

*Jares*  
BAUMA MÜNCHEN 1967

# Zement-Kalk-Gips

Nr. 2 / FEBRUAR 1967

Belegexemplar 

56. Jahrgang «ZEMENT»

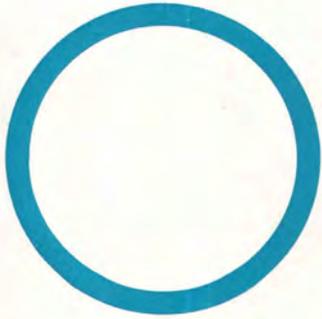
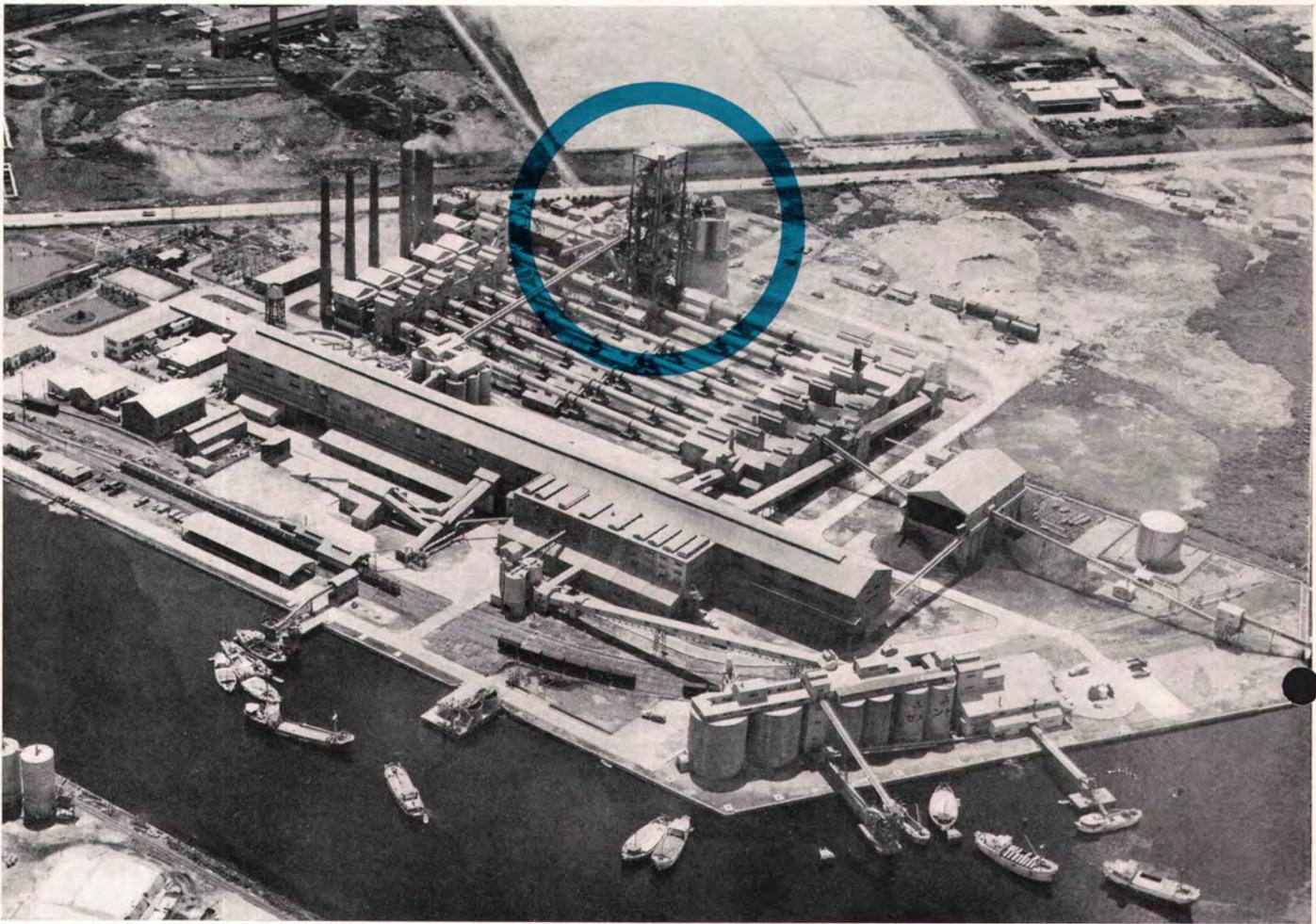
I Y 7502 E

(siehe Seite *114*)

*Arch.*



**STAHL-SIMONIS**  
**Hannover-Misburg**



Hier stand ebenfalls ein langer Naßofen. Er war erst 1 Jahr in Betrieb. Also neu. Sein Durchmesser betrug 5,2/4,9/5,3. Seine Länge 187 m. Seine Leistung: 1800 tato (bei dem bekanntlich hohen Wärmeaufwand des Naßverfahrens).

Der Ofen sollte wirtschaftlicher arbeiten. Deshalb studierten die Werksingenieure den Umbau auf das Trockenverfahren. Es ergaben sich zwei Möglichkeiten:

- 1.) Langer Trockenofen mit Einbauten.  
Garantierte Leistung: 2200 tato bei  
850 kcal/kg Klinker
- 2.) Doppelfofen mit Polystyrol-Vorwärmer  
und gekürzter Ofen von 187 m auf 95 m.  
(Restlänge als Trockentrommel verwendet.)  
Garantierte Leistung: 2500 tato.

## Über die Technologie der Kunststoff-Betone

*The technology of resin concretes*

*De la technologie des bétons de résine*

Von **R. Bares**, Prag

Institut für theoretische und angewandte Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit Erkenntnissen über die Technologie der Kunststoff-Betone, die in den letzten Jahren im Institut für theoretische und angewandte Mechanik gewonnen wurden. Weitere Untersuchungen sind noch in Arbeit, und es wird auch auf einige Probleme hingewiesen, die noch gelöst werden müssen. Formänderungseigenschaften der Kunststoff-Betone, wie z. B. Elastizität, Kriechen, Schwinden und andere Volumveränderungen, sowie Rheologie usw., werden hier nicht untersucht werden. Dieser Artikel ist eine kurze Zusammenfassung der Berichte über die von dem Institut für theoretische und angewandte Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften und dem VEB „Doprastav“, Bratislava, vorgenommenen Forschungsarbeiten.

### 1. Einleitung

Jede Konstruktion ist außer der Beanspruchung durch äußere Kräfte auch noch in größerem oder kleinerem Maße der Wirkung physikalisch-chemischer Einflüsse des umgebenden Mediums ausgesetzt.

Die bekannten Baustoffe, wie Ziegel, Beton und andere, widerstehen solchen Einflüssen in verschiedener Weise. Größtenteils ist es notwendig, sie in aggressiven Medien ausreichend zu schützen. Isolierungen sind kostspielig und manchmal sogar teurer als die eigentliche, der äußeren Beanspruchung standhaltende Konstruktion. Aus dieser Tatsache ergibt sich als eine ganz natürliche Folge das Bestreben, die beiden erforderlichen Funktionen, d. i. die tragende und isolierende, in einem einzigen Material zu vereinen.

Die Untersuchungen über ein solches neues Material als organisch-anorganisch gemischtes System wurden in unserem Institut im Jahre 1958 begonnen. Der organische Teil des Materials ist das Bindemittel, der anorganische das Füllmittel. Diese Stoffe werden heute Harz- oder Kunststoff-Betone genannt. Wenn als Bindemittel Furanharze benutzt werden, führen sie den Namen *Berol*<sup>1,2,3</sup>.

Ähnlich wie normale Betone bestehen Kunststoff-Betone aus Sand und Schotter mit Korngrößen von 0 bis 3 bis 10 cm, die gemeinsam mit dem Bindemittel (Harzmonomere, Katalysator, Beschleuniger) gemischt werden,

bis ein gleichmäßiges Gemenge entsteht, mit dem die Formen unter Stampfen, Rütteln usw. gefüllt werden. Sie kommen dann in einen trockenen und warmen Raum, in dem die Polymerisations- oder Polykondensationsreaktion des Bindemittels in Ruhe vor sich geht und die Erhärtung stattfindet. Kunststoff-Beton kann also, ebenso wie normaler Beton, als Mauerwerksmaterial betrachtet werden, welches nach seiner Herstellung einheitlich, fugenlos und monolithisch ist. In gleicher und oft besserer Weise können wir verschiedene Fertigteile erzeugen, die zum Aufbau, zur Verkleidung usw. verwendet werden können.

Vom normalen Beton unterscheiden sich Kunststoff-Betone unter anderem auch durch die relative Menge des Bindemittels. Beim normalen Beton beträgt die Gewichtsmenge des Bindemittels (Zement) durchschnittlich ein Fünftel der übrigen Bestandteile, bei Kunststoff-Betonen dagegen ein Zwölftel bis ein Fünfzehntel der Gesamtmasse.

Der Erhärtungsverlauf der Kunststoff-Betone kann gewöhnlich in einem weiten Zeitbereich reguliert werden, von einigen Stunden bis zu Monaten. Deshalb ist es besonders vorteilhaft, Kunststoff-Betone in der Vorfertigung zu verwenden, da hierbei ein schneller Umsatz der Formen bei nicht zu anspruchsvollen Nachbehandlungsbedingungen — mit warmer trockener Luft — erzielt werden kann. Bei manchen Kunststoff-Betonen kommt noch der Vorteil hinzu, daß zur Herstellung des Kunststoffs verschiedene Abfälle nutzbar gemacht werden können.

Der Preis des Kunststoff-Betons, der vom Preis des Bindemittels abhängt, ist wahrscheinlich immer höher als der des normalen Betons, und daraus folgt, daß Kunststoff-Betone nicht geeignet sind und auch nicht anstreben, als Universalersatz für normalen Beton zu dienen. Sie bieten jedoch beachtenswerte Verwendungsmöglichkeiten dort, wo der gewöhnliche Beton den gegebenen Erfordernissen nicht entsprechen kann und andere Bauweisen, z. B. Mauerwerk, schwere Isolationen usw., sehr mühevoll sind. Besonders wertvoll ist dabei die wesentliche Reduzierung des Arbeitsaufwands und die Steigerung der Arbeitsproduktivität.

Obwohl Kunststoff-Betone im Vergleich mit dem normalen Beton ein weit günstigeres Verhältnis zwischen Zug- und Druckfestigkeit aufweisen — durchschnittlich

ein Fünftel gegenüber ein Zehntel — sind sie in ihrer Art doch spröde Stoffe. Die Bewehrung der Kunststoff-Betone mit Stahl, aber auch anderen Materialien, wie z. B. Glas, das jedoch im normalen Beton bisher erfolglos blieb, ermöglicht ihre universale Nutzbarmachung. Dank der hohen Druckfestigkeit und besonders der Festigkeit bei Zugbeanspruchung, gemeinsam mit der Bewehrung, wird es möglich sein, hochwertige Bewehrungsstähle auszunutzen. Bei der Biegebeanspruchung wird man die Zugfestigkeit des Materials in Rechnung stellen und die Bewehrungsmenge herabsetzen können.

Diese Faktoren geben, gemeinsam mit der hohen chemischen Widerstandsfähigkeit und Wasserundurchlässigkeit, eine solide Grundlage für die Fähigkeit der Kunststoff-Betone, mit den bisher verwendeten Stoffen und technischen Erzeugungsmethoden in einer Reihe von Spezialfällen ernstlich in Wettbewerb zu treten. Aus Kunststoff-Betonen können verschiedene Erzeugnisse hergestellt werden, wie z. B. Fußboden- und Belagsplatten, Röhren, Behälter, Grubenstempel, Wasserbauten, Fundamente, Straßenfahrbahnen usw. Sie können auch als Dekorationsmittel dienen, z. B. bei Reliefs, Statuen u. a.

Sollen die Kunststoff-Betone verschiedene Aufgaben erfüllen, so müssen sie auch verschiedene Eigenschaften besitzen. Dies läßt sich erreichen, wenn man bei ihrer Erzeugung für die richtige Auswahl der Bestandteile und für das richtige Mischungsverhältnis sorgt und wenn man auf die richtigen Bedingungen bei der Aufbereitung und weiteren Nachbehandlung achtet. Dabei muß betont werden, daß bei Kunststoff-Betonen alle diese Verhältnisse mehr als bei normalen Betonen aufeinander einwirken und über keins von ihnen getrennt entschieden werden kann. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf die hauptsächlichsten Abhängigkeiten und auf wichtige, die Technologie der Kunststoff-Betone betreffende Punkte hingewiesen werden.

## 2. Eigenschaften des Füllmittels

Das feste Gerippe des Kunststoff-Betons wird von dem Sand- und Schottergemisch gebildet. Da Kunststoff-Beton vor allem in aggressiven Medien in Frage kommt, ist es in erster Reihe unerlässlich, daß das Schottermaterial säuerfest ist. Dies ist auch deshalb unbedingt notwendig, weil zur Polymerisation des Kunststoffs aggressive Substanzen — Säuren oder auch Basen — verwendet

werden. Ungeeignet sind also Gesteine, die basische Stoffe enthalten, vor allem in Gestalt von Karbonaten, wie z. B. Kalkstein, manche Sandsteine, Schiefer u. ä. Weniger schädlich sind Stoffe, die den Schotter sand verunreinigen, wie z. B. Lehm. Am vorteilhaftesten sind reine Quarzschotter oder -sande sowie zerkleinerte Eruptivgesteine. In Zusammenhang damit ist es notwendig, den Einfluß der Katalysatoren auf die Armierung des Kunststoff-Betons zu erwähnen. Sofern die Dosierung und die Wahl der Katalysatoren auch von anderen technologischen Gesichtspunkten richtig ist (Lebensdauer des Gemisches, Erhärtungsgeschwindigkeit u. a.), handelt es sich um eine kurzfristige direkte Einwirkung des Katalysators auf die Armierung. Im Laufe der Polykondensierung oder Polymerisation wird die eingebrachte Menge der Katalysatoren vollständig aufgebraucht, so daß sich die Armierung nach dem Erhärten in einem praktisch neutralen Medium befindet. Dies bestätigen auch die mikroskopischen Untersuchungen des Stahls im Inneren des Kunststoff-Betons, die in bestimmten Zeitintervallen nach dem Betonieren durchgeführt wurden. Im Laufe von bisher drei Jahren wurden keine sichtbaren Veränderungen in der Korrosion (Korrosionstiefe) bei dem verwendeten gewöhnlichen Baustahl im Inneren des Kunststoff-Betons beobachtet.

Der Gewichtsanteil der tonartigen Partikel soll 3% und der der Karbonate 0,1% des Schotter sandgewichts nicht übersteigen. Den Einfluß der Karbonate auf die Festigkeit des Betons zeigt Bild 1.

Einen anderen wichtigen Faktor bildet die Feuchtigkeit des Schotter sands. Um günstige Resultate zu erreichen, muß der Schotter sand in einem möglichst trockenen Zustand verwendet werden; seine Feuchtigkeit sollte keineswegs 0,2 Gew.-% übersteigen. Die Abnahme der Festigkeit und des Volumengewichtes des Materials infolge erhöhten Wassergehalts zeigt Bild 2 am Beispiel des Betons.

Druckfestigkeit, Schlagfestigkeit und Verschleißfestigkeit der Steinzusatzstoffe sollen ausreichend sein; diese Eigenschaften sind in erster Reihe entsprechend der Beanspruchung des Kunststoff-Betons zu wählen. Im großen und ganzen ist es möglich, einen Ausgleich der Festigkeiten der beiden beteiligten Materialien (Füllmittel und Bindemittel) zu erreichen, jedoch nicht gleiche Elastizität. Das Bindemittel besitzt einen wesentlich niedrigeren Elastizitätsmodul als der Schotter-

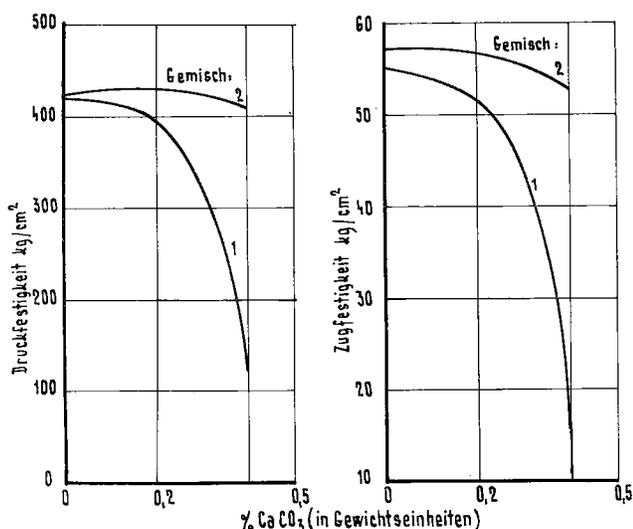


Bild 1: Einfluß des Karbonatgehalts des Schotter sandes auf die Festigkeit von Berol.

Alter 14 Tage. Nachbehandlung 18 °C, 55 % Relative Feuchtigkeit.

Gewichtszusammensetzung des Gemisches	1	2
Furolharz - FH	5	5
Furfurylalkohol - FOL	5	5
Furfurylaldehyd - FAL	2	2
Karbamidnitrat - KN	4	8
Normen-Sand I und II, gemischt im Verhältnis 1:3	80	80

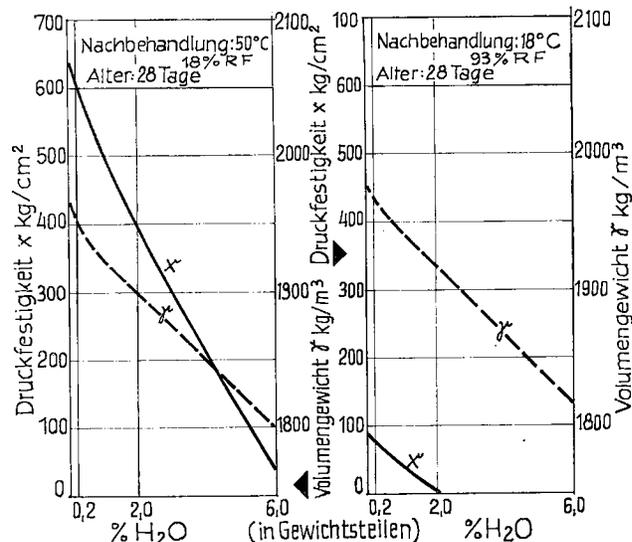


Bild 2: Einfluß der Feuchtigkeit des Schotter sandes auf die Festigkeit von Berol

Gewichtszusammensetzung des Gemisches	
Furolharz - FH	10
Furfurylaldehyd	1
Karbamidnitrat	3
Sand bis 7 mm	150
0-2 mm	70 %
2-4 mm	20 %
4-7 mm	10 %

sand; dadurch entsteht eine ungleichmäßige Verteilung der Spannung und es treten Querkzugwirkungen auf. Dabei macht sich hier in günstigerer Weise einerseits die erhöhte Zugfestigkeit gegenüber Zementmörtel, andererseits das gesteigerte Kriechen geltend, die verhältnismäßig schnell eine zweckmäßige Verteilung der Spannung ermöglichen. Diese Umstände üben auch einen günstigen Einfluß auf die Übertragung und Verteilung von Spannungen aus, die durch das Schwinden hervorgerufen werden. In diesem Zusammenhang haben wir in anderen Arbeiten <sup>3, 4</sup>) auf die vorteilhafte Wirkung einer gewissen Porosität hingewiesen.

Die Korngrößen richten sich, ähnlich wie beim normalen Beton, nach den Ausmaßen der Konstruktion und den Zwischenräumen der Bewehrung. Die Ausmaße der größten Körner sollten höchstens ein Viertel bis ein Drittel der kleinsten Abstände zwischen zwei Wänden der Schalung und höchstens drei Viertel bis vier Fünftel des Bewehrungsabstands betragen. Die kleinsten Körner sollten kleiner sein als beim normalen Beton, da es in diesem System notwendig ist, auch die feinsten Bestandteile zu ersetzen, die im normalen Beton der Zement vertritt. Außer Sand mit größten Körnern 2 bis 5 mm ist es erforderlich, in die Mischung auch eine gewisse Menge von feinem Mehl mit Korngrößen von 2 bis 200  $\mu$  einzubringen. Die Mikrofüllung macht sich in vorzüglicher Weise besonders in einem günstigeren inneren Spannungszustand, in kleinerem Schwinden und in einer Herabsetzung der erforderlichen Bindemittelmenge bemerkbar. Als feines Mehl sind alle Arten inerter Füllmittel verwendbar, wie z. B. Quarzmehl, Graphit, Kohlen- oder Koksstaub, Gipsstein usw.

Für die Form der Körner gelten dieselben Bedingungen wie für normalen Beton. Mit Vorteil können auch verschiedene künstliche Füllmittel verwendet werden, wie z. B. Schlacken u. a.

Bei der Abnahme und Einlagerung des Schotterands muß nur auf möglichst niedrige Feuchtigkeit der Mischung geachtet werden; sonst gelten hierfür dieselben Regeln wie beim normalen Beton.

### 3. Eigenschaften des Bindemittels

Die Schotter und Sand verbindende Komponente — das Bindemittel — ist ein makromolekulares Material, welches nach Zusatz des Initiators bzw. Beschleunigers der Polykondensations- oder Polymerisationsreaktion erhärtet. Diese Reaktion ist gewöhnlich stark exotherm.

Von den gegenwärtig in Betracht kommenden Bindemitteln sind es besonders Polyester-, Epoxy-, Phenol- und Karbamidformaldehyd-, in erster Reihe jedoch Furanharze. Furanharze empfehlen sich wegen ihrer hohen chemischen Widerstandsfähigkeit — sie übertreffen hierin praktisch alle Kunststoffe mit Ausnahme von Fluoroplasten — und andererseits wegen ihres relativ niedrigen Preises. Auf dem Weltmarkt sind diese Kunstharze am billigsten, und die notwendigen Rohstoffe hierfür (holzhaltige und landwirtschaftliche Abfälle) sind praktisch unerschöpflich. Von den Furanharzbetonen hat sich bei unseren Untersuchungen Kunststoff-Beton mit Furolfuralbindemittel am besten bewährt. Als aktive Komponente des Bindemittels wirkt Furfurylalkohol und als mitkondensierende Komponente, in zweiter Funktion als Beschleuniger, Furfurylaldehyd.

Es ist immer erforderlich, der Mischung auch einen Katalysator oder Initiator der Reaktion, oft auch einen Beschleuniger, beizufügen. Auf Einzelheiten dieser Fragen hier einzugehen, würde zu weit führen, da sie in einer großen Zahl von Veröffentlichungen und besonders in der Patenlliteratur beschrieben sind. Wir benutzten größtenteils handelsübliche Katalysatoren und probierten bei Furanharzen eine Reihe von Katalysierungsverfahren aus.

Die Vermischung des Monomers mit dem Katalysator verursachte anfangs keine wesentliche Veränderung seiner Viskosität. Mit der sich entwickelnden

Polymerisation oder Polykondensation erhöht sich die Harzviskosität, das Material geht in einen brei- oder gummiartigen Zustand über, mit anderen Worten, es erstarrt und wird schließlich unnachgiebig und fest. Vom Baustoffstandpunkt ist der Anfang und das Ende des Erstarrens und der Verlauf der Erhärtung besonders wichtig. Der Anfang des Erstarrens oder die sogenannte Lebensdauer der Mischung soll nicht kleiner sein als 40 bis 60 Minuten, das Ende des Erstarrens sollte nicht später als 12 Stunden nach der Vermischung eintreten. Die Dauer des Erstarrens und der Erhärtung wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, wie z. B. von der Menge des Katalysators und Beschleunigers, der Temperatur und der Feuchtigkeit des Mediums; sie hängt vom Volumen der Masse und dem Verhältnis zwischen Füll- und Bindemittel ab. Verlässliche Prüfungen über den Anfang des Erstarrens und des Erhärtens wurden bis jetzt noch nicht festgelegt. Beim Berol bietet die Farbe der Mischung einen guten Maßstab: nach der Durchmischung ist sie lichtbraun bis braun, der Anfang des Erstarrens macht sich durch Verdunkelung der Farbe bis zu dunkelbraun bemerkbar; am Ende des Erstarrens (Anfang des Erhärtens) zeigt die Mischung eine satte schwarze Farbe.

Nach dem Beginn des Erstarrens dürfen Kunststoff-Betone nicht mehr aufbereitet werden, sonst kommt es zu Störungen der inneren Bindungen und zum Nachlassen der Kohäsion, was bis zum Zerfall in Knollen führen kann. Deshalb ist jede weitere Aufbereitung von im Erstarren begriffenen Mischungen zu vermeiden.

### 4. Mischungsverhältnisse

Die Mischungsverhältnisse der einzelnen Komponenten haben, abgesehen von der Qualität der Aufbereitung und Nachbehandlung, den Haupteinfluß auf sämtliche Eigenschaften der Kunststoff-Betone. Die Mischung des Füllmittels soll möglichst viel Schotter enthalten, der in günstiger Weise Elastizitätsmodul, Volumenveränderungen und andere Eigenschaften des Kunststoff-Betons verbessert und außerdem billiger ist. Die Menge des Sands muß so groß sein, daß dieser die Zwischenräume zwischen dem Schotter ausfüllt. Für das Mehl im Hinblick auf den Sand gilt das gleiche, und überdies kann das Mehl als Füll- und

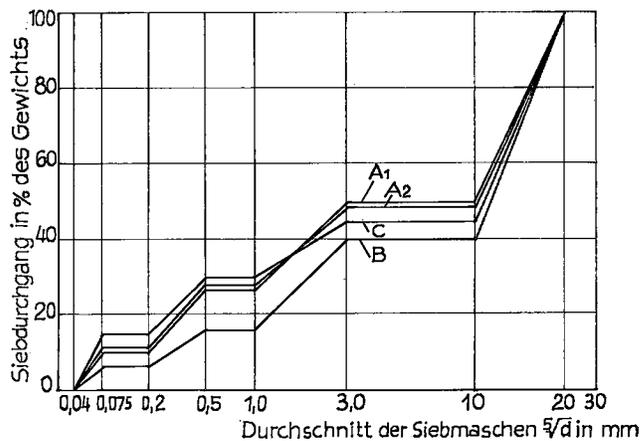


Bild 3: Körnungskurven diskontinuierlicher Gemische

d	$\sqrt[3]{d}$
0,002	0,2924
0,04	0,5260
0,08	0,6035
0,10	0,6310
0,20	0,7247
0,25	0,7577
0,50	0,8706
1,00	1,0000
1,50	1,0840
2,00	1,1486
3,00	1,2460
4,00	1,3195
5,00	1,3790
7,00	1,4760
10,00	1,5850
15,00	1,7180
20,00	1,8200

Streckungsmittel des Kunststoffes dienen, wenn seine Körner kleiner sind als die durchschnittliche Dicke der Umhüllungsschicht des Bindemittels auf den größeren Körnern. Ein weiteres, äußerst wichtiges Erfordernis besteht darin, daß die Menge und Größe der Zwischenräume im Schottersandgemisch möglichst klein sein soll, bei gleichzeitig geringster spezifischer Oberfläche. Um diesen Anforderungen weitgehend zu entsprechen, ist es am vorteilhaftesten, diskontinuierliche Gemische zu verwenden. Die beste Arbeitsweise ist, das Gemisch aus drei oder vier Fraktionen auf die Weise zusammenzusetzen, daß das Volumen der kleineren Fraktion immer um 20 bis 30% größer bleibt als das Volumen der Zwischenräume der vorhergehenden Fraktion oder der Fraktionsmischungen. Die Diskontinuität zwischen den einzelnen Fraktionen soll ungefähr so sein, daß sich das kleinste Korn der größeren Fraktion in den Grenzen zwischen dem 2,5- und 4fachen der Dimension des größten Korns der feineren Fraktion bewegt.

Unsere Ergebnisse zeigten, daß die auf diese Weise zusammengesetzten Gemische die natürlichen, und sogar auch die mit kontinuierlicher Körnungskurve zusammengesetzten Mischungen in jeder Beziehung übertreffen. Der zur Sicherung der Undurchlässigkeit notwendige Verbrauch an Bindemittel wird hierdurch herabgesetzt, und die erhöhten Kosten der Sortierung und Zusammensetzung des Gemischs machen sich vielfach im Endpreis der Kunststoff-Betone bezahlt. Bild 3 zeigt einige zweckmäßige diskontinuierliche Gemische.

Bei Polykondensatgemischen, wie z. B. beim Berol, wo bei der Erhärtung als Nebenprodukt der Reaktion Wasser entsteht, erwies es sich als zweckmäßig, als Mikrofüllmittel Gips (Plaster) zu verwenden, der fähig ist, dies Wasser chemisch zu binden. Bild 4 und 5 zeigen den Einfluß der Gipsmenge auf die Berolfestigkeit und ihren Anstieg mit zunehmendem Alter.

Die Menge des Bindemittels wird vor allem von der geforderten Qualität des Kunststoff-Betons bestimmt. Mitbestimmend sind hier zwar auch die Sorte und Qualität des Bindemittels, die Art der Aufbereitung und Bedingungen der Nachbehandlung; hinzu kommt noch der Umstand, daß von der Menge des Bindemittels auch die Aufbereikbaarheit des Kunststoff-Betons abhängig ist. Als Hauptkriterium verbleibt jedoch außer der Festigkeit die Grenze der Kontinuität der Porosität, mit anderen Worten, der Durchlässigkeit. Nach unseren Erfahrungen bewegt sich die notwendige

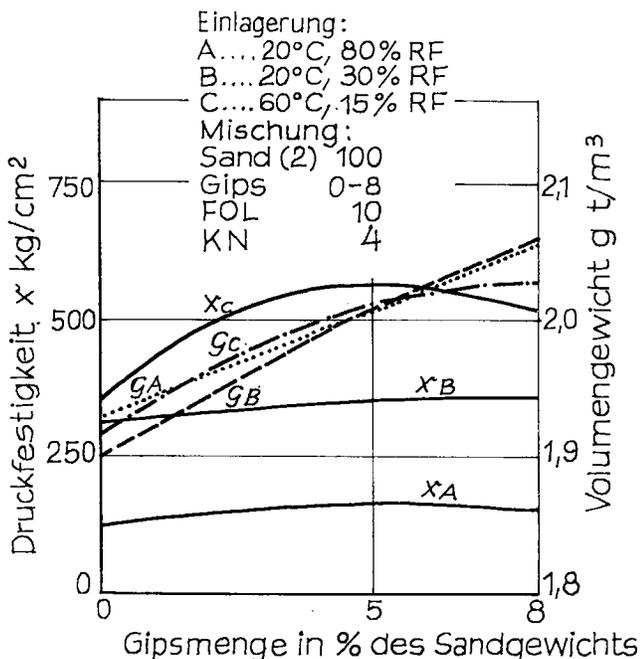


Bild 4: Einfluß der Gipsmenge auf die Festigkeit des Berols

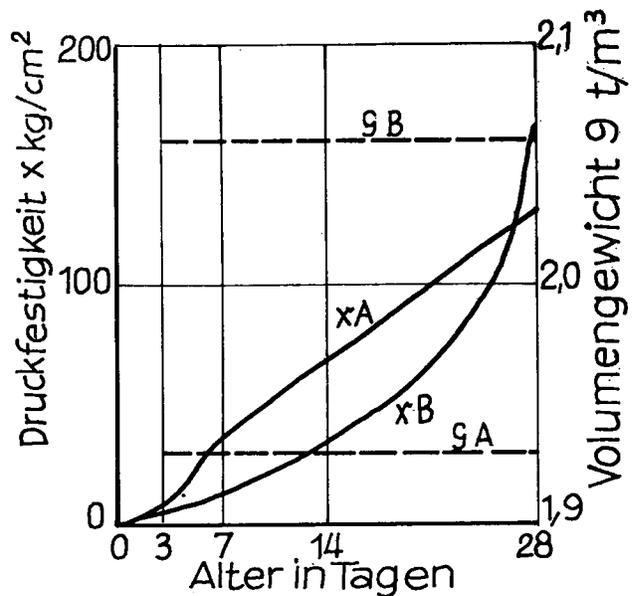


Bild 5: Anstieg der Festigkeit des Berols mit zunehmendem Alter

A = ohne, B = mit Gipszusatz	
Einlagerung: 20° C, 80 % RF	
Mischung ..	A B
Sand (2) ...	100 100
Gips .....	- 8
FOL .....	10 10
KN .....	4 4

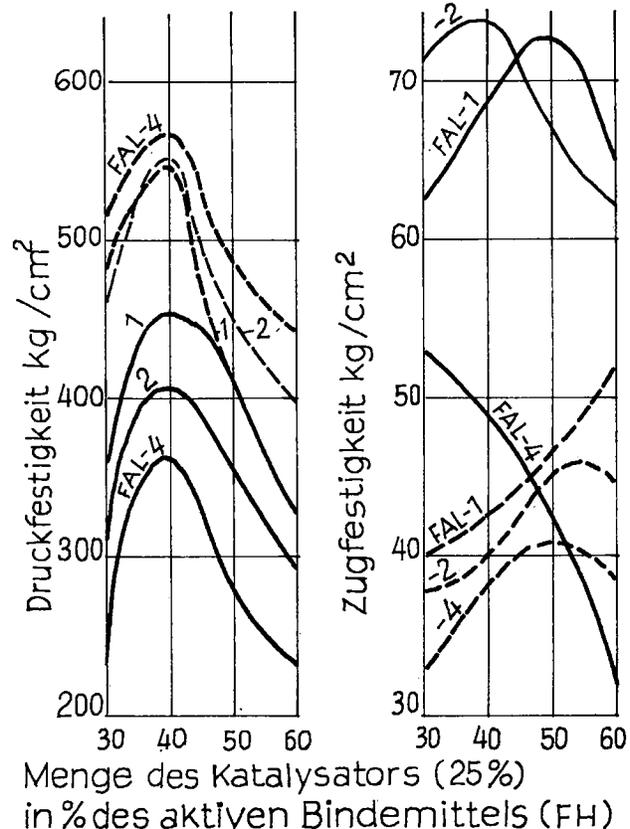


Bild 6: Druck- und Zugfestigkeit des vollkommen ausgehärteten Berols, abhängig vom Gehalt an Katalysator, bei Mischungsverhältnissen 1:8 und 1:15

Nachbehandlung: 60° C, 15 % RF  
 Zusammensetzung des Gemischs  
 (Gewichtsteile)

FH .....	10	10
KN 25 % .....	3+6	3+6
FAL .....	1+4	1+4
S .....	150	80

Alter: 14 Tage

Menge des Bindemittels zwischen 60 kg/m<sup>3</sup> fertigen Kunststoff-Betons (Mischungsverhältnis 1:35 bis 1:40) für einfache Bauausführungen und 250 bis 280 kg/m<sup>3</sup> (Mischungsverhältnis 1:6 bis 1:8) bei chemisch und mechanisch sowie besonders stark beanspruchten Konstruktionen.

Wichtig ist ferner die Zusammensetzung des Bindemittels. Sie sei am Beispiel des Berols und später auch an anderen Kunststoffbetonsorten erläutert. Bild 6 zeigt die Zug- und Druckfestigkeit des vollkommen ausgehärteten Berols entsprechend seinem Gehalt an Katalysator und Beschleuniger für ein Gemisch von Bindemittel (Furol) zu Sand von 1:8 bis 1:15. Man sieht, welchen starken Einfluß die einzelnen Bindemittelkomponenten haben. Aus diesem Grunde gilt hier in einem noch viel größeren Maße als beim normalen Beton der Grundsatz der genauen Gewichtsabmessung aller Komponenten. Eine ähnliche Abhängigkeit zeigt in einem Dreikomponentendiagramm auch Bild 7. Die Menge an Fural sollte hier 20% des Gesamtgewichts des Bindemittels nicht übersteigen.

Die Auswertung einer großen Anzahl von Prüfungen ließ erkennen, daß es beim Berol möglich ist, mittels gewisser Funktionen den Einfluß der Bindemittelzusammensetzung auf die Festigkeit zu beschreiben. So ist z. B. aus den nächsten Bildern ersichtlich, daß die Festigkeit durch die Funktion des Volumenverhältnisses: fal:(fh + fol + fal) (Bild 8), die Funktion des Volumenverhältnisses fol:(fh + fol) (Bild 9) und die Funktion des Volumenver-

hältnisses kn 100%:(kn 100% + fal) (Bild 10) beschrieben ist.

Der Einfluß der Gemischzusammensetzung auf die Festigkeit kann annähernd durch die logarithmische Funktion nach Bild 11 beschrieben werden. Bild 12 zeigt den Einfluß der Bindemittelzusammensetzung bei anderen Kunststoff-Betonen.

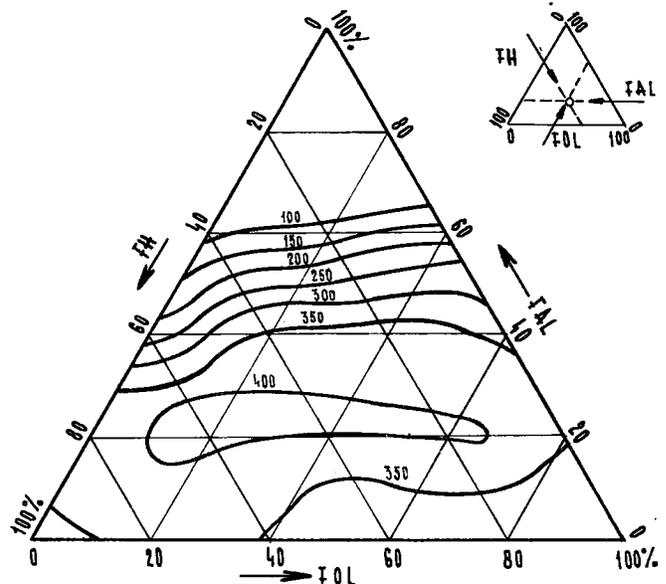


Bild 7: Druckfestigkeit des Berols je nach dem Volumenverhältnis Furolharz, Furol und Fural (für ein Gemisch von FH+FOL+FAL): S:Kat. = 1:15:0,4 nach Gewicht  
Einlagerung: 50° C, 15 % RF  
Alter: 14 Tage

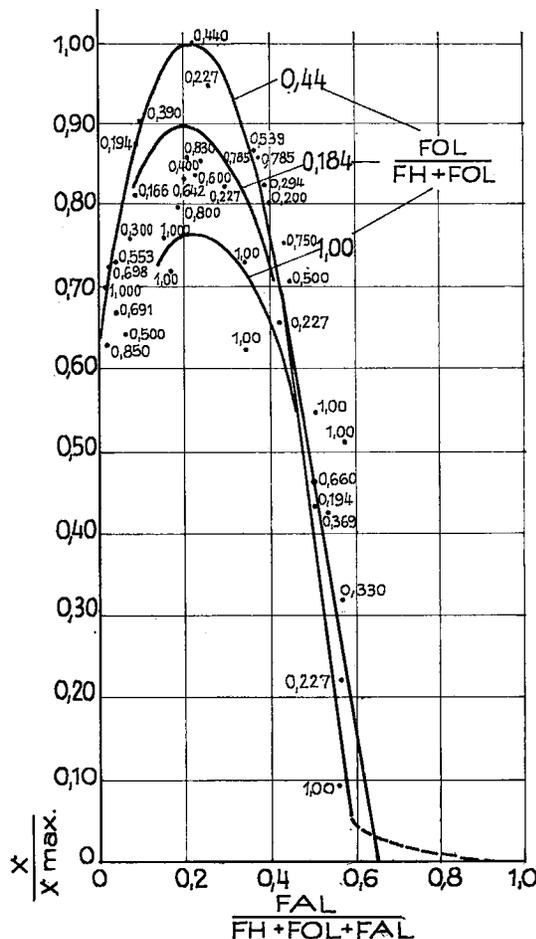


Bild 8: Festigkeit des Berols in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis fal:(fh+fol+fal)  
Zusammensetzung des Gemischs (Gewichtsteile)  
FH+FOL+FAL . . . . . 10  
KN 25 % . . . . . 4, 6, 7  
S 8 . . . . . 150  
Einlagerung: 50° C, 15 % RF  
Alter: 14 Tage

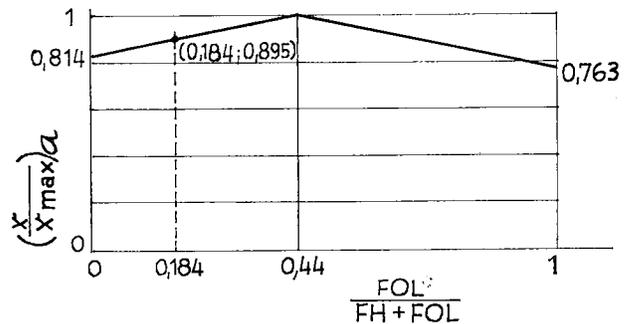


Bild 9: Abhängigkeit des höchsten Festigkeitswertes des Berols vom Volumenverhältnis fol:(fh+fol), vgl. Bild 8

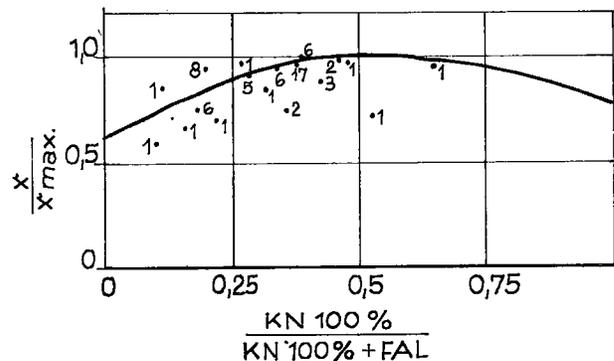


Bild 10: Festigkeit des Berols in Abhängigkeit vom Volumenverhältnis kn 100%:(kn 100% + fal)  
Zusammensetzung des Gemischs (Gewichtsteile)  
FH . . . . . 10  
S . . . . . 150  
KN . . . . . 3÷10  
FAL . . . . . 3÷10  
Einlagerung: 50° C, 15 % RF  
Alter: 14 Tage

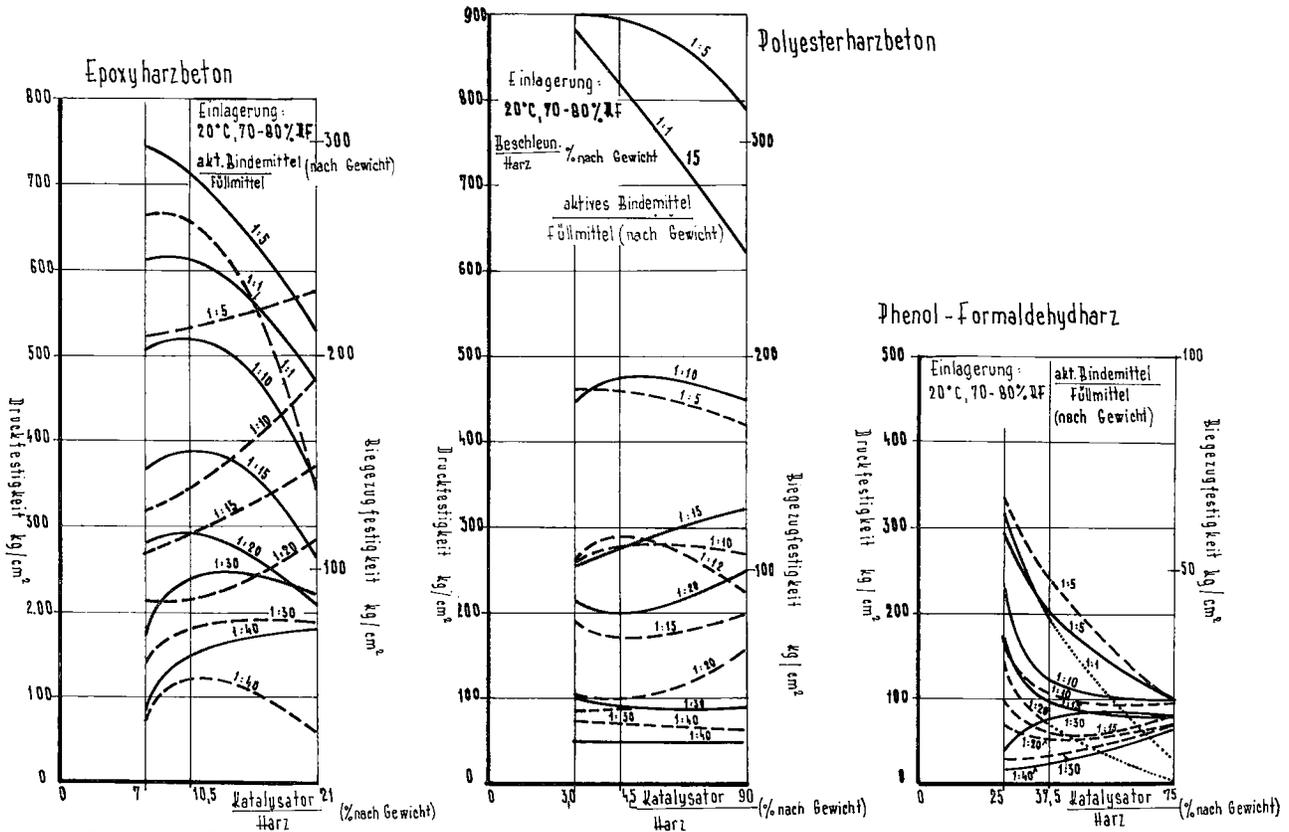


Bild 12: Einfluß der Katalysatormenge auf die Druck- und Biegezugfestigkeit verschiedener Kunststoff-Betone wechselnder Zusammensetzung

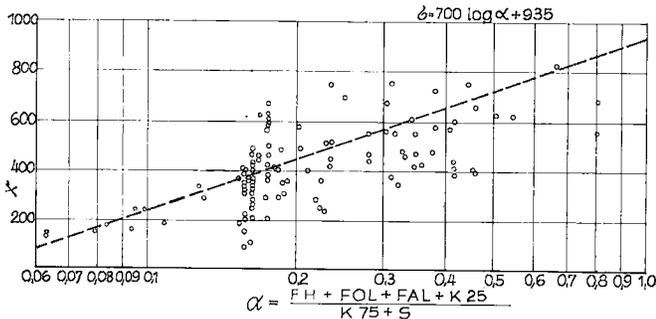


Bild 11: Festigkeit des Berols in Abhängigkeit von  $\alpha$  nach Volumen

Die Bilder 13, 14, 15 bringen einen Vergleich des Einflusses der Gemischzusammensetzung für verschiedene Kunststoff-Betone. Was die Druckfestigkeit anbelangt, sind alle Sorten beim Gewichtsverhältnis 1:10, was das Volumengewicht betrifft, beim Verhältnis 1:18 gleichwertig.

Das Mischen des Gemenges bildet eine der Grundbedingungen für gute Ergebnisse; am zweckmäßigsten findet es in Zwangsmischern statt. Wegen der exothermen Reaktion darf die Menge nicht zu groß sein und sollte 100 bis 200 l nicht übersteigen. Kunststoff-Betone können zum Unterschied zum normalen Beton nicht auf Vorrat gemischt werden.

Die Reihenfolge der Zusätze in der Mischmaschine ist zweckmäßig folgende: 1. Schotter sand, 2. Mehl, 3. Katalysator (wenn pulverförmig), 4. Kunststoff oder Gemisch von Kunststoff und Katalysator (wenn flüssig), 5. Beschleuniger.

Die Mischungsdauer sollte für eine Mischung nicht unter 3 Minuten liegen.

Die Reinigung der Mischmaschinen muß sofort nach Beendigung des Mischprozesses vorgenommen werden. Gewöhnlich genügt dazu warmes, oder besser heißes Wasser, aber verhältnismäßig gut kann auch ein Strahl von kaltem Wasser sein. Für manche Kunststoffe

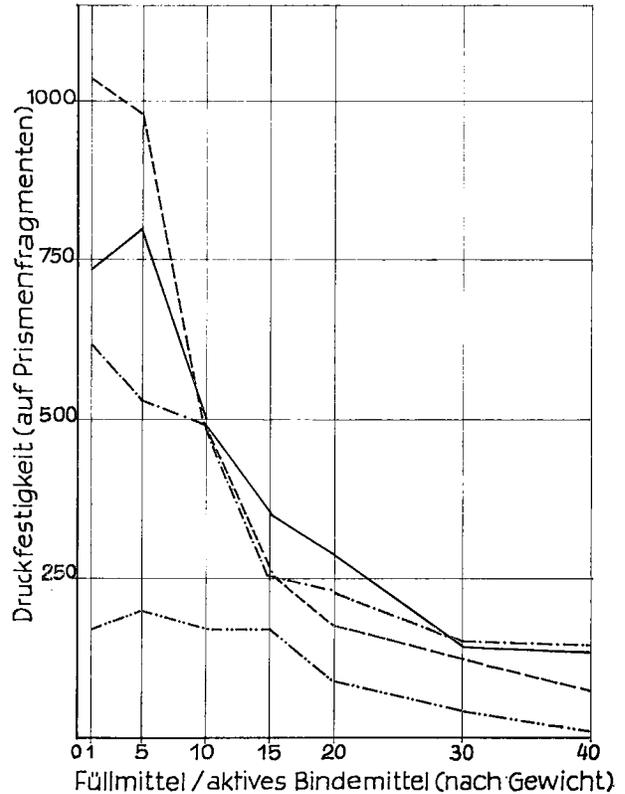
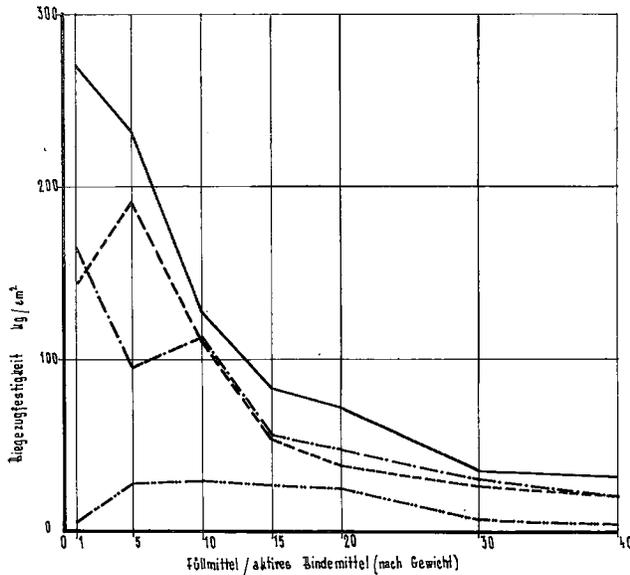


Bild 13: Druckfestigkeit verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

- Kunststoff-Beton:
- Epoxy (Harz:Katalysator (nach Gewicht) = 10:0,7)
  - - - Polyester: 10:0,3:0,15 (Harz:Katalysator:Beschleuniger) (nach Gewicht)
  - · - · - Furool-Fural (Berol) (Harz:Katal.:Beschleun.) = 10:4:1 (nach Gewicht)
  - · - · - Phenol-Formaldehyd (Harz:Katalysator) = 10:2,5 (nach Gewicht)
- Einlagerung: 50°C, 18% RF

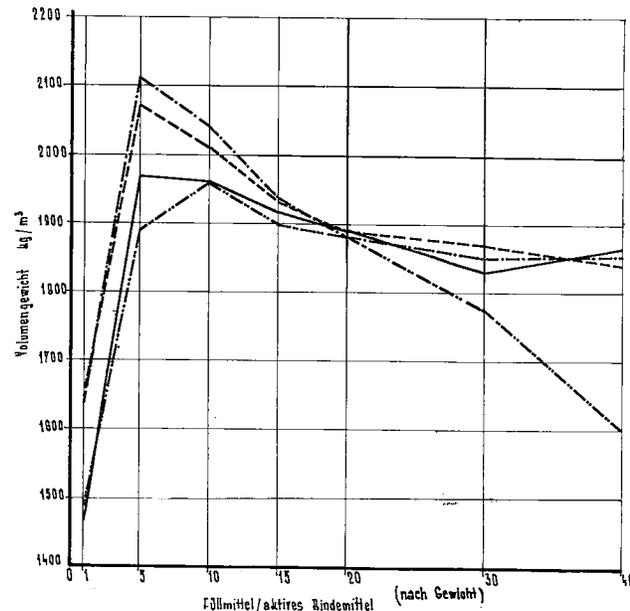
eignen sich technischer Spiritus oder verschiedene Lösemittel besser. Nach Erhärtung ist es nur sehr schwer und mühsam und nur unter Verwendung stärkster Lösemittel möglich, die Kunststoff-Betonreste zu entfernen.

Eine der wichtigsten Qualitätskennziffern für die praktische Verwendung ist die relative Dichte. Sie ist zwar nicht die Hauptgröße, welche die Festigkeit beeinflusst, aber sie ist das wichtigste Kriterium für die Undurchläss-



**Bild 14: Biegezugfestigkeit verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit von der Zusammensetzung (Prismen 4 x 4 x 16 cm)**

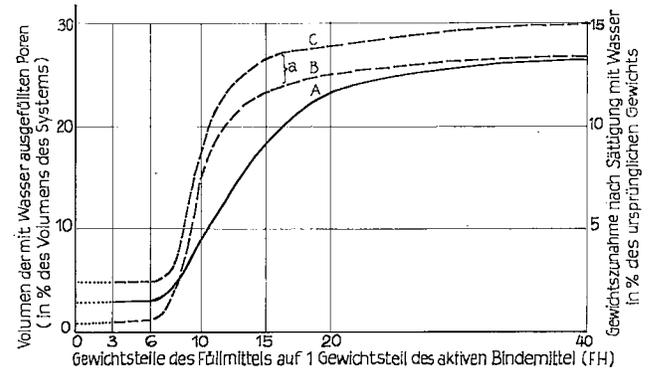
Kunststoff-Beton:  
 — Epoxy (Harz:Katalysator (nach Gewicht) = 10:0,7)  
 - - - Polyester: (Harz:Katalys.:Beschleuniger) = 10:0,3:0,15 (nach Gewicht)  
 - · - · Furool-Fural (Berol) (Harz:Katal.:Beschleun.) = 10:4:1 (nach Gewicht)  
 - · - · Phenol-Formaldehyd (Harz:Katalysator) = 10:2,5 (nach Gewicht)  
 Einlagerung: 50° C, 18 % RF



**Bild 15: Volumengewicht verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**

Kunststoff-Beton:  
 — Epoxy (Harz:Katalysator (nach Gewicht) = 10:0,7)  
 - - - Polyester: (Harz:Katalys.:Beschleuniger) = 10:0,3:0,15 (nach Gewicht)  
 - · - · Furool-Fural (Berol) (Harz:Katal.:Beschleun.) = 10:4:1 (nach Gewicht)  
 - · - · Phenol-Formaldehyd (Harz:Katalysator) = 10:2,5 (nach Gewicht)  
 Einlagerung: 50° C, 18 % RF

sigkeit und die Beständigkeit. Bild 16 zeigt die Veränderung der Porenmenge im Zusammenhang mit der Gemischzusammensetzung. Klar ersichtlich ist aus dem Charakter der Kurven der Bereich des Übergangs von der diskontinuierlichen (geschlossenen) Porosität zur kontinuierlichen (offenen) in den Grenzen des Verhältnisses zwischen



**Bild 16: Volumen der offenen Poren von Berol bei verschiedenen Gemischen (vollkommen ausgehärtet)**

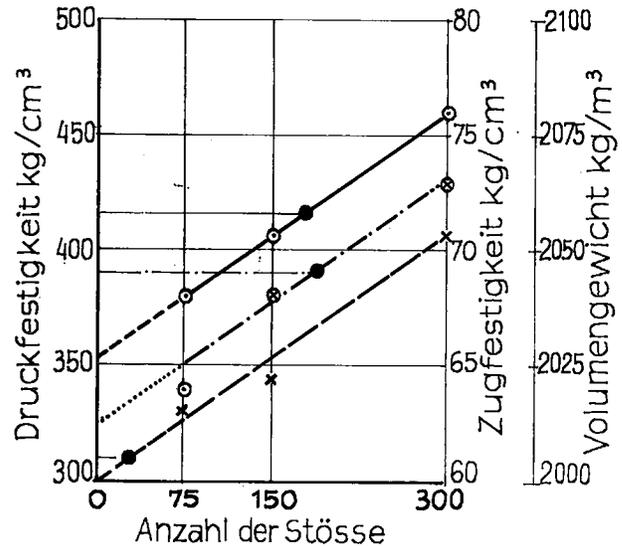
Zusammensetzung des Gemischs (Gewichtsteile)

S . . . . . 30, 60, 100, 150, 200, 400  
 FH . . . . . 10  
 FAL . . . . . 1  
 KN 25 . . . . . 4

Einlagerung:

A, B, C = 14 Tage 50° C, 15 % RF  
 dann A = 3 Monate H<sub>2</sub>O  
 B, C = 4 Stunden Kochen in H<sub>2</sub>O + 24 Stunden H<sub>2</sub>O  
 14 Tage 50° C, 15 % RF

A = Volumen der Poren, je nach Sättigung mit Wasser, nach 3 Monaten Einlagerung in Wasser.  
 B = Volumen der Poren, je nach Sättigung mit Wasser, 24 Stunden nach der Beendigung des Siedevorgangs, bezogen auf den ursprünglichen Zustand.  
 C = Volumen der Poren, je nach Sättigung mit Wasser, 24 Stunden nach der Beendigung des Siedevorgangs, bezogen auf den Endzustand (nach 14 Tagen dauernder Einlagerung bei 50° C)  
 a = Zunahme der Porosität nach dem Sieden.



**Bild 17: Einfluß der Anzahl der Stöße beim Einstampfen (System Proktor) auf die Festigkeiten und das Volumengewicht des Berol. Die horizontalen Linien zeigen die Werte bei sorgfältigem Stampfen von Hand.**

Zusammensetzung des Gemischs (Gewichtsteile)

FH . . . . . 10  
 FAL . . . . . 1  
 KN 25 % . . . . . 3  
 S 8 . . . . . 150

Nachbehandlung: 60° C, 15 % RF

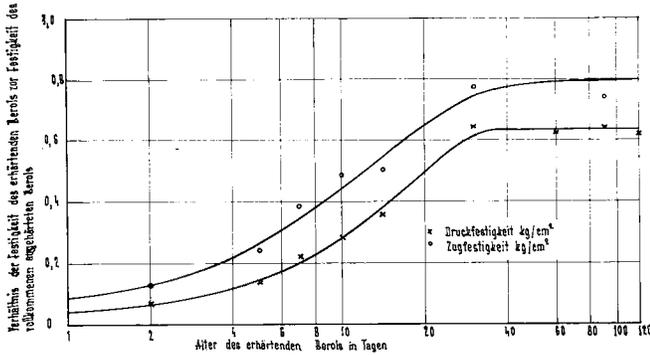
○ — — — Druckfestigkeit kg/cm<sup>2</sup>  
 X — — — Zugfestigkeit kg/cm<sup>2</sup>  
 ○ · · · · · Volumengewicht

aktivem Bindemittel und Füllmittel von 1:7 bis 1:8. Mittels geeigneter Zusammensetzung des Schotter-sand-gemisches erreicht man eine Verschiebung dieses Übergangs bis zu einem Verhältnis von 1:10 bis 1:13.

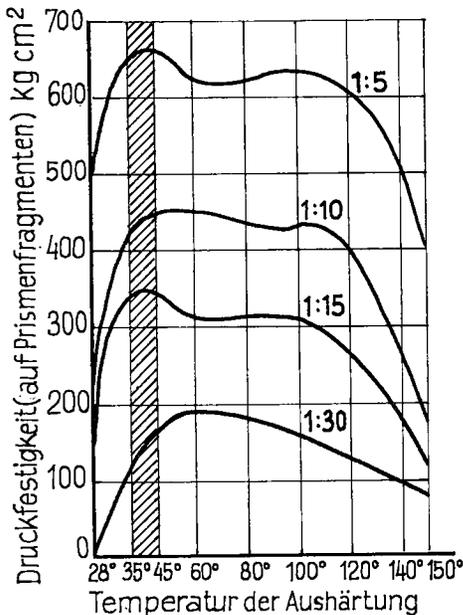
**5. Verdichtung und Nachbehandlung**

Die Verdichtung des frischen Gemisches ist eine wichtige Frage. Man kann dieselben technischen Verfahren benutzen wie beim normalen Beton, nämlich Stampfen, Rütteln, Vibrieren, bis zum Pressen oder Vibropressen. Der Grad der Verdichtung hat auf die Endeigenschaften einen bedeutenden Einfluß, wie aus Bild 17 ersichtlich ist.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Art der Nachbehandlung des Kunststoff-Betons. In allen Fällen wirkt ein kleiner Feuchtigkeitsgehalt der Luft auf die Erhärtung günstig, in der Mehrzahl der Fälle auch erhöhte Temperatur. Bild 18 zeigt den Erhärtungsverlauf bei nor-



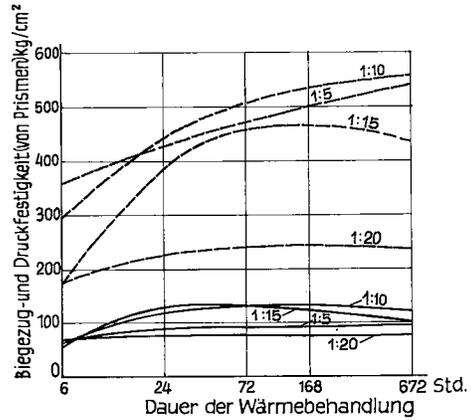
**Bild 18: Entwicklung der Festigkeiten des Berols in normalem Medium in Bezug auf die Festigkeiten nach vollständiger Aushärtung**  
 Zusammensetzung des Gemisches (Gewichtsteile)  
 FH ..... 10  
 FAL ..... 1  
 KN 25 % ..... 3  
 S 8 ..... 150  
 Nachbehandlung: 60°C, 18 % RF, 20°C, 60 % RF



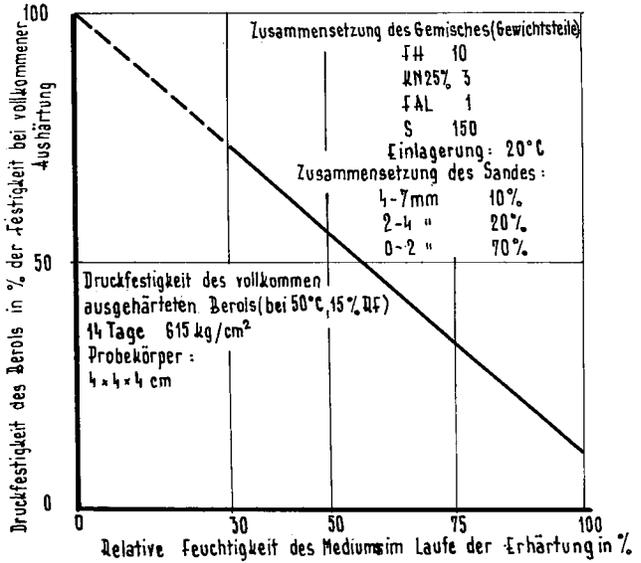
**Bild 19: Veränderung der Festigkeit des Berols mit der Aushärtungstemperatur bei verschiedenen Gemischen**  
 Zusammensetzung des Gemisches (Gewichtsteile)  
 FOL ..... 10  
 KN 25 % ..... 4  
 FAL ..... 3  
 S ..... 50, 100, 150, 300  
 Probekörper: 4 x 4 x 16 cm

maler Temperatur und Feuchtigkeit im Vergleich zu vollkommen ausgehärtetem Berol. Für Berol ist die zweckmäßigste Temperatur bei der Erhärtung im Laufe von 3 bis 7 Tagen 35 bis 40°C (Bild 19 und 20).

Die Feuchtigkeit der Luft im Verlauf der Erhärtung hat auf die Endeigenschaften der Kunststoff-Betone großen Einfluß. Am Beispiel des Berols wird in Bild 21 die



**Bild 20: Veränderung der Druck- und Biegezugfestigkeit verschiedener Gemische, je nach Dauer der Wärmebehandlung**  
 Zusammensetzung des Gemisches (Gewichtsteile)  
 FOL ..... 10  
 KN 25 % ..... 4  
 FAL ..... 1,5  
 S ..... 50, 100, 150, 200  
 Nachbehandlung: 55°C, 18 % RF



**Bild 21: Veränderung der Druckfestigkeit von Berol bei verschiedener Luftfeuchtigkeit**

Veränderung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der relativen Feuchtigkeit der Luft beim Erhärtungsvorgang gezeigt.

Bei der praktischen Durchführung sollte also die relative Feuchtigkeit der umgebenden Luft nicht höher als 50% sein.

**6. Festigkeit**

Die Feuchtigkeit des umgebenden Mediums beeinflusst die Kunststoff-Betone selbstverständlich auch nach deren vollkommener Aushärtung, wenn ihre Porosität kontinuierlich (offen) ist. Bild 22 zeigt die durch den Einfluß verschiedener Feuchtigkeitsgehalte der Luft hervorgerufenen Festigkeitsveränderungen des Berols.

In Tabelle 1 sind Festigkeiten der einzelnen Mischungen bei 28 Tage dauernder Einlagerung unter erhöhter Temperatur (55 bis 60°C) und bei 15% relativer Luftfeuchtigkeit angegeben. Auf diese beziehen sich alle übrigen in Bild 22 enthaltenen Festigkeiten. Außerdem sind in Tabelle 1 auch Festigkeitswerte angegeben, die für die einzelnen Mischungen nach 14 Tage dauernder Einlagerung im Wasser — nach vollkommener Aushärtung — ermittelt wurden. Ferner enthält die Tabelle noch Festigkeitswerte nach 14 Tage dauernder Wärmebehandlung, d. h. zu einer Zeit, als die Probekörper in verschiedene Medien eingelagert wurden.

Zu sehr interessanten Ergebnissen, die uns zu einer weiteren eingehenden Untersuchung von porösen Systemen im allgemeinen führten, gelangten wir durch Vergleich der Berolfestigkeit bei Veränderungen des Grades der Sättigung mit Wasser oder Wasserdampf. Es zeigte sich, daß nicht nur die Gemischzusammensetzung, sondern auch die Menge und Größe der Zwischenräume im Füllmittel und die Sättigung des Systems mit Wasser die Festigkeiten bedeutend beeinflussen, wie aus Bild 23 ersichtlich ist. In Bild 23 bezeichnet das Verhältnis  $x : x_c$  das

TABELLE 1

Festigkeiten verschiedener Mischungen bei 15% rel. Feuchtigkeit und erhöhter Temperatur

Einlagerung	Gemisch	1:5	1:10	1:15	1:30
		14 Tage 55—80°C 15% rel. Feuchtigkeit (RF)	Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> 103	108	80
		Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> 565	562	357	179
28 Tage 55—80°C 15% RF	Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> 113/100*)	110/100	87/100	64/100	
	Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> 626/100*)	565/100	341/100	217/100	
14 Tage 55—80°C 15% RF	Biegezugfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> /%	133/118*)	54/49,1	24/27,6	9/14,1
14 Tage Wasser	Druckfestigkeit kg/cm <sup>2</sup> /%	606/96,8*)	326/57,7	141/41,3	43/19,8

\*) Prozentwerte

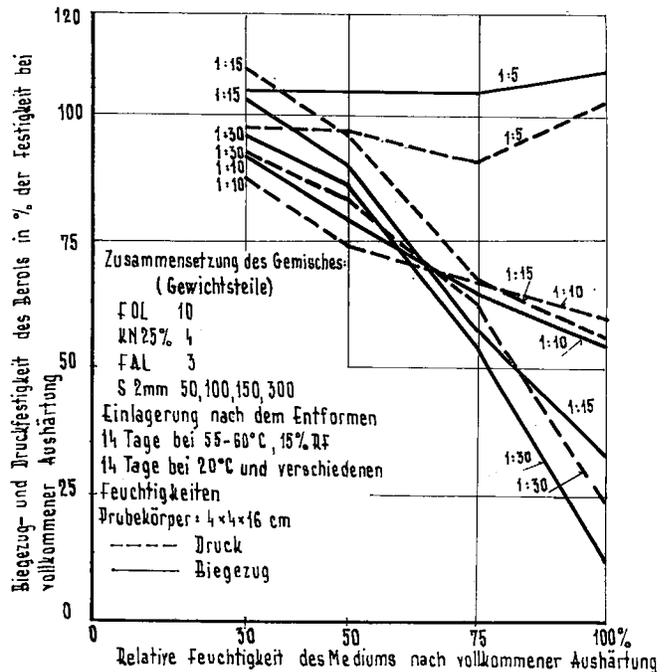


Bild 22: Veränderung der Biegezug- und Druckfestigkeiten von vollständig ausgehärtetem Berol verschiedener Zusammensetzung bei 20°C und unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten, bezogen auf die Festigkeiten von bei 55—80°C und 15% relativer Feuchtigkeit gelagertem Berol

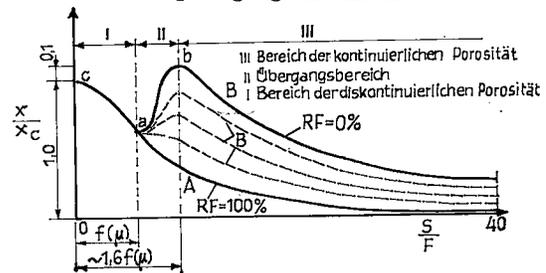


Bild 23: Veränderung der Festigkeit des Berols bei verschiedenem Verhältnis von aktivem Bindemittel zu Füllmaterial bei unterschiedlicher Sättigung mit Wasser

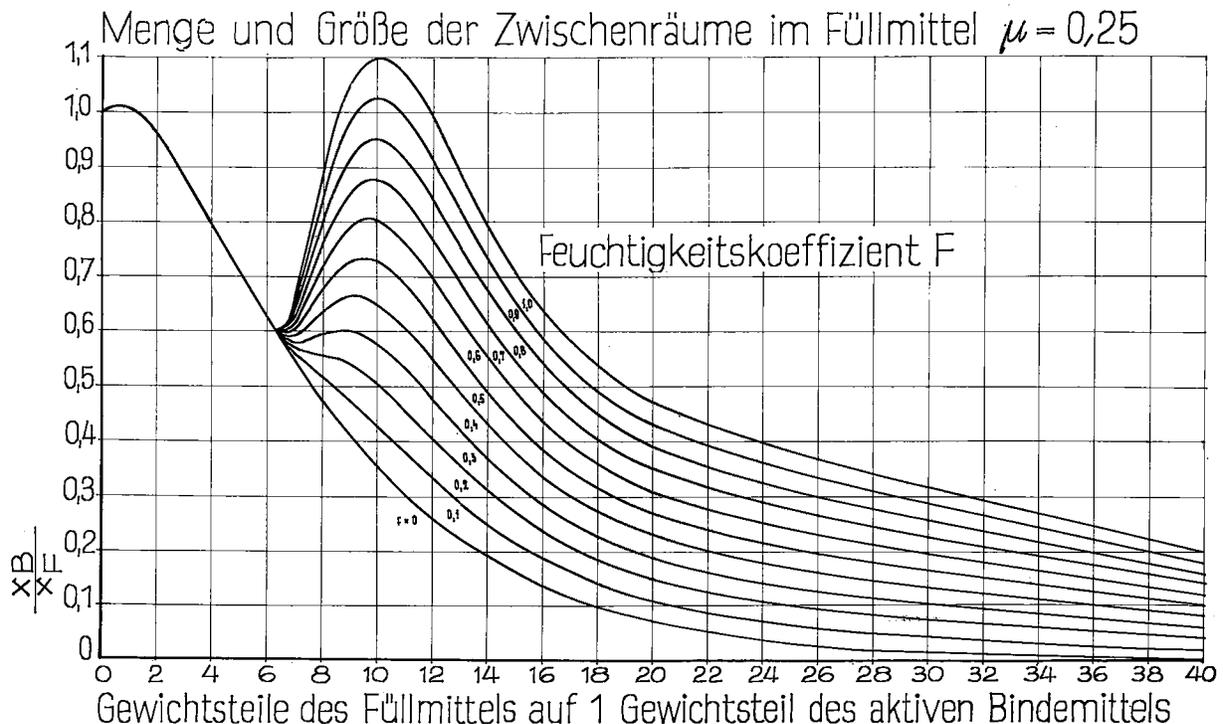


Bild 24: Graphische Darstellung der Funktion der Festigkeit von Berol in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, dem relativen Volumenanteil der Zwischenräume im Füllmittel, der Bindemittelüberschuss und der Feuchtigkeitsaufnahme

Verhältnis der Festigkeit  $x$  an jeder beliebigen Stelle  $\frac{P}{F}$  zur Festigkeit  $x_c$  an der Stelle  $\frac{P}{F} = 0$ , d. h. das Verhältnis der Festigkeit des Kunststoff-Betons (Berol) zur Festigkeit des eigentlichen Bindemittels.

Die Abszissen der beiden Extreme sind vor allem eine Funktion der Dichte des erhärteten Berols, oder, wenn wir gleiche Aufbereitung voraussetzen, der Menge und Größe der Zwischenräume  $\mu$  im Füllmittel. Das Minimum entspricht dem dichtesten Gemisch, das Maximum dem günstigsten inneren Spannungszustand. Wir haben hier jedoch nicht ausreichend Raum zur Verfügung, um uns eingehender mit unseren Erkenntnissen befassen zu können. Wir können nur feststellen, daß Funktionen gefunden wurden, die alle ermittelten Hauptveränderungen beschreiben, und zwar bis zur Funktion, welche die Berolfestigkeit in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, der Menge und Größe der Zwischenräume im Füllmittel, dem Bindemittelüberschuß im dichtesten Gemisch und dem Wassersättigungsgrad darstellt.

Für den praktischen Gebrauch wurden diese ziemlich komplizierten Funktionen in der Form von Diagrammen für gewisse Ausgangsparameter ausgedrückt. Bild 24 zeigt ein Beispiel eines solchen Diagramms <sup>7)</sup>. In Bild 24 ist  $x_B : x_F = x : x_c$ , oder  $x_B = x$  und  $x_F = x_c$  ( $x_B =$  Festigkeit von Berol,  $x_F =$  Festigkeit von Furol-Furalharz).

Beachten wir nun noch das Wasseraufnahmevermögen (Porosität) der übrigen untersuchten Kunststoff-Betone. Ihr Verlauf ist nicht besonders unterschiedlich, was nur die Tatsache bestätigt, daß es im Bereich der offenen Porosität nicht auf die Art des Bindemittels ankommt und daß das Volumen der Poren von anderen Faktoren bestimmt wird, wie z. B. von der Menge und Größe der Zwischenräume im Füllmittel, der Verdichtung u. a. (Bild 25 bis 28). Die Festigkeit verschiedener Kunststoff-Betone nach längerer Aufbewahrung im Wasser

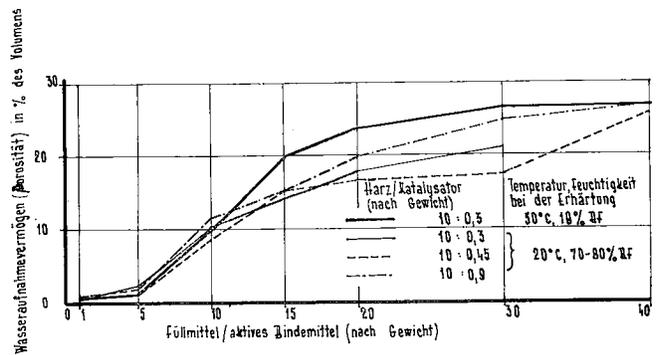


Bild 26: Porosität von Polyester-Kunststoff-Beton in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

Menge des Katalysators in Gew.-% des Harzes	Einlagerung der Proben	Füllmittel/ aktives Bindemittel (nach Gewicht)						
		1:1	1:5	1:10	1:15	1:20	1:30	1:40
30	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	—
	Wasser	21	7	21	22	20	22	—
	20°C, 50—70% RF	1	14	1	1	1	1	—
45	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	21	9	21	22	20	21	24
	20°C, 50—70% RF	1	12	1	1	1	1	2
90	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	21	9	21	20	21	21	22
	20°C, 50—70% RF	1	12	1	1	1	1	2
30	50°C, 18% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	21	21	21	20	21	22	20
	20°C, 50—70% RF	1	4 Std.	1	1	4	1	1

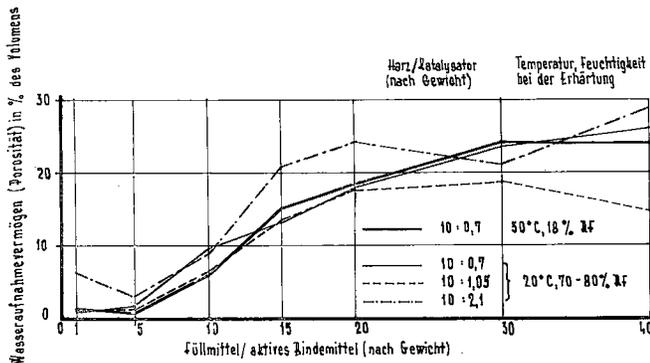


Bild 25: Porosität von Epoxykunststoff-Beton in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

Menge des Katalysators in Gew.-% des Harzes	Einlagerung der Proben	Füllmittel/ aktives Bindemittel (nach Gewicht)						
		1:1	1:5	1:10	1:15	1:20	1:30	1:40
7	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	7	12	13	11	17	14	21
	20°C, 50—70% RF	14	9	8	10	5	7	1
10,5	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	23
	Wasser	7	12	13	24	16	14	21
	20°C, 50—70% RF	14	9	8	1	6	7	1
21	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	21	18	13	8	17	21	21
	20°C, 50—70% RF	1	3	8	13	5	1	1
7	50°C, 18% RF	28	28	28	28	28	28	28
	Wasser	9	7	13	22	17	21	14
	20°C, 50—70% RF	12	14	8	1	5	1	7

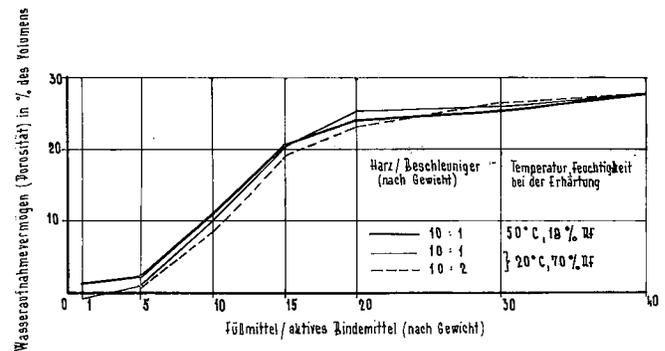
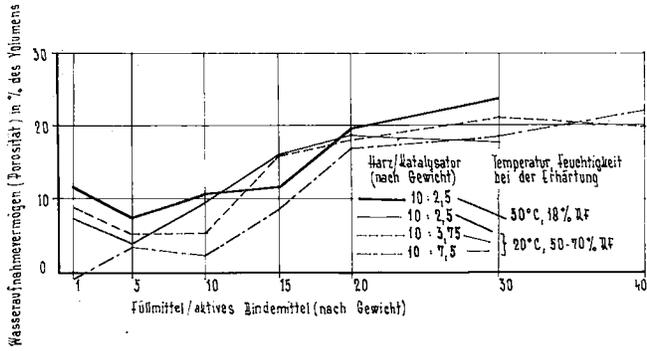


Bild 27: Porosität des Furol-Fural-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung

Beschleuniger (in Gew.-% des Furols)	Einlagerung der Proben	Füllmittel/ aktives Bindemittel (nach Gewicht)						
		1:1	1:5	1:10	1:15	1:20	1:30	1:40
10	20°C, 50—70% RF	28	28	28	28	28	35	28
	Wasser	25	21	24	21	22	17	13
	20°C, 50—70% RF	1	1	1	1	2	1	8
20	20°C, 50—70% RF	—	28	28	28	28	33	28
	Wasser	—	21	24	21	22	17	13
	20°C, 50—70% RF	—	1	1	1	2	1	8
10	50°C, 18% RF	28	28	28	28	35	33	28
	Wasser	22	21	21	22	17	17	13
	50°C, 18% RF	2	1	1	2	1	1	8

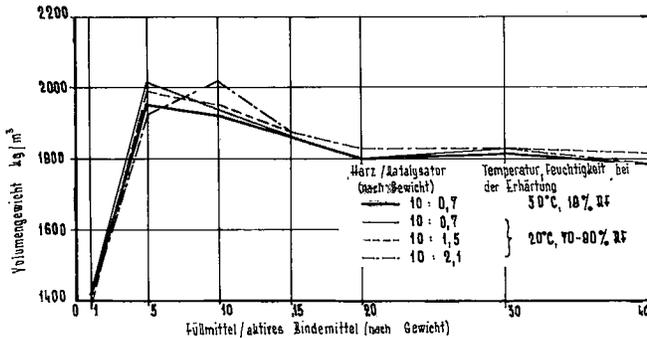


**Bild 28: Porosität des Phenol-Formaldehyd-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**

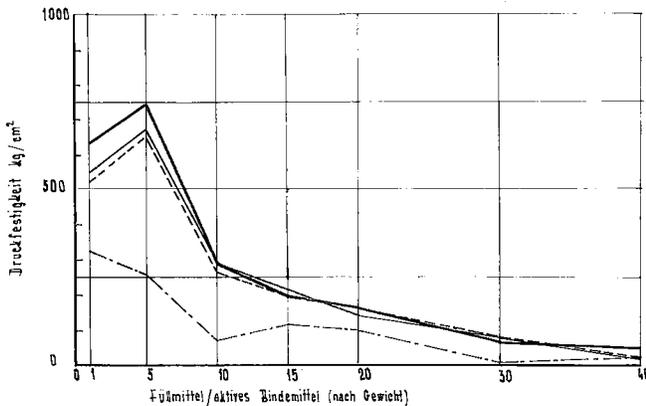
Menge des Katalysators in Gew.-% des Harzes	Einlagerung der Proben	Füllmittel/aktives Bindemittel (nach Gewicht)						
		1:1	1:5	1:10	1:15	1:20	1:30	1:40
25	20°C, 50-70% RF	28	28	30	28	28	28	28
	Wasser	21	20	19	21	16	14	—*)
	20°C, 50-70% RF	1	1	1	1	14	14	—*)
37,5	20°C, 50-70% RF	28	28	30	28	28	28	28
	Wasser	21	20	19	21	16	13	15
	20°C, 50-70% RF	1	1	1	1	14	14	8
75	20°C, 50-70% RF	28	28	30	28	28	28	28
	Wasser	21	20	19	21	16	13	15
	20°C, 50-70% RF	1	1	1	1	14	14	8
25	50°C, 18% RF	28	28	30	28	28	28	28
	Wasser	21	20	19	21	16	14	—*)
	20°C, 50-70% RF	1	1	1	1	14	14	—*)

\*) Beschädigung im Wasser nach 2 Tagen

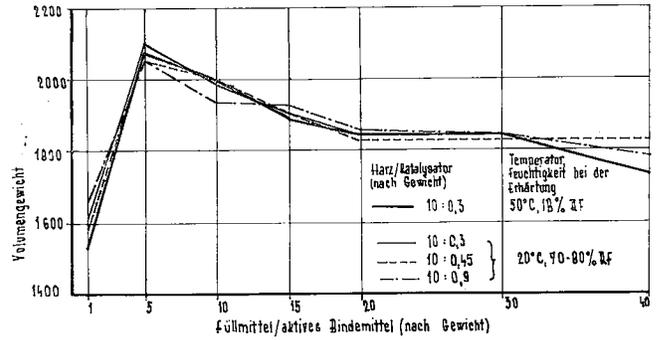
stellen die weiteren Bilder 29 bis 32 dar. Deren Änderung zeigt sich beim Vergleich mit der Festigkeit von Proben, die nur trocken aufbewahrt wurden (Bild 13).



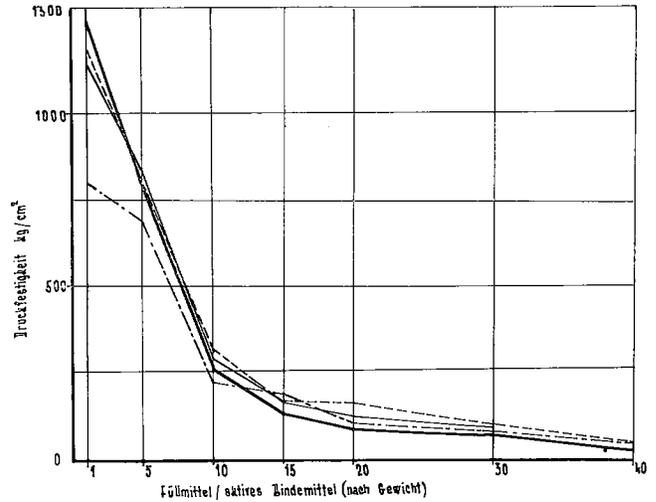
**Bild 29a: Volumengewicht des Epoxy-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**



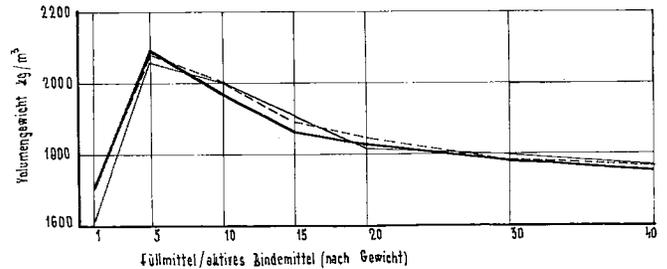
**Bild 29b: Druckfestigkeit des Epoxy-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**



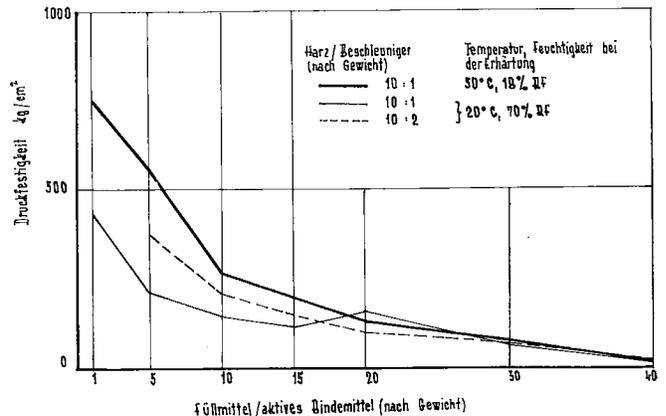
**Bild 30a: Volumengewicht des Polyester-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**



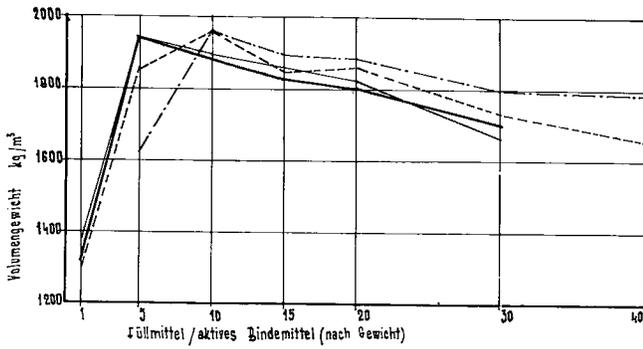
**Bild 30b: Druckfestigkeit des Polyester-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**



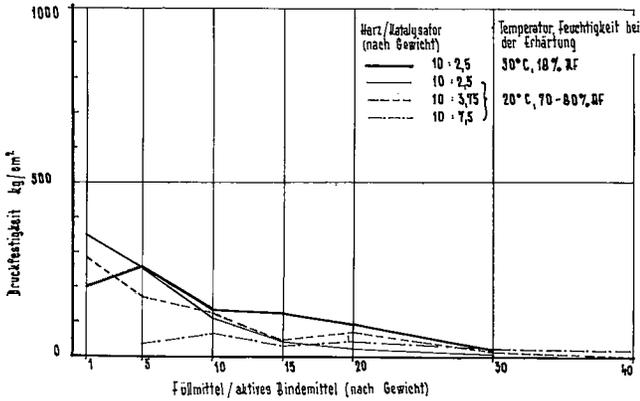
**Bild 31a: Volumengewicht des Furool-Fural-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**



**Bild 31b: Druckfestigkeit des Furool-Fural-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**

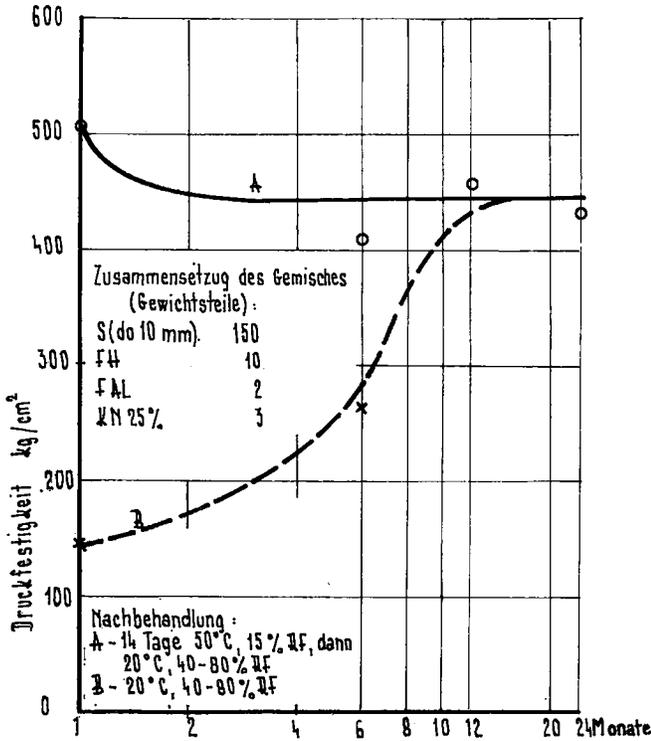


**Bild 32a: Volumengewicht des Phenol-Formaldehyd-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**

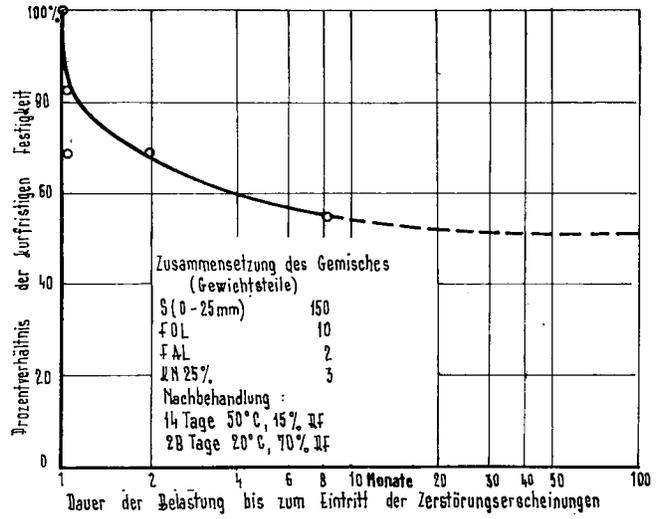


**Bild 32b: Druckfestigkeit des Phenol-Formaldehyd-Kunststoff-Betons in Abhängigkeit von der Zusammensetzung**

Die Veränderung der Berolfestigkeit bei längerer Lagerung ist in Bild 33 dargestellt. Nach einigen Monaten bleibt die Festigkeit konstant.



**Bild 33: Veränderung der Druckfestigkeit des Berols mit zunehmendem Alter**

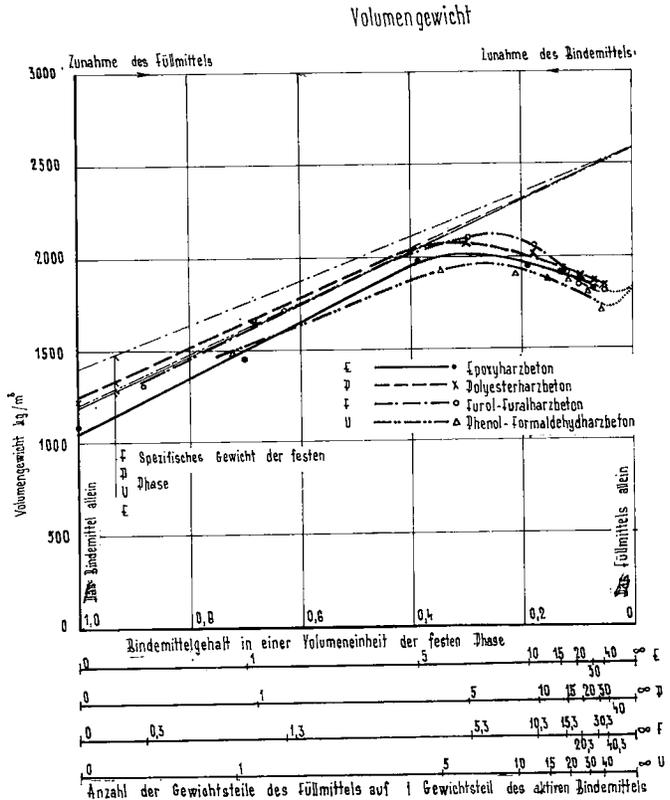


**Bild 34: Veränderung der Biegezugfestigkeit des Berols in Abhängigkeit von der Beanspruchungsdauer**

Bei langfristiger Belastung nähert sich die dauernde Festigkeit dem Wert von 50% der kurzfristigen Festigkeit, wie aus Bild 34 ersichtlich ist.

### 7. Vergleich verschiedener Kunststoff-Betone

Eine bessere und objektivere Möglichkeit zum Vergleichen der einzelnen Kunststoffbetoneigenschaften bietet der Vergleich dieser Eigenschaften in Abhängigkeit von dem relativen Volumenanteil des gesamten eingesetzten Bindemittels in einer Einheit des Volumens der festen Phase. Die Bilder 35 bis 37 zeigen die Ergebnisse dieses Vergleichs der verschiedenen Kunststoff-Betone.



**Bild 35: Volumengewicht verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt in der Volumeneinheit der festen Phase**

Porosität in % des Volumens des Systems

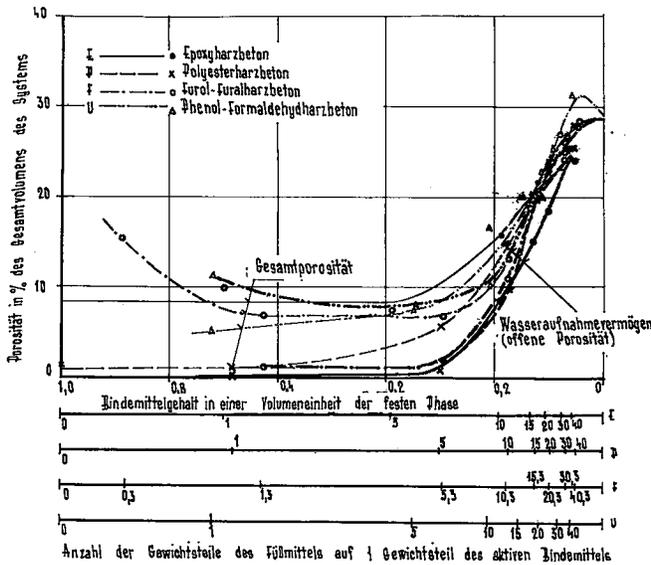


Bild 36: Porosität verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt in der Volumeneinheit der festen Phase

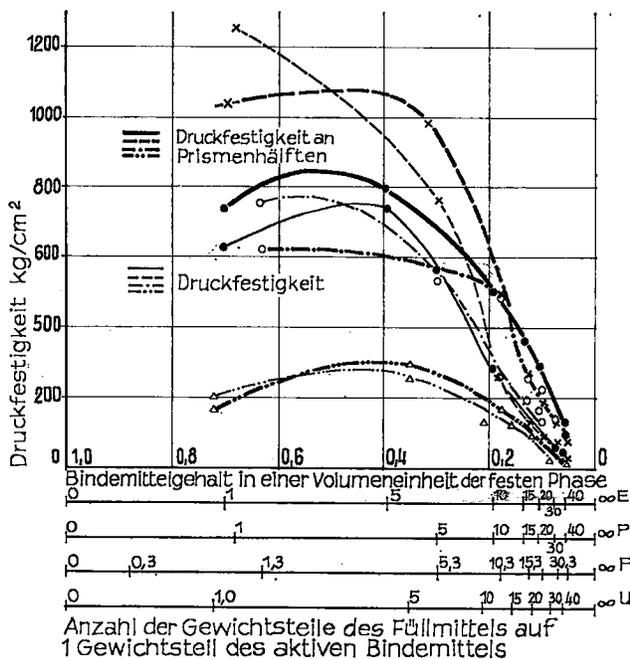


Bild 37: Druckfestigkeit verschiedener Kunststoff-Betone in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt in der Volumeneinheit der festen Phase

Druckfestigkeiten, ermittelt an Prismenhälften nach der Saugfähigkeitsprüfung  
 E ———● Epoxykunststoffbeton  
 P ———× Polyesterkunststoffbeton  
 F ———○ Furool-Furalkunststoffbeton  
 U ———△ Phenol-Formaldehydkunststoffbeton

Faßt man die allgemeinen Erkenntnisse zusammen, so ergibt sich, daß jede Eigenschaft der Kunststoff-Betone eine Funktion folgender Faktoren ist:

- Eigenschaften des Bindemittels;
- Volumanteil des Bindemittels im Gemisch;
- Menge und Größe der Zwischenräume im Füllmittel;
- Reaktionen zwischen Binde- und Füllmittel, in Ab-

hängigkeit von den Bedingungen der Aushärtung des Materials;

- Reaktionen zwischen dem Kunststoff-Beton und dem umgebenden Medium.

### 8. Kontrolle der Erzeugung, Materialverbrauch und Preis

Zum Schluß noch einige Worte zur Kontrolle der Berolherzeugung. Um die vorgesehene Qualität sicherzustellen, ist eine solche Kontrolle unerlässlich. Gewöhnlich wird nur eine gewisse Mindest-Festigkeit, -Dichte und -Undurchlässigkeit nachgewiesen. Aus den vorangehenden Darlegungen ist ersichtlich, daß die Qualität der Kunststoff-Betone in einem wesentlich höheren Grad als bei normalen Betonen von der gleichmäßigen Qualität der gelieferten Komponenten, der Einhaltung der Mischungsverhältnisse, der Aufbereitung und den äußeren Bedingungen bei der Erzeugung und Nachbehandlung abhängig ist. Es ist jedoch notwendig, nicht nur die absoluten Festigkeitswerte, sondern auch den Grad der Aushärtung zu ermitteln. Dieser wird so bestimmt, daß die Festigkeit der im gleichen Medium wie das Erzeugnis eingelagerten Probekörper mit der Festigkeit der Körper verglichen wird, die zumindest 7 Tage lang unter definierten Bedingungen des Mediums, bei erhöhter Temperatur von ungefähr 40 bis 60°C und bei geringster Feuchtigkeit gelagert sind. Auf Grund solcher Prüfungen ist es dann möglich, für bestimmte Produktionsbedingungen gewisse Mindestfestigkeiten der Probekörper anzugeben. Dies bildet auch den einzigen Unterschied gegenüber dem normalen Beton, bei dem die Umstände der Einlagerung die erreichten Festigkeitswerte bei weitem nicht so beeinflussen und aus diesem Grunde auch nicht so genau vorgeschrieben zu werden brauchen.

Tabelle 2 zeigt, wie sich die Berolfestigkeit unter der Einwirkung gewisser Faktoren verändern kann.

TABELLE 2  
 Änderungen der Berolfestigkeiten unter dem Einfluß verschiedener Faktoren

Faktor	Mögliche Veränderung der Festigkeit in %
Qualität der aktiven Komponente des Bindemittels (FOL, FP)	bis 70
Qualität des Beschleunigers (FAL)	bis 20
Qualität des Katalysators (DM 25 %)	bis 90
Körnung des Schotterands	bis 20
Reinheit des Schotterands (Karbonate)	bis 90
Feuchtigkeit des Schotterands	bis 90
Mischung:	
Verhältnis $\frac{FAL}{FP+FOL+FAL}$	bis 70
Verhältnis $\frac{FOL}{FP+FOL}$	bis 28
Verhältnis $\frac{DM 100}{DM 100+FAL}$	bis 40
Verdichtung	bis 50
Feuchtigkeit des Mediums	bis 90
Temperatur des Mediums	bis 60

Bei genauer Einhaltung des vorgeschriebenen technologischen Vorgangs und bei Benutzung derselben Komponenten erreicht man hingegen das erwartete Resultat. Dabei übersteigen die größten Abweichungen nicht einmal  $\pm 10\%$ .

Zwecks Ermittlung des Materialverbrauchs muß die Ergiebigkeit des Mischens bekannt sein, d. h. das Verhältnis des Volumens des fertigen Kunststoff-Betons zum scheinbaren (summarischen) Volumen der Komponenten. Die Ergiebigkeit unterscheidet sich je nach den Mischungsverhältnissen und hauptsächlich nach Menge und Größe der Zwischenräume im Füllmittel; sie beträgt ungefähr 0,70 bis 0,90.

Der Preis der Kunststoff-Betone wird vor allem von dem Preis des aktiven Bindemittels — des

Kunststoffes — beeinflusst. Für Berol beträgt der Preis für 1 m<sup>3</sup> einer Mischung, die noch undurchlässigen Beton liefert (d. h. bei einem Verhältnis des Bindemittels zum Füllmittel von etwa 1 : 12), nach tschechoslowakischen Marktpreisen z. Zt. 600 Kčs<sup>9, 10</sup>). Die übrigen Kunststoff-Betone, sofern sie ähnliche Eigenschaften aufweisen, sind alle wesentlich (etwa zwei- bis dreimal) teurer. Es kann vorausgesetzt werden, daß sich die Preise bei höherer Produktion wesentlich verringern lassen.

Auf weitere interessante Gesichtspunkte, Eigenschaften und Einflüsse bei der Erzeugung und Verwertung von Kunststoff-Betonen kann in einer einzigen Abhandlung nicht eingegangen werden. Weitere Informationen finden sich in der angegebenen Literatur<sup>1-8</sup>).

## 9. Schluß

Die Vorzüge und Nachteile der Kunststoff-Betone sind im Vorangehenden dargestellt. Berol hat gegenüber andern Kunststoff-Betonen gewisse Vorzüge, die auf seinem niedrigen Preis bei hervorragenden mechanisch-physikalischen und physikalisch-chemischen Eigenschaften beruhen. Als Nachteil verbleibt, wie bei der Mehrzahl aller Stoffe organischen Ursprungs, die verhältnismäßig geringe Feuersicherheit und das markante Kriechen. Es kann jedoch angenommen werden, daß auch diese Nachteile mit der Entfaltung der Makromolekularchemie nach und nach behoben werden. Eine Andeutung der möglichen Lösung liefert die Verwertung der Si-Paste.

Mißerfolge bei ausgeführten Anwendungen haben auch zu Einwänden gegen Kunststoff-Betone geführt. Aber zu solchen Mißerfolgen kommt es dann, wenn nicht alle Möglichkeiten und Eigenheiten des neuen Materials berücksichtigt werden.

Im allgemeinen kann gesagt werden, daß die Bedingungen des Erfolgs und die Ursachen des Mißerfolgs durchwegs bekannt sind. Es gibt hier keine Umstände, die sich in den Grenzen der geeigneten Anwendung den Eingriffen und der Kontrolle des Herstellers entziehen. Es muß allerdings vorausgesetzt werden, daß mit Entwurf und Ausführung Fachleute betraut werden, die erfahren und gewissenhaft sind und gründliche Kenntnisse der Materialeigenschaften besitzen.

## Zusammenfassung

Kunststoff-Betone sind neue Stoffe, über deren Eigenschaften die Erkenntnisse erst noch gesammelt werden. Eine Reihe bekannter Tatsachen aus der Technologie der Betone kann auch in der Technologie der Kunststoff-Betone angewendet werden. Demgegenüber besteht eine Reihe gänzlich neuer oder zum Teil abweichender Tatsachen, die bei der Erzeugung von Kunststoff-Betonen beachtet werden müssen. In der Abhandlung wird auf einige dieser wichtigen Tatsachen von Epoxy-, Polyester-, Phenol-Formaldehyd- und Furofural-Kunststoff-Betonen in der Weise hingewiesen, wie dies aus den Forschungen hervorgeht, die seit einer Reihe von Jahren im Institut für theoretische und angewandte Mechanik der ČSAV in Prag angestellt werden.

Schrittweise wurden die erforderlichen Eigenschaften der einzelnen Bestandteile, Füll- und Bindemittel, Mischverhältnisse der einzelnen Bestandteile, Verarbeitung und Behandlung des Gemischs, ermittelt. In der Folge werden, insbesondere bei dem am eingehendsten behandelten Furofural-Kunststoff-Beton (Berol), die Einflüsse verschiedener Faktoren auf Festigkeit, Volumgewicht, Saugfähigkeit und andere technologische Eigenschaften der Kunststoff-Betone beschrieben. Ferner werden Angaben über die Kontrolle der Erzeugung, den Materialverbrauch und die Preise gemacht.

## Summary

Resin concretes are new materials concerning whose properties it is necessary to gain more knowledge. A

number of facts known from concrete technology can also be applied to the technology of resin concretes. On the other hand, there is a whole range of new or, in part, different facts that have to be taken into account in making resin concretes. In the present article some of these important facts relating to epoxy, polyester, phenol-formaldehyde and furfural resin concretes are indicated, as have emerged from the researches which have, for a number of years, been conducted in the Institute for Theoretical and Applied Mechanics of the ČSAV at Prague.

The requisite properties of the individual constituents, fillers and binding agents, mix proportions of the individual constituents, preparation and treatment of the mix have been determined step by step. Thereafter the effects of various factors upon strength, bulk density, absorptive capacity and other technological properties of plastics concretes are described, more particularly for furfural resin concrete (Berol), which is dealt with in greatest detail. Furthermore, information on production control, material consumption and prices is given.

## Résumé

Les bétons de résine sont des matériaux nouveaux dont les caractéristiques sont seulement en voie de détermination. Un certain nombre de réalités connues, faisant partie de la technologie des bétons, peuvent également s'appliquer à celle des bétons de résine. Par contre, un certain nombre de considérations absolument nouvelles ou partiellement divergentes ne devront pas être perdues de vue lors de la préparation des bétons de résine. Dans le présent travail, certaines de ces considérations concernant les bétons aux résines époxy ou polyester, aux résines à base de formaldéhyde de phénol ou de furfurofural ont été soulignées suivant les résultats obtenus lors des recherches menées durant plusieurs années par l'Institut de Mécanique Théorique et Appliquée de la ČSAV à Prague.

Pas à pas, on a pu déterminer les propriétés nécessaires de tous les composants, agrégats et liants, les proportions de mélange des différents composants, la préparation et la mise en oeuvre du mélange. Ensuite, l'auteur décrit les influences exercées par différents facteurs sur la résistance, la densité, la capacité d'absorption ainsi que sur d'autres caractéristiques technologiques des bétons synthétiques et surtout des bétons au furfurofural (Berol) dont il est question plus particulièrement. Il fournit enfin des indications se rapportant au contrôle de fabrication, à la consommation des matériaux et aux prix.

## Schrifttum

- 1) Bareš, R., und Hošek, J.: Ein neuer Konstruktionsbaustoff auf Basis von Furalharze. Inženýrské stavby, č. 3 (1961).
- 2) Bareš, R.: Berol a furan-base building material. Technical Digest, 6 (1962).
- 3) Bareš, R.: Les bétons de résine à base des résines de furane - le bérol. Bulletin RILEM, 4, 28 (1965).
- 4) Bareš, R., Navrátil, J., Berka, L., und Javornický, J.: Practical application of synthetic constructive material as a result of exact definition of material properties. Symposium on the research and reception tests of synthetic materials for construction RILEM, Final Report, Liège (1964).
- 5) Bareš, R., Navrátil, J., Berka, L., und Javornický, J.: Physicommechanic properties of resin concretes (Diskussion). Bulletin RILEM 28 (1965).
- 6) Bareš, R.: Bétons de plastiques. Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment, no. 76, cah. 647, octobre 1965.
- 7) Bareš, R., und Navrátil, J.: Les bétons de furane et leurs applications. Cahiers du centre scientifique et technique du bâtiment, no. 76, cah. 647, octobre 1965, Paris.
- 8) Bareš, R., und Hošek, J.: Konstruktionsbaustoff auf Basis von Furanharzen. Stavebnický časopis, č. 7 (1963).
- 9) Čermák, Vl.: Entwicklung von säurefesten Deckschichten in Betonrohrleitungen als Ersatz für Steinzeug. Schlußbericht des VEB "Doprastav", Bratislava, Febr. 1964.
- 10) Čermák, Vl.: Verwertung von Harzbetonen für verschiedene Konstruktionen. Schlußbericht des VEB "Doprastav", Bratislava 1964.



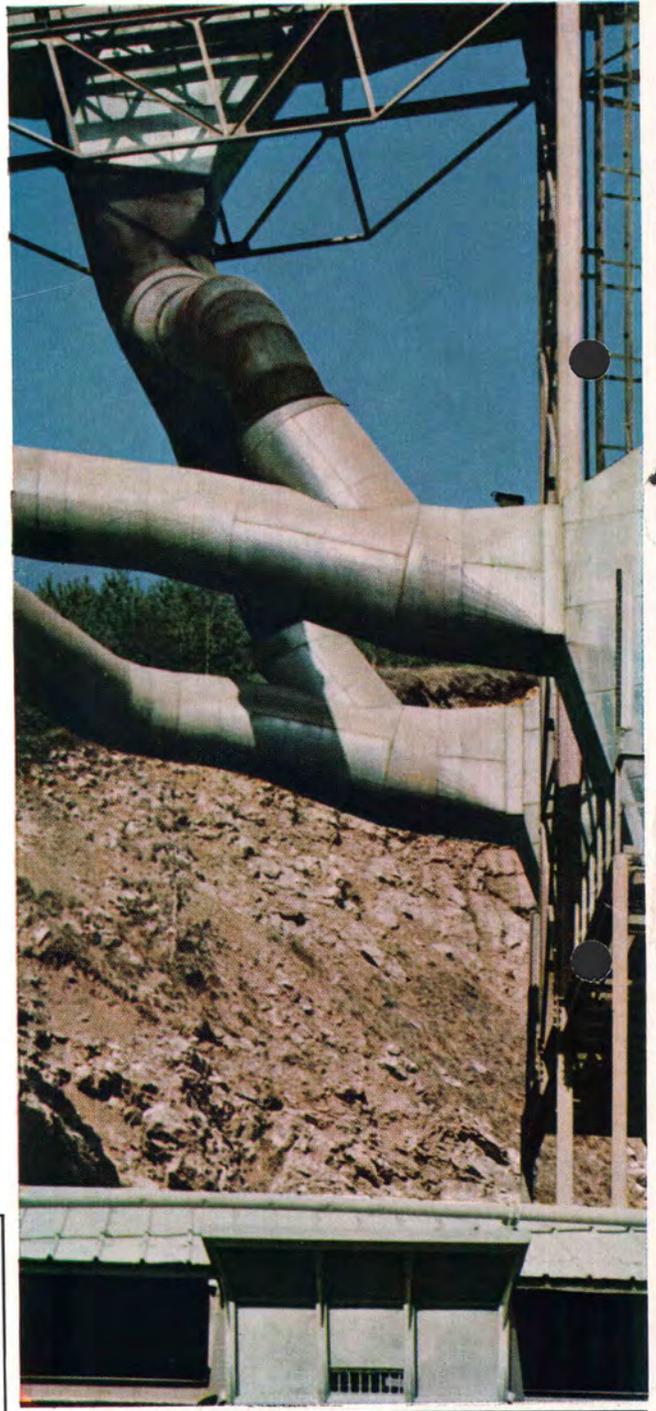
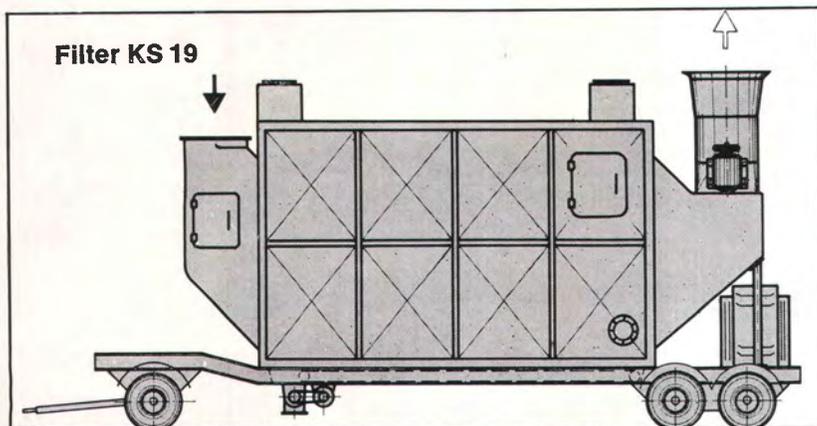
# HUMBOLDT

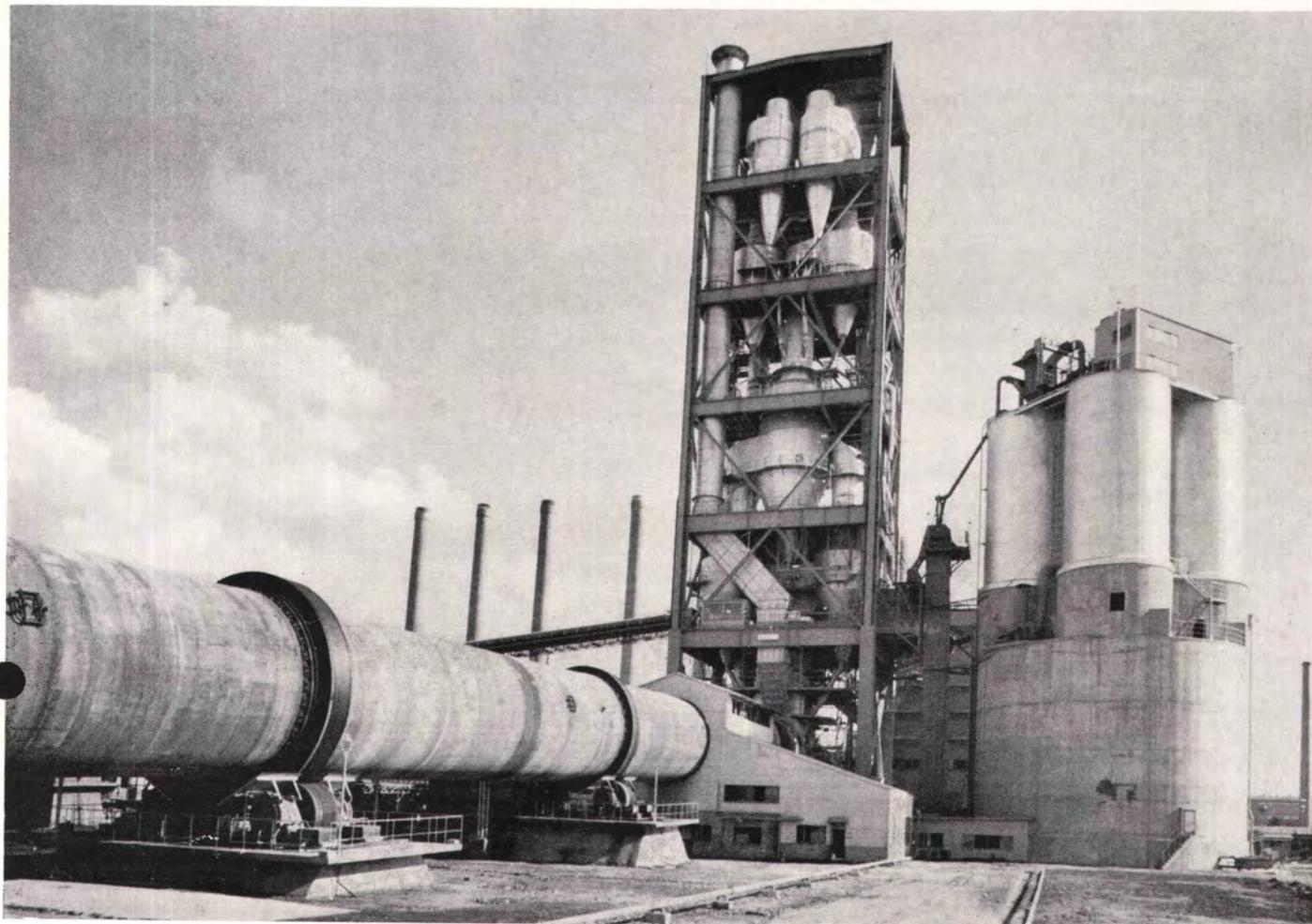
## ELEKTRO-FILTER ZYKLONE NASSABSCHIEDER

Entstaubung erfolgt  
nach den neuesten staatlichen Richtlinien

Fordern Sie Ingenieur-  
beratung und Informationen  
Werk HUMBOLDT  
Tel: 8231 FS: 08873501

### Spezial-Elektrofilter Typ KS 19 stationär und fahrbar





## Die Entscheidung:

• *Dopool - Ofen!*

*Erreichte Leistung 2800 t/d  
bei 770 Kcal/kg Klinker*

**POLYSIUS  
PLANT  
UND BAUT**



POLYSIUS liefert komplette, vollautomatisch arbeitende Zementwerke mit zentralem Leitstand, Röntgen-Fluoreszenzgerät und Prozeßrechner. Verfahrenstechnik + Meß- und Regeltechnik sind bei POLYSIUS in einer Hand.



**POLYSIUS GMBH**  
4723 Neubeckum/Westf.  
Tel.: (02525) 711 • FS 08921581  
Ascot • Paris • Madrid