

KFK-43

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

DEZEMBER 1960

KFK 43

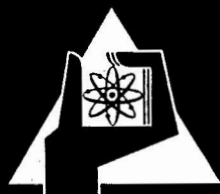
BAUABTEILUNG

DIE HERSTELLUNG DER BETONABSCHIRMUNG
DES KARLSRUHER FORSCHUNGSREAKTORS FR 2

ALFRED BAUER

JÜRGEN SEETZEN (TH HANNOVER)

KERNREAKTOR
Gesellschaft m.b.H.



Die Herstellung der Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

Von Dipl.-Ing. Alfred Bauer, Karlsruhe, Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH. und
Dipl.-Ing. Jürgen Seetzen, Hannover, Technische Hochschule, Lehrstuhl für Massivbau

KERNREAKTOR
Bau- und Betriebs-Gesellschaft m. b. H.
Zentralbücherei

Sonderdruck aus:

Beton- und Stahlbetonbau

Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin-Wilmersdorf, Hohenzollerndamm 169

55. Jahrgang
Heft 12 — Dezember 1960

Die Herstellung der Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

Von Dipl.-Ing. Alfred Bauer, Karlsruhe, Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH. und
Dipl.-Ing. Jürgen Seetzen, Hannover, Technische Hochschule, Lehrstuhl für Massivbau

DK 621.039.52 Atomreaktoren — DK 666.972.123 Besondere Schwerbetonarten

Überblick

Die vorliegende Darstellung befaßt sich im Anschluß an [1] mit der Bauausführung der Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2, der etwa 10 km nördlich von Karlsruhe an der Landstraße von Leopoldshafen nach Blankenloch errichtet worden ist. Neben der Beschreibung der Herstellung der fest mit dem Gebäude verbundenen zylinderförmigen Strahlenschutzwand des Reaktors werden auch betontechnologische Fragen behandelt, die bei der Herstellung verschiedener beweglicher Sonderteile der Abschirmung aufgetreten sind.

Eingangs werden das Bauwerk beschrieben und die wesentlichen Bestimmungen der Leistungsbeschreibung wiedergegeben. Nach der Baustelleneinrichtung werden die Bauausführung und die Ergebnisse der Mörtel- und Betonuntersuchungen behandelt. Ausführlich wird in einem Abschnitt auf Sonderfragen eingegangen, wie Schalungsdruck, elastische Verformungen, Arbeitsfugen, Korrosionsgefahr, Erstarrungstemperaturen und das Betonieren bei heißem Sommerwetter. Der abschließende Abschnitt erläutert das Ausbetonieren der Reaktordeckel, der Stopfen für waagerechte Kanäle und der Brennelementoberteile mit Spezialmörteln verschiedener Wichte.

1. Einleitung

Die Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2, der sogenannte biologische Schirm, hat die Aufgabe, die im Reaktor erzeugten und aus dem thermischen Schirm noch austretenden Gamma- und Neutronenstrahlen auf 1/10 der international zulässigen Dosisleistung abzuschwächen. Hierfür war ein Schwerbeton mit einem Raumgewicht von etwa 4 g/cm³ unter Verwendung von Eisenerz als Zuschlagstoff innerhalb einer bleibenden Stahlchalung herzustellen.

Die Vorarbeiten und Vorversuche [1] hatten folgende Ergebnisse:

Für die Herstellung wird ein Auspreßverfahren angewandt mit Rücksicht auf:

1. die sehr geringen Maßtoleranzen der Einbauten (bis 0,1 mm/m),
2. ein erschütterungsfreies Einbringen des Betons,
3. ein geringes Schwindmaß,
4. die Unzugänglichkeit der Schalung durch viele unregelmäßig geformte Einbauten,
5. ein hohlraumfreies Betongefüge und eine einwandfreie Umschließung der Einbauten.

Für die Auspreßarbeiten wurde das Colcrete-Verfahren gewählt. Als Zuschlagstoff diente westafrikanischer Magnetit (Fe₃O₄) der Firma Frank u. Schulte, Essen, in den Korngruppen Sand 0/3, Grobzuschläge 30/60 und 60/100 mm, als Bindemittel wurde mit Rücksicht auf die Hydrationswärme Sulfadur und als Zusatzmittel Injektsika verwendet.

Die Arbeiten wurden in der Zeit vom 3. 2. 59 bis 22. 10. 59 ausgeführt. Von diesen 9 Monaten wurden jedoch für die Betonierarbeiten lediglich 3 Monate in Anspruch genommen. Die restlichen 6 Monate entfielen auf den Stahl- und Rohrleitungsbau.

Der Auftrag für die Herstellung der Betonierarbeiten wurde der Arbeitsgemeinschaft Reaktorgebäude Ph. Holzmann AG., Wayss u. Freytag AG., Ed. Züblin AG., M. Jordan G.m.b.H. mit der Baugesellschaft Hagen m.b.H. als Subunternehmer für die Colcrete-Arbeiten erteilt.

2. Baubeschreibung und Ausführungsbestimmungen

Der Reaktor ist in einem zylindrischen Gebäude von 38,0 m Innen-

durchmesser und einer Gesamthöhe von 42,4 m untergebracht (vgl. Bild 1). Das Gebäude besteht aus einem 15,4 m hohen Betonunterbau und einer 27,0 m hohen Stahlkuppel. Der mehrgeschossige Betonunterbau ist 6,2 m unter Gelände gegründet. Er dient zur Aufnahme der Reaktorbetriebskreisläufe für schweres Wasser, voll entsalztes Wasser, Helium und Kohlendioxyd sowie von Experimentierkreisläufen und -einrichtungen. Seine ihn nach oben abschließende Decke liegt 9,26 m über Gelände und ist der Boden des Haupt-Experimentierraumes, der von der Stahlkuppel umschlossen wird. In diesem Raum befinden sich außer dem Reaktor ein Rundlaufkran für 60 t und der sogenannte Absetzblock, der im wesentlichen der Lagerung, der Montage und dem Transport von radioaktiven Gegenständen oder Stoffen dient.

Wie Bild 1 zeigt, liegt die Unterkante des Schwerbetonschirmes ungefähr 7 m über Geländehöhe. Er hat etwa zylindrische Form mit einem Durchmesser und einer Höhe von je rd. 9 m. Seine Wanddicke beträgt 2,5 m, die Dicke der unteren, waagerechten, 7 m frei gespannten Platte 2 m. Der frei bleibende Raum für das Reaktorcore, den thermischen Schirm und die Deckel über dem Core hat einen Durchmesser von 4 m und eine Höhe von 7 m. Nach Abzug aller Einbauten verbleibt ein mit Schwerbeton auszufüllender Hohlraum von 455 m³.

In der 2,5 m dicken Zylinderwand des biologischen Schirmes mußten die Einbauten (eine Vielzahl von Kanälen, Rohren, Nischen, Leitungen und Verbänden in allen möglichen Richtungen) so untergebracht werden, daß, vom Core aus gesehen, der Schwerbeton an keiner Stelle weniger als 1,8 m dick ist. Stahlchalung, Verbände und Einbauteile konnten besonders auch im Hinblick auf das Packen der Magnetitgrobzuschläge mit anschließendem Vermörteln nur in Abschnitten von 1 bis 2 m Höhe aufgebaut werden. Wegen der ungewöhnlich vielen, den Arbeitsablauf bestimmenden Einflüsse mußten die einzelnen Montage- und damit auch Betonierabschnitte in enger Zusammenarbeit zwischen Stahlbau, Rohrleitungsbau und Betonbau festgelegt werden, was zum Teil erst im Verlauf der Bauausführung möglich war. Aus Zeitnot mußte im oberen Teil des biologischen Schirmes in zwei Abschnitten übereinander gearbeitet werden. So wurden im unteren Abschnitt 3 die Magnetitgrobzuschläge gepackt, während in den darüberliegenden Abschnitten 5 und 6 die Stahlbau- und Rohrleitungsmontagen durchgeführt wurden. Die Steinpacker waren gegen herunterfallende Werkzeuge, Schweißfunken und glühende Stahltropfen durch eine mit Asbestplatten belegte kräftige Holzbühne, etwa in der Mitte des Abschnitts 4 (vgl. Bild 1), geschützt.

Nach Abschluß der Stahlbau- und Rohrleitungsverlegearbeiten eines Bauabschnitts wurden durch den TÜV und die Abnahmeabteilung des Bauherrn sämtliche Einbauten auf Vollständigkeit, Lage und Einhaltung der Toleranzen geprüft. Erst danach wurde der Abschnitt zum Packen der groben Magnetitzuschläge freigegeben. Zwischen dem Packen und der Freigabe zum Auspressen mit Magnetitmörtel mußten die Einbauten wiederum überprüft werden. Auch nach dem Vermörteln wurden bei besonders empfindlichen Bauteilen, wie z. B. den waagerechten Experimentierkanälen, die Achslage und Geradheit geprüft. Diese vielen Prüfungen erscheinen auf den ersten Blick übertrieben zu sein. Die Ergebnisse zeigten jedoch, daß im Hinblick auf den Zweck des zu erstellenden Bauwerks keine Zeit und Arbeit, auch bei größter Termintnot, gescheut werden durften. Nach dem Packen der Grobzuschläge konnten dabei entstandene Mängel noch behoben werden. In einem Fall wurde es erforderlich, einen Teil der Grobzuschläge wieder auszupacken, um Reparaturen an den Rohrleitungen durchführen zu können.

Der ursprüngliche nicht eingeplante Zeitaufwand für diese Abnahmen konnte durch Zeiteinsparungen beim Packen der Grobzuschläge wieder voll ausgeglichen werden. Die Ausführung zeigte, daß ein Betonierabschnitt (im Mittel 150 t Grobzuschläge) bei zweischichtigem Betrieb in 6...10 Tagen (gegenüber den angesetzten 14 Tagen) gepackt werden konnte.

Da hier erstmalig in Deutschland für einen großen Baukörper Auspreßschwerbeton hergestellt wurde, sollen die wichtigsten Ausführungsbestimmungen aus der Leistungsbeschreibung wiedergegeben werden. Wie in Abschnitt 4 gezeigt wird, sind allerdings unter Berücksichtigung der Erfahrungen bei den einzelnen Betonierabschnitten noch manche Ausführungsbestimmungen geändert oder verschärft worden.

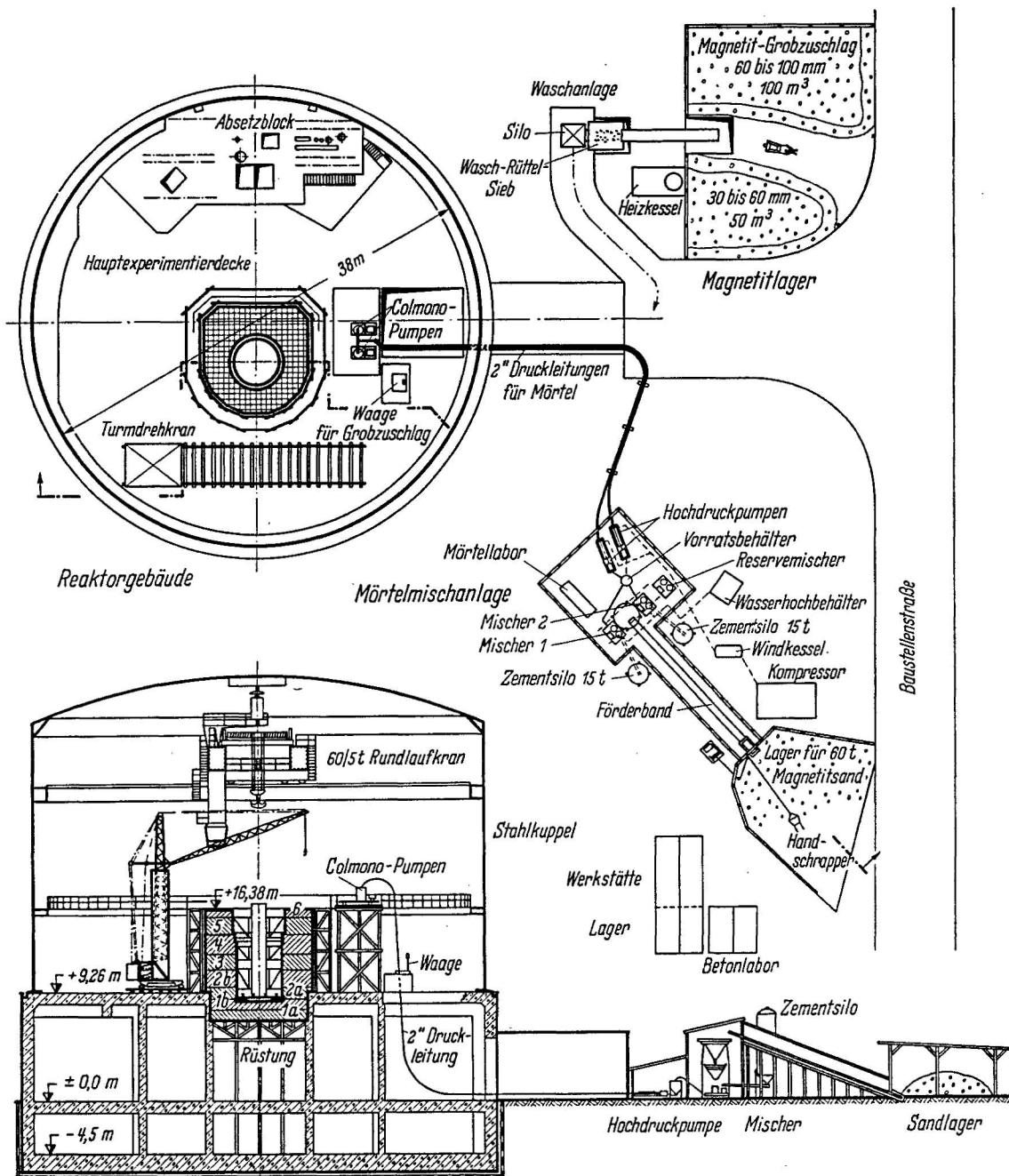
Für den Abschirmbeton war eine Rohwichte des erhärteten Betons von $3,85 \text{ g/cm}^3$ und eine Mindestdruckfestigkeit von 225 kg/cm^2 zu gewährleisten. Tatsächlich wurde überall eine Rohwichte von $4,0 \text{ g/cm}^3$ erreicht. Es wäre aber unbillig gewesen, vom Unternehmer eine Gewähr hierfür zu verlangen.

Auf eine genaue Festlegung des Mischungsverhältnisses wurde absichtlich verzichtet, dieses vielmehr von Vorversuchen abhängig gemacht.

Der eingebaute Beton durfte keine Hohlräume enthalten und keine Spalte unter oder neben den Einbauten freilassen, wie sie durch schlechtes Fließen des Mörtels, durch ungenügendes Packen der groben Zuschläge, durch Absetzen oder Schwinden des Mörtels hätten entstehen können.

Der grobe Zuschlag mußte frei von Verunreinigungen sein und durfte auch keinen Magnetitstaub an der Oberfläche aufweisen. Gestein mit nur geringem oder gar keinem Magnetitgehalt mußte aus den groben Zuschlägen aussortiert werden. Dies war ziemlich einfach, da solches Gestein nicht schwarz war, sondern eine hellgraue Färbung hatte. Die Zuschlagstoffe mußten trocken angeliefert, auf der Baustelle auf einem Betonboden gelagert und vor Regen und Staub geschützt werden.

Die groben Zuschlagstoffe mußten von der Wasch- und Siebanlage so zur Einbaustelle transportiert werden, daß sie möglichst nicht



Schnitt durch das Reaktorgebäude und die Mörtelmischanlage

Bild 1. Baustelleneinrichtung

zerschlagen wurden. Mehrmaliges Umladen mußte vermieden werden. Das Magnetit-Grobkorn durfte nur über flache Rutschen, mit Klappkübeln oder Eimern in die Stahlschalung eingebracht werden. Es durfte keinesfalls mehr als wenige Dezimeter frei fallen und auf irgendwelche Einbauten prallen.

Der Mörtel mußte nach Ablauf der genau festgelegten Mischzeit bis unmittelbar vor dem Einpumpen in die Schalung in Bewegung gehalten werden.

Innerhalb der Stahlschalung waren genügend Auspreßrohre, $\varnothing 1\frac{1}{2}$ "", so einzusetzen und vorübergehend zu befestigen, daß der Mörtel mit Sicherheit an alle Stellen des auszubetonierenden Raumes floß. Die Rohre durften gekrümmt werden und die abgelenkten Rohrteile im Beton verbleiben. Außerdem waren genügend Beobachtungsrohre zur Überwachung des Mörtelpegels vorzusehen (Bild 2). Beim Auspressen waren die Rohre entsprechend dem Steigen des Mörtelpegels zu ziehen und schließlich ganz zu entfernen.

Der Einpreßmörtel durfte mit Rücksicht auf die Belastbarkeit der Stahlschalung und ihre elastischen Verformungen auf der gesamten Fläche des biologischen Schirmes nur gleichmäßig und nicht mehr als 30 cm/h aufsteigen. In die Oberfläche eines Betonierabschnittes waren, nachdem der Mörtel ausgetreten war, grobe Zuschläge möglichst dicht einzudrücken, um eine gute Verzahnung mit dem nachfolgenden Betonierabschnitt zu sichern.

Die Oberfläche des Betons der einzelnen Bauabschnitte mußte durch Sackleinen abgedeckt und feucht gehalten sowie vor dem Einbringen von neuem Zuschlag sorgfältig gesäubert werden.

Da die Güte des fertigen Betons nur schwer nachzuprüfen ist, war ganz besonderer Wert auf ständige Überwachung vor und beim Auspressen zu legen. So waren Rohwichte und Kornaufbau bei jeder Lieferung festzustellen und ein Zeugnis einer amtlich anerkannten Prüfstelle für die Begutachtung von Erzen vorzulegen. Die Gewichte der eingebauten Stoffe (Magnetit-Grobkorn, -Sand, Zement, Zusatzmittel und Wasser) waren festzuhalten. Für Mörtelleistungs- und Mörtelgüteprüfungen mußten die Proben mit den auf der Baustelle zum Einsatz kommenden Maschinen hergestellt werden. Die Rohwichte, Konsistenz und Erstarrungszeit des Mörtels waren während des Auspressens ständig zu überwachen.

3. Baustelleneinrichtung

Wie Bild 1 zeigt, bestand die Baustelleneinrichtung aus folgenden drei Anlagen, die räumlich voneinander getrennt erstellt wurden.

1. Mörtelmischanlage mit Sandlager,
2. Magnetitlager mit Waschanlage für die groben Zuschlagstoffe,
3. Übergabeeinrichtung am Einbauort im Reaktorgebäude für Magnetit und Mörtel sowie Turmdrehkran.

Die Mörtelmischanlage stand außerhalb des Gebäudes, und der Magnetitmörtel mit einem spezifischen Gewicht von rd. 3 g/cm³

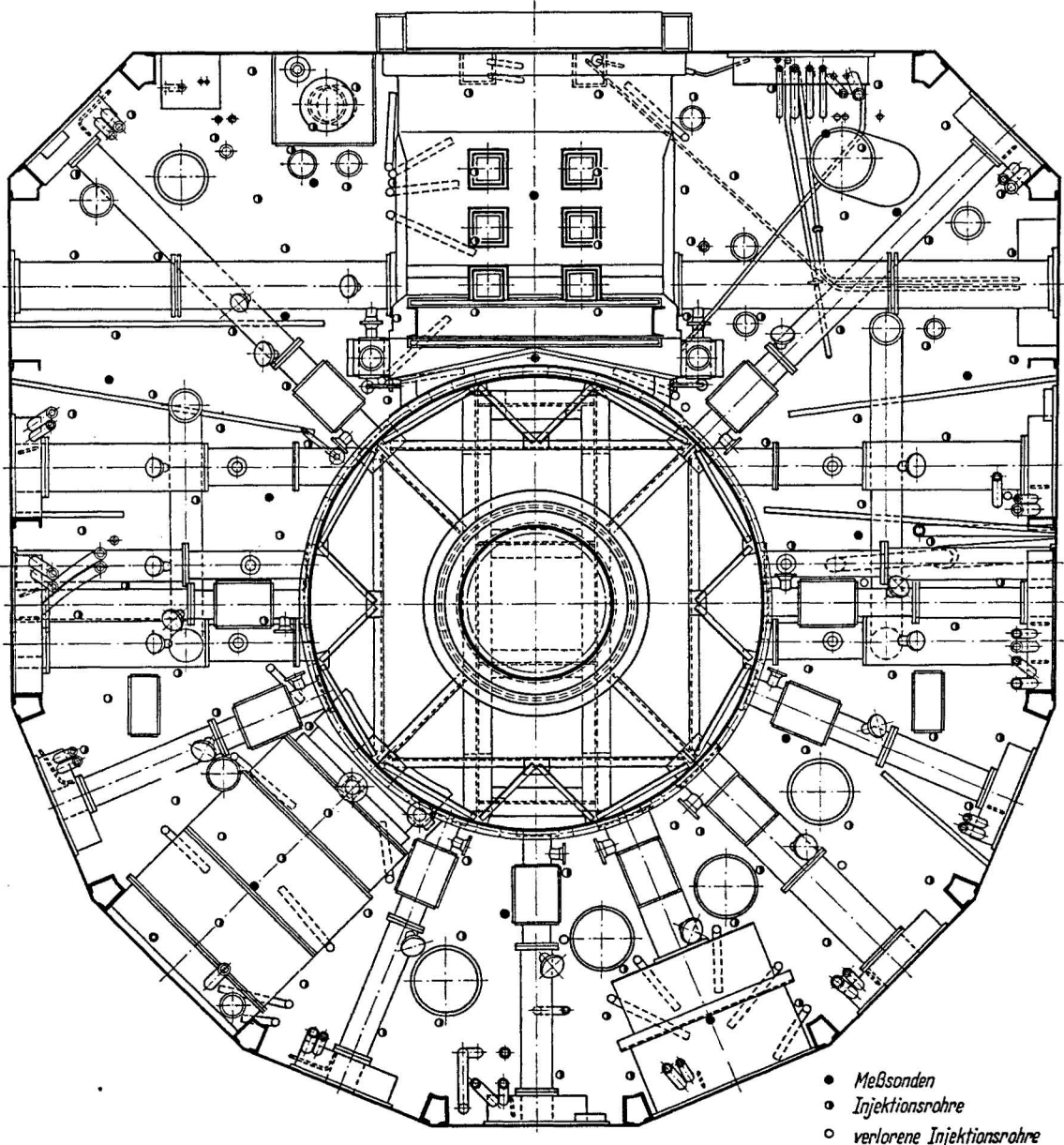


Bild 2. Waagerechter Schnitt durch den biologischen Schild mit Auspreß- und Meßrohren

wurde unter Einschaltung einer Zwischenhochdruckpumpe über eine Strecke von 60 m und auf eine größte Höhe von 18 m gepumpt. Zwei Hochdruckpumpen und Mörtelleitungen waren vorgesehen um bei Ausfall einer Anlage das Auspressen nicht unterbrechen zu müssen.

Der Magnetitsand lagerte in einem abgedeckten, an drei Seiten verschalteten Schuppen auf einer Magerbetonplatte. Mit einem Handschraper wurde der Sand auf das Förderband geschoben, das ihn zum Vorsilo der vollautomatischen Wiegeeinrichtung brachte. Die Silowaage bediente wechselweise die beiden Zweitrommelmischer.

Beim Colcrete-Verfahren wird der Mörtel in zwei Abschnitten gemischt. Zuerst Wasser und Zement in einer Trommel mit Hilfe einer Zentrifugalpumpe. Die Zement-Wassermischung gelangt dann über eine Verbindungsleitung zur zweiten, größeren Mischtrommel, in der der Sand zugegeben und mit Hilfe einer weiteren Zentrifugalpumpe der Colcrete-Mörtel hergestellt wird. Die Zentrifugalpumpen leisten etwa 2000 U/min. Dies ergibt gegenüber dem weit langsameren Mischen mit Freifall- oder Zwangsmischern eine wesentlich innigere Vermischung des Zements mit dem Anmachwasser und damit eine bedeutend größere Fließfähigkeit des Mörtels. Von den beiden Mischern gelangte der Mörtel in einen Vorratsbehälter, so daß die Hochdruckpumpen stetig arbeiten konnten. Am Einbauort im Reaktorgebäude pumpten zwei Colmono-Pumpen den Mörtel zu den Auspreßrohren und dienten gleichzeitig als weitere Zwischenspeicher. Eine Sprechanlage sorgte für eine schnelle Verständigung zwischen der Einbaustelle im Reaktor und der Mörtelmischanlage.

Die groben Zuschlagstoffe lagerten getrennt nach den beiden Korngruppen 30/60 mm und 60/100 mm ebenso wie der Magnetitsand in einem abgedeckten Schuppen. Die Erze wurden mit Schubkarren zum Förderband gebracht, das sie zum Wasch-Rüttelsieb transportierte. Ein Dampfkessel ermöglichte auch im Winter bei Frost ein einwandfreies Waschen der Zuschlagstoffe. Ein Motorjapaner brachte die mit Magnetit gefüllten Klappkübel vom Vorsilo bei der Waschanlage in das Reaktorgebäude, wo sie vom Turmdrehkran übernommen und auf der Tafelwaage abgestellt wurden.

Bis zum Einbringen und Hochziehen der beiden je rd. 40 t schweren Hauptträger des 60/5-t-Rundlaufkrans in das Gebäude konnte lediglich der unterhalb der Hauptexperimentierdecke liegende Teil des biologischen Schirmes gebaut werden (Betonierabschnitte 1a und 1b). Erst nach diesem Zeitpunkt war es möglich, das Dach des Gebäudes zu schließen. Ein provisorisches Dach über der Bodenplatte des Reaktors, bespannt mit einer Kunststoff-Folie, ermöglichte jedoch die umfangreichen Montagearbeiten auch im Winter. Außerdem wurde die Arbeitsstelle mit Warmluft beheizt. Da in drei übereinanderliegenden Ebenen gearbeitet wurde, nämlich am Reaktor, am Gebäudekran und am Dach des Gebäudes, waren umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, besonders beim Einbau der Dachkonstruktion. Zum Schutz der am Reaktor Arbeitenden wurde an den Trägern des Gebäudekrans ein weit ausladendes schweres Hänge-

gerüst angebracht. In enger-Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden, besonders dem Gewerbeaufsichtsamt und der Bauberufsgenossenschaft, konnte der Bau unter Einhaltung aller Sicherheitsmaßnahmen termingerecht und ohne Unfall durchgeführt werden.

4. Bauausführung

Vor Beginn jeden Betonierabschnitts wurden Stahlschalung und Einbauten von groben Verunreinigungen und Fettresten befreit. Am Beton haftende Bitumenflecke von dem Schutzanstrich für Edelstahlrohre (s. Abschnitt 6.4) wurden abgespitzt. Die wunschgemäß sehr unebenen Oberflächen der waagerechten Arbeitsfugen ließen sich erstaunlich gut mit einem Industriestaubsauger von allem losen Schmutz reinigen, womit die Gewähr für ein gutes Anbinden des nächsten Abschnittes gegeben war.

Am Förderband zur Waschanlage für die groben Zuschläge wurden die geringen Mengen nicht magnetithaltigen Gesteins, herausgelesen. Durch Wiegen des in jedem Betonierabschnitt eingebrachten groben Magnetits war die Möglichkeit gegeben, die Wichte des fertigen Betons zu berechnen, da die Anzahl und Wichte der Mörtelmischungen eines jeden Abschnitts genau festgehalten wurden. Nicht verbrauchtes Grobkorn wurde zurückgewogen.

Nach dem Wiegen wurden die Klappkübel auf der Verteilerbühne entleert. In Gummieimern wurden die Korngruppen einzeln in die Abschirmung zu den Steinsetzern herabgelassen.

Das sorgfältige Packen der groben Zuschläge von Hand war eine mühsame Arbeit, die aber auch an schwer zugänglichen Stellen einwandfrei ausgeführt werden konnte (vgl. Bild 3 und 4). In einer Achtstundenschicht wurden im Durchschnitt 20 bis 25 t Magnetit gepackt, und zwar wurde lagenweise die Körnung 60/100 mm eingebracht und danach mit der kleineren Körnung 30/60 mm so dicht wie möglich ausgefüllt (Bild 3). Hierbei waren jeweils etwa 6 Arbeiter in der Schalung mit Packen und 8 auf der Arbeitsbühne mit Anreichen der Steine beschäftigt. Dazu kamen noch etwa 10 Arbeiter für Waschen, Wiegen, Transport und Aufsicht.

Vor dem Einbringen des Grobzuschlages war die Frage offen, ob in einzelnen Bereichen zur Zeit- und Arbeitersparnis die groben Steine in geeigneter Kornzusammensetzung eingeschüttet werden durften. Da aber auch in den oberen Arbeitsabschnitten hinter senkrechten Rohren und Schächten von Hand gepackt werden mußte und das Einschütten zusätzlich ein Verdichten des Zuschlages erfordert hätte, wurden die Magnetitsteine im gesamten Schild von Hand gesetzt. Das Rütteln des Magnetits mit Oberflächenrüttlern hätte zudem die empfindlichen Einbauten schädigen können. Es soll aber betont werden, daß die sichere aber auch etwas primitive Art, das Steingerüst für Auspreßbeton von Hand einzubringen, kein allgemeines Kennzeichen für diese Betonierart ist. In anderen Fällen läßt sich die Handarbeit zweifellos weitgehend vermeiden.

Sehr hinderlich war für die Steinsetzer in den Abschnitten 1a und 1b eine Raumbewehrung \varnothing 16 mm im Abstand von rd. 40 cm in



Bild 3. Magnetitgrobzuschläge 30/60 und 60/100 mm von Hand gepackt

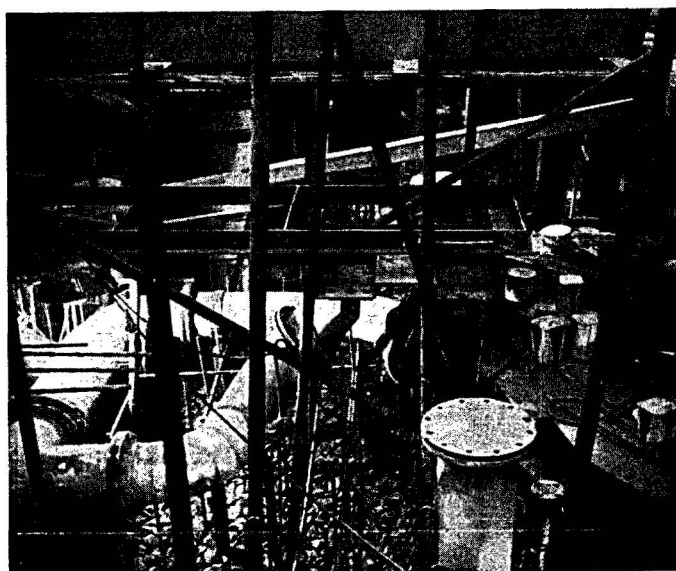


Bild 4. Blick in den biologischen Schild mit Einbauten, Magnetitgrobzuschlägen und Auspreßrohren

allen drei Richtungen. Diese Bewehrung stellt in der unteren Abschirmung, die als Platte beansprucht ist, aber wegen der vielen Leitungen nur in wenigen durchgehenden Streifen zu bewehren war, eine Verbügelung her. Aus der Überlegung, daß Schwind- oder Temperaturkräfte in diesem dicken Betonkörper durch 12,5 cm²/m² Rundstahl ohnehin nicht aufzunehmen sind, wurde die Raumbewehrung bei den weiteren Abschnitten weggelassen.

Vor dem Packen jeden Abschnittes wurden die Auspreßrohre mit 1 1/2" Ø (etwa 2 je m²) sowie die Meßrohre mit 2" Ø (etwa 0,3 je m²) gesetzt und an den Verbänden befestigt. An schwierigen Stellen wurden zusätzliche Rohre gesetzt, die zum Teil auch abgewinkelt geführt wurden. Nach den Erfahrungen der ausführenden Firma und den Beobachtungen bei den Großversuchen hätten weniger Auspreßrohre genügt (≈ 1/m²). Um den Mörtelspiegel jedoch möglichst gleichmäßig steigen zu lassen, wurde die größere Anzahl gewählt. Bild 2 zeigt die ungefähre Anordnung der Auspreß- und Meßrohre im Betonierabschnitt 2a. Die waagerechten Verbände zwischen Außen- und Innenschalung sind darin der Übersichtlichkeit wegen weggelassen. Nach genauem Plan wurde in jedes der nummerierten Auspreßrohre entsprechend dem zu vermörtelnden Volumen eine vorbestimmte Zeit lang Mörtel gepumpt. Im Normalfall konnten rd. 5 m³ Mörtel je Stunde eingebracht werden, was etwa 11 m³ Beton entspricht. Zu den beiden Kolonnen, die die Schläuche umkuppelten, bestand Sicht oder zumindest Rufverbindung von den Mörtelpumpen aus (Bild 5).

Während aller Betoniervorgänge wurde das Steigen des Mörtelspiegels laufend gemessen. In Meßrohren, die auf die ganze Länge mit Schlitzfenstern versehen waren, um den Mörtel eindringen zu lassen, hingen elektrische Sonden in genau bestimmter Höhe, worin der Mörtel einen Stromkreis schloß, der an einer gemeinsamen Anzeigetafel ein Lämpchen aufleuchten ließ. Die genaue Uhrzeit des Aufleuchtens wurde festgehalten, die Sonde jeweils wieder gereinigt und um 20 cm höher gehängt. So konnte das Steigen des Mörtelspiegels über den ganzen Schildgrundriß verfolgt und im Zweifelsfall später aufgezeigt werden.

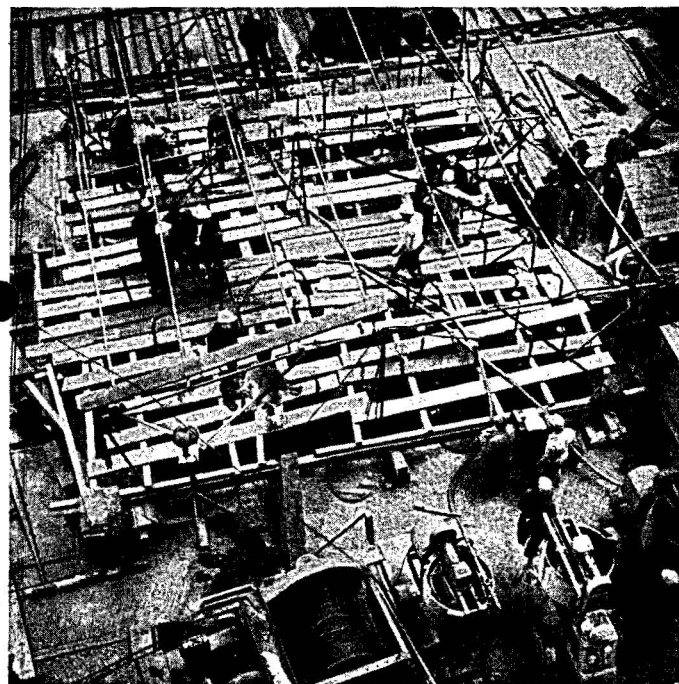


Bild 5. Beim Auspressen von Betonierabschnitt 1a. Im Vordergrund rechts die Colmonopumpen

Besondere Sorgfalt wurde während des gesamten Betoniervorganges auf die Überwachung des Mörtelzustandes gelegt, da von ihm die Güte des fertigen Betons entscheidend abhängt. Aus den Colmonopumpen beim Schild wurden laufend Proben entnommen und an ihnen die Temperatur, Fließfähigkeit, Rohwichte, Erstarrungszeit und das Absetzmaß gemessen. Die Mörtelkonsistenz wurde zusätzlich ständig durch mindestens einen Sachverständigen der Technischen Hochschule Karlsruhe festgestellt. Die Fließfähigkeit des

Mörtels konnte sehr gut mit dem beim Colcrete-Verfahren zur Verfügung gestellten Viskosimeter gemessen werden. Hierbei wird auf eine rechteckige Rinne, deren eines Ende geschlossen ist, am geschlossenen Ende ein Trichter aufgesetzt und dieser mit Mörtel gefüllt. Danach wird der Trichter unten geöffnet, und der Mörtel fließt in der Rinne um ein bestimmtes Maß, das seine Fließfähigkeit kennzeichnet. Die Rohwichte wurde durch Wiegen in einem 1-dm³-Gefäß gemessen und das Absetzmaß [gemäß 2] bestimmt. Der Beginn des Erstarrens konnte dabei mit beobachtet werden. Daneben wurden in Anlehnung an DIN 1164 Prismen 4 x 4 x 16cm hergestellt und nach 28 Tagen auf Biegezug- und Druckfestigkeit untersucht. Bei jedem Betonierabschnitt sind außerdem in besonderen Schalungen Würfel mit 30 cm Kantenlänge, die mit grobem Magnetit wie im Schild gefüllt waren, ausgepreßt worden. Aus den aufgezeichneten Werten konnte nachträglich die mittlere Zusammensetzung des Abschirmbetons berechnet und den bei den Vorversuchen (Werte in Klammern) festgelegten gegenübergestellt werden. Bei einem mittleren Raumgewicht von 3,984 t/m³ waren enthalten:

	kg/m ³	
Magnetit		
grob 30/ 60 mm 37,8 % (33)	1000	(890)
60/100 mm 62,2 % (67)	1634	(1810)
	2634	(2700)
Mörtel	1350	(1355)
Magnetitsand 0/3	778	(780)
Zement (Sulfadur)	389	(391)
Wasser	179	(180)
Injektsika	4	(4)
	1350	(1355)
Zusammengefaßt		
Magnetit	3412	(3480)
Zement	389	(391)
Wasser	179	(180)
Injektsika	4	(4)
	3984	(4055)

Aus dem Mischungsverhältnis kann schließlich die Zusammensetzung des Abschirmbetons nach Elementen berechnet werden, die für die rechnerische Ermittlung von Abschirmkonstanten erforderlich ist. Tafel I enthält die Zusammensetzung nach Elementen.

Tafel I. Zusammensetzung des Magnetitbetons nach Elementen

Element	Anteil %	
H	0,48	(0,50)
O	32,01	(32,20)
Mg	0,56	(0,43)
Al	1,24	(0,97)
Si	1,74	(1,72)
Ca	4,49	(4,40)
Fe	59,41	(59,78)
S	0,07	(0,00)

5. Ergebnisse der Mörtel- und Betonuntersuchungen

Über die Ergebnisse der umfangreichen Mörtel- und Betonuntersuchungen während des Betonierens und im Anschluß daran sei nur kurz berichtet. Zum Vergleich wird auf die Tafeln III bis VII in [1] hingewiesen.

Die Rohwichte des Frischmörtels betrug 2,825 bis 3,096 g/cm³ mit einem Mittelwert von 2,973. Das zuvor beschriebene Fließmaß lag — mit einer Ausnahme von 6 Zoll — zwischen 15 und 22 Zoll. Die mittlere Druckfestigkeit des Mörtels nach 28 Tagen betrug, gemessen an Zylindern von 10 cm Höhe und 10 cm Ø, 432 kg/cm² und an Prismen 4 x 4 x 16 cm 489 kg/cm²; für letztere ergab sich eine Biegezugfestigkeit von 87 kg/cm².

Die Rohwichte des Betons nach 28 Tagen an 30-cm-Würfeln, im Auspreßverfahren hergestellt, lag zwischen 4,06 und 4,18 g/cm³, seine Druckfestigkeit zwischen 336 und 486 kg/cm² mit einem Mittelwert von 423 kg/cm² und Streuungen der zusammengehörigen Werte eines Betonierabschnittes von höchstens 8%. Gefordert waren 225 kg/cm².

6. Sonderfragen

6.1 Schalungsdruck

Wegen der Einhaltung der geringen Maßtoleranzen der Einbauten, die an der bleibenden Stahlschalung befestigt sind, kommt dem Schalungsdruck des Auspreßschwerbetons erhebliche Bedeutung zu. Mit den Annahmen: 1,5 m hohe Betonierabschnitte, Raumgewicht des Steingerüsts $\gamma = 3,0 \text{ t/m}^3$, des Mörtels $\gamma = 3,0 \text{ t/m}^3$, Reibungswinkel des groben Magnetits $\rho = 40^\circ$ und einer Steiggeschwindigkeit des Mörtels von 0,30 m/h war ein Schalungsdruck von etwa $3,5 \text{ t/m}^2$ berechnet worden, mit einer größten Druckhöhe von $4,0 \text{ t/m}^2$. Die Schalung wurde daraufhin für einen Druck von $3,5 \text{ t/m}^2$ auf Formänderungen und Festigkeit untersucht. Eine unnötig hohe Festlegung dieses Druckes hätte erhebliche Mehrausgaben erfordert. Da die Berechnung des Schalungsdruckes mit Unsicherheiten (Reibungswinkel, Erstarrungszeit) verbunden ist, wurde er, um sicher zu gehen, beim wichtigsten Abschnitt 2b durch Glötzlgeber gemessen. Die Anordnung der Geber und die Meßergebnisse zeigt das Bild 6. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung mit der Berechnung.

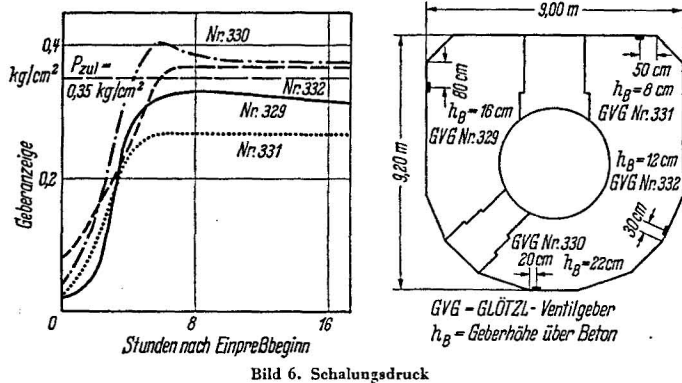


Bild 6. Schalungsdruck

6.2 Elastische Verformungen der unteren biologischen Abschirmung

In [1; Abschnitte 2.22 und 8.1] wurde bereits gesagt, daß die untere waagerechte, rd. 2,0 m dicke Abschirmung den gesamten Reaktor tragen muß. Darin ist der Unterstützungsring der Reaktortanks einbetoniert, deren maßgerechte Lage für alle anderen Reaktorteile wesentlich ist. Die Stahlschalung der unteren Abschirmung wurde im Bauzustand durch 2,0 m hohe stählerne Fachwerke getragen, um die Durchbiegungen möglichst klein zu halten. Da sich etwa in der Mitte der Abschirmung noch eine Betonwand an der Lastenaufnahme beteiligen mußte, war die Biegefläche dieser von vielen großen Rohrleitungen durchbrochen und deswegen uneinheitlich bewehrten Platte nicht vorzuberechnen.

Aus diesem Grunde ist an der bis zu 7,0 m weit gespannten Platte die Durchbiegung gemessen worden. Offensichtlich lagen aber die Ergebnisse der schwierigen optischen Messungen im Bereich der Meßgenauigkeit, so daß sich kein klares Bild von den sehr geringen Durchbiegungen gewinnen ließ. Nach einer Überschlagsrechnung war eine größte Durchbiegung von 3 mm zu erwarten. Die größte gemessene senkrechte Verschiebung betrug 2,4 mm. Die Lage des Unterstützungsringes erwies sich nach dem Betonieren und Entfernen der Fachwerkträger als einwandfrei maßgerecht, d. h. es zeigten sich Unterschiede in der Horizontallage von 0,4 mm bei einem Durchmesser von 4,0 m und einer Toleranz von 0,5 mm.

6.3 Ausbildung waagerechter Arbeitsfugen

In [1; Abschnitt 8.4] ist eine Lösungsmöglichkeit für die waagerechten Arbeitsfugen angedeutet. Sie sollten danach so hergestellt werden, daß der Mörtel aus dem Steingerüst austritt und grober Magnetit in ihn eingedrückt wird, bis sich eine unregelmäßige Oberfläche aus Mörtel und daraus herausragenden groben Magnetitbrocken ergibt. Bei der Ausführung der ersten beiden Betonierabschnitte erwies sich dieser Weg aber als unsicher; denn bevor das Steingerüst vollständig von Mörtel bedeckt war, stieg dieser um die Einpreßrohre mindestens 10 cm über das Steingerüst. Durch das Eindringen des groben Magnetits stieg der Mörtelspiegel weiter, so daß sich schließlich eine etwa 10...15 cm dicke Betonschicht mit nicht nachprüfbarer Wichte ergab. Bei den folgenden Abschnitten führte deshalb ein anderer Weg zum gewünschten Ziel. Der Mörtel durfte

um die Einpreßrohre gerade aus dem groben Zuschlag herausquellen, dann wurde das Vermörteln beendet.

1 bis 2 Tage nach dem Einpressen wurden alle losen Magnetitsteine entfernt. Auch die so entstandenen gebirgigen Oberflächen (Bild 7) konnten vor Beginn des Packens für den nächsten Abschnitt mit einem Industriestaubsauger gut gereinigt werden. Die Einpreßrohre wurden dann in die Täler gesetzt, wodurch sich ein einwandfreier Anschluß an den vorhergehenden Abschnitt ergab. Wie Versuche im großen Maßstab gezeigt haben, fließt der Mörtel auch in das Steingerüst, ohne daß Hohlräume entstehen, wenn das Einpreßrohr nicht genau in das Tal gesetzt wird. Der sicherere Weg ist jedoch, die Einpreßrohre in den tiefsten Stellen der Arbeitsfuge anzuordnen und überall den Mörtel nach oben zu drücken.



Bild 7. Arbeitsfuge

6.4 Korrosion von Einbauten im Magnetitbeton

Die zahlreichen, für den Betrieb des Reaktors wesentlichen Durchführungen aus Stahl und Edelstahl machten die Frage nach der Korrosionsgefährdung dieser Einbauten in Magnetitbeton bedeutungsvoll. Von schwerwiegenden Korrosionserscheinungen in Abschirmbeton war bisher nichts Sicheres bekannt geworden, und es ist auch unwahrscheinlich, daß Magnetitbeton sich gegenüber Stahl anders verhält als Kiesbeton, bei dem bekanntlich der Zementstein einen ausgezeichneten Korrosionsschutz darstellt.

Die bei Betonierbeginn etwa einjährigen Probekörper, die im Freien gelagert waren und Stahleinbauten enthielten, boten die Möglichkeit zur Überprüfung. Die einbetonierten Stahlrohre waren an den betonberührten Stellen erwartungsgemäß völlig rostfrei, obgleich sie vor dem Betonieren angerostet waren. Allerdings lassen sich offensichtlich beim Auspreßverfahren kleine Luftsinschlüsse nicht vermeiden, wie alle vier untersuchten Verfahren gezeigt haben. An den Stellen, an denen solche Poren waren, zeigten die Stahleinbauten Rostbildung.

Ein ausführliches Gutachten des Instituts für Beton und Stahlbeton der Technischen Hochschule Karlsruhe zu dieser Frage brachte jedoch die Gewißheit, daß diese örtliche Rostbildung nicht auf besondere Eigenschaften des verwendeten Betons oder seiner Mischungsanteile zurückzuführen ist, sondern ebenso bei gewöhnlichem Beton aufgetreten wäre. Die Rostbildung war trotz der ungünstigen Lagerungsbedingungen an keiner Stelle tiefgehend, so daß mit Sicherheit geschlossen werden kann, daß sie am Stahl zum Stillstand gekommen war.

Nicht ganz klar ist jedoch das Verhalten von Edelstahl in Beton, da bei Edelstahl eine Korrosion nach Wegfall der äußeren Ursache nicht unbedingt zum Stillstand kommt. Diese Frage muß noch durch Langzeitversuche geklärt werden. Zur Sicherheit wurden die besonders wichtigen Edelstahlleitungen vor dem Packen der Zuschläge mit

einem Rostschutzmittel mehrmals angestrichen und gleichzeitig wegen der Gefahr der mechanischen Beschädigung mit Sackleinen umwickelt. Andere Rohrleitungen und Schächte mit verhältnismäßig dünnen Wänden aus Normalstahl wurden zum Rostschutz mit Zementmilch gestrichen. Rohre, die auch äußerlich verzinkt waren, wurden ohne besondere Maßnahmen einbetoniert, da die Zinkschicht nur im Inneren der Rohre erforderlich und die zu erwartende Reaktion mit dem Beton nicht schädlich ist.

6.5. Messung der Erstarrungstemperaturen

In der biologischen Abschirmung sind für spätere Feststellungen beim Betrieb Temperaturmeßstellen eingebaut. An einigen dieser Stellen wurden die Temperaturen beim Erhärten des Betons gemessen. Die in Bild 8 wiedergegebenen Meßergebnisse zeigen gute Übereinstimmung mit den Temperaturmessungen der Vorversuche [vgl. 1; Bild 12].

Wasser-Zusatzmittel-Gemisches in der ersten Trommel des Colcrete-Mischers ab. Der beste Weg, diese Temperatur herabzusetzen ist, das Wasser des Gemisches zu kühlen.

Die Mischtemperatur ist

$$T = \frac{C_Z \cdot G_Z \cdot T_Z + C_W \cdot G_W \cdot T_W}{C_Z \cdot G_Z + C_W \cdot G_W}$$

C spez. Wärme $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ Fußzeiger: Z Zement
W Wasser

G Gewicht kg

T Temperatur $^\circ\text{C}$

Für das vorliegende Gemisch war

$$T = 0,29 T_Z + 0,71 T_W,$$

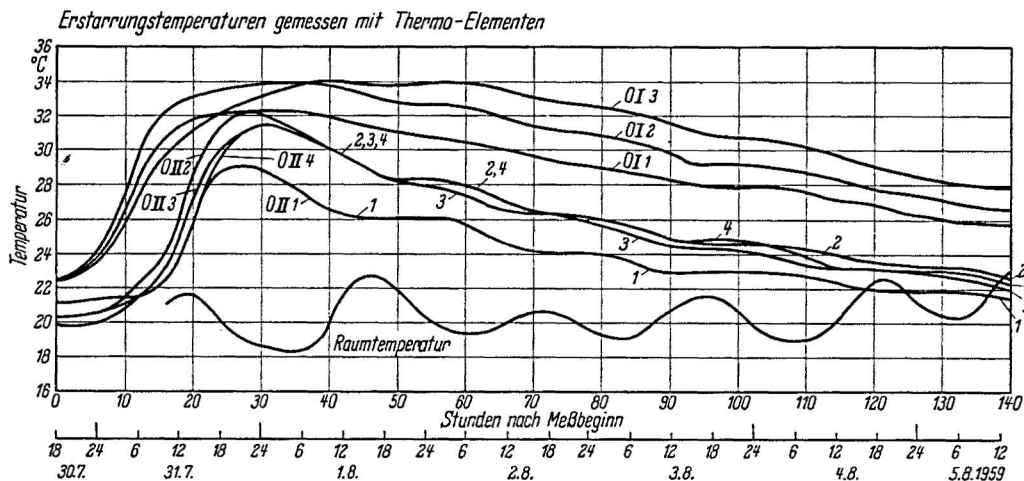
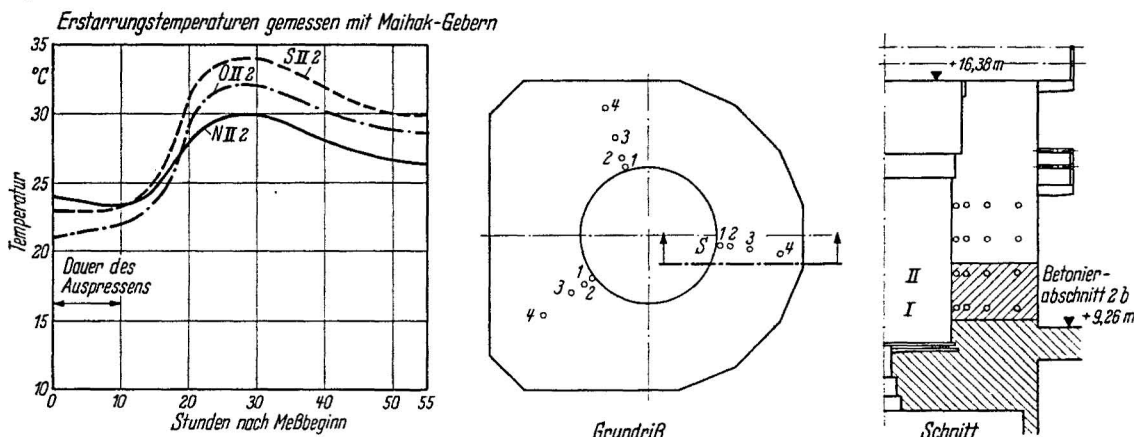


Bild 8. Erstarrungstemperaturen

6.6 Einflüsse der Temperatur auf die Fließfähigkeit des Mörtels

Eine bedenkliche Erscheinung zeigte sich gegen Ende des Betonierabschnittes 1b, als der Mörtel plötzlich an Fließfähigkeit verlor und den im Abschnitt 5 angegebenen Vergleichswert von 6 Zoll gegenüber dem nächsthöheren Mindestwert von 15 Zoll aufwies.

Als Ursache konnte am nächsten Tag festgestellt werden, daß der frisch angelieferte Zement noch verhältnismäßig heiß war, als er mit dem Zusatzmittel und Wasser vermischt wurde. Dies führte, wie auch Versuche zeigten, zu einer zu schnellen Gasentwicklung des Treibmittels im Zusatzmittel und dadurch zu einer schaumigen, wenig fließfähigen Mörtelbeschaffenheit.

Weil die Zementlieferfirma leider nicht in der Lage war, die Lieferung genügend abgekühlten Zementes zu gewährleisten, andererseits auf das Zusatzmittel nicht verzichtet werden konnte, mußte ein Weg gefunden werden, die Mörteltemperatur in jedem Fall, auch an heißen Sommertagen, niedrig zu halten. Die ausreichende Fließfähigkeit des Mörtels zur sicheren Auffüllung der Hohlräume im Magnetitgestein hängt vor allem von der Temperatur des Zement-

so daß noch bei Zementtemperaturen von 60° Mischtemperaturen von 20° zu erreichen waren, wenn das Wasser auf 5° abgekühlt wurde. Wegen dieser Überlegung entschloß man sich, das Mischungswasser durch schmelzendes Eis zu kühlen, wodurch Wassertemperaturen um 5° C erreicht werden konnten. Im ganzen gesehen hat sich diese nicht schwierig durchzuführende Maßnahme sehr gut bewährt.

Da sich aber gezeigt hatte, wie temperaturanfällig die Fließfähigkeit des Mörtels war, wurden für das Betonieren im Sommer zur Sicherheit einige weitere Maßnahmen getroffen. So wurden der Vorratsbehälter des Mörtels vor den Hochdruckpumpen außen mit Schmelzwasser gekühlt, weiter die Mörteldruckleitung mit Sackleinen umwickelt und feucht gehalten und vor allem wurde nachts betoniert. Die letzte Maßnahme bewirkte zusätzlich ein ganz ungestörtes Arbeiten auf der betriebsamen Reaktorbaustelle.

7. Ausbetonieren von Einbauteilen der biologischen Abschirmung

Alle mehrfach erwähnten Durchführungen in der biologischen Abschirmung des FR 2 müssen beim Betrieb des Reaktors so ver-

geschlossen sein, daß ihre Abschirmung der des umgebenden Betons gleichwertig ist. Die Öffnungen werden darum mit Stopfen verschlossen, die eine Betonfüllung haben, deren Herstellung eine zusätzliche interessante Aufgabe war.

Die beiden größten dieser Einbauteile sind die Deckel des Reaktors, wie sie aus [1; Bild 1 und 2] zu ersehen sind. Durch diese Deckel werden die Brennelemente, die Regeleinrichtungen und Experimentiereinrichtungen geführt. Dadurch ergibt sich im Bereich der Deckel eine Vielzahl von Oberteilen, die ebenfalls, wie die Deckel selbst, mit Beton ausgefüllt werden müssen. In der seitlichen Abschirmung waren hauptsächlich ein großer Kasten für die Meßeinrichtungen sowie die Experimentierstopfen mit Beton zu füllen. Dazu kommen eine Reihe von Stopfen in der unteren Abschirmung.

Alle Stopfen in der seitlichen und unteren Abschirmung waren mit Beton auszufüllen, der eine Mindestwichte von 4 g/cm^3 hat. Dagegen sind die Reaktordeckel aus konstruktiven Gründen so dick, daß mit üblichem Beton abgeschirmt werden konnte. Der Beton brauchte hier nur $2,1 \text{ g/cm}^3$ zu wiegen. Die gleiche Forderung wurde an die Betonfüllung der Brennelementoberteile gestellt. Beide Deckel besitzen Randzonen, in die Beton der Wichte 5 g/cm^3 eingebracht werden mußte. Sämtliche Einbauteile, mit Ausnahme der Deckelränder, sind entweder in ihrem Innern sehr verwickelt aufgebaut, haben empfindliche Einbauten oder sind in ihren Abmessungen so klein, daß ein normaler Betonvorgang nicht in Betracht kam. Nach einer Reihe von Versuchen über die Möglichkeiten, solche Betonfüllungen auszuführen, vor allen Dingen aber nach den guten Erfahrungen bei der Herstellung der biologischen Abschirmung mit pumpfähigem Mörtel, und weiter, nachdem durch Versuche erwiesen war, daß sich mit den Colcrete-Maschinen auch Schwerstmörtel mit Eisenzuschlägen bis zu einer Wichte von etwa $4,5 \text{ g/cm}^3$ einwandfrei pumpen läßt, hat man sich entschlossen, alle diese Einbauteile mit Mörtel auszupressen. Dieser Weg war im Falle der Brennelementoberteile, die sich in ihren Abmessungen mit Spannkänen vergleichen lassen, aus der Praxis des Spannbetons bekannt, wogegen über das Auspressen von so großen Teilen, wie sie die Reaktordeckel und der Meßkasten darstellen, mit Normal- und Schwerstmörtel bisher kaum Erfahrungen vorlagen. Es hat sich aber gezeigt, daß sich auch Schwerstmörtel durch geeignete Zusatzmittel so weit stabilisieren läßt, daß ein Absetzen nicht zu befürchten ist, sondern daß vielmehr durch das Quellen des Mörtels alle Hohlräume sicher ausgefüllt werden. Ein nachträgliches Schwinden des Mörtels ist nach dem Erhärten nicht zu erwarten, da alle Einbauteile luftdicht verschweißt werden. Zur Sicherheit sind Versuche angestellt worden, die ein etwaiges nachträgliches Verformen des Mörtels unter Abschluß zeigen sollten. Der Beton zeigte jedoch erwartungsgemäß keinerlei Raumänderung.

Im folgenden sollen die Mischungsverhältnisse sowie die Prüfergebnisse der vier verwendeten Mörtelarten wiedergegeben und auf die Ausführung der Betonierarbeiten kurz eingegangen werden.

Die Hauptteile der beiden Deckel waren an ihrer Oberseite mit Öffnungen versehen, durch die Auspreßrohre gesteckt werden konnten. Durch diese Rohre wurde der Mörtel gleichmäßig eingepumpt, bis der Deckel nahezu gefüllt war (Bild 9). Sodann wurden auf die mit Gewinde versehenen Öffnungen Rohrstutzen geschraubt

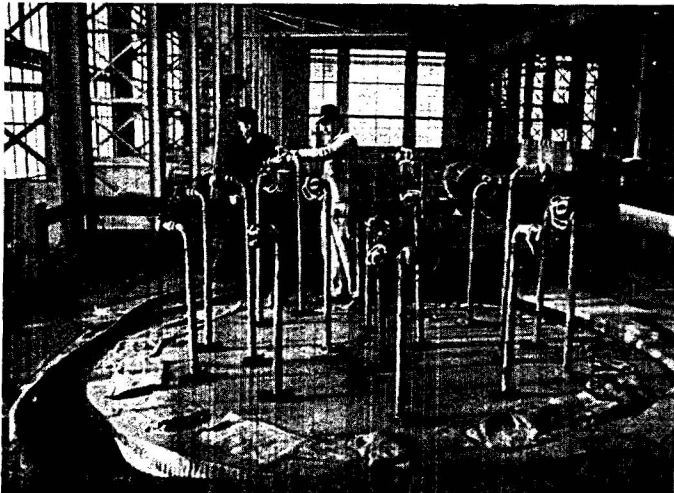


Bild 9. Auspressen des Reaktordeckels mit Quarzitmörtel

und der Mörtel von einer Seite des Deckels aus eingepumpt, bis er an allen anderen Stutzen, die mit Verschlusskappen versehen waren, ausfloß (Bild 10). Nach etwa 30 Minuten wurde von einem anderen Rohr noch einmal nachgepreßt, so daß etwa abgeschiedenes Wasser

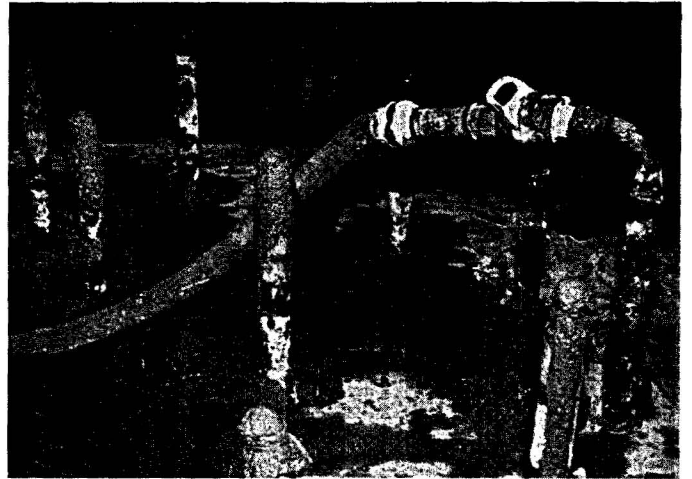


Bild 10. Nachpressen am Reaktordeckel um Luftinschlüsse herauszudrücken

durch die einzelnen Rohrstutzen herausgedrückt werden konnte. Es trat aber nur ganz wenig Wasser aus, im übrigen wurde Mörtel einwandfrei Beschaffenheit herausgedrückt. Danach konnten alle Stutzen geöffnet werden, so daß der quellende Mörtel sich ausdehnen konnte und austrat. Nach etwa 36 Stunden wurden alle Einfüllöffnungen ausgeräumt und rd. 15 cm tief ausgespitzt. Der einwandfreie Anschluß des Mörtels an die obere Stahlplatte des Deckels konnte so überprüft werden (Bild 11). Es war keinerlei Spalt vorhanden. Die Einfüllöffnungen wurden zunächst verschraubt und später verschweißt.



Bild 11. Anschluß des Mörtels an die obere Stahlplatte

Das Mischungsverhältnis war:

Quarzsand	1250 kg/m ³
Zement (Sulfadur) 275	545 „
Wasser	350 „
Injektsika	5 „

Der Sand hatte eine Kornverteilung von:

0/0,2 mm	21 % (8 %)
0,2/1 mm	17 % (30 %)
1/3 mm	37 % (42 %)
3/5 mm	25 % (20 %)

Gefordert war eine Siebverteilung entsprechend den in Klammern gesetzten Zahlen. Durch den höheren Feinanteil des Sandes war der Wasseranspruch merklich erhöht. Trotzdem konnte die erforderliche Wichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$ eingehalten werden. Die Stabilität des Mörtels hat nicht gelitten.

Gemessene Wichte am 1-dm³-Gefäß: im Mittel $2,155 \text{ g/cm}^3$.

Mittleres Quellmaß nach 22 Stunden: 1,3 %.

In den Randzonen der Deckel wurde erdfeuchter Schwerstmörtel der folgenden Zusammensetzungen durch Einfüllöffnungen eingebracht und durch Innenrüttler verdichtet:

Eisensand	4 410 kg/m ³
Zement (Sulfadur) 275	490 „
Wasser	196 „
Injektsika	5 „
	5 101 kg/m ³

Der Mörtel wurde in einem kleinen, fahrbaren Zwangsmischer gemischt.

Der Betonvorgang beim Meßkasten verlief wie bei den Deckeln. Zwar war die Wasserabscheidung an der Oberfläche gegenüber dem Mörtel der Deckel etwas höher, es wurde aber alles Wasser durch den quellenden Mörtel mit herausgedrückt, so daß auch hierbei ein sattes Ausfüllen des gesamten Hohlraumes gewährleistet war, wie das Aufspitzen der Einfülllöcher einwandfrei zeigte.

Das Mischungsverhältnis war:

Eisensand	3 380 kg/m ³
Zement (Sulfadur) 275	750 „
Wasser	315 „
Injektsika	7 „

Gemessene Wichte am 1-dm³-Gefäß: 4,319 g/cm³.

Hierbei wurden die Proben z. T. von dem beim Auspressen herausgedrückten Mörtel entnommen.

Mittleres Absetzmaß nach 4 Stunden: 0,8 %.

Die Brennelementoberteile wurden, wie Bild 12 zeigt, an einem Stahlrohrgerüst aufgehängt und von unten mit Mörtel verpreßt, bis dieser durch eine obere Öffnung blasenfrei austrat. An der unteren Seite waren Hähne angebracht, die nach dem Auspressen verschlossen wurden, so daß der Mörtel ungestört erstarren konnte. Die obere Öffnung blieb offen, aus ihr trat durch den Quellvorgang Mörtel aus. Nach etwa 30 Minuten wurden die Brennelemente nachgepreßt, um möglicherweise abgesetztes Wasser herauszudrücken.

Da der Durchmesser der Brennelementoberteile nur 75 mm beträgt und im Innern gewendelte Rohre laufen, war es nicht zweckmäßig, den Mörtel mit Sand herzustellen, sondern es mußte ein Zement-

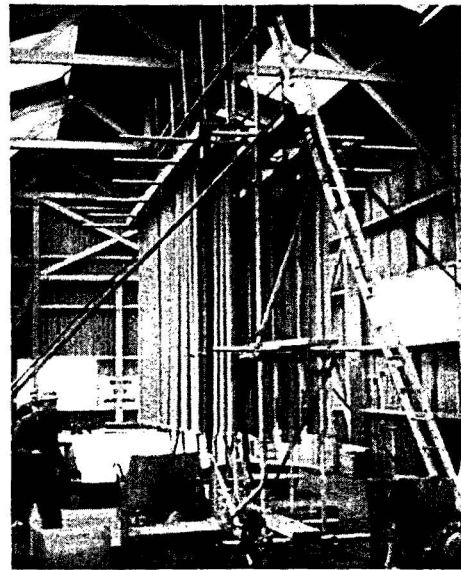


Bild 12. Betonieren der Brennelementoberteile

Gemessene Wichte an einem 1 dm³-Gefäß: 2,29 g/cm³; mittleres Quellmaß nach 20 Stunden 3,8 %.

Das Ausbetonieren der übrigen Einbauteile verlief ähnlich und in allen Fällen ohne besondere weitere Schwierigkeiten.

8. Schlußbemerkung

Das Institut für Beton und Stahlbeton der Technischen Hochschule Karlsruhe, Institutsdirektor Prof. Dr.-Ing. G. Franz, überwachte bei allen Betonierabschnitten den Auspreßvorgang, entnahm die Mörtelproben und führte die Güteprüfungen durch.

Darüber hinaus begutachtete der Technische Überwachungsverein Mannheim im Auftrag des Arbeitsministeriums des Landes Baden-Württemberg den Entwurf und die Ausführung der gesamten biologischen Abschirmung des Forschungsreaktors FR 2. Herr Ober-

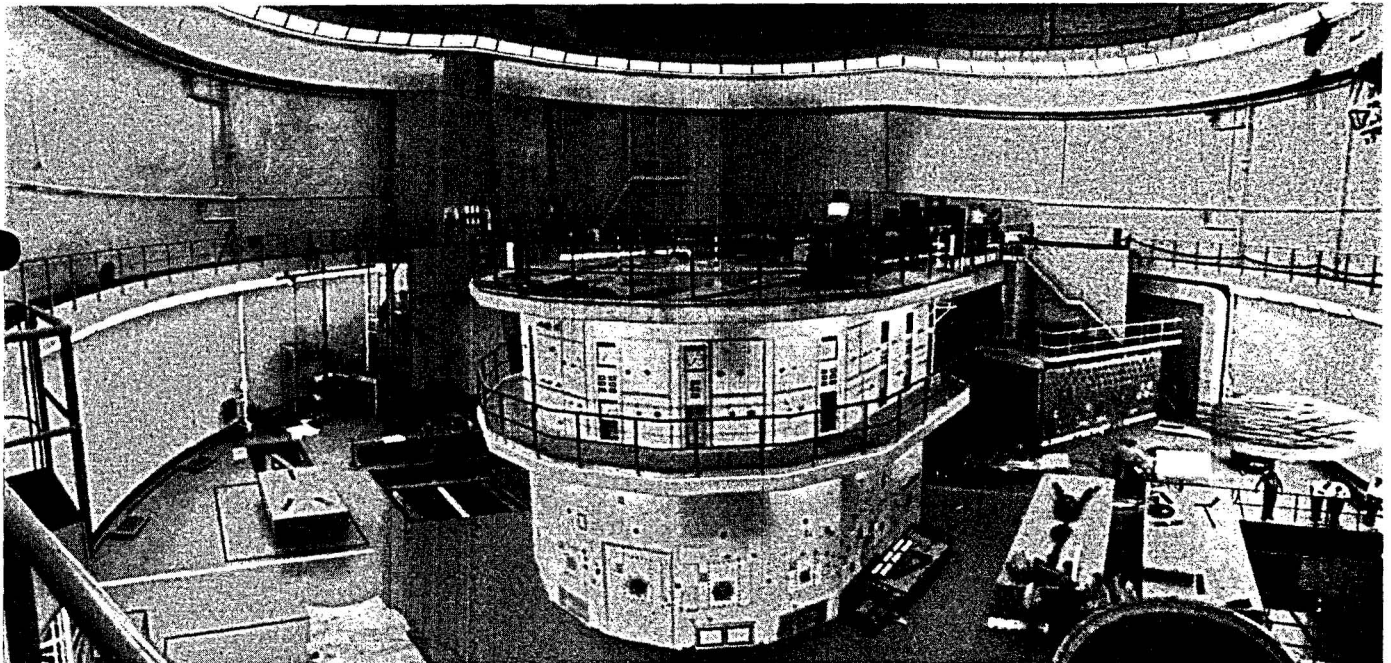


Bild 13. Reaktorhalle mit biologischem Schild (aus mehreren Fotos zusammengesetzt)

Wasser-Gemisch eingepreßt werden. Zur Erreichung der erforderlichen Wichte von 2,1 g/cm³ wurde feiner Magnetitsand 0/1 mm in geringer Menge beigegeben.

Mischungsverhältnis:

Magnetitsand	468 kg/m ³
Zement (Sulfadur) 275	1 340 „
Wasser	453 „
Injektsika	13 „

ingenieur Dr.-Ing. W. Lenz bestätigte in seinem abschließenden Bericht die Übereinstimmung der Bauausführung mit den beim Entwurf zugrunde gelegten Werten.

Bild 13 zeigt die Reaktorhalle mit dem biologischen Schild.

Schrifttum:

- [1] Bauer, A. und Seetzen, J.: Der Abschirmbeton des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2. B. u. St. 1959, S. 281 bis 293.
- [2] Vorläufige Richtlinien für das Einpressen von Zementmörtel in Spankanäle, Fassung Juli 1957. In B. u. St. 1957, S. 292 und in Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. 7. Auflage, Berlin 1960, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn.