

**Forschungszentrum Karlsruhe**

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6554

Simulationsexperiment zum Fluten von  
Kernschmelzen: KATS-9

G. Fieg, H. Massier, W. Schütz, U. Stegmaier, G. Stern\*

Institut für Kern- und Energietechnik

Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik

Institut für Reaktorsicherheit

Institut für Materialforschung

Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

\*Fa. Pro Science, Ettlingen

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2000

# Zusammenfassung

Für zukünftige Leichtwasserreaktoren werden spezielle Einbauten (Kernfänger) entwickelt, um das Containment-Versagen infolge der Erosion des Fundamentes bei einem Kernschmelzunfall zu verhindern. Die geschmolzenen Kernmassen sollen möglichst schnell in einen festen Zustand überführt werden, um die Freisetzung von radioaktivem Material zu reduzieren. Einige der vorgeschlagenen Kernfängerkonzepte beruhen auf dem Prinzip, die geschmolzenen Kernmassen auf ebenen Flächen zu verteilen und anschließend mit Wasser zu kühlen.

Es wurde ein Experiment durchgeführt, um das Fluten von Schmelzen nach der Ausbreitung zu untersuchen. Dabei wurde als Simulationsmaterial eine Thermitschmelze aus Aluminiumoxid und Eisen verwendet. Die Oxidschmelze wird durch Zusatz weiterer Oxide derart konditioniert, dass sie möglichst realistisch einer oxidischen Coriumschmelze gleicht. Die Flutung erfolgte getrennt nach Oxid und Eisenschmelze in Kanälen, deren Böden aus silikatischem Beton bestand. Die Flutrate war so eingestellt, dass sie, bezogen auf die vorliegende Schmelzenfläche, der im EPR vorgesehenen gleicht.

# Abstract

## Simulation Experiment on the Flooding Behaviour of Core Melts: KATS-9

For future Light Water Reactors special devices (core catchers) are being developed to prevent containment failure by basement erosion after reactor pressure vessel meltthrough during a core meltdown accident. Quick freezing of the molten core masses is desirable to reduce release of radioactivity. Several concepts of core catcher devices have been proposed based on the spreading of corium melt onto flat surfaces with subsequent water cooling.

A KATS-experiment has been performed to investigate the flooding behaviour of high temperature melts using alumina-iron thermite melts as a simulant. The oxidic thermite melt is conditioned by adding other oxides to simulate a realistic corium melt as close as possible in terms of liquidus and solidus temperatures. Before flooding with water, spreading of the separate oxidic and metallic melts has been done in one-dimensional channels with a silicate concrete as the substrate. The flooding rate was, in relation to the melt surface, identical to the flooding rate in EPR.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Experimenteller Aufbau .....	3
2.1	Thermit und Reaktionsbehälter .....	3
2.2	Flutkanäle und Flutmechanismus.....	6
2.3	Triggermechanismus für Flutventile .....	9
2.4	Instrumentierung mit Thermoelementen.....	10
2.4.1	W-Re-Thermoelemente zur Bestimmung der Schmelztemperatur.....	10
2.4.2	NiCr-Ni-Thermoelemente .....	10
2.5	Druckaufnehmer.....	12
2.6	Video- und Infrarotkameras.....	12
2.7	Steuerung des Experiments .....	12
3	Durchführung des Experiments .....	13
4	Ergebnisse des Versuchs KATS-9 .....	15
4.1	Oxidausbreitung und Flutung .....	15
4.1.1	Beschreibung des erstarrten Oxids nach dem Experiment.....	19
4.1.2	Bestimmung der Porosität.....	23
4.1.3	Bestimmung der Permeabilität.....	24
4.1.4	Poröse Struktur des erstarrten Oxids.....	25
4.1.5	Analyse von Oxidproben.....	28
4.1.6	Erosion im Oxidkanal .....	29
4.2	Eisenausbreitung und Flutung.....	30
4.2.1	Nachuntersuchungen des Eisenregulus .....	33
4.2.2	Erosion im Eisenkanal .....	34
4.3	Triggermechanismus.....	35
5	Schlußfolgerungen .....	35
6	Literatur .....	36
	Anhang A Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger Untersuchungen.....	37
	Anhang B Transiente Wärmeleitrechnungen mit dem Programm Fidap.....	43

## TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 2.1: Auslegungsdaten der beiden Flutkanäle	7
Tab. 2.2: Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente im Flutkanal für Oxid	11
Tab. 2.3: Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente im Flutkanal für Eisen	11
Tab. 3.1: Zeitlicher Ablauf des Experiments	14
Tab. 4.1: Dichtebestimmung von Oxidproben an vier Positionen	23
Tab. 4.2: Bestimmung der Porosität mit Heliumpyknometer	24
Tab. 4.3: Analysenergebnisse von Oxidproben	28
Tab. 4.4: Erosion des Betonbodens im Oxidkanal	29
Tab. 4.5: Zeitliches Fortschreiten der Wasserfront im Eisenkanal. Die Flutung erfolgt bei 1.0 m	31

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1.1: Aufbau der externen Kühleinrichtung für Kernschmelze im EPR Reaktor	1
Abb. 2.1: Experimenteller Aufbau von KATS-9. Die Flutung erfolgt am Ende der Flutkanäle	3
Abb. 2.2: Detailzeichnung des Düsenbereichs in KATS-9	4
Abb. 2.3: Flutmechanismus am Ende des Kanals	6
Abb. 2.4: Querschnitt durch die Flutkanäle und Positionierung der seitlichen Wandthermoelemente	8
Abb. 4.1: Voranschreiten der Wasserfront auf der Oxidschmelze	16
Abb. 4.2: Seitenwandtemperaturen bei 2.3 m im Kanal	17
Abb. 4.3: Seitenwandtemperaturen bei 1.3 m im Kanal	18
Abb. 4.4: Seitenwandtemperaturen bei 0.3 m im Kanal	18
Abb. 4.5: Oxidkruste im vorderen, nicht gefluteten Bereich	19
Abb. 4.6: Oxidkruste im hinteren, gefluteten Bereich	20
Abb. 4.7: Zerklüftete Oberflächenstruktur im ersten, ungefluteten Bereich	21
Abb. 4.8: Unzerklüftete Oberflächenstruktur im zweiten, gefluteten Bereich	22
Abb. 4.9: Struktur der Oxidprobe von der Ablaufschräge des Mischkanals	25
Abb. 4.10: Struktur der Oxidprobe an der Kanalseitenwand	26
Abb. 4.11: Sehr poröse Oxidschicht an der Seitenwand bei 0.2 m im Kanal	27
Abb. 4.12: Struktur des erstarrten Oxids nahe der Seitenwand im gefluteten Bereich zwischen 1.5 m und 2.2 m	27
Abb. 4.13: Aufzeichnung der Temperaturen in der Seitenwand bei 0.3 m	32
Abb. 4.14: Aufzeichnung der Temperaturen in der Seitenwand bei 0.7 m	33
Abb. 4.15: Oberfläche des Eisenregulus in KATS-9	33

# 1 Einleitung

Leichtwasserreaktoren der nächsten Generation sollen entsprechend den Anforderungen des Artikelgesetzes eine weiter erhöhte Sicherheit auch bei schwersten Unfällen besitzen. Hierzu werden zur Zeit Vorrichtungen entwickelt, die im Falle eines nicht beherrschten Kernschmelzenunfalls die Schmelze außerhalb des Reaktor-druckbehälters sicher auffangen und kühlen sollen, mit dem Ziel, sowohl das Durchschmelzen des Reaktorfundaments wie auch eine wesentliche Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung auszuschließen.

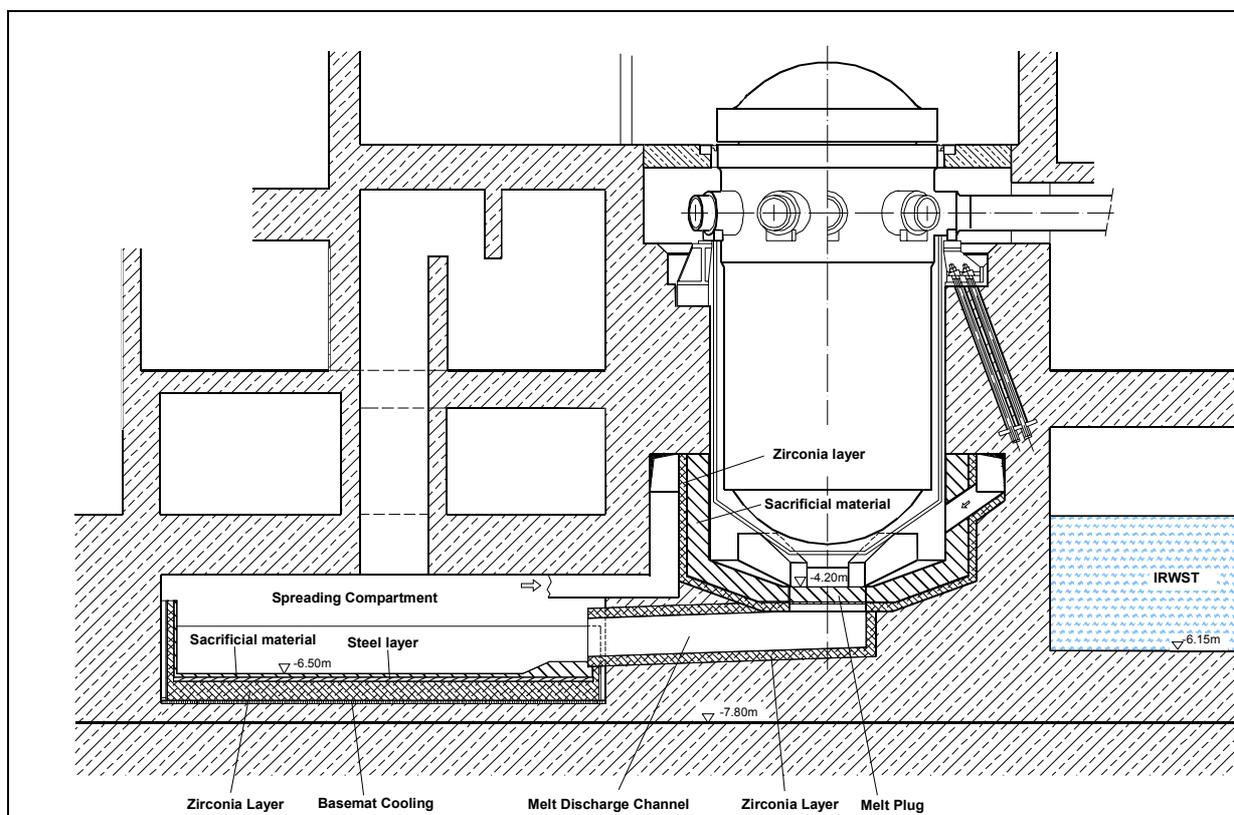


Abb. 1.1: Aufbau der externen Kühleinrichtung für Kernschmelze im EPR Reaktor

Eine Kühleinrichtung für Kernschmelzen, der sogenannte Kernfänger, ist Bestandteil des EPR-Konzepts [1], das zur Zeit in deutsch-französischer Industriekooperation als europäischer Druckwasserreaktor geplant wird, Abb. 1.1. Bei Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters (RDB) wird die Schmelze zunächst in der Reaktorgrube gesammelt und für einen Zeitraum von etwa einer Stunde gehalten, um eventuell später abstürzende Restschmelzen aufzunehmen und damit unterschiedlichste Unfallab-

läufe sicher beherrschen zu können. Nach Durchschmelzen einer Betonopferschicht und des am Boden der Reaktorgrube befindlichen Stahltores fließt die Schmelze über einen geneigten Kanal auf eine Ausbreitungsfläche von etwa 170 m<sup>2</sup>. Hier soll sich die Schmelze möglichst gleichmäßig ausbreiten und erreicht so eine Schichthöhe von etwa 30 cm.

Danach wird die Flutung der Schmelze mit Wasser aus dem IRWST-Vorratsbehälter eingeleitet. Dadurch wird die Schmelze von oben gekühlt und erstarrt teilweise. Durch Inbetriebnahme einer aktiven Bodenkühlung innerhalb von 12 Stunden wird die Schmelze auch von unten stabilisiert. Die Schmelze erstarrt schließlich vollständig entsprechend der zeitlichen Abnahme der Nachwärmeleistung in der Schmelze. Das Ausbreiten einer Kernschmelze und das anschließende Kühlen durch Fluten mit Wasser ist ein generisches Problem. Im Gegensatz zur Problematik der Schmelzausbreitung, für die mehrere theoretische Modelle existieren, existiert zur Problematik der Flutung bisher nur ein integrales Modell [2], das auf Beobachtungen der MA-CE-Tests [3] aufbaut. Zum besseren Verständnis muß auch weiterhin auf Experimente zurückgegriffen werden. Die Anzahl der Tests mit realistischem Corium wird begrenzt sein, deshalb sind solche mit Simulationsschmelzen unumgänglich.

Bis auf das Flutexperiment KATS-9 galt die Zielsetzung aller KATS-Tests (**K**arlsruher **A**usbreitungsexperimente mit **T**hermit-**S**chmelzen) der Untersuchung der Ausbreitung von Hochtemperaturschmelzen in eindimensionale Kanäle und auf Flächen mit unterschiedlichen Substraten (trockene Keramik; Beton, mit und ohne Wasserauflage). Dabei wurden die Tests stets getrennt mit oxidischen und metallischen Schmelzen aus der Thermitreaktion vorgenommen. In diesem Bericht wird die Flutung der Oberflächen einer ausgebreiteten oxidischen und metallischen Schmelze mit Wasser beschrieben.

## 2 Experimenteller Aufbau

### 2.1 Thermit und Reaktionsbehälter

Abb. 2.1 zeigt den experimentellen Aufbau der KATS-Anlage. In einem konischen Reaktionstiegel wird eine Thermitmischung von etwa 300 kg gezündet.

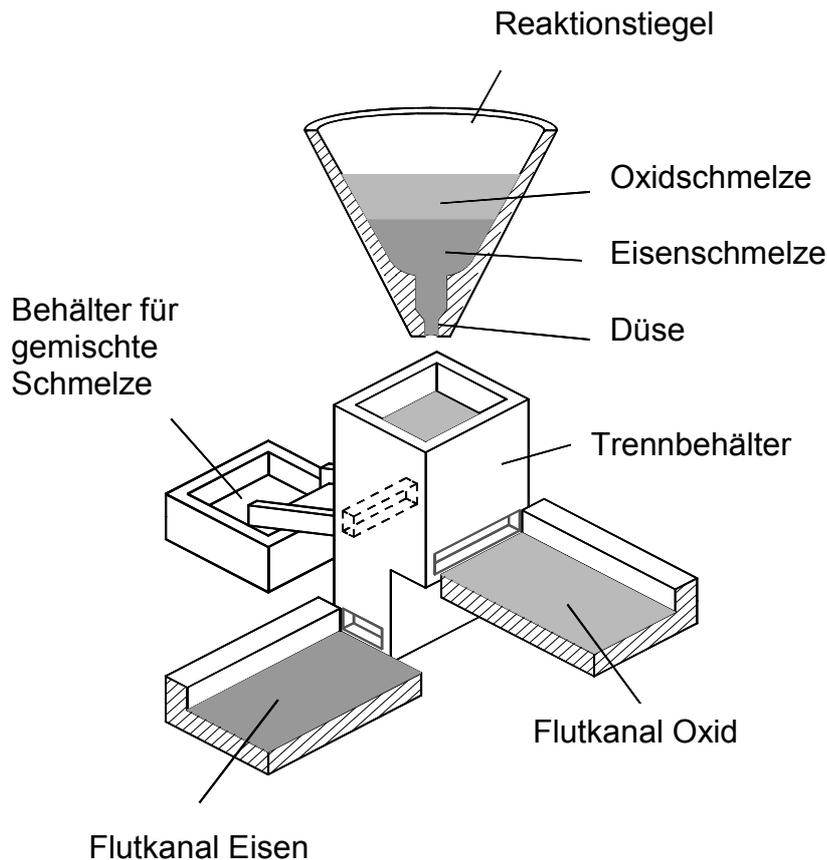


Abb. 2.1: Experimenteller Aufbau von KATS-9. Die Flutung erfolgt am Ende der Flutkanäle

Die Thermitreaktion dauert etwa 30 s an und nach einer Beruhigungsphase von weiteren 20 s Sekunden findet sodann der Abstich statt. Aufgrund der Dichteunterschiede zwischen metallischer ( $6800 \text{ kg/m}^3$ ) und oxidischer Schmelze ( $2800 \text{ kg/m}^3$ ) findet bereits im Reaktionstiegel eine Separierung der Phasen statt. Oberhalb der Austrittsdüse am Boden des Reaktionsbehälters befindet sich zusätzlich eine 200 mm hohe Charge von Thermit, das eine geringere Reaktionsgeschwindigkeit als das normale Thermit aufweist (etwa  $10 \text{ mm/s}$  anstelle von  $25 \text{ mm/s}$ ), Abb. 2.2. Durch das

langsame Abbrennen dieser Thermitcharge wird bewirkt, dass die Thermitreaktion im Tiegel vollständig beendet wird und die beiden Schmelzphasen sich trennen.

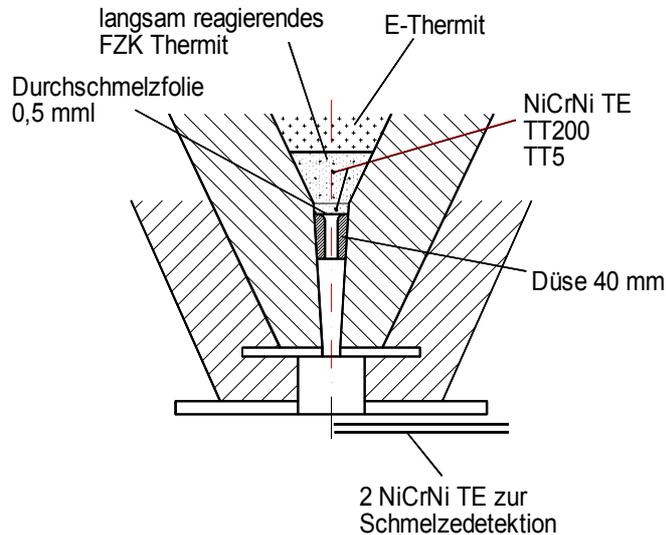


Abb. 2.2: Detailzeichnung des Düsenbereichs in KATS-9

Die Eisenschmelze tritt zuerst aus der Düse am Boden des Tiegels aus, gefolgt von der Oxidschmelze. Aus dem Durchmesser der Düse, deren Form, sowie der jeweiligen Flüssigstandshöhe der Schmelze im Tiegel kann mit Hilfe der Formel von Torricelli [4] der transiente Ausströmvorgang im voraus berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass keine Erosion des Düsenkörpers erfolgt, der Durchmesser also erhalten bleibt. Aus dieser Abschätzung wird die maximale Ausströmdauer für beide Schmelzen bestimmt. Beide Schmelzen wurden zunächst unterhalb des Reaktionsriegels in einem Zwischenbehälter aufgefangen und dann nach pneumatischem Öffnen von Schmelzefenstern in die Flutkanäle geleitet. Die Ausströmraten der Schmelzen sind durch die Fensteröffnungen bestimmt. Die Öffnung des obersten Fensters liegt vollständig oberhalb der Phasengrenze Metall-Oxid. Dieses Fenster wird zuerst aktiviert. Die Höhe des zweiten Fensters liegt im Bereich der Phasengrenze, es wird anschließend aktiviert, um eine Mischschmelze von der reinen Eisenschmelze zu trennen. Aus dem untersten Fenster tritt zuletzt die Eisenschmelze aus.

Um den Temperaturbereich zwischen Liquidus und Solidus dem realistischen Fall einer Coriumschmelze anzupassen, wurden dem Thermitpulver (302 kg vom Typ 10AISSH der Fa. Elektro Thermit, Essen) ein Zuschlag von 16 kg  $\text{SiO}_2$  in Form von

feinem Quarzsand beigegeben. Mit Hilfe von GEMINI-Rechnungen [5] wurden die thermodynamischen Daten für diese Oxidschmelze im Bereich zwischen Solidus und Liquidus errechnet, Anhang A.

Experimente im 1 bis 10 kg Bereich mit Thermit wurden durchgeführt, um den Umsetzungsgrad der Reaktion und deren Reaktionsprodukte zu bestimmen. Diese Untersuchungen waren notwendig zur Auslegung der Schmelzebehälter. Mit Hilfe dieser Ergebnisse und zusätzlicher Analysen mit dem Programm EquiTherm [6] konnte der Umsetzungsgrad der Thermitreaktion bestimmt werden, der bei 95% liegt. Dies bedeutet, daß etwa 5% Eisenoxide in der oxidischen Phase vorhanden sind. Durch teilweises Erodieren der keramischen Tiegelwand durch die Hochtemperaturschmelze addieren sich weitere Oxidanteile in Form geringer Zuschläge zur Oxidschmelze.

## 2.2 Flutkanäle und Flutmechanismus

Nach der Ausbreitung der beiden Schmelzen in die Kanäle und einer kurzen Beruhigungsphase erfolgt die Flutung mit Wasser. Dies geschieht in Form eines dünnen Wasserfilmes, der am Ende des Kanals in voller Kanalbreite auf die Schmelze geleitet wird, Abb. 2.3.

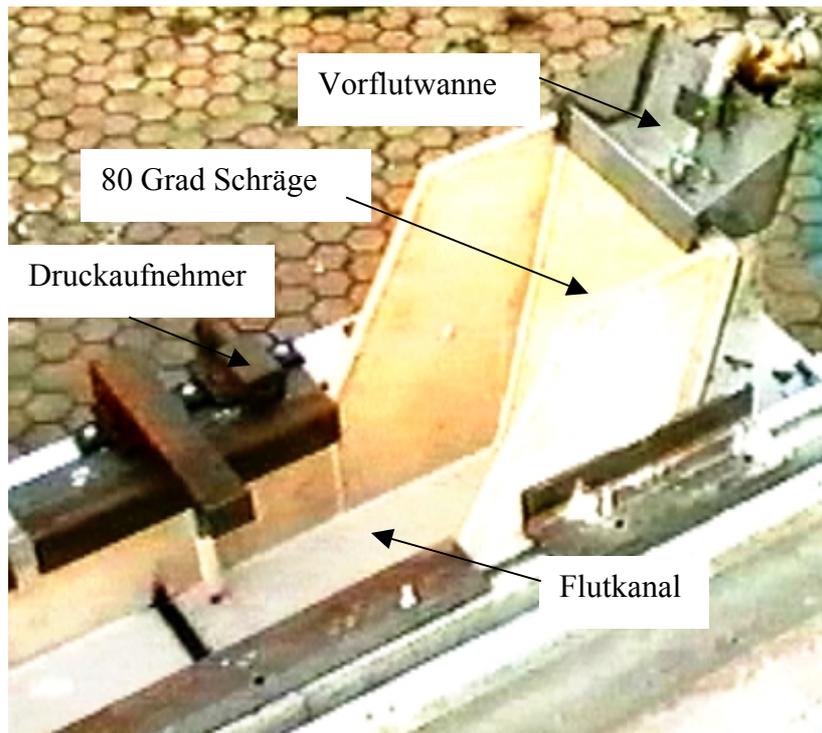


Abb. 2.3: Flutmechanismus am Ende des Kanals

Zur Flutung war am Kanalende eine schräge Cordieritplatte im  $10^\circ$  Winkel zur Vertikalen angebracht. Ein kleines Vorbecken wurde gefüllt und das überlaufende Wasser rann diese Schräge hinab, wodurch ein gleichmäßiges Aufbringen des Wasserfilms über die ganze Kanalbreite erreicht wurde. Der Massenstrom zur Flutung wurde auf 100 g/s beschränkt. Diese Flutrate, bezogen auf die Fläche von  $0.75 \text{ m}^2$  für die Oxidschmelze, stimmt mit der im EPR vorgesehenen 20-30 l/s (auf  $170 \text{ m}^2$ ) überein. Die Flutung der Schmelzen wurde nach einer kurzen Beruhigungspause von Hand ferngesteuert getriggert und konnte ebenso beendet werden. Die Daten für beide Flutkanäle sind in Tab. 2.1 dargestellt, Abb. 2.4 zeigt den Querschnitt durch die Kanäle. Die Dimensionen wurden so gewählt, dass in beiden Fällen die Höhen der Schmelzen

zwischen 80 und 100 mm liegen. Diese Höhe ist erforderlich, da die Schmelzen noch längere Zeit während der Flutphase im flüssigen Zustand erhalten bleiben sollen. Als Bodensubstrat wurde silikatischer Beton gewählt. Eine intensive Rührwirkung in den Schmelzen tritt durch das aufsteigende verdampfende Wasser aus dem Beton auf, wie es auch im realistischen Fall beim EPR erwartet wird. Da die Flutrate kontrolliert und begrenzt wird, ist eine heftige Schmelze-Wasserreaktion (Dampfexplosion) bei diesem Test nicht zu erwarten.

Tab. 2.1: Auslegungsdaten der beiden Flutkanäle

	<b>Eisenschmelze</b>	<b>Oxidenschmelze</b>
Kanalbreite (m)	0.3	0.3
Kanallänge (m)	0.9	2.5
Vorgesehene Schmelzenhöhe (mm)	90 mm	80 mm
Substrat Boden	Silikatischer Beton	
Material Seitenwand	Cordierit	
Vorgesehene Flutrate	100 ml/s Wassertemperatur bei 50 °C	

## Experimenteller Aufbau

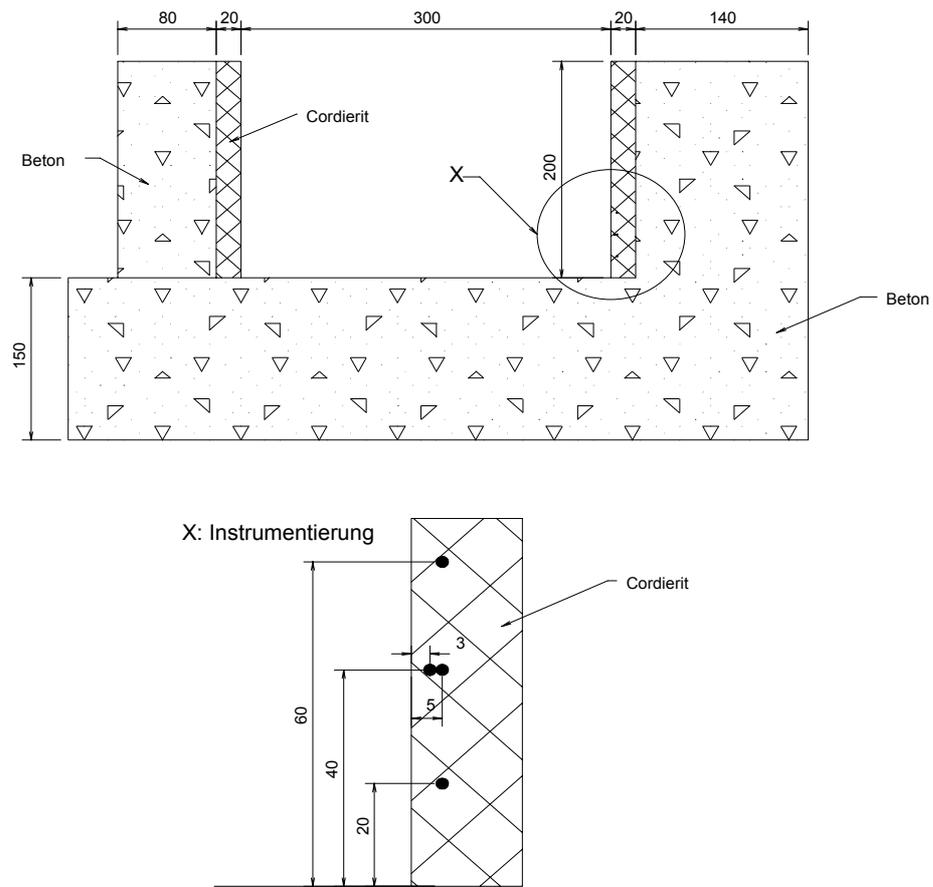


Abb. 2.4: Querschnitt durch die Flutkanäle und Positionierung der seitlichen Wandthermoelemente

### 2.3 Triggermechanismus für Flutventile

Bei diesem Experiment wurde zusätzlich ein möglicher Triggermechanismus zum Öffnen von Flutventilen getestet: je zwei Stahlseile (4 mm Stärke, zusammengesetzt aus sechs Litzen) waren in Querrichtung und eines vertikal in beiden Flutkanälen angebracht. Im Realfall sollen beim Ausbreiten der Kernschmelze gespannte Seile durch thermische Wechselwirkung durchtrennt werden, die dann Ventile zur Flutung der Schmelze öffnen. In KATS-9 waren die horizontal gespannten Seile 25 mm über dem Boden auf einer Seite in der Wand fest verankert, an der gegenüberliegenden Seite wurden sie durch einen dünnen Kanal geführt. Die Spannung der Seile erfolgte nach Umlenkung über Rollen von Gewichten (5-10 kg). In jedem Kanal war zusätzlich ein vertikales Seil gespannt, das im Zentrum des Kanals am Boden verankert, nach oben über Ablenkrollen nach außen geführt und ebenfalls durch Gewichte gespannt war. Mit Videokameras wurden diese Gewichte beobachtet, um den Versagenszeitpunkt der Seile zu bestimmen. Im EPR ist das Fluten der Schmelze durch mechanisches Öffnen von Ventilen durch ähnliche Installationen vorgesehen. In diesem KATS-9 Experiment wurde jedoch auf einen Triggermechanismus für die Flutventile verzichtet, die Triggerung erfolgte im Test von Hand.

## 2.4 Instrumentierung mit Thermoelementen

### 2.4.1 W-Re-Thermoelemente zur Bestimmung der Schmelztemperatur

Je zwei Wolfram-Rhenium-Thermoelemente waren in den beiden Kanälen installiert, um die Schmelztemperatur zu Beginn der Ausbreitung zu bestimmen. Diese Thermoelemente haben beim Kontakt mit der Schmelze nur eine Lebensdauer von einigen Sekunden, die Messung des zeitlichen Verlaufs der Schmelztemperatur während des gesamten Flutvorgangs war nicht möglich.

### 2.4.2 NiCr-Ni-Thermoelemente

Abb. 2.4 zeigt die Positionen der NiCr-Ni-Mantelthermoelemente (Durchmesser 1 mm) in den Seitenwänden beider Kanäle. Mit ihrer Hilfe sollte der laterale Wärmetransport aus der Schmelze in die seitlichen Wände ermittelt werden. In Tab. 2.2 und Tab. 2.3 sind die Positionen der einzelnen Thermoelemente für beide Kanäle aufgeführt.

Weiterhin sind im Reaktionstiegel zwei NiCr-Ni-Thermoelemente im Abstand von 200 mm (TT200) und 5 mm (TT05) über der Verschlussfolie angebracht. Sie sollen kontrollieren, wie lange die Abbrennperiode des langsam reagierenden Thermit's dauert. Bei der angenommenen Reaktionsgeschwindigkeit von etwa 10 mm/s des langsam reagierenden Thermit's sollte diese Zeit bei 20 s liegen. Zwei weitere Thermoelemente (TA1 und TA2) unterhalb der Austrittsdüse signalisieren den Beginn des Abstichs.

## Experimenteller Aufbau

Tab. 2.2: Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente im Flutkanal für Oxid

Oxid	Längenposition ab Kanalanschluss [mm]	Höhe über dem Boden [mm]	Tiefe in der Wand [mm]
TKO.03.25	300	20	5
TKO.03.45	300	40	5
TKO.03.43	300	40	3
TKO.03.65	300	60	5
TKO.13.25	1300	20	5
TKO.13.45	1300	40	5
TKO.13.43	1300	40	3
TKO.13.65	1300	60	5
TKO.23.25	2300	20	5
TKO.23.45	2300	40	5
TKO.23.43	2300	40	3
TKO.23.65	2300	60	5

Tab. 2.3: Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente im Flutkanal für Eisen

Eisen	Längenposition ab Kanalanschluss [mm]	Höhe über dem Boden [mm]	Tiefe in der Wand [mm]
TKE.03.25	300	20	5
TKE.03.45	300	40	5
TKE.03.43	300	40	3
TKE.03.65	300	60	5
TKE.07.25	700	20	5
TKE.07.45	700	40	5
TKE.07.43	700	40	3
TKE.07.65	700	60	5

### 2.5 Druckaufnehmer

Je zwei Druckaufnehmer (Typ KISTLER 7000) sind in einer Höhe von 235 mm über dem Kanalboden seitlich an der Kanalwand in beiden Flutkanälen angebracht. Um sie gegen eventuell herausgeschleuderte Schmelze zu schützen, sind sie 100 mm von der Seitenwand zurückversetzt, in Abb. 2.3 ist einer dieser Druckaufnehmer abgebildet.

### 2.6 Video- und Infrarotkameras

Mehrere Videokameras wurden um den Teststand herum installiert: Eine Kamera kontrolliert den Zeitpunkt des Abstichs aus dem Reaktionstiegel. Je zwei Kameras sind auf die Gewichte an den Stahlseilen gerichtet, eine Kamera dient als Übersichtskamera und je zwei weitere beobachten die Schmelzenoberflächen in beiden Kanälen. Zusätzlich beobachtet eine Infrarotkamera die Oberfläche der Oxidschmelze zur Bestimmung der Oberflächentemperatur.

### 2.7 Steuerung des Experiments

Der Ablauf der Tests wurde mit einem zentralen PC-Rechner gesteuert. Zuerst erfolgte die Zündung des Thermits, gleichzeitig wurden Blitzlampen gefeuert, welche die zeitliche Synchronisation der Videokameras mit dem Zentralrechner herstellten. Nach der Zündung des Thermits geht der Rechner in eine Warteschleife und wartet auf das Signal der zwei Thermoelemente TA1 und TA2 unterhalb der Düse, das den Beginn des Abstichs signalisiert. Alle weiteren Befehle (Start der Transientenrecorder zur Aufzeichnung der Thermoelemente, Öffnen der Schmelzefenster) erfolgen nach vorausberechneten Zeitintervallen.

### 3 Durchführung des Experiments

Die Zündung des Thermits erfolgte vom zentralen Rechner aus. Etwa 54 s später erfolgte der Abstich, detektiert von den beiden Thermoelementen TA1 und TA2. Es zeigte sich, dass die gewählte "pretime" des Transientenrecorders von 30 s zu kurz war, um das Signal des obersten Thermoelements TT200 im langsam reagierenden Thermit 200 mm über der Düse noch vollständig aufzuzeichnen. TT05 detektierte die Ankunft der Thermitfront 5 s vor Abstich. Die Verzögerungszeit durch das langsame Thermit betrug somit über 25 s, vorausgerechnet waren 20 s. Der Zeitpunkt des Abstichs wird als Referenzzeitpunkt Null gesetzt. Die Auslaufzeit der Thermitschmelze aus dem Reaktionsbehälter wurde mit Hilfe der Torricelli'schen Formel [4] abgeschätzt, sie liegt bei 18 s, wenn angenommen wird, dass der Düsendurchmesser von 45 mm sich während der Auslaufphase nicht vergrößert. In Wirklichkeit ist dies nicht der Fall, der Düsendurchmesser erweitert sich etwas und die tatsächliche Auslaufzeit war kürzer. Nach Beendigung des Auslaufens aus dem Tiegel verharrte die Schmelze noch etwa 10 s lang im Sammelbehälter. Diese Zeit war für die vollständige Trennung von Eisen und Oxid nötig. Danach wurde das Oxidfenster geöffnet, die berechnete Auslaufzeit war 16.3 s. Das Mischfenster wurde 20 s nach Öffnen des Oxidfensters geöffnet, die berechnete Auslaufzeit der Mischschmelze war 2 s. Sechs Sekunden nach Öffnen des Mischfensters öffnete das Fenster für die Eisenschmelze. Die Nachuntersuchungen zeigten, dass die Trennung der metallischen und oxidischen Phasen bei diesem Experiment gut gelang. Der zeitliche Ablauf des Experimentes ist in Tab. 3.1 nochmals tabellarisch dargestellt.

Tab. 3.1: Zeitlicher Ablauf des Experiments

<b>Zeitpunkt</b>	<b>Vorgang</b>
-54 s	Zündung des Thermits →Synchronblitze feuern
0.0	TA1/TA2-Signale: Abstich Schmelze →Start der Transientenrecorder für Thermoelemente(500 Hz, 512 s lang, pretime 30 s)
25.05 s	→Oxidfenster auf →Start Aufzeichnung Drucksignale (5000 Hz, 51.2 s, 0 s pretime)
45.09 s	→Mischfenster auf
51.13 s	→Eisenfenster auf
61.19 s	→Fluten Oxid
71.24 s	→Fluten Eisen
1176 s	→Stop Fluten →Stop aller Aufzeichnungen

## 4 Ergebnisse des Versuchs KATS-9

### 4.1 Oxidausbreitung und Flutung

Die ausgebreitete Oxidmasse wurde nach dem Experiment nicht gewogen. Durch die zusätzliche Erosion des Betons war eine genaue Bestimmung der ursprünglichen Oxidmenge nicht möglich. Jedoch aus der Bestimmung der Eisenmenge kann unter Zuhilfenahme des Programms EquiTherm [6] die ursprüngliche Oxidmenge ermittelt werden, die Rechnung ergab 173 kg. Abzüglich der abgewogenen Oxidkrusten im Trennbehälter und im Mischbehälter ergeben sich 158 kg Oxid zur Ausbreitung in den Kanal. Weiterhin kann die Oxidmenge auch aus dem Schmelzestand im oberen Teil des Trennbehälters vor dem Öffnen des Oxidfensters festgestellt werden. Die Nachuntersuchung ergab etwa 465 mm für den Flüssigkeitsstand über der Unterkante des Oxidfensters. Das Oxidvolumen betrug somit unter Berücksichtigung von Abschmelzungen an den Wänden  $65,6 \text{ dm}^3$ . Die Temperatur der Schmelze im Trennbehälter konnte nicht gemessen werden, da eine Verstärkereinheit während des Tests ausfiel. Jedoch aus der Erfahrung von vorangegangenen Versuchen wird eine Schmelztemperatur von  $2050 \text{ °C} \pm 50 \text{ K}$  geschätzt. Aus der Eisen- und Oxidschmelze, die aus dem Mischfenster in einen Stahlbehälter abgeflossen ist, kann man, da das Volumen gut bekannt ist, auf die Eisen- und Oxiddichte schließen. Man ermittelt auf diese Weise eine Oxiddichte von  $2,5 \text{ kg/dm}^3$ . Somit ergibt sich aus dem Volumen von  $65,6 \text{ dm}^3$  eine Masse von 164 kg für die Oxidausbreitung. Dieser Wert liegt etwa 4% über dem aus EquiTherm abgeschätzten.

Die Oxidschmelze verteilt sich in dem 2,5 m langen und 300 mm breiten Kanal rechnerisch zu einer gemittelten Höhe von 87 mm. Die Volumenrate der Oxidausbreitung in den Flutkanal wurde nicht gemessen. Sie wurde aus dem Schmelzefüllstand und der Fenstergröße rechnerisch ermittelt. Der anfängliche Massenstrom von  $18,2 \text{ kg/s}$  fällt linear auf Null bei 18,1 s ab. Somit startete das Fluten der Oxidschmelze etwa 18 s nach Beendigung der Ausbreitung. Diese Verzögerungszeit war gewollt, um mögliche heftige Wechselwirkungen zwischen Schmelze und Wasser zu verhindern.

Während der Ausbreitung und vor allem während der Flutung der Schmelze mit Wasser, waren sowohl akustisch (Knall) als auch optisch (Schmelzeauswurf) keine Druckereignisse durch Schmelze-Wasser-Wechselwirkungen zu beobachten. Im

Einklang dazu haben auch die Druckaufnehmer keinerlei lokale Druckerhöhungen registriert, daher wird hier auf eine Darstellung der Signale verzichtet.

Zur Flutung war am Kanalende eine schräge Cordieritplatte im  $80^\circ$  Winkel zur Horizontalen angebracht. Ein kleines Vorbecken wurde gefüllt und das überlaufende Wasser rann diese Schräge hinab, wodurch ein gleichmäßiges Aufbringen des Wasserfilms über die ganze Kanalbreite erreicht wurde. Der Massenstrom für die Flutung wurde auf 100 g/s eingestellt. Die Temperatur des Wassers war auf  $50^\circ\text{C}$  eingestellt. Der gesamte Flutvorgang wurde von den Videokameras aufgezeichnet. Um den gesamten etwa 15 min dauernden Vorgang zu beobachten, waren die Kameras in Automatikmodus eingestellt, mit dem Nachteil, daß die heißen Stellen der Schmelze meist überstrahlt sind. Daraus ergibt sich, daß man Krusten erst als solche erkennen kann, wenn sie schon deutlich abgekühlt sind und dunkler geworden sind. Das Vorschreiten dieser dunklen Zone wurde im folgenden zeitlich ausgewertet und (mangels besserer Daten und Beobachtungen) mit dem Vorschreiten der Wasserfront gleichgesetzt, Abb. 4.1.

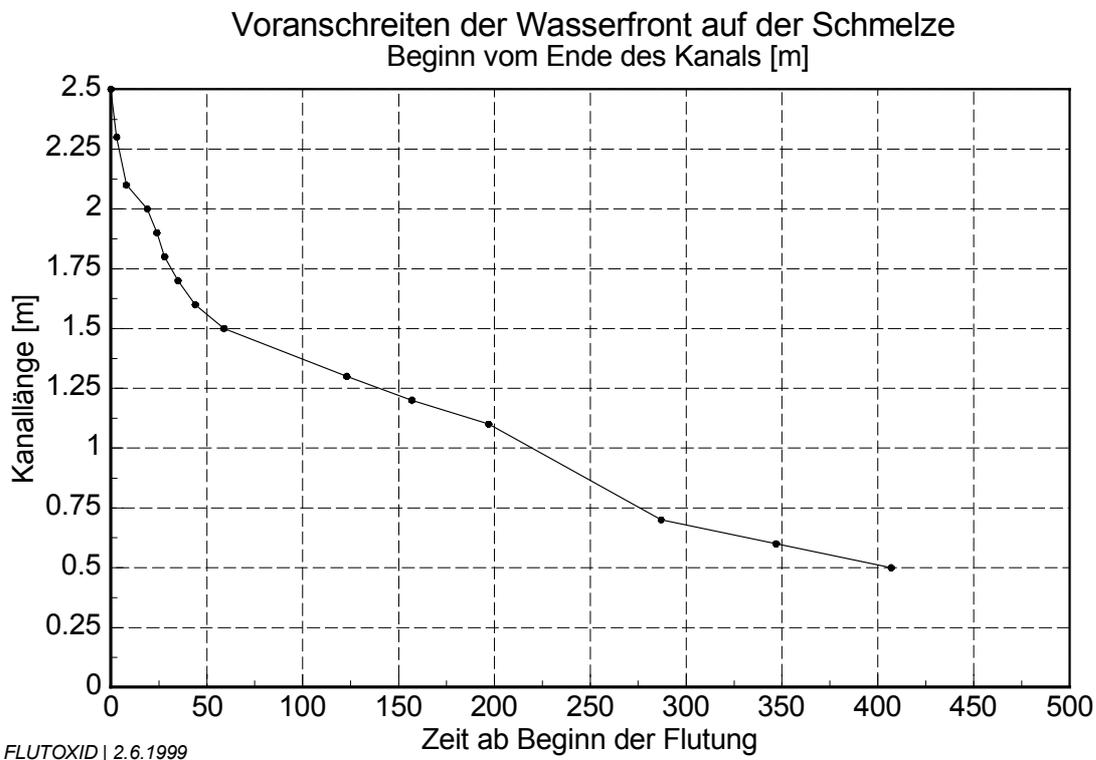
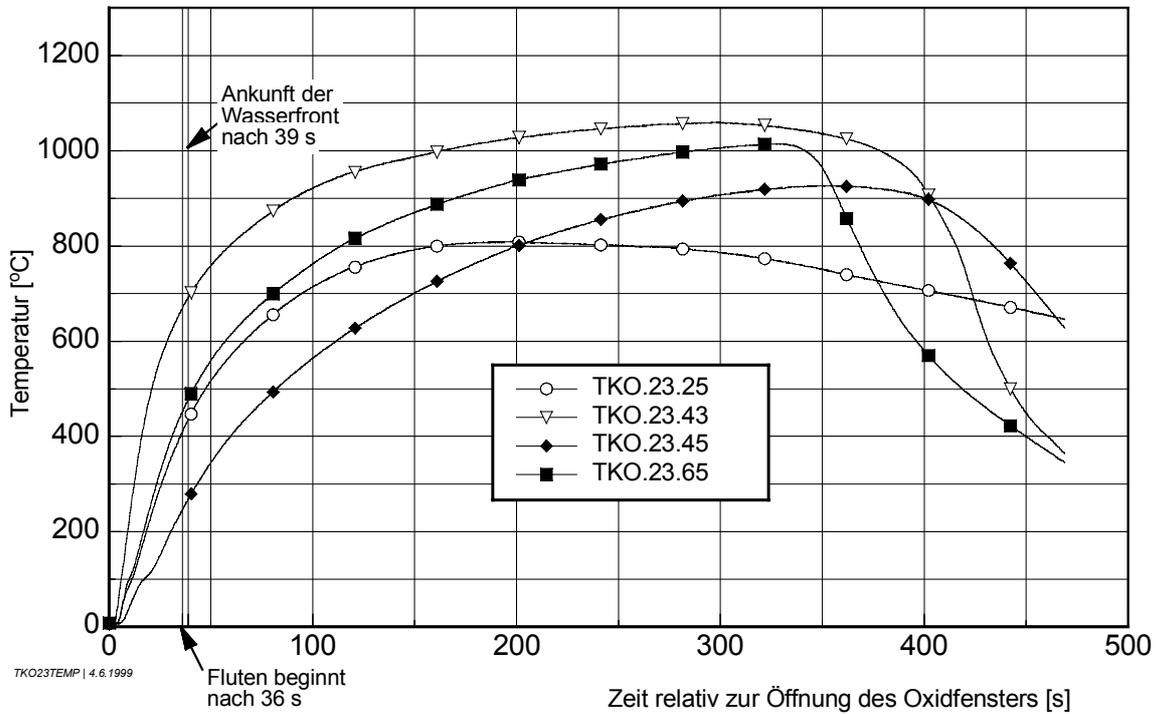


Abb. 4.1: Voranschreiten der Wasserfront auf der Oxidschmelze

Anfänglich lag die Geschwindigkeit der Flutfront bei 20 mm/s, danach reduzierte sie sich auf Werte von etwa 3 mm/s. Der Grund für diese Abnahme der Frontgeschwindigkeit ist die stetig anwachsende benetzte Fläche und damit der steigende absolute Wärmetransport aus dem Oxid in das Wasser.



Versuch KATS-9 Temperaturmessung im Oxidkanal 2,3 m vom Schmelzeintritt

Abb. 4.2: Seitenwandtemperaturen bei 2.3 m im Kanal

Die Aufzeichnungen der Wandthermoelemente sind in Abb. 4.2 bis Abb. 4.4 dargestellt. Der Zeitnullpunkt entspricht dabei dem Zeitpunkt, bei welchem das Oxidfenster geöffnet wurde. Die Flutung selbst erfolgte etwa 36 s später. Die dem Fenster nächste Position bei 0.3 m, Abb. 4.4, wurde während des gesamten Tests nicht geflutet, die Wandtemperaturen nehmen daher dort die höchsten Werte ein. Im Vergleich dazu ist die nahe der Flutungsstelle gelegene Position, Abb. 4.2, sehr früh durch Wasser geflutet, was einen verminderten Temperaturanstieg in der Wand zur Folge hatte. Die Temperaturwerte bei Position 1.3 m in etwa der Hälfte des Flutkanals, Abb. 4.3, liegen zwischen den beiden erstgenannten. Mit dem Computerprogramm FIDAP [7] wurde versucht, die Wärmeübergänge von der Oxidschmelze in

die Wand abzuschätzen. Im Anhang B sind die Ergebnisse und ein Vergleich mit den experimentellen Daten aufgeführt.

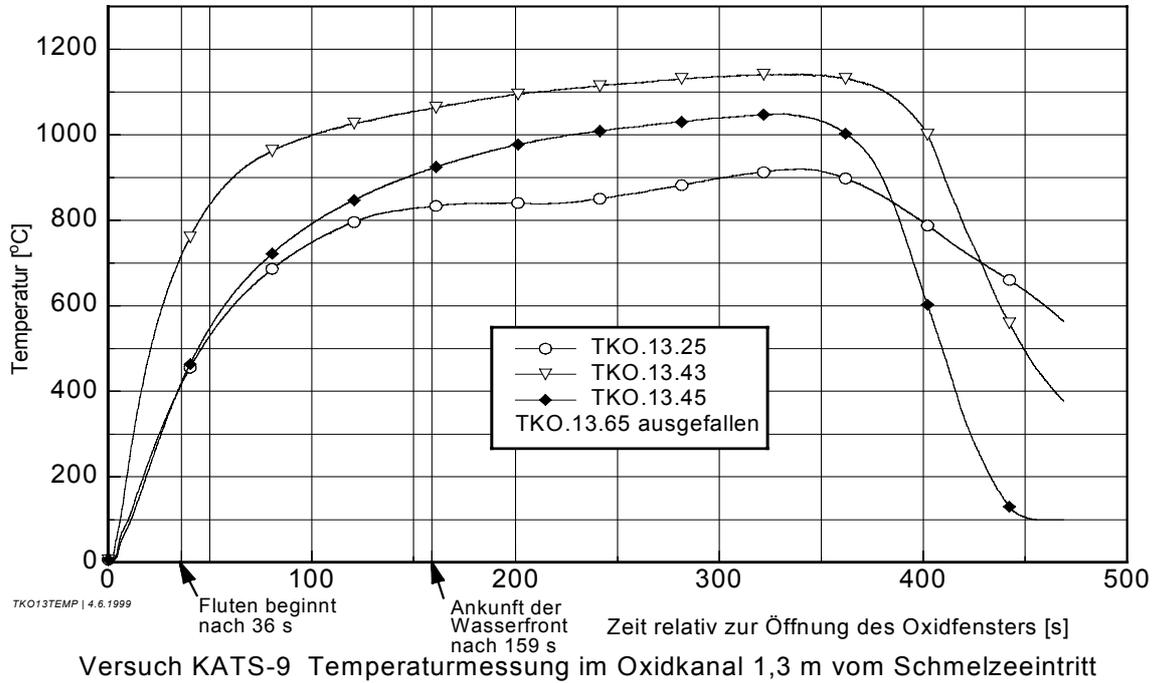


Abb. 4.3: Seitenwandtemperaturen bei 1.3 m im Kanal

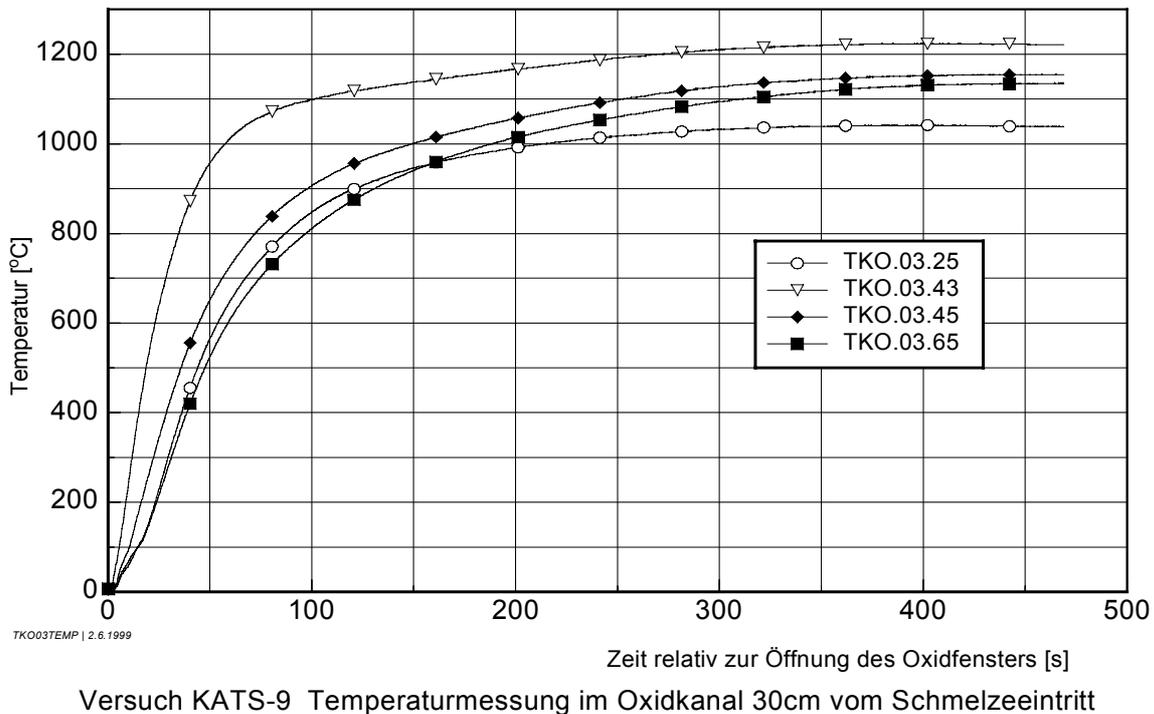


Abb. 4.4: Seitenwandtemperaturen bei 0.3 m im Kanal

### 4.1.1 Beschreibung des erstarrten Oxids nach dem Experiment

Die Oxidschicht kann in Längsrichtung des Kanals ihrer Beschaffenheit nach in zwei Bereiche unterschiedlicher Beschaffenheit unterteilt werden. Der vordere Bereich erstreckt sich vom Eintrittsfenster bis etwa zur Mitte bei 1.2-1.3 m, dieser wurde sehr spät beim Test geflutet. In diesem Bereich besitzt das Oxid eine hohe Porosität. Die Anordnung dieser Poren ist homogen über die gesamte Höhe, Abb. 4.5 zeigt das Photo einer Probe aus diesem Bereich.



Abb. 4.5: Oxidkruste im vorderen, nicht gefluteten Bereich

Der hintere Bereich, beginnend bei 1.3 m bis zum Ende des Kanals war beim Test geflutet. Dort wird die Krustenstruktur dichter und kompakter, mit weniger Gaseinschlüssen. Abb. 4.6 zeigt eine Probe bei 2.2 m im Kanal, wo die Proben mit der größten Dichte angetroffen wurden. An der Kontaktfläche mit dem Betonboden sowie mit den Seitenflächen aus Cordierit weist das Oxid auch aus diesem hinteren Bereich poröse Zonen von ca. 10 mm Dicke auf, ähnlich dem Oxid des vorderen Bereiches.



Abb. 4.6: Oxidkruste im hinteren, gefluteten Bereich

Wie in der Porosität, so unterscheiden sich die Proben beider Bereiche auch in der Beschaffenheit der Oxidoberfläche. Im vorderen ist die Oberfläche infolge der Schmelze-Beton-Wechselwirkung sehr uneben und zerklüftet, die Höhe der Oberfläche schwankt um ca. 4 cm zwischen Berg und Tal, Abb. 4.7.

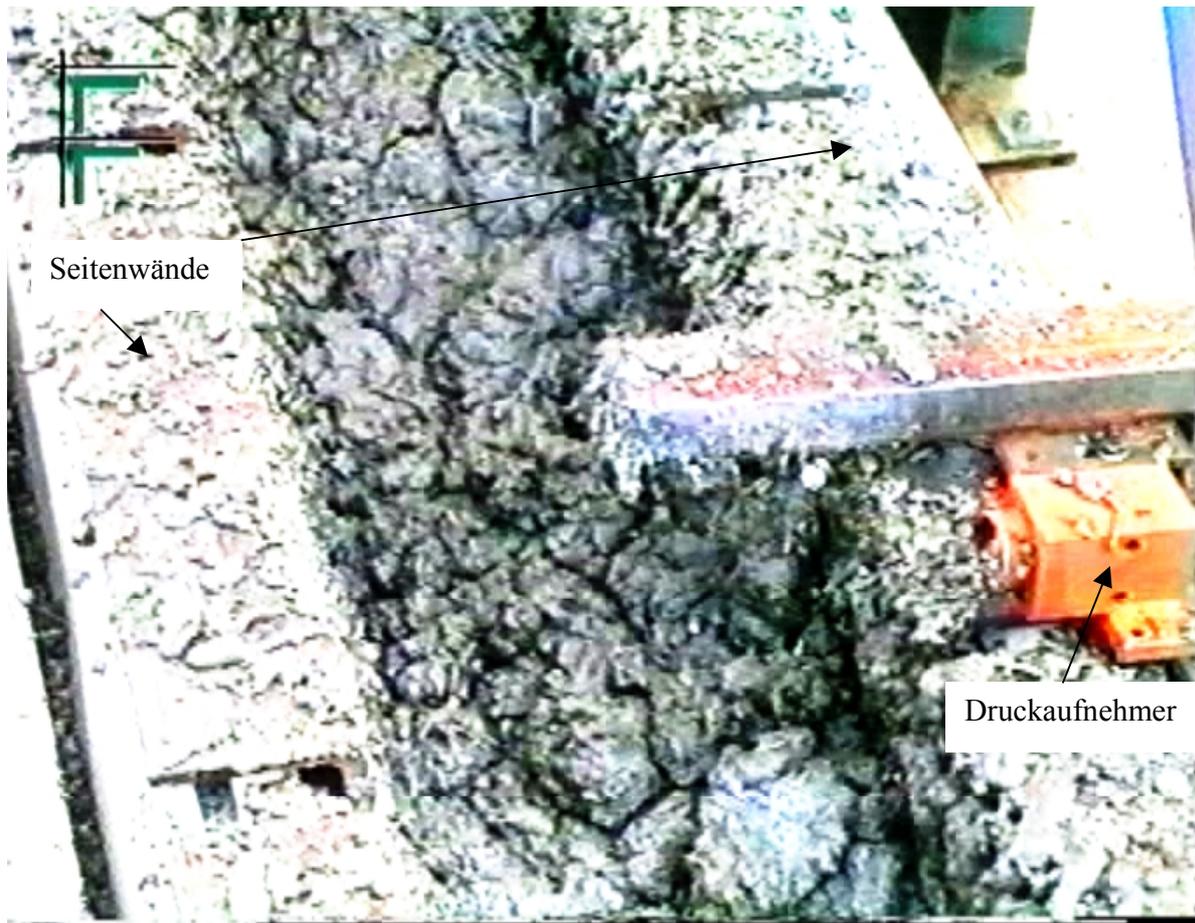


Abb. 4.7: Zerklüftete Oberflächenstruktur im ersten, ungefluteten Bereich

Dagegen ist die Oxidoberfläche im hinteren Bereich eher glatt, Abb. 4.8, weist jedoch darunter große Gaseinschlüsse auf. Im vorderen Bereich hat die Oxidschicht eine Dicke von ca. 10 bis 14 cm, im hinteren eine niedrigere von ca. 10 bis 12 cm. Die höhere Schmelzendicke im vorderen Bereich stellte für das Flutwasser bei etwa 1.3 m eine Schwelle dar.



Abb. 4.8: Unzerklüftete Oberflächenstruktur im zweiten, gefluteten Bereich

Ursache für die zwei unterschiedlichen Bereiche (Übergänge sind fließend) ist wahrscheinlich der Einfluß der Kühlung durch die Wasserflutung. Im hinteren Bereich wurde die Schmelze nämlich sehr früh mit Wasser an der Oberfläche beaufschlagt. Dort bildete sich daher früh eine feste Kruste an der Oberfläche aus, welche die Schmelze in thermischer Hinsicht gesehen nach oben praktisch isolierte. Aufsteigende Gasblasen waren am Austritt oben behindert und mussten sich einen anderen Weg ins Freie suchen. Die Oxidschmelze hatte oben durch die frühe Krustenbildung keine Möglichkeit mehr, sich vertikal auszudehnen. Zur Bildung einer porösen Struktur ist jedoch gerade diese vertikale Ausdehnung der Oxidschmelze notwendig. Im Gegensatz dazu erreichte die Wasserfront den vorderen Bereich relativ spät, die Oxidschmelze war nicht durch eine Kruste am vertikalen Ausdehnen behindert, daher auch die größere Schmelzenhöhe. Was bei diesem Experiment erwartet wurde, trat nicht ein: es wurde angenommen, daß das oberflächige Fluten der Schmelze eine heftige Wechselwirkung mit dem Wasser hervorruft und eine rasche Abkühlung

unter Bildung eines gut kühlfähigen Partikelbetts erfolgt. Dieses ist jedoch aufgrund der frühen Krustenbildung an der Oberfläche verhindert worden. Nachuntersuchungen zeigen, dass diese Kruste keinen Kontakt zur Seitenwand aufwies, dort war ein dünner Spalt von etwa 1 mm im Mittel zu erkennen.

Aus den Schmelzmassen wurde eine mittlere Schmelzendicke von 87 mm bei gleichmäßiger Verteilung im Kanal berechnet. Aus der gemessenen mittleren Dicke von 120 mm nach Beendigung des Tests, gemittelt über die gesamte Länge des Kanals, läßt sich überschlägig ableiten, daß durch den ausgasenden Beton eine „zusätzliche“ Porosität von 25 % in die Schmelze eingebracht wurde. Zusätzlich deshalb, weil die erstarrte Schmelze, hätte sie keinerlei Porosität, bei Raumtemperatur eine Dichte von nahezu 4 kg/dm<sup>3</sup> hätte. Demzufolge würde ein Volumen von 164 kg / 4 kg/dm<sup>3</sup> = 41 dm<sup>3</sup> einen Füllstand von 55 mm ergeben. Insgesamt hat die Schmelze nach dieser Berechnungsmethode eine mittlere Porosität von 54 %.

#### **4.1.2 Bestimmung der Porosität**

Im Rahmen einer Diplomarbeit [8] wurden Dichtebestimmungen und Porositätsmessungen mit Hilfe eines Helium-Pyknometers und die Permeabilität an Oxidproben von KATS-9 durchgeführt.

Die in Tab. 4.1 aufgeführten Dichten (genannt Gesamtdichte) entspricht der Größe, die man ermittelt, wenn von den Proben das umhüllende Volumen (d.h. einschließlich der Poren) mit ihren Massen in Bezug gesetzt wird. Mit Berücksichtigung der theoretisch ermittelbaren Feststoffdichte erhält man daraus die totale Porosität, d. h. offene und geschlossene Poren zusammen genommen. Erst die Meßmethode mit dem Helium-Pyknometer ermöglicht die getrennte Ermittlung der geschlossenen und offenen Porosität.

Tab. 4.1: Dichtebestimmung von Oxidproben an vier Positionen

<b>Position im Kanal</b>	<b>0,2 m</b>	<b>1 m</b>	<b>1,5 m</b>	<b>2,4 m</b>
Gesamtdichte (kg/dm <sup>3</sup> ) (rel. Fehler~3%)	2,1	2,2	2,8	3,1
Totale Porosität (%) (rel. Fehler~5%)	45.6	45	30	23

Deutlich ist die stetige Zunahme der Gesamtdichte, und damit verbunden die Abnahme der Porosität mit wachsendem Fortschritt im Kanal zu sehen. Mit Hilfe eines Helium-Pyknometers wurde weiterhin an einer Probe, die 0.20 m vom Eintrittsfenster entfernt genommen wurde, die offene und geschlossene Porosität getrennt voneinander ermittelt, Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Bestimmung der Porosität mit Heliumpyknometer

	<b>0,2 m</b>
Totale Porosität (%)	45,6
Offene Porosität (%)	43,8
Geschlossene Porosität (%)	1,8

Es zeigt sich, dass der weitaus größte Anteil der Oxidprobe aus offener Porosität besteht.

#### 4.1.3 Bestimmung der Permeabilität

An einer KATS-9 Oxidprobe aus dem vorderen Bereich (Position 0.5 m, Gesamtporosität 46%) wurde die Permeabilität bestimmt. Die gemessene Permeabilität von  $7.4E-12 \text{ m}^2$  ist sehr gering. Sie kann zum besseren Verständnis mit der berechneten Permeabilität einer homogenen Kugelschüttung verglichen werden: Für eine Kugelschüttung mit der höchsten Packungsdichte gilt nach Ergün [9] zwischen der (offenen) Porosität  $P$ , dem Kugeldurchmesser  $d$  und der Permeabilität  $K$  folgende Korrelation:

$$K = \frac{d^2 \cdot P^3}{150 \cdot (1 - P)^2}$$

Die in KATS-9 gemessene Permeabilität der Oxidprobe entspricht nach dieser Formel einer dichten Kugelschüttung mit Kugeln von nur 0.06 mm Durchmesser.

#### 4.1.4 Poröse Struktur des erstarrten Oxids

Die Oxidproben von der Randschicht und von der Kruste auf der Ablaufschräge im Mischbehälter mußten unter dem Mikroskop betrachtet werden, dagegen wurden die großen Bruchstücke aus dem bulk-Bereich im Oxidkanal nur mit dem bloßen Auge und makroskopisch beurteilt.

Von kleinen Probestücken der Oxidschicht, die auf der Ablaufschräge zum Mischbehälter verblieben war, wurde versucht, die Porenstruktur zu charakterisieren. Diese Oxidproben waren nicht im Kontakt mit Beton und sind somit in ihrer Zusammensetzung der ursprünglichen Oxidschmelze am nächsten. Die Proben sind 2 bis 10 mm dick. An der luftzugewandten Seite haben sich glatte, glänzende Oberflächen ausgebildet. Diese Oberflächen sind dunkelgrau und vereinzelt lassen sich kleine Eisenspritzer ( $< 1$  mm) erkennen. Die Unterseite zur Ablaufschräge aus Stahlblech ist uneben und von Blasen (Hohlräumen) durchzogen, von denen die größeren einen geschätzten Durchmesser von 3 mm haben. Schätzungsweise 50% der Fläche sind echte Kontaktfläche mit der metallischen Ablaufschräge gewesen. An diesen Stellen haftet auch noch Eisen, was an der dunklen Farbe gegenüber dem ansonsten hellgrauen Oxid deutlich zu erkennen ist. Unter dem Mikroskop betrachtet läßt sich der Querschnitt eines Bruchstücks in drei Bereiche unterteilen, Abb. 4.9.

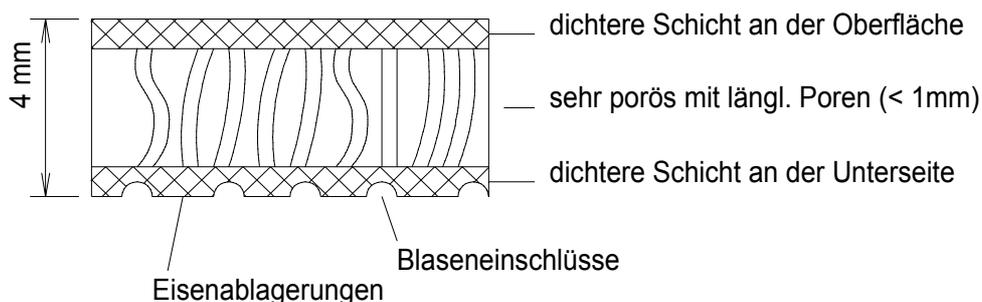


Abb. 4.9: Struktur der Oxidprobe von der Ablaufschräge des Mischkanals

- Eine sehr dichte oberflächennahe, glänzende Schicht (keine offenen Poren an der Oberfläche) von nicht einmal einem Millimeter Dicke.
- Eine sehr ähnlich aussehende Schicht an der Unterseite, die selbst sehr dicht ist, allerdings durch die (Halb-)Blasen an der Unterseite verworfen und wellig ist. Diese Schicht ist nicht an allen Stellen so deutlich erkennbar wie die Oberflächenschicht.

- Die Zwischenschicht ist deutlich porös. Die Poren sind länglich und verlaufen senkrecht zu den Oberflächen. Die Durchmesser der Poren sind kleiner als 1 mm.

Bei manchen Probestücken, die im Ausmaß dicker sind, wiederholt sich dieser Aufbau in mehreren Schichten. Wahrscheinlich ist an diesen Stellen mehrmals heiße Schmelze über die bereits erstarrte Schmelze geflossen.

Bis zu drei Bereiche unterschiedlicher Porenstruktur werden bei den Oxidproben gefunden, die dem Flutkanal entnommen wurden. Beim Kontakt der Oxidschmelze mit den Seitenflächen des Kanals schmolz das Cordierit nicht auf. Eine etwa 2 mm starke Randschicht des Oxids weist eine ähnliche Struktur auf, wie sie der Unterseite der Proben von der Ablaufschräge entspricht. Diese Schicht ist praktisch instantan beim ersten Kontakt mit der Wand gebildet worden. Auch die Kontaktfläche hat ähnliches Aussehen: etwa 50% der Fläche hatte direkten Kontakt, der Rest war durch Blaseneinschlüsse von der Wand isoliert. In senkrechter Richtung zur Wand verlaufen längliche Poren, wie in Abb. 4.10 abgebildet.

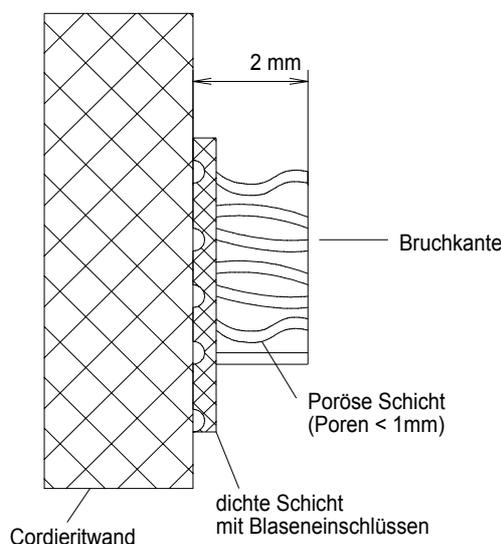


Abb. 4.10: Struktur der Oxidprobe an der Kanalseitenwand

Diese Porenstruktur der Oxidschicht im Wandbereich von 2 mm ist längs des gesamten Kanals zu erkennen. Sie rührt von einer instantanen Krustenbildung beim Ausbreiten der Schmelze her. Anschließend an diese Randschicht sind Strukturen zu erkennen, die jedoch lokal unterschiedlich längs des Kanals ausfallen. Im Abstand von 0.2 m vom Einlauf schließt sich an die Randschicht ein grobporöses, schwamm-

ähnliches Gefüge von mehreren Zentimetern Stärke an, Abb. 4.11 zeigt schematisch diese Struktur. Die Poren sind annäherungsweise rund und betragen im Mittel einige Millimeter im Durchmesser. Vereinzelt sind auch größere unförmige Hohlräume vorhanden.

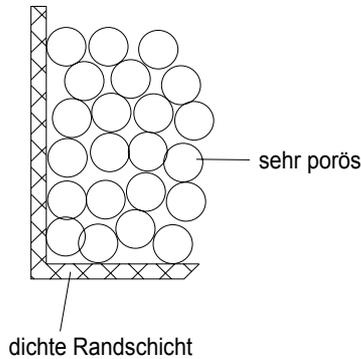


Abb. 4.11: Sehr poröse Oxidschicht an der Seitenwand bei 0,2 m im Kanal

Bei Proben, aus dem Kanal bei 1,5 m, 1,8 m und 2,2 m schließt sich an die dichte Randschicht wie bei der Probe von 0,2 m ebenfalls eine poröse schwammartige Struktur an. Sie ist allerdings nur 1 bis 2 cm dick und wird zum Innern der Proben hin von einer dichteren Struktur abgelöst, die weniger, aber größere Hohlräume beinhaltet, Abb. 4.12.

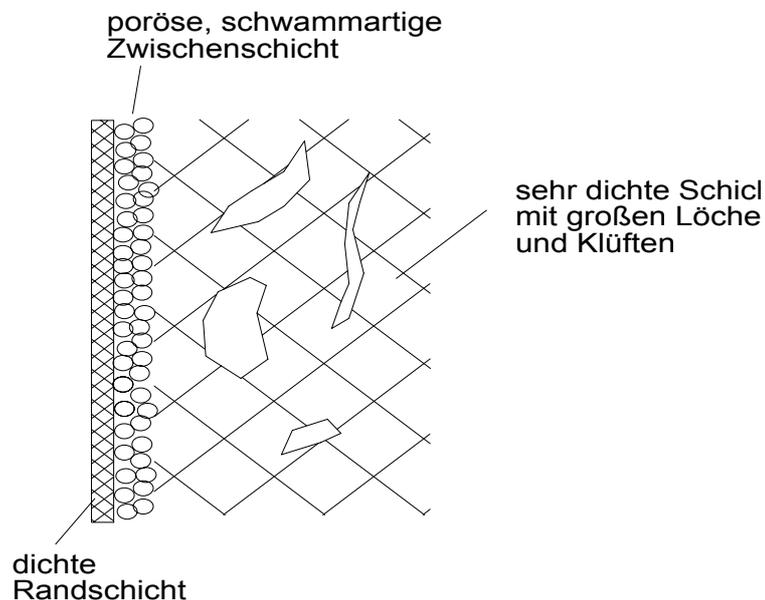


Abb. 4.12: Struktur des erstarrten Oxids nahe der Seitenwand im gefluteten Bereich zwischen 1,5 m und 2,2 m

Das Oxid um diese Blasen ist nicht mehr schwammartig, sondern scheint verdichtet. Die Hohlräume stehen nicht selten in Verbindung zueinander oder haben als Klüfte und Spalte Verbindung zur Oberfläche.

#### **4.1.5 Analyse von Oxidproben**

Einige Proben aus dem Test KATS-9 wurden auf ihre chemische Zusammensetzung hin analysiert. Die Zusammensetzung der Proben aus dem Mischbehälter sind mit der in den Oxidkanal sich ausbreitenden Schmelze praktisch identisch. Der silikatische Anteil liegt bei 7%, er steigt bei den Proben aus dem Flutkanal durch die Erosion des silikatischen Betons auf 9% bis 11% an. Das Eisenoxid rührt von der nicht vollständig reagierenden Thermitreaktion her, und das Magnesiumoxid rührt von der Ablation der keramischen Wand des Reaktionsbehälters aus Magnetisal her, Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Analysenergebnisse von Oxidproben

	<b>KATS-9</b>	<b>KATS-9</b>	<b>KATS-9</b>	<b>KATS-9</b>	<b>KATS-9</b>
	<b>Misch 1</b>	<b>Misch 2</b>	<b>Kanal 1m</b>	<b>Kanal 1.5m</b>	<b>Kanal 2 m</b>
	<b>788/96</b>	<b>789/96</b>	<b>790/96</b>	<b>791/96</b>	<b>792/96</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	76.58	77.67	72.66	74.27	73.12
SiO <sub>2</sub>	7.27	6.76	11.17	9.16	9.66
FeO	6.59	5.83	5.93	6.15	6.54
MgO	8.10	8.26	7.74	7.91	7.82
MnO	0.59	0.58	0.52	0.50	0.53

#### 4.1.6 Erosion im Oxidkanal

Wie bereits erwähnt, fand an den Seitenwänden aus Cordierit keine Erosion statt. Der Betonboden jedoch wurde bis zu 35 mm durch Erosion abgetragen. Die Abtragung war im vorderen Bereich des Kanals am höchsten und nahm mit wachsender Kanallänge stetig ab, die Werte sind in Tab. 4.4 aufgelistet.

Tab. 4.4: Erosion des Betonbodens im Oxidkanal

<b>Kanallänge</b>	<b>Bis 0,4 m</b>	<b>Ab 0,4 m</b>
Erosionstiefe	25 bis 35 mm	10 bis 20 mm leicht abnehmend

## 4.2 Eisenausbreitung und Flutung

Die ausgebreitete Eisenmasse wurde nach dem Experiment gewogen, sie betrug 129,6 kg. Die Temperaturmessung im Kanal mit den W-Re-Thermoelementen hat durch den Ausfall einer Verstärkereinheit nicht funktioniert. Aus der Erfahrung von vorangegangenen Versuchen wird eine Schmelzentemperatur von  $1950\text{ °C} \pm 50\text{ K}$  geschätzt. Die Eisentemperatur liegt unter der Oxidtemperatur, der Grund dafür ist, dass die Eisenschmelze deutlich länger als die Oxidschmelze im Zwischenbehälter gehalten werden muß. Das zur Ausbreitung zur Verfügung stehende Eisen hatte im Trennbehälter ein Volumen von  $21,7\text{ dm}^3$  eingenommen. Zusammen mit der ausgebreiteten Masse ermittelt sich daraus eine Eisendichte von nur  $6\text{ kg/dm}^3$ , was auf einen größeren Gasgehalt der Schmelze (etwa 12 Vol%) schließen lässt, die spezifische Dichte des Eisens liegt bei  $6,8\text{ kg/dm}^3$  bei der vorliegenden Temperatur.

Das Volumen der Eisenschmelze verteilt sich in dem 0,9 m langen und 300 mm breiten Kanal rechnerisch zu einer gemittelten Höhe von 80 mm. Wie im Falle des Oxids sollte zwischen Ende der Ausbreitung und Beginn des Flutens eine gewisse Beruhigungsphase eintreten. Die aus der Torricelli-Formel berechnete Auslaufzeit der Eisenschmelze aus dem Fenster betrug 6.4 s. Es vergehen somit etwa 13 s nach Ausbreiten, bis die Flutung des Eisens begann, siehe Tab. 3.1.

Während der Ausbreitung und vor allem während der Flutung der Schmelze mit Wasser waren sowohl akustisch als auch optisch keine Druckereignisse durch Schmelze-Wasser-Wechselwirkungen zu beobachten. Im Einklang dazu haben auch die Druckaufnehmer keinerlei lokale Druckerhöhungen registriert. Daher wird hier auf eine Darstellung der Signale verzichtet.

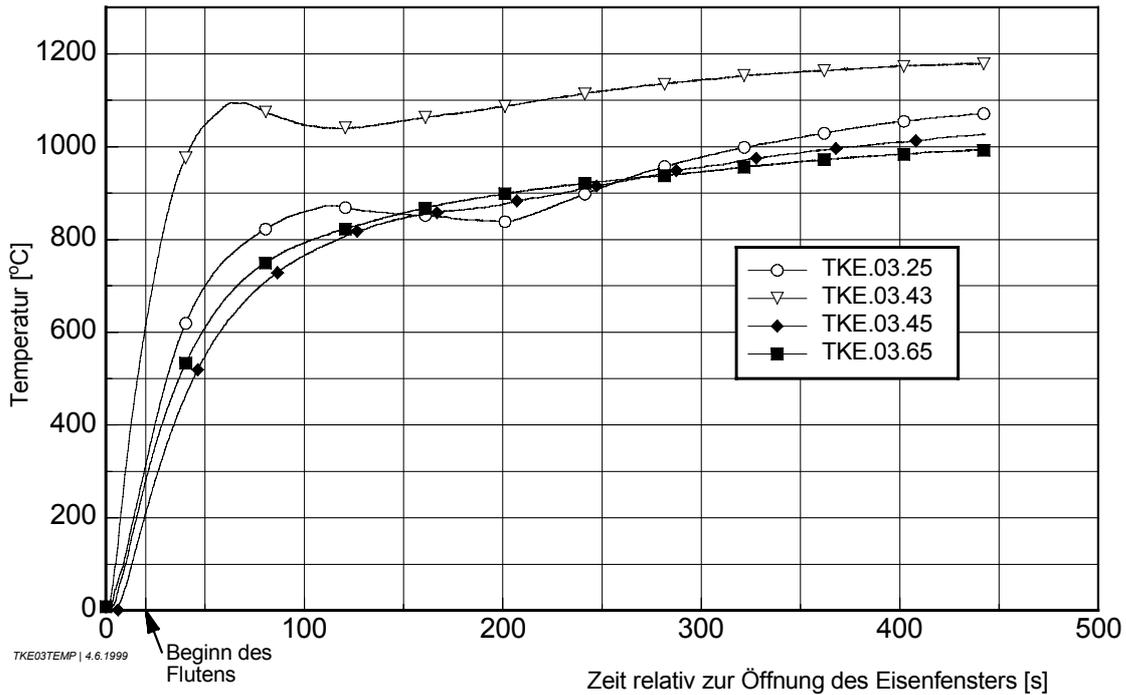
Auch im Eisenkanal war zur Flutung am Kanalende eine schräge Cordieritplatte im  $80^\circ$  Winkel zur Horizontalen angebracht. Ein kleines Vorbecken wurde gefüllt und das überlaufende Wasser rann diese Schräge hinab, wodurch ein gleichmäßiges Aufbringen des Wasserfilms über die ganze Kanalbreite erreicht wurde. Der Massenstrom für die Flutung wurde auf 100 g/s beschränkt. Der gesamte Flutvorgang wurde von den Videokameras aufgezeichnet. Um den gesamten etwa 15 min dauernden Vorgang zu beobachten, waren die Kameras in Automatikmodus eingestellt, mit dem Nachteil, daß die heißen Stellen der Schmelze meist überstrahlt sind. Die dunklen Stellen, die sich nach einiger Zeit ausbilden, waren jedoch nicht mit der Abkühlung

und Erstarrung des Eisens gekoppelt, sondern das aufschwimmende Oxid aus der Betonerosion wurde sichtbar. Ein Voranschreiten der Wasserfront war daher noch schwerer auszumachen, als dies beim Oxidkanal der Fall war. Tab. 4.5 zeigt daher nur das ungefähre zeitliche Fortschreiten der Wasserfront in dem Eisenkanal. Zu Beginn des Flutens war der abströmende Wasserdampf stark überhitzt, daher war die heiße Oberfläche gut zu erkennen. Mit zunehmender Zeit jedoch strömte mehr und mehr gesättigter Wasserdampf ab, der die Sicht stark behinderte.

Tab. 4.5: Zeitliches Fortschreiten der Wasserfront im Eisenkanal. Die Flutung erfolgt bei 1.0 m

<b>Zeit ab Beginn des Flutens [s]</b>	<b>Ungefähre Position der Wasserfront [m]</b>
0	0,9
1	0,85
7	0,8 – 0,75
37	0,7 – 0,53
42	0,64 – 0,4

Die Aufzeichnungen der Wandthermoelemente sind in Abb. 4.13 und Abb. 4.14 dargestellt. Der Zeitnullpunkt entspricht dabei dem Zeitpunkt, bei welchem das Eisenfenster geöffnet wurde. Die Flutung selbst erfolgte etwa 20 s später. Der Zeitpunkt, zu dem die Flutfront die dem Fenster nahe Position bei 0.3 m erreichte, ist nicht genau bekannt. Zuviel Dampf strömte aus dem Kanal, um dies sichtbar machen zu können. Aus Tab. 4.5 kann man abschätzen, dass dies etwa 50 s nach Beginn des Flutens geschah. In Abb. 4.13 ist zu diesem Zeitpunkt auch in der Tat ein Temperaturabfall des Thermoelements aufgetreten, das der Kontaktfläche zum Eisen am nächsten lag, siehe Tab. 2.3. Die Thermoelemente, die weiter innerhalb der Cordieritwand installiert waren, registrieren einen Temperaturabfall entsprechend später.



Versuch KATS-9 Temperaturmessung im Eisenkanal 30cm vom Schmelzeintritt

Abb. 4.13: Aufzeichnung der Temperaturen in der Seitenwand bei 0.3 m

Auch bei der Position 0.7 m kann der Einfluß des Flutens anhand der Temperatur-  
aufzeichnungen der Thermoelemente in der Seitenwand registriert werden. Das  
wandnächste Thermoelement (3 mm Tiefe) zeigt einen deutlichen Knick bei der An-  
kunft der Flutfront.

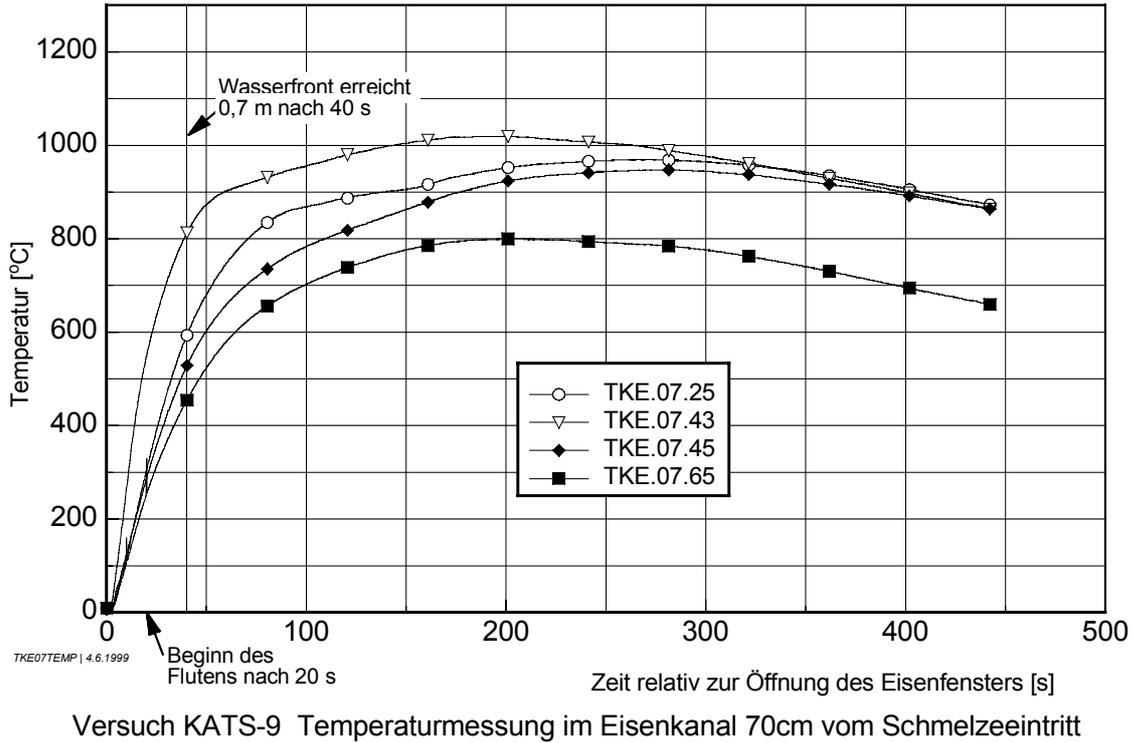


Abb. 4.14: Aufzeichnung der Temperaturen in der Seitenwand bei 0.7 m

#### 4.2.1 Nachuntersuchungen des Eisenregulus

Der Eisenregulus hatte eine sehr unregelmäßige Oberfläche mit hohen Erhebungen, Vertiefungen und vielen Einschlüssen von erodiertem Beton, Abb. 4.15 zeigt ein Photo der Oberfläche des Regulus. Die Unterseite zeigte ebenfalls große Unregelmäßigkeiten durch die inhomogene Betonerosion. Die mittlere Höhe des Eisenregulus betrug ca. 8 – 10 cm.

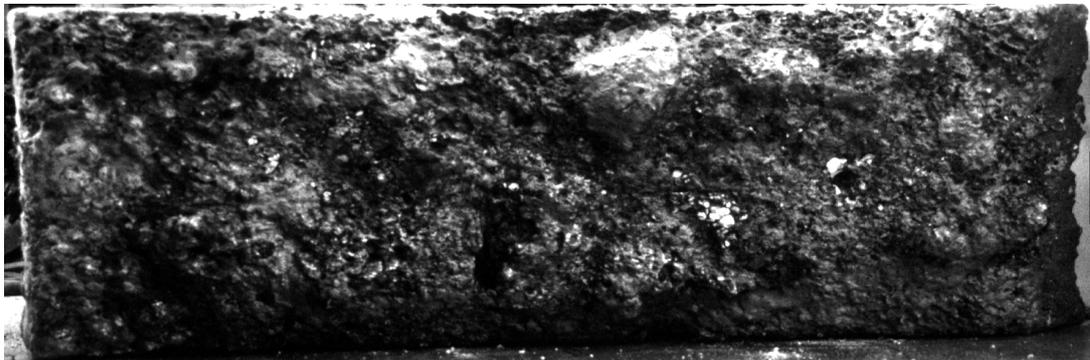


Abb. 4.15: Oberfläche des Eisenregulus in KATS-9

#### **4.2.2 Erosion im Eisenkanal**

Die seitlichen Cordieritwände erfuhren eine teilweise starke Erosion aufgrund der Wechselwirkung mit der Eisenschmelze. In Bodennähe betrug sie bis zu 6 mm. Dies macht zwar die Lage der NiCr-Ni-Thermoelemente unsicher, hat jedoch nicht zu deren Versagen geführt.

Die Erosion des Betonbodens ist inhomogener als sie beim Oxid war. Die Erosionstiefen liegen zwischen 25 und 40 mm, im Mittel um die 30 mm. An einer Stelle wurde eine außergewöhnliche Tiefe von 50 mm gemessen.

### 4.3 Triggermechanismus

Die Gewichte, welche die in den beiden Kanälen gespannten Stahlseile spannten, wurden mit Videokameras beobachtet. Sowohl bei der Oxid- als auch der Eisen-schmelze versagten die Seile innerhalb weniger als 0.5 s nach Kontakt mit der vor-dersten Schmelzefront. Damit ist nachgewiesen, dass Stahlseile im Ausbreitungs-raum, wenige cm über dem Boden gespannt, als eine mögliche Methode zur Trigge-rung der Flutventile im EPR in Betracht gezogen werden kann.

## 5 Schlußfolgerungen

Das Flutexperiment KATS-9 zeigte, dass die Oberflächen ausgebreiteter Oxid- und Metallschmelzen selbst bei hohen Temperaturen und intensiver Rührwirkung durch das Substrat Beton mit Wasser mit Raten von 0.1-0.2 l/s·m<sup>2</sup> geflutet werden können, ohne dass heftige Schmelze/Wasser-Wechselwirkungen auftreten.

Im Falle der Oxidschmelze bildete sich auf der Oberfläche kurz nach Kontakt mit Wasser eine feste Kruste aus, die auch durch die heftige Rührwirkung der Schmelze nicht mehr aufbrach. Diese Kruste stellt bezüglich des Wärmetransports aus der Schmelze in den Wasserpool darüber eine Barriere dar. Dieser Sachverhalt wurde unter anderen Tests auch bei den MACE Tests [3] gefunden. Diese Tests zeigten, dass eine vollständige Kühlung der Schmelze durch Fluten der Oberfläche nicht er-reicht werden kann. Zusätzliche Kühlmaßnahmen werden zur Stabilisierung der Schmelze notwendig sein.

## 6 Literatur

- [1] Michel, M. et al.  
EPR Safety Approach and Consideration of Severe Accidents, Transactions of the ENC 1994, Lyon, France, October 2-6 1994, Vol. II, 502-506
- [2] Farmer, M.T.; Spencer, B.W.  
Status of the CORQUENCH Model for Calculation of Ex-Vessel Corium Coolability by an Overlying Water Layer, Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November, FZKA-Report 6475, pp332-344
- [3] Farmer, M.T. et al.,  
Status of Large Scale MACE Core Coolability Experiments, Proceedings of the OECD Workshop on Ex-Vessel Debris Coolability, Karlsruhe, 15-18 November 1999, FZKA-Report 6475, pp317-331
- [4] Bohl, W.,  
Technische Strömungslehre, Vogel Fachbuch Kamprath Reihe 11. Auflage, 1998
- [5] Chevalier, P.Y.,  
Thermodynamic Calculation of Phase Equilibria in a Quinary Oxide System  $Al_2O_3-CaO-SiO_2-U_2-Zr_2$ : Determination of Liquidus and Solidus Temperatures of Some Selected Mixtures, J. Nucl. Mat. 186, 1992, pp212-215
- [6] Stegmaier, U.,  
EquiTherm-calculations, private Mitteilung
- [7] Tiseanu, Ion,  
FIDAP-calulations, private Mitteilung
- [8] Depelley, L.  
Bestimmung von Stoffdaten (Dichte, Porosität, spez. Wärme, Permeabilität), der Kristallstruktur und Elementzusammensetzung von oxidischen KATS-Proben, Diplomarbeit an der Fakultät für Maschinenbau, Universität Karlsruhe, Juni1998
- [9] Kakac, S.; Shah, R.K.; Aung, W.,  
Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, John Wiley & Sons, 1987

## **Anhang A Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger Untersuchungen**

J.M. Veteau and B. Spindler analyzed enthalpy, viscosity and density of the KATS oxidic mixture using results of the GEMINI 2 code [A1] and compared their results with former calculations using the GEMINI 1 version. The composition of the oxide mixture chosen in these studies is:

83 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
8.5 wt%  $\text{SiO}_2$   
6.0 wt%  $\text{FeO}$   
1.5 wt%  $\text{MgO}$   
1.0wt%  $\text{MnO}$

The temperature dependant solid fraction within the liquidus and solidus range are calculated with the GEMINI code. J.M. Veteau and B. Spindler used newer versions of the code and the data base. The difference in the results, Figure 1, must be attributed to this fact. Yet, the liquidus-temperatures are identical (1925 °C) and the 50% solid fraction temperature (1777 °C for the older GEMINI calculation and 1767 °C for the new version) is very close together.

The temperature dependant enthalpy is plotted in Figure 2 for both investigations. The two curves are normalized at room temperature. Whereas in the range from low temperatures to about liquidus the two curves are rather close together, there is a systematic deviation above liquidus. The reason for this difference lies in different data sets used for the specific heat values of the liquid states. Figure 3 shows the comparison of the densities. The difference between the two curves is rather small at liquidus. Below solidus the differences are rather large, the reason stems from using different values at room temperature. Here a further investigation is needed.

As to the viscosities, Figure 4, two regions have to be regarded separately: above and below liquidus. For both investigations the liquidus temperature is identical.

Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger  
Untersuchungen

Above liquidus:

At FZK experimental data of ELYUTIN et al. [A2] have been used to cover the range above the liquidus temperature. These experiments have been performed with only two of the oxidic partners: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and SiO<sub>2</sub>. The small amount of SiO<sub>2</sub> increases the viscosity only by about 20% compared to the viscosity of pure alumina.

Additional experiments at the University of Bayreuth [A3] have been done to investigate the viscosity of an oxidic melt, one sample with a composition as shown above and one with a similar composition, Table A1. The experimental liquidus temperatures are found to be in between 1950 °C and 2000 °C. This is close to the data from ELYUTIN if one considers a realistic error of about 50 K for temperature measurements in this high temperature range. The experimental viscosity data at the liquidus temperature are in rather good agreement with the data from ELYUTIN.

If one sets the liquidus temperature of the Bayreuth experiments to the value of 1925 °C, it turns out that the viscosity data after this temperature correction are in a rather good agreement with the FZK data.

Table A1: Results of viscosity measurements

	<b>Sample #1</b>	<b>Sample #2</b>
Material composition (wt%)		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	83.0	79.3
SiO <sub>2</sub>	8.5	7.4
FeO	6.0	7.0
MgO	1.5	5.6
MnO	1.0	0.7
Liquidus Temperature (°C)	1975-2000	1950
Viscosity at Liquidus (Pa s)	0.1 < μ < 0.2	0.12

Calculating the viscosity above liquidus Veteau and Spindler used the URBAIN model [A4]. The data from this correlation are lower by a factor of about two compared to the ELYUTIN data and are distinctively smaller than the viscosity data for pure alumina.

Below liquidus:

As to the range below liquidus, there is a discrepancy which originates from the differences in viscosities at the liquidus temperature: viscosity data below liquidus are normalized to the data at the liquidus point. There exist several correlations for the apparent viscosity in the range between liquidus and solidus. Here the Stedman correlation [A5] is used, assuming that at 50 % solid fraction the value of the viscosity reaches infinity asymptotically. The discrepancies between the two investigations below liquidus are due to the differences at liquidus and the minor shift of 10 K for the 50% solid fraction temperature.

Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger Untersuchungen

---

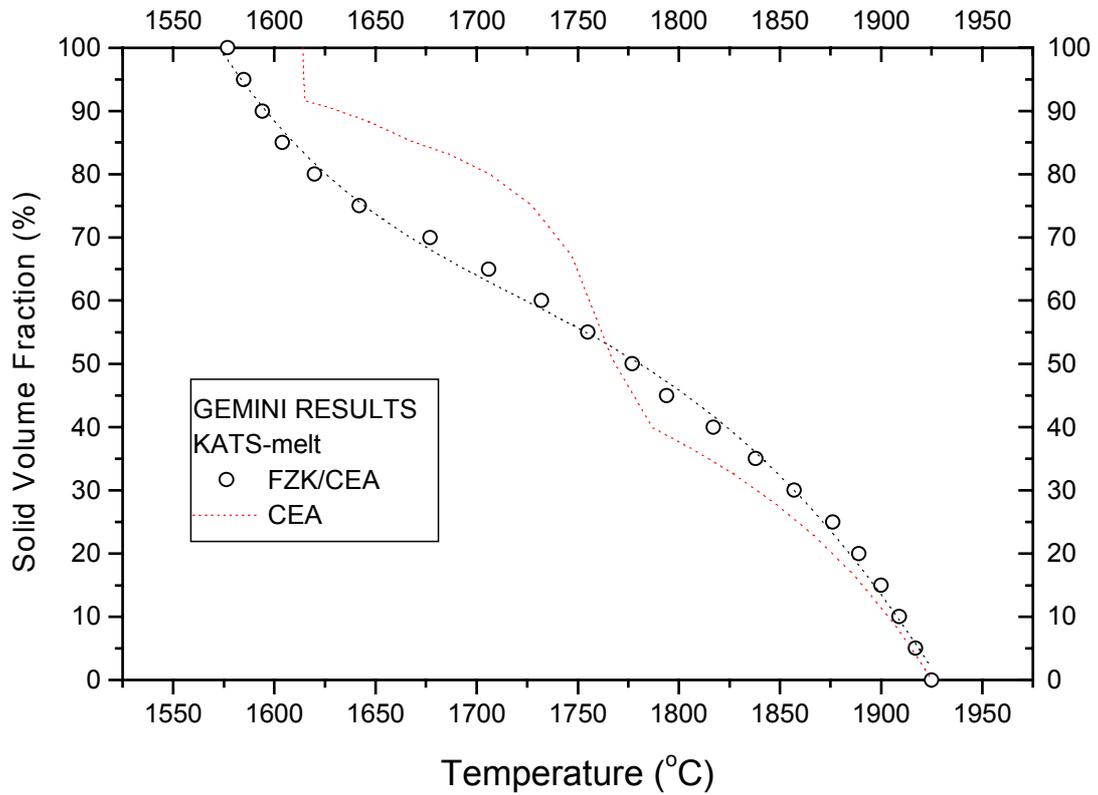


Fig. 1 Solid volume fraction in the liquidus-solidus range

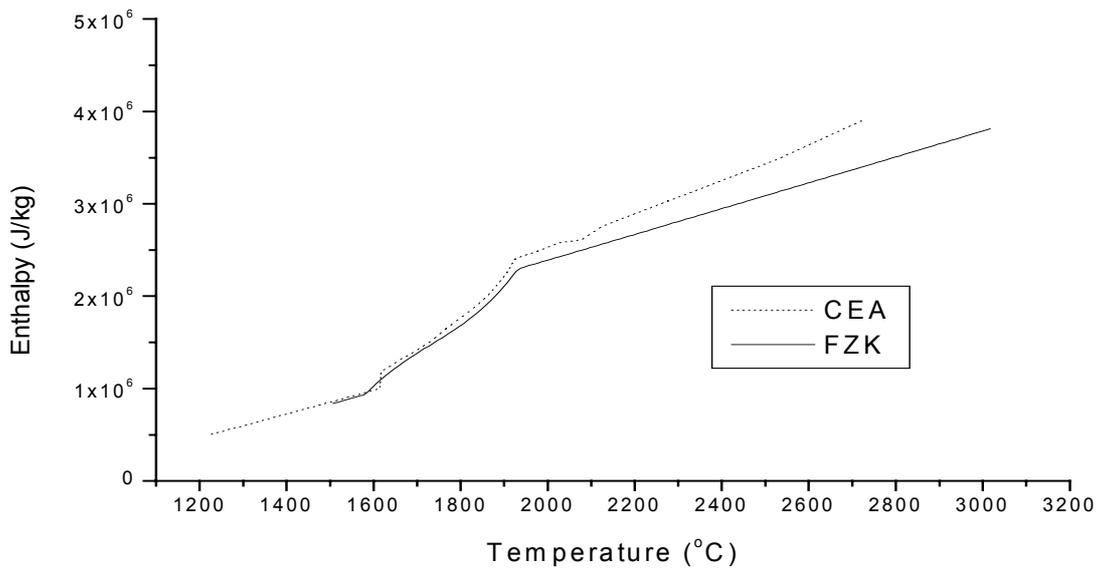


Fig. 2 Enthalpy vs Temperature

Materialdaten für die oxidische Schmelze, ein Vergleich zweier unabhängiger Untersuchungen

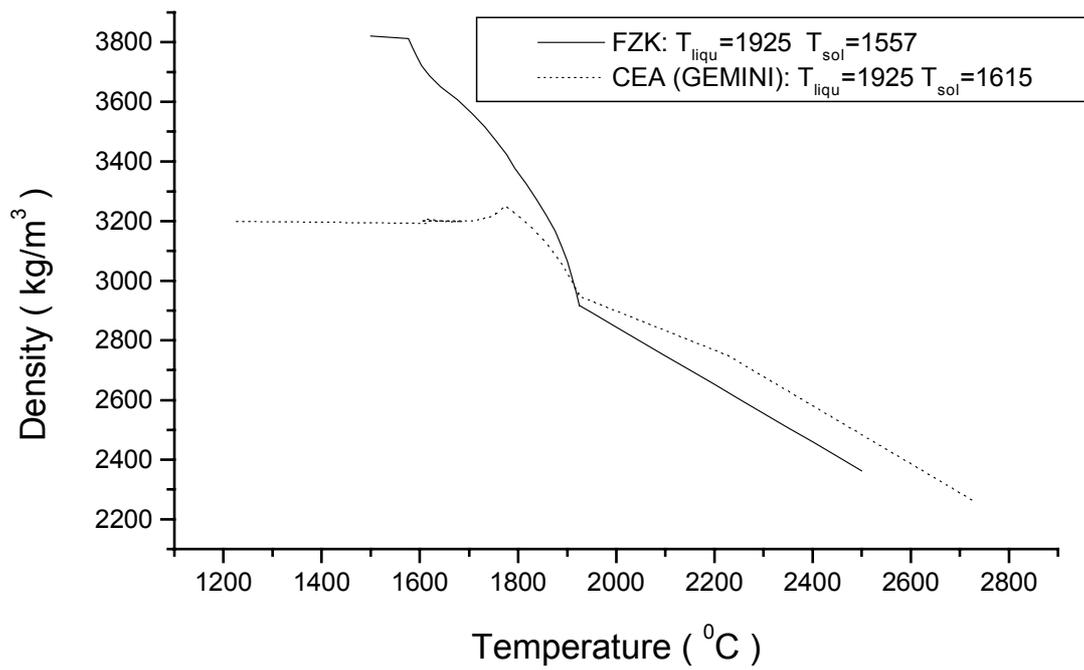


Fig. 3 Density of oxide melt

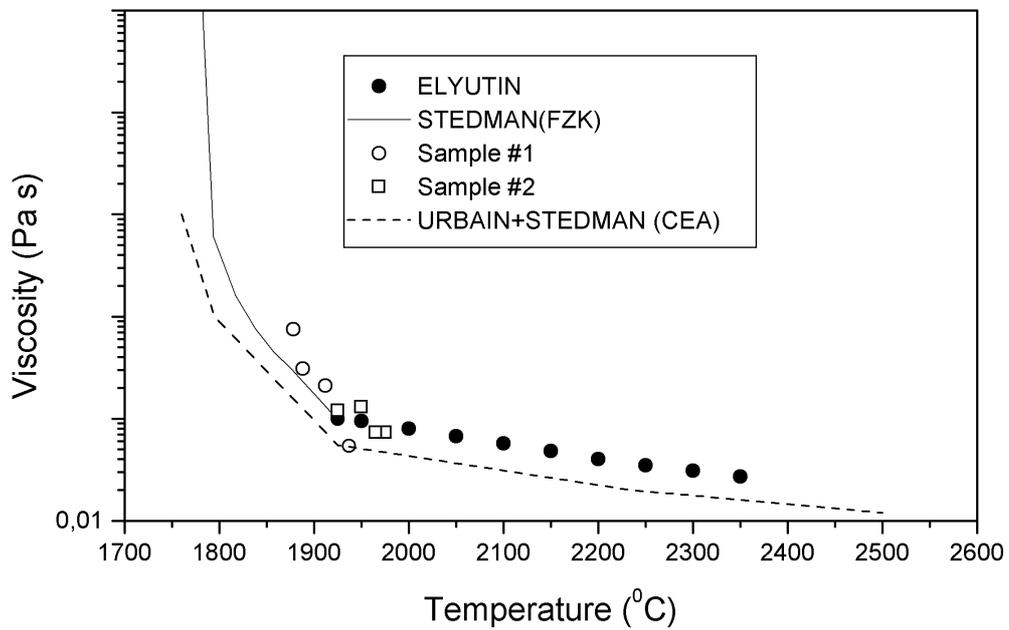


Fig. 4 Comparison of temperature dependant viscosities

## References:

[A1] P.Y. Chevalier, "Thermodynamic Calculation of Phase Equilibria in a Quinary Oxide System  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2\text{-U}_2\text{-Zr}_2$ : Determination of Liquidus and Solidus Temperatures of Some Selected Mixtures", J. Nucl. Mat. 186, 1992, pp 212-215

[A2] V.P. Elyutin et al, "Viscosity of Alumina", Russian Journal of Physical Chemistry, 43 (3),1969

[A3] B.D. Dingwell, Bayr. Forschungsinstitut für Experimentelle Geochemie und Geophysik, University of Bayreuth, private communication

[A4] G. Urbain, "Viscosity estimations of slags", Steel Research, 58 N.3, 1987, pp 111-116

[A5] S.J. Stedman et al., " Rheology of composite ceramic injection moulding suspensions", J. Mat. Sci. 25,1990, pp1833-1841

## Anhang B Transiente Wärmeleitrechnungen mit dem Programm Fidap

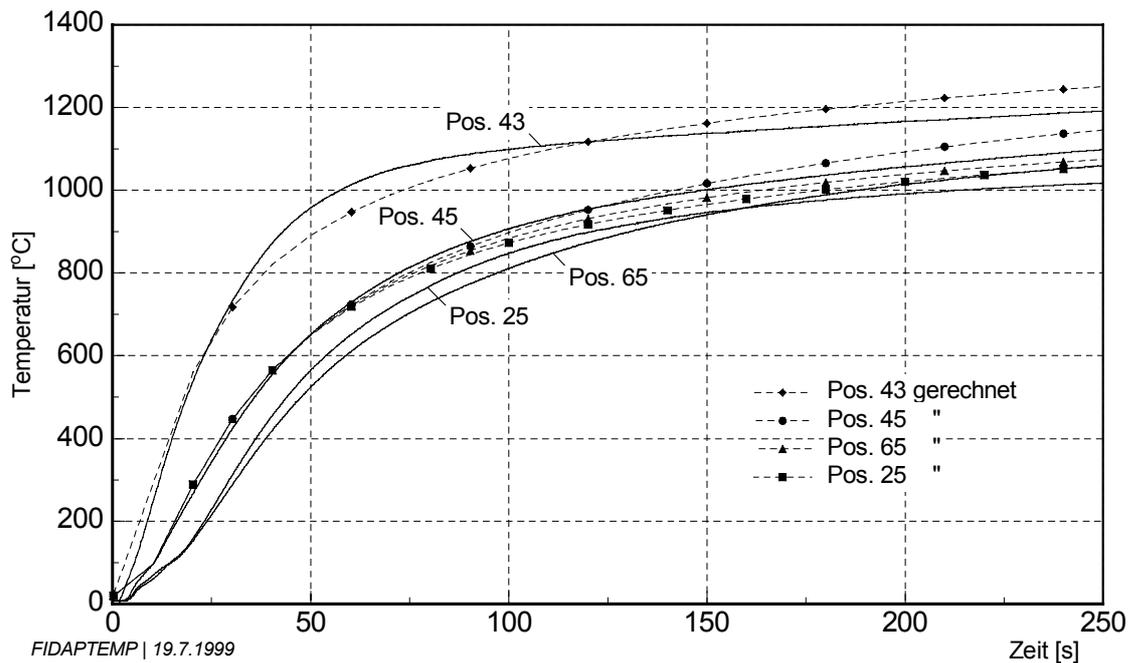
Analysen mit dem Code FIDAP wurden nur für den Oxidkanal durchgeführt. Beim Eisen stellte sich heraus, dass eine intensive Wechselwirkung der Schmelze mit der Seitenwand aus Cordierit stattfand, die eine entsprechende Analyse mit FIDAP verbietet.

Das Modell stellt ein zweidimensionales Wärmeleitproblem zwischen der Oxidschmelze, der Seitenwand, dem Betonboden und der freien Oberfläche dar. Konvektive Wärmetransporte wurden nicht berücksichtigt, da die Nachuntersuchungen zeigten, dass beim ersten Kontakt der Schmelze mit der Cordieritwand sofort eine Kruste gebildet wurde. Durch diese Kruste wurde der Wärmetransport in die Wand kontrolliert und begrenzt. Da die Nachuntersuchungen zeigten, dass der Kontakt zwischen der Oxidkruste und der Wand nicht ideal war, wurde in dieser Analyse ein Luftspalt von 1 mm Stärke mit einbezogen. Die Annahme, dass am Boden im Kontakt mit dem Beton nur Wärmeleitung herrscht, ist sicherlich nicht richtig, das Hauptaugenmerk jedoch bei diesen Analysen ist auf den seitlichen Wärmeübergang gerichtet, wo ein Vergleich mit experimentellen Temperaturdaten möglich ist. Die für die Rechnungen notwendigen Stoffdaten sind in Tabelle A.1 aufgeführt. Die Anfangstemperatur der Oxidschmelze liegt bei 2050°C. Da in dieser Analyse der Flutvorgang nicht modelliert wurde, kann ein Vergleich nur mit den Daten bei 0.3 m im Kanal erfolgen, wo die Flutfront nicht vorgedrungen war.

**Tab. A.1:** Stoffdaten für die FIDAP Rechnungen

	<b>Schmelze</b>	<b>Cordierit</b>	<b>Luft</b>
Emissivität	1.0	-	-
Wärmeleitfähigkeit (W/mK)	3-4	1.2	0.032
Dichte (kg/m <sup>3</sup> )	3050	2000	1.18
Spez. Wärme (J/kgK)	1250	880	1000

Abbildung A.1 zeigt den Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen in der Seitenwand. In dieser Abbildung sind die experimentellen Daten aus Abbildung 4.4 bei der Position 0.3 m im Kanal dargestellt: in 40 mm Höhe, d. h. in etwa halber Höhe der Oxidschmelze in 3 mm Tiefe der Wand, sowie weitere drei Thermoelementaufzeichnungen in 20 mm, 40 mm und 60 mm bei einer Tiefe von 5 mm in der Wand. In halber Höhe (40 mm) stimmen die anfänglichen Temperaturanstiege für beide Wandtiefen recht gut überein. Die Abweichungen ab etwa 800 °C können damit zusammenhängen, dass konstante Stoffgrößen in der Rechnung verwendet wurden, was bei höheren Temperaturen sicherlich keine Gültigkeit mehr hat. Unterschiedliche Temperaturanstiege in 5 mm Wandtiefe bei den drei Höhen 20 mm, 40 mm und 60 mm wurden im Experiment gemessen. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, daß die Kontaktfläche zwischen Oxidkruste und Cordieritwand über der Höhe ungleichmäßig war.



KATS-9: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei  $x = 0,3$  m mit der Fidap-Rechnung