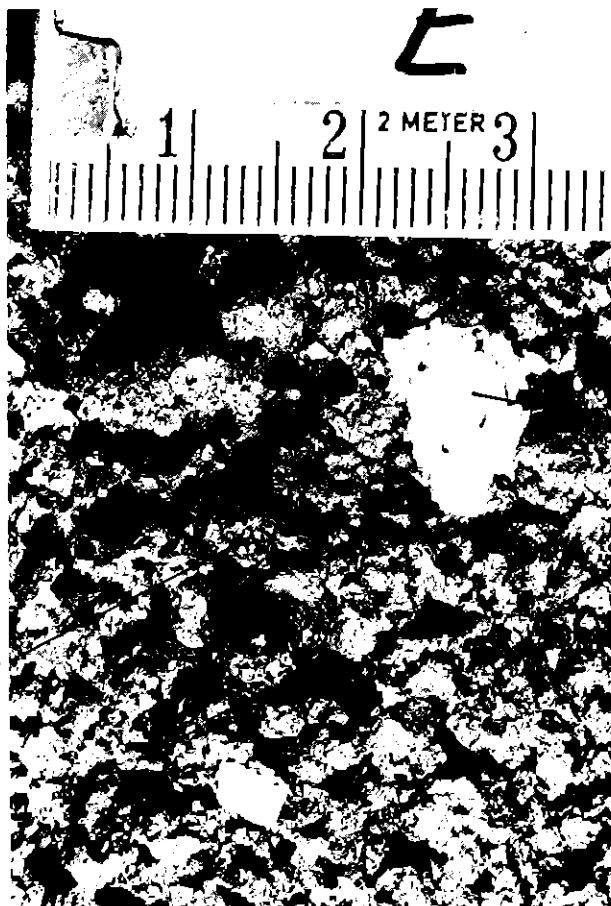
PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
REGULUSSPALT, ANTHRAZITFARBENE SCHMELZSCHICHT

GFK
RBT/IT



GRANULAT



KIESELSTEIN

METALLEINSCHLUSS

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
KIESELSTEINE UND METALLEINSCHLÜSSE IN DER OXID-
SCHMELZE, TROPFENARTIGES, METALLISCHES GRANULAT

GFK
RBT/IT

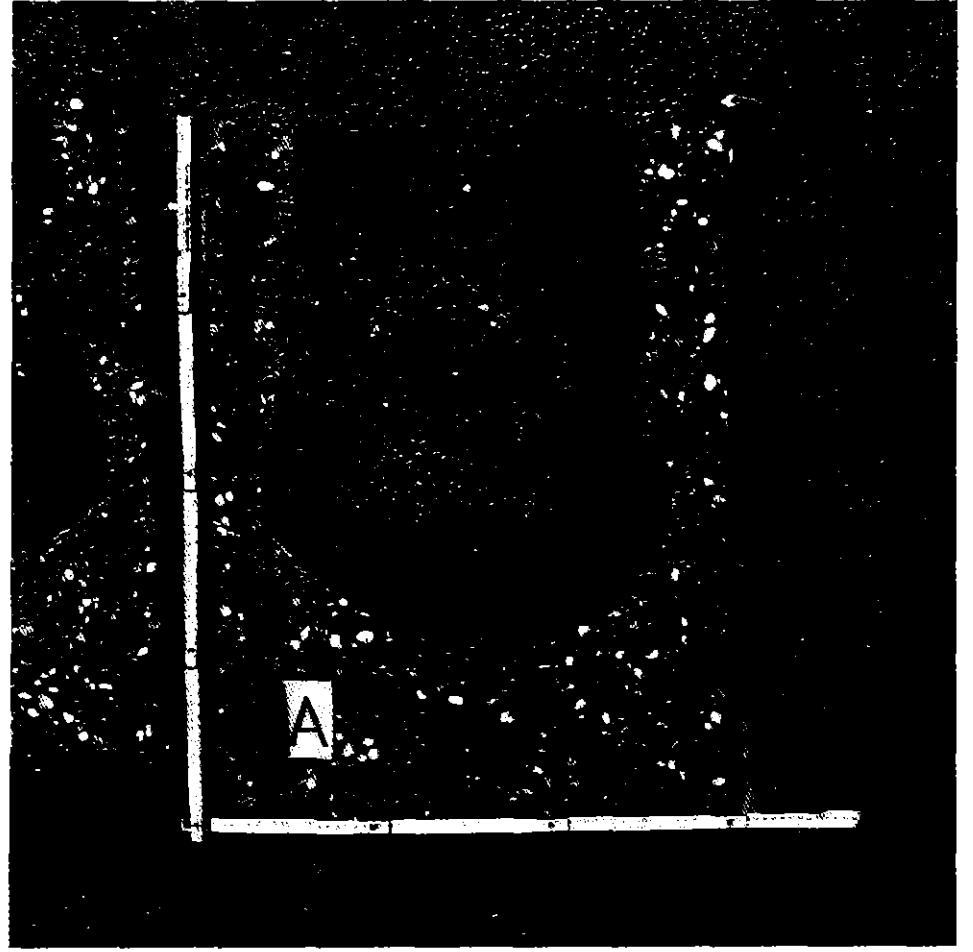
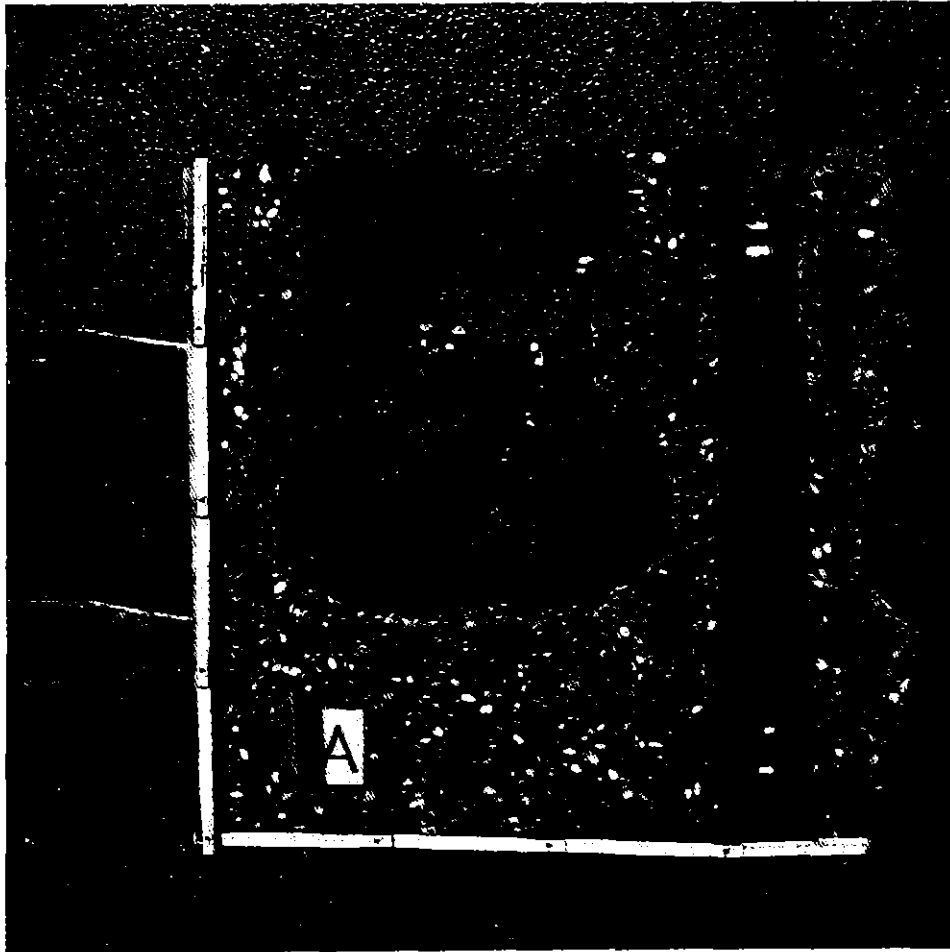


Abb. 59

PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS A

GFK
RBT-IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL A - REGULUSANSICHTEN

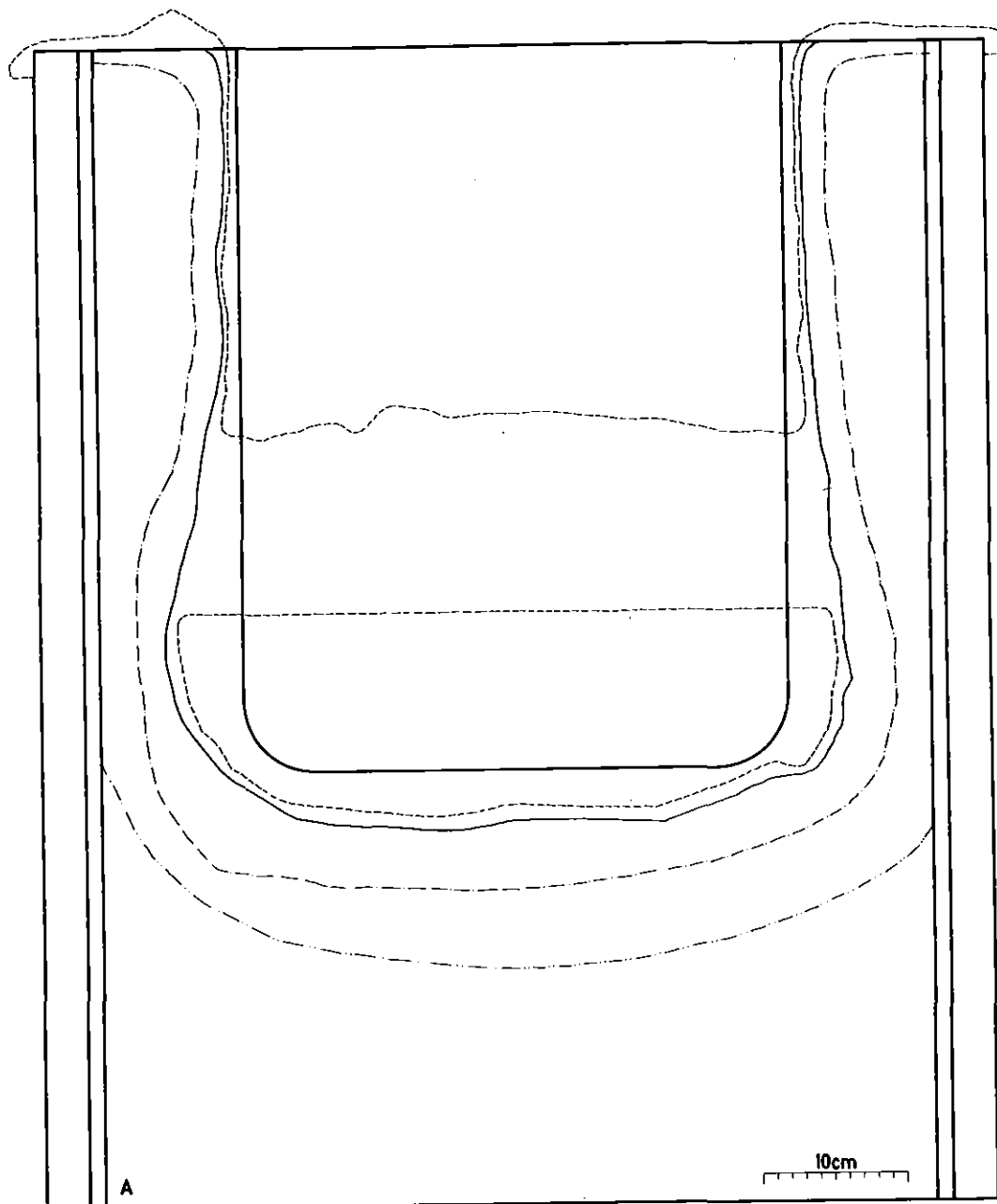
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITTSCHMELZEN
TIEGEL A - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT

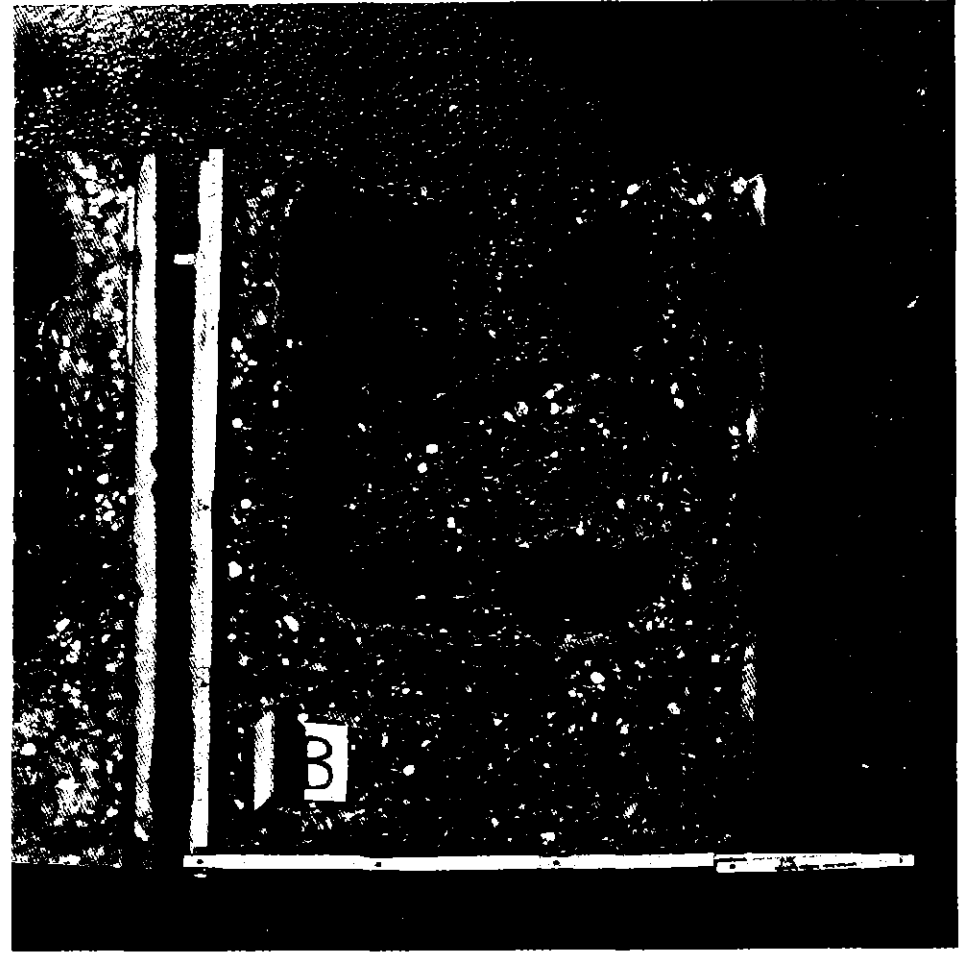
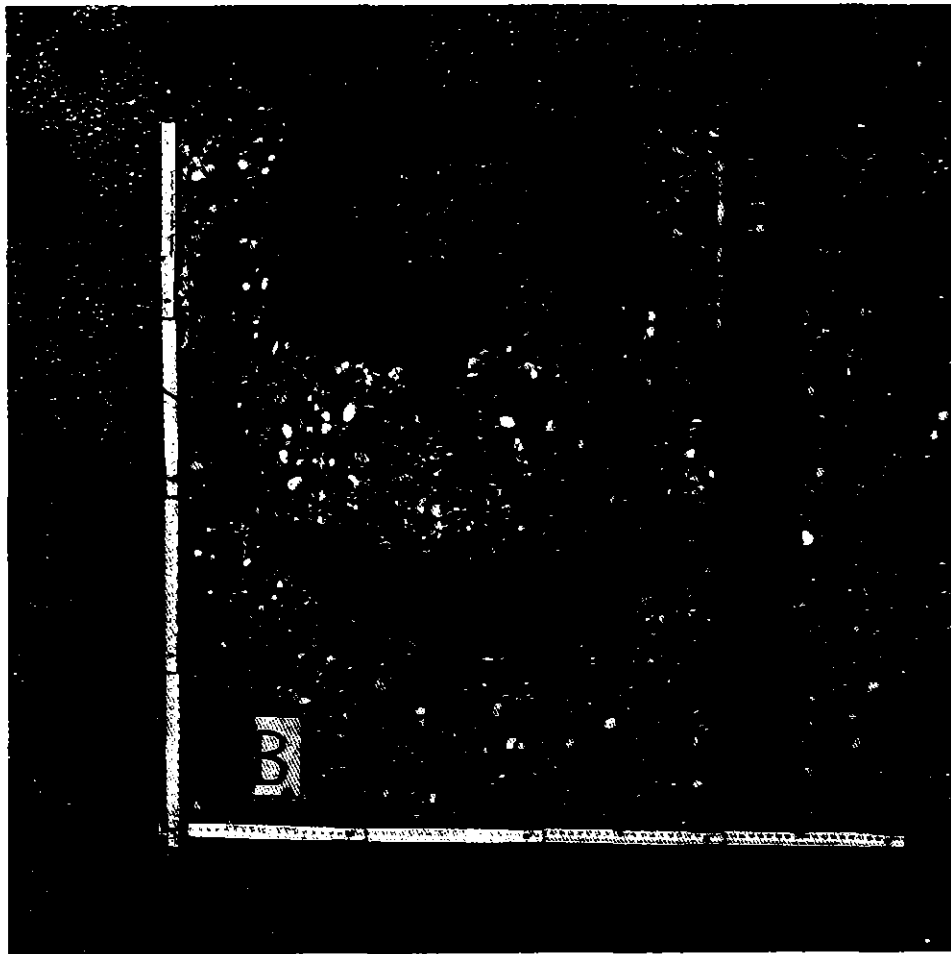


- Ursprüngliche Kontur
- - - Schmelzfront
- - - Konturen der erstarrten Schmelze
- - - Kontur der dehydrierten Zone
- - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL A - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTES

GFK
RBT/IT



PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS B

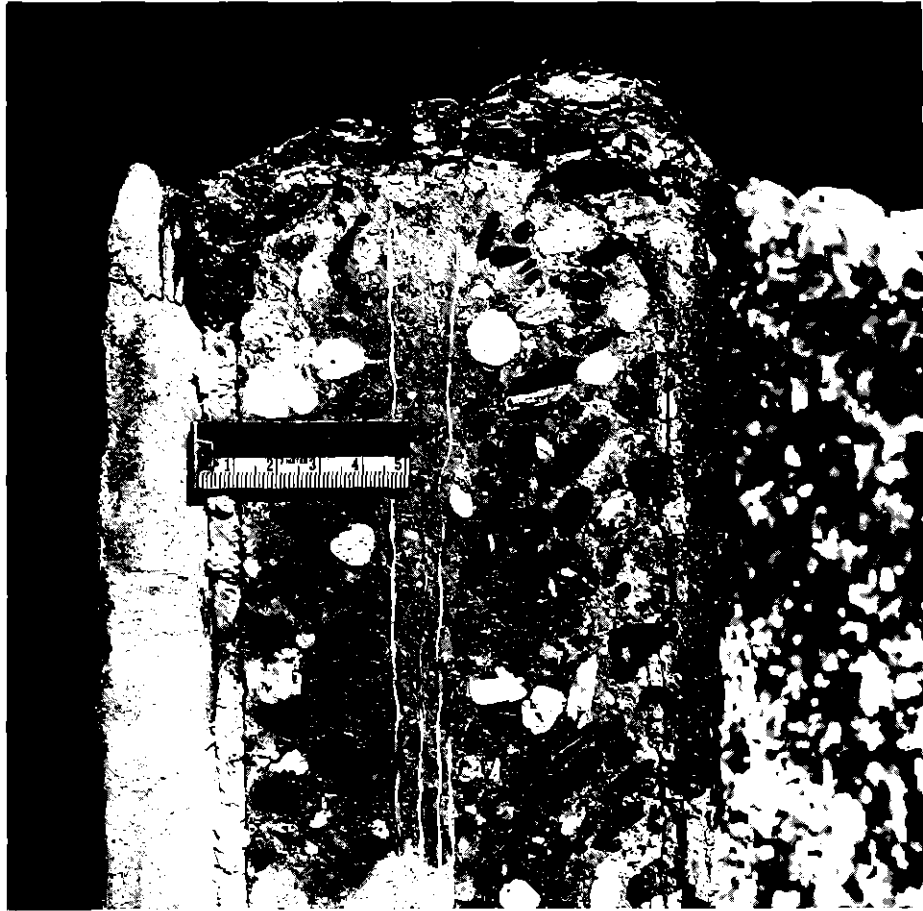
GFK
RBT-IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - REGULUSANSICHTEN

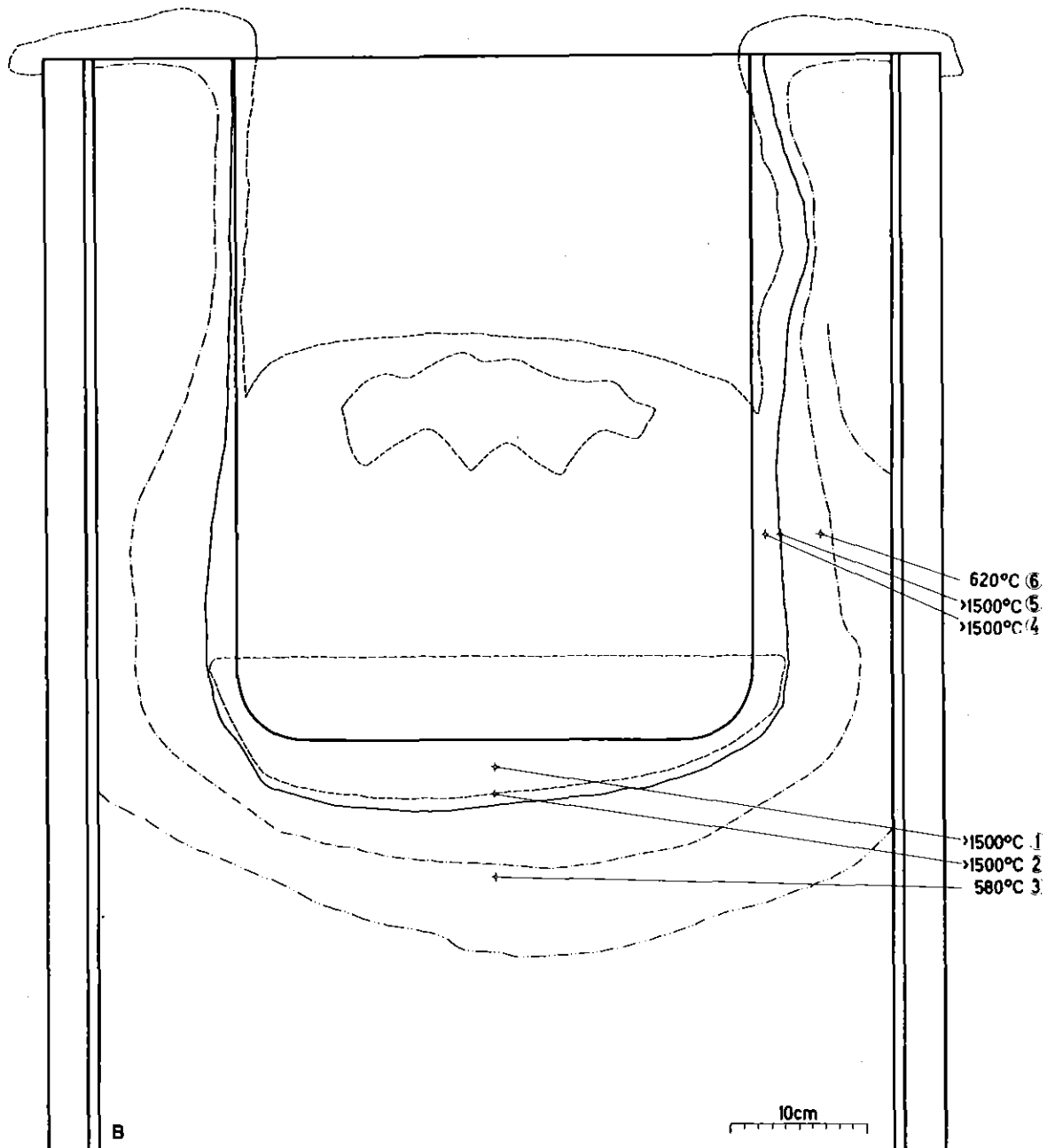
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT

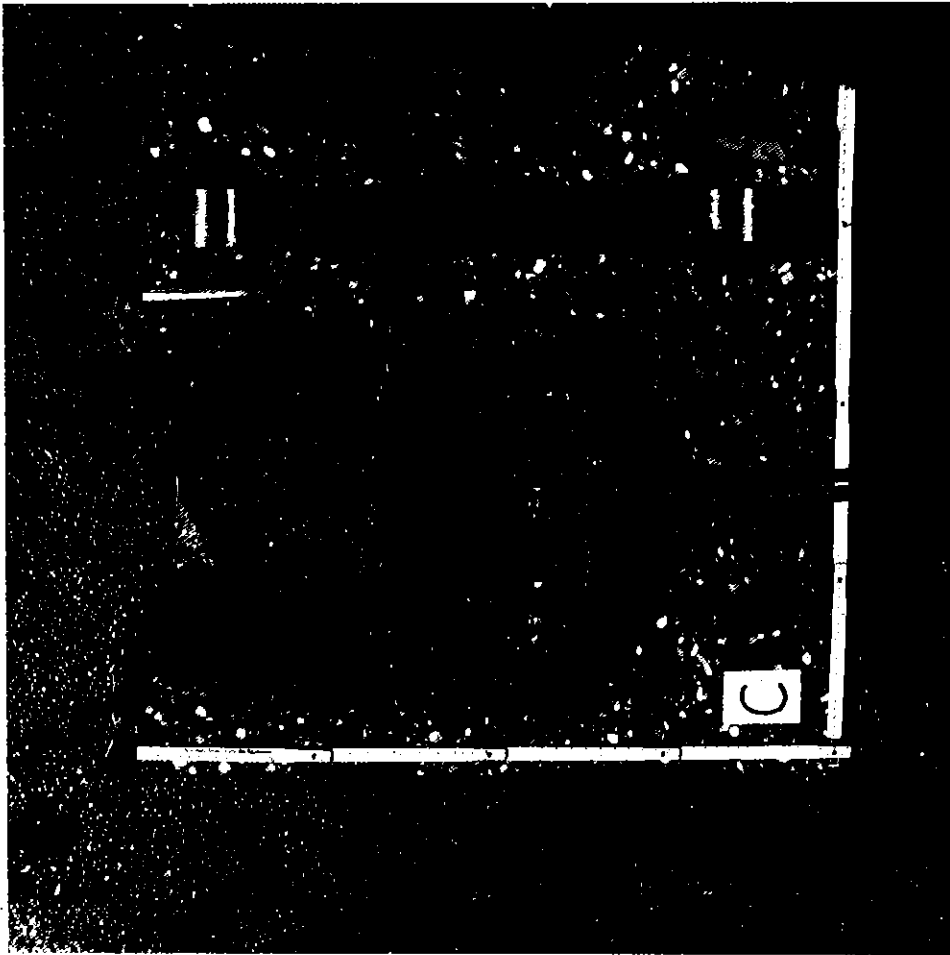
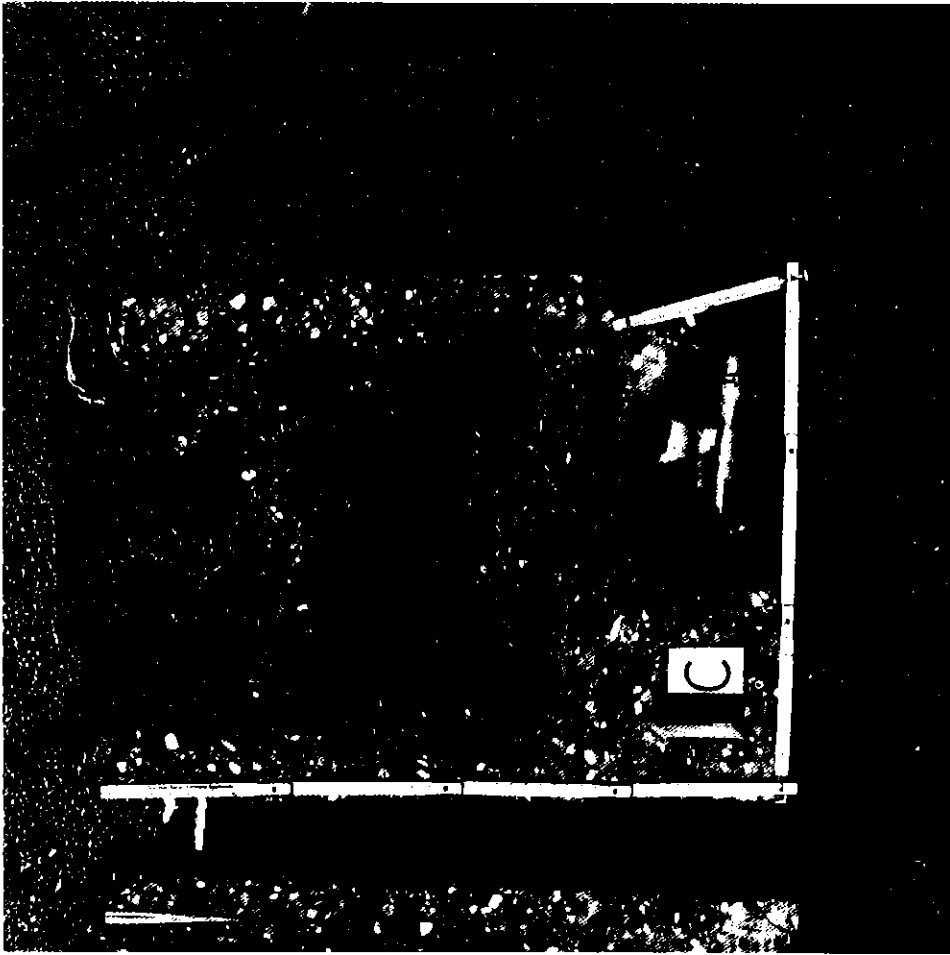


- Ursprüngliche Kontur
 - Schmelzfront
 - - - - - Konturen der erstarrten Schmelze
 - - - - - Kontur der dehydrierten Zone
 - - - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone
- TE in die Schnittlebene eingezeichnet

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT



GFK
RBT-IT

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS C

PNS 4323



GFK
RBT/IT

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN:
TIEGEL C - REGULUSANSICHTEN

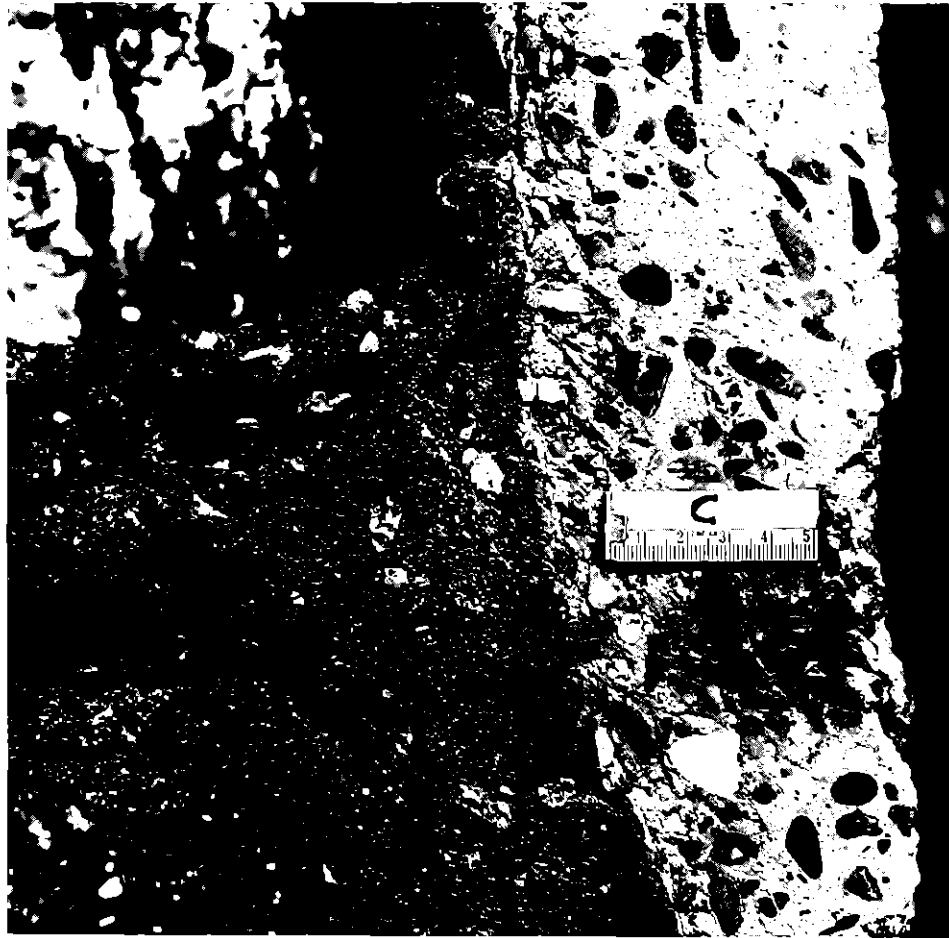
PNS
4323



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - DETAILAUFNAHMEN

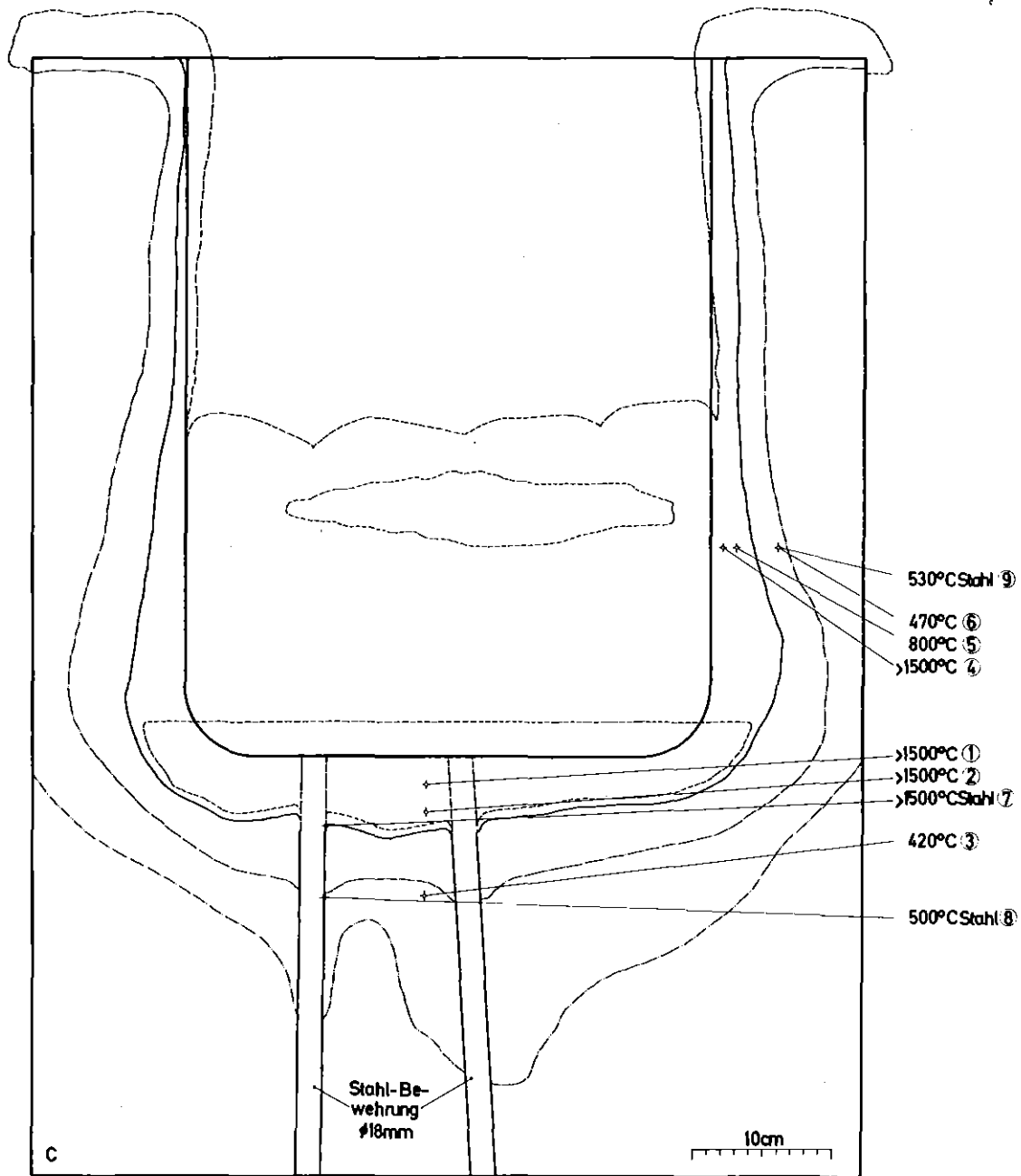
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT

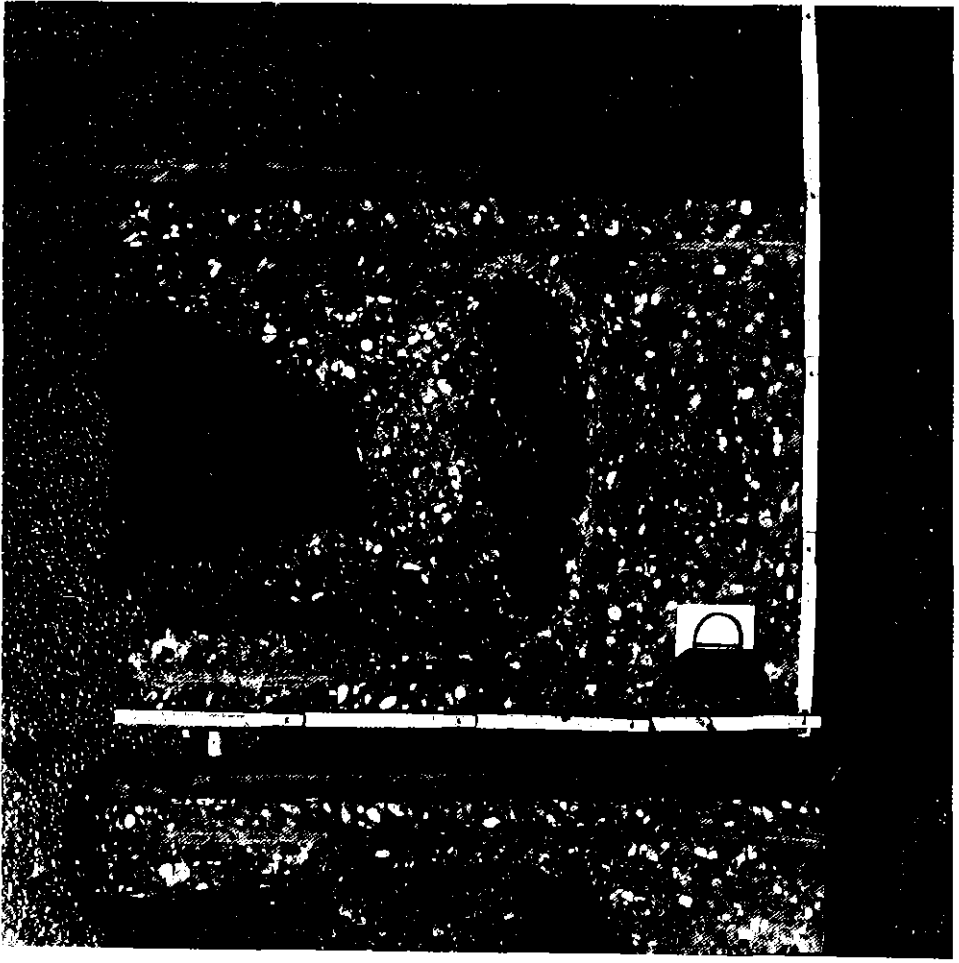
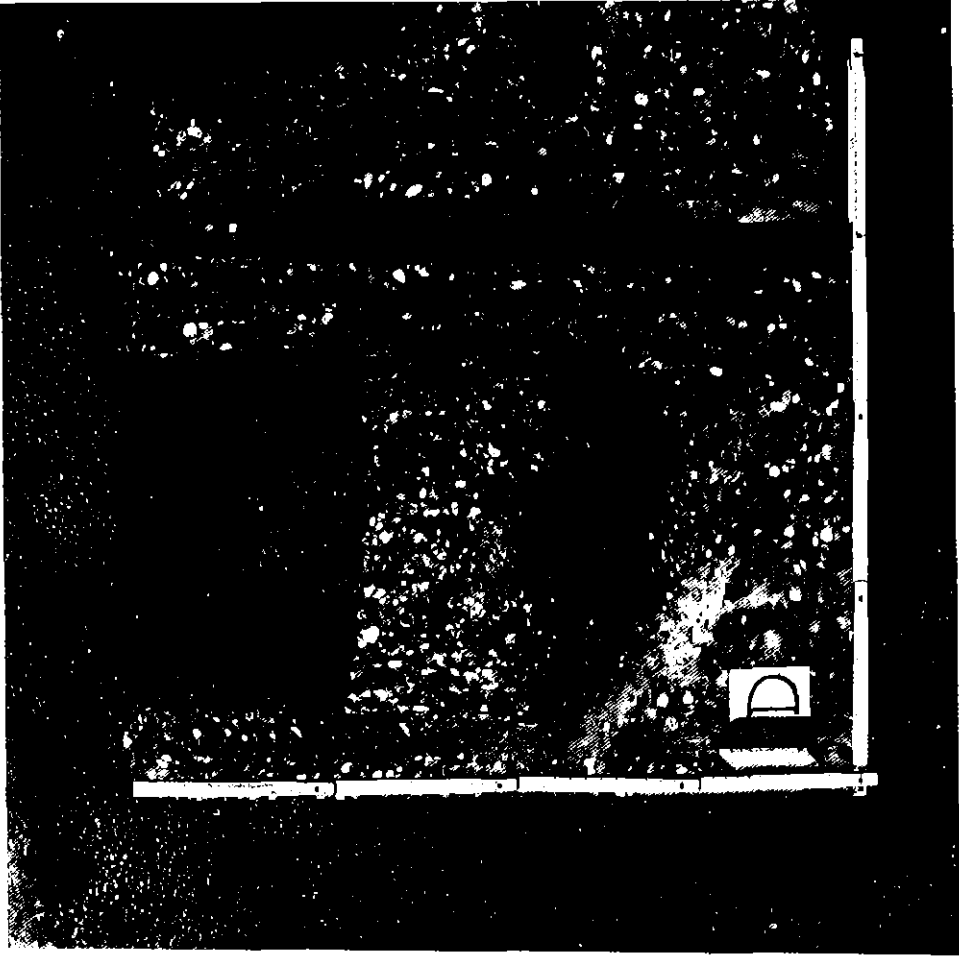


- Ursprüngliche Kontur
 - Schmelzfront
 - - - Konturen der erstarrten Schmelze
 - - - Kontur der dehydrierten Zone
 - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone
- TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS
 4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL C - SKIZZE DES TIEGELSCHMITTS

GFK
 RBT/IT



PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS D

GFK

RBT-IT



PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - REGULUSANSICHTEN

GFK
RBT/IT

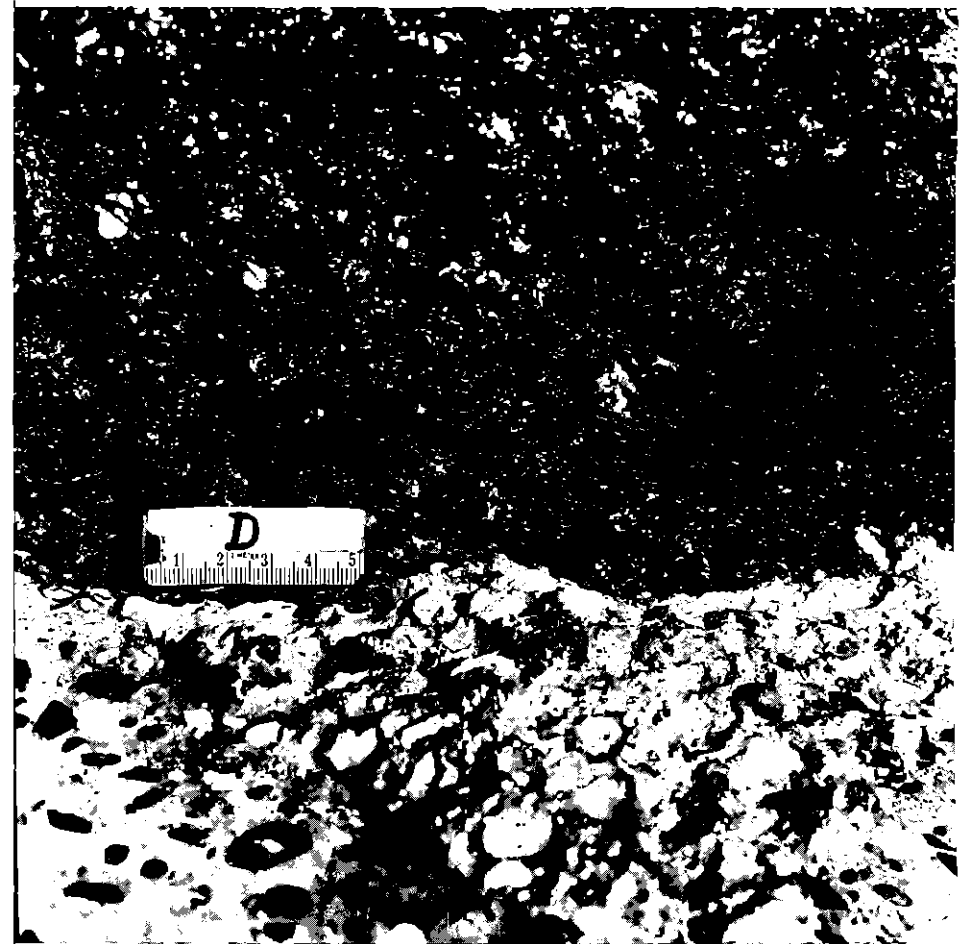
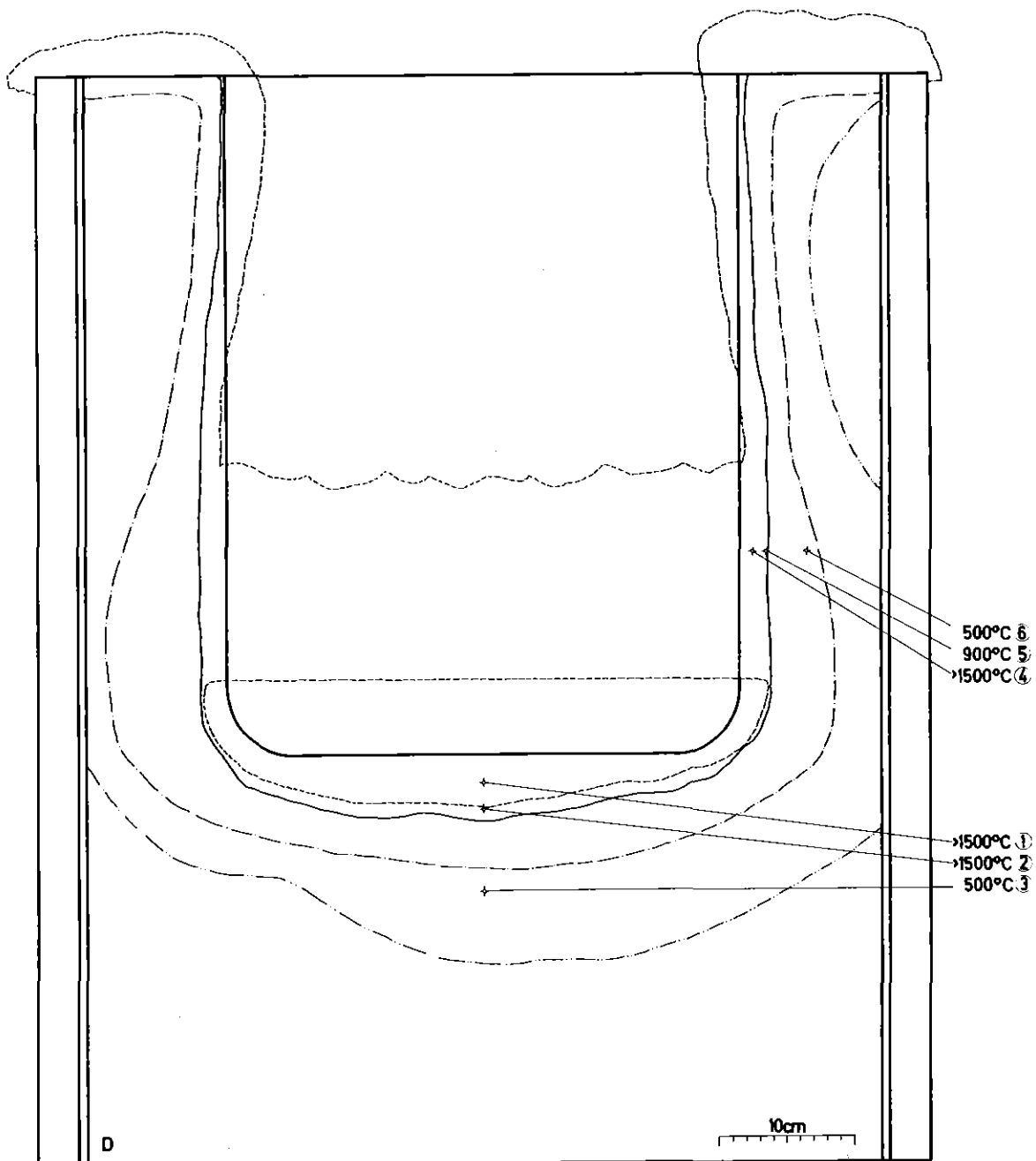


Abb. 74

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT



- Ursprüngliche Kontur
 - Schmelzfront
 - - - - - Konturen der erstarrten Schmelze
 - - - - - Kontur der dehydrierten Zone
 - - - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone
- TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT

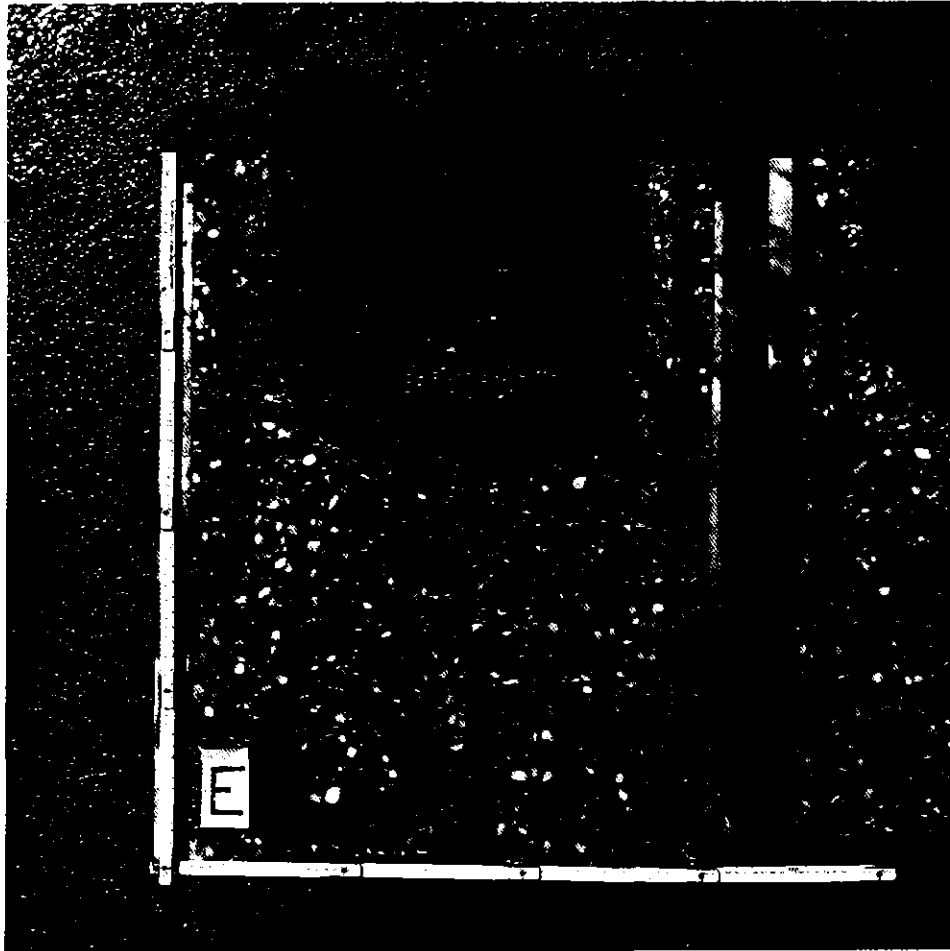


Abb. 76

PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS E

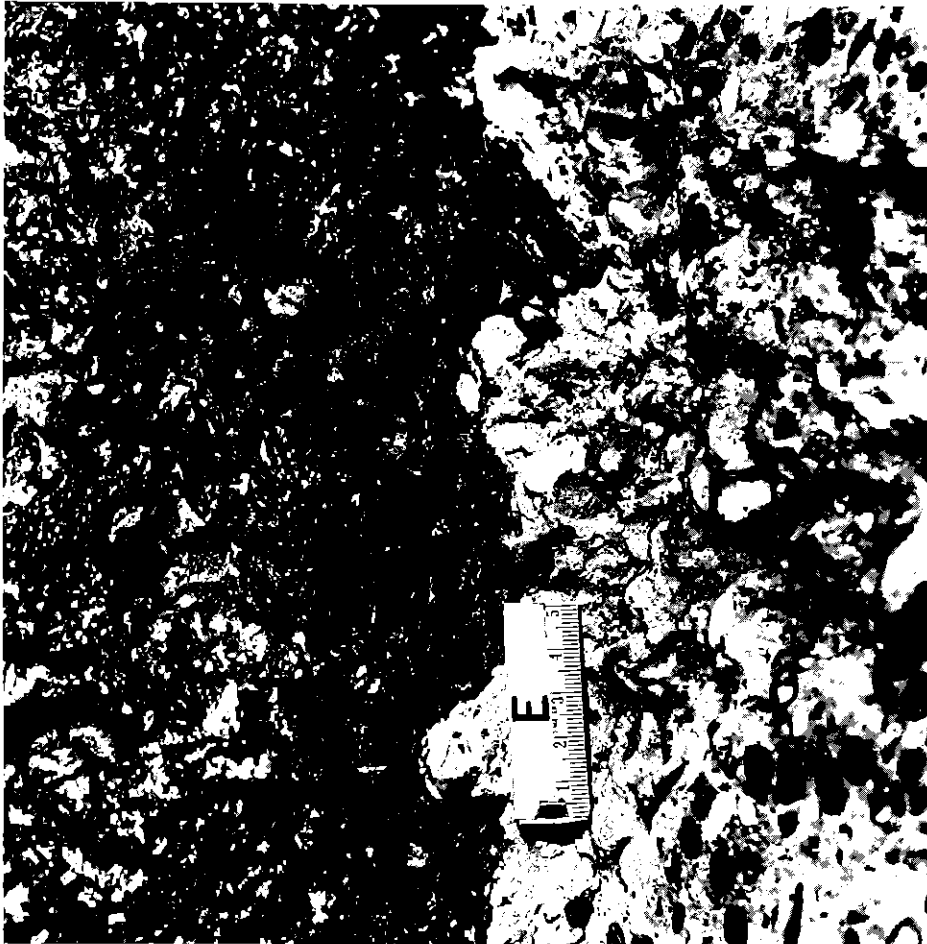
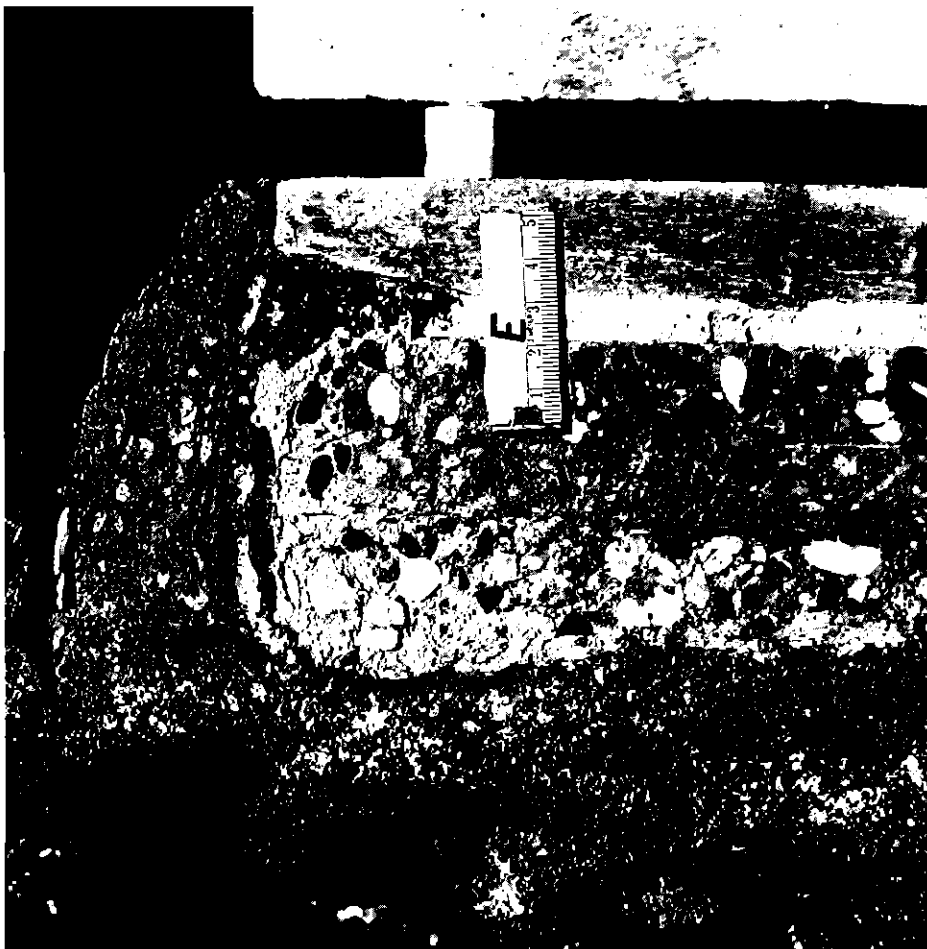
GFK
RBT-IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - REGULUSANSICHTEN

GFK
RBT/IT

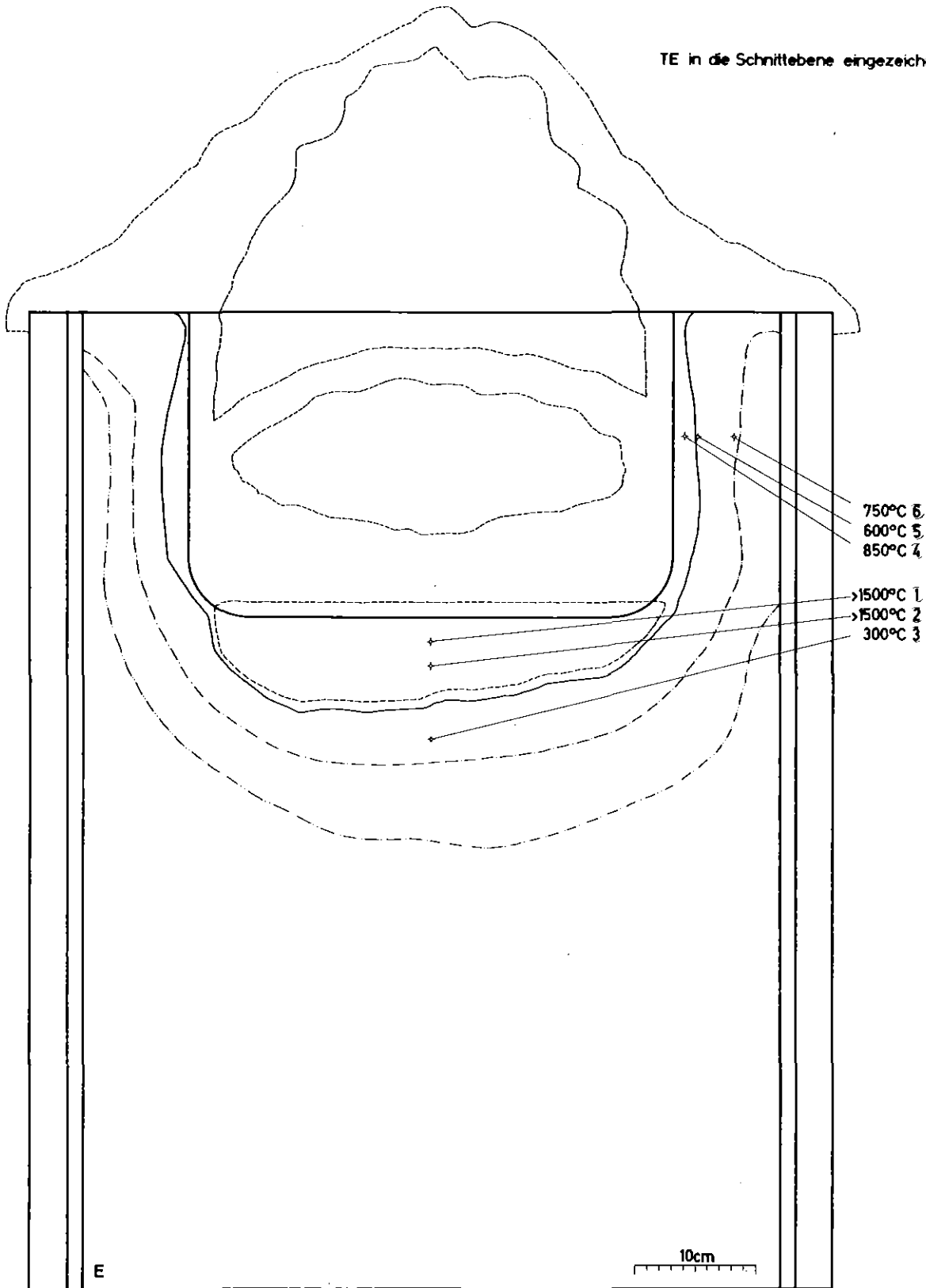


GFK
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITTSCHMELZEN
TIEGEL E - DETAILAUFNAHMEN

GEK
RBT/IT

TE in die Schnittebene eingezeichnet

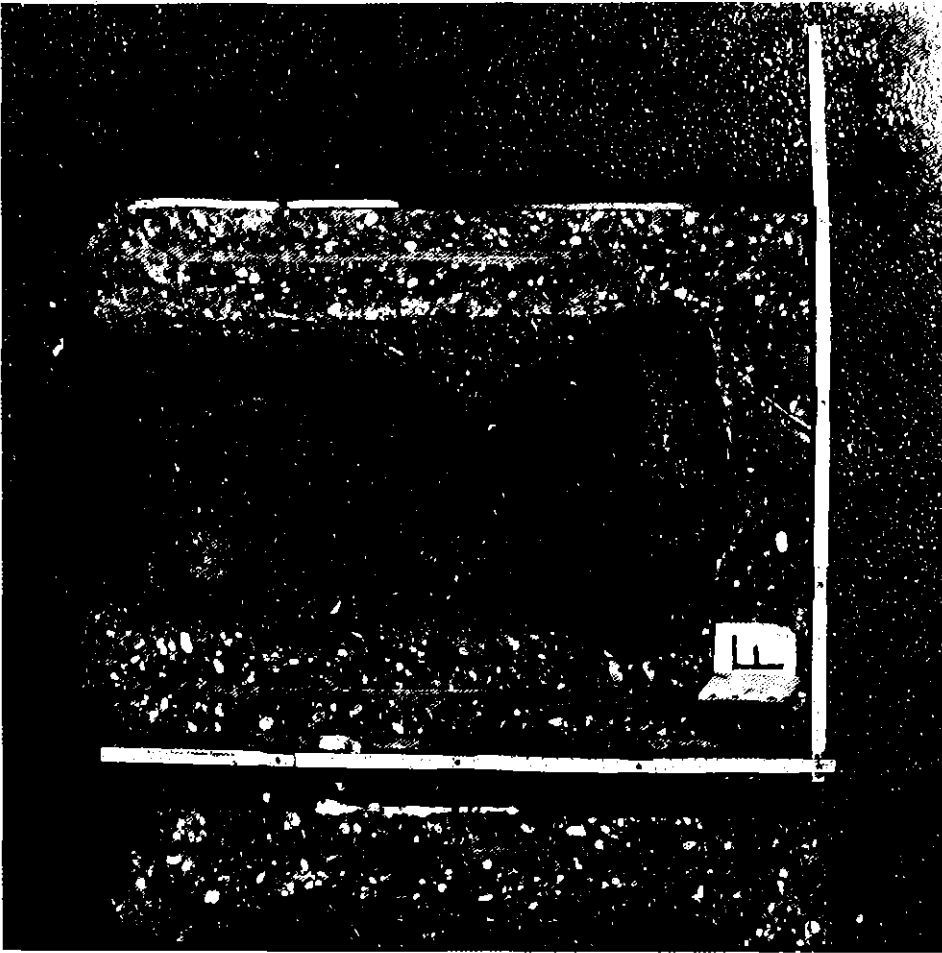
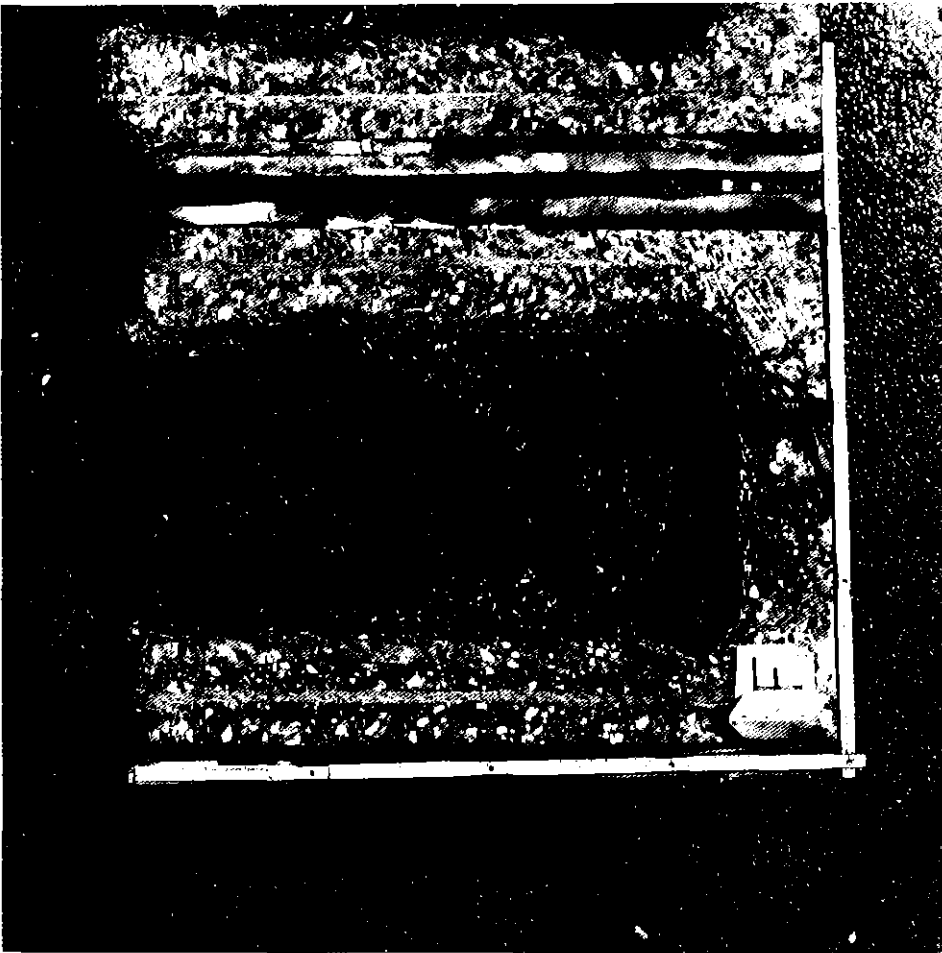


- Ursprüngliche Kontur
- Schmelzfront
- - - - - Konturen der erstarrten Schmelze
- - - - - Kontur der dehydrierten Zone
- - - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT



PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS F

GFK
RBT-IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - REGULUSANSICHTEN

GFK
RBT/IT

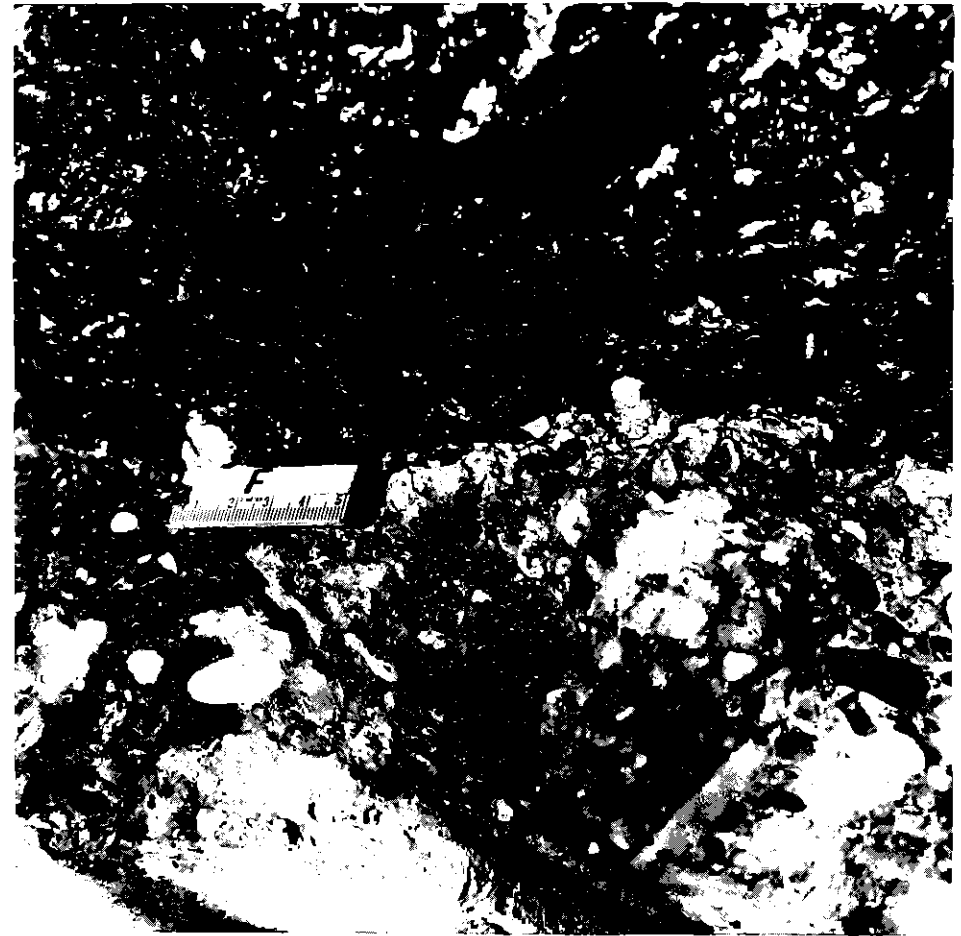
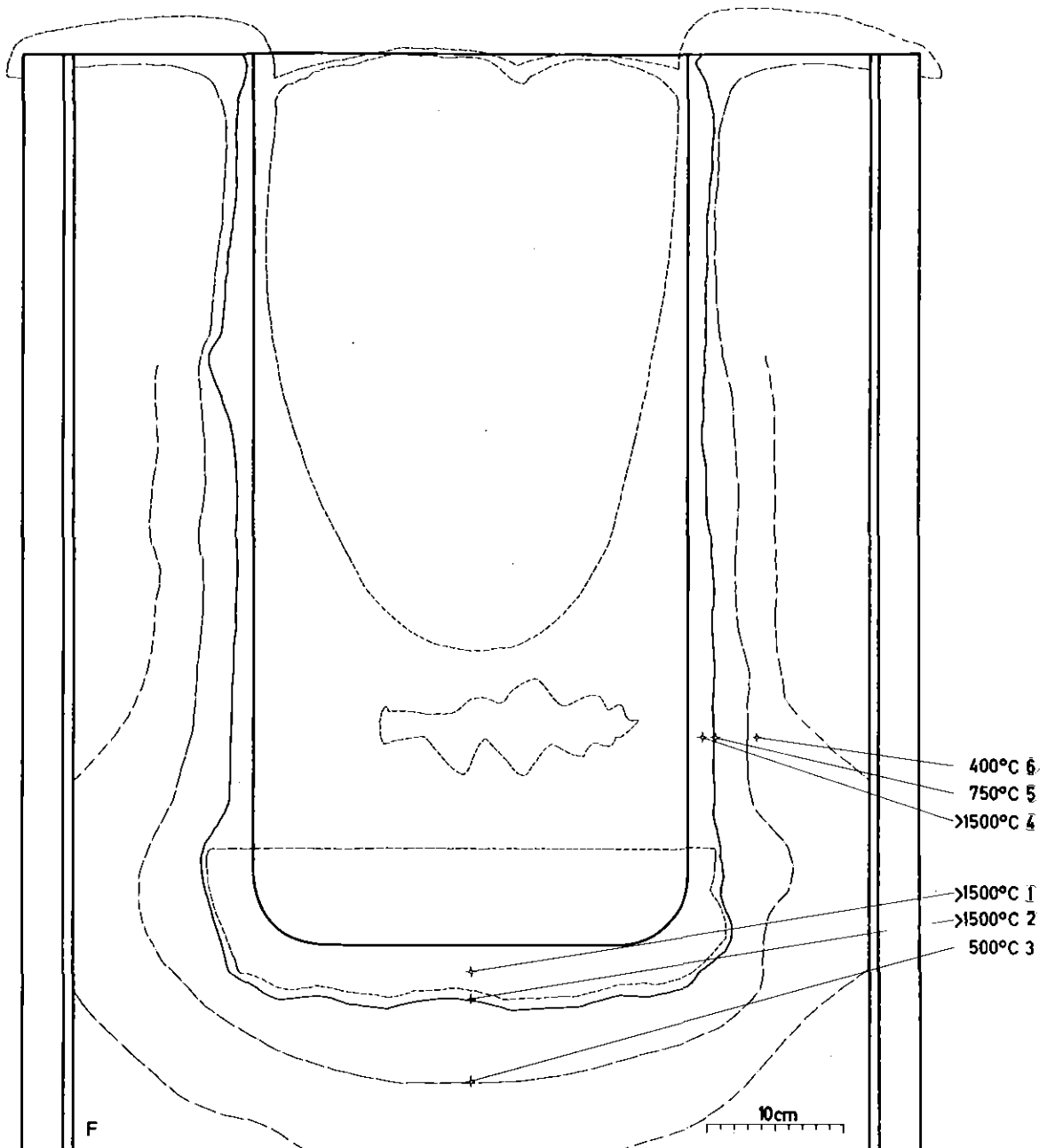


Abb. 82

PNS
4323

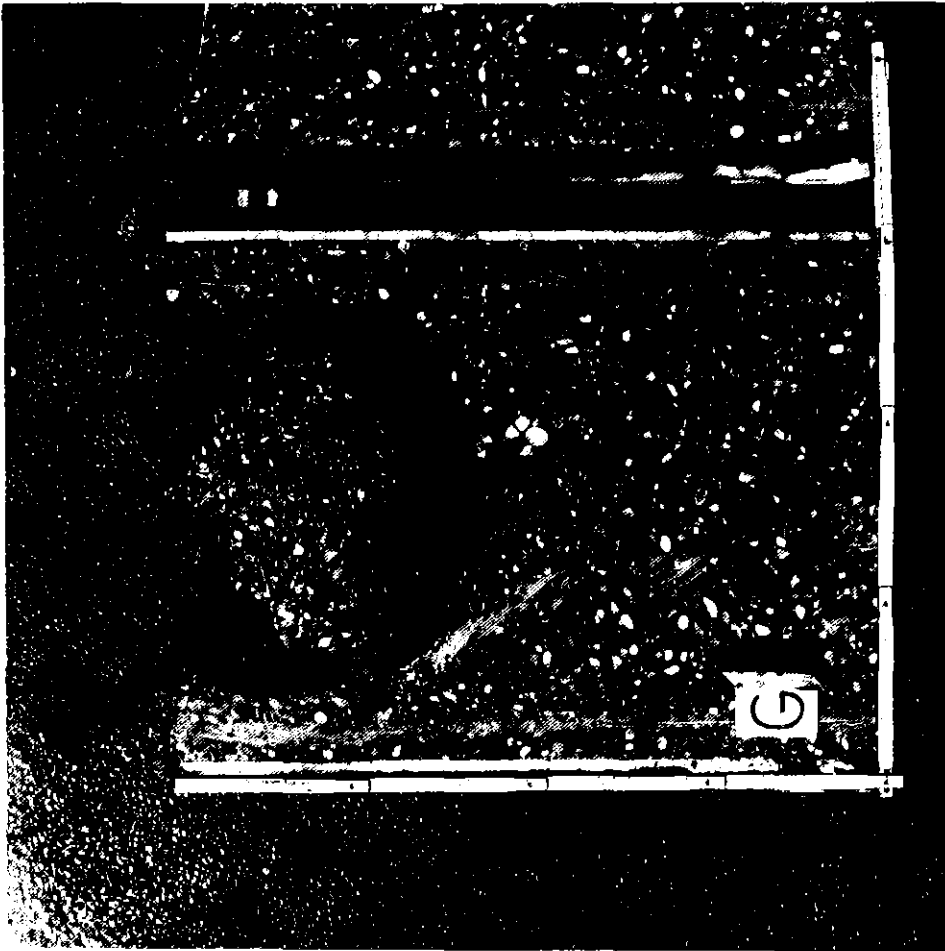
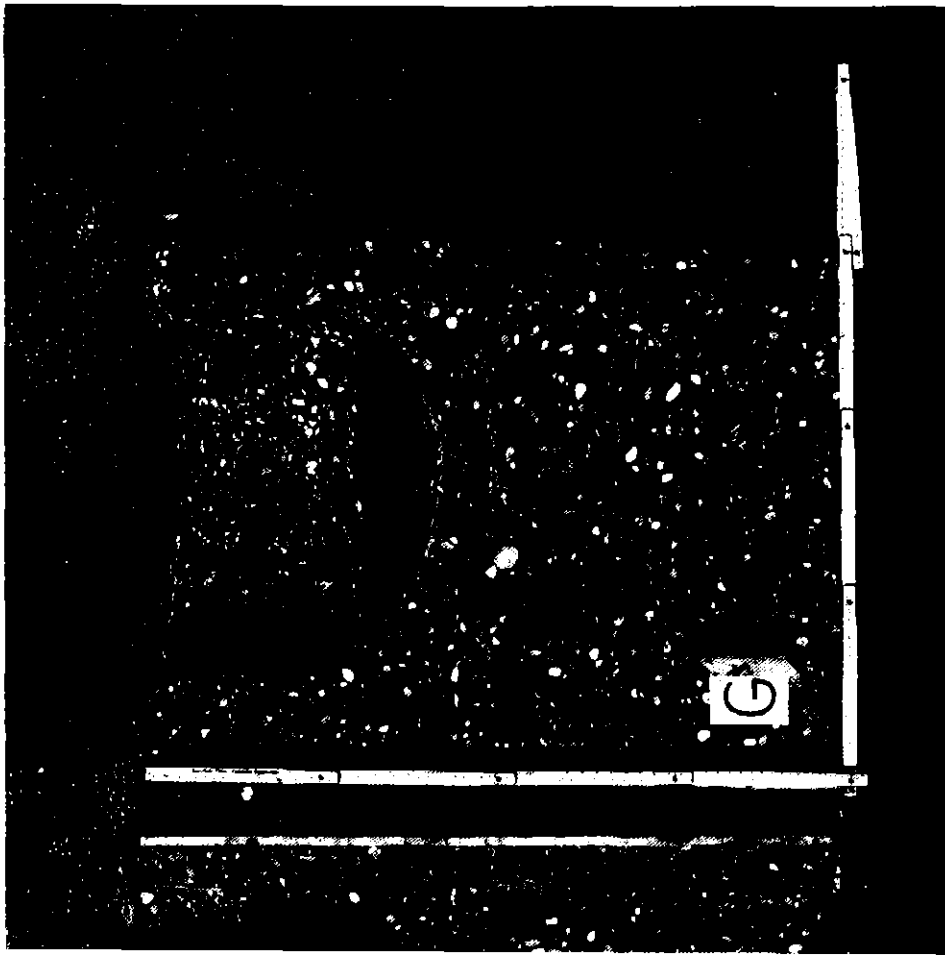
BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT

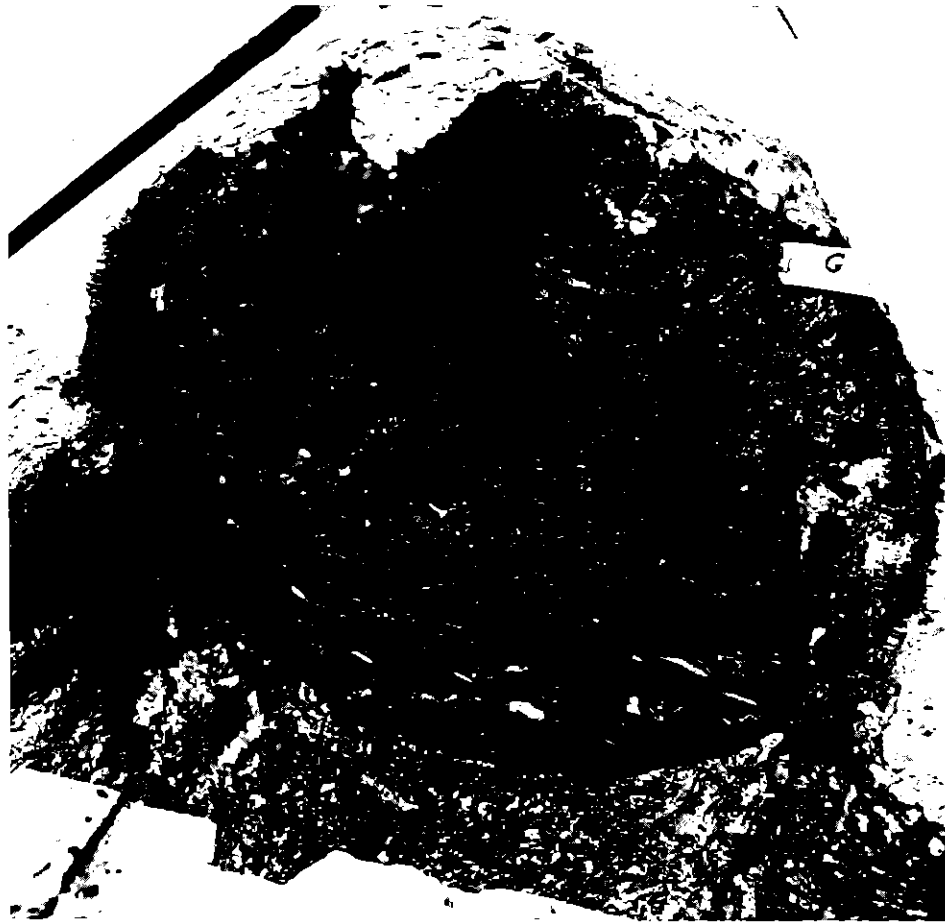


- Ursprüngliche Kontur
 - Schmelzfront
 - - - Konturen der erstarrten Schmelze
 - - - Kontur der dehydrierten Zone
 - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone
- TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS 4323	BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN TIEGEL F - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS	GFK RBT/IT
-------------	--	---------------



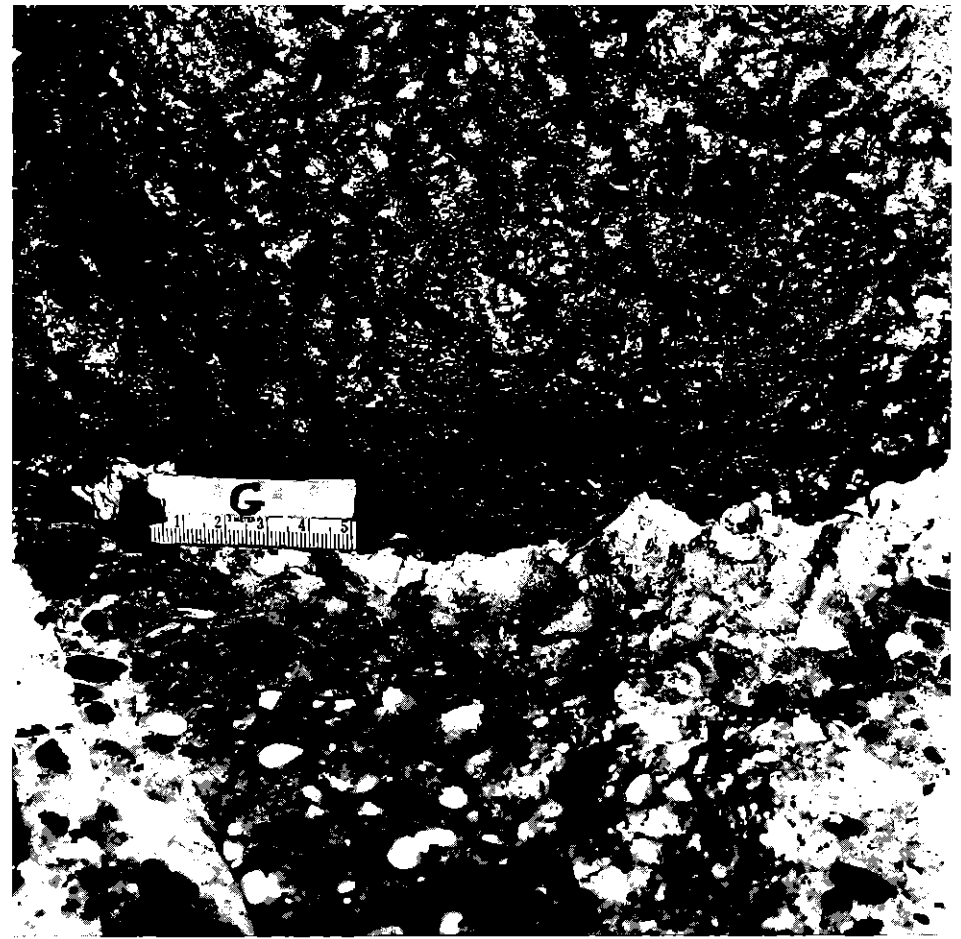
PNS 4323	THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES CRUCIBLE SECTIONS G	6FK RBT-IT
----------	---	---------------



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - REGULUSANSICHTEN

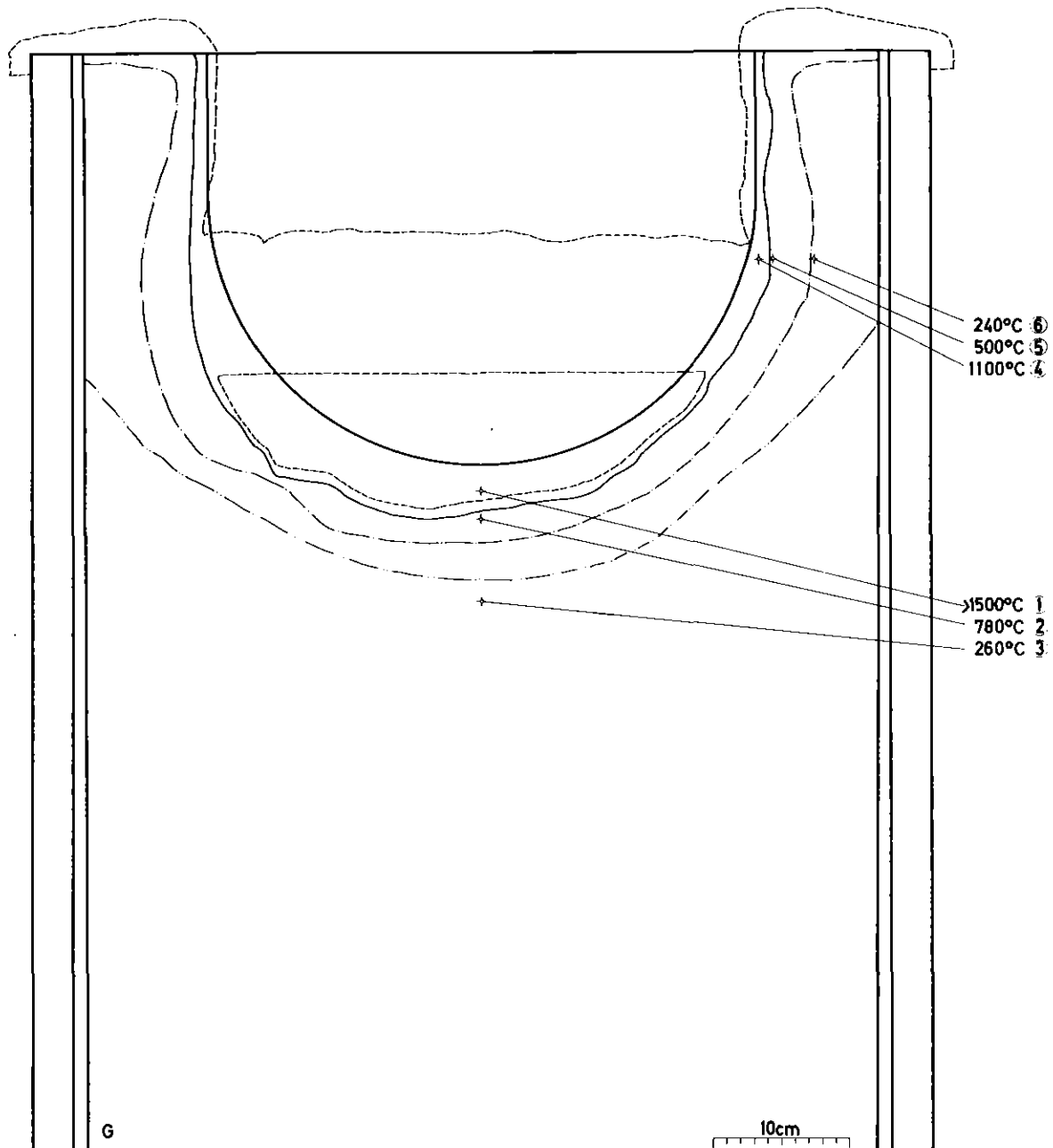
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT

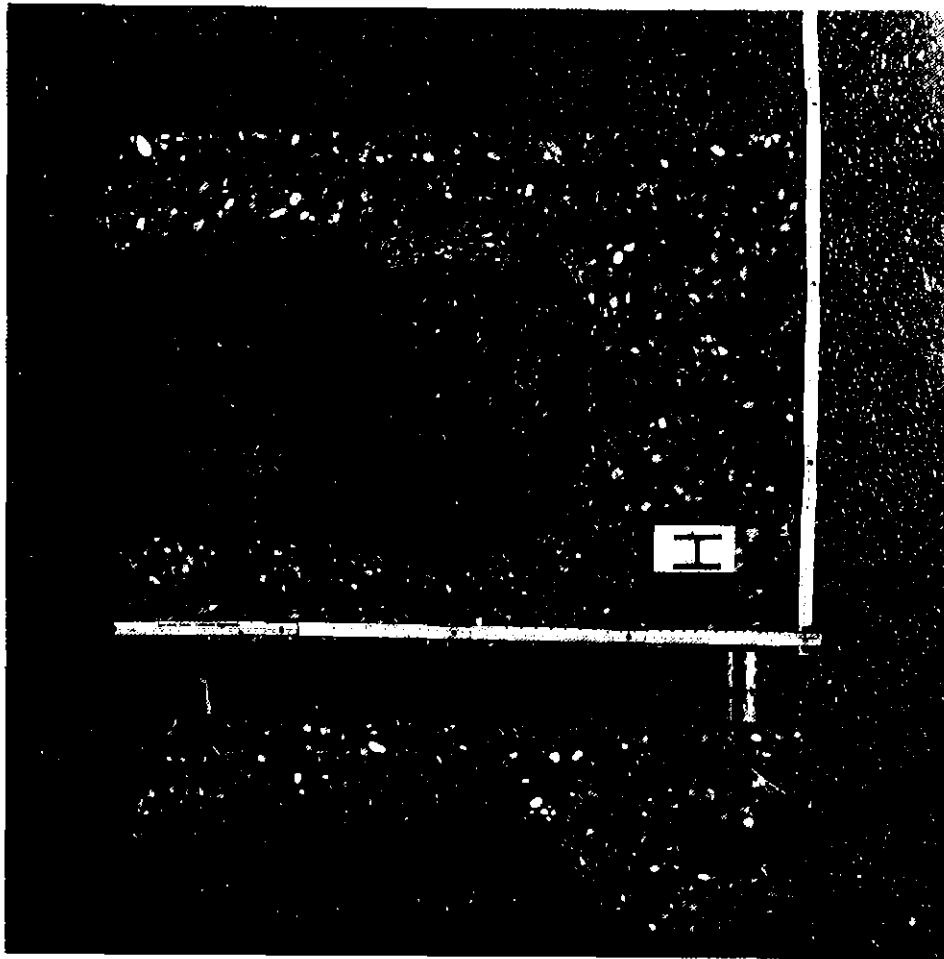
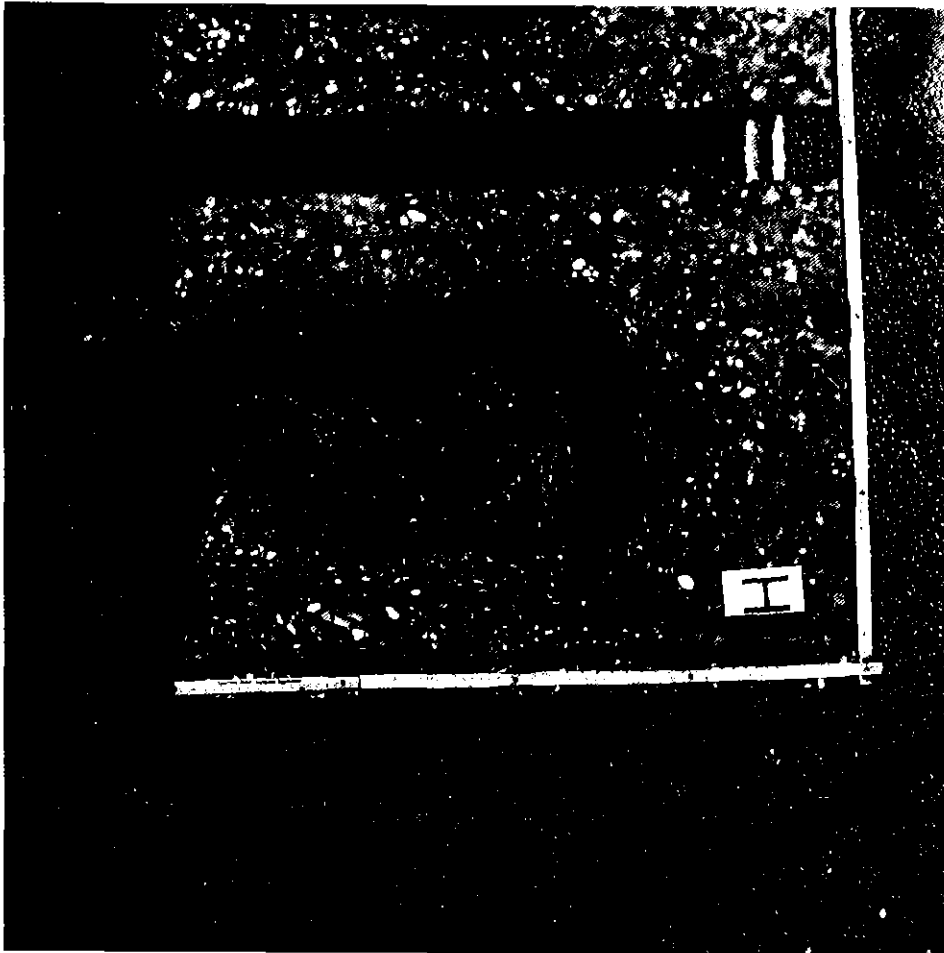


- Ursprüngliche Kontur
 - Schmelzfront
 - Konturen der erstarrten Schmelze
 - Kontur der dehydrierten Zone
 - Kontur der z.T. dehydrierten Zone
- TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT



PNS 4323

THERMIT MELT POURS INTO CONCRETE CRUCIBLES
CRUCIBLE SECTIONS H

GFK
RBT-IT

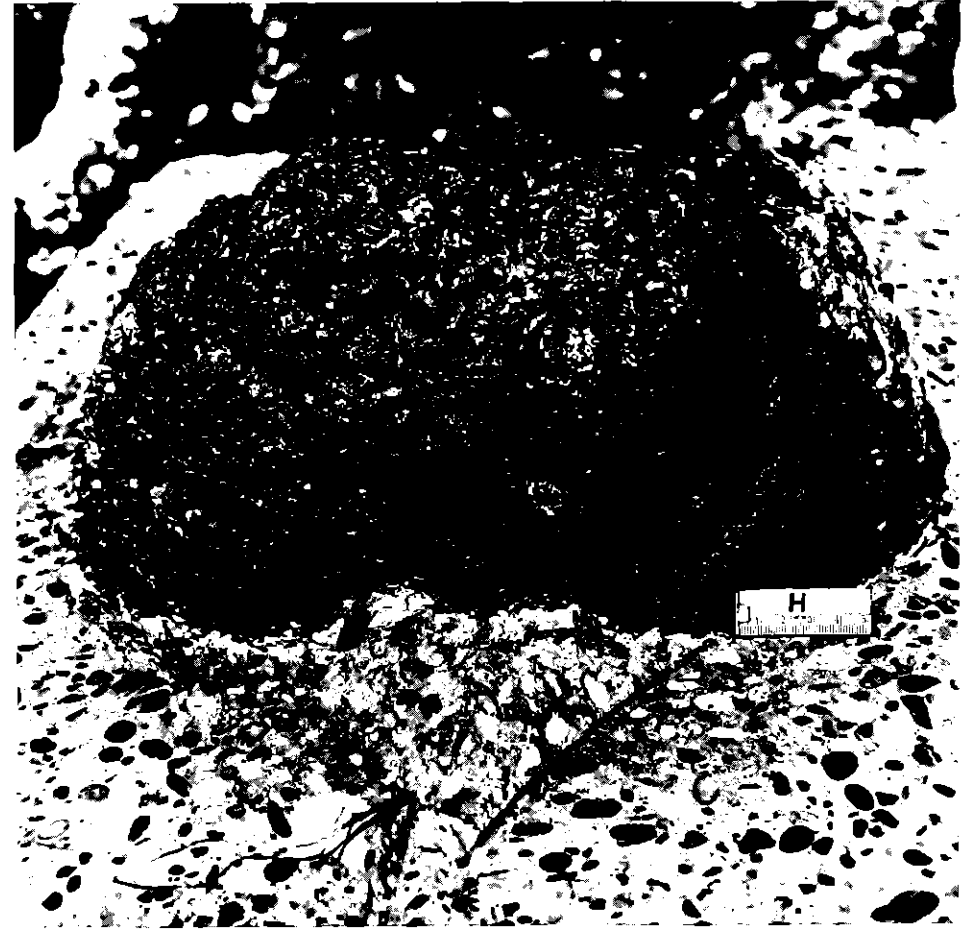
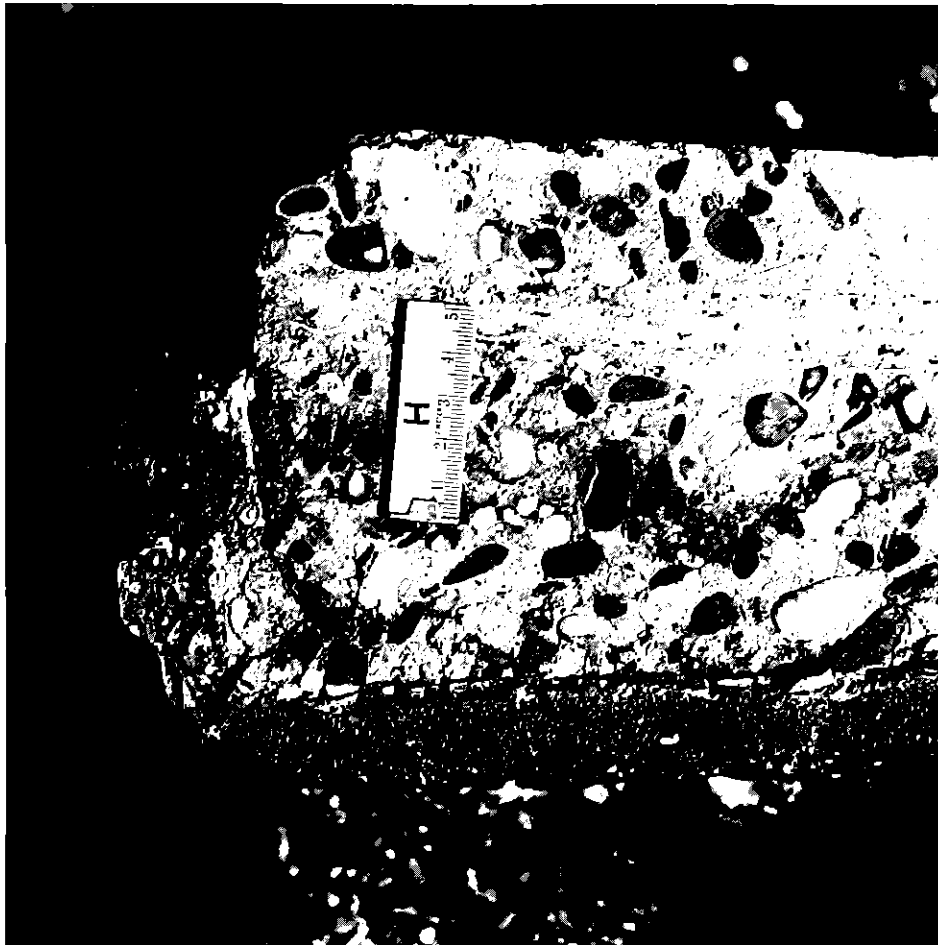
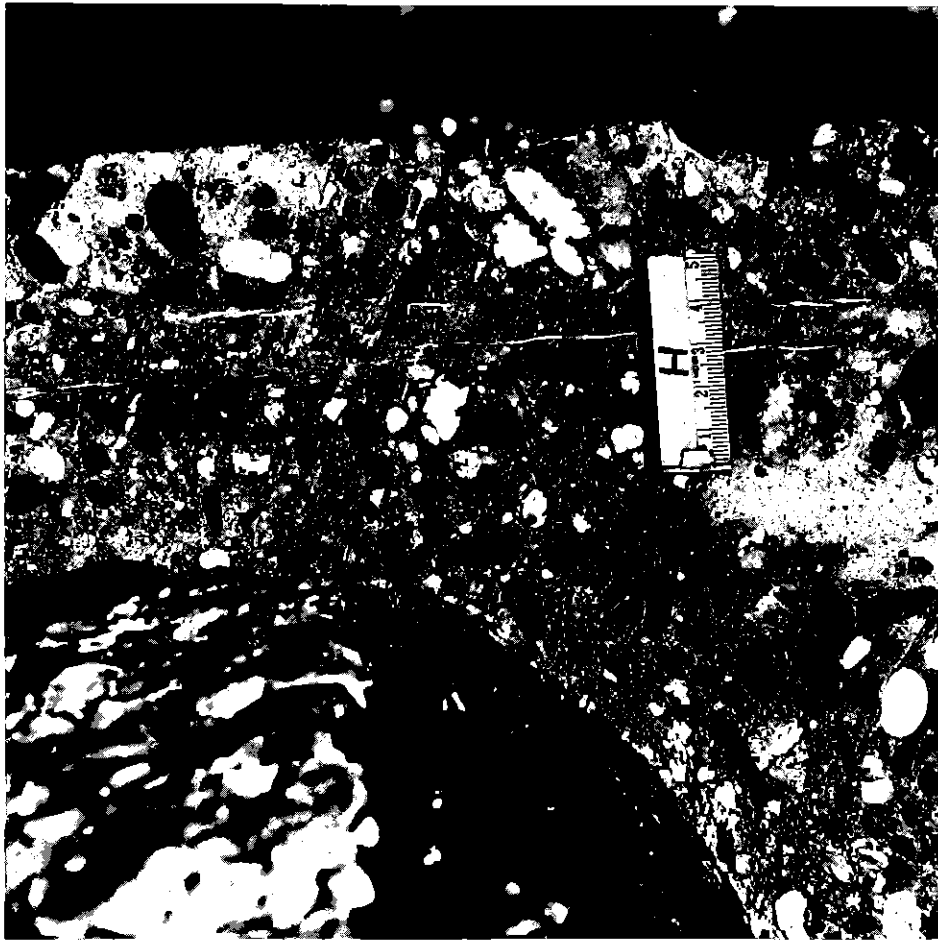


Abb. 89

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H - REGULUSANSICHTEN

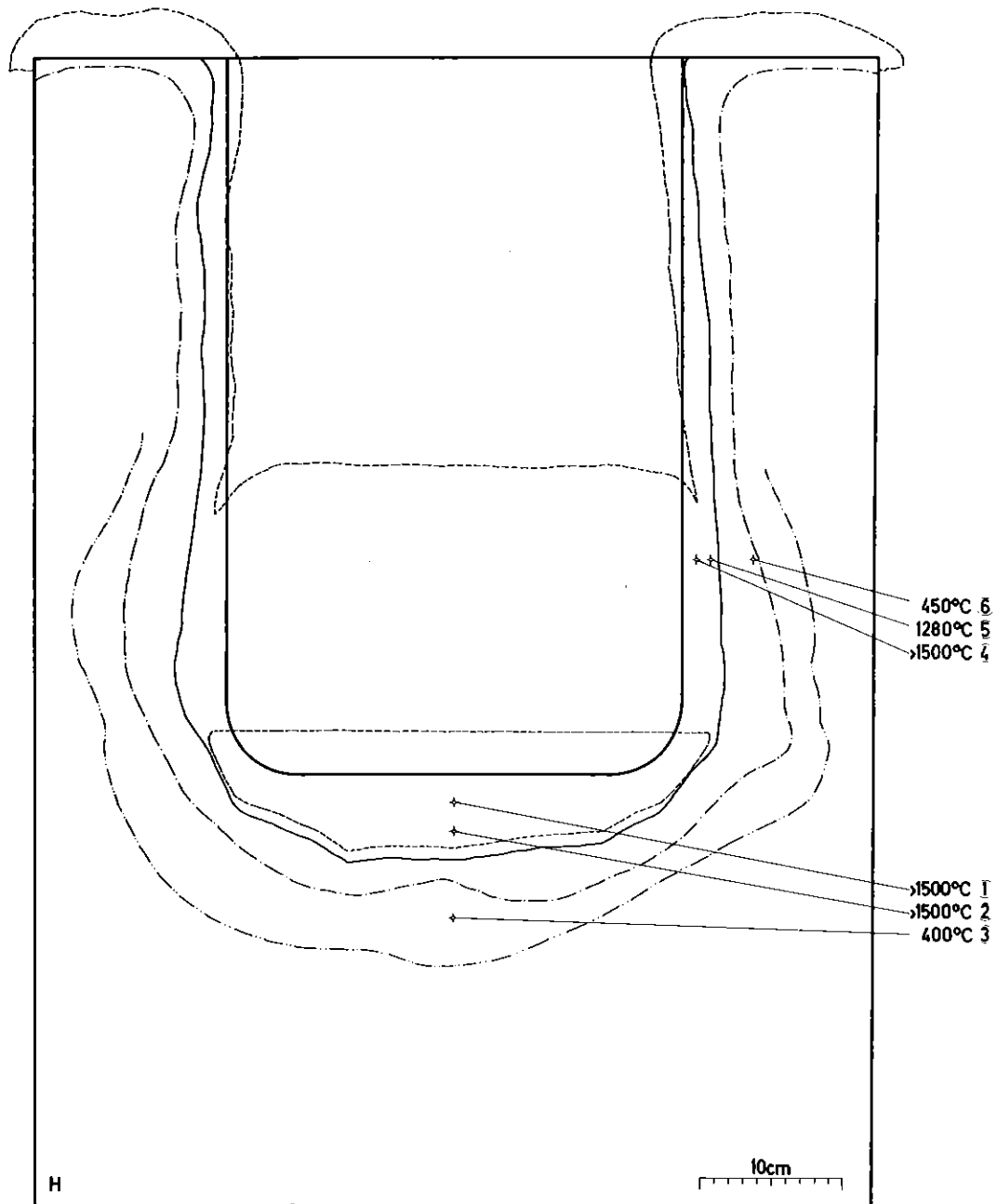
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL H - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT



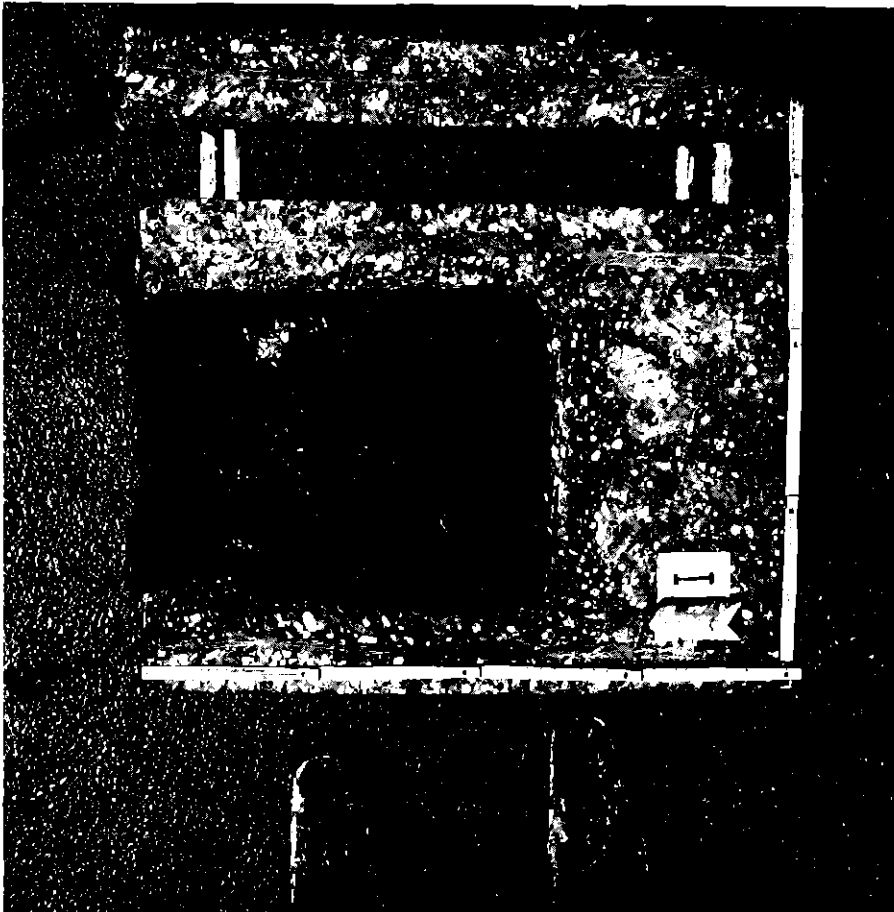
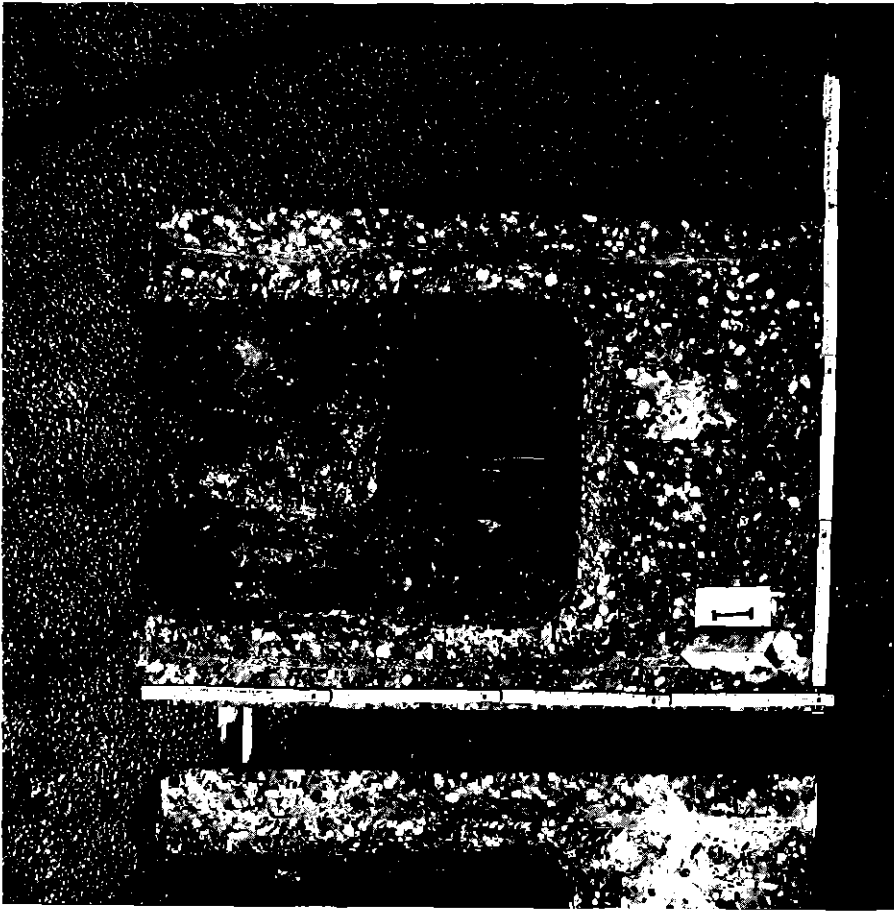
- Ursprüngliche Kontur
- - - Schmelzfront
- · - · - Konturen der erstarrten Schmelze
- · - · - Kontur der dehydrierten Zone
- · - · - Kontur der z.T. dehydrierten Zone

TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHEMELZEN
TIEGEL H - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT



GFK RBT/IT	BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN TIEGEL I - SCHNITTANSICHTEN	PNS 4323
---------------	---	-------------

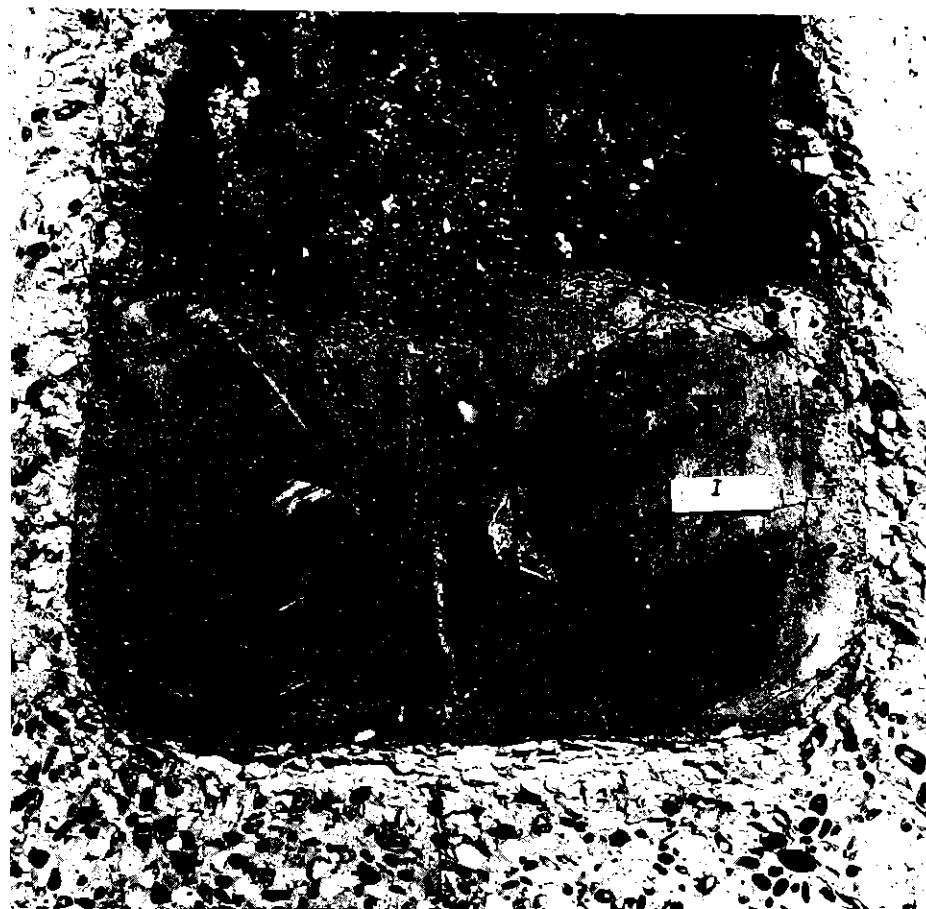


Abb. 93

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - REGULUSANSICHTEN

GFK
RBT/IT

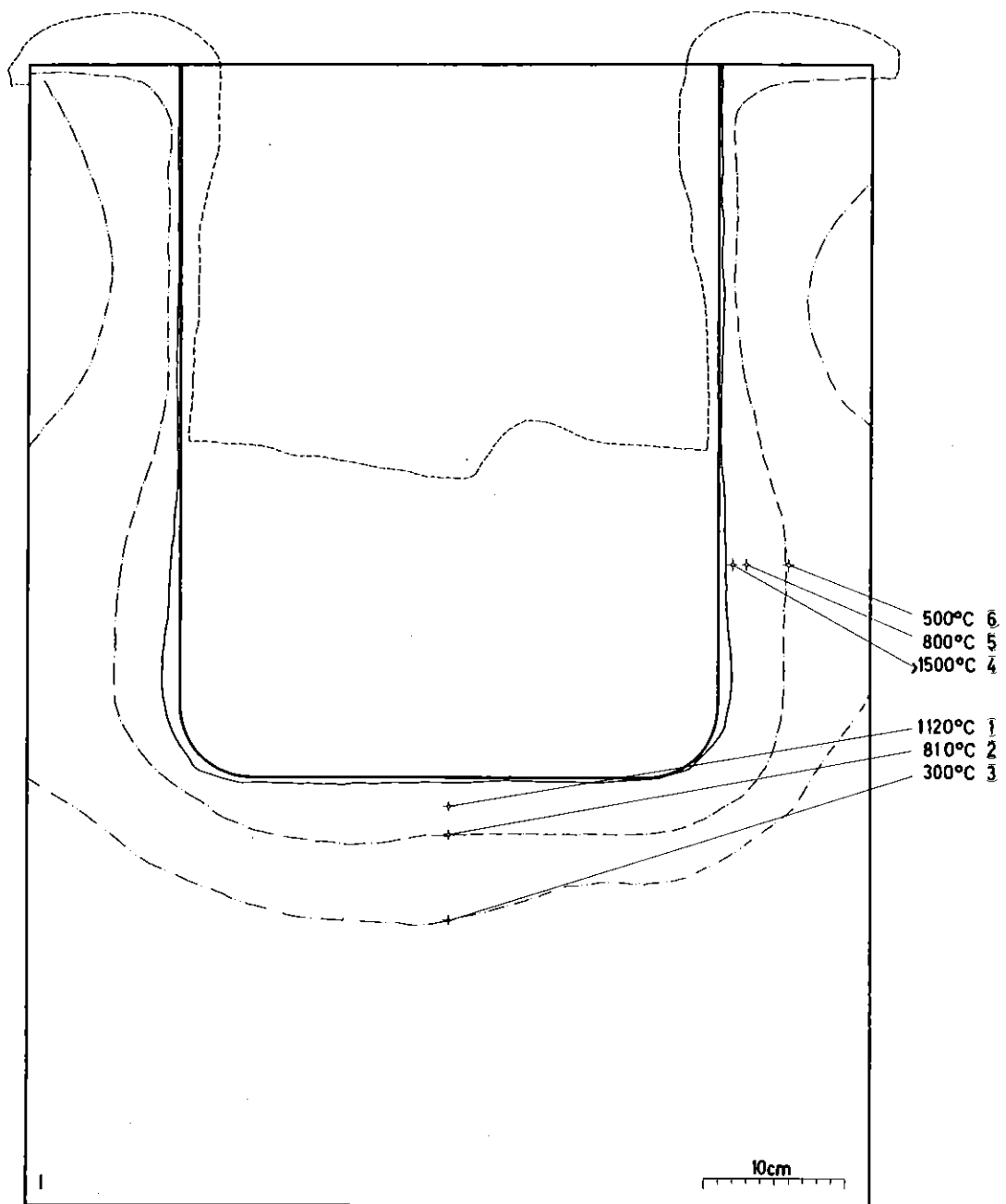


Abb. 94

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - DETAILAUFNAHMEN

GFK
RBT/IT



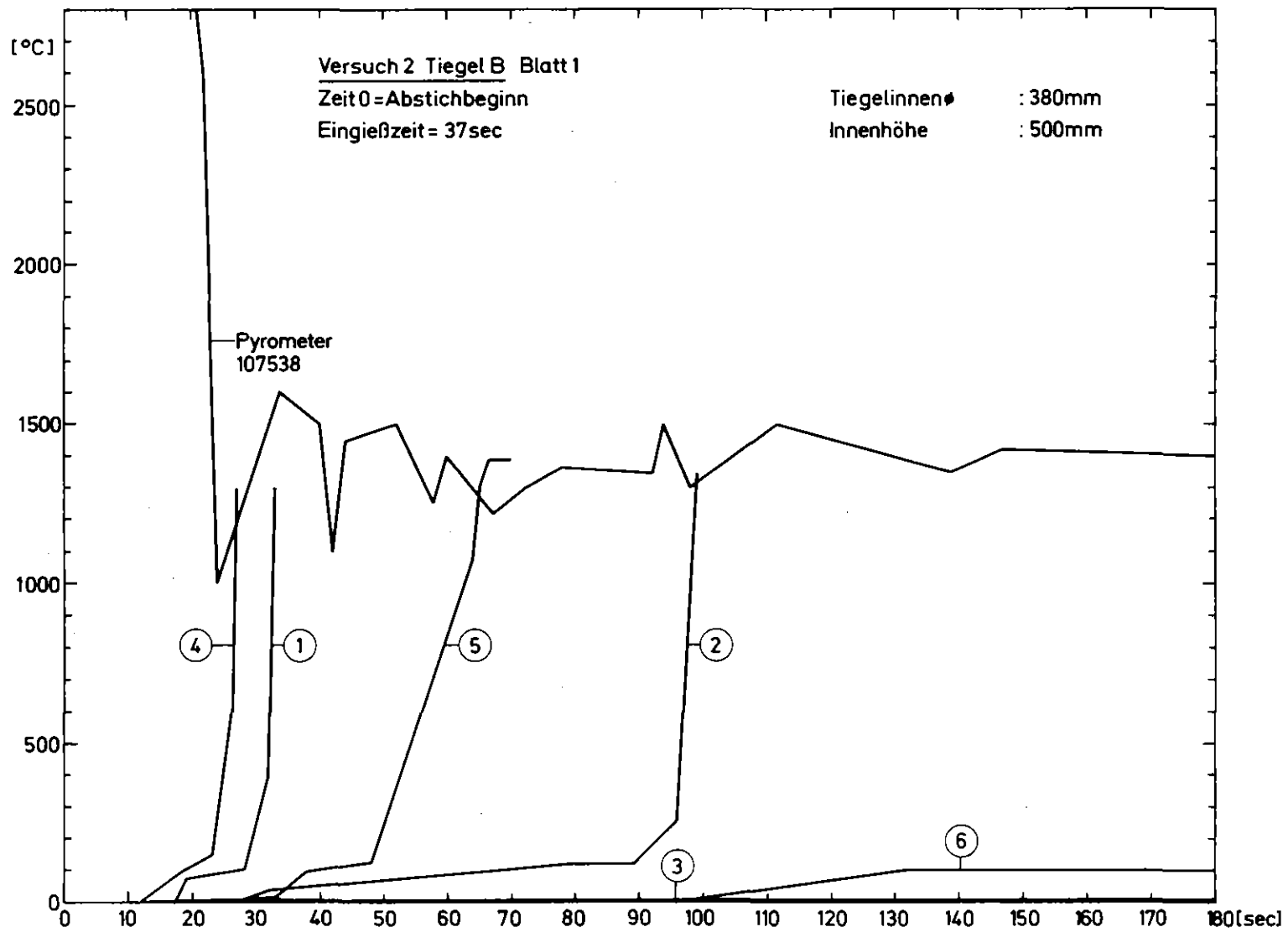
- Ursprüngliche Kontur
- Schmelzfront
- - - - - Konturen der erstarrten Schmelze
- - - - - Kontur der dehydrierten Zone
- - - - - Kontur der z.T. dehydrierten Zone

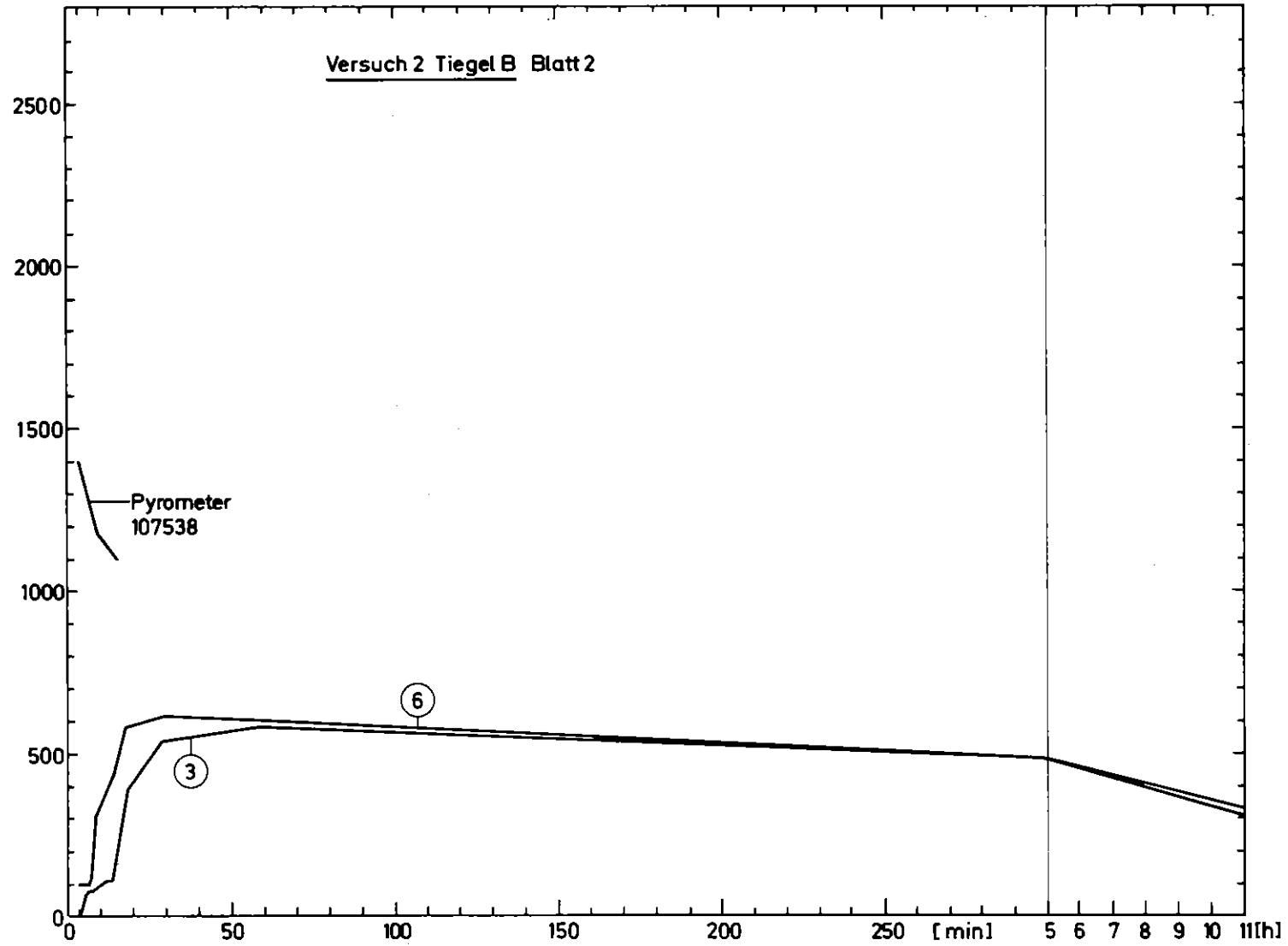
TE in die Schnittebene eingezeichnet

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHELMELZEN
TIEGEL I - SKIZZE DES TIEGELSCHNITTS

GFK
RBT/IT





PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TEIGEL B - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT

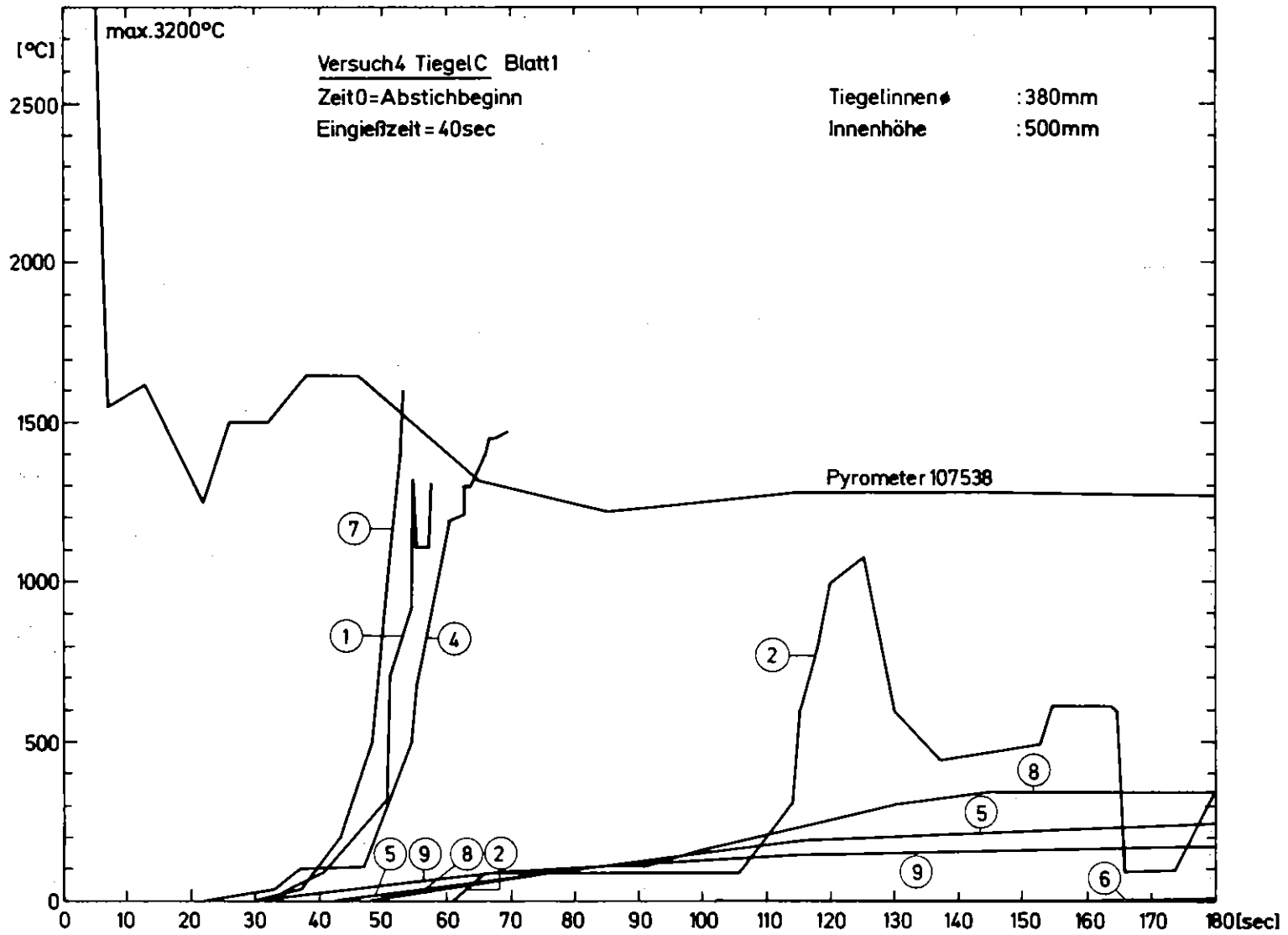


Abb. 98

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - TEMPERATURVERLÄUFE I

GFK
RBT/IT

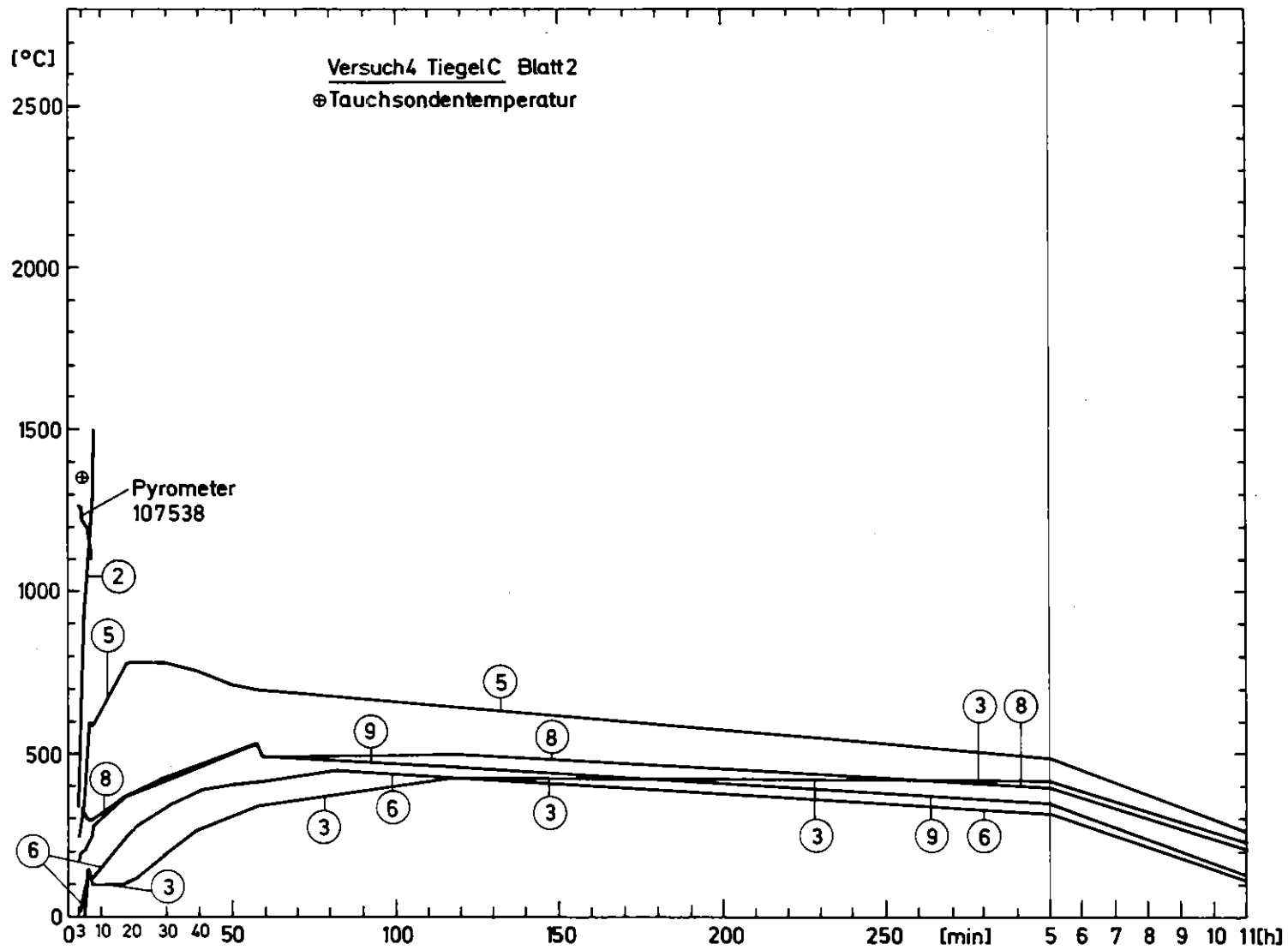


Abb. 99

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHELMELZEN
TIEGEL C - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT

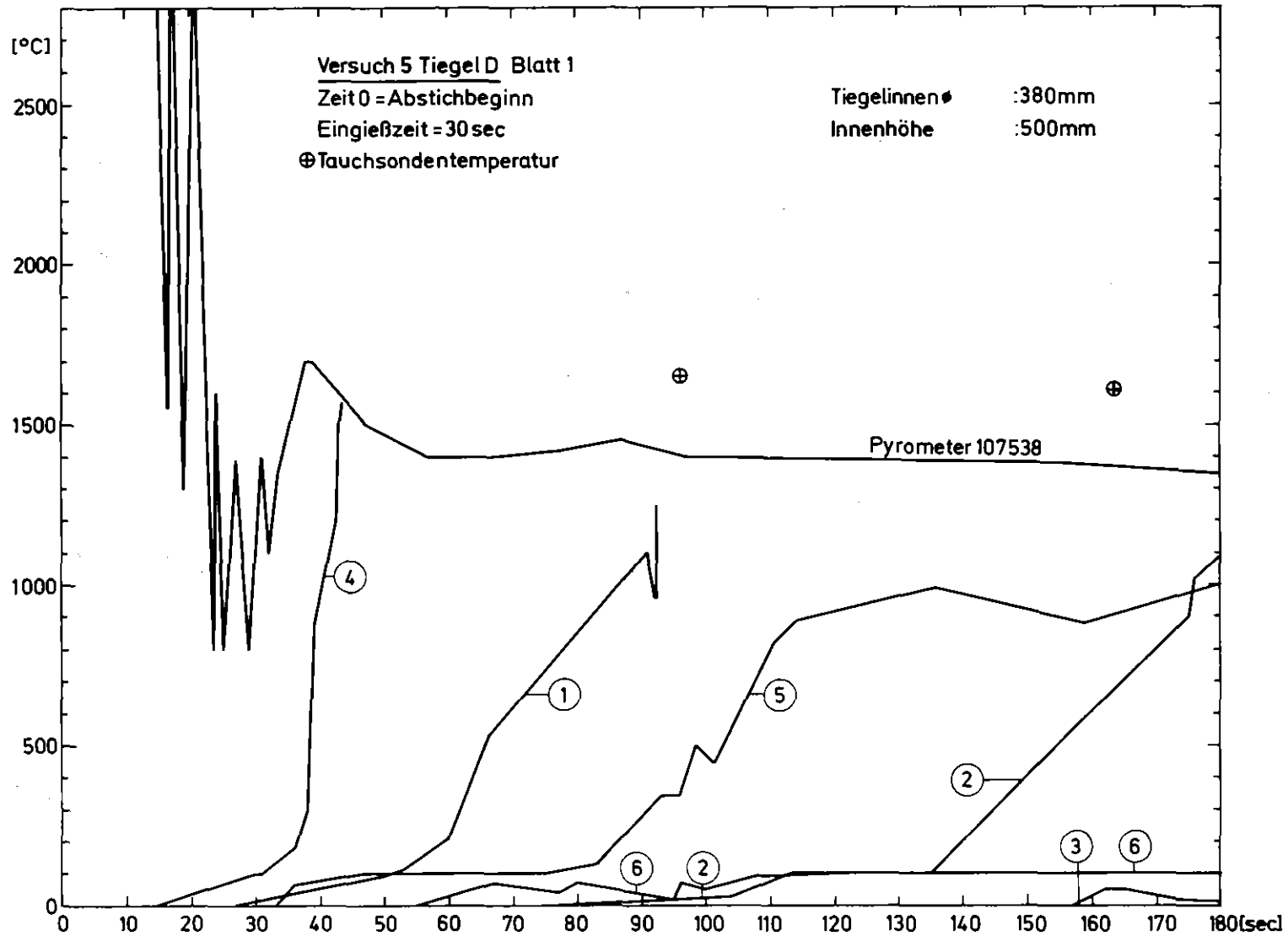


Abb. 100

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL D - TEMPERATURVERLÄUFE I

GFK
RBT/IT

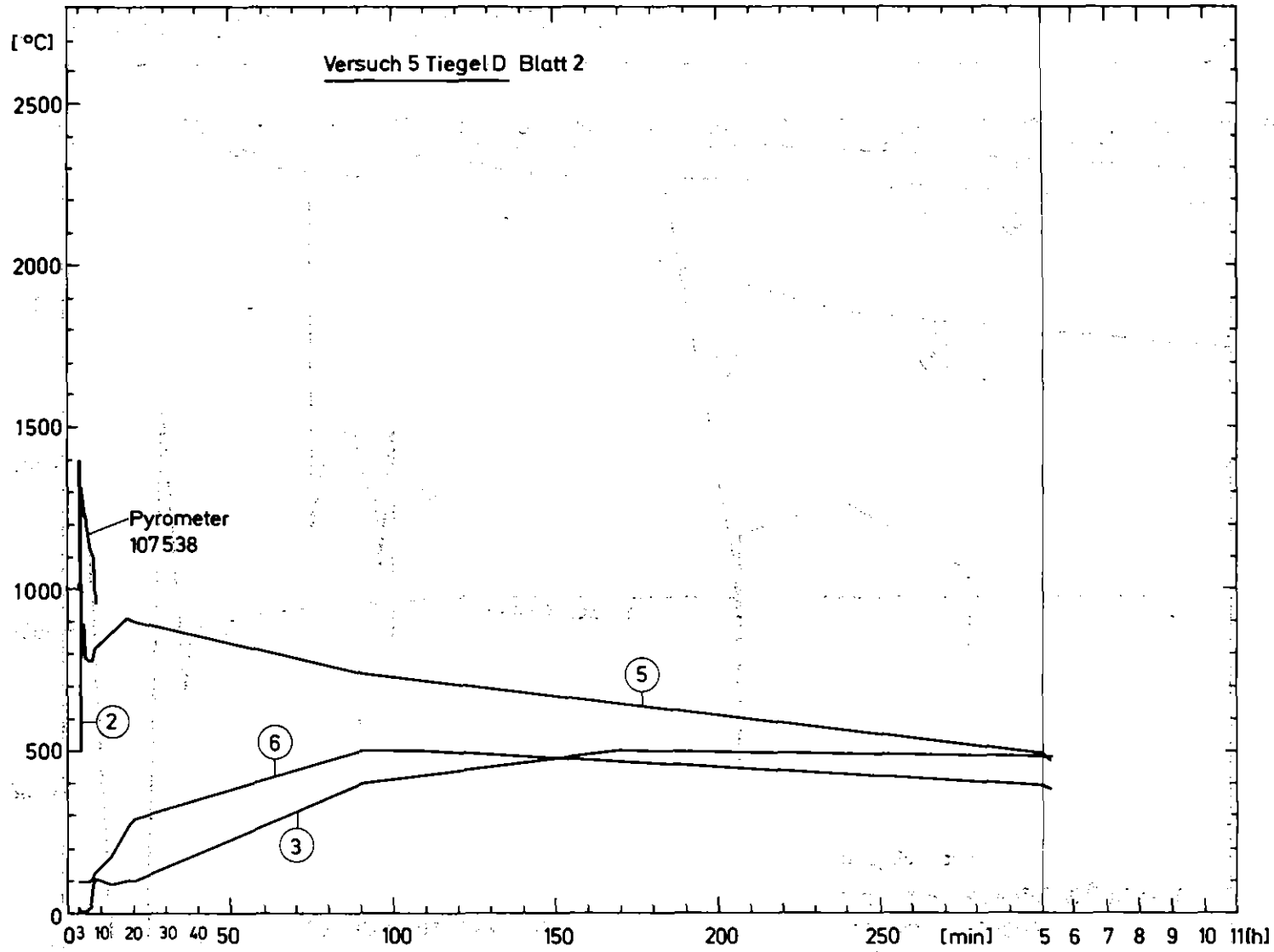


Abb. 101

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT

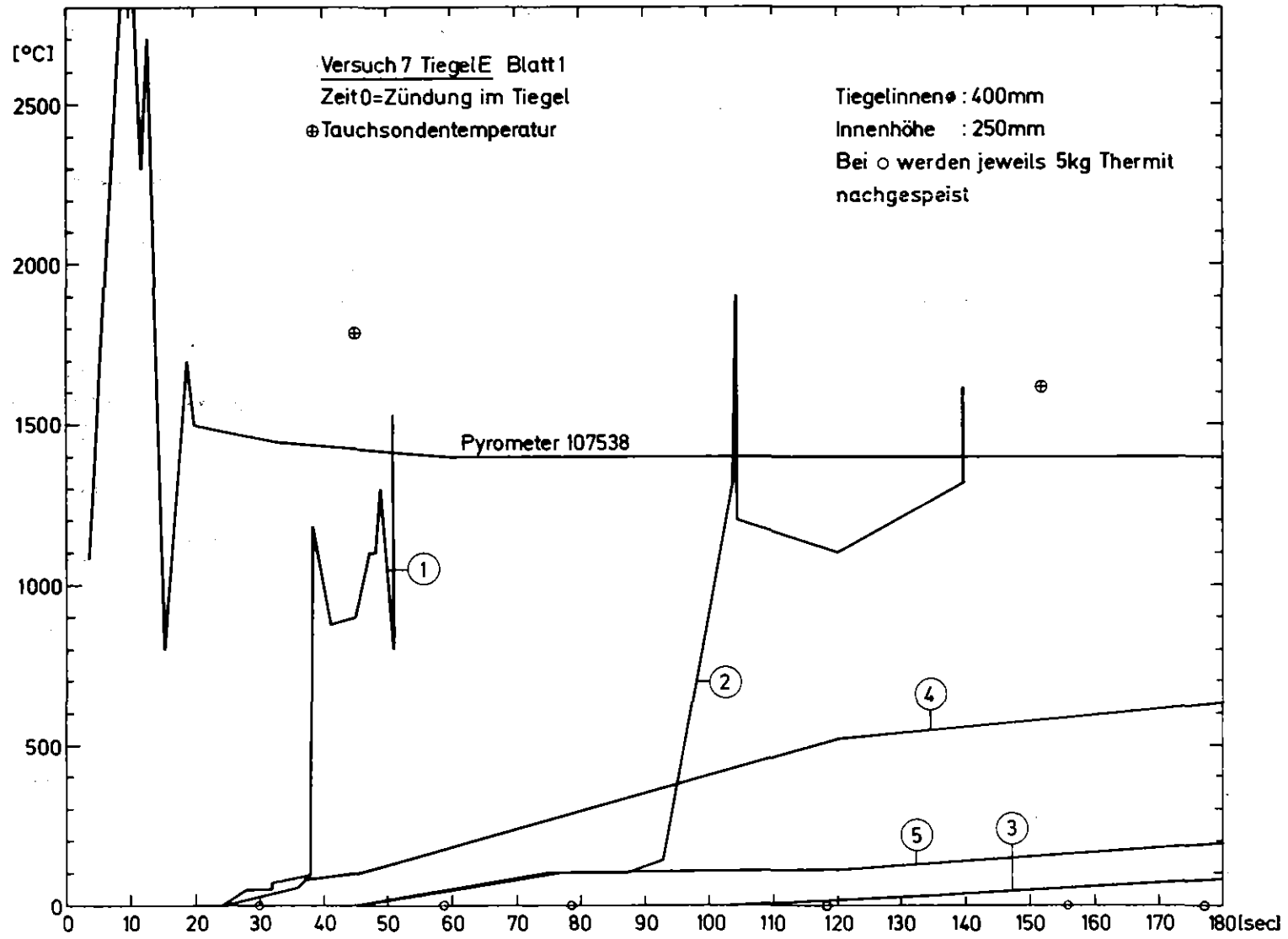


Abb. 102

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL E - TEMPERATURVERLÄUFE I

GFK
RBT/IT

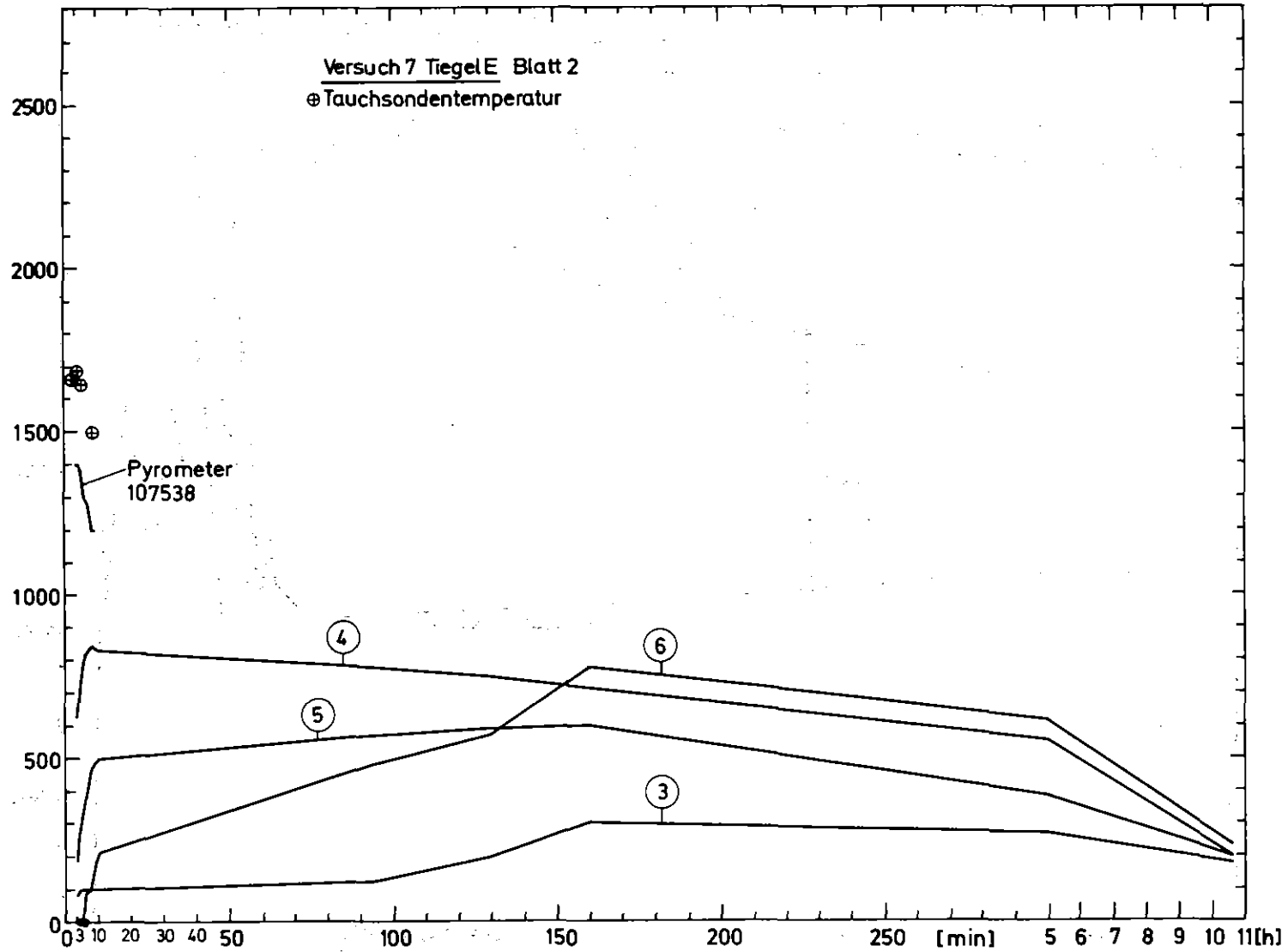


Abb. 103

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT

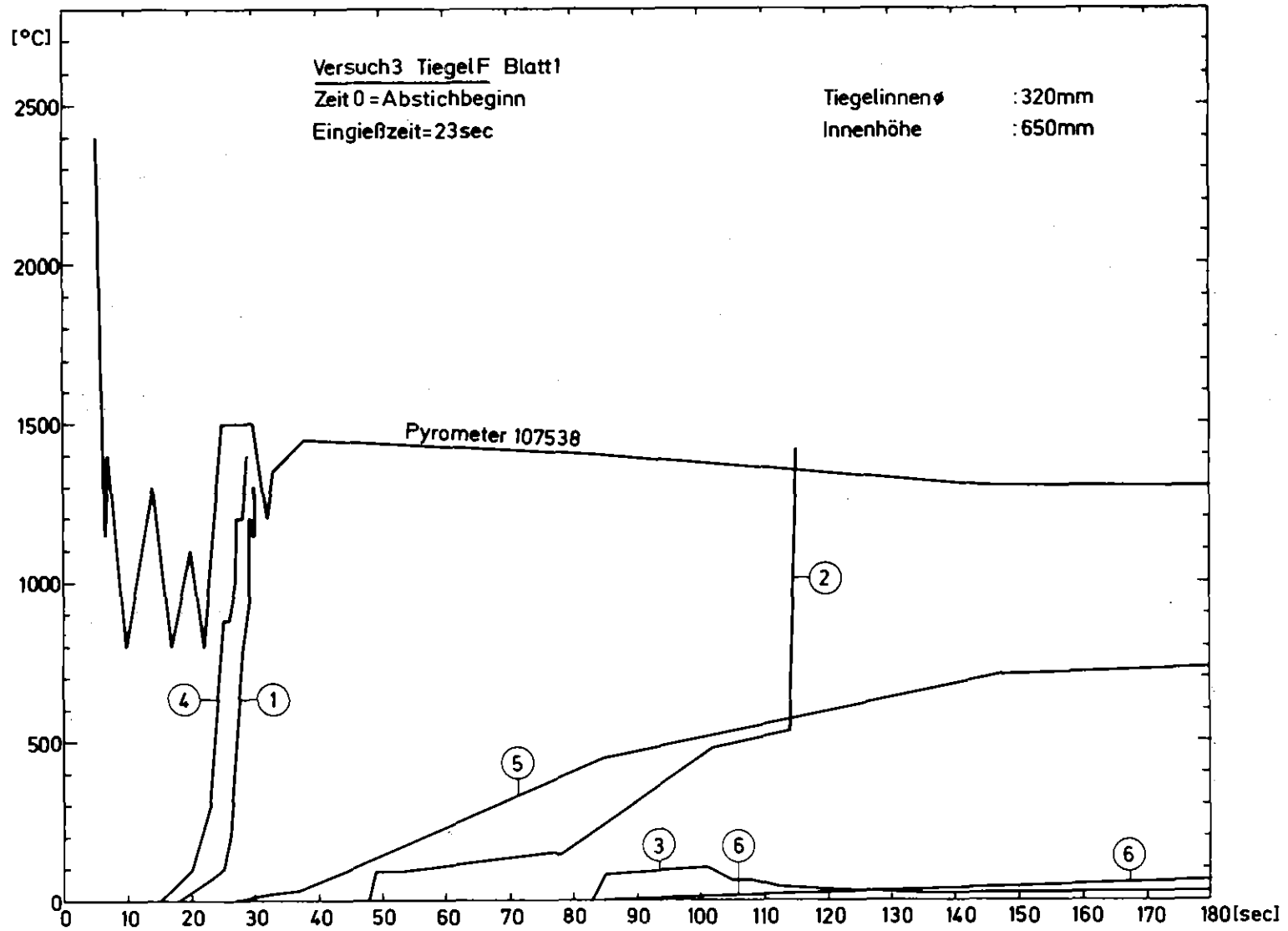
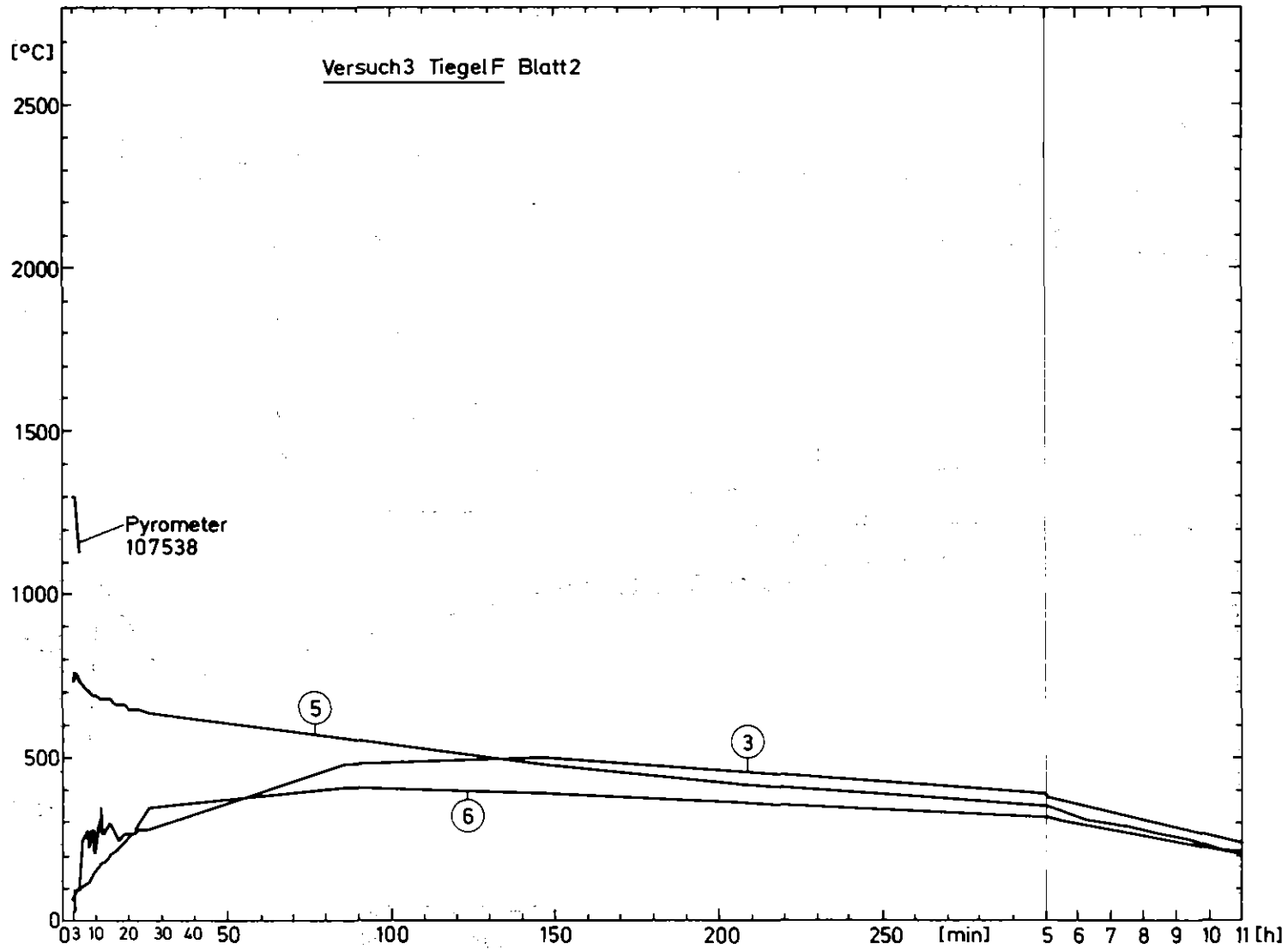


Abb. 104

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL F - TEMPERATURVERLÄUFE I

GFK
RBT/IT

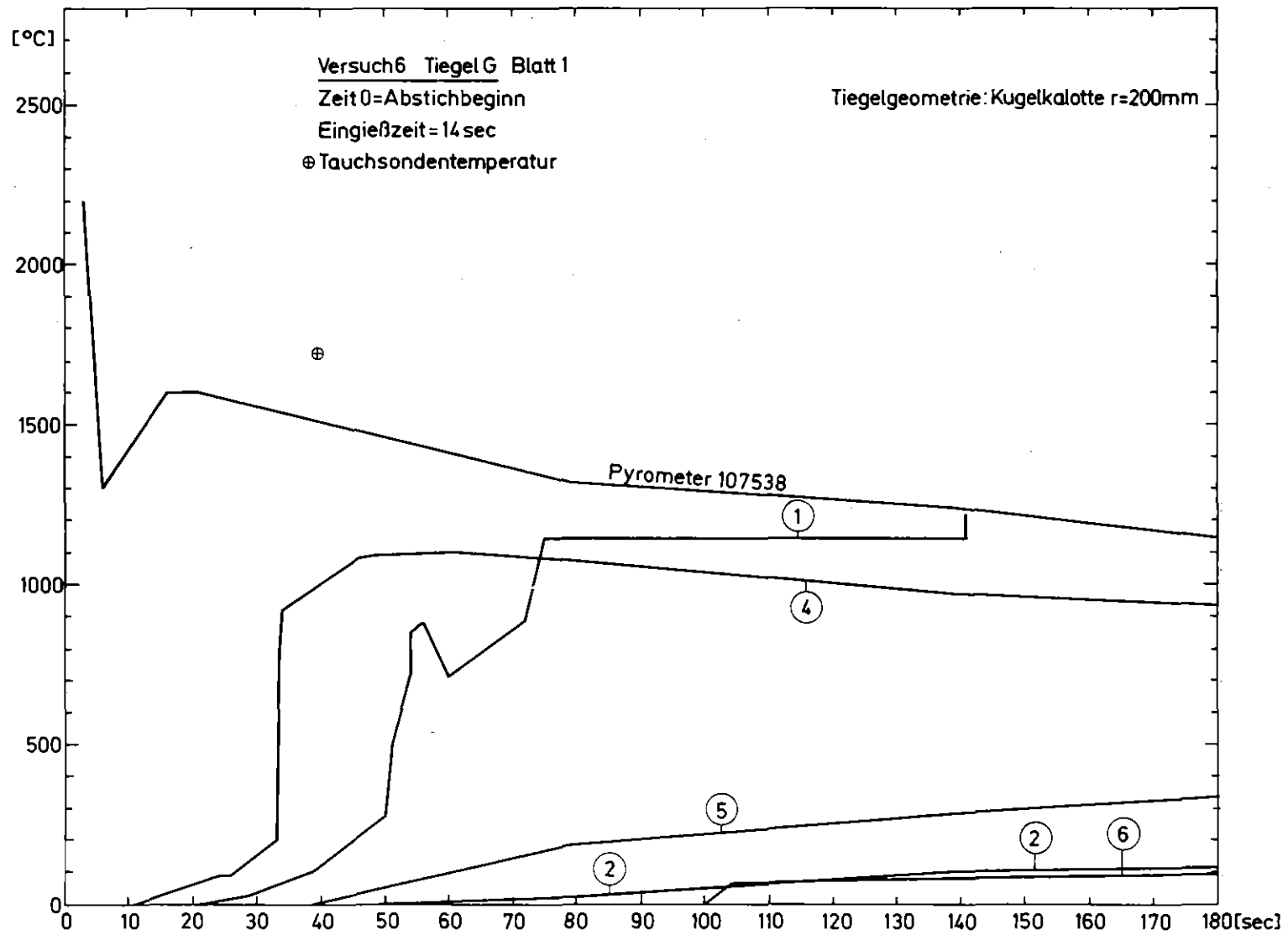


PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL F - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT

Abb. 105



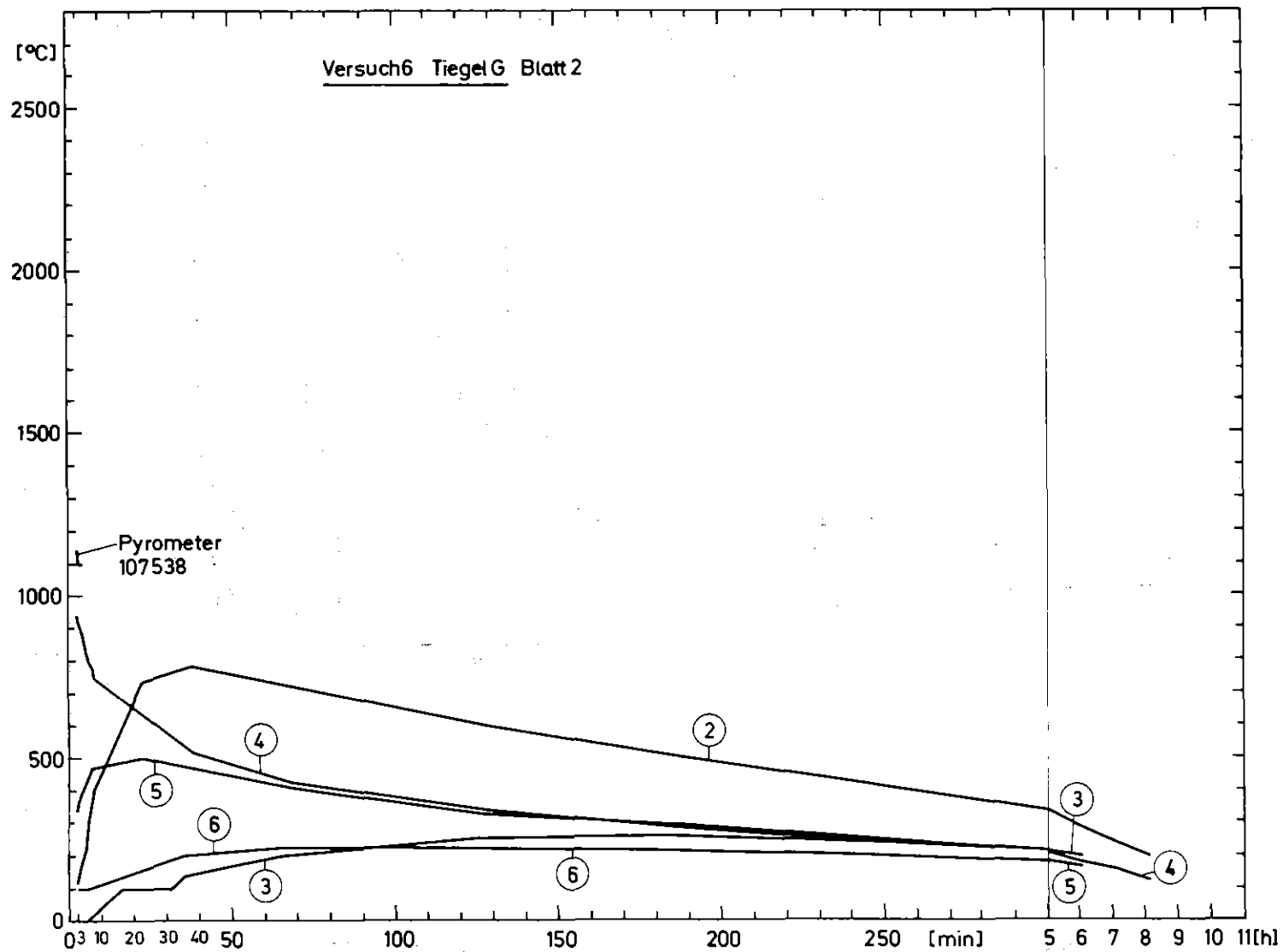
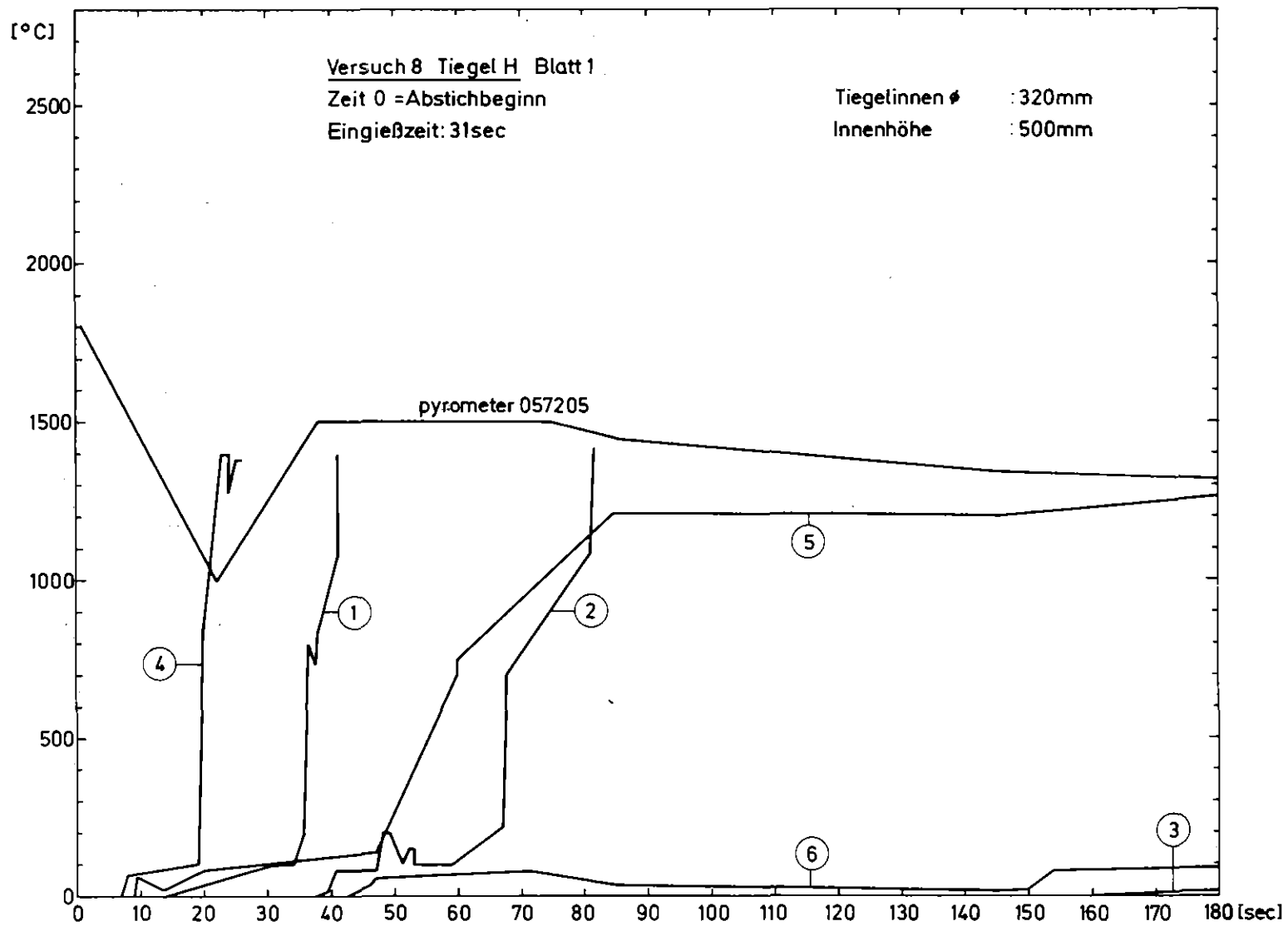


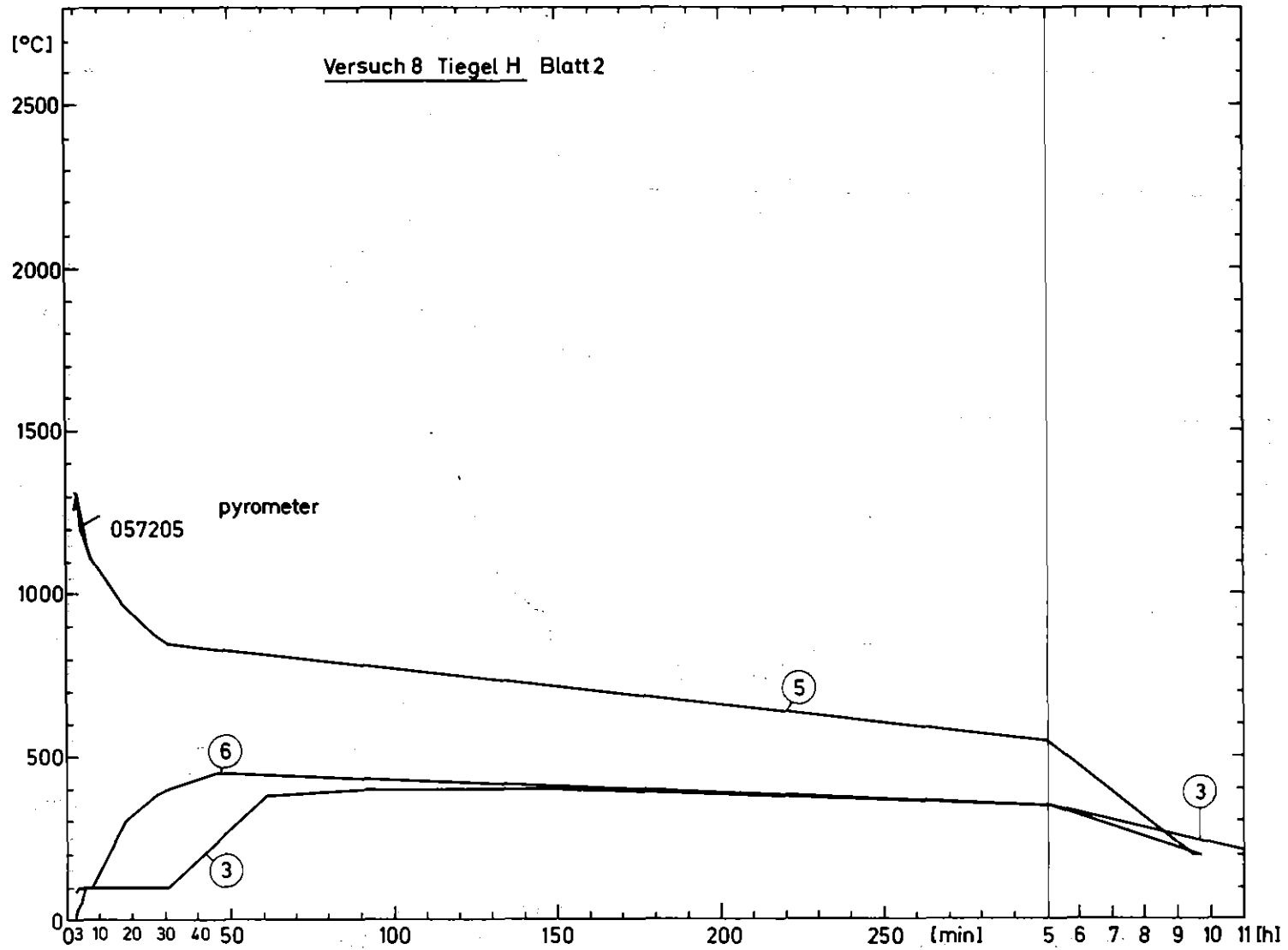
Abb. 107

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN!
TIEGEL G - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT





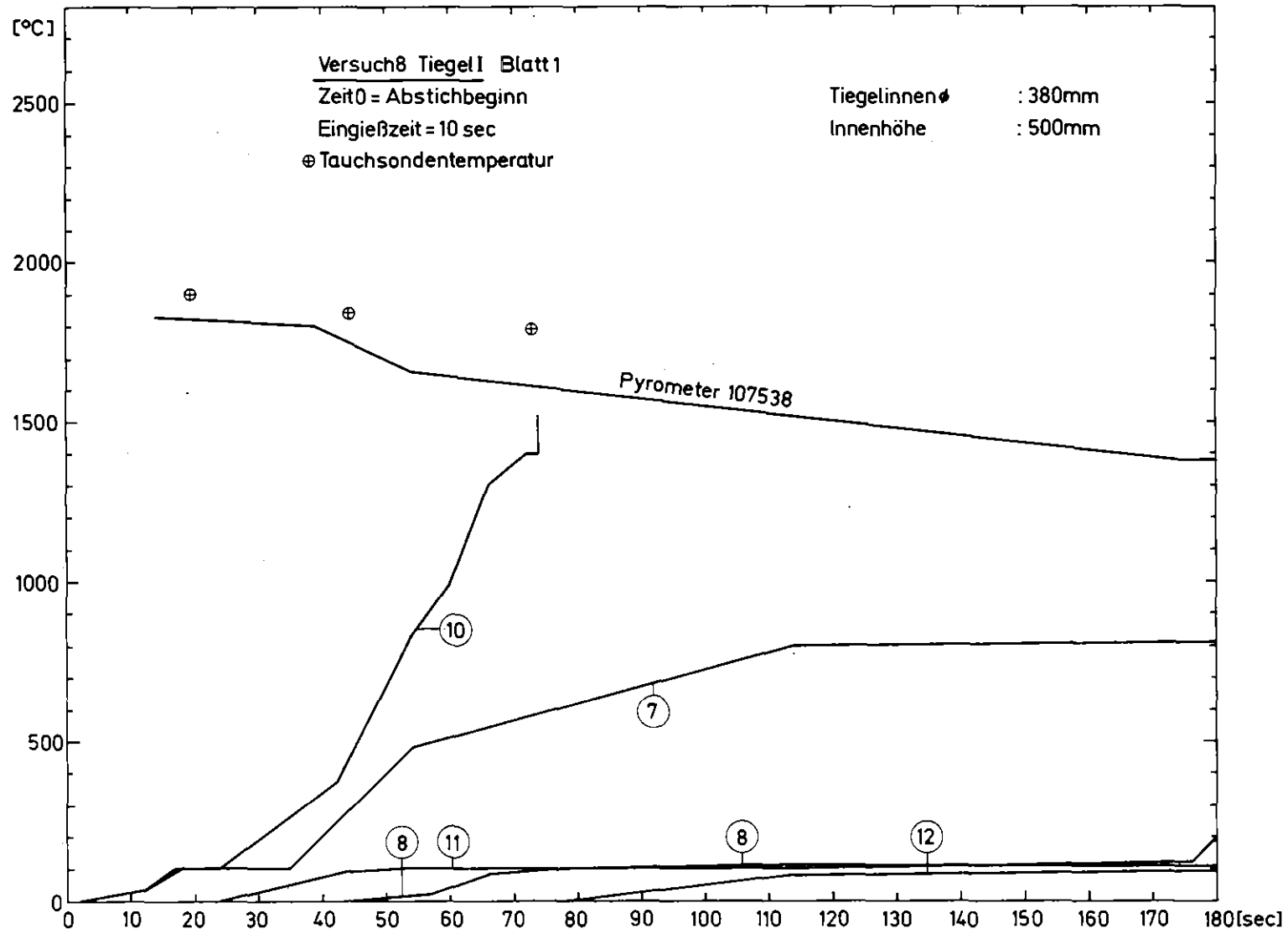


Abb. 110

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
 TIEGEL I - TEMPERATURVERLÄUFE I

GFK
RBT/IT

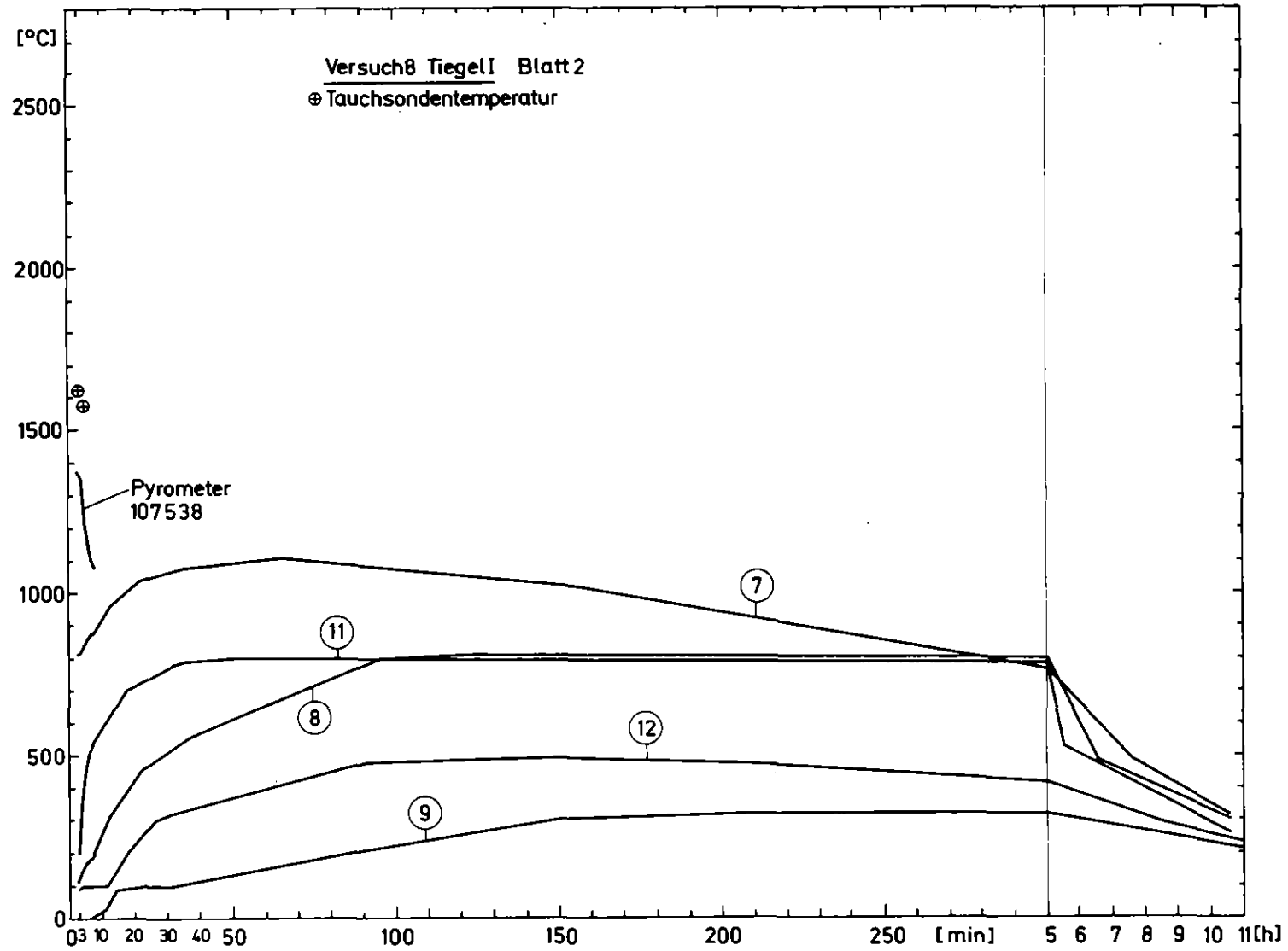
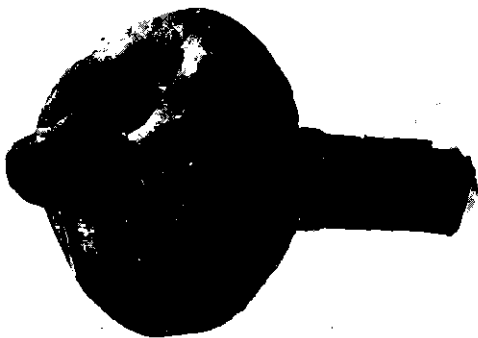


Abb. 111

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - TEMPERATURVERLÄUFE II

GFK
RBT/IT



GFK
RBT/IT

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL G - TAUCHSONDEN-MESSKÖPFE

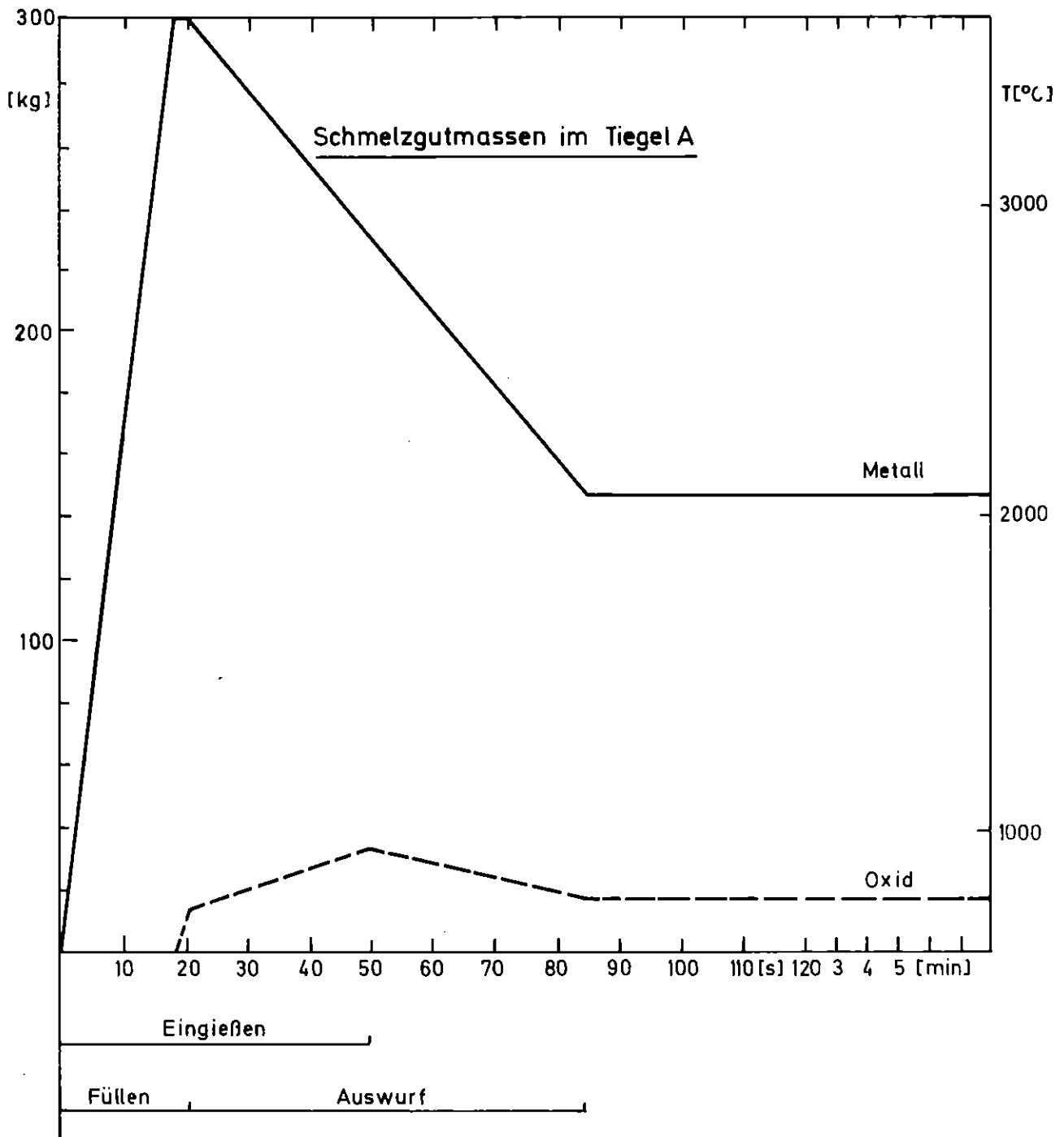
PNS
4323



GFK
RBT/IT

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - TAUCHSONDEN

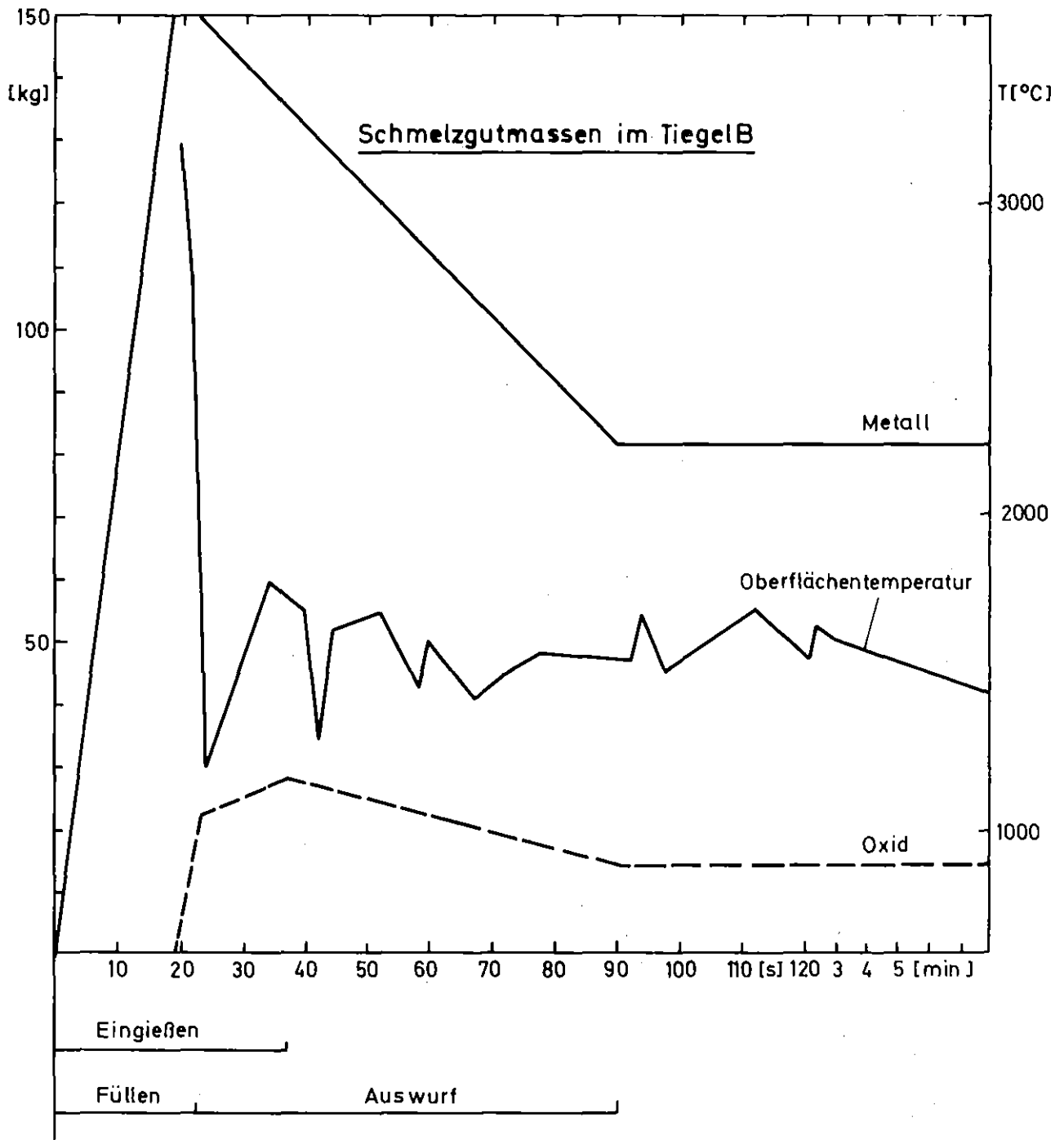
PNS
4323



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL A

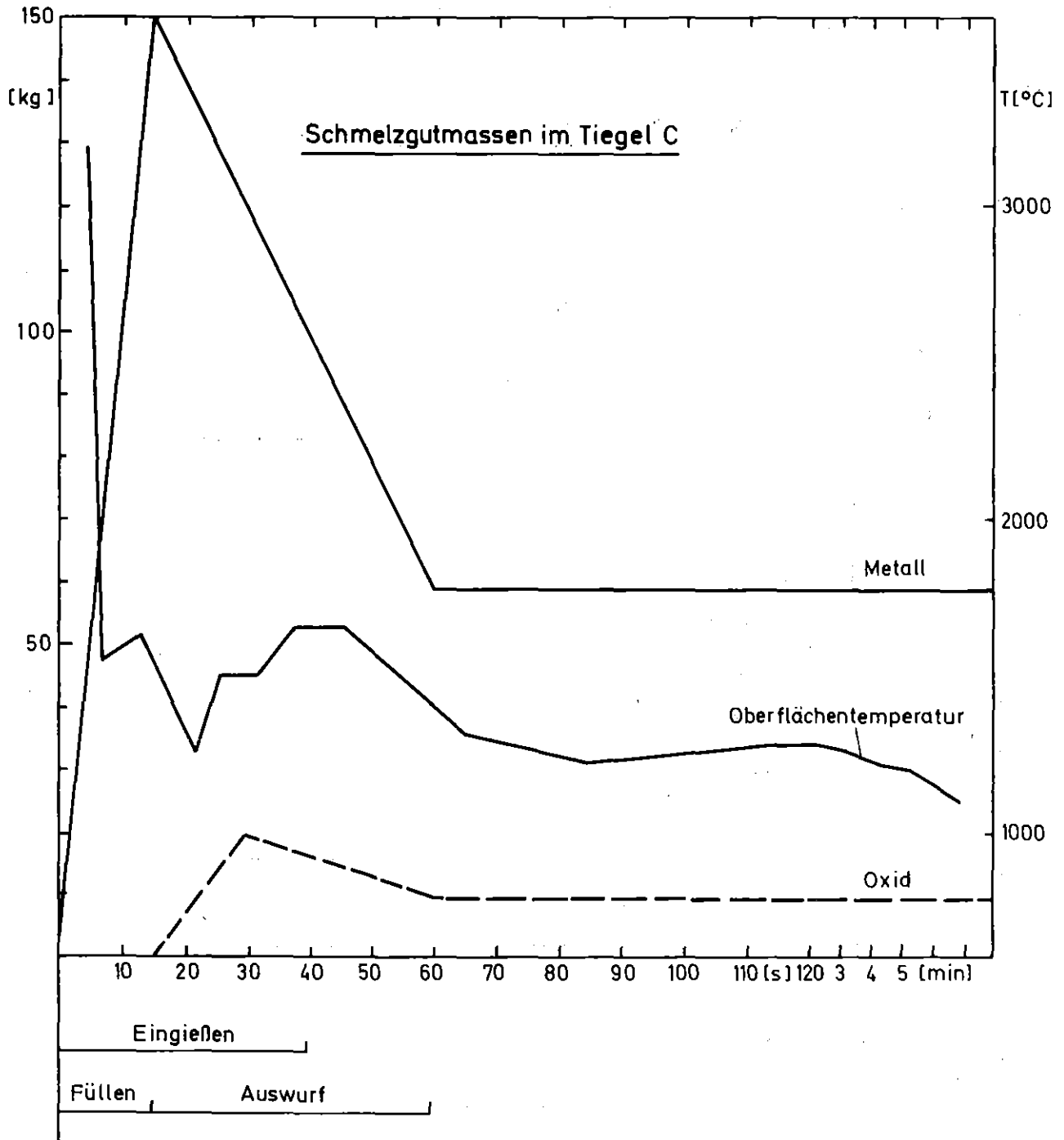
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL B

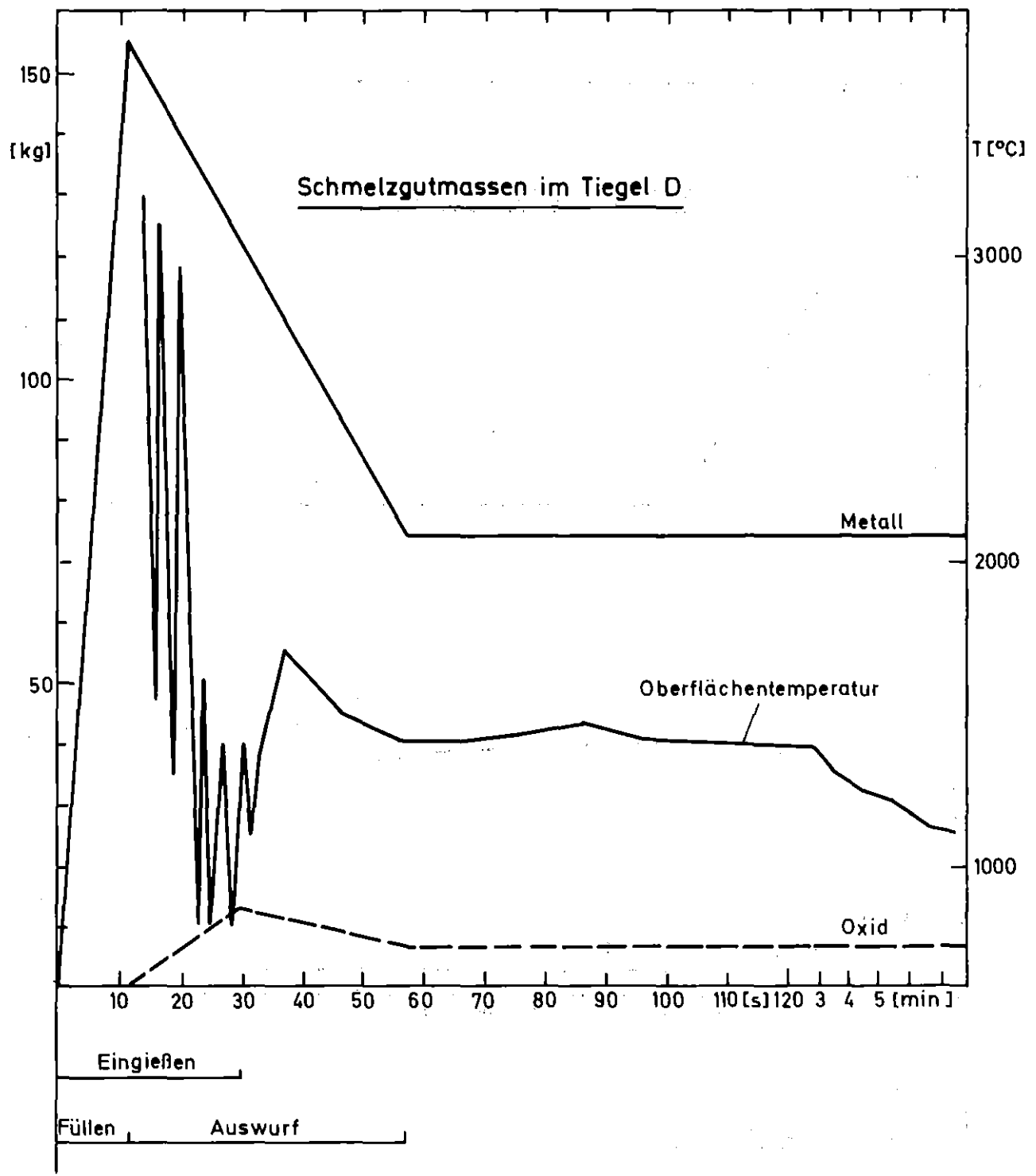
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL C

GFK
RBT/IT

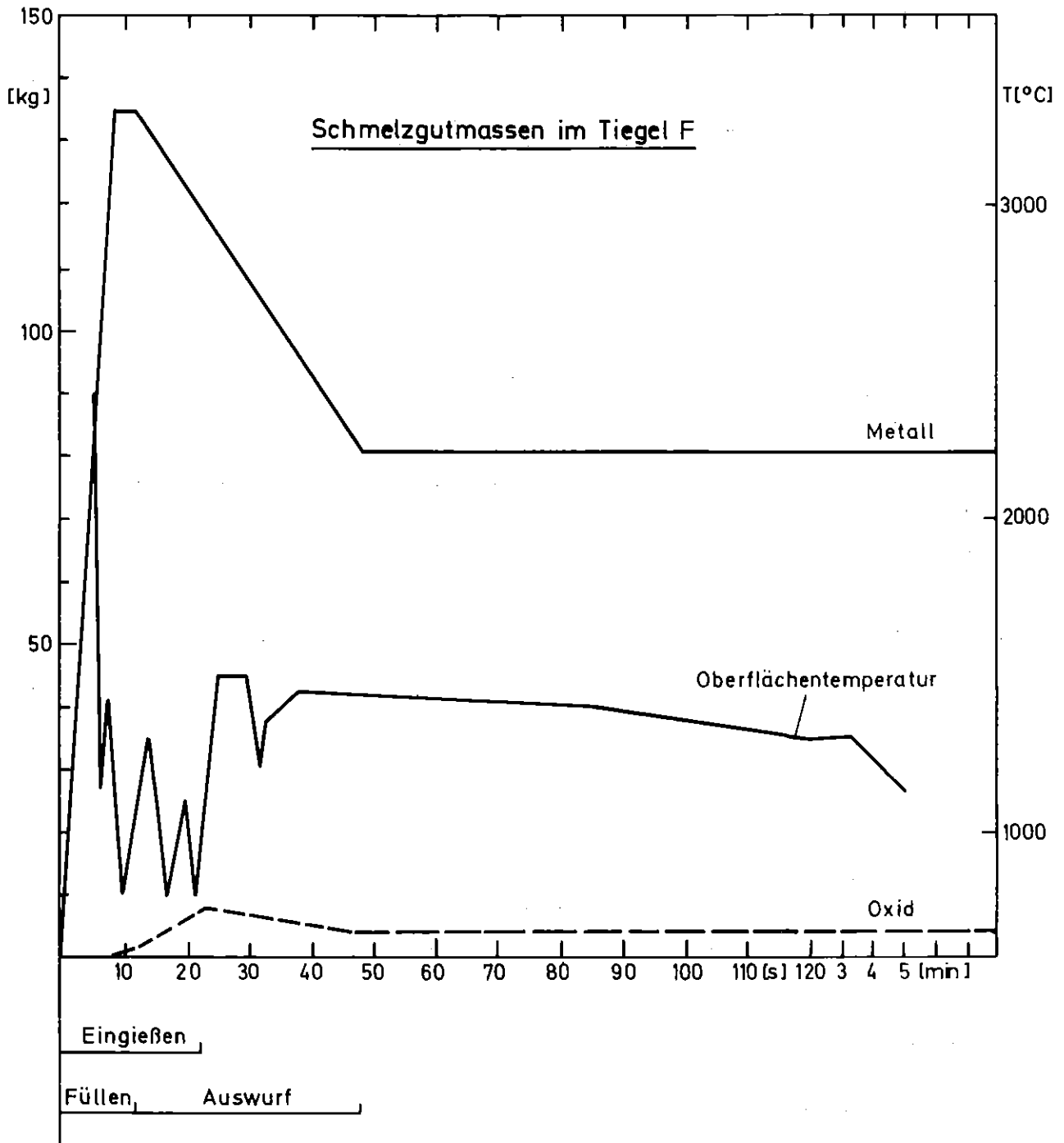


PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL D

GFK
RBT/IT

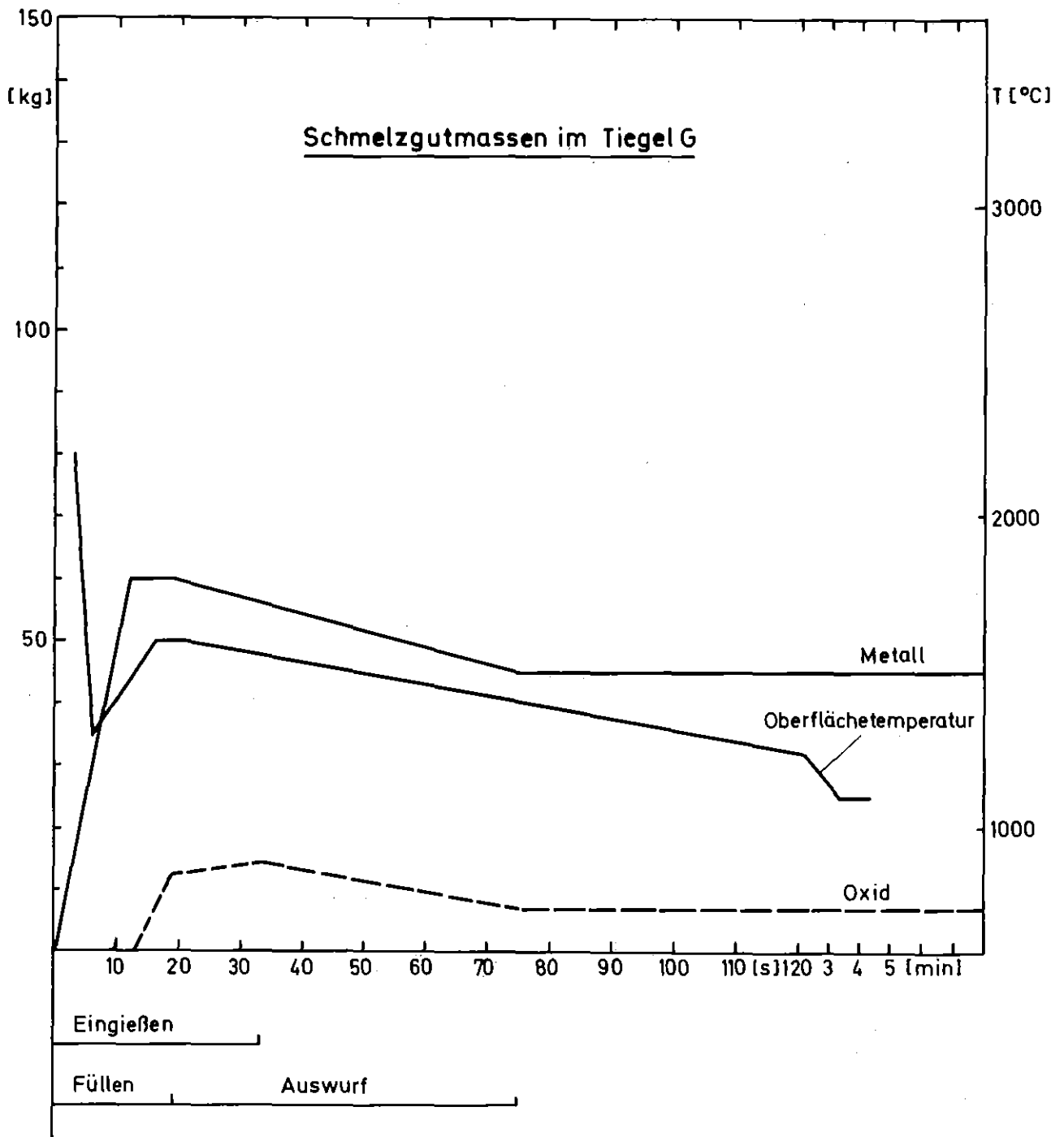
Abb. 117



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL F

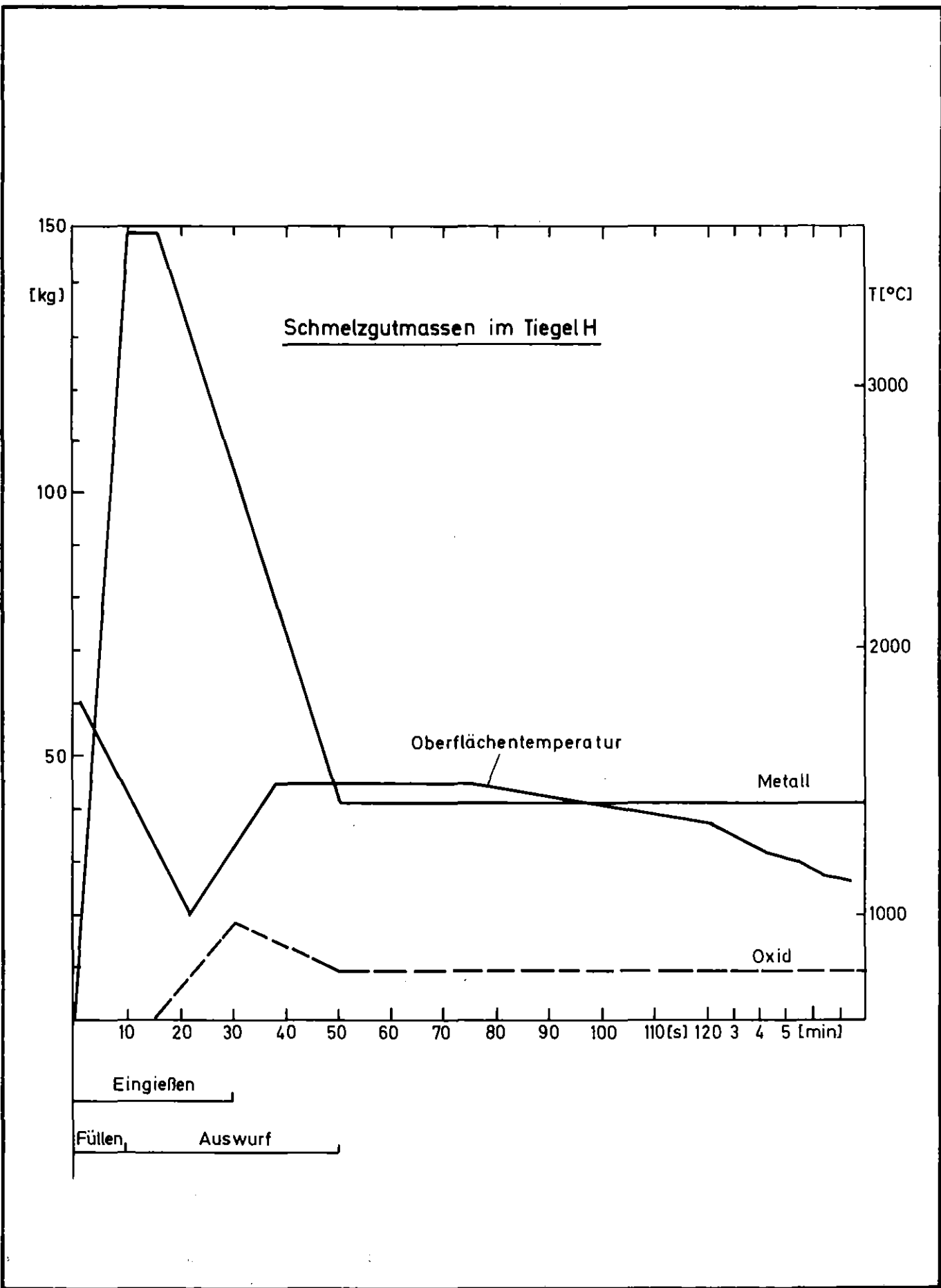
GFK
RBT/IT



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL G

GFK
RBT/IT

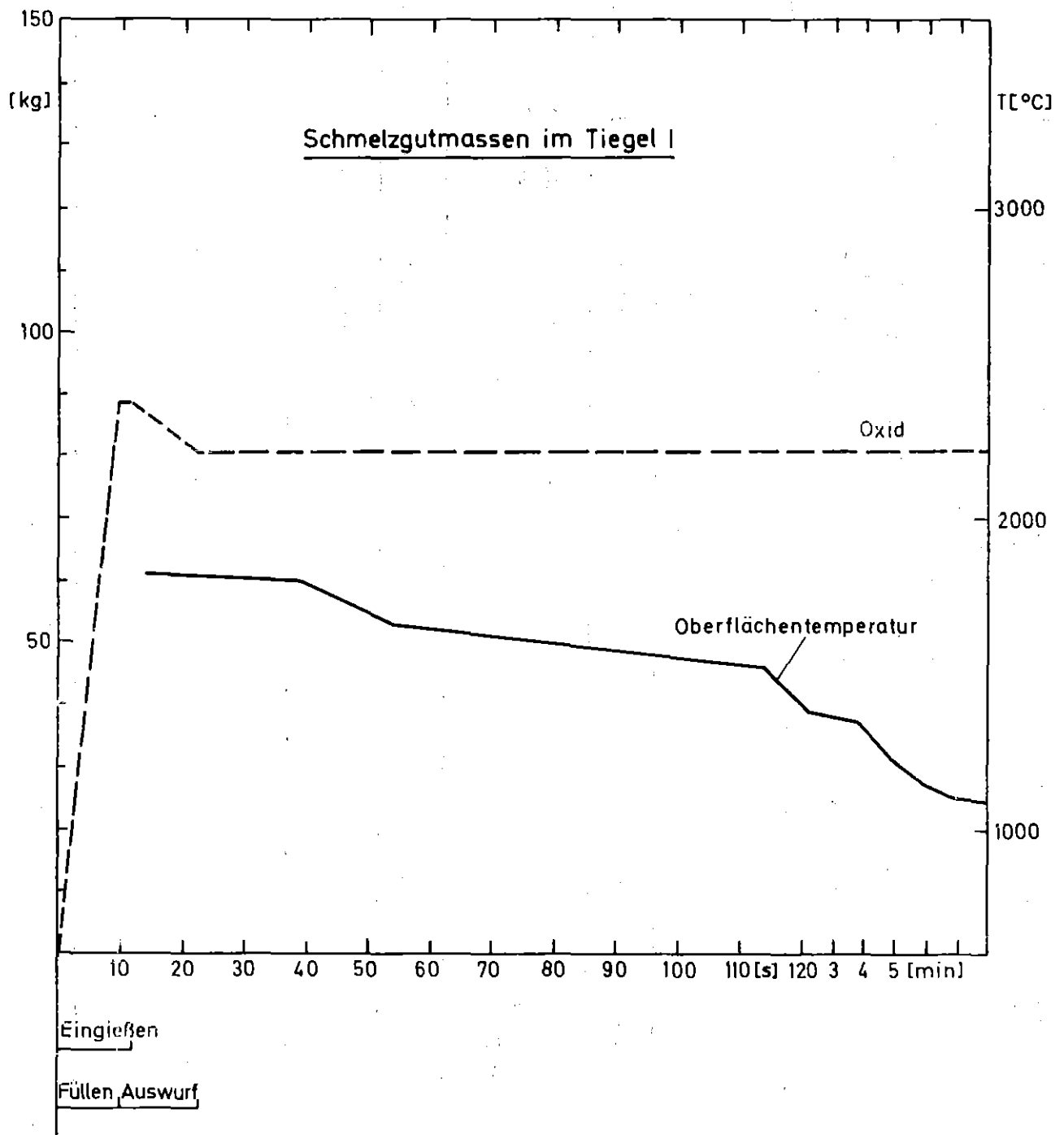


PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHELZEN
SCHMELZGUTMASSEN IM TIEGEL H

GFK
RBT/IT

Abb. 120



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
SCHMELZGÜTMASSEN IM TIEGEL I

GFK
RBT/IT

Tiegel	Reaktionszeit im Tiegel	Auslaufzeit des Schmelzgutes	Beginn Einfluß-Füllung des Tiegels	Rauchschwaden über der Schmelze	Füllung des Tiegels - Ende Eruption	Auftreten von Blasen	Oberfläche erstarrt	Gießstrahl	
								∅ mm	Geschwindigkeit m/sec.
A	40"	50"	21" Rinne wird geschwenkt	2" - 40"	21"-1'25"	keine Blasen erkennbar, nur Kolbenbewegung	5'	nicht auswertbar	
B	35"	37"	23"	3" - 21"	23"-1'30"	3'	9'30"	nicht auswertbar	
C	35"	40"	15"	3" - 13"	15" - 60"	2'30"	6'	17	1,2
D	23"	30"	12"	3" - 23"	12" - 58"	2'40"	6'40"	13	1,1
E	--	Thermit wird im Tiegel gezündet	--	--	--	4'30"	nicht erkennbar	--	--
F	35"	23"	12"	1" - 12"	12" - 48"	2'15"	6'23"	nicht auswertbar	
G	41"	33"	19"	4" - 30"	19"-1'15"	nicht auswertbar	nicht auswertbar	nicht auswertbar	
H	35"	31"	10"	2" - 26"	10" - 50"	nicht auswertbar	nicht auswertbar	nicht auswertbar	
I	--	12"	10"	kein Rauch	8" - 23"	nicht auswertbar	nicht auswertbar	nicht auswertbar	

PNS

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

GFK

4323

DATEN AUS FILMAUSWERTUNG

RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreff- zeit ab Einguß / s /	Geschwindig- keit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	18	33,3	2850
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	19	63,2	2800
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	38	31,6	2400
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	78	30,8	1800
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	132	22,7	1600
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	480	12,5	1400
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	20	30,0	1500
100°C-Isotherme	TE5 - TE6	30	radial	94	19,1	1500
100°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	60	20,0	1500
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	26,5	22,6	2700
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	32,5	36,9	2500
800°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	59,5	20,2	2100
800°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	97,5	24,6	1750
800°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	33,0	18,2	1500
800°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	65,0	18,5	1500
Schmelzfront	O - TE4	10	radial	27,0	22,2	2700
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	33,0	36,4	2700
Schmelzfront	O - TE5	20	radial	66,5	18,1	2100
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	99,0	24,2	2000
Schmelzfront	TE4 - TE5	10	radial	39,5	15,2	1500
Schmelzfront	TE1 - TE2	20	axial	66,0	18,2	1400

O = Tiegelinnenwand

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL B - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK
RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr.Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	41	29,3	2000
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	37	16,2	2000
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	66	36,4	1800
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	79	12,5	1700
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	325	9,2	1200
100°C-Isotherme	TE1-TE2	20	axial	25	48,0	1550
100°C-Isotherme	TE4-TE5	10	radial	42	14,3	1500
100°C-Isotherme	TE5-TE6	30	radial	246	7,3	1200
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	53	22,6	1800
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	57	10,5	1700
800°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	118	20,3	1600
800°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	925	1,3	1300
800°C-Isotherme	TE1-TE2	20	axial	65	18,5	1400
800°C-Isotherme	TE4-TE5	10	radial	868	0,7	1250
Schmelzfront	O - TE7	50	axial	48,5	61,9	1800
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	58,0	20,7	1800
Schmelzfront	O - TE4	10	radial	65,5	9,2	1800
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	470,0	5,1	1500
Schmelzfront	TE1-TE2	20	axial	412,0	2,9	1200

O = Tiegelinnenwand

TE7 ist an Armierung befestigt

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL C - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK
RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächentemperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	30	20,0	2500
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	52	23,0	2300
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	47	25,5	2200
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	113	21,2	1800
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	108	27,8	1800
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	517	11,6	1400
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	17	35,2	1700
100°C-Isotherme	TE5 - TE6	30	radial	61	29,5	1300
100°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	61	19,7	1300
100°C-Isotherme	TE2 - TE3	60	axial	404	8,9	1100
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	39	15,4	2400
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	78	15,4	2100
800°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	110	10,9	1600
800°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	157	15,3	1600
800°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	71	8,5	1350
800°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	79	1,5	1300
Schmelzfront	O - TE4	10	radial	43,5	13,8	2700
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	92,5	13,0	2200
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	182,0	13,2	1800
Schmelzfront	TE2 - TE2	20	axial	89,5	13,4	1300

O = Tiegelinnenwand

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL D - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK
RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	38	32,8	2000
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	75	32,0	1600
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	240	25,0	1470
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	45	13,3	1850
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	75	16,0	1600
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	420	7,0	1300
100°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	37	32,4	1400
100°C-Isotherme	TE2 - TE3	60	axial	165	21,8	1400
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	30	20,0	1400
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	38,5	32,1	2000
800°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	99,0	24,2	1550
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	51	23,5	2000
Schmelzfront	TE1 - TE2	20	axial	89	13,5	1400
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	140	17,1	1500

O = Tiegelinnenwand

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL E - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK
RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	20	30,0	2200
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	25	48,0	2100
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	45	26,7	2000
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	49	49,0	2000
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	85	148,5	1900
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	205	14,6	1400
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	25	24,0	1500
100°C-Isotherme	TE5 - TE6	30	radial	160	11,3	1400
100°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	24	50,0	1400
100°C-Isotherme	TE2 - TE3	60	axial	36	100,0	1400
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	24,5	24,5	2200
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	28,0	42,9	2100
800°C-Isotherme	O - TE2	40	radial	114,0	21,1	1800
800°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	86,0	13,9	1400
Schmelzfront	O - TE4	10	radial	29,5	20,3	2000
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	30,0	40,0	2000
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	115,5	20,8	1700
Schmelzfront	TE1 - TE2	20	axial	86,0	13,9	1400

O = Tiegelinnenwand

PNS

4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

TIEGEL F - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK

RBT/IT

Meßwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	24	25,4	1850
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	39	30,8	1700
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	61	19,7	1600
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	139	17,3	1450
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	199	15,1	1350
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	979	6,1	1100
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	37	16,2	1450
100°C-Isotherme	TE5 - TE6	30	radial	138	13,0	1300
100°C-Isotherme	Te1 - TE2	20	axial	100	12,0	1200
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	34	17,6	1750
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	54	22,2	1650
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	141	8,5	1500

O = Tiegelinnenwand

PNS

4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

TIEGEL G - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK

RBT/IT

Messwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	8	75,0	1800
100°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	31	38,7	1700
100°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	20	60,0	1700
100°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	50	48,0	1650
100°C-Isotherme	O - TE6	50	radial	205	14,6	1500
100°C-Isotherme	O - TE3	100	axial	325	18,5	1400
100°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	12	50,0	1700
100°C-Isotherme	TE5 - TE6	30	radial	185	9,7	1350
100°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	19	63,2	1550
100°C-Isotherme	TE2 - TE3	60	axial	175	20,6	1250
800°C-Isotherme	O - TE4	10	radial	20	30,0	1700
800°C-Isotherme	O - TE1	20	axial	36	33,3	1650
800°C-Isotherme	O - TE5	20	radial	62	19,3	1600
800°C-Isotherme	O - TE2	40	axial	71	33,8	1550
800°C-Isotherme	TE4 - TE5	10	radial	42	14,3	1500
800°C-Isotherme	TE1 - TE2	20	axial	35	34,2	1500
Schmelzfront	O - TE4	10	radial	26	23,1	1700
Schmelzfront	O - TE1	20	axial	38	31,6	1650
Schmelzfront	O - TE2	40	axial	82	29,3	1600
Schmelzfront	TE1 - TE2	20	axial	44	27,3	1500

O = Tiegelinnenwand

PNS

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

GFK

4323

TIEGEL H - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

RBT/IT

Messwert	Messung	Abstand / mm /	Richtung	Auftreffzeit ab Einguß / s /	Geschwindigkeit / mm/min /	Oberflächen- temperatur (Integr. Mittelw.) / °C /
100°C-Isotherme	O - TE10	10	radial	18,0	33,3	1800
100°C-Isotherme	O - TE7	20	axial	18,5	64,8	1800
100°C-Isotherme	O - TE11	20	radial	43,0	27,9	1800
100°C-Isotherme	O - TE8	40	axial	66,0	36,4	1750
100°C-Isotherme	O - TE12	50	radial	114,0	26,3	1700
100°C-Isotherme	O - TE9	100	axial	1476,0	4,1	1000
100°C-Isotherme	TE7 - TE8	20	axial	47,5	25,3	1700
100°C-Isotherme	TE8 - TE9	60	axial	1390,0	2,6	1000
100°C-Isotherme	TE10- TE11	10	radial	25,0	24,0	1750
100°C-Isotherme	TE11- TE12	30	radial	71,0	25,4	1600
800°C-Isotherme	O - TE10	10	radial	51,0	11,8	1800
800°C-Isotherme	O - TE7	20	axial	115,0	10,4	1700
Schmelzfront	O - TE10	10	radial	74,0	8,1	1750

O = Tiegelinnenwand

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
TIEGEL I - GESCHWINDIGKEIT DER TEMPERATURFRONTEN IM BETON

GFK

RBT/IT

Geschw. d. 100°C-Isothermen

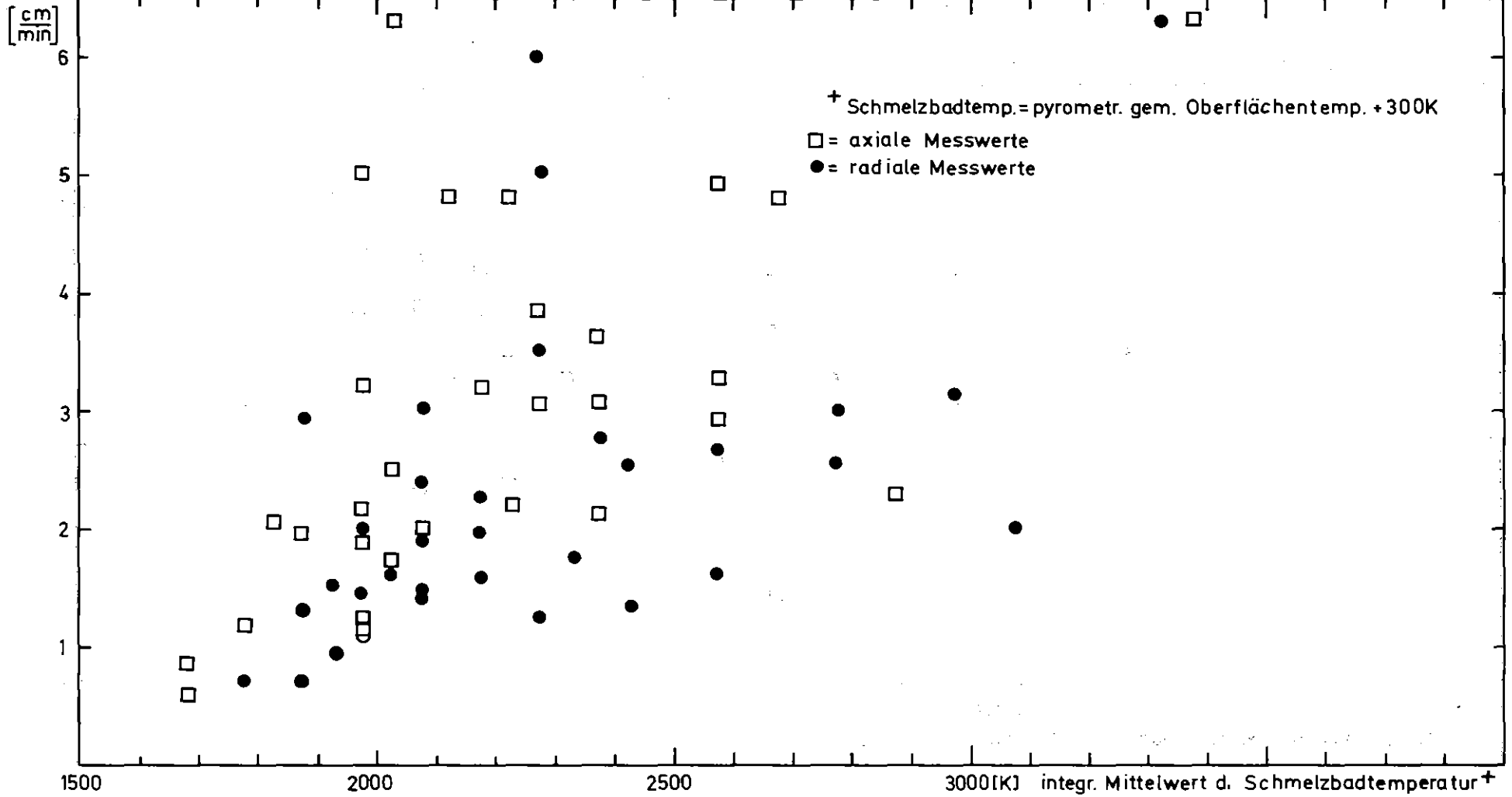


Abb. 131

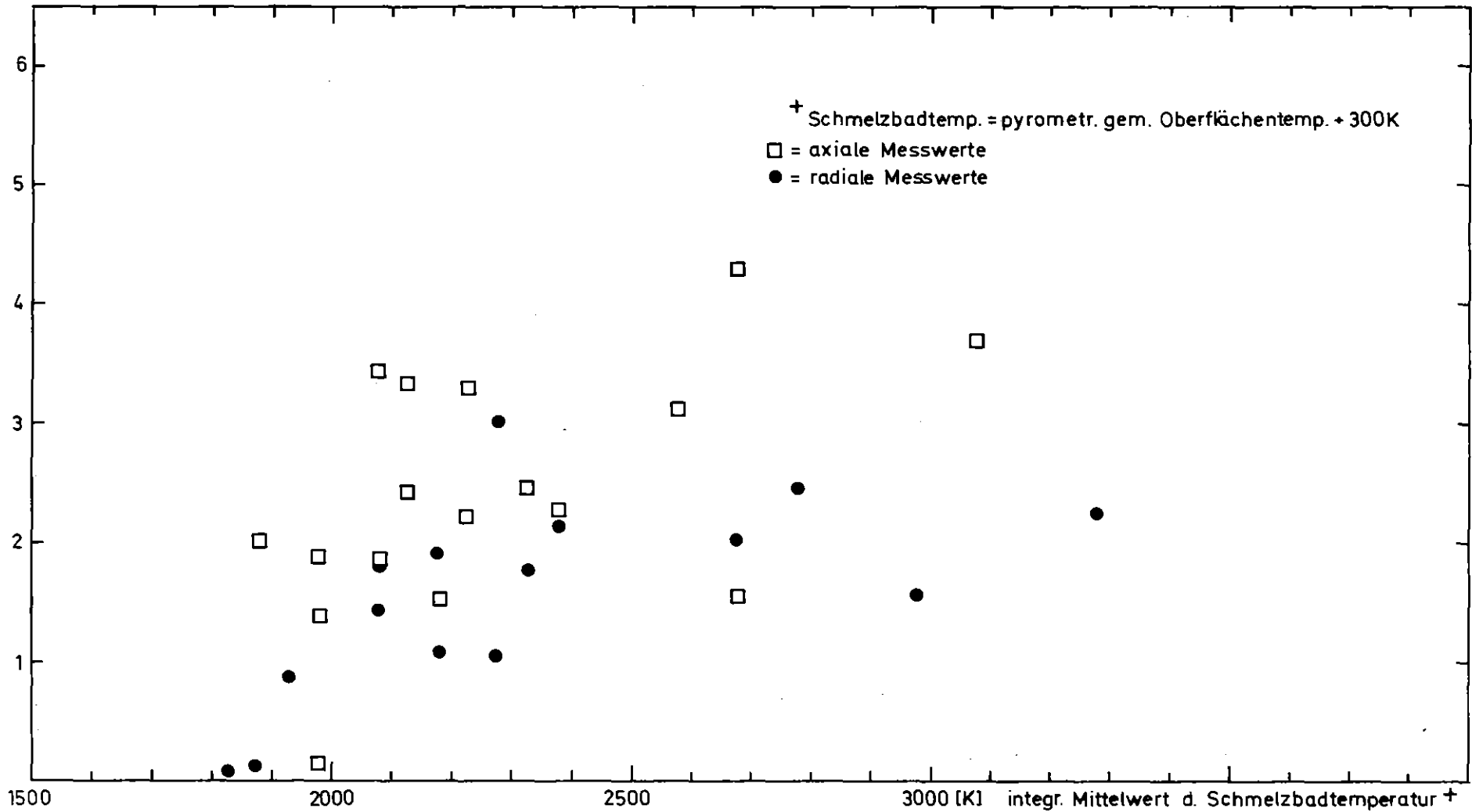
PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
GESCHWINDIGKEIT DER 100°C-ISOTHERME IM BETON

GFK
RBT/IT

Geschw. d. 800°C- Isothermen

$\left[\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right]$



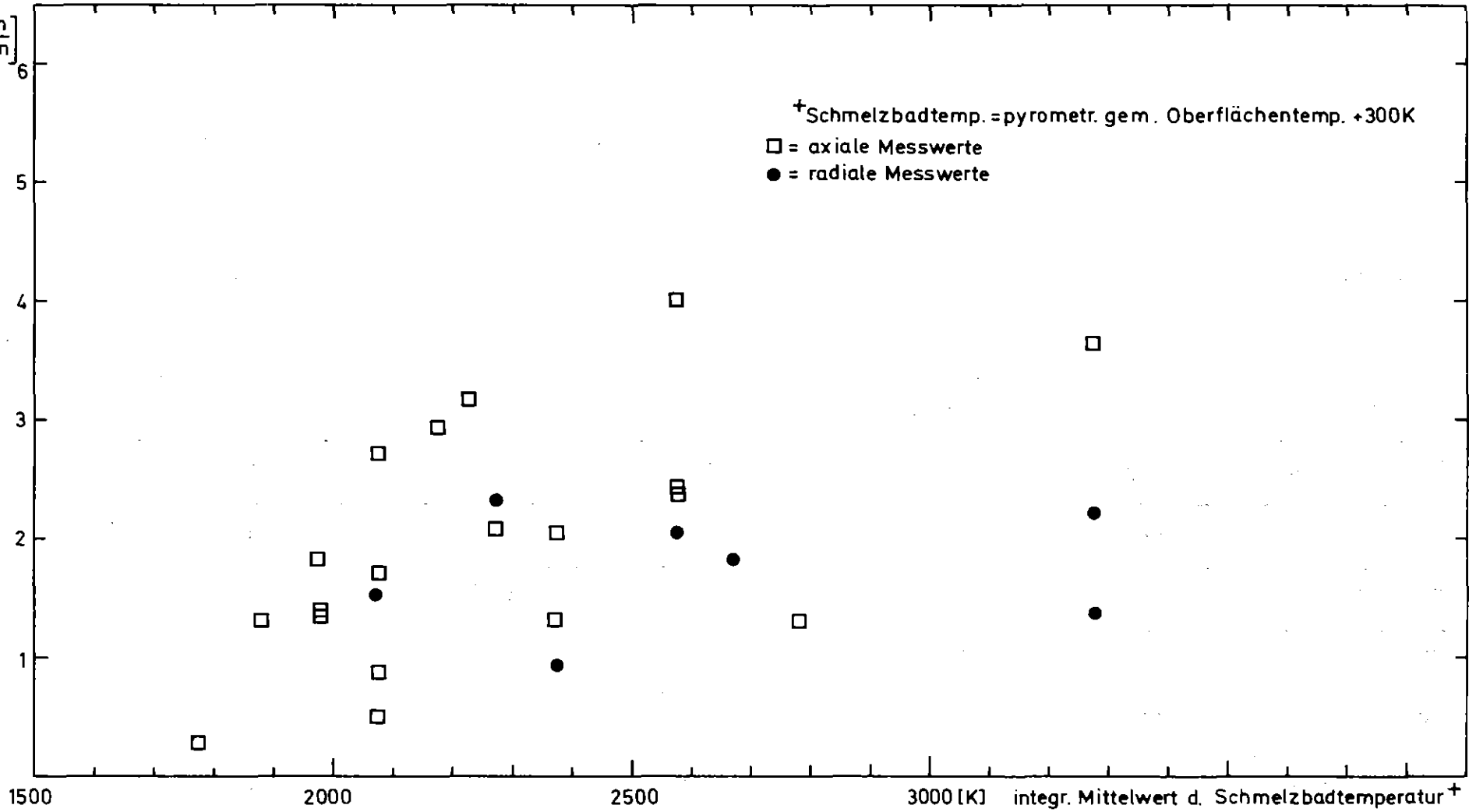
PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
GESCHWINDIGKEIT DER 800°C-ISOTHERME IM BETON

GFK
RBT/IT

Schmelzfrontgeschw.

$\left[\frac{\text{cm}}{\text{min}} \right]$



PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
GESCHWINDIGKEIT DER SCHMELZFRONT IM BETON

GFK
RBT/IT

Tiegel	max. Eindringtiefe der Schmelze		Verhältnis axial : radial	max. Stärke der dehydrierten Betonschicht		max. Stärke der zum Teil dehydrierten Betonschicht	
	axial / mm /	radial / mm /		axial / mm /	radial / mm /	axial / mm /	radial / mm /
A	42	52	0,81	48	35	56	>Tiegelrand
B	52	27	1,93	50	60	63	>Tiegelrand
C	59	53	1,11	57	45	132	>Tiegelrand
D	48	23	2,08	35	70	70	>Tiegelrand
E	78	23	3,39	50	40	74	35
F	39	38	1,03	60	50	>Tiegelrand	>Tiegelrand
G	45*	45*	1,00	25	40	30	35
H	61	36	1,70	37	51	52	44
I	5	12	0,42	42	43	62	>Tiegelrand

*) gemessen in Richtung 45° von der Mittellinie

PNS
4323

BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
EINDRINGTIEFEN DER SCHMELZE, DEHYDRIERTE ZONEN

GFK
RBT/IT

Tiegel	Metall-Regulus kg	axial		radial		Übergangsgebiet		Gesamtvolumen		Gesamtmasse (Beton $\rho = 2,4$)	
		geschmolzen dm ³	dehydriert dm ³	geschmolzen dm ³	dehydriert dm ³	geschmolzen dm ³	dehydriert dm ³	geschmolzen dm ³	dehydriert dm ³	geschmolzen kg	dehydriert kg
A	147,80	3,11	4,73	14,01	18,12	0,70	3,30	17,82	26,15	42,77	62,76
B	81,74	3,60	4,73	10,78	21,47	0,58	4,12	14,96	30,32	35,90	72,77
C	58,90	3,32	5,25	13,91	19,93	1,12	2,61	18,35	27,79	44,04	66,70
D	73,93	3,29	4,21	9,02	24,96	0,62	2,54	12,93	31,71	31,03	76,10
E	47,00	5,67	6,23	4,60	14,85	0,57	1,54	10,84	22,62	26,02	54,29
F	80,69	3,09	3,79	11,68	17,98	1,05	2,76	15,82	24,53	37,97	58,87
G	45,70	3,40	3,18	5,96	11,86	--	--	9,36	15,04	22,46	36,10
H	41,90	3,02	3,49	10,56	17,51	0,59	0,99	14,17	21,99	34,01	52,78
I	81,50*	0,196	4,23	2,30	15,44	0,33	0,61	2,83	20,28	6,78	48,67

* Oxid $\rho = 2,92 \text{ g/cm}^3$

PNS

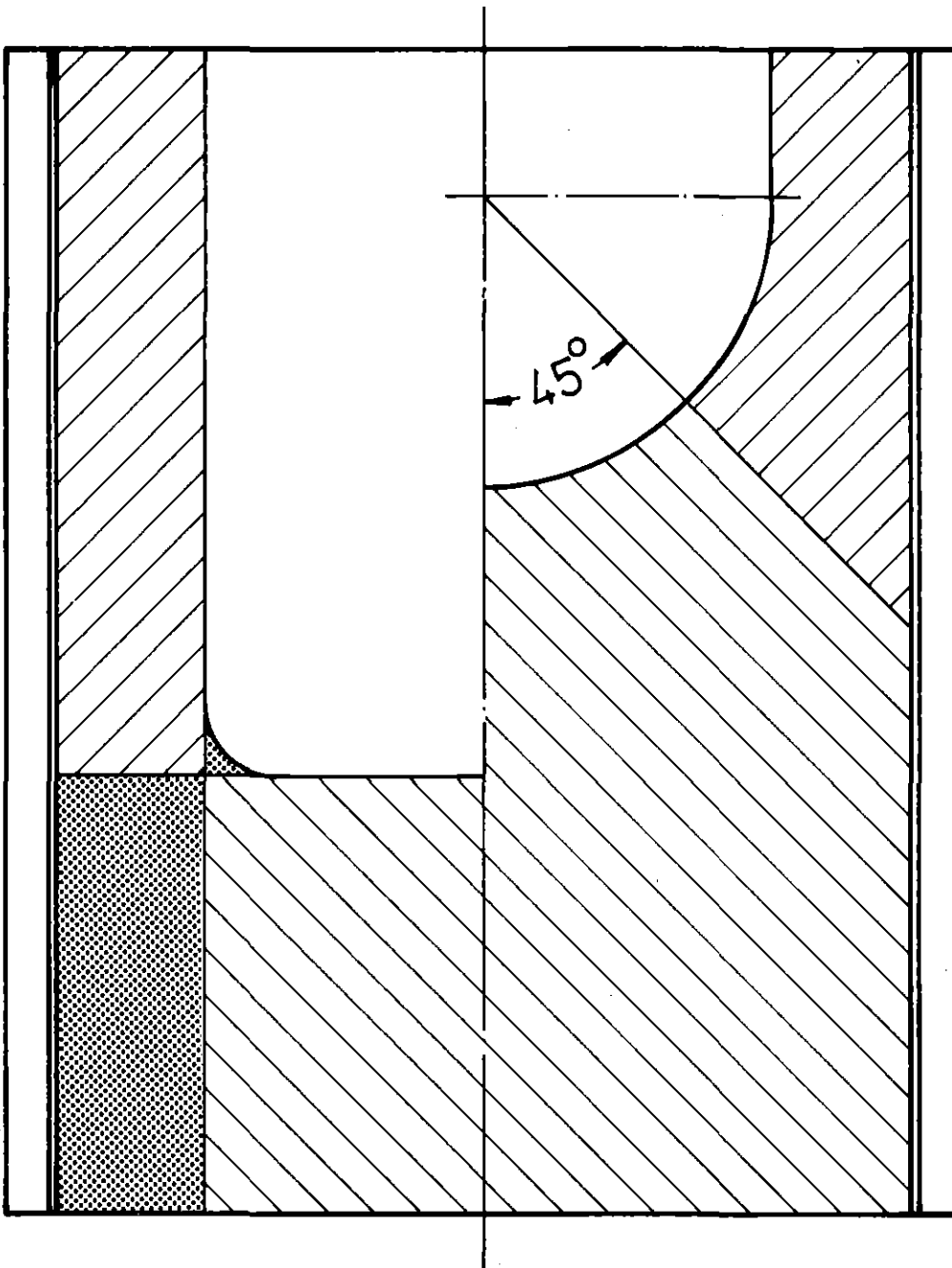
BETONTIEGEL - VERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN

4323

GESCHMOLZENER UND DEHYDRIERTER BETON: VOLUMEN UND MASSEN

GFK

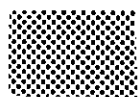
RBT/IT



radialer Ausbreitungsbereich



axialer Ausbreitungsbereich



Ausbreitungsbereich im Übergangs-
gebiet

PNS
4323

BETONTIEGELVERSUCHE MIT THERMITSCHMELZEN
FESTLEGUNGEN ZUR AUSBREITUNGSGEOMETRIE

GFK
RBT/IT