

KFK-18

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

DEZEMBER 1959

KFK 18

TECHNISCHE ABTEILUNG/REAKTOR

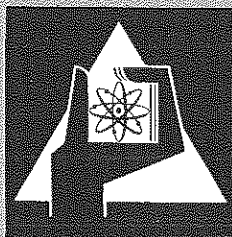
DER ABSCHIRMBETON
DES KARLSRUHER FORSCHUNGSREAKTORS FR 2

VON

ALFRED BAUER

UND

JÜRGEN SEETZEN (TH HANNOVER)



KERNREAKTOR

BAU- UND BETRIEBS-GESELLSCHAFT M.B.H.

KARLSRUHE

Der Abschirmbeton des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

Von

Dipl.-Ing. Alfred Bauer, Karlsruhe, Kernreaktor Bau- und Betriebs-G.m.b.H. und
Dipl.-Ing. Jürgen Seetzen, Hannover, Technische Hochschule, Lehrstuhl für Massivbau



Sonderdruck aus:

Beton- und Stahlbetonbau

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

54. Jahrgang
Heft 12 — Dezember 1959

Der Abschirmbeton des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2

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

DK 621.039.572 Forschungsreaktoren — DK 666.972.5 Besondere Schwerbetonarten

Überblick

Die vorliegende Darstellung befaßt sich mit den Vorarbeiten und Vorversuchen für die Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2. Die Bauausführung und die Betonfragen bei der Herstellung von Sonderteilen der Abschirmung sollen in späteren Arbeiten behandelt werden.

Zunächst werden die allgemeinen physikalischen und technischen Anforderungen an eine Betonabschirmung beschrieben. Sodann wird auf die besonderen Bedingungen für die Betonabschirmung des Karlsruher Forschungsreaktors FR 2 eingegangen. Die daraus folgende Wahl der Art und Herstellungsweise des Abschirmbetons wird eingehend begründet. Ausführlich sind die Eignungsversuche und ihre Ergebnisse wiedergegeben wie auch der Wettbewerb von vier verschiedenen Auspreßverfahren und die dabei ermittelten Beton- und Mörtteleigenschaften. Abschließend werden Versuche über den E -Modul und die Wärmekonstanten von Magnetitbeton sowie die zweckmäßige Ausbildung waagerechter Arbeitsfugen behandelt.

1. Einleitung

Der Karlsruher Forschungsreaktor FR 2, bekanntlich der erste in Deutschland entworfene Kernspaltungsreaktor, ist ein mit Natururan betriebener Schwerwasser-moderierter und -gekühlter Typ von 12 MW thermischer Leistung. Er soll im wesentlichen der Brennelementforschung, der Isotopenerzeugung und der physikalisch-technischen Grundlagenforschung dienen.

Die Abschirmung des Reaktors besteht wie üblich aus zwei verschieden aufgebauten Schilden, dem thermischen und dem biologischen Schild, die das Herz (Core) des Reaktors umschließen. Sie sollen gemeinsam die aus dem Reaktor austretende Gamma- und Neutronen-Strahlung sowie die durch Neutronen bei Kernreaktionen auch in der Abschirmung entstehende Sekundär-Gammastrahlung auf eine bestimmte, niedrige Menge je Flächen- und Zeiteinheit, die g. Dosisleistung, abschwächen.

Der thermische Schild hat die Aufgabe, den Hauptteil der Strahlung einzufangen. Außerdem schützt er den anschließenden Beton gegen unmittelbaren Wärmeeinfluß aus dem Reaktorinneren. Durch Strahlenabsorption entstehen im thermischen Schild über vielfältige Wechselwirkungen erhebliche Wärmemengen, die mit Kühlluft oder Wasser abgeleitet werden. Zur Strahlenabsorption und Wärmeableitung sind als Baustoffe des thermischen Schildes Stahl, Stahlguß, Blei und Boral notwendig. Sie sind allerdings im Verhältnis zu ihrer Strahlenschwächung teuer.

Der biologische Schild umschließt den thermischen und schwächt die Reststrahlung mindestens auf ein für den Menschen biologisch vertretbares Maß ab. Die Reststrahlung aus dem thermischen Schild muß einerseits so gering sein, daß im biologischen Schild keine schädlichen Wärmemengen entstehen oder der Baustoff des Schildes geschädigt wird, andererseits benötigt man aber für die geforderte Schwächung der Reststrahlung noch so viel Materie, daß man bei feststehenden Reaktoren als Baustoff für den biologischen Schild allgemein zum wirtschaftlicheren Beton greift.

Die Grenze zwischen thermischem und biologischem Schild sollte dort liegen, wo die Strahlung gerade so weit vermindert ist, daß sie vom Beton ertragen werden kann. Zur Zeit des Entwurfes des FR 2 vor etwa drei Jahren und auch heute noch ist die Grenze der Strahlenbelastbarkeit von Beton jedoch noch nicht eindeutig bekannt. Aus diesem Grunde wurde die Abschirmung des FR 2 sehr vorsichtig bemessen. Ihren Aufbau zeigen die Bilder 1, 2 und 3.

Hier soll die Betonabschirmung im einzelnen besprochen werden.

2. Anforderungen an den Abschirmbeton

2.1 Anforderungen auf Grund der Strahlenbelastung

2.1.1 Strahlenschwächung

Die aus dem thermischen Schild austretende Strahlung beträgt nach den Berechnungen [1]:

Schnelle (Spalt-) Neutronen	$5,0 \cdot 10^7$ n/cm ² · sec	(i. M. 3 MeV)
Mittelschnelle und thermische	$2,2 \cdot 10^9$ n/cm ² · sec	
Gamma-Quanten	$3,5 \cdot 10^3$ γ/cm ² · sec	(0 ... 2 MeV)
	$1,7 \cdot 10^6$ γ/cm ² · sec	(2 ... 4 MeV)
	$2,8 \cdot 10^5$ γ/cm ² · sec	(4 ... 6 MeV)
	$1,4 \cdot 10^5$ γ/cm ² · sec	(über 6 MeV)

Die aus der biologischen Abschirmung austretende Strahlung darf 10 mrem/40 h nicht übersteigen, um empfindliche Strahlenmessungen im Experimentierbereich des Reaktors nicht durch zu hohe Hintergrundstrahlung zu stören. Die zulässige Strahlungsmenge beim FR 2 liegt also bei $\frac{1}{10}$ der biologisch vertretbaren Dauerbelastung von 100 mrem/40 Stunden.

Der zulässigen Strahlungsmenge beim FR 2 entsprechen jeweils etwa

2 Spalt-Neutronen/cm ² · sec
52 Thermische Neutronen/cm ² · sec
120 Gammaquanten von 1 MeV Energie
57 Gammaquanten von 3 MeV Energie
41 Gammaquanten von 5 MeV Energie
33 Gammaquanten von 7 MeV Energie

Der Abschirmbeton muß also die einzelnen Strahlenarten und -gruppen noch unter die obenstehenden Werte schwächen, damit die Summe der Teilmengen die zulässige Gesamtmenge nicht übersteigt.

2.1.2 Homogenität

Die Voraussetzungen der Abschirmberechnungen stimmen nur dann einigermaßen befriedigend, wenn der Beton das angenommene homogene Gemisch von Atomen auch hinreichend genau darstellt. Aus diesem Grunde muß der Beton in seiner Zusammensetzung an allen Stellen in gleichmäßiger Güte und ohne größere, unvorhergesehene Hohlräume hergestellt werden. Kleine Luftblasen und Haarrisse sind vom Standpunkt der Abschirmung dagegen unbedeutend, solange sie nicht gehäuft und in geradliniger Verbindung von innen nach außen auftreten.

2.1.3 Absorptionswärme

Die als Folge der Strahlenabsorption auftretende Wärme führt auch in einer Betonabschirmung zu Temperaturerhöhungen. Werden sie zu groß, kann entweder das Betongefüge angegriffen werden oder es können wegen des unvermeidlichen Temperaturgefälles in der dicken Wand Spannungen und damit Risse entstehen.

Die Berechnung der zu erwartenden Absorptionswärmemengen ergab jedoch so geringe Werte, daß wegen auftretender Wärmespannungen keine Bedingungen zu stellen waren. Das größte Temperaturgefälle beträgt im Betrieb 1 ... 2° C/m von innen nach außen. Aus dem gleichen Grunde erübrigten sich besondere Anforderungen an die Wärmebeständigkeit des Betons.

2.1.4 Strahlenschäden

Unter starker Strahlenbelastung werden die Eigenschaften aller Stoffe mehr oder weniger verändert. Bei Beton besteht die Gefahr, daß die Festigkeit des Zementsteins herabgesetzt und dadurch schließlich das Betongefüge zerstört wird. Nach amerikanischen Messungen ist jedoch etwa eine Menge von rd. 10^{19} n/cm² erforderlich,

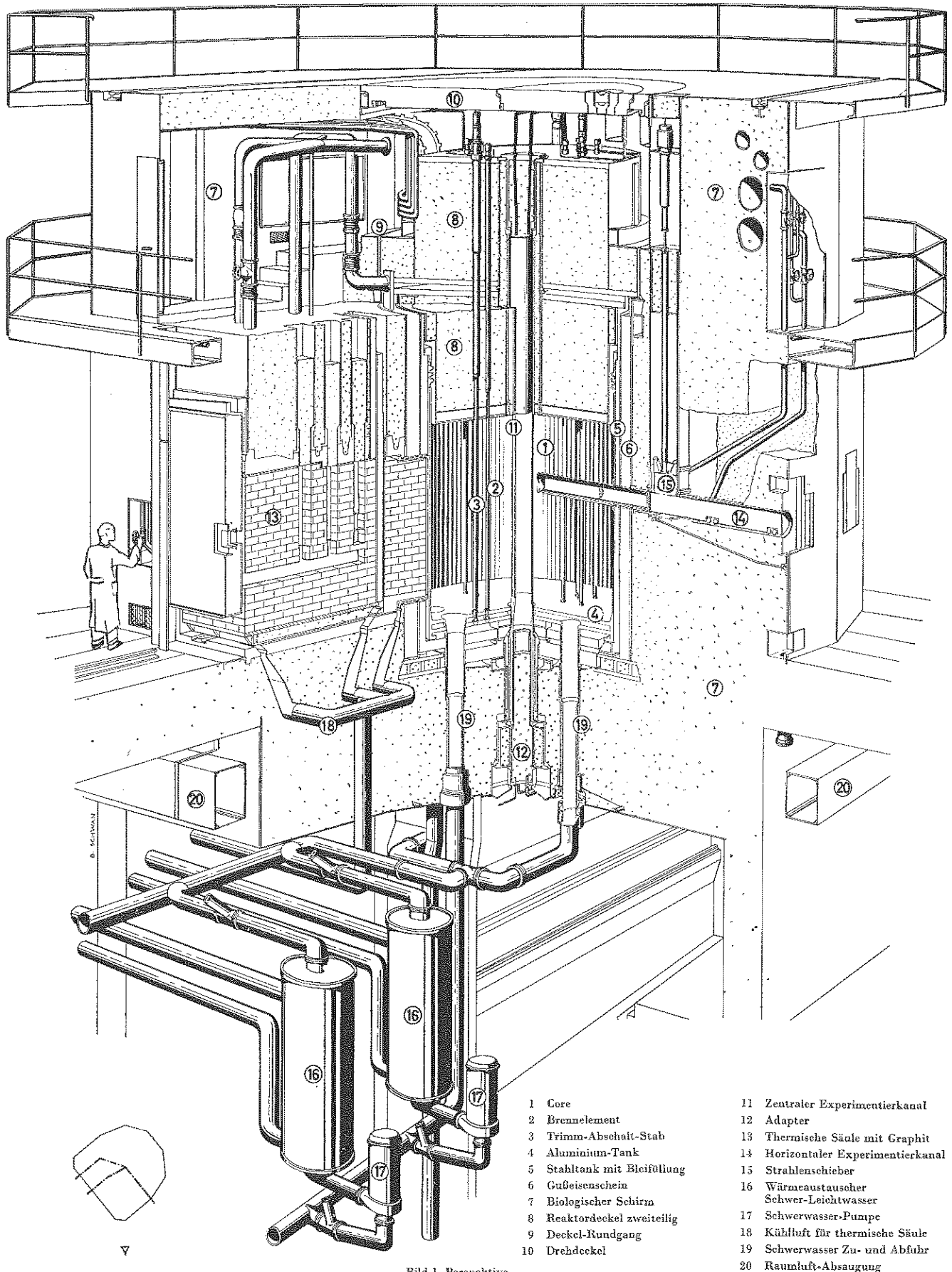


Bild 1. Perspektive

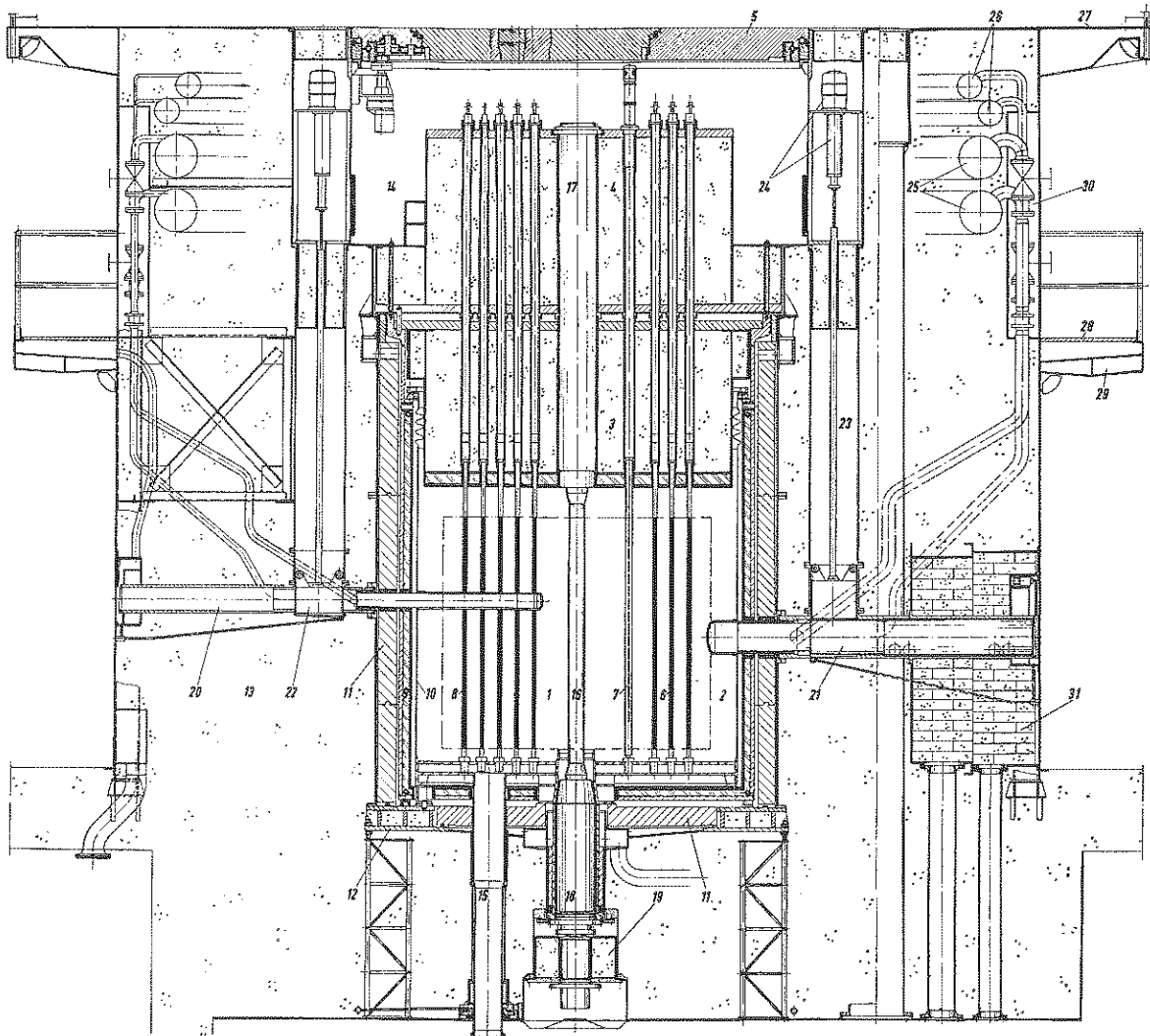


Bild 2. Senkrechter Schnitt

- | | | |
|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| 1. Core | 12. Tragring | 22. Strahlenschieber |
| 2. D ₂ O Reflektor | 13. Biologischer Schirm | 23. Schieberschacht |
| 3. Unterer Reaktordeckel | 14. Deckel Rundgang | 24. Schieberantrieb |
| 4. Oberer Reaktordeckel | 15. D ₂ O Zulauf | 25. Luft-Ringleitung off. Kreisl. |
| 5. Drehdeckel | 16. Zentraler vertikaler Experimentierkanal | 26. Luft-Ringleitung geschl. Kreisl. |
| 6. Brennstäbe | 17. Oberer Adapter | 27. Reaktorplattform |
| 7. Trimm-Abschaltstäbe | 18. Unterer Adapter | 28. Umlaufbühne |
| 8. Thoriumstäbe | 19. Ringpfropfen | 29. Kabelkanal |
| 9. Stahltank | 20. Experimentier-C-Kanal | 30. Ventil- und Meßnische |
| 10. Aluminiumtank | 21. Experimentier-R-Kanal | 31. Großraum-Nische |
| 11. Gußeisenschirm | | |

um die Biegezugfestigkeit um etwa 10 % zu vermindern [2]. Der Abschirmbeton müßte also etwa 100 Jahre bei vollem Betrieb bestrahlt werden, bis merkliche Festigkeitseinbußen zu berücksichtigen wären.

2.2 Konstruktive Anforderungen

2.2.1 Maßtoleranzen und Maßhaltigkeit

Der biologische Schirm eines Forschungsreaktors wie des FR 2 ist ein Teil einer großen Präzisionsmaschine, und darum gelten hierfür wesentlich höhere Genauigkeitsanforderungen als die beim üblichen Beton- und Stahlbetonbau gewohnten. Diese Maßgenauigkeit ist deswegen erforderlich, weil das Gitter der rd. 250 senkrechten Reaktorpositionen für Brennelemente, Thoriumstäbe, Trimmabschaltstäbe und Kanäle für Experimente und Isotopenerzeugung von den rd. 20 waagerechten Experimentiereinrichtungen auf engstem Raum im Core durchdrungen wird. Hinzu kommt, daß fast alle Betriebsvorgänge des Reaktors ferngesteuert werden und viele Teile nicht mehr zugänglich sind, wenn der Reaktor einmal in Betrieb war. Die Einbauten dürfen also weder beim Betonieren noch durch den erhärtenden Beton in ihrer Lage verändert werden.

2.2.2 Festigkeit

Beim FR 2 trägt die untere waagerechte Abschirmung von rd. 2,5 m Dicke den gesamten Reaktor. Der Abschirmbeton wird also als Stahlbeton zur Übertragung erheblicher Lasten herangezogen. Daher muß er eine Mindestdruckfestigkeit von 225 kg/cm² besitzen.

2.2.3 Elastische Verformungen

Wegen der geringen Maßtoleranzen muß die elastische Verformung der tragenden Teile berücksichtigt und so gering wie möglich gehalten werden.

2.3 Wirtschaftliche Anforderungen

Da sich die Abmessungen des Reaktorgebäudes nach der geforderten Experimentierfläche rings um den Reaktor richten, ist es mit Rücksicht auf den umbauten Raum wirtschaftlich, die Dicke der Abschirmung zu beschränken. Außerdem sind bei einer dünneren Abschirmung die notwendigen Durchführungen, besonders die Experimentierkanäle, billiger und leichter mit der erforderlichen Genauigkeit herzustellen und einzubauen. Dünne Abschirmungen bedingen

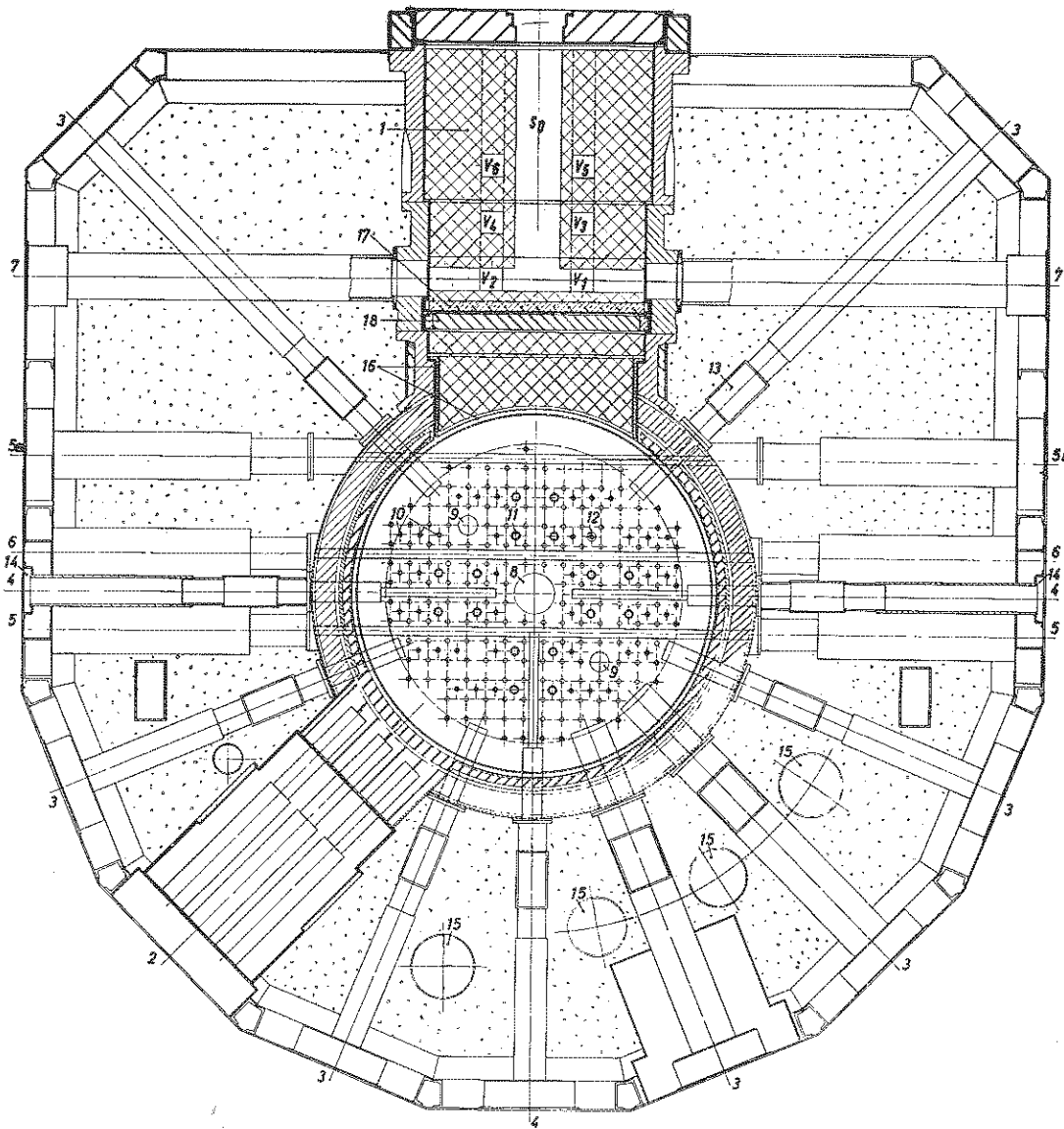


Bild 3. Waagerechter Schnitt

Bei Berücksichtigung der Zehntelwertdicken waren also die Spaltneutronen und Sekundär-Gamma-Quanten maßgebend für die Dicke der Betonabschirmung des FR 2.

Auf Grund der Abschirmberechnung und im Hinblick auf damit mögliche Raumsparnis wurde ein Schwerstbeton mit Eisenerzzuschlag gefordert. Ein solcher Beton liegt in der Mitte zwischen den noch wirksameren, aber beträchtlich teureren Betonarten wie Ferrophosphor- oder Eisenbeton (Beton mit Eisenerzzuschlag) und den weniger wirksamen billigeren wie

- 1 Thermische Säule
- 2 Meß-Säule
- 3 Exp.-R-Kanal, in den Reflektor gehend
- 4 Exp.-C-Kanal, in das Core gehend
- 5 Exp.-D-Kanal, durchgehend
- 6 Exp.-D-Kanal, Rohrpost
- 7 Exp.-Th-Kanal, horizont. durch die therm. Säule
- 8 Vertikaler Zentral-Kanal
- 9 Vertikale Neben-Kanäle
- 10 Isotopen-Kanäle
- 11 Trimm-Abschalt-Stab
- 12 Feinregel-Stab
- 13 Strahlenschieber
- 14 Dichtschieber
- 15 Schacht für Loop-Leitung
- 16 Aluminium-Fenster
- 17 Stahl-Schieber
- 18 Blei-Boral-Schieber
- V₁ + V₆ Vertikale Kanäle durch die therm. Säule
- S₀ Horizont. Kanal durch die therm. Säule

aber andererseits teure Baustoffe. Es gibt also ein wirtschaftliches Optimum der Abschirmdicke, wenn man die Einsparungen am umbauten Raum und an den Einbauten gegen die Mehrausgaben für die Abschirmstoffe aufrechnet. Tatsächlich hängt dieses Optimum aber von so vielen Veränderlichen ab, daß man es bestenfalls abschätzen kann.

3. Voraussetzungen für die Wahl der Abschirmbetonart

Ganz überschlägig betrachtet und ohne auf die zum Teil recht schwierige Theorie der Abschirmung einzugehen, kann man sagen, daß zur Schwächung der einzelnen Strahlenkomponenten um eine Größenordnung, d. h. den Faktor 10 etwa folgende Dicke einer Betonschicht benötigt wird.

	Kiesbeton	Barytbeton	Eisenerzbeton
Spalt-Neutronen	25 cm	25 cm	21 cm
Thermische Neutronen (0,025 MeV)	23 cm	15 cm	7 cm
Gamma-Quanten (2 MeV)	22 cm	18 cm	14 cm
Gamma-Quanten (7,5 MeV)	39 cm	25 cm	20 cm

Die den Betonschild treffenden Strahlenkomponenten sind etwa um die folgenden Größenordnungen abzuschwächen:

Spalt-Neutronen	8
Gamma-Quanten (2 MeV)	6
Sekundär Gamma-Quanten (7,5 MeV)	9 (für Eisenerzbeton)

Kiesbeton, Schlackenbeton oder Barytbeton. Er hat eine Zehntelwertdicke von 21 cm für schnelle Neutronen und eine Rohwichte von 3,5...4,0 g/cm³. Die Angabe der Rohwichte ersetzt dabei die der Zehntelwertdicken für verschiedene Gamma-Energien, da nach einer im Reaktorbau üblichen, aber nur bedingt richtigen Faustregel die Rohwichte eines Betons ein Verhältnismaß für seine Gamma-Strahlenschwächung ist. Hiernach ergab sich als Bedingung für die biologische Abschirmung, daß an keiner Stelle weniger als 1,80 m Schwerstbeton in radialer Richtung vorhanden sein darf.

Es muß betont werden, daß die obigen Angaben keinesfalls allein als Berechnungsgrundlagen dienen können oder gedient haben. Der Abschirmfachmann wird zweifellos nähere Einzelheiten vermissen. Hier sollte vielmehr nur die Wahl einer Betonart aus physikalischen Gründen verständlich gemacht werden.

Weiter sei gesagt, daß die Wahl nicht von eingehenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen bestimmt wurde, da hierfür weder Grundlagen noch Erfahrungen während des Entwurfes verfügbar waren, auch wenn man die damals schon sehr fortgeschrittene Entwicklung des Auslandes auf dem Gebiet des Reaktorbaues mit einbezieht. Trotzdem ist nach Abwägen aller Umstände die Wahl sicherlich nicht sehr weit von der wirtschaftlich günstigsten Lösung entfernt getroffen worden.

Der biologische Schirm besteht, wie die Bilder 1, 2 und 3 zeigen, aus einer inneren und äußeren, bleibenden Stahlchalung, die durch waagerechte und senkrechte Verbände ausgesteift sind. Zwischen die Schalungen sind Experimentierkanäle mit Strahlenschieberschächten, eine thermische Säule, Meß- und Verteilernischen sowie die Rohr-

leitungen für Leichtwasser-, Schwerwasser-, Luft- und Heliumkreisläufe und eine Rohrpostanlage für kurzlebige Isotope eingebaut. Dazu kommen eine große Zahl von Rohren für die Durchführung von Kabeln und zeitweiligen Experimentierkreisläufen. Die obengenannten Einrichtungen dienen dem Betrieb des Reaktors oder vielfältigsten Experimentiermöglichkeiten. Ihre Beschreibung ist jedoch nicht Aufgabe dieser Darstellung. Die Bilder 1 bis 3 geben über die Menge der Einbauten noch kein vollständiges Bild, da weder alle Leitungen und Rohre noch die Verbände und die Bewehrung eingezeichnet sind. Eine Zeichnung mit allen diesen Einzelheiten sähe einer modernen Graphik nicht unähnlich. Die Anordnung aller Einbauten im biologischen Schirm hatte der erwähnten Forderung zu genügen, daß mindestens 1,80 m des rd. 2,50 m dicken Schildes für die Betonfüllung verblieben. Der eingeschaltete Raum mußte mit Schwerbeton ausgefüllt werden, ohne die Einbauten beim Betonieren zu erschüttern oder in ihrer Lage zu verändern. Mit dem Gesagten sind gewissermaßen die Randbedingungen für den Abschirmbeton gegeben. Bis zur Ausführung der Betonarbeiten war in zweierlei Hinsicht eine Auswahl zu treffen. Erstens waren die Betonbestandteile festzulegen und zweitens das Herstellungsverfahren für den Beton.

Tafel I. Überblick über Zuschlagstoffe für Abschirmbeton

Zuschlagstoffe	Wichte g/cm ³	Betonwichte g/cm ³	Bemerkungen
1. Kies	2,6...2,7	2,3...2,4	gut geeignet
2. Schlacken	3,0...3,6	2,7...3,0	
Chromschlacke	3,4	2,9	gut geeignet
Bleischlacke	3,6	3,0	gut geeignet
Kupferschlacke	3,3		zu porig, schlecht geeignet
Titanschlacke	3,6		zu geringe Mengen vorhanden
3. Baryt (BaSO ₄) <i>schwerer</i>	4,2	3,2...3,6	guter Baryt hat bis zu 95% BaSO ₄ . Es liegen viele Versuchsergebnisse vor, in US wirtschaftlichster Abschirmbeton, Gestein verhältnismäßig brüchig, Güte schwankend
4. Eisenerze			
deutsche Erze			
Roherz	3,2...3,8		brüchig und wenig geeignet
Flußeisenerz	3,2		schlecht geeignet
Roteisenerz	3,2		schlecht geeignet
ausländische Erze			aus Schweden, Afrika, Südamerika
Limonit (3 Fe ₂ O ₃ + 4 H ₂ O)	3,4...3,8	2,9...3,1	geeignet für Beton mit hohem Wassergehalt, sehr weich und schwer zu verarbeiten
Magnetit (Fe ₃ O ₄)	4,8...5,1	4,0	z. T. etwas brüchig, gut geeignet
Hämatit (Fe ₂ O ₃)	4,5	3,6	spröde, schwer verarbeitbar, hoher Wasseranspruch, Betoneigenschaften gut, etwas unwirtschaftlicher als Magnetit ¹⁾
5. Titanerz Ilmenit (FeTiO ₃)	4,6	3,8	ähnlich Hämatit, brüchig, in Deutschland bisher teuer, neuerdings preiswert ¹⁾
6. Ferrophosphor (FeP, Fe ₂ P, Fe ₃ P)	6,3	4,5...5	Zwischenerzeugnis der Phosphorherstellung, Kosten schwankend, Betoneigenschaften gut
7. Eisen	7,7	5,4...6,3	als Stahlsand gut geeignet, bei Schrott auf Verschmutzung achten, leichter Rost unschädlich, geringer Wasseranspruch, Entmischungsfahr, teuer ¹⁾
8. Borträger			
Colemanit (2 CaO · 3 B ₂ O ₃ · 5 H ₂ O)			wirtschaftlichster Borträger, Abbindeverzögerung des Zements beachten
Borkalzit			aufbereitetes Colemanit, verhältnismäßig teuer, aber besser zu verarbeiten als Colemanit
Borfitte			aus Sinterung von Borax und Silikaten 27% B ₂ O ₃ , Löslichkeit beachten; hohe Kosten
Borcarbid (B ₄ C)			zu teuer, aber gut geeignet

¹⁾ bezüglich der erreichbaren Betonwichte

4. Stoffauswahl

4.1 Zuschlagstoffe

Schon zu Beginn der Planung, noch bevor die physikalischen und konstruktiven Gegebenheiten genau abzusehen waren, sind die verfügbaren Zuschlagstoffe für Abschirmbetone eingehend untersucht worden. Die Ergebnisse sind in Tafel I zusammengefaßt.

Diese Erfahrungen und die oben beschriebenen Bedingungen ließen nur Magnetit (Magnetisenstein) und Hämatit (Eisenglanz) als Zuschlagstoffe für die engere Wahl zu. Beide Erze bestehen fast vollständig aus Eisenoxyd, unterscheiden sich aber wesentlich in der Kristallstruktur und damit in den Gesteinseigenschaften. Die in diesem Falle an den Zuschlag zu stellenden Anforderungen erfüllen beide Erze, und sie sind auch, wegen ihres fast gleichen Eisengehaltes, im Preis nicht unterschieden. Die Auswahl mußte auf Grund von Eignungsprüfungen getroffen werden, deren Ergebnisse die Tafel II wiedergibt.

Tafel II. Ergebnisse von Eignungsprüfungen

Zuschlagstoff	Hämatit	Magnetit
Rohwichte	4,52 g/cm ³	4,95 g/cm ³
Kornzusammensetzung	Gew. %	Gew. %
0... 0,2 mm	11,3	5,2
0... 1 mm	20,9	21,5
0... 3 mm	35,0	35,0
0... 7 mm	55,0	55,0
0... 15 mm	75,0	75,0
0... 30 mm	100,0	100,0
Mischungsverhältnis	Hämatitbeton	Magnetitbeton
	kg/m ³ Gew. T.	kg/m ³ Gew. T.
Zement PZ 275	294 1	317 1
Zuschlag	3084 10,5	3526 11,1
Wasser	212 0,72	107 0,59
Summe	3590 12,22	4030 12,69
Betoneigenschaften	Hämatitbeton	Magnetitbeton
Rohwichte: Frischbeton	3,59 g/cm ³	4,03 g/cm ³
nach 7 Tagen	3,58 g/cm ³	4,00 g/cm ³
nach 28 Tagen	3,55 g/cm ³	3,98 g/cm ³
Druckfestigkeit (20 cm Würfel), Mittel aus 3 Würfeln		
nach 7 Tagen	295 kg/cm ²	277 kg/cm ²
nach 28 Tagen	502 kg/cm ²	404 kg/cm ²

Sowohl der verwendete Hämatit als auch der Magnetit waren ausgesucht gute, ausländische Erze. Beide sind im selben Brecher zerkleinert worden. Am höheren Feinstanteil des gebrochenen Hämatits zeigte sich schon dessen größere Sprödigkeit. Außerdem ist der einzelne Stein härter als beim Magnetit, so daß bei diesem Zuschlag die aufzuwendende Brecharbeit wesentlich höher war.

Der Hämatit brach wegen seiner größeren Sprödigkeit sehr scharfkantig und splittig. Dies machte sich bei der Betonherstellung durch wesentlich vergrößerten Wasseranspruch gegenüber dem Magnetit bemerkbar. Obgleich beide Betonarten gut zu verdichten waren, erreichte der Hämatitbeton doch nicht die theoretisch größte Dichte von rd. 3,66 g/cm³.

Diese Ergebnisse führten schließlich zur Wahl von Magnetit als Zuschlagstoff. Aus den verschiedenen Magnetit-Angeboten der einzelnen Vorkommen wurde der Magnetit mit der größten Rohwichte, den besten Gesteinseigenschaften, d. h. hoher Festigkeit, würfeligem Bruch, geringer Sprödigkeit, und mit dem günstigsten Preis ausgesucht. Dieser Magnetit stammt aus afrikanischen Vorkommen und hat eine Rohwichte zwischen 4,9 und 5,1 g/cm³.

4.2 Bindemittel

Von vornherein stand fest, daß ein handelsüblicher Zement als Bindemittel verwendet werden sollte. Es sind zwar zu Beginn der Entwicklung von Abschirmbetonen Vorschläge für andere Arten von Bindemitteln gemacht worden, jedoch fehlen im großen bis heute die erforderlichen Erfahrungen. Insbesondere ist auch nicht nachgewiesen, daß die Verwendung von Sonderzementen notwendig sei. Alle Betonabschirmungen von Reaktoren wurden bisher mit Normalzement hergestellt und haben sich in dieser Hinsicht durchaus bewährt.

Eine andere Frage ist der Einfluß der Hydratationswärme. Zunächst ist zum Vergleich die Wärmeentwicklung verschiedener Zemente adiabatisch gemessen worden (Bild 4). Die Zemente 1 und 2 sind Portlandzemente, während 3 und 4 Sonderzemente mit geringer Abbindewärme sind. Um von vornherein die Gefahr einer Wärme- dehnung und der damit verbundenen Verformung von Einbauten aus

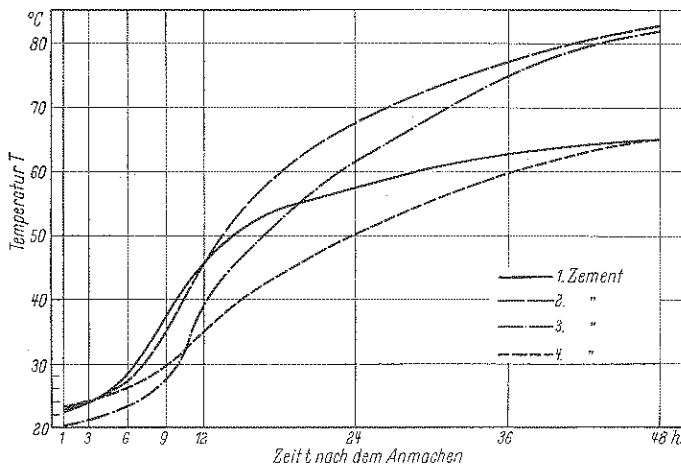


Bild 4. Wärmeentwicklung verschiedener Zemente

dem Wege zu gehen, wurde ein Zement mit geringer Wärmeentwicklung gewählt. Später sind sowohl bei Versuchen als auch bei der Betonherstellung Temperaturmessungen vorgenommen worden, über die noch weiter unten zu berichten ist.

5. Wahl des Herstellungsverfahrens

Nachdem die Stoffe für den Abschirmbeton festgelegt waren, mußte das Betonierverfahren gewählt werden. Bei ausländischen Reaktoren sind bisher mit üblichem Schüttbodyeton und Auspreßbeton gute Erfahrungen gemacht worden. Dagegen hat sich das Einbringen der groben Zuschläge in Mörtelschichten, das sogenannte Puddelverfahren, nicht sonderlich bewährt.

Die Herstellung von Schüttbodyeton setzt voraus, daß er ungehindert eingebracht und in der Schalung durch Innenrüttler vollständig verdichtet werden kann. Kurz gesagt, bei Beton, an den höchste Güteanforderungen gestellt werden, muß der eingeschaltete Raum gut zugänglich sein. Das ist er im vorliegenden Fall durchaus nicht. Hinzu kommt, daß das Einschütten und Einrütteln von Beton ein vergleichsweise roher Arbeitsvorgang ist, der sich mit der feinen Ausrichtung der Einbauten (z. T. bis auf $1/10$ mm/m) nicht verträgt. Bedenkt man weiter, welche Bedeutung das Schwinden bei einem so großen, fugenlosen Betonkörper besitzt und daß die Schwindneigung von Schüttbodyeton etwa doppelt so groß wie beim Auspreßbeton ist, so sprechen alle technischen Gründe für die Anwendung des Auspreßverfahrens. Das Auspreßverfahren besteht bekanntlich darin, daß die groben Zuschlagstoffe ohne Bindemittel lose in die Schalung eingebracht und die Hohlräume dieses Steingerüsts mit Mörtel ausgepreßt werden. Setzt man die groben Steine von Hand in die Schalung und pumpt man den Mörtel mit geringem Druck ein, so läßt sich der Beton vollständig erschütterungsfrei einbringen. Weiter kann der grobe Zuschlag zuverlässig dicht gelagert werden, so daß sich mit dem nachprüfbar gleichbleibenden Mörtel ein homogener Beton herstellen läßt. Vor allem ist die Betongüte nicht wie beim Schüttbodyeton vom augenblicklichen Arbeitseifer des einzelnen Arbeiters am Innenrüttler abhängig. Die Vorteile des Auspreßverfahrens sind also zusammengefaßt: keine Behinderung des Betonierens durch viele, unregelmäßig geformte Einbauten, keine Erschütterungen beim Einbringen, einwandfrei homogenes Betongefüge und geringe Schwindneigung. Als Nachteil müssen die gegenüber dem Schüttbodyeton höheren Kosten hingenommen werden, da der mögliche Schaden bei Verwendung von Schüttbodyeton mit seinen unvermeidlichen Unzulänglichkeiten ein Vielfaches des Kostenunterschiedes betragen könnte.

Nachdem die Entscheidung für ein Auspreßverfahren gefallen war, galt es zu klären, welches der bekannten Verfahren im besonderen

gewählt werden sollte. Die Verfahren der einzelnen Firmen unterscheiden sich in der Hauptsache in der Mörtelzusammensetzung, im Mischen des Mörtels und in der Art der verwendeten Misch- und Auspreßmaschinen. Nicht zuletzt muß die Erfahrung der einzelnen Firmen bei ähnlichen Arbeiten berücksichtigt werden.

Da die technische Güte des herzustellenden Betons entscheidend für die Vergabe der Arbeiten war, andererseits die in Frage kommenden Unternehmen mit einer Ausnahme keine unmittelbaren Erfahrungen bei der Herstellung einer Betonabschirmung mit Magnetitzuschlag besaßen, wurden einige Firmen gebeten, an einem Wettbewerb in Form von Großversuchen teilzunehmen. Schließlich beteiligten sich vier namhafte Unternehmen, ein ausländisches und drei deutsche, von denen eins ein ausländisches Verfahren vertrat, an den Versuchen, über die im weiteren berichtet werden soll.

6. Großversuche zur Wahl des geeignetsten Auspreßverfahrens

6.1 Versuchsbedingungen

Die Versuche sollten unter Baustellenbedingungen auf dem Gelände des Kernforschungszentrums Karlsruhe durchgeführt werden. Die erforderlichen Baustoffe sowie eine kleine überdachte Versuchshalle wurden den Wettbewerbsteilnehmern zur Verfügung gestellt.

Im einzelnen sollte ein Probekörper von rd. $1,1 \text{ m}^3$ Auspreßschwerbeton in einer zur Verfügung gestellten Stahlschalung hergestellt werden. Die Stahlschalung hatte die in Bild 5 wiedergegebenen Abmessungen und Einbauten. Der Beton sollte eine Rohwichte von möglichst 4000 kg/m^3 und eine Mindestdruckfestigkeit von 225 kg/cm^2 besitzen. Der Kornaufbau der groben Zuschläge sowie die Mörtelzusammensetzung waren den Wettbewerbsteilnehmern freigestellt. Es war jedoch gefordert, daß der Mörtel möglichst wenig schwinden und

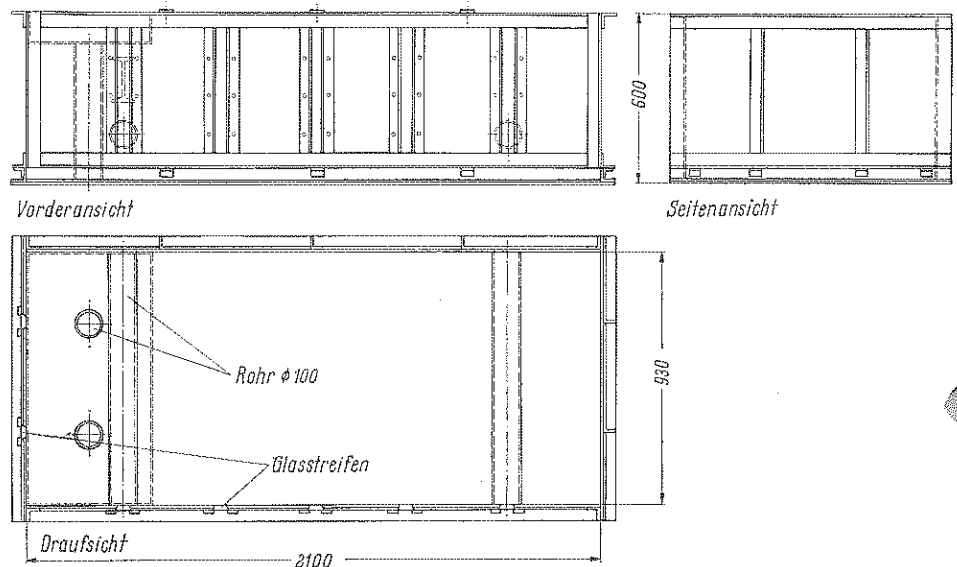


Bild 5. Stahlschalung für Großversuche

sich nicht absetzen sollte. Außerdem sollten bei den Versuchen die Maschinen und Geräte zum Einsatz kommen, die ggf. für die Ausführung der gesamten Abschirmung vorgesehen waren.

6.2 Durchgeführte Untersuchungen

6.2.1 Baustoffe

Ergebnisse der Normenprüfung des Zements nach DIN 1164

Erstarrungsbeginn 3 Std. 40 Min., Erstarrungsende 5 Std. raumbeständig bei einem Wasserzusatz von 28 % zum Probekuchen. Festigkeiten (Mittel aus drei Proben) bei $W/Z = 0,6$ und einem Ausbreitmaß von 17,5 cm

	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
nach 7 Tagen	48,8 kg/cm ²	241 kg/cm ²
nach 28 Tagen	76,6 kg/cm ²	432 kg/cm ²

Schwindmaße (nach 7 Tagen Null-Messung)

nach 14 Tagen 0,11 mm/m	} (Mittel aus drei Proben)
nach 28 Tagen 0,34 mm/m	
nach 42 Tagen 0,44 mm/m	
nach 56 Tagen 0,47 mm/m	

Reinwichte $3,28 \text{ g/cm}^3$

Kornrohichte des Magnetits

Die Kornrohichte ist wiederholt festgestellt worden und ergab eine gewisse Abhängigkeit von Korngröße und Korngefüge,

i. M. Körnung 30...100 mm	$4,95 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$
0... 3 mm	$5,07 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$

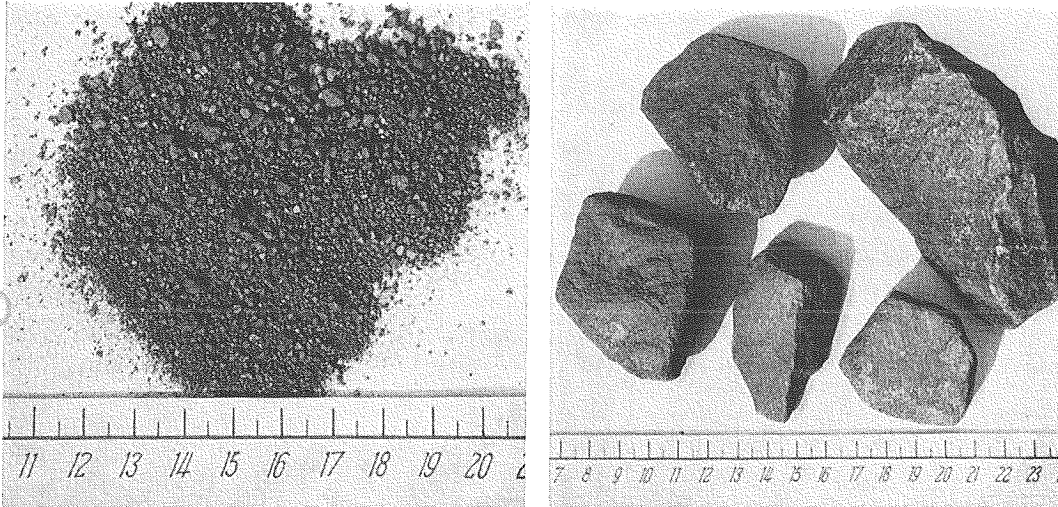


Bild 6. Magnetit, Sand und Grobkorn

Der Magnetitgrobzuschlag hat meist eine gedrungene, häufig auch würfelige Kornform mit fein bis grob rauher Oberfläche und allgemein geringe Saugfähigkeit. Selbstverständlich kam auch längliche und plattige Kornform vor. Die Kornfestigkeit war je nach Feingefüge unterschiedlich.

Die Magnetit-Feinkörnung 0/1 und 0/3 mm war ebenfalls vorwiegend gedrunge und hatte teils rauhe, teils glatte, von der Schichtspaltung herrührende ebene Flächen sowie größtenteils stumpfwinklige Kanten (Bild 6).

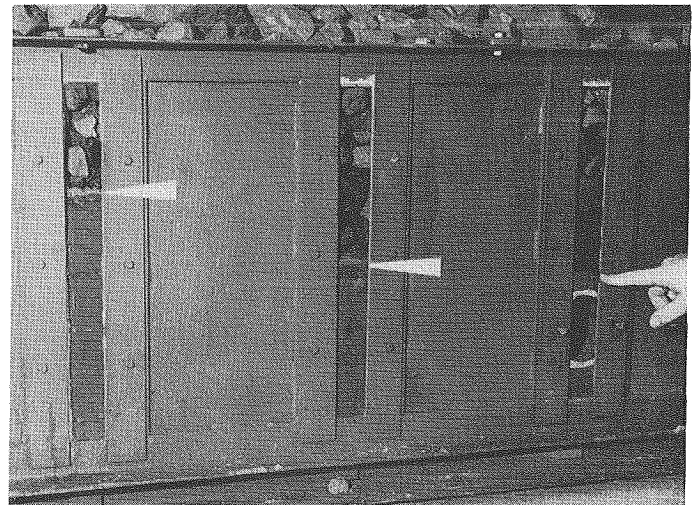


Bild 7. Fließen des Mörtels im Grobzuschlag

Zur Feststellung des Fließvermögens von Einpreßmörtel wird die Zeit, die ein 5000 g schwerer Tauchkörper zum Einsinken in einer bestimmten Mörtelsäule benötigt, gemessen. Das Richtliniengerät sieht an sich eine Spaltweite zwischen dem äußeren Messingrohr und dem Tauchkörper von $1,9 \pm 0,05 \text{ mm}$ vor; da jedoch der Schwerstmörtel zum Teil Magnetitkörner bis 3 mm enthielt, wurde ein geeigneter Tauchkörper derselben Form und Länge jedoch mit Spaltweite von 3,5 mm hergestellt und bei den Versuchen verwandt.

Ein Vergleich mit den empfohlenen Tauchzeiten der Richtlinien ist zwar dadurch nicht mehr möglich, jedoch können Unterschiede des Fließvermögens der verschiedenen Ausführungen des Schwerstmörtels festgestellt werden. Das Gerät arbeitete einwandfrei und ergab reproduzierbare Werte.

Der erste Versuch wurde unmittelbar nach dem Einfüllen des Mörtels in den Messingzylinder durchgeführt, wobei die erste der drei erforderlichen Bestimmungen nicht gewertet wurde. Nach einer Pause von rd. $\frac{1}{2}$ Stunde wurde der Tauchversuch wiederholt.

Raumänderungen durch Sedimentation und Zusatzmittelwirkung wurden durch Messungen der Veränderungen der Mörtelhöhe in einer handelsüblichen, luftdichtverschließbaren 1 kg-Konservendose ($\varnothing 99 \text{ mm}$) bestimmt. Diese Messungen wurden wie die des Fließvermögens am Ort der Großversuche (Bild 7) durchgeführt.

Das Schwinden wurde an $4 \times 4 \times 16 \text{-cm}$ -Prismen gemessen. Diese Prismen wurden auf der Baustelle hergestellt, nach etwa 6...8 Stunden Lagerung unter feuchten Tüchern mit einem Stahllineal abgezogen und nach weiteren 16...18 Stunden Feuchtluft-Lagerung ausgeschalt. Jeweils 3 Prismen lagerten bis kurz vor dem 28-Tage-Prüftermin unter Wasser von rd. 20° C . Drei weitere Prismen wurden bis zum 40-Tage-Prüftermin der Grob-beton-Würfel bei Temperaturen zwischen 18 und 22° C aufbewahrt.

6.22 Mörteluntersuchungen

Es besteht bisher kein anerkanntes Prüfverfahren für Schwerstmörtel, so daß die notwendigen Prüfungen in Anlehnung an bestehende Normen und Richtlinien durchgeführt wurden. Zunächst sei die Art der Prüfungen beschrieben. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche werden geschlossen unter 6.3 Versuchsergebnisse wiedergegeben.

In Anlehnung an die „Vorläufigen Richtlinien für das Einpressen von Zementmörteln in Spannkanäle, Fassung Juli 1957“ [3] und die Prüfung der Normzemente DIN 1164 wurden die folgenden Mörtel-eigenschaften bestimmt.

Da die Schwindmessungen kein absolutes Maß, sondern nur Vergleichswerte zwischen verschiedenen Verfahren liefern konnten, wurden jeweils 3 Kleinprismen nach DIN 1164, wie vorgeschrieben, entformt und nach Wasserlagerung bis zum Alter von 7 Tagen im Schwindmeßgerät nach Graf-Kaufmann erstmals gemessen und gewogen (Null-Messung). Anschließend wurden sie in luftdicht verschließbaren Blechkästen über Glasschalen mit gesättigter Pottaschelösung bei Temperaturen zwischen 18 und 21° C aufbewahrt. Gemessen und gewogen wurden die Bällchen 7 Tage später, sodann alle 14 Tage bis zum Erhärtungsalter von 56 Tagen.

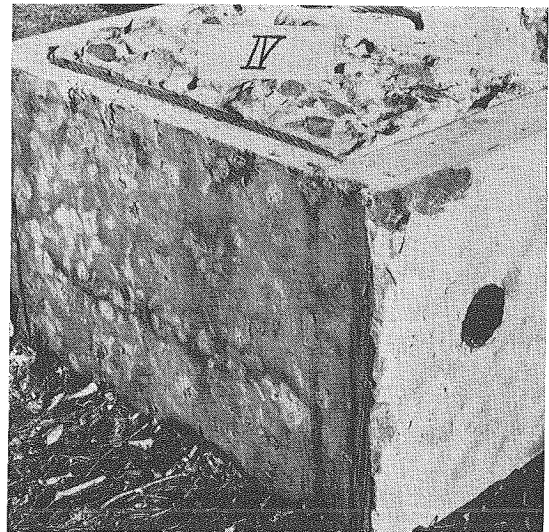
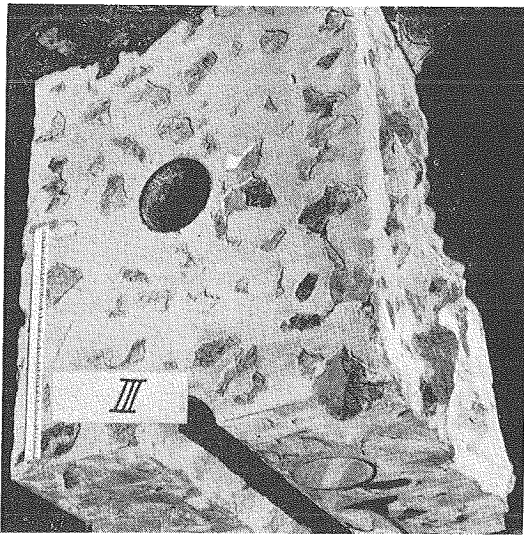
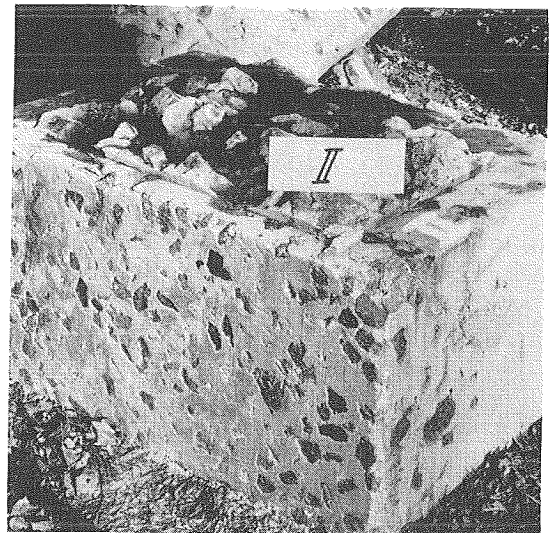
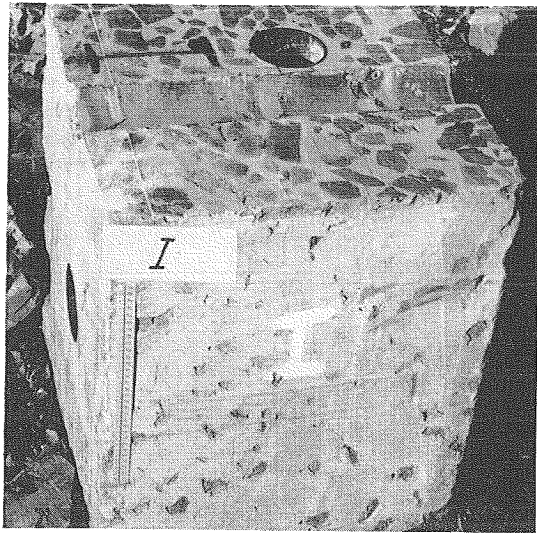


Bild 8. Schal- und Spaltflächen

Die Frischmörtelrohichte wurde unmittelbar auf der Baustelle durch Wiegen in einem geeichten 1-l-Gefäß bestimmt. Die Mörtelrohichte des erhärteten Mörtels wurde außerdem mehrfach an den $4 \times 4 \times 16$ -cm-Prismen gemessen.

Die Druckfestigkeit des Mörtels konnte an den für das Messen des Raumänderungsverhaltens hergestellten Zylindern bestimmt werden. Diese wurden hierzu nach 28tägiger Lagerung in den Blechdosen auf 8 cm abgesägt, mit einer dünnen Zementleimschicht ausgeglichen und abgedrückt. Daneben wurde die Druckfestigkeit an den Bruchstücken der $4 \times 4 \times 16$ -cm-Prismen aus den Biegeversuchen ermittelt.

Die Mörtelprismen wurden entsprechend DIN 1164 auf Biegezugfestigkeit untersucht.

6.23 Betonuntersuchungen

Am erhärteten Beton wurden folgende Untersuchungen vorgenommen: Aus den rd. $1,1 \text{ m}^3$ großen Probekörpern wurden 8 bis 14 Tage nach der Herstellung je 6 Probewürfel von rd. 30 cm Kantenlänge herausgesägt. Für diese Größe der Würfel hatte man sich entschieden, weil die groben Zuschlagstücke Abmessungen bis 100 mm besaßen. Um einen zuverlässigen Mittelwert zu erhalten, wurden 6 statt üblicherweise 3 Würfel untersucht. An den Würfeln wurde das Gefüge, die Rohichte und die Druckfestigkeit nach 40 Tagen bestimmt.

Das Gefüge der Probewürfel wurde durch Augenschein beurteilt.

Die Rohichte des Betons wurde auf zweierlei Weise ermittelt. Einmal durch Wiegen und Ausmessen der Würfel. Wegen des unvermeidlichen Ausbrechens der Kanten beim Sägen war die Raumbestimmung der Würfel nicht ganz sicher. Darum wurde zum zweiten der Rauminhalt der Würfel dadurch gemessen, daß der Hohlraum

zwischen Würfel und einem Stahlbehälter mit trockenem Sand ausgefüllt wurde. Aus dem bekannten Inhalt des Behälters und dem durch Wiegen bestimmten Volumen des Sandes konnte der Rauminhalt des Würfels berechnet werden.

Die Druckfestigkeit wurde nach Erhärtung einer Abgleichsschicht aus fettem Zementmörtel gemessen. Darüber hinaus wurde an den Restteilen der Probekörper nach etwa 7 Monaten Lagerung im Freien eine zerstörungsfreie Prüfung mit dem Schlaghärteprüfer Bauart Frank (DIN 4240) sowie mit dem Prellhärteprüfer Bauart Schmidt vorgenommen.

Die nicht für das Heraussägen der Probewürfel verbleibenden Bruchstücke boten zu den folgenden weiteren Untersuchungen Gelegenheit. An den Schalfflächen, an Bruchflächen und Sägeschnitten (Bild 8 und 9) konnte die Porigkeit des Betons zuverlässig beurteilt werden. Weiter wurden durch die Einbauten, bestehend aus einem NPI 16 und einem waagerechten sowie zwei senkrechten Rohren $\varnothing 100$ (Bild 5 und 9), Sägeschnitte geführt, die den Einschluß solcher Einbauten im Beton beurteilen ließen.

6.24 Betonherstellung

Bei den Großversuchen konnten der Betoniervorgang beobachtet und wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Von Bedeutung war zunächst das Einbringen der groben Magnetitstücke. Es stand fest, daß in der Abschirmung des Reaktors der Grobzuschlag nur von Hand eingesetzt werden kann, so daß bei den Versuchen ein Anhalt für den günstigsten Kornaufbau und das beste Packen gewonnen werden mußte. Damit die Wettbewerbsteilnehmer die Kornzusammensetzung des groben Magnetits erproben konnten, wurde ihnen hierfür vor dem einmaligen Großversuch gesondert Grobzuschlag zur Verfügung gestellt.

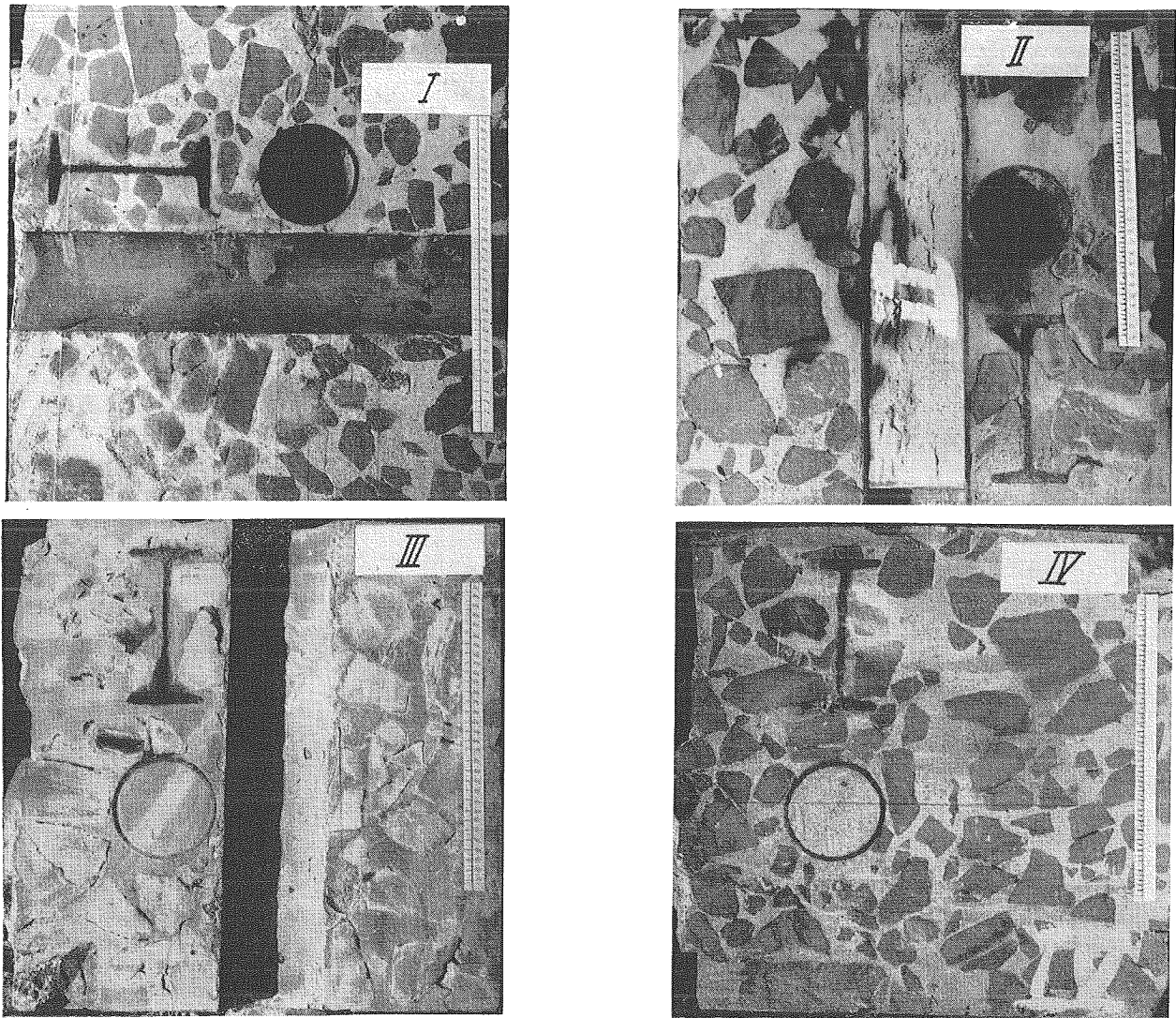


Bild 9. Sägeschnitte

Beim Betonieren war durch Glasfenster in der Stahlschalung das Fließen des Mörtels um die groben Zuschläge zu beobachten (Bild 7). Dabei konnte der Fließkegel gemessen werden. Ferner wurde die Überwachung des Mörtelspiegels mit Beobachtungsröhren erprobt. Schließlich war die Frage zu beantworten, wie eine waagerechte Arbeitsfuge ohne Beeinträchtigung der Homogenität des Betons auszuführen sei.

6.3 Versuchsergebnisse

Die Wettbewerbsteilnehmer sind im folgenden mit I, II, III, IV nach der zeitlichen Reihenfolge der Versuchsdurchführung bezeichnet.

6.31 Betonzusammensetzungen

Aus Tafel III ist zu ersehen, daß die Haufwerksporigkeit trotz verschiedener Kornzusammensetzungen nicht wesentlich unterschieden ist. Die Werte sind aus dem Gewicht des in der Stahlschalung von 1,1 m³ gepackten Magnetit und dessen Rohwichte von i. M. 4,9 berechnet. Die kleinen Unterschiede zwischen theoretischer und experimenteller Rohwichte von rd. 1% und weniger lassen keine Schlußfolgerung aus diesen nicht ganz genauen Werten zu. Kennzeichnend ist jedoch die Verringerung der Betonrohichte des Versuches IV, der auf einem beträchtlichen Auftreiben des Mörtels durch das dabei verwendete Zusatzmittel beruht.

6.32 Mörtel Eigenschaften

Die gemessenen Mörtel Eigenschaften sind in Tafel IV zusammengestellt.

Das Fließvermögen des Schwerstmörtels ist für das einwandfreie Ausfüllen aller Hohlräume und seine Erhaltung für die Überbrückung kurzer Betriebsunterbrechungen von Bedeutung. Darum ist in An-

Tafel III. Betonzusammensetzungen

Verfahren	I	II	III	IV
Magnetitsand mm	0-3	0-1	0,2-1	0-1
Grober Magnetitzschlag	30- 60: 33	30- 60: 39	20- 60: 30	10- 20: 7,6
Körnung u. Zusammensetzung in Gew. %	60-100: 67	60-100: 61	60-100: 70	20- 60: 65,3 60-100: 27,3
Haufwerksporigkeit %	45,5	44,5	41,2	42,6
Mörtelzusammensetzung in Gewichtsteilen				
Zement	1	1	1	1
Magnetitsand	2	3	2	2,67
Wasser	0,46	0,60	0,48	0,53
Zusatzmittel	0,01	0,03	0,03	0,015
nach Volumen:				
Zement	0,261	0,201	0,253	0,223
Magnetitsand	0,339	0,390	0,330	0,303
Wasser	0,395	0,396	0,400	0,387
Zusatzmittel	0,005	0,013	0,017	0,007
max. Frischmörtelrohichte g/cm ³	2,98	3,05	2,93	3,07
Betonzusammensetzung				
Grober Magnetit kg/m ³	2700	2750	2880	2840
Mörtel kg/m ³	1355	1350	1225	1310
Zementgehalt kg/cm ³ (ungefähr)	370-380	290-300	340-360	300-320
theoretische Rohichte des Betons kg/m ³	4055	4100	4105	4150
experimentelle Rohichte des Betons kg/m ³	4070	4080	4060	4000
Unterschied kg	+ 15	-20	-45	-150

Tafel IV. Mörtel Eigenschaften

Verfahren	I			II			III			IV		
Rohwichte des Frischmörtels	(2,71)			3,04			2,91			2,93		
Fließvermögen Tauchzeit (sec) nach rd. 2 Min. rd. 40 Min.	17 ; 17,5 20,3; 21,0			13; 13 20; 20			8,5; 8,6; 8,9 97; 60			11; 11 24; 25		
Fließkegelneigung im Grobzuschlag	25°			18-20°			18-20°			bis 45°		
Probekörper	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Raumänderungsverhalten	(Mörtelzylinder rd. 100 mm ø 100 mm Höhe)											
Höhenunterschied (mm)	+1,6	+1,1	+2,1	-1,9	-2,6	-2,0	-1,9	-1,2	-2,1	+3,5	+2,9	+1,8
Mittel aus 6 Messungen	102,4	101,9	102,8	105,9	107,6	106,0	103,9	102,2	103,1	104,5	102,1	104,2
Füllhöhe (mm)	1,59			—			—			2,64		
Quellen i. M. % Absetzen	—			2,03			1,68			—		
Rohwichte (g/cm³) i. M.	2,83	2,85 2,80	2,71	3,02	3,00 3,01	2,99	2,97	2,89 2,97	3,04	2,70	2,70 2,69	2,68
Druckfestigkeit (kg/cm²) i. M.	401	501 443	427	353	414 384	385	504	500 487	458	237	232 229	218
	(Mörtelprismen 4 x 4 x 16 cm)											
Rohwichte (g/cm³) i. M.	2,70	2,70 2,69	2,68	3,04	3,07 3,05	3,05	3,01	3,00 3,00	3,00	2,72	2,73 2,73	2,73
Druckfestigkeit (kg/cm²) i. M.	500	483 499	530	398	398 392	380	447	424 446	466	240	230 230	220
Biegezugfestigkeit (kg/cm²) i. M.	85,2	100,2 92	90,8	89,9	86,1 86	83,3	94,1	98,3 100	106,2	61,3	60,4 62	62,7
Schwindmaß (mm/m) nach Tagen:	14	0,294			0,127			0,32			0,18	
	28	1,070			0,860			0,92			1,11	
	42	1,455			0,109			1,21			1,30	
(Mittel aus 3 Prismen 4 x 4 x 16 cm) 56		1,570			1,130			1,25			1,30	
Rohwichte (g/cm³) nach Tagen:	14	2,75			2,95			2,90			2,59	
	28	2,68			2,87			2,86			2,53	
	32	2,66			2,85			2,84			2,51	
(Mittel aus 3 Prismen 4 x 4 x 16 cm) 56		2,65			2,84			2,83			2,51	

lehnung an die erwähnten Prüfrichtlinien für das Auspressen von Spankanälen zu fordern, daß die Tauchzeit nach 1/2-stündiger Liegezeit des Mörtels nicht mehr als den doppelten Betrag der sofort nach Entnahme festgestellten Tauchzeit beträgt. Diese Bedingung wird streng genommen nur von Verfahren I und II erfüllt, wobei Verfahren I das geringste Versteifen zeigt. Das Raumänderungsverhalten der verschiedenen Mörtel ist zum Teil aus der Wirkung der Zusatzmittel zu deuten. Darüber hinaus sind aber sicher Einflüsse aus Mörtelzusammensetzung, Mischart und Mischdauer in die Absetz- oder Quellmaße eingegangen.

Das Schwindmaß der einzelnen Mörtel ist nicht wesentlich voneinander unterschieden. Wie die gleichzeitige Messung der Rohwichte zeigt, sind die Proben scharf ausgetrocknet. Die Schwindmaße stellen nur Vergleichswerte dar. Da der Beton in einer bleibenden Stahlschalung hergestellt wird, ist nur mit einem sehr geringen bzw. gar keinem Schwinden zu rechnen. Hinzu kommt, daß die Schwindneigung von Auspreßbeton ohnehin gering ist. Zur Ausfüllung etwa verbliebener kleiner Hohlräume ist jedoch ein Mörtel mit einer gewissen, wenn auch geringen Treibwirkung vorzuziehen. Die Rohwichte des Mörtels der Verfahren II und III entspricht annähernd der theoretischen Rohwichte. Spätere Feststellungen an Mörtelmischungen des Verfahrens I und der gemessenen Betonrohichte bei den Versuchen, verbunden mit der Berechnung der Raumauffüllung, ließen vermuten, daß der Mörtel des Verfahrens I eine höhere Rohwichte hatte (2,9 g/cm³) als die Proben ergaben. Darum wurde der gemessene Wert eingeklammert.

Die Druckfestigkeiten sind, da die Normendruckfestigkeit des Zements als konstant anzusetzen ist, außer vom Wasser/Zement-Wert vom Herstellungsverfahren und vom Zusatzmittel abhängig, was sich besonders bei Versuch IV zeigt. Dasselbe gilt von der Biegezugfestigkeit.

6.33 Betoneigenschaften

Die Rohwichte der Schwerstbetonwürfel von rd. 30 cm Kantenlänge in g/cm³ enthält die Tafel V.

Tafel V. Rohwichte der Schwerstbetonwürfel

Auspreßverfahren	I		II		III		IV	
Meßverfahren	1	2	1	2	1	2	1	2
Würfel 1	4,16		4,14	4,13	4,06	4,08	3,91	3,96
" 2	4,08		4,13	4,13	4,07	4,08	4,04	4,07
" 3	4,04	—	4,03	4,08	4,00	3,98	4,07	4,07
" 4	4,05		4,02	4,02	4,00	4,00	4,02	4,00
" 5	4,08		4,00	4,02	4,12	4,16	3,97	4,01
" 6	4,00		4,17	4,16	4,12	4,15	3,98	4,01
Rohwichte i. M.	4,07		4,08	4,09	4,06	4,08	4,00	4,03

Unter Rohwichte ist hier die an den nach etwa 1 Woche aus dem Probekörper gesägten und anschließend an der Luft gelagerten Würfeln festgestellte Rohwichte zu verstehen. Der Beton in der Abschürnung trocknet wegen der bleibenden Stahlschalung nicht wesentlich aus, so daß die gemessenen Rohwichten noch etwas ungünstiger sind als die zu erwartenden Werte.

Die Druckfestigkeiten wurden auf drei verschiedenen Wegen bestimmt und sind in Tafel VI zusammengestellt. Es bezeichnen
1 Schlaghärteprüfung nach DIN 4240 am 8 Monate alten Beton
2 Prellhammerprüfung am 8 Monate alten Beton
3 Druckfestigkeit von 30 cm Würfeln nach 40 Tagen.

Tafel VI. Druckfestigkeit [kg/cm²]

Auspreßverfahren	I		II		III		IV	
Prüfverfahren	Probe							
1	1	355	355	380	260			
	2		336	420	280			
	i. M.	355	332	400	270			
2	1	360	310	360	250			
	2		345	400	300			
	i. M.	360	327	380	275			
3	1	381	348	372	340			
	2	367	308	326	344			
	3	424	300	310	397			
	4	390	298	359	385			
	5	384	315	334	368			
	6	422	312	349	365			
i. M.		395	314	342	365			

Die zerstörungsfreien Prüfungen wurden am Mörtel der zerschnittenen Betonblöcke ausgeführt, nachdem diese etwa 8 Monate im Freien gelagert hatten. Die angegebenen Werte sind arithmetische Mittel aus 10 bis 15 Einzelprüfungen und wurden als „wahrscheinliche Werte“ bzw. als „Mittelfestigkeit mit 50% Wahrscheinlichkeit“ aus den entsprechenden Eichtafeln entnommen.

Zum Vergleich sind ebenfalls nach 40 Tagen drei Mörtelprismen 4 x 4 x 16 cm auf Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit untersucht worden und in Tafel VII zusammengestellt.

geht also mit größerem Einfluß in die Druckfestigkeit ein als die Mörteldruckfestigkeit, die erklärlicherweise erst wirksam wird, wenn die Berührungsstellen des Steingerüstes versagen.

Das Gefüge des Betons der vier Versuche konnte an Schalflächen, an Bruchflächen und Sägeschnitten betrachtet werden. In erster Linie konnte festgestellt werden, ob der Mörtel alle Hohlräume ausgefüllt hat.

Bei den Verfahren I, II und III sind an den Schalungsflächen und im Betoninnern kleine Luftschlüsse festzustellen, wo die Steine

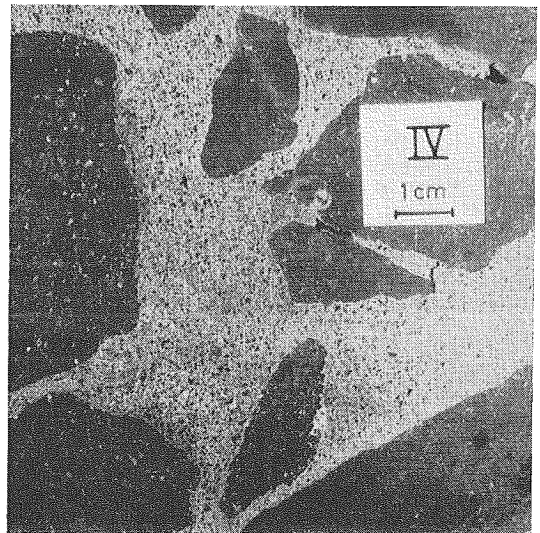
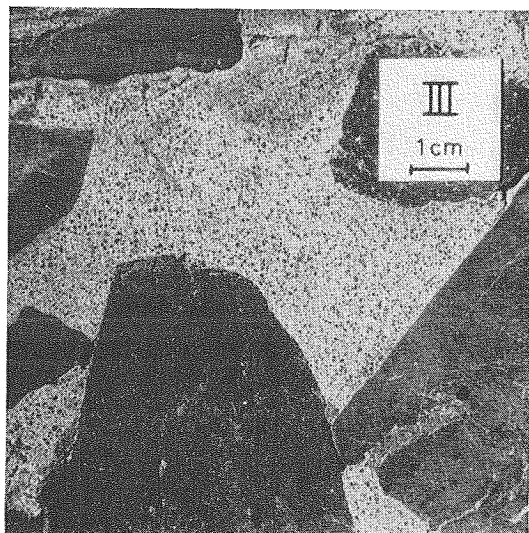
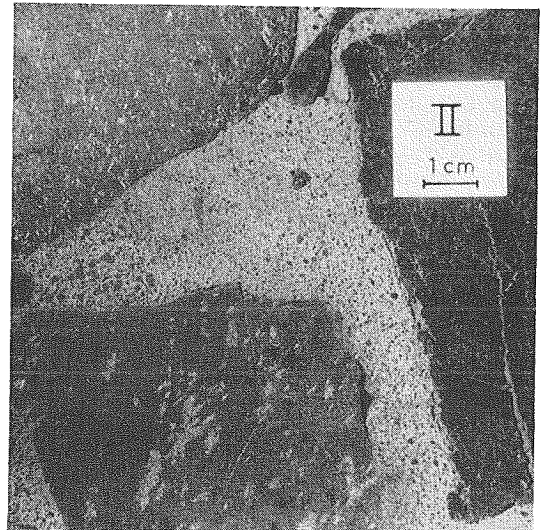
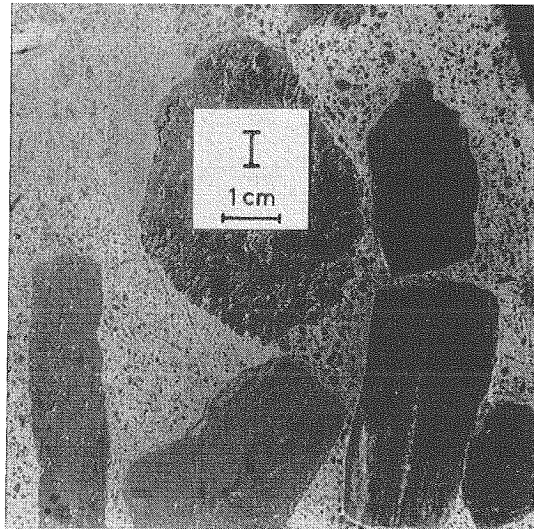


Bild 10. Feingefüge

Tafel VII. Druck- und Biegezugfestigkeit von Mörtelprismen

Verfahren	I	II	III	IV
Druckfestigkeit 1	490	376	556	264
(kg/cm ²) 2	556	380	527	269
nach 40 Tagen 3	518	374	516	274
nach 28 Tagen i. M.	521 (499)	377 (392)	533 (446)	269 (230)
Biegezugfestigkeit 1	102	91	100	65
(kg/cm ²) 2	105	98	110	53
nach 40 Tagen 3	105	82	109	66
nach 28 Tagen i. M.	103 (92)	90 (86)	106 (100)	65 (62)

Betrachtet man die Ergebnisse der verschiedenen Druckfestigkeitsprüfungen, so fällt auf, daß die Festigkeiten der Probewürfel der vier Verfahren nur wenig verschieden sind, während die der Mörtel auch bei den zerstörungsfreien Prüfungen beträchtlich schwanken. Diese Tatsache widerspricht den bisherigen Erfahrungen, nach der die Betonfestigkeit in erster Linie von der Zementleim-Festigkeit abhängig ist. Die Erklärung ist in der Herstellungsweise zu suchen. Das grobe Korn eines Auspreßbetons stützt sich gegeneinander ab, ohne daß an diesen Stellen Zementleim vorhanden ist. Die Art der Packung

enge Spalte bilden. Diese Hohlräume fehlen beim Verfahren IV fast völlig. Im übrigen besitzt der Beton in allen vier Fällen, wie sich an den Sägeschnitten zeigt, ein dichtes, gutes Gefüge, das den Ansprüchen an die Homogenität für eine starke Abschirmung völlig genügt. Vor allem sind die Einbauten gut im Mörtel eingebettet. Irgendwelche Spalte haben sich nicht gebildet. Während die Mörtel der Verfahren I, II und III sehr dicht gefügt sind, besitzt der des Verfahrens IV eine große Menge von Poren. Wegen dieser Poren ist der Beton trotz des vollständigen Ausfüllens der Hohlräume etwas leichter als der der anderen drei Verfahren. Außerdem hat sich beim Verfahren IV an der Betonoberfläche eine einige Millimeter dicke leichte weiße Schicht abgesetzt, die nicht erhärtete und sich zu Pulver zerreiben ließ. Die Bildung dieser Schicht muß auf das verwendete Zusatzmittel zurückgeführt werden. Außerdem war ein nestartiger Hohlraum an einer Ecke der Oberfläche festzustellen, der wahrscheinlich durch zu schnelles Steigen des Mörtelspiegels entstand.

Die Bilder 8, 9 und 10 zeigen das Gefüge des nach den einzelnen Verfahren hergestellten Betons.

6.34 Beobachtungen bei der Betonherstellung

Hier sollen zunächst nur die Fragen behandelt werden, die zur

Wahl des geeignetsten Verfahrens führten. Untersuchungen von Eigenschaften und Sonderfragen, die allen vier Verfahren gemeinsam sind, werden in Abschnitt 8 behandelt. Bei den Verfahren I und IV wurden die groben Zuschlagstoffe durch kräftiges Abspritzen vom teilweise anhaftenden Staub befreit. Die Verfahren II und III verwendeten sie, wie sie auf der Baustelle im Freien lagen. Ein hervortretender Einfluß des Waschens auf die Betoneigenschaften hat sich nicht gezeigt.

Zur Mörtelherstellung benutzten das Verfahren I den Magnetitsand 0/3 mm, wie er nach dem Brechen ausgesiebt wurde, die Verfahren II und IV einen gesondert ausgesiebten Sand 0/1 mm und das Verfahren III einen doppelt ausgesiebten Sand 0,2/1 mm. Vergleicht man die Ergebnisse bei den Verfahren I und II oder I und III, so läßt sich ebenfalls kein besonderer Vorzug von ausgesiebttem Sand feststellen. Wegen des höheren Verlustanteils sind solche Sande aber letzten Endes wesentlich teurer.

Eine besondere Bedeutung für die Betoneigenschaften hat jedoch ganz offensichtlich das Mischverfahren des Mörtels und zum Teil das verwendete Zusatzmittel. Die Unterschiede zeigen sich sowohl im Betongefüge als auch in den Mörtel- und Betoneigenschaften.

Hiermit hängt die Frage der Erfahrungen beim Herstellen von Auspreßbeton eng zusammen. Diese Erfahrungen lassen sich, wie sich gezeigt hat, weitgehend auf die Herstellung eines Auspreßschwerstbetons übertragen. Die Firmen, die die Verfahren I und IV herstellen,

Tafel VIII. E -Modul (Mittel aus je drei Messungen in kg/cm^2)

Druckspannung (kg/cm^2)	Magnetitbeton	Hämatitbeton
30	404 000	452 000
55	388 000	416 000
80	377 000	407 000
105	369 000	393 000
130	347 000	378 000
155	350 000	377 000
180	334 000	363 000

besitzen diese Erfahrungen, und der Einsatz ihrer Originalmaschinen und ihres Stammpersonals hinterließ den Eindruck technischer Reife. Dagegen befanden sich die Verfahren II und III trotz einzelner Vorzüge zum Teil noch im Versuchsstadium.

7. Wahl des Verfahrens

Überschaut man die umfangreichen Versuchsergebnisse, die zur Auswahl des geeignetsten Auspreßverfahrens erarbeitet wurden, so fällt auf, daß ganz wesentliche Unterschiede in der Güte des erzielten Betons nicht vorhanden sind. Mit allen vier Verfahren wurden die gestellten Mindestanforderungen überschritten. Es kann daher gesagt werden, daß alle vier Verfahren zur Herstellung des Abschirmbetons möglich sind. Ohne Zweifel sind die Herstellerfirmen auch in der Lage, die Unterschiede, die sich im einzelnen ergeben haben, durch Berücksichtigung der aus den Versuchen gewonnenen Erfahrungen auszugleichen. Der Sinn der Großversuche, deren Übertragbarkeit auf die praktische Bauausführung durch die Versuchsbedingungen gewährleistet war, ist jedoch darin zu erblicken, daß den konkurrierenden Firmen eine einmalige Gelegenheit gegeben wurde, die Gesamtheit ihres Wissens und ihrer Erfahrungen sowohl in betontechnologischer als auch in betrieblich-organisatorischer Hinsicht einzusetzen und vorzuführen. Zu ausreichender Vorplanung war ihnen durch Unterrichtung über die Versuchsziele und Gestellung von Baustoffen Gelegenheit gegeben.

Aus den Versuchsergebnissen erkennt man, daß betontechnologisch die Verfahren III und IV gegenüber den beiden anderen gewisse Mängel besaßen. Diese liegen in der Hauptsache beim Verfahren III im früh versteifenden Mörtel und der damit verbundenen größeren Porigkeit des Betons und dem erhöhten Risiko beim Betonieren. Beim Verfahren IV sind sie in der unnötig großen Porigkeit des Mörtels und den daraus folgenden schlechteren Mörtel-eigenschaften zu suchen. Nicht zuletzt ist das Absetzen der nicht erhärtenden sehr leichten Schicht an der Betonoberfläche für das gesamte Betongefüge als nachteilig zu beurteilen. Die Schwind- und Quell- bzw. Absetzmaße der Mörtel glichen sich bei den Verfahren I und IV etwa aus, während sich bei Verfahren II und III Schwinden und Absetzen addierten. Zwar kann man das Quellen und Schwinden schon wegen seiner zeitlichen Verschiebung nicht ohne weiteres überlagern, es

kommt auch hinzu, daß die festgestellten Maße nur Vergleichswerte sind. Trotzdem ist aber ein Mörtel, der sich absetzt und dazu womöglich noch schwindet, ungünstiger zu beurteilen als ein zunächst leicht quellender Mörtel. Es muß jedoch gesagt werden, daß sich trotz dieser Unterschiede im Mörtelverhalten keine hervortretenden Mängel im Betongefüge gezeigt haben, die auf dieses Verhalten zurückgeführt werden könnten.

Betrieblich-organisatorisch waren die Verfahren I und IV, wie gesagt, den beiden anderen überlegen, untereinander jedoch gleichwertig. Alles in allem hatte sich das Verfahren I wegen seiner technischen Güte und betrieblichen Ausgereiftheit als das für die Herstellung des Auspreßschwerstbetons der biologischen Abschirmung geeignetste erwiesen. Es wurde deshalb gewählt.

8. Untersuchung einiger Sonderfragen

Zum Abschluß sollen noch die Ergebnisse einiger Untersuchungen wiedergegeben werden, die über Sonderfragen Aufschluß bringen sollten.

8.1 Elastizitätsmodul von Magnetitbeton

Wie im Abschnitt 2.22 gesagt, trägt die untere waagerechte, etwa 2,5 m dicke Betonabschirmung den gesamten Reaktor. Im Hinblick auf die Toleranzen muß unbedingt aus den oben ausführlich erwähnten Gründen vermieden werden, daß der Beton durch Biegespannung zu große elastische Verformungen erfährt. Deshalb wurde der zunächst geschätzte E -Modul von Magnetitbeton gemessen. Er wurde an Magnetit- und Hämatitbeton, die auf übliche Weise hergestellt waren, bestimmt. Der Beton entspricht zwar nicht genau dem Beton in der Abschirmung, aber die Messungen zeigen zumindest, daß man bei Magnetitbeton keinen vom üblichen abweichenden Einfluß des Zuschlagstoffes auf den E -Modul zu erwarten hat. Andererseits mußten die Messungen gleichzeitig mit den Eignungsprüfungen gemacht

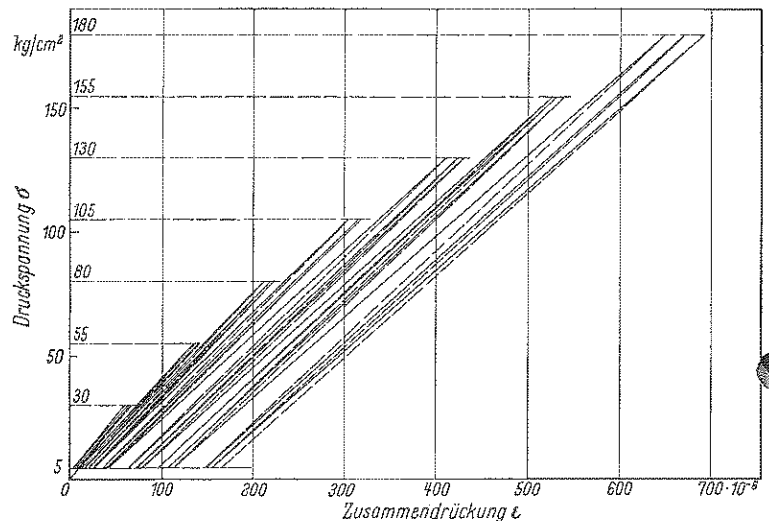


Bild 11. E -Modul von Magnetitbeton

werden, um Unterlagen für die statische Berechnung und die Abschätzung der zu erwartenden Durchbiegungen zu schaffen.

In der Tafel VIII sind die Ergebnisse von Messungen des E -Moduls von Magnetit- und Hämatitbeton wiedergegeben.

Der E -Modul wurde an je 3 Betonzyllern einer Betonart von 15 cm Durchmesser und 50 cm Höhe mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen gemessen.

In Bild 11 ist das Spannungsdehnungsdiagramm einer solchen Messung wiedergegeben.

8.2 Wärmekonstanten von Magnetitbeton

Zur Berechnung der im Beton auftretenden Temperatur durch die Abbindewärme des Zementes und die Wärme aus der Strahlenabsorption ist die Kenntnis der spezifischen Wärme und der Wärmeleitfähigkeit des Magnetitbetons notwendig, und für die Berechnung der Spannungen im Beton aus der Temperaturverteilung muß der Wärmedehnkoeffizient bekannt sein.

Diese drei Wärmekonstanten wurden ebenfalls gemessen (siehe Tafel IX).

Tafel IX. Wärmekonstanten von Magnetitbeton (Mittel aus zwei Messungen)

Spezifische Wärme	0,185	cal/g °C
Wärmeleitzahl	0,75	kcal/m · h · °C
Wärmeleitzahl (Rechenwert)	1,19	kcal/m · h · °C
Wärmedehnzahl	0,0102	mm/m °C $\triangle 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$

Die Wärmeleitzahl ist nach dem in DIN 52 612 Blatt I festgelegten Verfahren gemessen worden. Die gemessenen Werte müssen nach dieser Norm für die praktische Rechnung um 60% erhöht werden, damit der Feuchtigkeitseinfluß berücksichtigt wird. Dieser Wert ist auch im vorliegenden Falle als richtig anzunehmen, da die Feuchtigkeit nicht aus dem Beton entweichen kann.

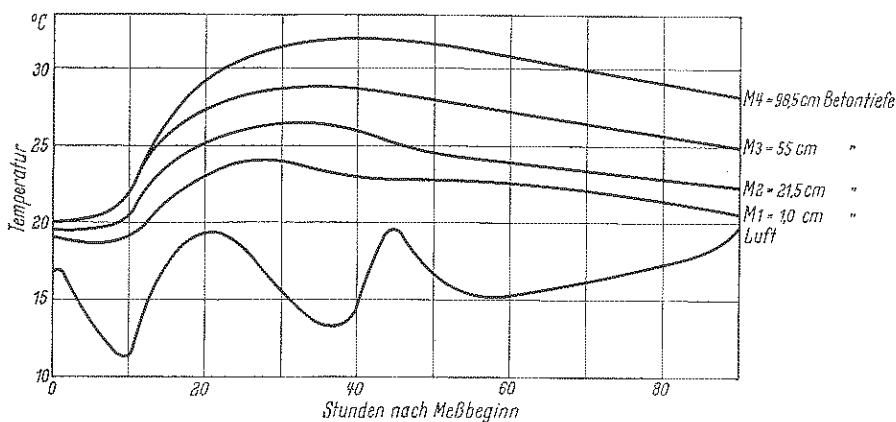
8.3 Wärmeentwicklung des Magnetit-Auspreßbetons

Obgleich der Zement im Hinblick auf die Hydrationswärme mit Vorsicht gewählt wurde, sind, um sicher zu gehen und einen Anhalt für die zu erwartenden Temperaturen zu erhalten, bei den Großversuchen an zwei Probekörpern Temperaturmessungen vorgenommen worden. Hierfür wurden in der Mitte des Betons an vier Stellen Thermoelemente eingebaut und die Probekörper mit Sägespänen, Stroh- und Wärmedämmplatten gut nach außen abgedämmt. Die Bilder 12 und 13 geben die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung der zweiten Messung am Probekörper des Versuches III wieder. Die höchsten Temperaturen der ersten Messung lagen um etwa 5 bis 7° C niedriger, weil die Wärmedämmung weniger sorgfältig hergestellt war. Der größte Temperaturunterschied innerhalb des Betons betrug also 9° C. Dieser Unterschied läßt bereits eine größte Zugspannung von rd. 20 kg/cm² erwarten. Man sieht, daß bei einer 2 m dicken Abschirmung Vorsicht am Platze ist, da mit gewöhnlichem Portlandzement wahrscheinlich die doppelten Spannungen auftreten können.

8.4 Ausbildung waagerechter Arbeitsfugen

Schließlich sei noch über eine Frage berichtet, die sich auf den Betoniervorgang bezieht. Die Abschirmung muß aus Gründen der Montage in einzelnen waagerechten Abschnitten hergestellt werden. Daraus folgt für den Abschirmbeton die Notwendigkeit waagerechter Arbeitsfugen. Da beim Auspreßbeton die erreichte Wichte des Betons hauptsächlich vom vorgepackten groben Gestein abhängt, darf man an diesen Arbeitsfugen nicht einfach bis zur Oberfläche des Steingerüstes auspressen. Auf diese Weise würden Schichten in der Abschirmung entstehen, die erheblich mehr Mörtel enthalten und für die Strahlung durchlässiger sind als zulässig. Andererseits kann man den Mörtel auch nicht einige cm unter der Gesteinsoberfläche stehen lassen, da er nicht in einer waagerechten Fläche aufsteigt, sondern kegelförmig um die Auspreßrohre herum. Die Neigungswinkel der Kegel betragen zwischen 15 und 25°. Man verliert also die Übersicht über die Mörteloberfläche, wenn man mit Auspressen aufhört, ohne

daß der Mörtel bis zur Oberfläche gestiegen ist. Als Lösung dieser Schwierigkeit wurde folgender Weg gefunden. Der Mörtel tritt aus dem groben Gestein aus und bildet dann eine Fläche, in die grobe Magnetitsteine dicht an dicht eingedrückt werden. Es läßt sich so eine verhältnismäßig ebene aber gut verzahnte Oberfläche herstellen, wobei die obere Betonschicht nicht wesentlich weniger dicht als der übrige Beton ist.



Meßbeginn: 1 Std. nach Ende der Füllung

Bild 12. Abbinde Temperaturen mit Zeit als Abszisse

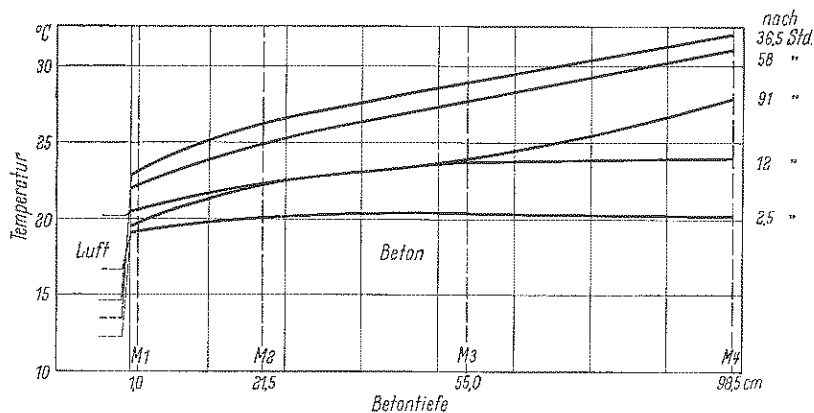


Bild 13. Abbinde Temperaturen mit Tiefe als Abszisse

Schlußbemerkung

Das Institut für Beton- und Stahlbetonbau der Technischen Hochschule Karlsruhe begutachtete die Versuche, entnahm die Proben und führte die Untersuchungen durch. Darüber hinaus erteilten der Institutsdirektor o. Prof. Dr.-Ing. G. Franz und sein Obering. Dr.-Ing. K. Weirich bei den wichtigsten Fragen der Herstellung der Betonabschirmung wertvolle Ratschläge.

Schrifttum:

- [1] Blässer, G.: Abschirmprobleme des FR 2, Bericht Nr. 12 vom 10. 1. 59 Kernreaktor Bau- und Betriebs-G.m.b.H.
- [2] Price und andere: Radiation Shielding, Pergamon Press, London 1957.
- [3] B. u. St. 1957, S. 292 u. f.