

Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6212

Simulationsexperimente zum Verhalten von Kernschmelzen in der Reaktorgrube des EPR: KAPOOL 1-5

F. Fellmoser, G. Engel, G. Fieg, H. Massier, H. Werle

Institut für Neutronenphysik und Reaktortechnik
Projekt Nukleare Sicherheitsforschung

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
1999

Simulationsexperimente zum Verhalten von Kernschmelzen in der Reaktorgrube des EPR: KAPOOL 1-5

Zusammenfassung

Für zukünftige Leichtwasserreaktoren werden spezielle Einbauten (Kernfänger) erforderlich sein, um das Containment-Versagen infolge von 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. Im EPR (European Pressurized Water Reactor) ist ein solcher Kernfänger vorgesehen. Nach Versagen des Reaktordruckbehälters soll die Kernschmelze zunächst in der Reaktorgrube etwa 1h zurückgehalten werden, damit auch eventuell später abstürzende Restschmelzen gesammelt werden. Nach Aufschmelzen einer Schicht aus Opferbeton, mit der die Reaktorgrube ausgekleidet ist, und eines Stahltors am Boden der Reaktorgrube soll sich die Kernschmelze gleichmäßig in einem dafür vorgesehenen Ausbreitungsraum verteilen und anschließend mit Wasser von oben geflutet und dadurch gekühlt werden.

Es wurde deshalb eine Serie von Experimenten durchgeführt, um das Aufschmelzen der Opferbetonschicht und der Stahlplatte zu untersuchen. Dabei wurde als Simulationsmaterial für die Kernschmelze eine Thermitschmelze aus Aluminiumoxid und Eisen verwendet. Als Opfermaterial wurde ein spezieller Beton benutzt, der als Zuschlagstoff Borosilikatglas enthielt. Außerdem wurde in zwei Versuchen zusätzlich die Ausbreitung und Kühlung der Schmelze untersucht. In einem Experiment wurde ein passiver Auslösemechanismus für die Wasserflutung getestet. Die Experimente lieferten Daten zur Erosionsrate des Opferbetons, zur Homogenität der Erosionsfront und zum Aufschmelzverhalten des Stahltors.

Simulation Experiments on the Corium Melt Behaviour in the EPR Reactor Cavity: KAPOOL 1-5

Abstract

In future Light Water Reactors special devices (core catchers) might be required 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. In the EPR (European Pressurized Water Reactor) such a core catcher is foreseen. After failure of the reactor pressure vessel the core melt is retained in the reactor cavity for ~ 1 h to pick up late melts. The reactor cavity is protected by a layer of sacrificial concrete and closed by a steel gate at the bottom. After meltthrough of this gate the core melt should be distributed homogeneously in a special spreading room. The spread melt is cooled by flooding with water from top.

A series of experiments has been performed to investigate the meltthrough of the sacrificial concrete layer and the steel plate using alumina-iron thermite melts as a simulant for the core melt. The sacrificial material was a special concrete with boron-silicate glass as aggregate. In addition, the spreading and cooling of the melt was investigated in two tests. In one experiment also a passive flooding initiation device for water flooding was tested. Data on the erosion velocity of the sacrificial concrete, the homogeneity of the melt front and on the melting behaviour of the steel gate were achieved.

Inhalt

	Seite
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung der KAPOOL-Experimente	2
3 Opferbeton	3
4 Experiment KAPOOL-1	5
4.1 Versuchsaufbau.....	5
4.2 Instrumentierung.....	6
4.3 Ergebnisse.....	8
5 Experiment KAPOOL-2	12
5.1 Versuchsaufbau.....	12
5.2 Instrumentierung.....	13
5.3 Ergebnisse.....	15
6 Experiment KAPOOL-3	21
6.1 Versuchsaufbau.....	21
6.2 Instrumentierung.....	23
6.3 Ergebnisse.....	25
7 Experiment KAPOOL-4	33
8 Experiment KAPOOL-5	34
8.1 Versuchsaufbau.....	34
8.2 Instrumentierung.....	36
8.3 Ergebnisse.....	38
9 Vergleiche und Diskussion	45
9.1 Erosionsraten des Opferbetons	45
9.2 Inhomogenität der Betonerosion.....	48
9.3 Erosionsverhalten des Stahltors.....	48
10 Zusammenfassung	51
11 Literaturverzeichnis	52
12 Anhang.....	54

1 Einleitung

Aufgrund der Anforderungen des Artikelgesetzes müssen Leichtwasserreaktoren der nächsten Generation eine erhöhte Sicherheit auch bei schwersten Unfällen besitzen. Deshalb werden Vorrichtungen entwickelt, die im Falle eines schweren Kernschmelzenunfalls die Schmelze außerhalb des Reaktordruckbehälters (RDB) sicher auffangen und kühlen können. Ziel ist sowohl das Durchschmelzen des Reaktorfundamentes wie auch eine wesentliche Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung auszuschließen.

Eine Kühleinrichtung für Kernschmelzen, der sogenannte Kernfänger, ist Bestandteil des EPR-Konzepts [1, 2]. Der EPR (European Pressurized Water Reactor) wird zur Zeit in deutsch-französischer Kooperation als europäischer Druckwasserreaktor geplant (Abb. 1).

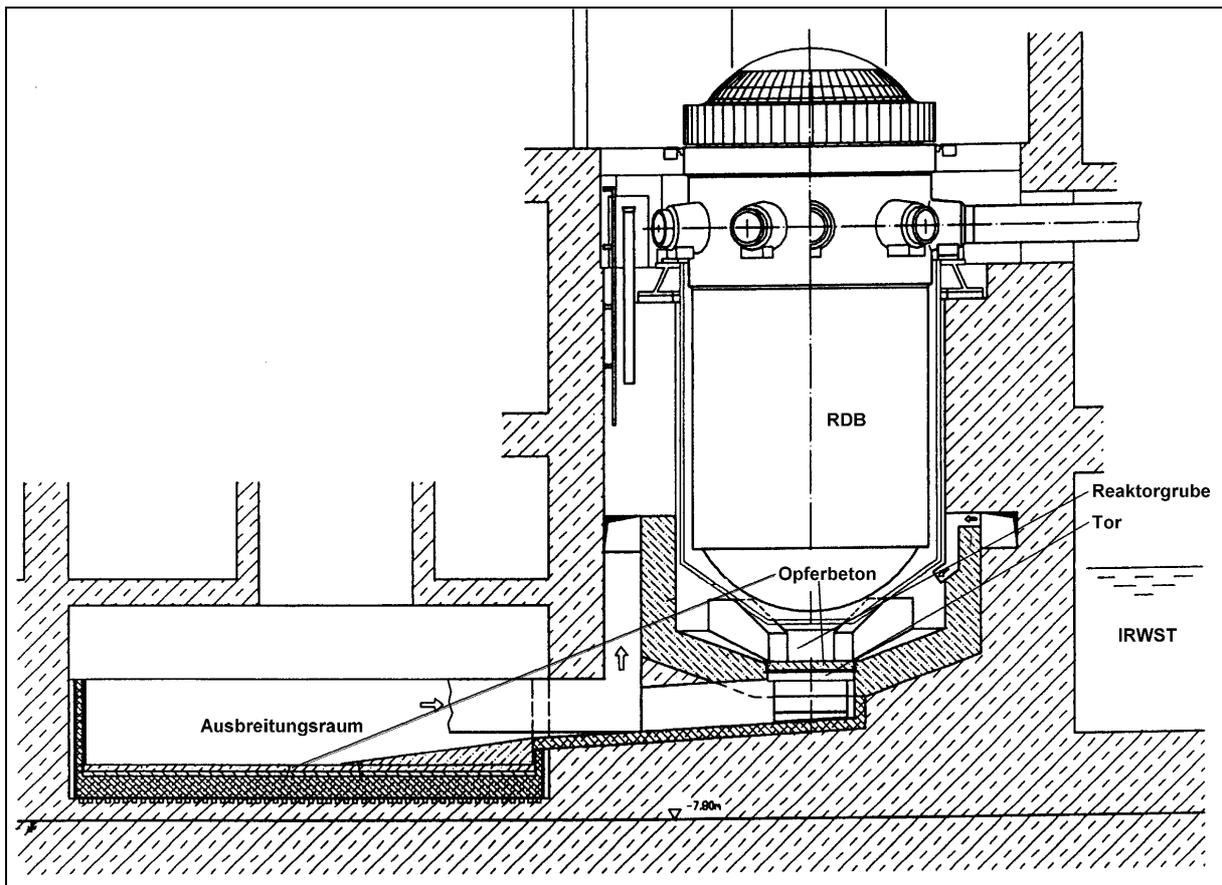


Abb. 1: Konzept zur Rückhaltung und Kühlung der Kernschmelze im EPR

Bei Durchschmelzen des Reaktordruckbehälters wird die Schmelze zunächst in der Reaktorgrube gesammelt und für einen Zeitraum von etwa einer Stunde zurückgehalten, um eventuell später abstürzende Restschmelzen aufnehmen zu können. Nach Durchschmelzen einer Opferbetonschicht und des darunter liegenden Stahltors fließt die Schmelze über einen leicht abfallenden Kanal auf eine Ausbreitungsfläche von etwa 170 m². Hier soll sich die Schmelze möglichst gleichmäßig ausbreiten und erreicht damit eine Schichthöhe von ungefähr 30 cm. Danach wird die Überflutung der Schmelze mit Wasser passiv und zeitverzögert aus einem 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.

Im EPR-Konzept soll die Schmelze etwa eine Stunde in der Reaktorgrube zurückgehalten werden, um sicherzustellen, daß praktisch die gesamte Kernschmelze gesammelt wird. Während dieser Zeit kommt es zur Erosion des Opferbetons durch die Schmelze. Dabei mischen sich die Zuschläge des Opferbetons mit der oxidischen Schmelze. Dadurch werden sowohl die Erstarrungstemperatur als auch die Dichte der oxidischen Schmelze herabgesetzt, was schließlich dazu führen soll, daß die ursprünglich schwerere Oxidphase leichter wird und sich über die metallische Phase schichtet (Dichteumkehr). Nach Aufschmelzen der Betonschicht versagt das Stahltor am Boden der Reaktorgrube, über das dann die Schmelze abläuft und sich auf der Ausbreitungsfläche verteilt. Voraussetzung für eine möglichst gleichmäßige Ausbreitung sind eine genügend gute Fließfähigkeit der Schmelze und eine nicht zu lange Auslaufzeit aus der Reaktorgrube, die mit einer entsprechend großen Öffnung des Tors zu erreichen ist. Diese Vorgänge werden in den KAPOOL-Experimenten untersucht.

2 Zielsetzung der KAPOOL-Experimente

Ziel der Versuchsreihe „KAPOOL“ [3 – 5] ist in erster Linie das Verhalten der Kernschmelze in der Reaktorgrube unterhalb des Reaktordruckbehälters nach einem schweren Kernschmelzenunfall zu untersuchen. Die Kernschmelze, die aus einem oxidischen UO₂/ZrO₂-Anteil und einem Metallanteil besteht, wird in den Experimenten durch eine Aluminiumoxid /

Eisen-Schmelze simuliert, die mittels einer Thermit-Reaktion erzeugt wird: $8 \text{ Al} + 3 \text{ Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow 4 \text{ Al}_2\text{O}_3 + 9 \text{ Fe}$. Der Gewichtsanteil beider Schmelzen liegt bei dieser Reaktion bei ca. 50%. Anders als bei Kernschmelzen, bei welchen die Dichten der Metall- und Oxidschmelzen ähnlich sind ($\approx 7000 \text{ kg / m}^3$), ist jedoch die Dichte der Al_2O_3 -Schmelze viel geringer ($\approx 3000 \text{ kg / m}^3$) als die der Eisenschmelze ($\approx 7000 \text{ kg / m}^3$). Deshalb liegt die Oxidschmelze im Versuch über der Eisenschmelze und die Erosion des Opferbetons erfolgt durch die Eisenschmelze. Bei den Versuchen wird die Resistenz der Opferbetonschicht gegenüber der darüber liegenden Schmelze untersucht. Ein Maß dafür ist die Erosionsrate des gewählten Opfermaterials. Sie stellt die Geschwindigkeit dar, mit der sich die Schmelzenfront in die Opferschicht hineinfrißt. Kennt man diese Größe, so ergibt sich die erforderliche Dicke dieser Schicht bei einer vorgegebenen Haltezeit der Schmelze. Da die Versuche transient sind, d. h. ohne äußere Nachbeheizung, fällt die Schmelzentemperatur während des Versuchs stark ab. Deshalb werden die Erosionsraten in Abhängigkeit der Schmelzentemperatur bestimmt. Ein weiteres Versuchsziel ist die Ermittlung der Gleichmäßigkeit des vertikalen Erosionsfortschritts über die gesamte Betonfläche, weil dies den Aufschmelzprozeß des Stahltors unterhalb des Betons beeinflusst. Dem Aufschmelzen der Stahlplatte wiederum kommt besondere Bedeutung zu, da der Öffnungsquerschnitt den Massenstrom aus der Reaktorgrube in den Ausbreitungsraum bestimmt. Im Versuch wird deshalb das zeitliche Öffnungsverhalten und der endgültige Öffnungsquerschnitt untersucht. Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurden in zwei Experimenten die anschließende Schmelzenausbreitung und -kühlung beobachtet. Außerdem wurde in einem Experiment ein passiver Auslösemechanismus für die Überflutung der Schmelze mit Wasser untersucht. In den ersten Experimenten war ein weiteres Versuchsziel, die Nachwärmeproduktion der Kernschmelze dadurch zu simulieren, daß während des Experiments Thermit zur Schmelze zugegeben wird. Die Abkühlung der Schmelze sollte dadurch verlangsamt werden.

3 Opferbeton

Bei den betrachteten Versuchen (KAPOOL 1-5) wurde immer das gleiche Opfermaterial verwendet. Es handelt sich dabei um einen Beton, der als Zuschlagstoff ein spezielles

Borosilikat-Glas enthält. Diese Betonzusammensetzung wurde von den COMET-Experimenten [5], die im IATF des FZK durchgeführt werden, übernommen. Der Beton setzt sich aus

- 76 Gew. % Borosilikat-Glas,
- 15 Gew. % Portlandzement,
- 9 Gew. % Wasser + Fließmittel (20 ml / kg Zement)

zusammen. Die chemische Zusammensetzung des Borosilikat-Glases ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Zusammensetzung des als Zuschlagstoffes eingesetzten Borosilikat-Glases

Chemische Zusammensetzung	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	LiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	TiO ₂
Gewichts-%	60,0	17,6	3,1	3,5	7,1	5,3	2,2	1,2

Die Körnung der Glasstücke erstreckt sich von 0 bis 8 mm im Durchmesser, wobei 30 % der Glaskörner im Bereich 0 bis 1mm und 70 % im Bereich 1 bis 8 mm liegen. Nach Trocknung des Opferbetons wurde mit Hilfe einer Glühverlustbestimmung bei 570 °C ein Wassergehalt von ca. 2 Gew. % ermittelt. Demnach verschieben sich die Gewichtsanteile des in den Versuchen verwendeten Opferbetons folgendermaßen:

- ca. 82 Gew. % Borosilikat-Glas,
- ca. 16 Gew. % Portlandzement,
- ca. 2 Gew. % Wasser.

4 Experiment KAPOOL-1

4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsbehälter stellt das Kernstück des Versuchsaufbaus dar. Er simuliert die Reaktorgrube. Der Aufbau dieses Behälters ist aus Abb. 2 ersichtlich (siehe auch Abb. A-1 und A-2 im Anhang).

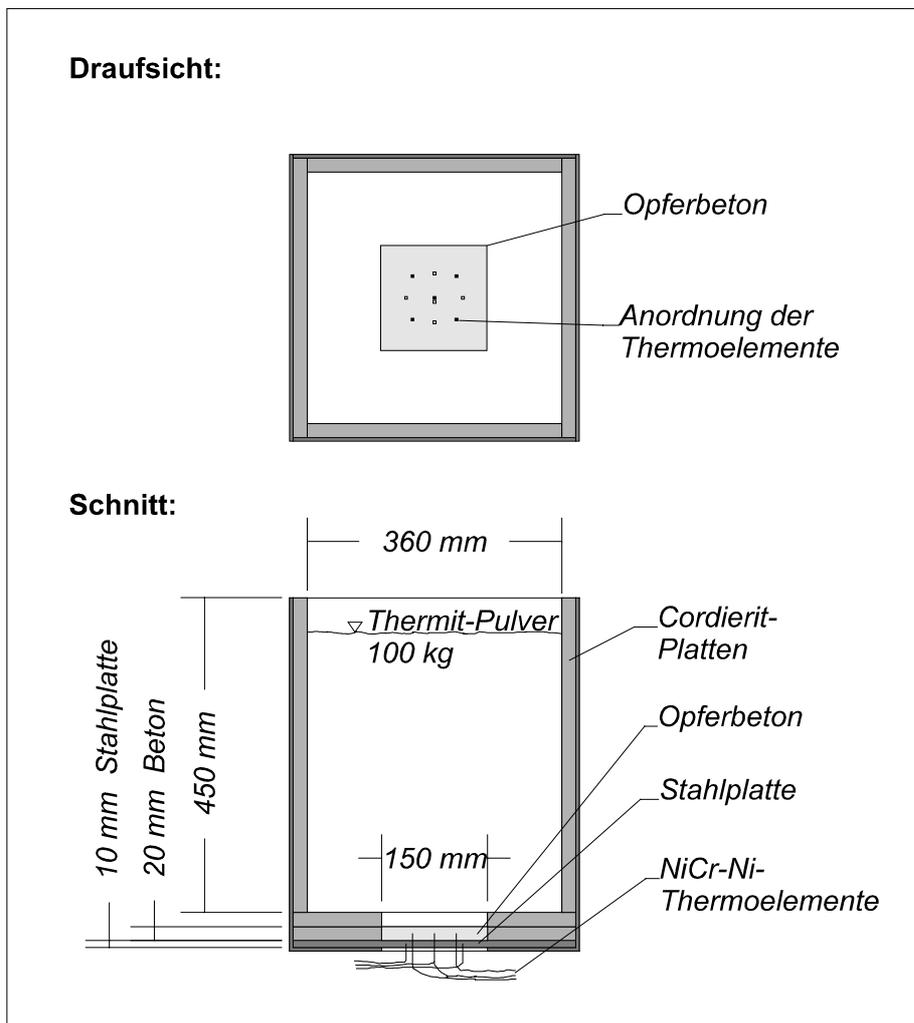


Abb. 2: Versuchsbehälter von KAPOOL-1

Er bestand aus vier Seitenwänden und einer Bodenplatte aus jeweils 5 mm dickem Stahl. Zum thermischen Schutz war er innen mit 20 mm dicken Keramik-Platten aus Cordierit (52 % SiO_2 ; 37 % Al_2O_3 ; 6,5 % MgO) ausgekleidet, an den Seiten jeweils eine und am Boden zwei.

Es ergab sich somit eine Grundfläche von 360 x 360 mm². Die Behälterinnenhöhe war mit 450 mm ausreichend für die Thermitmenge bemessen. Der Boden der Reaktorgrube wurde durch ein kleines quadratisches Fenster von 150 x 150 mm² simuliert, in das eine 20 mm dicke Opferschicht aus Glas-Beton eingegossen war (Abb. A-2). Unterhalb dieser Schicht befand sich eine 10 mm dicke Stahlplatte, die das Stahltor simulierte. Die zu erodierende Menge an Opferbeton ist somit gering und entsprechend bleibt die Schmelze über längere Zeit heiß. Der Behälter war auf vier Füßen montiert. Darunter stand ein weiterer Behälter, der die austretende Schmelze auffangen sollte. Auch dieser war mit Cordierit-Platten ausgekleidet, um ein thermisches Versagen zu verhindern. Beim Experiment KAPOOL-1 wurden 100 kg Thermit der Sorte R70SSH verwendet. Gezündet wurde an der Oberfläche des Thermitpulvers mit einem Zünddraht, der von Hand ausgelöst wurde. Die Thermitreaktion fand im Reaktionsbehälter statt. Dies hatte den Vorteil, daß kein zusätzliches Reaktionsgefäß erforderlich war und die Anfangstemperaturen der Schmelze relativ hoch waren.

4.2 Instrumentierung

Erosionsfront

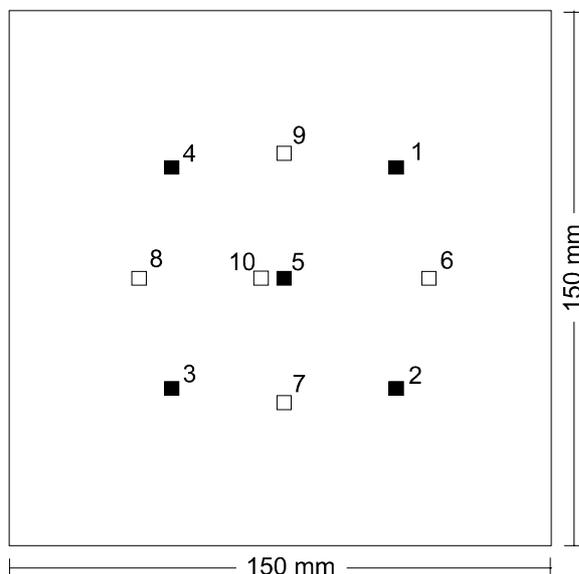


Abb. 3: Horizontale Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-1
 ■ im Beton (10 mm unter Oberfläche)
 □ in Stahlplatte (25 mm unter Oberfläche)

Um Anhaltswerte über die Erosionsrate zu erhalten, waren im Opferbeton fünf NiCr-Ni-Thermoelemente eingegossen, die die ankommende, heiße Schmelze detektieren sollten. Sie waren 10 mm unterhalb der Oberfläche im Beton positioniert. Die horizontale Positionierung ist aus der Abb. 3 ersichtlich (ausgefüllte Quadrate). In der 10 mm dicken Stahlplatte befanden sich zusätzlich fünf NiCr-Ni-Thermoelemente (leere Quadrate). Ihre Enden waren 5 mm tief im Stahl

versenkt. In Tabelle 2 sind die horizontalen (x;y) und vertikalen (z) Positionen der Thermoelemente im Opferbeton und in der Stahlplatte aufgeführt, wobei der horizontale Nullpunkt im Zentrum des Fensters und der vertikale Nullpunkt an der Oberfläche des Opferbetons liegt.

Tabelle 2: Positionen der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-1

Thermoelement- Nummer	Horizontale Position		Vertikale Position z [mm]	Medium
	x [mm]	y [mm]		
1	32	32	-10	Opferbeton
2	32	-32	-10	Opferbeton
3	-32	-32	-10	Opferbeton
4	-32	32	-10	Opferbeton
5	0	0	-10	Opferbeton
6	40	0	-25	Stahlplatte
7	0	-40	-25	Stahlplatte
8	-40	0	-25	Stahlplatte
9	0	40	-25	Stahlplatte
10	-10	0	-25	Stahlplatte

Die Thermospannungssignale der Thermoelemente wurden nach Verstärkung (Faktor: 247.3) mit einem Transientenrecorder aufgenommen. Die Daten wurden später auf ein PC-System übertragen und ausgewertet.

Temperatur der Schmelze

Während des Versuchs wurde die Schmelzentemperatur als Funktion der Zeit bestimmt. Gemessen wurde diese mittels W/Re-Thermoelementen, die für gewisse Zeit (ca. 10 s) in die Schmelze eingetaucht wurden, weil sie eine Zeitkonstante aufweisen und erst nach ca. 3 - 5 s die richtige Temperatur anzeigen. Die Position der Temperatursonde war zu diesem Zeitpunkt ca. 30 mm über dem Opferbeton und somit in der Eisenschmelze. Nach dem Eintauchen sind die Thermoelemente in der Regel defekt. Befestigt waren diese W/Re-Thermoelementtauchsonden an einem Hebel, der sich über ein Gelenk hinter einer Schutzmauer manuell betätigen läßt und womit die Thermoelemente in die Schmelze eingetaucht und wieder herausgezogen werden können. Insgesamt sollten 10 Sonden zum Einsatz kommen. Die

Thermospannungen der Thermoelemente wurden auf einen Umschalter weitergeleitet, der auf das aktuelle Thermoelement eingestellt war. Nach Verstärkung mit dem Faktor 247.3 wurden sie auf einem Kanal eines Transientenrecorders aufgezeichnet. Auch diese Daten wurden über das PC-System ausgewertet.

Videoaufzeichnung

Das Experiment wurde mit drei Videokameras dokumentiert. Eine Kamera zeichnete den Versuchsablauf in einer Übersicht von oben auf. Mit dieser hatte man die Möglichkeit den zeitlichen Verlauf des Experimentes zu rekonstruieren. Eine zweite war direkt über dem Reaktionsbehälter positioniert. Diese zeigte die Schmelzenoberfläche in Nahaufnahme. Die dritte Kamera zeichnete den Behälterboden über einen Spiegel auf, der unterhalb des Behälters installiert war, um den Durchbruch der Schmelze beobachten zu können. Zur zeitlichen Synchronisation der verschiedenen Videoaufnahmen wurde bei Zündung des Thermitpulvers ein Blitzlicht ausgelöst, das von allen Kameras aufgenommen wurde.

4.3 Ergebnisse

Versuchsablauf

Bei der Zündung des Thermits wurde gleichzeitig das Blitzlicht als zeitlicher Nullpunkt der Videoaufnahmen ausgelöst. Außerdem startete der Transientenrecorder mit der Aufzeichnung der Thermoelementsignale. Aus den Videoaufnahmen ist folgender Versuchsablauf zu rekonstruieren. Nach ca. 24 s wurde das erste W/Re-Thermoelement in die Schmelze eingetaucht. Das zweite folgte ca. 42 s nach Zündung. Die Verweildauer der beiden Thermoelemente in der Schmelze betrug jeweils etwa 8 s. Das Durchschmelzen der Stahlplatte erfolgte schon ca. 52.5 s nach der Zündung. Der Durchtrittsquerschnitt war zu Beginn sehr klein. Es konnte ein Schmelzestrahle beobachtet werden, der die Stahlplatte dann weiter aufweitete. Die gesamte Austrittsdauer der Schmelze (ca. 100 kg) betrug 6 s. Zu einer Thermit-Zugabe zur Schmelze (zwecks Stabilisierung der Schmelzentemperatur) kam es nicht, weil diese planmäßig erst nach ungefähr 70 s erfolgen sollte.

Erosionsverhalten

Die Schmelzendetektion mit den fünf NiCr-Ni-Thermoelementen im Glasbeton funktionierte sehr gut. Man erkennt bei allen Temperaturaufzeichnungen zuerst einen Anstieg auf ungefähr 100 °C, eine gewisse Haltezeit auf dieser Temperatur und danach einen steilen Anstieg der Temperatur. Der Haltepunkt auf 100 °C ist damit zu erklären, daß das Restwasser in dieser Zeit aus dem Beton verdampft. Die Haltezeit bei 100 °C liegt bei allen fünf Meßstellen im Beton zwischen 3 und 6 s. Der anschließende sehr steile Anstieg signalisiert die ankommende Schmelze. Dieser Zeitpunkt entspricht dem Passieren der Erosionsfront an dieser Stelle. Tabelle 3 zeigt diese Detektionszeitpunkte für alle Meßstellen. Der Mittelwert aus den detektierten Zeiten im Opferbeton beträgt 31.2 s. Es ist dies die Zeit, die die Schmelze durchschnittlich brauchte um 10 mm des Glasbetons zu erodieren. Darin ist allerdings die Reaktionszeit des Thermiten enthalten. Da das Thermitpulver an der Oberfläche gezündet wurde, brauchte es einige Zeit bis die chemische Reaktion abgeschlossen war und die Erosion des Betons begann. Deshalb kann man daraus auch keine exakte Erosionsrate bilden. Nimmt man allerdings eine Reaktionszeit des Thermiten von ca. 10 s (Erfahrungswert) an, so ergibt sich eine Erosionszeit von 21.2 s und eine Erosionsrate von 0.47 mm/s. Von den fünf Thermoelementen, die in der Stahlplatte positioniert waren, detektierten drei die Schmelze, die beiden anderen hatten keinen Schmelzenkontakt. Diese Beobachtungen sind in Abb. 4 graphisch dargestellt.

Tabelle 3: Detektionszeitpunkte der Schmelze im Opferbeton und Stahlplatte von KAPOOL-1

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
1	35.5
2	34.4
3	26.9
4	28.3
5	31.0
6	kein Schmelzenkontakt
7	kein Schmelzenkontakt
8	54.2
9	52.1
10	53.8

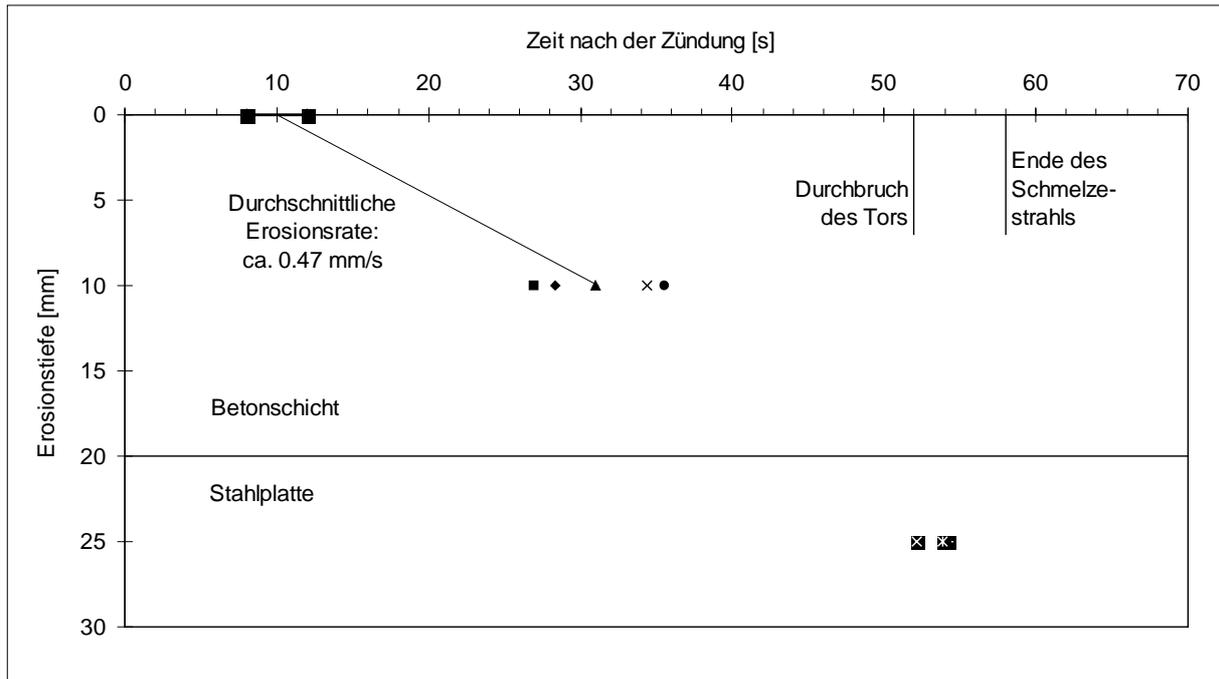


Abb. 4: Detektionszeitpunkte der Schmelze im Opferbeton und in der Stahlplatte von KAPOOL-1

Schmelzentemperatur

Wegen der kurzen Verweilzeit der Schmelze im Versuchsbehälter waren nur zwei Temperaturmessungen der Schmelze möglich. Die Thermospannungssignale erreichen schon ca. 2 s nach Eintauchen in die Schmelze asymptotische Werte. Diese werden (nach Berücksichtigung des Verstärkungsfaktors) gemäß einer Eich-tabelle in eine Temperatur gewandelt. Tabelle 4 und Abb. 5 zeigen die Schmelzentemperatur über der Zeit nach der Zündung. Durch die zwei Punkte kann natürlich keine Abkühlkurve gelegt werden, trotzdem sind die Werte für den Vergleich mit weiteren Experimenten von Nutzen. Die Temperatur der Schmelze beim Austritt aus dem Versuchsbehälter (52.5 s) lag demnach bei ca. 1910 °C (extrapoliert).

Tabelle 4: Schmelzentemperatur der Eisenphase von KAPOOL-1

Zeitpunkt nach Zündung [s]	Schmelzentemperatur der Eisenphase [°C]
25.9	2090
44.2	1965

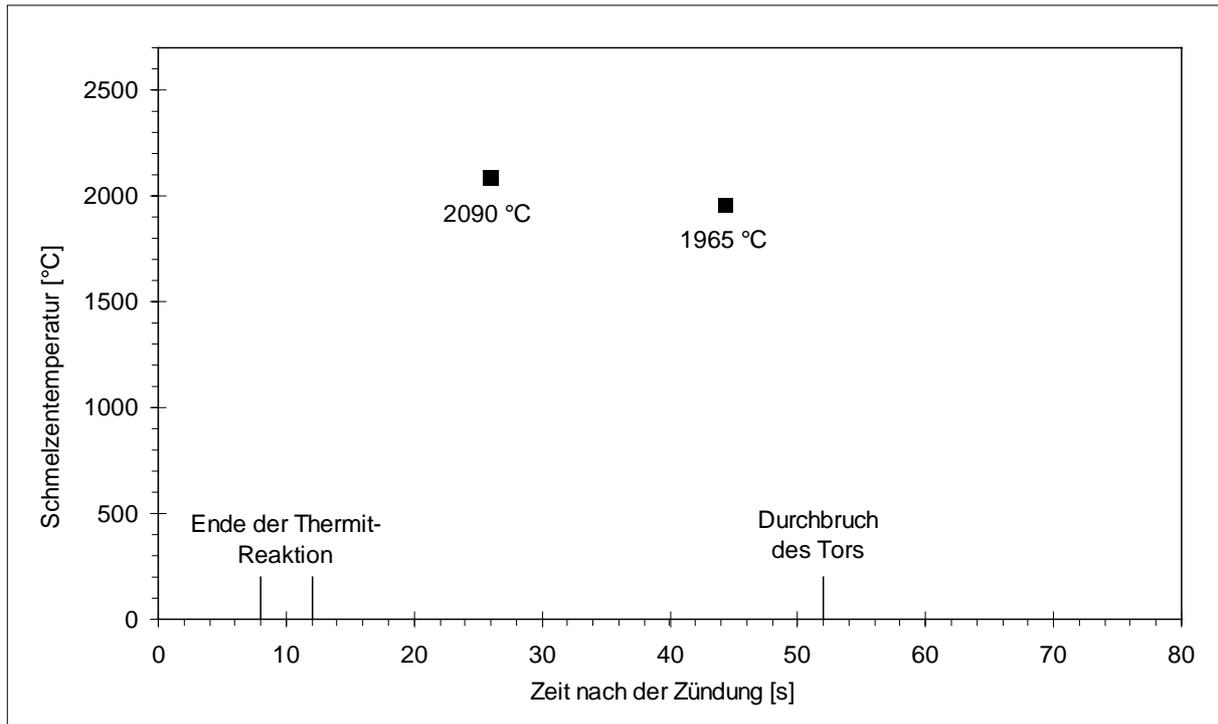


Abb. 5: Schmelztemperatur der Eisenphase von KAPOOL-1

Nachuntersuchungen

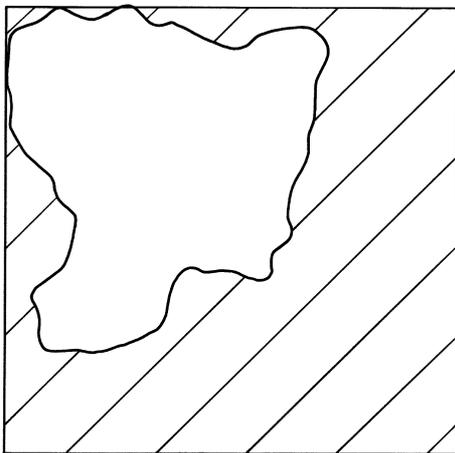


Abb. 6: Öffnungsquerschnitt der Stahlplatte in KAPOOL-1

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter ergaben, daß der Opferbeton über die gesamte Fläche vollständig erodiert war. Die Stahlplatte hingegen war nicht über die gesamte Fläche des Fensters aufgeschmolzen. Diese zeigt die in Abb. 6 skizzierte Austrittsöffnung. Die Öffnungsfläche betrug ca. 84 cm^2 , das entspricht 37 % der Fensterfläche ($150 \times 150 \text{ mm}^2$). Zur Austrittsöffnung hin war die Stahlplatte schräg angeschmolzen. Der übrige Teil der Stahlplatte war nur leicht bis gar nicht angeschmolzen. Der Behälterboden (Stahlplatte und Cordieritboden) war gleichmäßig mit einer ca. 3 mm dicken Oxidschicht bedeckt,

die aber mit der Stahlplatte keine feste Verbindung bildete (Abb. A-3 und A-4).

Zusammenfassung

Der Versuch KAPOOL-1 war so ausgelegt, daß nur wenig Opferbeton aufgeschmolzen werden mußte. Das wurde dadurch erreicht, daß sich die Fensterfläche ($150 \times 150 \text{ mm}^2$) nur über einen Teil der Behältergrundfläche ($360 \times 360 \text{ mm}^2$) erstreckte. Die Versuchszeit bis zum Durchschmelzen des Stahltors war deshalb sehr kurz. Der Versuch war ein Erfolg, da alle Messungen gute Ergebnisse lieferten und diese weiter verwertet werden konnten. Die Schmelzendetektion mit den NiCr-Ni-Thermoelementen erwies sich als sehr gut und exakt. Die Temperaturmessung mittels W/Re-Thermoelementen, die nacheinander in die Schmelze eingetaucht wurden, war ebenfalls erfolgreich und lieferte genaue Temperaturwerte der Eisenschmelze. Die Videoaufzeichnung war gut und dokumentierte den zeitlichen Versuchsablauf. Das Experiment hat auch gezeigt, daß man zukünftig mit mehr Opferbeton arbeiten kann, da der Wärmehalt und die Temperatur der Schmelze am Ende des Versuchs noch sehr hoch waren.

5 Experiment KAPOOL-2

5.1 Versuchsaufbau

Die entscheidendste Änderung des Versuchsbehälters gegenüber KAPOOL-1 war die Größe der Opferbetonschicht. Sie füllte jetzt die gesamte Behältergrundfläche aus, d. h. sie war $400 \times 400 \text{ mm}^2$ groß (Abb. 7).

Die Dicke betrug 50 mm. Der Grund für diese Änderung war, daß bei KAPOOL-1 die Betonschicht sehr schnell erodiert worden ist und die Schmelze noch so heiß war, daß sie viel mehr Beton hätte aufschmelzen können. Auch die Dicke des Stahltors wurde auf 20 mm vergrößert. Als thermischer Schutz der Seitenwände dienten zwei Cordierit-Platten. Es kamen in diesem Experiment wieder 100 kg Thermit der Sorte R70SSH zur Verwendung. Um den Temperaturabfall der Schmelze zu verlangsamen, sollten Päckchen mit Thermitpulver (2 kg) im Abstand von 30 s zur Schmelze zugegeben werden. Gezündet wurde das Thermitpulver an der Oberfläche.

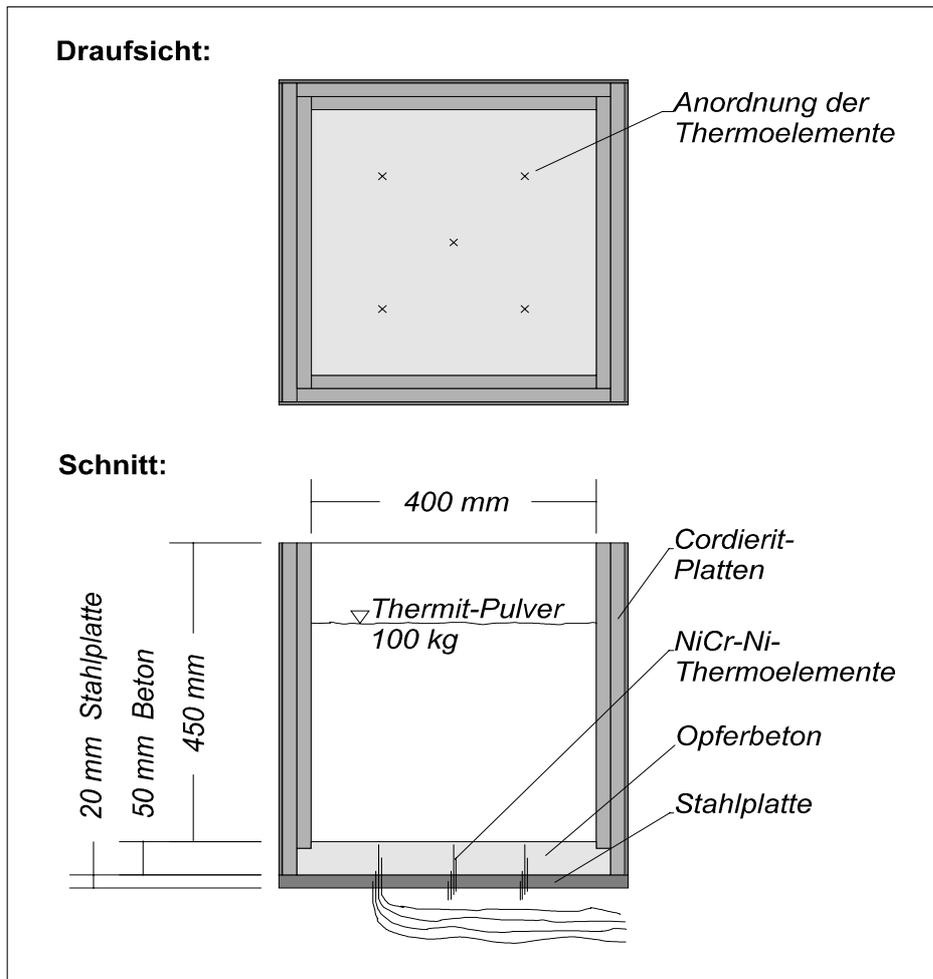


Abb. 7: Versuchsbehälter von KAPOOL-2

5.2 Instrumentierung

Erosionsfront

Bei KAPOOL-2 wurden an drei vertikalen Positionen im Opferbeton jeweils fünf NiCr-Ni-Thermoelemente positioniert (Abb. 8). In der Stahlplatte waren fünf Thermoelemente 10 mm unterhalb der Oberfläche

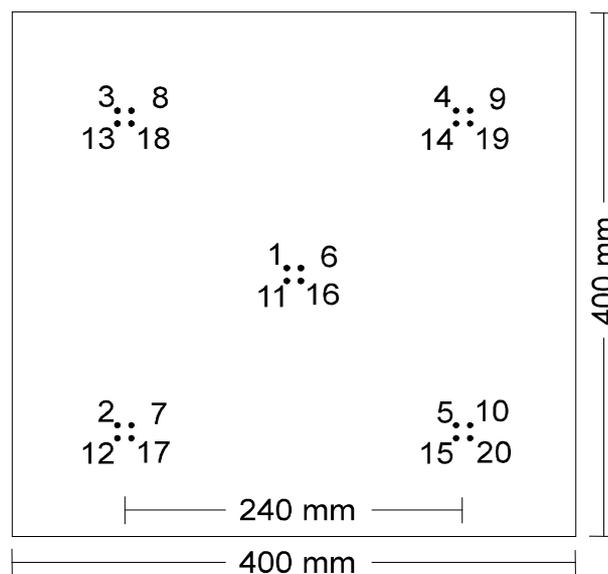


Abb. 8: Horizontale Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-2

verteilt. Mit dieser Anordnung lassen sich sowohl die Erosionsgeschwindigkeiten als auch die Gleichmäßigkeit der Erosionsfront bestimmen. In Tabelle 5 sind alle horizontalen (x;y) und vertikalen (z) Positionen der Thermoelemente aufgeführt, wobei der horizontale Nullpunkt im Zentrum der Grundfläche liegt und der vertikale Nullpunkt an der Oberfläche des Opferbetons.

Tabelle 5: Positionen der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-2

Thermoelement- Nummer	Horizontale Position		Vertikale Position z [mm]	Medium
	x [mm]	y [mm]		
1	0	0	-60	Stahlplatte
2	-120	-120	-60	Stahlplatte
3	-120	120	-60	Stahlplatte
4	120	120	-60	Stahlplatte
5	120	-120	-60	Stahlplatte
6	0	0	-45	Opferbeton
7	-120	-120	-45	Opferbeton
8	-120	120	-45	Opferbeton
9	120	120	-45	Opferbeton
10	120	-120	-45	Opferbeton
11	0	0	-25	Opferbeton
12	-120	-120	-25	Opferbeton
13	-120	120	-25	Opferbeton
14	120	120	-25	Opferbeton
15	120	-120	-25	Opferbeton
16	0	0	-5	Opferbeton
17	-120	-120	-5	Opferbeton
18	-120	120	-5	Opferbeton
19	120	120	-5	Opferbeton
20	120	-120	-5	Opferbeton

Die Thermospannungssignale der Thermoelemente wurden mit einem Verstärkungsfaktor von 100 beaufschlagt und mit einem Transientenrecorder aufgenommen. Diese Daten wurden später auf ein PC-System übertragen und ausgewertet.

Temperatur der Schmelze

Wie bei KAPOOL-1 wurde auch hier die Temperatur der Eisenschmelze mittels W/Re-Thermoelementen, die über ca. 10 s in die Schmelze eingetaucht wurden, gemessen. Die Position der Thermoelemente nach Eintauchen war ca. 30 mm oberhalb des Opferbetons und somit in der Eisenschmelze. Das Eintauchen der W/Re-Thermoelementtauchsonden erfolgte mit einem Hebel, der sich über ein Gelenk hinter einer Schutzmauer manuell betätigen ließ. Insgesamt sollten 10 Sonden zum Einsatz kommen. Die Thermospannungen der Thermoelemente wurden auf einen Umschalter weitergeleitet, der auf das aktuelle Thermoelement eingestellt war, mit einem Verstärkungsfaktor von 100 beaufschlagt und von einem Kanal eines Transientenrecorders aufgezeichnet. Auch diese Daten wurden über das PC-System ausgewertet.

Videoaufzeichnung

Das Experiment wurde mit drei Videokameras dokumentiert. Eine Kamera zeichnete den Versuchsablauf in einer Übersicht von oben auf. Mit dieser hatte man die Möglichkeit den zeitlichen Verlauf des Experimentes zu rekonstruieren. Eine zweite war direkt über dem Reaktionsbehälter positioniert. Diese filmte die Schmelzenoberfläche in Nahaufnahme. Die dritte Kamera zeichnete den Behälterboden über einen Spiegel auf, der unterhalb dem Behälter installiert war, um den Durchbruch der Schmelze beobachten zu können. Zur zeitlichen Synchronisation der Videobilder wurde bei Zündung des Thermit ein Blitzlicht ausgelöst, das alle Kameras aufnahmen.

5.3 Ergebnisse

Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs KAPOOL-2 wurde zeitgleich das Thermit gezündet, der Transientenrecorder gestartet und das Blitzlicht ausgelöst (Tabelle 6). Nach ca. 10 s begann die Schmelze kräftig zu brodeln. Die Thermitreaktion war zu diesem Zeitpunkt wahrscheinlich abgeschlossen und die Betonerosion setzte ein. Die heftige Rührbewegung im Schmelzebad beruhigte sich nach weiteren 20 s. Das erste W/Re-Thermoelement zur Temperatur-

bestimmung der Eisenschmelze wurde zum Zeitpunkt von 37 s nach der Zündung in die Schmelze eingetaucht. Der erste Beutel mit 2 kg Thermit wurde 78 s nach Zündung manuell über ein Hebelsystem in die Schmelze befördert. Im weiteren Versuchsablauf wechselten sich die Temperaturmessung und Thermitzugabe ab. Zum Zeitpunkt 159 s nach Zündung fand eine Verpuffung in der Schmelze statt. Dabei wurde eine geringe Menge Schmelze (ca. 1 kg) aus dem Versuchsbehälter ausgeworfen. Zu erklären ist dieses Phänomen damit, daß das verdampfte Restwasser aus der Betonschicht teilweise auch nach unten, d. h. tiefer in die Betonschicht, getrieben wurde. Da sich aber unterhalb der Betonschicht die Stahlplatte befand, konnte das Wasser nicht weiter entweichen und sammelte sich auf ihr. Zum Zeitpunkt als die Betonschicht vollständig aufgeschmolzen war, traf die immer noch sehr heiße Schmelze (1640 °C) auf das Wasser und verdampfte dieses sehr schnell. Der Dampf suchte sich den Weg durch die Schmelze nach oben und riß ein wenig Schmelze mit sich. Zu diesem Zeitpunkt versagte die Temperaturmessung der Schmelze. Es wurden zwar noch alle zur Verfügung stehenden W/Re-Thermoelemente eingetaucht, aber im Transientenrecorder nichts mehr aufgezeichnet. Die Thermitzufuhr wurde fortgesetzt und die Stahlplatte begann allmählich hellrot zu glühen, wurde aber nicht durchgeschmolzen .

Tabelle 6: Zeitlicher Versuchsablauf von KAPOOL-2

Zeit nach Zündung	Ereignis
0 s	Zündung / Start Transientenrecorder / Blitzlicht
10 s - 30 s	Heftige Reaktion
37 s	1. W/Re-Thermoelement eingetaucht
55 s	2. W/Re-Thermoelement eingetaucht
67 s	3. W/Re-Thermoelement eingetaucht
78 s	1. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
93 s	4. W/Re-Thermoelement eingetaucht
105 s	2. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
124 s	5. W/Re-Thermoelement eingetaucht
136 s	3. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
154 s	6. W/Re-Thermoelement eingetaucht
159 s	Verpuffung
176 s	6. W/Re-Thermoelement herausgezogen
196 s	4. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
205 s	7. W/Re-Thermoelement eingetaucht
218 s	5. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
235 s	8. W/Re-Thermoelement eingetaucht

Zeit nach Zündung	Ereignis
249 s	6. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
260 s	7. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
270 s	8. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
282 s	9. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
289 s	9. W/Re-Thermoelement eingetaucht
306 s	10. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
316 s	11. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
328 s	12. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
337 s	10. W/Re-Thermoelement eingetaucht
353 s	13. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
362 s	14. Thermitbeutel (2kg) zugegeben
371 s	15. Thermitbeutel (2kg) zugegeben

Die in die Stahlplatte eingelassenen NiCr-Ni-Thermoelemente zeigten ca. 8 bis 11 Minuten nach Zündung ihre Maximalwerte, die zwischen ca. 1100 °C und 1200 °C lagen. Diese Temperaturen reichten nicht, um die Stahlplatte aufzuschmelzen.

Erosionsverhalten

Die Schmelzendetektion mittels der NiCr-Ni-Thermoelemente (an drei Höhen im Beton und einer Höhe in der Stahlplatte) funktionierte sehr gut. An den Temperatursignalen der Meßstellen im Beton ist ein Haltepunkt bei 100 °C erkennbar, der auf das verdampfende Wasser hindeutet und die Annahme über die vorher beschriebene Verpuffung bestätigt. Der Versagenspunkt der Thermoelemente (nach dem steilen Temperaturanstieg) wird wieder als Detektionszeitpunkt der Schmelze definiert (Tabelle 7).

Tabelle 7: Detektionszeitpunkte der Schmelze im Opferbeton und Stahlplatte von KAPOOL-2

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
1	kein Schmelzenkontakt
2	kein Schmelzenkontakt
3	kein Schmelzenkontakt
4	kein Schmelzenkontakt
5	kein Schmelzenkontakt
6	156.2
7	150.6

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
8	157.2
9	157.3
10	157.5
11	56.0
12	66.2
13	64.9
14	74.0
15	75.7
16	15.1
17	17.3
18	15.4
19	21.1
20	20.8

Wie man aus den Ergebnissen sieht, ist das vertikale Fortschreiten der Erosionsfront über die gesamte Grundfläche sehr gleichmäßig (Abb. 9). Bildet man eine mittlere Zeit der Meßpunkte einer Ebene (Tabelle 8), so ergibt sich ein gemittelter Erosionsfortschritt über der Zeit (Abb. 9). Daraus lassen sich jetzt die Erosionsraten zwischen zwei Ebenen berechnen. So liegt die Erosionsrate im ersten Abschnitt (5 mm bis 25 mm) bei 0.40 mm/s und im zweiten Abschnitt (25 mm bis 45 mm) bei 0.23 mm/s. Wie schon erwähnt, wurde die Stahlplatte nicht aufgeschmolzen, und somit versagten die in der Stahlplatte liegenden Thermoelemente nicht. Diese gaben aber Aufschluß über die Temperatur in der Stahlplatte.

Tabelle 8: Gemittelte Detektionszeitpunkte im Opferbeton von KAPOOL-2

Gemittelter Detektionszeitpunkt [s]	Erosionstiefe [mm]
17.9	5
67.4	25
155.8	45

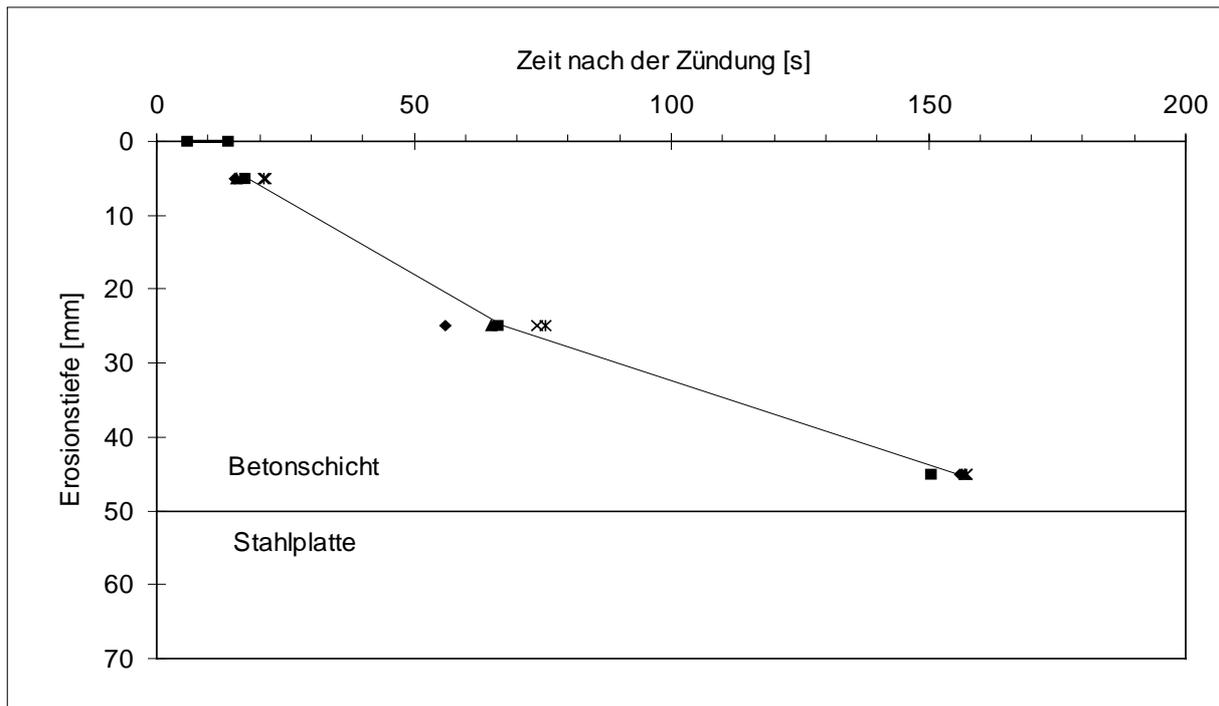


Abb. 9: Erosion des Opferbetons in KAPOOL-2

Schmelzentemperatur

Von den 10 Temperaturmessungen wurden nur die ersten sechs aufgezeichnet (Tabelle 9). Nach der Verpuffung fiel die Messung durch einen Defekt in den Zuleitungen aus. Dennoch ist die gesamte Erosionszeit des Betons abgedeckt, weil diese nach ca. 160 s zu Ende war. Abb. 10 zeigt den Temperaturverlauf der Schmelze.

Tabelle 9: Schmelzentemperatur der Eisenphase von KAPOOL-2

Zeit nach Zündung [s]	Schmelzentemperatur [°C]
38.5	2070
57.3	1949
70.5	1884
98.4	1802
131.7	1708
159	1638

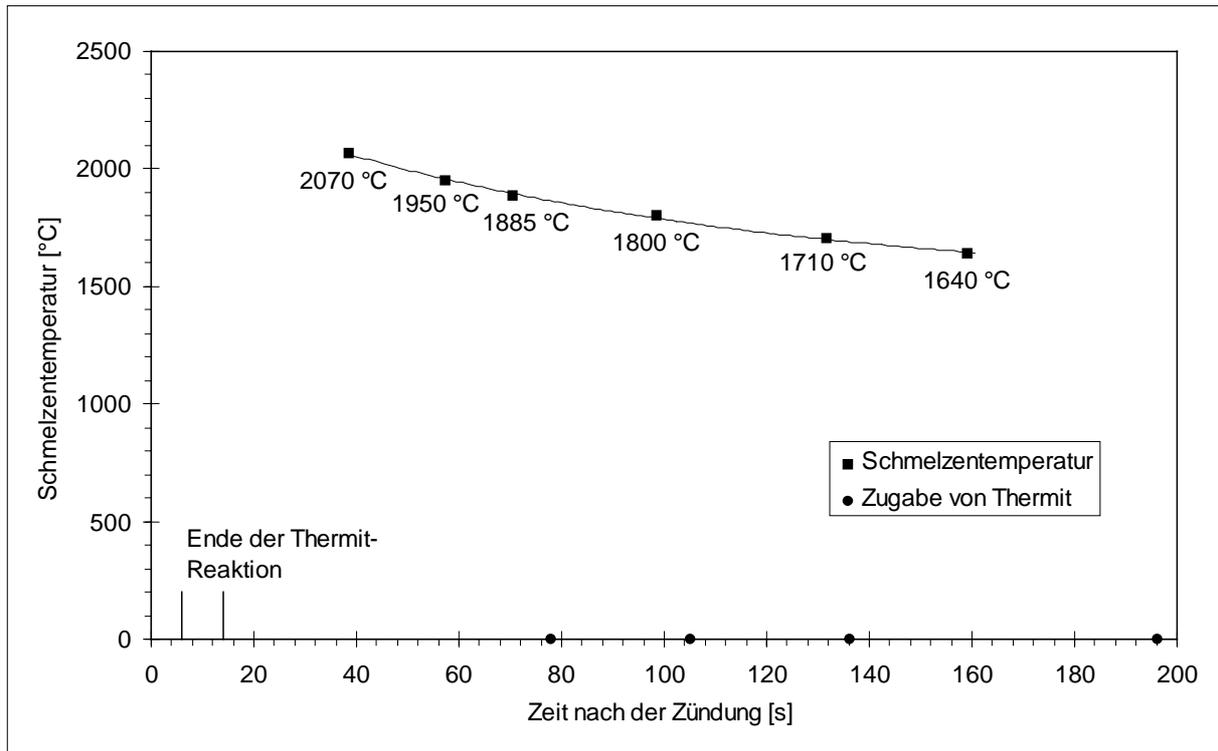


Abb. 10: Schmelzentemperatur der Eisenphase von KAPOOL-2

Nachuntersuchungen

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter ergaben, daß der Opferbeton komplett erodiert war, und daß der Eisenregulus nur an wenigen Stellen punktwise mit der Stahlplatte verschweißt war (Abb. A-5). Demzufolge lag die Kontakttemperatur von Eisenschmelze und Stahlplatte nur leicht über der Schmelztemperatur von Stahl und dies nur an den verschweißten Stellen. Der Eisenregulus hatte eine Dicke zwischen 4.5 und 5 cm. Darüber lag der Oxidblock, vom Eisen leicht abzutrennen, mit einer Höhe von ca. 17 cm (Abb. A-6).

Zusammenfassung

Die Menge an Opferbeton ($400 \times 400 \times 50 \text{ mm}^3$) in KAPOOL-2 war zu hoch. Die Schmelze verlor während der Betonerosion zu viel Wärme und konnte deswegen die Stahlplatte nicht mehr aufschmelzen, obwohl Thermitpulver während des Versuchs zugesetzt wurde. Dennoch war der Versuch erfolgreich und lieferte viele Informationen hinsichtlich der Betonerosion. Die Meßsignale für die Schmelzentemperatur und die Schmelzendetektion hatten gute

Qualität und konnten weiter ausgewertet werden. Die drei Videoaufzeichnung dokumentierten den Versuch sehr gut.

6 Experiment KAPOOL-3

6.1 Versuchsaufbau

Im Versuchsbehälter (Abb. 11) war im Gegensatz zum vorhergehenden Experiment nicht die gesamte Grundfläche mit Opferbeton ausgegossen, sondern nur ein Fenster (200 x 200 mm²), ähnlich wie bei KAPOOL-1.

Die Dicke des Opferbetons betrug 40 mm. Die Fläche und die Höhe waren demnach etwas größer bemessen als bei KAPOOL-1 und wurden so gewählt, daß auch ein Aufschmelzen der Stahlplatte zu erwarten war. Entsprechend wurde auch die Dicke des Stahltors auf 15 mm reduziert. Der Behälter war durch doppelt verlegte Cordierit-Platten (je 20 mm dick) thermisch geschützt. In diesem Experiment standen anfänglich 100 kg Thermit der Sorte 10AlSSH zur Verfügung. Während des Versuchs sollten Päckchen mit je 3 kg Thermit im 30 Sekunden-Takt zur Schmelze zugegeben werden, um die Schmelze „nachzubeheizen“. Gezündet wurde das Thermitpulver an der Oberfläche. Unter dem Behälter befand sich eine Ausbreitungswanne. Nach Durchschmelzen des Tors im Versuchsbehälter sollte sich die Schmelze über eine Schräge in dieser Wanne ausbreiten (Abb. 12 und Abb. A-7).

Als Substrat für die Ausbreitungsfläche (1500 mm x 410 mm) kam der gleiche Opferbeton wie im Versuchsbehälter zum Einsatz. Diese Betonschicht (3 cm dick) war auf Normalbeton aufgetragen, die seitliche Begrenzung der Ausbreitungsfläche bestand aus Cordierit-Platten. Ein weiteres Versuchsziel war der Test eines Triggermechanismus, der im Realfall die Wasserflutung auslösen soll. Das Prinzip dieser Vorrichtung ist sehr einfach. Beim Ausbreiten der Kernschmelze auf der Fläche sollen gespannte Stahlseile thermisch durchtrennt werden, die dann Ventile öffnen und Wasser freigeben. Im Versuch waren zwei Stahlseile (Durchmesser 5 mm) mit Gewichten gespannt, das eine vertikal und das andere horizontal, 2,5 cm über dem Boden. Videokameras beobachteten die Gewichte, um den exakten Zeitpunkt der Durchtrennung festzustellen. Nach beendeter Ausbreitung sollte die Schmelzenoberfläche

über einen Wasserzulauf (Abb.A-8) am Ende des Kanals geflutet werden (Flutrate 100 ml/s). Das Fluten wurde aber nicht durch die Stahlseile getriggert, sondern von Hand eingeleitet.

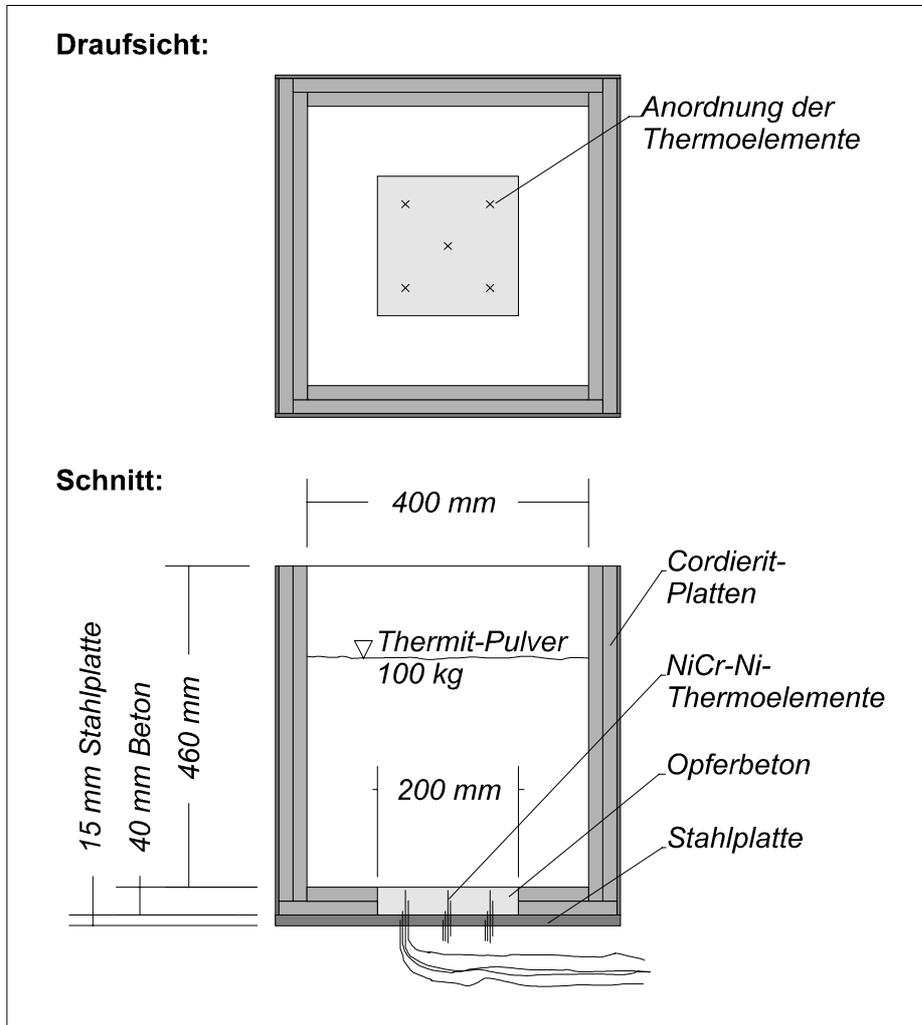


Abb. 11: Versuchsbehälter von KAPOOL-3

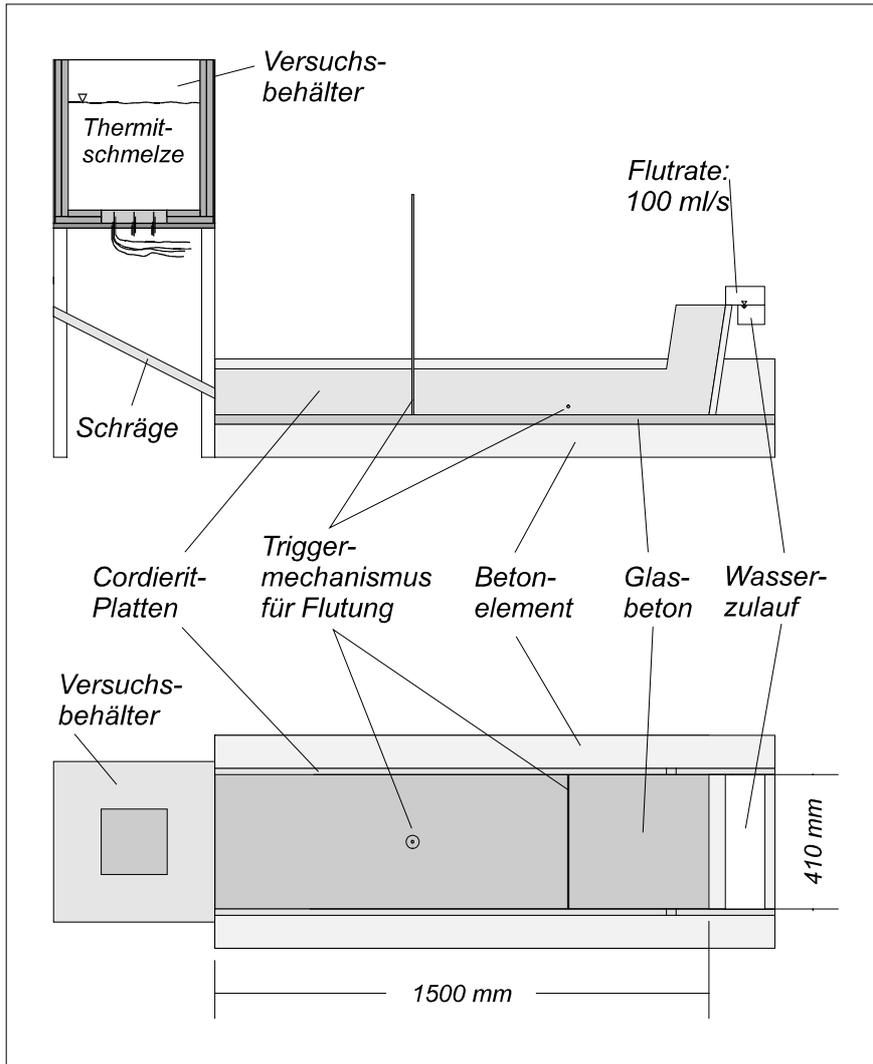


Abb. 12: Versuchsaufbau mit Ausbreitungswanne von KAPOOL-3

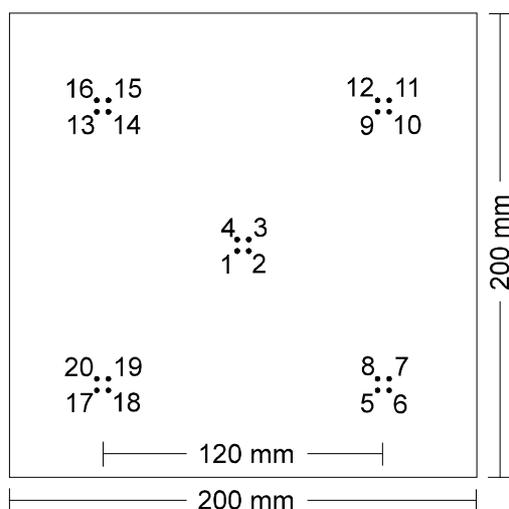


Abb. 13: Horizontale Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-3

6.2 Instrumentierung

Erosionsfront

Bei KAPOOL-3 waren die NiCr-Ni-Thermoelemente zur Schmelzendetektion in ähnlicher Weise wie bei KAPOOL-2 positioniert, drei Meßebenen im Opferbeton und eine in der Stahlplatte. In jeder Ebene waren jeweils fünf Thermoelemente untergebracht (Abb. 13). Auch bei dem

Versuch sollten mit dieser Anordnung der Thermoelemente sowohl die Erosionsgeschwindigkeiten als auch die Gleichmäßigkeit des Erosionsfront bestimmt werden. In Tabelle 10 sind alle horizontalen (x;y) und vertikalen (z) Positionen der Thermoelemente aufgeführt, wobei der horizontale Nullpunkt im Zentrum der Grundfläche und der vertikale Nullpunkt an der Oberfläche des Opferbetons liegt.

Tabelle 10: Positionen der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-3

Thermoelement- Nummer	Horizontale Position		Vertikale Position z [mm]	Medium
	x [mm]	y [mm]		
4	0	0	-5	Opferbeton
8	60	-60	-5	Opferbeton
12	60	60	-5	Opferbeton
16	-60	60	-5	Opferbeton
20	-60	-60	-5	Opferbeton
3	0	0	-20	Opferbeton
7	60	-60	-20	Opferbeton
11	60	60	-20	Opferbeton
15	-60	60	-20	Opferbeton
19	-60	-60	-20	Opferbeton
2	0	0	-35	Opferbeton
6	60	-60	-35	Opferbeton
10	60	60	-35	Opferbeton
14	-60	60	-35	Opferbeton
18	-60	-60	-35	Opferbeton
1	0	0	-47.5	Stahlplatte
5	60	-60	-47.5	Stahlplatte
9	60	60	-47.5	Stahlplatte
13	-60	60	-47.5	Stahlplatte
17	-60	-60	-47.5	Stahlplatte

Die Thermospannungssignale der Thermoelemente wurden mit einem konstanten Verstärkungsfaktor von 100 beaufschlagt und mit einem Transientenrecorder aufgenommen. Diese Daten wurden später auf ein PC-System übertragen und weiter ausgewertet.

Temperatur der Schmelze

Wie bei den beiden vorhergehenden Experimenten standen auch bei KAPOOL-3 insgesamt 10 W/Re-Thermoelemente zur Verfügung. Die Installation der manuell zu bedienenden Hebeln und ihre Bedienung waren im Vergleich zu den früheren Experimenten identisch. Um die Temperatur der Eisenschmelze zu messen, waren die Thermoelementsonden wieder so eingestellt, daß sie sich bei der Messung ca. 30 mm oberhalb des Opferbetons befanden. Die 10 Ausgleichsleitungen der einzelnen Thermoelemente endeten auch bei KAPOOL-3 an einem Umschalter, der manuell auf das gerade messende Thermoelement eingestellt wurde. Vom Umschalter ging eine Leitung zum Transientenrecorder, der das Signal zuerst um den Faktor 100 verstärkte und dann aufzeichnete.

Videoaufzeichnung

Das Experiment wurde mittels drei Videokameras dokumentiert. Eine Kamera diente zur Übersicht über den Versuchsablauf und blickte von schräg oben auf den gesamten Versuchsaufbau. Mit der zweiten wurde der Versuchsbehälter und die Ausbreitungsfläche im Detail aufgenommen. Die dritte zeichnete den Behälterboden über einen Spiegel auf, um den Schmelzeaustritt aus dem Behälter beobachten zu können. Ein Blitzlicht sorgte für die Synchronisation der Videobilder und des Transientenrecorders.

6.3 Ergebnisse

Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs KAPOOL-3 wurde zeitgleich das Thermit gezündet, der Transientenrecorder gestartet und das Blitzlicht ausgelöst (Tabelle 11). Das erste W/Re-Thermoelement

zur Temperaturbestimmung der Eisenschmelze wurde zum Zeitpunkt von 20 s nach der Zündung in die Schmelze eingetaucht. Der erste Beutel mit 3 kg Thermit wurde sofort nach der Temperaturmessung über ein mechanisches Hebelsystem in die Schmelze befördert (32 s). Dies ging dann im Wechsel so weiter bis das Stahltor zum Zeitpunkt von 72.8 s nach Zündung thermisch versagte und der Schmelzeaustritt begann.

Tabelle 11: Zeitlicher Versuchsablauf von KAPOOL-3

Zeit nach Zündung	Ereignis
0 s	Zündung / Start Transientenrecorder / Blitzlicht
20 s	1. W/Re-Thermoelement eingetaucht
32 s	1. Thermitbeutel (3 kg) zugegeben
40 s	2. W/Re-Thermoelement eingetaucht
52 s	2. Thermitbeutel (3 kg) zugegeben
60 s	3. W/Re-Thermoelement eingetaucht
70 s	3. Thermitbeutel (3 kg) zugegeben
72.8 s	Schmelzeaustritt beginnt
73.9 s	Bruch des vertikalen Stahlseils
75.7 s	Bruch des horizontalen Stahlseils
95 s	Schmelzeaustritt beendet
100 s	Wasserflutung beginnt

Das erste Stahlseil (vertikal) brach zum Zeitpunkt 73.9 s, d.h. 1.1 s nach Beginn des Schmelzeaustritts. Rechnet man die Zeit ab, die die Schmelze bis zum Ort des Stahlseils benötigte (kann nur näherungsweise geschätzt werden), so ergibt sich eine Aufschmelzzeit des Seils von < 1 s. Auch das horizontale Seil brach unmittelbar nach dem Schmelzenkontakt. Zum Zeitpunkt 95 s war der Schmelzeaustritt aus dem Behälter beendet. Dies ergibt eine gesamte Ausflußzeit von 23 s, was im Vergleich zu KAPOOL-1 (6 s) sehr lang war. Die Wasserflutung wurde 5 s nach Ende des Schmelzeaustritts eingeschaltet. Der Wasserzutritt erfolgte vom Kanalende her mit einem Volumenstrom von 100 ml/s. Der Wasserfilm wanderte langsam in den Kanal hinein und kühlte die Schmelzenoberfläche, wodurch sich sehr schnell eine Kruste bildete. Das Wasser konnte aber nur bis zu einer Länge von 70 cm in den Kanal vordringen. Dort hatte die Schmelze einen kleinen Wall gebildet, der vom Wasser

nicht zu überwinden war. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Wasserschicht im überdeckten Bereich eine Höhe von wenigen Zentimetern. Das Wasser verdampfte langsam, floß aber schon durch Spalte in den Seitenrändern nach außen weg. Aus diesem Grund wurde die Wasserzufuhr dann abgeschaltet.

Erosionsverhalten

Die Schmelzendetektion mit Hilfe der NiCr-Ni-Thermoelemente funktionierte sehr gut. Wie bei den vorherigen Experimenten ist an den meisten Meßstellen im Opferbeton ein Haltepunkt der Temperatur bei 100 °C zu erkennen, der auf verdampfendes Wasser hindeutet. Die Detektionszeitpunkte der Schmelze an den einzelnen Meßstellen sind in Tabelle 12 zusammengefaßt.

Tabelle 12: Detektionszeitpunkte im Opferbeton und Stahlplatte von KAPOOL-3

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
4	18
8	17.2
12	16.6
16	19.3
20	19.2
3	45.8
7	42.1
11	46.0
15	49.9
19	53.7
2	87.9
6	82.4
10	kein exakter Zeitpunkt
14	kein Schmelzenkontakt
18	kein Schmelzenkontakt
1	kein Schmelzenkontakt
5	kein Schmelzenkontakt
9	kein Schmelzenkontakt

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
13	kein Schmelzenkontakt
17	kein Schmelzenkontakt

Zu Beginn der Erosion (erste Meßebene; $z=-5$ mm) liegen die Detektionszeitpunkte der verschiedenen Thermoelemente sehr dicht beieinander (Abb. 14).

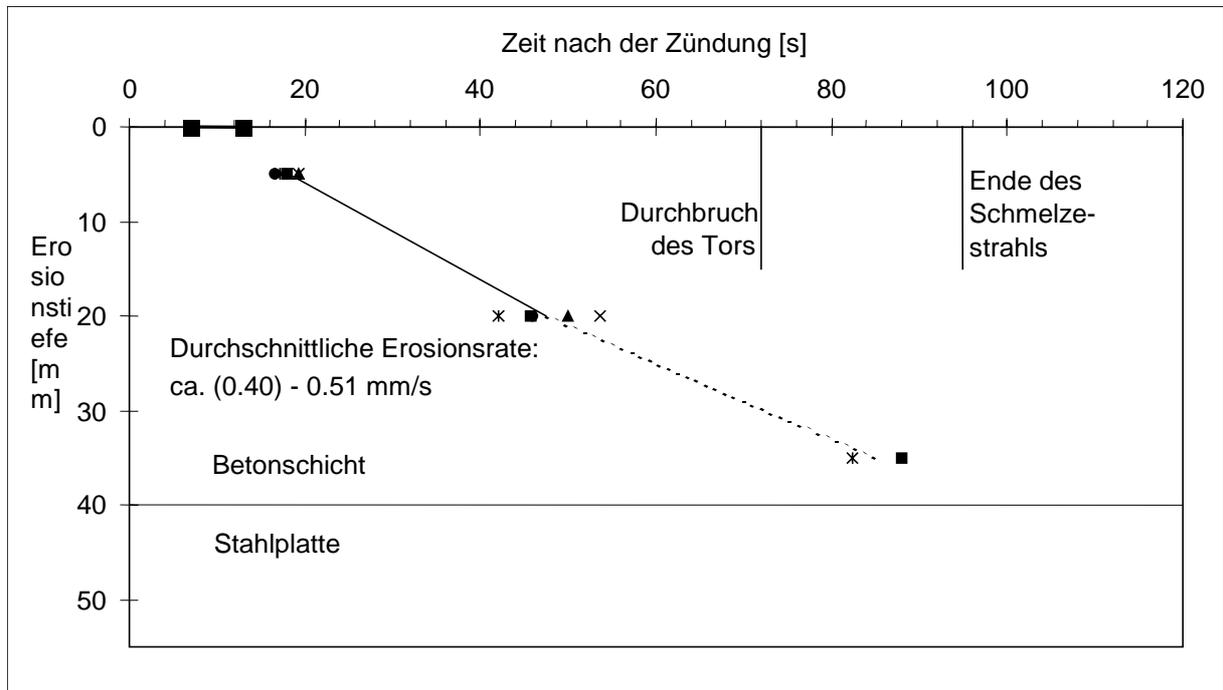


Abb.14: Erosion des Opferbetons in KAPOOL-3

Dies bedeutet eine zunächst sehr gleichmäßige vertikale Erosion. In der zweiten Meßebene ($z=-20$ mm) ist die Streuung zwar schon größer, aber dennoch gering. In der dritten Schicht ($z=-35$ mm) jedoch wird die Schmelze nur von zwei Thermoelementen (TE-Nr. 2 und 6) detektiert, ein weiteres (TE-Nr. 10) war defekt und die beiden anderen (TE-Nr. 14 und 18) wurden nicht zerstört, d. h. sie hatten keinen Schmelzenkontakt. Der Durchbruch des Tores fand schon statt bevor die beiden Thermoelemente (TE-Nr. 2 und 6) die Schmelze detektierten, was bedeutet, daß die vertikale Erosion zum Ende hin sehr inhomogen war und die Erosionstiefe an der Stelle, wo die Schmelze die Stahlplatte durchdrang, sehr viel größer war als an der übrigen Fläche. Während die Schmelze aus dem Behälter auslief, ging die

Betonerosion natürlich weiter, dennoch erreichte die Schmelze die anderen beiden Meßstellen (TE-Nr. 14 und 18) nicht. Demzufolge waren hier beim Durchbruch mindestens 5 mm Restbeton auf der Stahlplatte. Die Thermoelemente in der Stahlplatte waren alle intakt und signalisierten keinen Schmelzenkontakt. Aus den gemittelten Detektionszeitpunkten (Tabelle 13) der ersten beiden Ebenen ($z=-5$ mm; -20 mm) läßt sich eine Erosionsrate von 0.51 mm/s ermitteln. Für den Bereich zwischen der zweiten und dritten Meßebeine ($z=-20$ mm und -35 mm) kann eigentlich keine Erosionsrate errechnet werden, weil von den fünf Meßstellen nur zwei die Schmelze detektierten. Verwendet man dennoch nur diese beiden Werte, so ergibt sich eine Erosionsrate von ungefähr 0.4 mm/s.

Tabelle 13: Gemittelte Detektionszeitpunkte im Opferbeton von KAPOOL-3

Gemittelter Detektionszeitpunkt [s]	Erosionstiefe [mm]
18.1	5
47.5	20
(85.15)	35

Schmelzentemperatur

Während des Versuchs KAPOOL-3 wurde die Temperatur drei Mal gemessen (Tabelle 14). Bei der ersten Messung wurde das W/Re-Thermoelement zu früh zerstört, d. h. noch im Anstieg des Meßsignals. Da die typischen Kurven des Temperaturmeßwerts sich sehr gleichen, kann der asymptotische Wert der Kurve extrapoliert werden. Dieser liegt ca. 100 °C höher als der maximale Meßwert. Die anderen beiden Temperaturmessungen waren exzellent. Extrapoliert man nun diese drei Meßpunkte, so hatte die Schmelze zum Zeitpunkt des Austritts (72 s) eine Temperatur von ca. 2035 °C (Abb. 15).

Tabelle 14: Schmelzentemperatur der Eisenphase von KAPOOL-3

Zeit nach Zündung [s]	Schmelzentemperatur [°C]
22.8	2355 +100
44.2	2160
64	2070

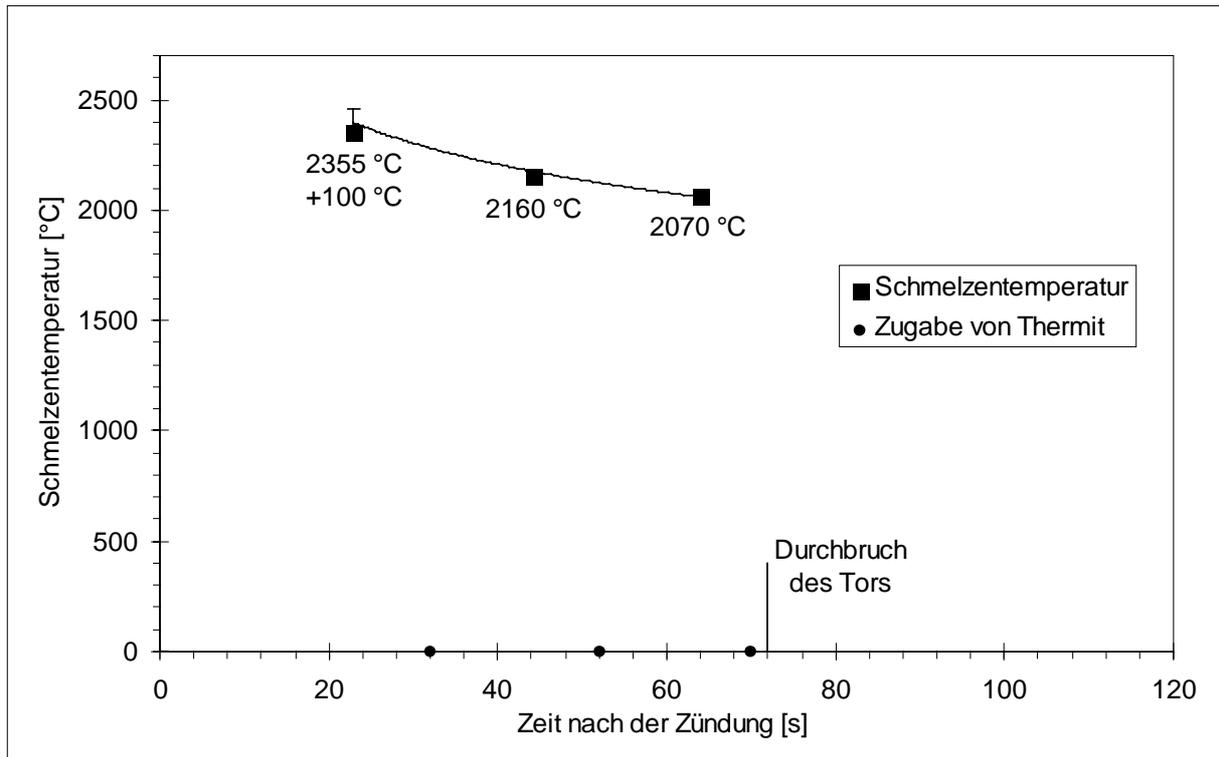


Abb. 15: Schmelztemperatur der Eisenphase von KAPOOL-3

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter

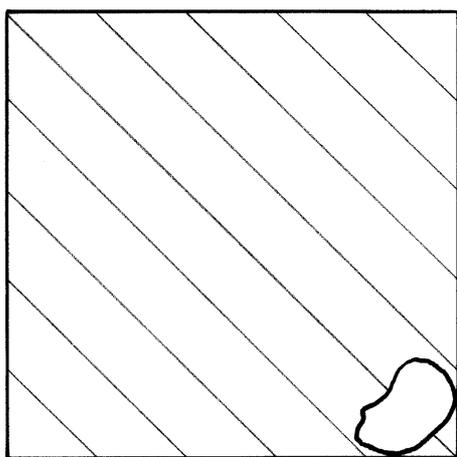


Abb. 16: Öffnungsquerschnitt der Stahlplatte in KAPOOL-3

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter ergaben, daß nur eine sehr kleine Öffnung in der Stahlplatte aufgeschmolzen wurde (Abb. 16, Abb. A-9 und A-10). Die Fläche beträgt ca. 10 cm^2 , d. h. 2.5 % der gesamten Fensterfläche ($200 \times 200 \text{ mm}^2$). Dies erklärt die relativ lange Ausflußzeit der Schmelze (ca. 23 s). Der restliche Teil der Stahlplatte war unversehrt. Auf der Stahlplatte fand sich noch eine Schicht Restbeton. Diese hatte nahe der Öffnung eine Dicke von $\leq 1 \text{ mm}$. Sie wuchs aber gleichmäßig mit der Entfernung von der

Öffnung an. In der gegenüberliegenden Ecke wies die Restbetonschicht noch eine Dicke von 5 - 7 mm auf. Dies stimmt mit den Ergebnissen der Schmelzendetektion überein. Aus den Videoaufnahmen ist zu erkennen, daß die Stahlplatte ca. 5 s vor Austrittsbeginn anfängt hellrot zu glühen. Der nachfolgende Schmelzenstrahl hatte augenscheinlich von Beginn an immer den gleichen Durchmesser, d. h. die Austrittsöffnung vergrößerte sich nicht, was vermutlich auf die Schutzwirkung des Restbetons zurückzuführen ist.

Schmelzenausbreitung und -kühlung

Wie beschrieben begann der Austritt der Schmelze ca. 72 s nach der Zündung und dauerte ca. 23 s an. Kurze Zeit später setzte die Wasserflutung (100 ml/s) vom Kanalende her ein. Das führte schnell zu einer starken Dampfentwicklung, wodurch manchmal die Sicht der Videokameras behindert war. Dennoch konnte das Ausbreiten des Wasserfilms auf der Schmelze im Ausbreitungskanal beobachtet werden (Abb. 17). Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Wasserfront nahm mit der Zeit ab. Sie kam bei 70 cm zum Stillstand, nachdem ein Gleichgewicht zwischen nachfließendem und verdampfendem (bzw. abfließendem) Wasser erreicht war.

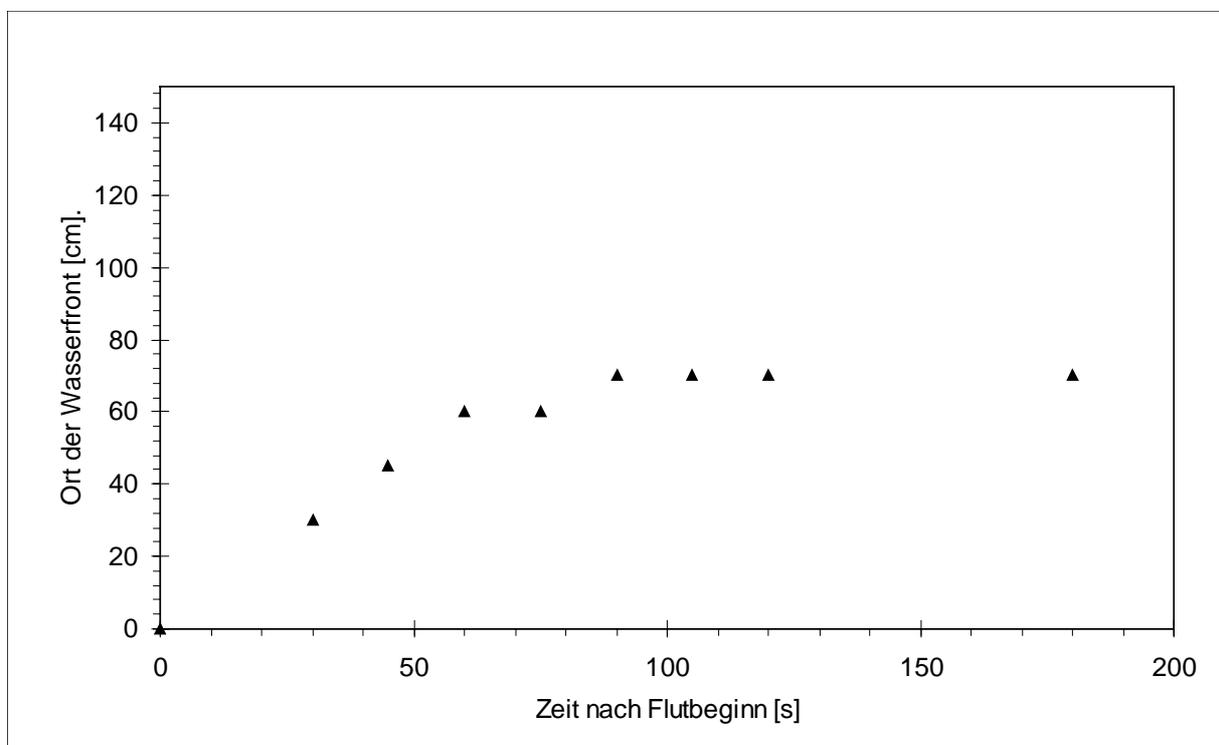


Abb. 17: Ausbreitung des Wasserfilms auf der Schmelze bei KAPOOL-3

Während und nach der Schmelzenausbreitung wurden Flammen beobachtet, die an der Schmelzenoberfläche austraten. Diese rührten von der Erosion des Opferbetons auf der Ausbreitungsfläche her. Bei der Betonerosion durch die unten liegende Eisenschmelze wurde Eisen durch das Restwasser im Beton oxidiert und der frei werdende Wasserstoff verbrannte an der Oberfläche der Schmelze. Aufgrund dieser Gasströmung entstanden viele kleine Vulkane (Abb. A-11) in der oben liegenden Oxidschmelze. Entsprechend war die erstarrte Oxidoberfläche sehr uneben und wies Höhenunterschiede von bis zu 4 cm auf. Nachuntersuchungen der erstarrten Schmelze (Abb. A-12) zeigten einen zusammenhängenden, die gesamte Ausbreitungsfläche bedeckenden Eisenregulus mit einer Dicke von 10 - 15 mm. Darüber lag (leicht abzuheben) die Oxidkruste mit einer mittleren Dicke von 7 - 9 cm. Die kleinen Vulkane hatten Höhen bis zu 11 cm.

Zusammenfassung

Das Experiment KAPOOL-3 lieferte relativ wenig Informationen über die Erosionsrate des Opferbetons, da sich diese nur im oberen Teil der Betonschicht quantifizieren läßt. Im unteren Teil ist dies nicht möglich, da infolge lokal inhomogener Betonerosion die Schmelze schnell aus dem Behälter ausfloß. Ursache für diese starke Inhomogenität können Materialeigenschaften sein. Die Tatsache aber, daß sich die Öffnung am Rand des Fensters befindet, läßt auch die Vermutung zu, daß der Durchbruch auf ein Versagen der Abdichtung zwischen Opferbeton und Keramikauskleidung zurückzuführen ist. Das Experiment lieferte dennoch ein sehr wichtiges Ergebnis: Falls die Betonerosion ungleichmäßig ist, bewirkt restlicher Beton auf der Stahlplatte, daß sich eine aufgeschmolzene Stelle nicht oder nur sehr langsam vergrößert, weil die Stahlplatte durch den Beton gegenüber der Schmelze geschützt und isoliert wird. Die Schmelze verteilte sich sehr gleichmäßig auf der Ausbreitungsfläche und bildete nach Erstarrung einen zusammenhängenden Eisenregulus unten und darüber eine gleichmäßige Oxidschicht. Bei der Flutung der Schmelzenoberfläche wurde zu keinem Zeitpunkt eine Schmelze/Wasser-Wechselwirkung beobachtet, was im Hinblick auf das EPR-Kernfänger-Konzept günstig ist. Ein zusätzliches Versuchsziel bei KAPOOL-3 war der Test eines Triggermechanismus für die Flutung. Der Versuch hat gezeigt, daß die verwendeten Stahlseile unmittelbar nach Schmelzenkontakt thermisch durchtrennt wurden, womit dieser Test als erfolgreich einzustufen ist.

7 Experiment KAPOOL-4

KAPOOL-4 war ein Wiederholungsexperiment zu KAPOOL-3. Eine kleine Änderung betrifft die Geometrie der Betonschicht (Abb. 18). Diese wurde treppenförmig gestaltet, um eine bevorzugte Erosion an der Verbindungsstelle Beton/Cordierit, wie sie möglicherweise bei KAPOOL-3 stattfand, zu vermeiden. Außerdem wurde die Anfangsmenge an Thermit auf 150 kg erhöht und die Behälterhöhe entsprechend um 10 cm vergrößert. Auf das Nachfüllen von zusätzlichem Thermit wurde verzichtet.

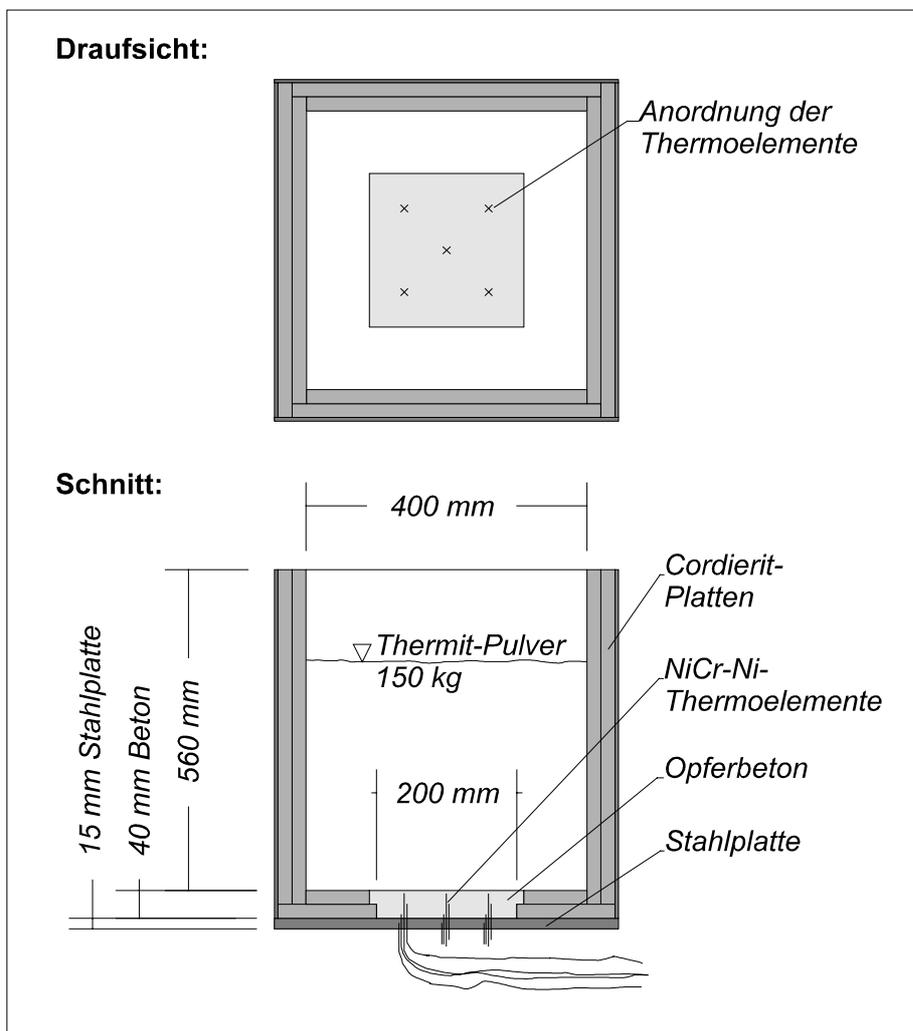


Abb. 18: Versuchsbehälter von KAPOOL-4

Die Versuchsvorbereitung war ähnlich wie bei den vorhergehenden Experimenten. Die Zündung des Thermits erfolgte planmäßig, aber bereits ca. 11 s nach der Zündung trat die Schmelze unerwartet durch die Seitenwand des Behälters aus (Abb. A-13 und A-14). Die Nachuntersuchung zeigte, daß die Cordierit-Platten in einer Ecke am Boden des Behälters versagten und die Schmelze durch einen Spalt zwischen zwei Platten ausgeflossen war. In den folgenden Experimenten wurde deshalb ein völlig neu konzipierter Tiegel verwendet.

8 Experiment KAPOOL-5

8.1 Versuchsaufbau

Basierend auf den Erfahrungen von KAPOOL-4 wurde der Versuchsbehälter von KAPOOL-5 (Abb. 19) grundsätzlich anders gestaltet. Die Behälterauskleidung wurde nicht mehr aus Cordierit-Platten, sondern aus einer Gießmasse („SITAL-CAST 042“) gefertigt. Dieses Material besteht aus 95 % Al_2O_3 , 3.5 % CaO und 0.1 % Fe_2O_3 .

Vermengt mit ca. 10 % Wasser läßt sie sich sehr gut in eine Form gießen und wird durch hydraulische Bindung sehr hart. Der große Vorteil bei dieser Auskleidung besteht darin, daß es keine Spalte und Ritzen mehr gibt. Durch die Art der Herstellung war eine runde Form des Versuchsbehälters vorteilhafter. Entsprechend war auch das Opferbeton-Fenster kreisförmig. Die Fläche (Durchmesser 22.5 cm) und die Höhe (40 mm) waren jedoch ähnlich wie in KAPOOL-3 und -4. Das Stahltor hatte eine Dicke von 15 mm. Es wurden 150 kg Thermit der Sorte 10AlSSH eingesetzt, die Zündung erfolgte wieder an der Oberfläche. Auch in KAPOOL-5 wurde zusätzlich die Ausbreitung und Kühlung der Schmelze untersucht (Abb. 20 und A-15).

Die Ausbreitungsfläche wurde auf 225 cm verlängert (KAPOOL-3 150 cm), da anstelle von 100 kg Thermit jetzt 150 kg verwendet wurden und die Schmelzenhöhen etwa gleich sein sollten. Als Substrat wurde im Ausbreitungskanal wieder der Glasbeton verwendet (Dicke: 3 cm). Die seitlichen Begrenzungen bestanden aus Cordierit-Platten. Nach der Ausbreitung wurde die Schmelze mit 250 ml/s Wasser vom Kanalende her geflutet.

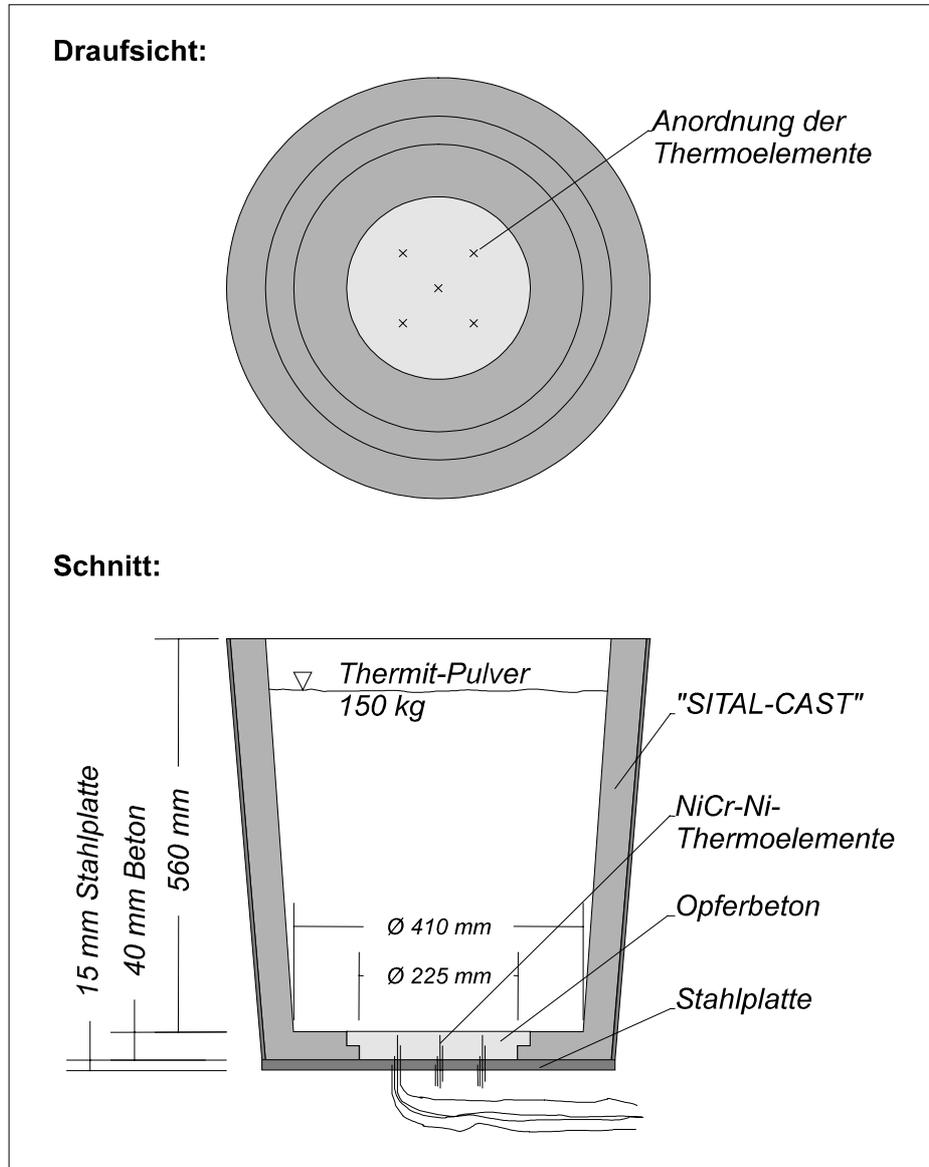


Abb. 19: Versuchsbehälter von KAPOOL-5

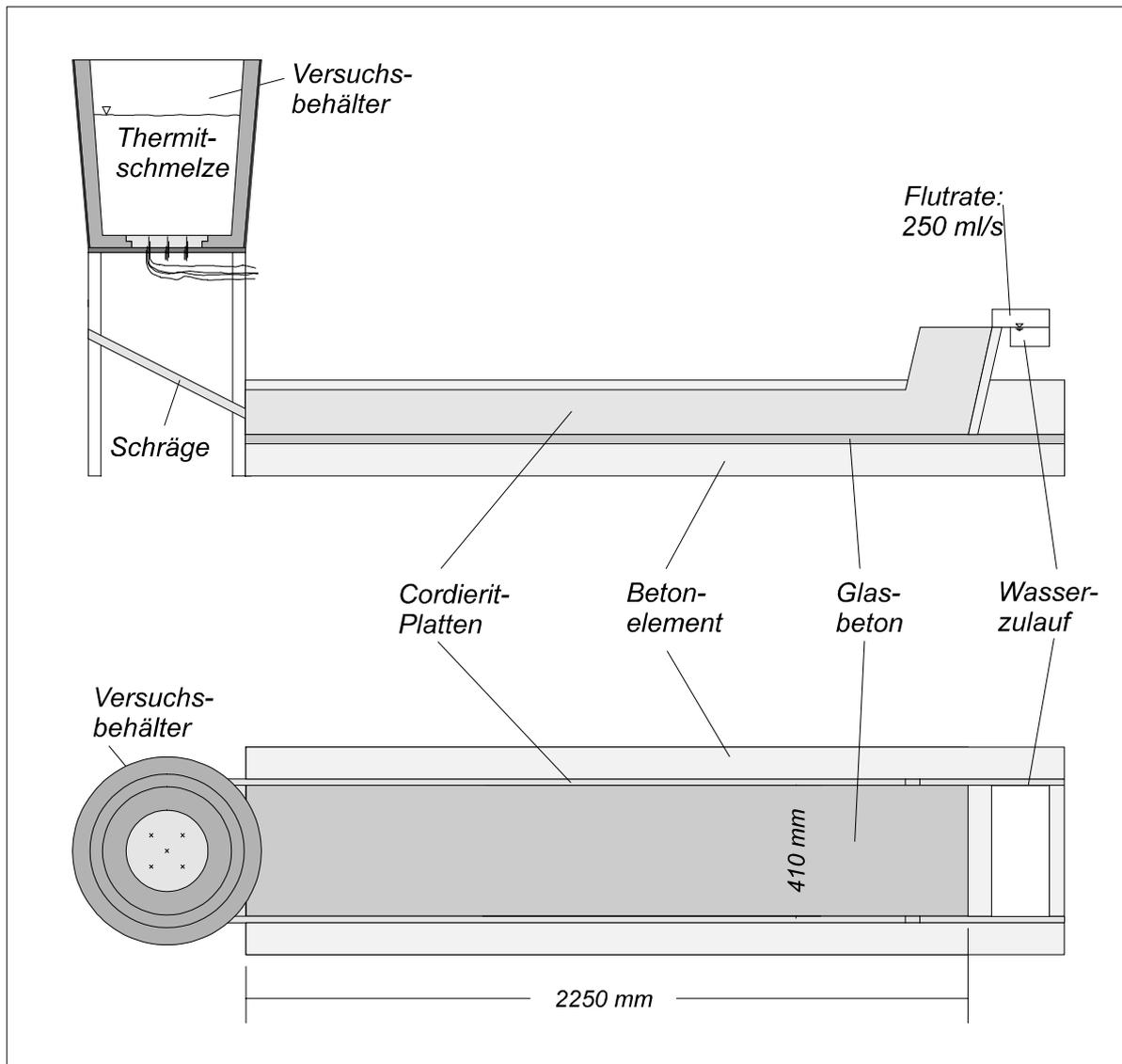


Abb. 20: Versuchsaufbau mit Ausbreitungsfläche von KAPOOL-5

8.2 Instrumentierung

Erosionsfront

Bei KAPOOL-5 wurden die NiCr-Ni-Thermoelemente zur Schmelzendetektion in drei Ebenen im Opferbeton und in einer Ebene in der Stahlplatte positioniert (Abb. 21). Wie bei den vorhergehenden Versuchen sollten auch hier die Erosionsgeschwindigkeiten und die Gleichmäßigkeit der Erosionsfront untersucht werden. In Tabelle 15 sind die horizontalen (x,y) und vertikalen (z) Positionen der Thermoelemente aufgeführt, wobei der horizontale

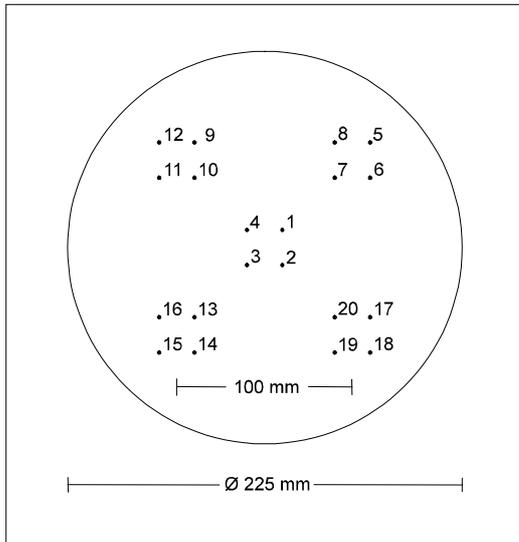


Abb 21: Horizontale Anordnung der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-5

Nullpunkt im Zentrum der Grundfläche und der vertikale Nullpunkt an der Oberfläche des Opferbetons liegt.

Die Thermospannungssignale dieser Thermoelemente wurden um den Verstärkungsfaktor 100 erhöht, von einem Transientenrecorder aufgenommen und später auf ein PC-System übertragen und ausgewertet.

Tabelle 15: Positionen der NiCr-Ni-Thermoelemente bei KAPOOL-5

Thermoelement- Nummer	Horizontale Position		Vertikale Position z [mm]	Medium
	x [mm]	y [mm]		
4	0	0	-5	Opferbeton
8	50	50	-5	Opferbeton
12	-50	50	-5	Opferbeton
16	-50	-50	-5	Opferbeton
20	50	-50	-5	Opferbeton
3	0	0	-20	Opferbeton
7	50	50	-20	Opferbeton
11	-50	50	-20	Opferbeton
15	-50	-50	-20	Opferbeton
19	50	-50	-20	Opferbeton
2	0	0	-35	Opferbeton
6	50	50	-35	Opferbeton
10	-50	50	-35	Opferbeton
14	-50	-50	-35	Opferbeton
18	50	-50	-35	Opferbeton
1	0	0	-47.5	Stahlplatte

Thermoelement- Nummer	Horizontale Position		Vertikale Position	Medium
	x [mm]	y [mm]	z [mm]	
5	50	50	-47.5	Stahlplatte
9	-50	50	-47.5	Stahlplatte
13	-50	-50	-47.5	Stahlplatte
17	50	-50	-47.5	Stahlplatte

Temperatur der Schmelze

Bei KAPOOL-5 standen 10 W/Re-Thermoelemente zur Temperaturmessung zur Verfügung. Diese waren wieder an Schwenkhebeln befestigt und konnten manuell zu beliebigen Zeitpunkten in die Schmelze eingetaucht werden. Es wurde die Temperatur der Eisenschmelze ca. 30 mm oberhalb des Behälterbodens gemessen. Die Signale der 10 Thermoelemente gingen auf einen Umschalter und wurden nach Verstärkung (Faktor 100) mit dem Transientrecorder aufgenommen.

Videoaufzeichnung

Drei Videokameras standen für dieses Experiment zur Verfügung. Die erste Kamera hatte die Aufgabe eine Übersicht über das Experiment zu geben. Sie beobachtete den Versuchsbehälter, die W/Re-Thermoelemente und die Ausbreitungsfläche. Mit der zweiten Videokamera wurde die Ausbreitungsfläche bildfüllend aufgenommen, so daß die Vorgänge bei der Ausbreitung und Kühlung der Schmelze gut zu beobachten waren. Die dritte Videokamera zeichnete den Behälterboden (Stahlplatte) von unten über einen Spiegel auf, um den Schmelzeaustritt zu dokumentieren.

8.3 Ergebnisse

Versuchsablauf

Zu Beginn des Versuchs KAPOOL-5 wurde zeitgleich das Thermit gezündet, der Transientrecorder gestartet und das Blitzlicht ausgelöst (Tabelle 16).

Tabelle 16: Zeitlicher Versuchsablauf von KAPOOL-5

Zeit nach Zündung	Ereignis
0 s	Zündung / Start Transientenrecorder / Blitzlicht
17 s	1. W/Re-Thermoelement eingetaucht
27 s	2. W/Re-Thermoelement eingetaucht
37 s	3. W/Re-Thermoelement eingetaucht
48 s	4. W/Re-Thermoelement eingetaucht
60 s	5. W/Re-Thermoelement eingetaucht
71 s	6. W/Re-Thermoelement eingetaucht
75 s	Schmelzeaustritt beginnt
83 s	Schmelzeaustritt beendet
120 s	Wasserflutung beginnt
360 s	Ausbreitungsfläche komplett geflutet

Das erste W/Re-Thermoelement zur Temperaturbestimmung der Eisenschmelze tauchte 17 s nach der Zündung in die Schmelze ein. Im 10 Sekunden-Takt ging die Temperaturmessung weiter bis insgesamt sechs Thermoelemente eingetaucht wurden. Zum Zeitpunkt 75 s versagte das Stahltor und die Schmelze begann auszutreten. Die Auslaufzeit betrug 8 s. Dies war bedeutend kürzer als bei KAPOOL-3 (23 s). Demzufolge mußte die Stahlplatte großflächiger aufgeschmolzen sein. Nach 120 s wurde die Wasserflutung (250 ml/s) manuell eingeschaltet. Es bildete sich ein Wasserfilm, der sich langsam in den Kanal hinein bewegte. Der Kanal war nach 360 s komplett geflutet, d. h. 240 s nach Beginn der Flutung.

Erosionsverhalten

Die Thermospannungssignale der NiCr-Ni-Thermoelemente wurden in gleicher Weise ausgewertet wie bei den vorhergehenden Versuchen. An den Meßstellen im Opferbeton waren wieder die durch verdampfendes Wasser bedingten Haltepunkte bei 100 °C zu erkennen. In Tabelle 17 sind alle Detektionszeitpunkte der einzelnen Meßpunkte zusammengefaßt.

Tabelle 17: Detektionszeitpunkte im Opferbeton und Stahlplatte von KAPOOL-5

Thermoelement-Nummer	Detektionszeitpunkt [s]
4	20.6
8	(35.4)
12	21.7
16	21.1
20	(29.3)
3	39.5
7	40.3
11	38.7
15	38.6
19	41.5
2	62.7
6	67.4
10	63.6
14	67.6
18	69.0
1	81.3
5	82.5
9	79.6
13	78.4
17	80.5

Anzumerken ist, daß die Detektionszeitpunkte von Thermoelement-Nr. 8 und 20 Ausreißer sind (Tabelle 17), sie detektierten die Schmelze viel zu spät. Bezogen auf diese wäre die Zeit für die Erosion bis 5 mm Tiefe viel zu lang und die Zeit von der ersten Meßebeine ($z=-5$ mm) bis zur zweiten ($z=-20$ mm) viel zu kurz. Deswegen wurden diese beiden Meßwerte bei der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Ein weiterer Beweis für die Ausreißer ist, daß die Detektionszeitpunkte in der zweiten Ebene ($z=-20$ mm) sehr nahe beieinander liegen (Abb. 22), d. h. daß die Erosion tatsächlich sehr homogen ablief.

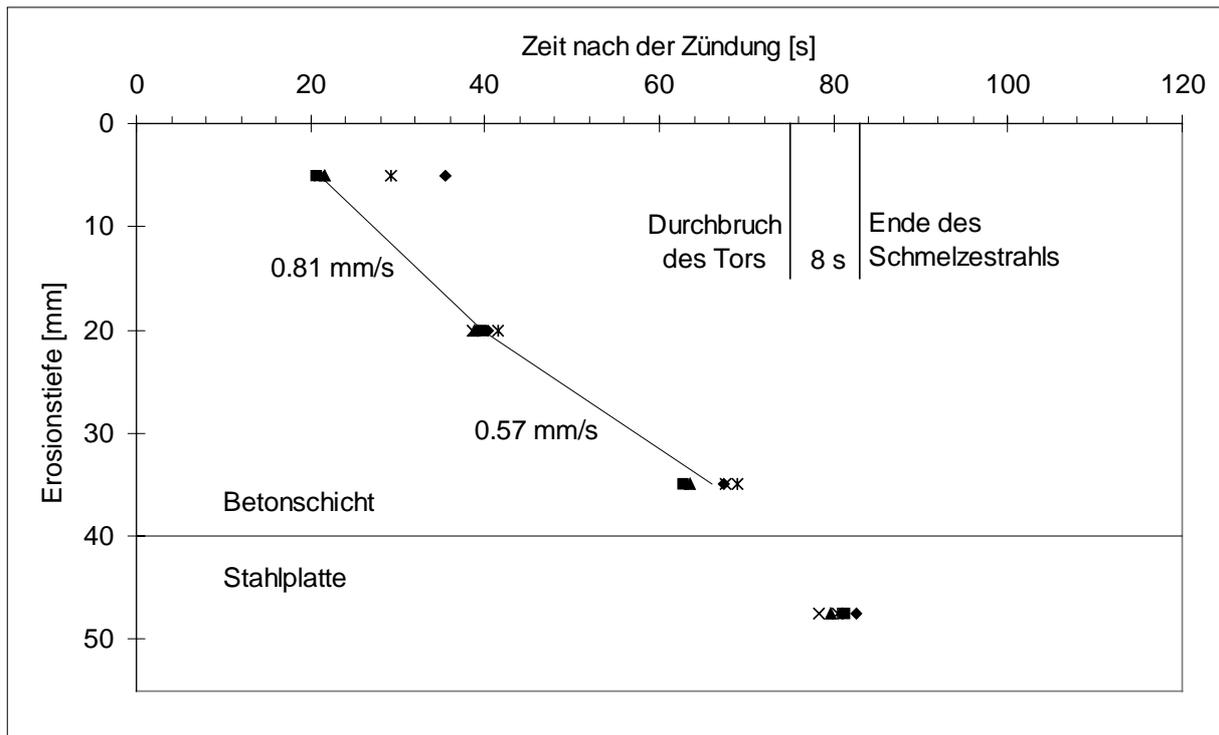


Abb. 22: Erosion des Opferbetons und der Stahlplatte in KAPOOL-5

Aus den restlichen drei Meßwerten der ersten Ebene ($z=-5$ mm) und denen der anderen Ebenen lassen sich gemittelte Detektionszeitpunkte berechnen (Tabelle 18). Im ersten Abschnitt ergibt sich demnach eine mittlere Erosionsrate von 0.81 mm/s und im zweiten Abschnitt eine von 0.57 mm/s (Abb. 22).

Tabelle 18: Gemittelte Detektionszeitpunkte im Opferbeton von KAPOOL-5

Gemittelter Detektionszeitpunkt [s]	Erosionstiefe [mm]
21.1	5
39.7	20
66.1	35

Schmelztemperatur

Die Schmelztemperatur der Eisenphase wurde in KAPOOL-5 insgesamt sechs Mal gemessen. Bei der ersten Messung wurde das Thermoelement schon während des Signalanstiegs zerstört, jedoch erst kurz vor Erreichen der asymptotischen Temperatur. Extrapoliert man die Kurve, so erhält man eine gegenüber dem maximalen Meßwert um ca.

100 °C höhere Temperatur (Tabelle 19). Die weiteren Messungen waren sehr gut und sind in Abb. 23 dargestellt. Bei Beginn des Schmelzdurchtritts (75 s) hatte die Schmelze demnach eine Temperatur von ca. 2060 °C.

Tabelle 19: Schmelzentemperatur der Eisenphase von KAPOOL-5

Zeit nach Zündung [s]	Schmelzentemperatur [°C]
18.5	2463 +100
28.8	2330
39.8	2198
51.5	2149
63.2	2098
74.2	2061

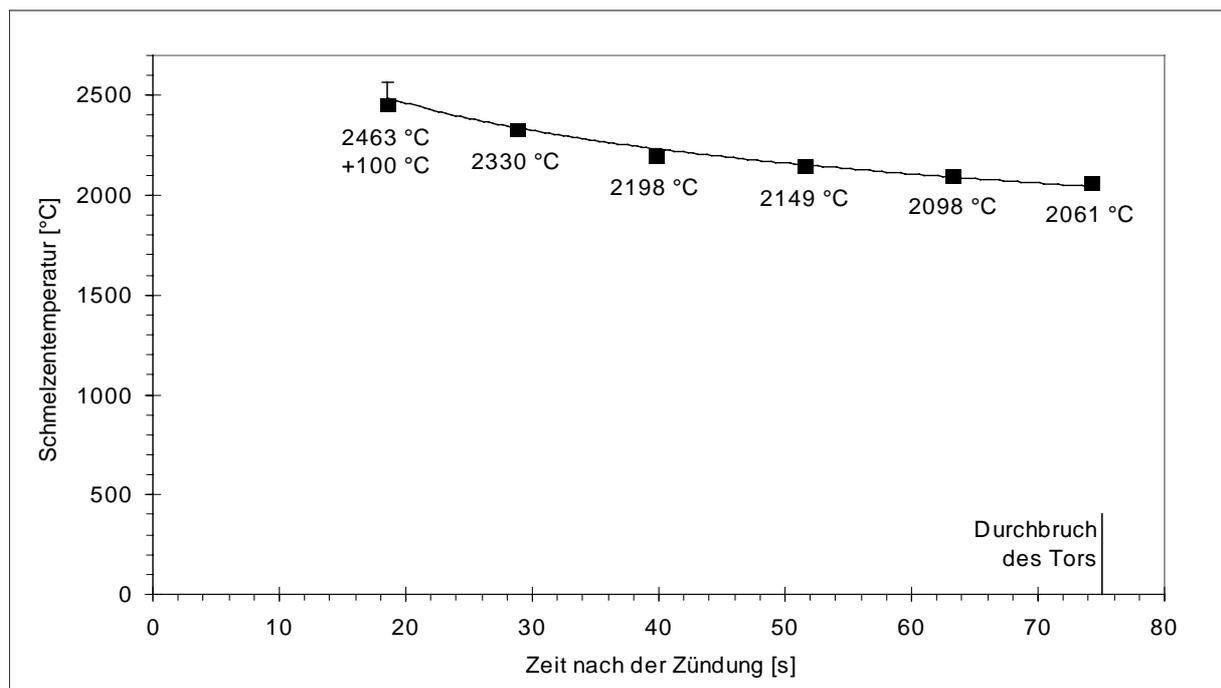


Abb. 23: Schmelzentemperatur der Eisenphase in KAPOOL-5

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter

Nachuntersuchungen am Versuchsbehälter von KAPOOL-5 zeigten, daß die Opferbeton-

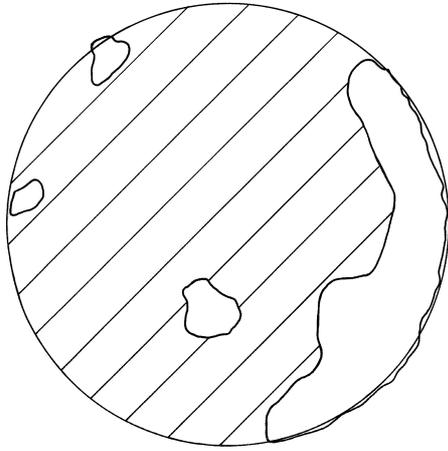


Abb. 24: Öffnungsquerschnitt der Stahlplatte in KAPOOL-5

schicht vollständig erodiert war. Es wurde keinerlei Beton über der Stahlplatte gefunden. Die Stahlplatte hatte ein große und drei kleinere Öffnungen (Abb. 24 und A-16). Die aufgeschmolzene Fläche betrug ca. 82 cm^2 , das entspricht 21 % der gesamten Fensterfläche (398 cm^2). Dies erklärt die relativ kurze Ausfließzeit der Schmelze von 8 s. An den Rändern der Öffnungen war die Stahlplatte schräg angeschmolzen. Wäre das Angebot an Schmelze größer gewesen, so wäre die Stahlplatte wahrscheinlich noch weiter aufgeschmolzen.

Schmelzenausbreitung und -kühlung

Der Schmelzenaustritt begann ca. 75 s nach der Zündung und dauerte 8 s an. Ab dem Zeitpunkt 120 s nach der Zündung wurde die Schmelze mit einer Flutrate von 250 ml/s vom Kanalende her geflutet. Das Wasser bildete einen Film auf der Schmelzenoberfläche und wanderte in den Kanal hinein. Abb. 25 zeigt das Ausbreiten der Wasserfront über der Schmelze in Längsrichtung des Kanals. Anfangs drang die Wasserfront sehr schnell in den Kanal ein. Nach ca. 60 s hatte sie 150 cm überflutet und stoppte kurze Zeit, weil die nachfließende und die verdampfende Wassermenge gleich groß waren. Nach weiteren 50 s setzte sich die Wasserfront wieder in Bewegung, da die Schmelzenoberfläche eine immer dicker werdende Kruste ausbildete und immer weniger Wärme durch diese abgeführt werden konnte. Die Ausbreitungsfläche war schließlich 240 s nach Flutbeginn vollständig überflutet. Wie in KAPOOL-3 wurden während und nach Ausbreitung der Schmelze Flammen beobachtet, die an der Oberfläche der Schmelze austraten. Sie rührten von der Betonerosion durch die Eisenschmelze her. Frei werdendes Wasser wird vom Eisen reduziert und der entstehende Wasserstoff verbrennt an der Oberfläche der Schmelze. An der oben liegenden Oxidkruste sieht man viele kleine Vulkane, die durch das durchströmende Gas gebildet

wurden. Die Oxidoberfläche war deswegen auch sehr uneben mit Höhenunterschieden von bis zu 4 cm (Abb. A-17). Die mittlere Dicke der Oxidkruste betrug 7 - 9 cm, mit Höhen bis zu 11 cm (Vulkane). Darunter fand sich ein vom Oxid völlig getrennter Eisenregulus mit einer Dicke von 10 - 15 mm, der die gesamte Grundfläche bedeckte.

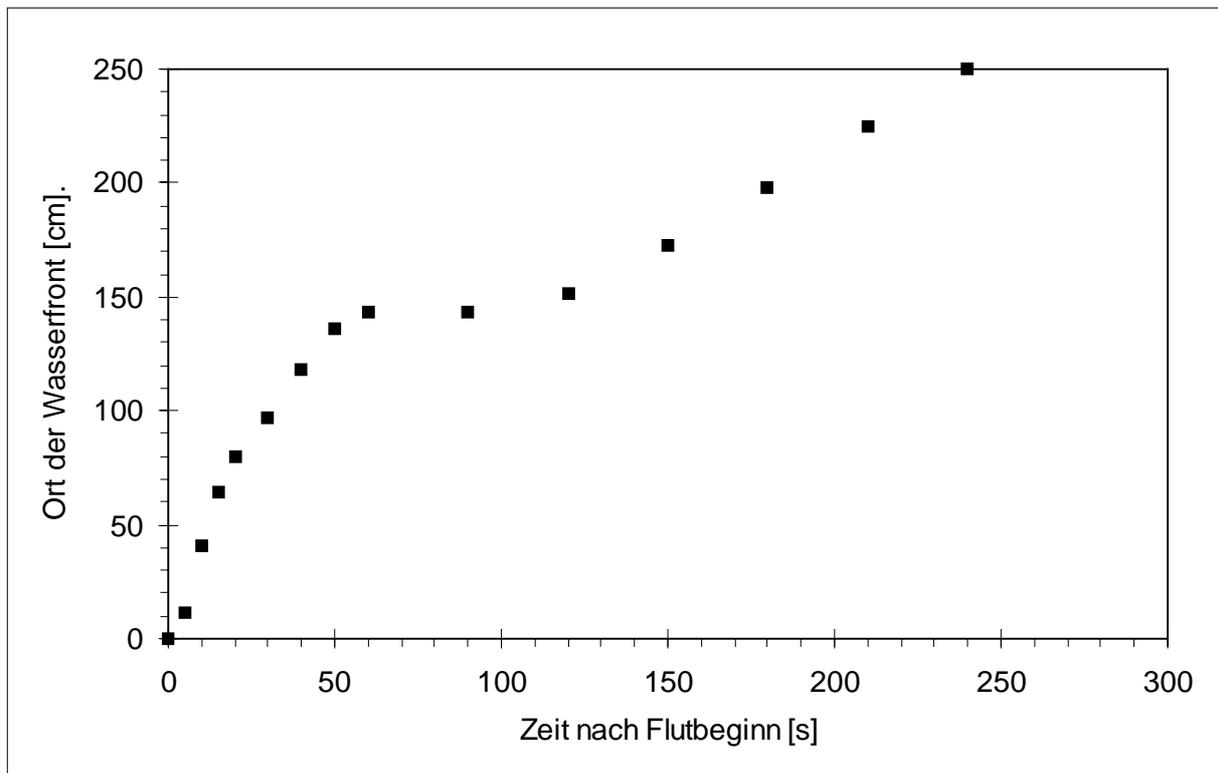


Abb. 25: Ausbreitung des Wasserfilms auf der Schmelze bei KAPOOL-5

Zusammenfassung

KAPOOL-5 war ein sehr erfolgreiches Experiment. Die Behälterauskleidung wurde nur wenig erodiert (vgl. KAPOOL-4). Die Erosion des Opferbetons konnte sehr gut verfolgt werden und lieferte zuverlässige Daten zur Erosionsgeschwindigkeit. Die Erosion war über die Grundfläche gesehen sehr homogen. Dadurch kam die Erosionsfront mit zeitlich wenig Differenz (ca. 6 s, Tabelle 17) an der Stahlplatte an, wodurch diese großflächig aufgeschmolzen wurde. Die Schmelze breitete sich sehr gleichmäßig aus, es wurde ein zusammenhängender Eisenregulus mit konstanter Dicke und eine homogene Oxidkruste gefunden. Bei der Flutung wurde keine Schmelze/Wasser-Wechselwirkung beobachtet.

9 Vergleiche und Diskussion

9.1 Erosionsraten des Opferbetons

Die wichtigsten Versuchsziele, Versuchsparameter und Ergebnisse der fünf Experimente KAPOOL-1 bis -5 sind in Tabelle 20 zusammengefaßt. In allen Experimenten wurde derselbe Opferbeton (vgl. Kap. 3) verwendet, variiert wurden die Geometrie des Behälters, der Betonschicht und des Tors sowie die Thermitorte und -menge.

Tabelle 20: KAPOOL-1 bis -5; Versuchsziele, Versuchsparameter und Ergebnisse

Experiment (Datum)	Versuchs- ziele	Behälter- grundfläche (cm)	Tor			Thermit- Typ	Thermit- masse (kg)		Schmelze- temperatur (°C)		Beton- erosions- rate (mm/s)	Tor-Erosion		Erodierte Fläche (cm ²)	Fläche (%)
			Fläche (cm)	Dicke (mm)	Beton		Stahl	Anfang	zugef.	Anfang		Ende	Start (s)		
KAPOOL-1 (26.06.96)	Betonerosion Torversagen	36 x 36	15 x 15	20	10	R70SSH	100	-	-2090	-1910	0.47	52	58	84	37
KAPOOL-2 (10.07.96)	Betonerosion Torversagen	40 x 40	40 x 40	50	20	R70SSH	100	15 x 2	-2070	-	0.4 - 0.23	Tor nicht durchge- schmolzen		-	-
KAPOOL-3 (08.10.96)	Betonerosion Torversagen Ausbreitung Flutauslösung Flutung (100ml/s)	40 x 40	20 x 20	40	15	10AISSH	100	3 x 3	-2355 +100	-2035	0.51 - -0.4	72	95	10	2.5
KAPOOL-4 (14.11.96)	Betonerosion Torversagen Ausbreitung Flutung (250ml/s)	40 x 40	20 x 20	40	15	10AISSH	150	-	-2450	-	-	11	Schmelze trat durch seitliche Schutzkeramik aus		
KAPOOL-5 (16.01.97)	Betonerosion Torversagen Ausbreitung Flutung (250ml/s)	Ø 41	Ø 22.5	40	15	10AISSH	150	-	-2465 +100	-2060	0.81 - 0.57	75	83	82	21

Als erstes soll die Erosion des Opferbetons diskutiert werden. Abb. 26 zeigt die gemittelten Detektionszeitpunkte der Erosionsfront (aus jeweils fünf Thermoelementen einer Meßebeine) in den Versuchen KAPOOL-1, -2, -3, -5 als Funktion der Zeit. Die Erosionsverläufe liegen bei allen Experimenten dicht beieinander, mit zunehmender Erosionstiefe allerdings werden die Unterschiede größer. Dies liegt vor allem an den unterschiedlichen Schmelzentemperaturen der einzelnen Experimente. Deshalb ist es zweckmäßig die Erosionsraten und die Schmelzentemperaturen zu korrelieren.

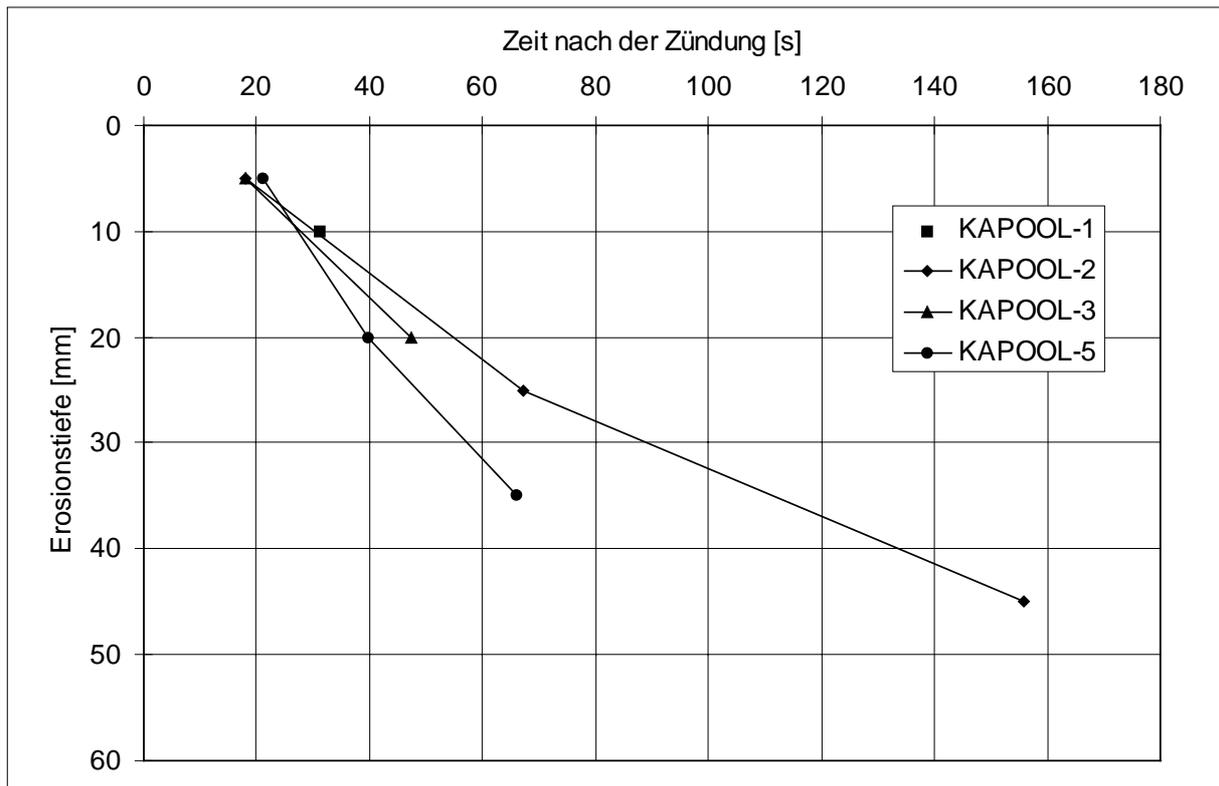


Abb. 26: Gemittelter Erosionsverlauf der Experimente KAPOOL-1, -2, -3 und -5

Die Steigung zwischen zwei Meßpunkten in Abb. 26 stellt die mittlere Erosionsrate in diesem Zeitabschnitt dar. Diese Erosionsrate wird der mittleren Zeit dieser Zeitspanne zugeordnet. Daraus ergeben sich Erosionsraten zu diesen bestimmten Zeitpunkten (Tabelle 21).

Tabelle 21: Erosionsraten und korrespondierende Schmelzentemperaturen

Experiment	Zeit nach der Zündung [s]	Erosionsrate [mm/s]	Schmelzentemperatur [°C]
KAPOOL-2	42.7	0.40	2043
KAPOOL-2	111.6	0.23	1765
KAPOOL-3	32.8	0.51	2291 ±47
KAPOOL-5	30.4	0.81	2310
KAPOOL-5	52.9	0.57	2143

Korreliert man diese Daten mit dem zeitlichen Verlauf der Schmelzentemperatur (Abb. 27), erhält man die in Abb. 28 dargestellte Abhängigkeit der Erosionsrate von der

Schmelzentemperatur. Die Kenntnis dieser Abhängigkeit ist für die Beschreibung des Verhaltens der Schmelze in der Reaktorgrube von großer Bedeutung.

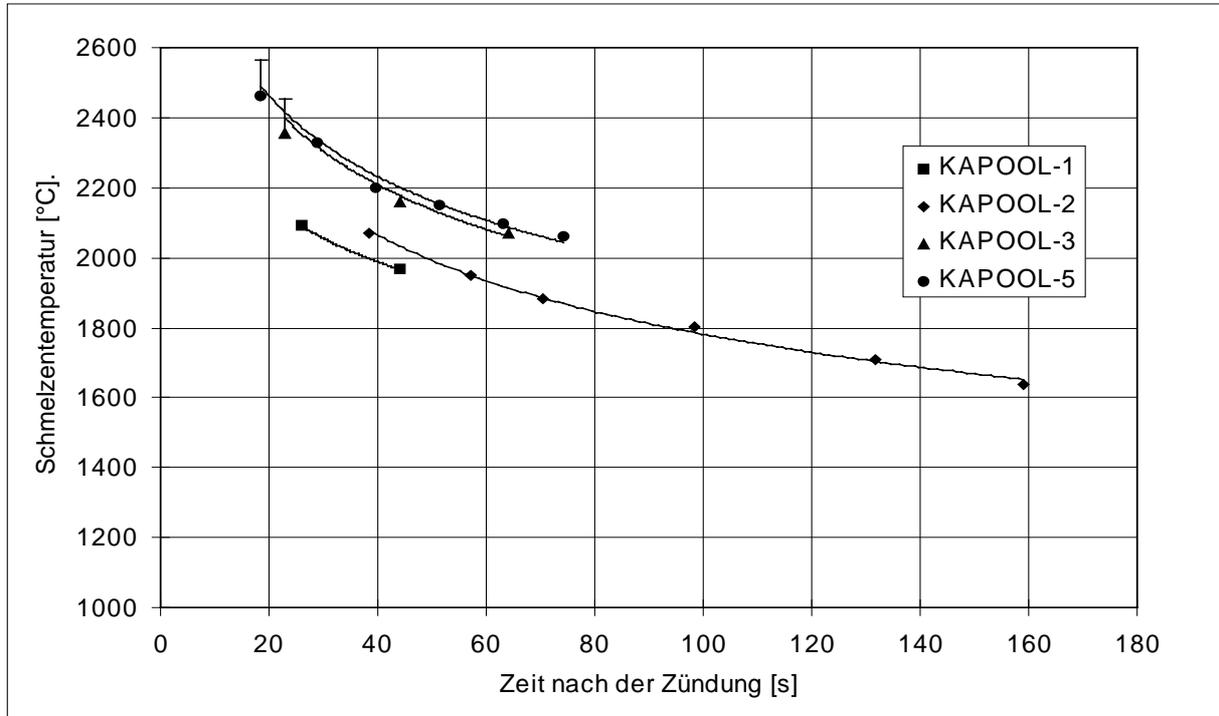


Abb. 27: Temperaturverlauf der Eisenschmelze der Experimente KAPOOL-1, -2, -3 und -5

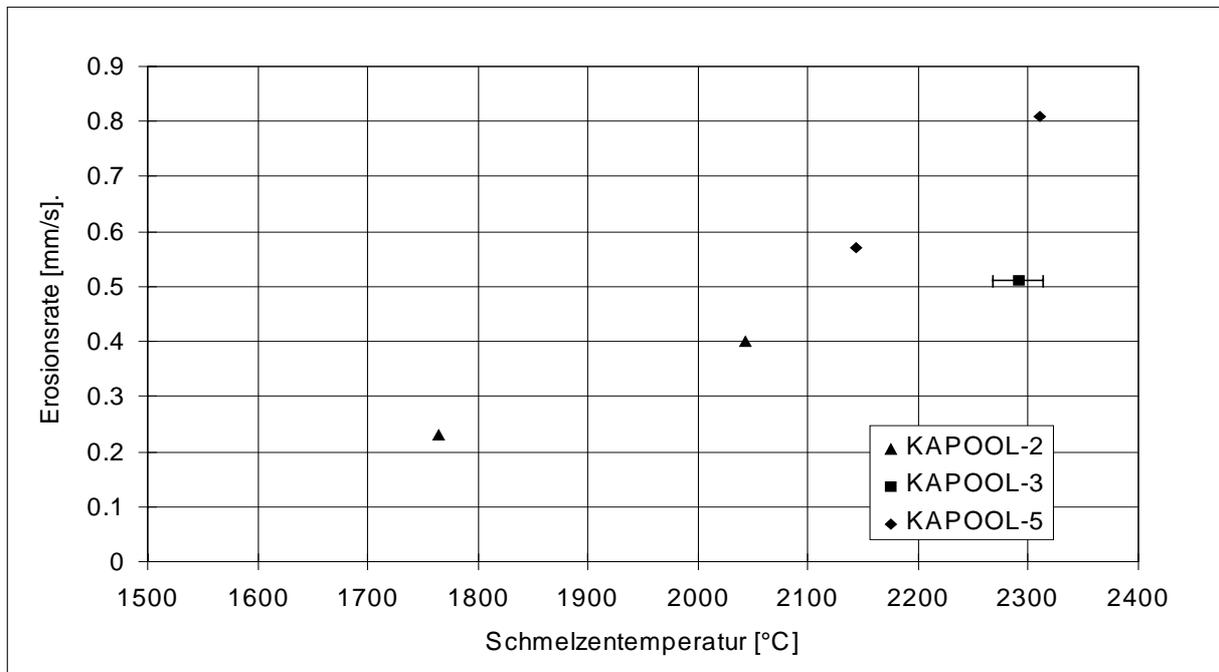


Abb. 28: Erosionsraten in Abhängigkeit der Schmelzentemperatur

9.2 Inhomogenität der Betonerosion

Wie in 9.3 näher erläutert, hängt das Aufschmelzverhalten des Stahltores (zeitliche Vergrößerung der Ausflußöffnung) im wesentlichen von der Inhomogenität der Betonerosion ab. In Tabelle 22 sind charakteristische Daten für die Inhomogenität der Betonerosion zusammengestellt. Δt_{\max} ist die maximale Differenz der Ankunftszeiten der Schmelze an derselben vertikalen (z), aber unterschiedlichen horizontalen Positionen. Durch Multiplikation von Δt_{\max} mit der temperaturabhängigen Erosionsrate (Abb. 28), ergibt sich ein charakteristisches Maß für die maximale Inhomogenität Δz_{\max} der horizontalen Schmelzfronten.

Tabelle 22: Inhomogenität der Betonerosion

Experiment	Fläche Opferbeton	Erosionstiefe (mm)	Inhomogenität	
			Δt_{\max} (s)	Δz_{\max} (mm)
KAPOOL-1	15 cm * 15 cm	5	9	4
KAPOOL-2	40 cm * 40 cm	5	6	4
		25	20	7
		45	7	1
KAPOOL-3	20 cm * 20 cm	5	2	2
		20	12	6
		35	(≥ 5)	(≥ 2)
KAPOOL-5	22,5 cm \varnothing	5	1	1
		20	3	2
		35	6	3

Die Werte von Δt_{\max} und Δz_{\max} streuen stark. Δt_{\max} liegt bei einigen s (Maximalwert 20 s) und scheint mit der Erosionstiefe zuzunehmen. Δz_{\max} liegt bei nur wenigen mm, eine klare Abhängigkeit von der Erosionstiefe ist nicht zu erkennen. Dies zeigt, daß die Erosionsfronten, selbst bei diesem relativ grobkörnigen Beton (30 %, 0 – 1 mm; 70 %, 1 – 8 mm), über die Größe der untersuchten Betonflächen (225 – 1400 cm²) sehr homogen sind.

9.3 Erosionsverhaltens des Stahltors

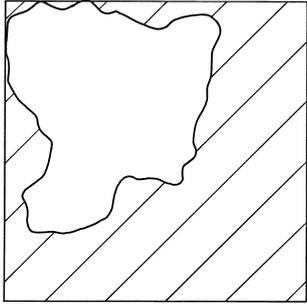
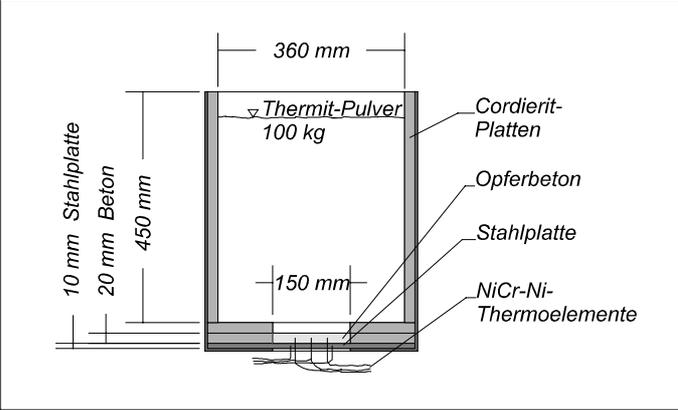
Wie bereits erwähnt (Abschnitt 6.3), wurde das Erosionsverhalten des Stahltors in KAPOOL-3 (eine Öffnung mit nur 10 cm^2 , Abb. 29) mit großer Wahrscheinlichkeit durch eine lokale Inhomogenität im Randbereich der Betonplatte verursacht. Dies führte zu einer starken lokalen Betonerosion, frühzeitigem lokalen Kontakt der Schmelze mit der Stahlplatte und schließlich zum lokalen Durchschmelzen der Stahlplatte. Indizien hierfür sind die stark inhomogene Front nach 35 mm Betonerosion (Tabelle 12), der praktisch konstante Strahldurchmesser während des langandauernden (23 s) Schmelzenaustritts und schließlich die dicke Schicht (bis zu 7 mm) an Restbeton auf der Stahlplatte nach Auslauf der Schmelze. Das Aufschmelzen des Tors in KAPOOL-3 wird daher als nicht EPR-repräsentativ betrachtet. Im Gegensatz zu KAPOOL-3, wurden in KAPOOL-1 und -5 eine Aufweitung des Schmelzenstrahls während des Auslaufs und entsprechend relativ große Austrittsöffnungen nach dem Auslauf beobachtet (KAPOOL-1: eine Öffnung mit 84 cm^2 , KAPOOL-5: vier Öffnungen mit insgesamt 82 cm^2 , Abb. 29). Außerdem wurde in diesen Experimenten, wie aufgrund der geringen Inhomogenität der Betonerosion (Abschnitt 9.2) erwartet, kein Restbeton auf den Stahlplatten gefunden.

Die Experimente deuten darauf hin, daß das Aufschmelzverhalten des Stahltors wie folgt beschrieben werden kann: Beim ersten Kontakt der Eisenschmelze mit der Stahlplatte ist die restliche Stahlplatte noch mit einer Betonschicht bedeckt, deren Dicke von der Inhomogenität der Betonerosion abhängt. Nach einer von der Dicke und Temperatur der Stahlplatte abhängigen Verzögerungszeit schmilzt die Stahlplatte an der von der Schmelze kontaktierten Stelle auf und die Schmelze tritt aus. Während dieser Verzögerungszeit und während des Auslaufs der Schmelze wird der Restbeton weiter erodiert, was zu einer Vergrößerung der Austrittsöffnung und/oder zu Bildung weiterer Austrittsöffnungen während des Auslaufs führt.

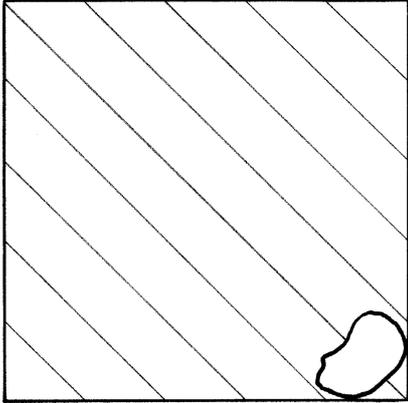
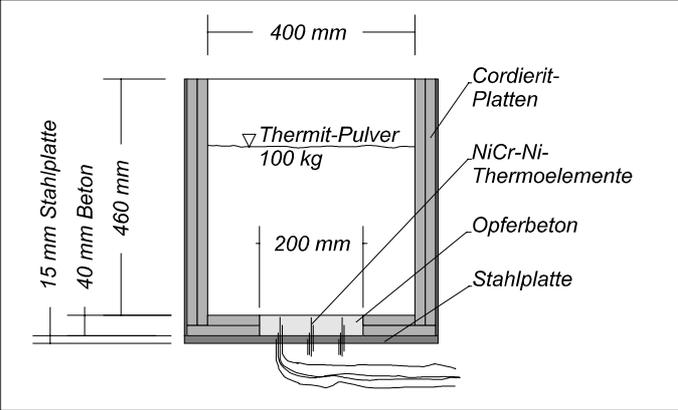
Danach wird das Aufschmelzverhalten des Stahltors, d.h. die zeitliche Vergrößerung der Austrittsfläche, im wesentlichen bestimmt durch die Inhomogenität der Betonerosion. $F(\Delta z)$ sei der Flächenanteil des Stahltors der beim ersten lokalen Schmelzekontakt mit Restbeton der Dicke Δz bedeckt ist. Bei bekannter Erosionsrate kann Δz in eine Erosionszeit Δt transformiert werden und die Größe $F(\Delta t)$ beschreibt dann die zeitliche Zunahme der Austrittsfläche, vorausgesetzt es ist noch Schmelze vorhanden. Die maximale Dicke des Restbetons auf der Stahlplatte bestimmt die Öffnungszeit des Tors, d.h. die Zeitspanne zwischen Beginn des

Auslaufs und vollständiger Öffnung des Stahltrags. Die nach lokalem Schmelzkontakt benötigte Zeit zum lokalen Aufheizen und Aufschmelzen der Stahlplatte bewirkt nur eine Verzögerung aber keine zusätzliche Vergrößerung der Öffnungszeit.

KAPOOL-1



KAPOOL-3



KAPOOL-5

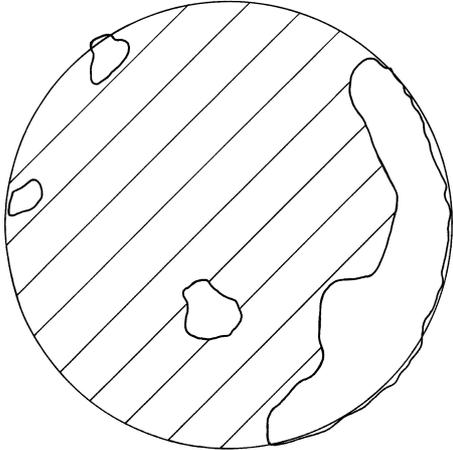
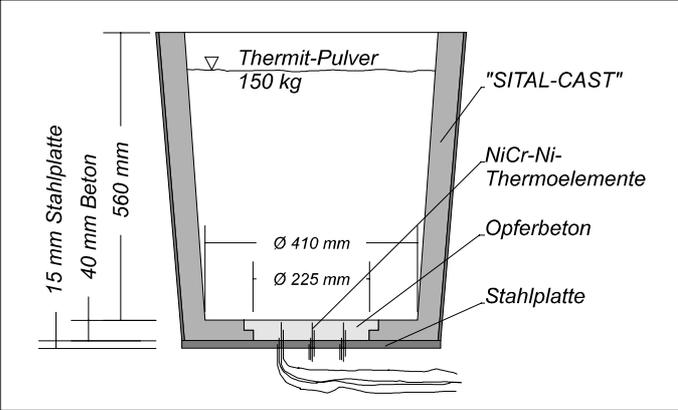


Abb. 29: Versuchsbehälter und Stahltor (4-fache Größe) von KAPOOL-1, -3 und -5

Diese Interpretation ist konsistent mit dem Ergebnissen von KAPOOL-1 und -5. Basierend auf der beobachteten maximalen Inhomogenität der Betonerosion von 3 – 5 mm und der geschätzten Betonerosionsrate während des Schmelzenauslaufs von etwa 0,4 mm/s (Schmelzentemperatur ~ 2000 °C), erwartet man eine Öffnungszeit für das ganze Tor von etwa 10 s. Dies konnte experimentell nicht verifiziert werden, da die gesamte Schmelze (Eisen und Oxid) in KAPOOL-1 bereits nach ~ 6 s und in KAPOOL-5 nach ~ 8 s ausgelaufen war. Die geschätzte Auslaufzeit für die Eisenschmelze beträgt in beiden Experimenten ≤ 5 s. In dieser Zeit wurden in KAPOOL-1 etwa 40 % und in KAPOOL-5 etwa 20 % der Gesamtfläche des Tors aufgeschmolzen (die Erosionsrate des Betons und die Aufschmelzrate der Stahlplatte durch die Oxidschmelze sind vernachlässigbar gegenüber denen der Eisenschmelze). Diese Werte sind konsistent mit der geschätzten Aufschmelzzeit von 10 s für das gesamte Tor.

Geht man davon aus, daß zumindest über einen zentralen Bereich des EPR-Tors (Gesamtfläche ~ 3 m²) von etwa 1 m², die Inhomogenität der Betonerosion ähnlich ist wie in den KAPOOL-Experimenten (≤ 5 mm), dann sollte das EPR-Tor bei Kontakt mit der metallischen Komponente der Kernschmelze, über die 1 m² Fläche ebenfalls in etwa 10 s öffnen und die gesamte Kernschmelze (Volumen ~ 65 m³) würde in 20 – 40 s auslaufen. Diese kurzen Auslaufzeiten sind im Hinblick auf eine gleichmäßige Verteilung der Schmelze auf der Ausbreitungsfläche sehr günstig.

10 Zusammenfassung

In den Experimenten KAPOOL-1 bis -5 wurde das Verhalten einer Kernschmelze in der Reaktorgrube des EPR untersucht. Die Kernschmelze wurde dabei durch Aluminiumoxid- bzw. Eisen-Schmelzen simuliert.

Die Experimente liefern wertvolle Hinweise darauf, wie der aus einer Schicht Opferbeton und einer Stahlplatte bestehenden Boden der Reaktorgrube durch eine metallische Schmelze

erodiert wird und wie diese Schmelze schließlich ausfließt. Das Ausfließverhalten wird im wesentlichen durch die Homogenität der Betonerosion bestimmt. Es ist für das Ausbreitungsverhalten der Kernschmelze von großer Bedeutung und soll durch weitere Experimente quantifiziert werden.

Eine erste Extrapolation der bisherigen Ergebnisse auf den EPR läßt, bei mit den KAPOOL-Tests vergleichbar homogenen Betonerosion, kurze Auslaufzeiten der Kernschmelze (wenige zehn s) erwarten, was im Hinblick auf eine gleichmäßige Ausbreitung sehr günstig ist.

Die Experimente lieferten auch für die Verifikation von Rechenprogrammen wertvolle Daten zur Erosion von Opferbeton in Abhängigkeit der Temperatur der metallischen Schmelzen.

In zwei Experimenten wurde zusätzlich die Ausbreitung und die anschließende Kühlung der Schmelze durch einen Wasserfilm von oben untersucht. Die gemischten Schmelzen (Oxid über Eisen) breiteten sich gleichmäßig aus und es wurden keinerlei energetische Schmelze/Wasser-Wechselwirkungen während der Flutung beobachtet. Darüber hinaus wurde in einem Versuch ein passiver Auslösemechanismus für die Flutung der Schmelze erfolgreich getestet.

11 Literaturverzeichnis

- [1] H. Alsmeyer, H. Werle, „Kernschmelzekühleinrichtungen für zukünftige DWR-Anlagen“, KfK-Nachrichten, Jahrgang 26, 3/94, S. 170-178.
- [2] H. Alsmeyer, et al., „Studies on Core Melt Retention Concepts for the EPR“, Proc. SFEN/KTG Conf. on the EPR Project, Strasbourg, November 1995, S. 204.
- [3] H. Alsmeyer, et al., „Ex-vessel Melt Behavior in the EPR“, KTG/SFEN Conf. on the EPR, Cologne, October 1997, S. 161.
- [4] F. Fellmoser, G. Fieg, H. Massier, H. Werle, „Simulation Experiments on the Corium Behaviour in the EPR Cavity: KAPOOL-Tests“, Proc. Jahrestagung Kerntechnik '98, München, Mai 1998, S. 141.

- [5] H. Alsmeyer, et al., „Beherrschung und Kühlung von Kernschmelzen außerhalb des Druckbehälters“, Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 29, 4/97, S. 327 – 335.

Danksagung

Diese Arbeiten wurden mit teilweiser Unterstützung durch deutsche EVUs und Siemens durchgeführt.

Wir danken den Kollegen von Siemens, insbesondere Herrn M. Fischer, für wertvolle Diskussionen und Anregungen.