

ISBN 3-88314-339-1

Forschungsbericht 104

Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM)
Berlin

Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen

von Dr.-Ing. Michael Gierloff

April 1984

86 Seiten, 61 Abbildungen

Herausgegeben von der
Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45
Telefon 030/8104-1 Telex 183261 bamb d

Copyright © 1984 by Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1
Telefon 0471/46093-95

Zusammenfassung

Zusätze von wäßrigen Kunststoffdispersionen verändern Festbetoneigenschaften, haben aber auch Einfluß auf die Verarbeitbarkeit des Frischbetons. Über das Langzeitverhalten derartig modifizierter Mischungen weiß man allerdings noch wenig. Daher sind Merkmale wie Porosität, Hydratation und die mechanischen Eigenschaften über einen Zeitraum von drei Jahren untersucht worden. Es konnte eine komplexe Beziehung zwischen der Änderung des dynamischen Elastizitätsmoduls, des Feuchtigkeitshaltes und der Dichte aufgestellt werden. Diese Korrektur gestattet eine wesentliche Verringerung des Fehlers bei der Berechnung der elastischen Kennwerte. Auf die Verteilung des Kunststoffes im Betongefüge wird eingegangen und untersucht, ob bekannte Baustoffkriterien von Normalbeton auf Kunststoffvarianten übertragen werden können. Die Ergebnisse geben Anhaltspunkte dafür, wie solche Betone bei extremen, aber in der Praxis zu erwartenden klimatischen Beanspruchungen reagieren.

Summary

Resin dispersions are added with the mixing water to mortar and concrete in order to improve their properties in fresh and hardened states. Until now only individual tests have been carried out, mostly on cement paste and mortar than on concrete. Data on long-term-behaviour, the distribution of resin within the matrix of cement and aggregate, as well as changes in material's properties during the phase of hydration are missing. These phenomena were therefore studied in „normal“ composed concretes with modified mixtures, and the results may later be extended to concretes for special applications. Furthermore it could be found a relationship between moisture content bulk density and Young's modulus. The influence upon elastic behaviour of the concretes can be calculated now from a formula developed for this research.

Die Arbeit fand finanzielle Förderung durch den Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. Ausgeführt wurde sie in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), in der Fachgruppe 2.1, dessen Leiter Herr Prof. Dr. rer. nat. P. Schimmelwitz wertvolle Anregungen gab. Stellvertretend für die Mitarbeiter, die die zahlreichen Proben herstellten, seien die Herren D. Ramgeus und J. Sichtung genannt.

Inhaltsverzeichnis

Seite

	Verwendete Formelzeichen	
1.	Einleitung und Problemstellung	1
2.	Stand der Kenntnisse	3
2.1	Grundlagen	3
2.2	Entwicklung und Einsatz von Kunststoffdispersionen, Einfluß von Feuchtigkeit und Temperatur auf mechanische Eigenschaften des Betons	3
3.	Ziel der Untersuchungen	15
4.	Umfang und Durchführung der Versuche	17
4.1	Herstellen von Zementpasten und Beton	18
4.2	Frischbetonkennwerte	20
4.2.1	Konsistenz	20
4.2.2	Porenvolumen	21
4.3	Festbetonkennwerte	22
4.3.1	Porengrößenverteilung	22
4.3.2	Rasterelektronenmikroskopie	23
4.3.3	Mechanisches Verhalten	23
4.3.3.1	Klimabeanspruchungen	23
4.3.3.2	Druck- und Biegezugfestigkeit	25
4.3.3.3	Elastizitätsmodul	26
4.3.3.4	Kriechen	30
4.4	Reaktion des Kunststoffes im Beton	31
5.	Versuchsergebnisse	33
5.1	Frischbetoneigenschaften	33
5.1.1	Wärmeentwicklung im hydratisierenden Zement und Beton	33
5.1.2	Konsistenz	35
5.1.3	Luftporengehalt	37
5.2	Reaktion des Kunststoffes mit Calciumhydroxid in jungem und altem Beton	39
5.3	Festbetoneigenschaften	41
5.3.1	Porenvolumen	41
5.3.2	Porengrößenverteilung	47
5.3.3	Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop	48
5.3.4	Mechanisches Verhalten bei unterschiedlichen Klimabedingungen	52
5.3.4.1	Druck- und Biegezugfestigkeit	52
5.3.4.2	Elastizitätsmodul	62
5.3.4.2.1	Feuchtigkeitseinfluß	65
5.3.4.2.2	Klimaeinfluß	67
5.3.4.3	Verhältnis von statischem zu dynamischem Elastizitätsmodul	70
5.4	Kriechen	73
6.	Zusammenfassung und Ausblick	75
	Schrifttum	81

Zeichen	Bedeutung
a	Ausbreitmaß, Parameter der Hyperbel
"a"	Klima 60 °C/10 % r. F.
a _k	Parameter für Grund- und Oberschwingung
b	Breite, Parameter der Hyperbel
"b"	Klima 60 °C/10 % r. F.; -10 °C/95 % r. F. im wöchentlichen Wechsel
B	Festigkeitsklasse von Beton
c	Korrekturfaktor, der den Einfluß von Schub- und Trägheitsmomenten berücksichtigt
C ₃ A	Tricalciumaluminat (3 CaO · Al ₂ O ₃)
C ₃ S	Tricalciumsilicat (3 CaO · SiO ₂)
CSH	Calciumsilicathydrat (z. B. für Tobermorit 5 CaO · 6 SiO ₂ · 5 H ₂ O)
"d"	Klima -10 °C/95 % r. F.
E _D	dynamischer Elastizitätsmodul
ΔE _D	Änderung des dynamischen Elastizitätsmoduls
E _S	statischer Elastizitätsmodul
f _{tr}	Resonanzfrequenz (Transversalschwingung)
G	Gleitmodul
h	Höhe
"h"	Klima 20 °C/65 % r. F.
i _z	Trägheitsradius
K	Konsistenzbereich
l	Länge
m	Masse des Betons
p	Luftporengehalt, Druck in Kapillaren
P _{Fbr}	rechnerisch ermittelter Luftporengehalt von Frischbeton
P _R	Porenraum, errechnet aus der Rohdichte
P	Gesamtporosität

Zeichen	Bedeutung
r	Korrelationskoeffizient, Porenradius
s	Standardabweichung
t	Zeit, Erstarrungszeit
v	Verdichtungsmaß
1/v	Festbetonmenge bei vollständiger Verdichtung
V	Summenhäufigkeit des Porenvolumens
$\frac{\Delta V}{\Delta r} \times \Delta r$	relative Häufigkeit des Porenvolumens
"w"	Unterwasserlagerung
W_V	Volumen des verdampfbaren Wassers
w/z	Wasser-Zement-Wert
β_{BZ}	Biegezugfestigkeit
β_D	Druckfestigkeit
ϵ_{el}	elastischer Anteil bei der Kriechverformung
$\Delta \epsilon_{el}$	Vergrößerung der Verformung infolge Zunahme des E-Moduls
ϵ_K	Kriechverformung
ϵ_S	Schwinden
ϵ_{tot}	Gesamtverformung
ϑ	Temperaturverlauf
φ	Kriechzahl
α	Konstante, die eine ungleichmäßige Verteilung von Schubspannungen über den Querschnitt berücksichtigt
λ	Wellenlänge
ρ_{Fb}	Frischbetonrohddichte
ρ_{Fbr}	rechnerisch ermittelte Dichte des Frischbetons
ρ_0	Reindichte (Dichte) des Betons
ρ_{Rb}	Trockenrohddichte von Beton
ρ_{Rbt}	Rohddichte des Betons in unterschiedlichem Alter

1 Einleitung und Problemstellung

Um Verarbeitbarkeit und Beständigkeit von Beton und Mörtel zu verbessern, wurden bereits früher organische Zusätze (Eiweiß-Hydrolysate, Sulfitablaugen u. ä.) verwendet. Erst in jüngerer Zeit fanden zunehmend Kunststoffe Eingang in die Betontechnologie. Nach der Verfahrensweise zur Herstellung kunststoffhaltiger Betone unterscheidet man drei Gruppen: "Polymer Impregnated Concrete" (PIC), "Polymer Concrete" (PC) und "Polymer Cement Concrete (PCC)". Bei PIC handelt es sich um erhärteten Zementbeton, der mit Monomeren imprägniert wird, die anschließend polymerisieren. PC ist ein Gemisch aus einem anorganischen Zuschlag und z. B. einem Monomer, das als späteres Polymer wie ein Bindemittel wirkt, also den Zement ersetzt. Als dritte Variante ist PCC in Gebrauch, der als "kunststoffmodifizierter Beton" bezeichnet wird. Hier gelangt der Kunststoff als Zusatzstoff in Form einer Dispersion oder eines Pulvers in den Frischbeton, der aus den herkömmlichen Komponenten besteht. Insbesondere haben hierbei die wäßrigen Dispersionen ein großes Anwendungsgebiet. Ihr Einfluß auf Eigenschaften des Betons ist Thema dieser Arbeit.

Neben der Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton beeinflussen die Zusatzstoffe wichtige Festbetoneigenschaften wie die Dichtigkeit des Gefüges, das elastische Verhalten, die Festigkeit, das Schwinden und Kriechen und verändern mehrere Merkmale zugleich. Im Gegensatz zu den Betonzusatzmitteln werden sie in relativ hohen Dosierungen gemeinsam mit dem Anmachwasser dem Zement und Zuschlag beigegeben. Unter Ausnutzung mehrerer Betoneigenschaften, die man mit diesen Produkten gezielt verändern kann, lassen sich solche Systeme dort einsetzen, wo übliche Betone bisher versagten. Das Hauptanwendungsgebiet der Dispersionen liegt zur Zeit bei den Beschichtungen, im Sanierungsbereich und im Industrieestrichbau. Auch ist beabsichtigt, schadhafte Konstruktionsbeton durch die modifizierte Variante zu ersetzen. Hierzu bedürfen aber diese Stoffe einer gesonderten Zulassung, wenn sie für tragende Bauteile verwendet werden sollen. Bisher fehlen jedoch ausreichende Erfahrungen über die Beeinflussung der Betoneigenschaften, insbesondere über die Langzeitwirkung.

Für den Betontechnologen ist es von großer Bedeutung, Unterschiede von kunststoffmodifizierten Varianten zum herkömmlichen Beton festzustellen und Frisch- und Festbetoneigenschaften zielgerecht abschätzen zu können.

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Grundlagen

Die hier untersuchten Kunststoffdispersionen bestehen aus Feststoffteilchen von wenigen μm Durchmesser, die in Wasser verteilt sind. Es bewirken Hilfsstoffe in Form oberflächenaktiver Substanzen, das sind Emulgatoren oder Schutzkolloide, die Trennung der Feststoffteilchen. Monomere Grundsubstanzen wie z. B. Vinylester, Acrylsäureester werden bei Verwendung eines einzelnen Monomers durch sogenannte Emulsionspolymerisation zu Homopolymerisaten oder sofern es sich um verschiedene monomere Ausgangsstoffe handelt, zu Misch- bzw. Copolymerisaten mit jeweils anderem Verhalten. Der verhältnismäßig hohe Erweichungspunkt von Polyvinylchlorid (PVC) wird durch Mischpolymerisation mit Vinylacetat (VAc) herabgesetzt, um somit eine leichtere Verarbeitbarkeit des entstandenen Polyvinylacetats (PVAc) zu erreichen. Homopolymeres Styrol ist spröde und wird durch Mischpolymerisation mit Butadien elastisch. Acrylsäureester polymerisieren relativ leicht und schnell und finden sowohl als Homopolymerisat als auch gemischt mit anderen, härtere Polymerisate liefernden Monomeren, wie z. B. Styrol, Verwendung. Von großem Einfluß ist der bei der Verseifung gewählte Alkohol: je höher molekular er ist, desto dehnbarer, weicher und klebriger werden die filmbildenden Kunststoffe /48/. So entstehen Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften, durch die der Beton nach den jeweiligen Erfordernissen verändert werden kann.

2.2 Entwicklung und Einsatz von Kunststoffdispersionen, Einfluß von Feuchtigkeit und Temperatur auf mechanische Eigenschaften des Betons

Zusatzstoffe, die mit Zementkomponenten derart reagieren, daß Eigenschaften des Betons negativ beeinflußt werden, oder den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht gewährleisten, sind auszuschließen. Es kommen daher nur solche Polymerisate in Betracht, die entweder im alkalischen Medium des Betons beständig, oder deren Reaktionsprodukte mit Zementkomponenten in Wasser schwer löslich sind. Wie in 5.2 gezeigt wird, entstehen Calciumsalze der Acrylsäure nach Verseifung der entsprechenden Ester mit Calciumhydroxid. Natriumhydroxid ist

offenbar von untergeordneter Bedeutung /4/. Ebenso muß bei Einsatz von Dispersionen die Raumbeständigkeit der Zemente erhalten bleiben. Der Halogengehalt darf im Beton nicht über das zulässige Maß hinaus erhöht werden, d. h. der Korrosionsschutz des Stahles ist zu gewährleisten. Frisch- und Festbetoneigenschaften sollen in Abhängigkeit von Zusatzstoffart und -menge kontrollierbar sein /42/.

Von den Kunststoffen der ersten Generation erwiesen sich besonders die Acetate als Homo- oder Copolymer im alkalischen Bereich des Betons oft als wenig beständig. Stellvertretend für die Forschungsergebnisse bis etwa zum Ende der 60er Jahre, sei die umfangreiche Arbeit von K r e i j g e r /28/ genannt, in der der Autor bislang gewonnene Erkenntnisse über Versuche hauptsächlich mit Polyvinylacetat (PVAc) zusammenfaßt. Übereinstimmend wird der Einfluß der Vorbehandlung und Lagerung der Proben auf deren Festigkeitseigenschaften genannt. K r e i j g e r und die Mehrzahl der von ihm bearbeiteten Autoren stellen fest, daß die Biegezugfestigkeit, mehr noch bei Mörteln als bei Betonen, mit erhöhtem Verhältnis von Dispersion zu Zement und nur bei Trockenlagerung steigt. Wassergelagerte Proben erreichen etwa nur die Hälfte an Festigkeit der Vergleichsmörtel. 70 % r. F. bewirkt bereits deutliche Verluste; anschließende Trocknung führt nicht in allen Fällen wieder zu einer Festigkeitssteigerung. Die Hydrolyse von PVAc wird hierfür verantwortlich gemacht. Einige Forscher sehen in der Bildung von Calciumacetaten $[Ca(CH_3COO)_2]$, einem leicht wasserlöslichen Salz, die Ursache. Andere Autoren sind der Auffassung, daß Verseifung nicht der einzige Grund bei Wasserlagerung ist. In Rahmen der Bestimmung der Verseifungsgeschwindigkeit werden PVAc Dispersionen anhand dieses Kriteriums als geeignet oder nicht eingestuft. Die physikalischen Einflüsse dieses organischen Zusatzes sollen auch für die Festigkeitseigenschaften von Beton verantwortlich sein. Während des Trocknungsvorganges entstehen in den sich bildenden Filmen Änderungen der Oberflächenspannungen. Der Verbund der Kunststoffe mit den Hydratationsprodukten ermöglicht die Übertragung dreiaxialer Druckspannungen, so daß die Belastbarkeit des Zementsteins zunimmt. Bei hohem Zementanteil macht sich jedoch ein Festigkeitszuwachs durch den Kunststoffilm kaum

bemerkbar. Tritt eine Trennung durch Abreißen der Filme vom Zementkorn und vom Zuschlag auf, so hat dies ein Absinken der Festigkeit zur Folge. Auch ist eine Mindestmenge an Kunststoff bei gegebenem Wassergehalt erforderlich. Wasser-Zement-Werte von 0,50 bei Kunststoff-Zement-Faktoren von 0,01 werden genannt, damit Betoneigenschaften günstig beeinflusst werden können. Übersteigt der Faktor jedoch diesen Wert, neigen die dicker werdenden Filme immer mehr zum Schwinden und führen dann zur Rißbildung. Die Möglichkeit der Spannungsübertragung geht damit verloren. Noch höhere Dosierungen von Zusatzstoff führen zum Aufbau eines Kunststoff-Skeletts, in dem die zugänglichen Hohlräume ausgefüllt werden. Die Entstehung eines Filmes ist dann nicht mehr möglich. Bei Gehalten von 10 bis 20 % können Schwindspannungen nicht mehr das stabile Kunststoffgerüst zum Reißen zu bringen. Bei weiterer Steigerung des Kunststoffgehaltes dominiert dann diese Phase so, daß die Festigkeit sinkt. Die oben erwähnten Spannungen werden für deren Festigkeitsminderung kaum verantwortlich gemacht.

Neuere Untersuchungen mit PVAc-Dispersionen lieferten widersprüchliche Aussagen über das Verhalten im Beisein von Feuchtigkeit. P e r é n y i /39/ fand heraus, daß Biegezug- und Druckfestigkeit von derartig modifizierten Mörteln mit Zusatzstoffgehalten zwischen 10 und 20 %, bezogen auf die Masse des Zementes, nach Lagerung bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 45 und 50 % zunächst einen anfänglichen Festigkeitsabfall und später jedoch einen jähen Anstieg nach dreimonatiger Lagerung aufwiesen. Nach einem Jahr waren Festigkeitswerte von luft- und wassergelagerten Proben nahezu gleich. Hinsichtlich des Korrosionsschutzes empfiehlt der Autor, Dispersionen vor ihrem Einsatz zu neutralisieren und den pH-Wert auf 7 einzustellen. Die mit diesen Zusatzstoffen verarbeiteten Mörtel boten dann einen besseren Korrosionsschutz. Eine Verseifung konnte nicht festgestellt werden. Dagegen stellen F r o n d i s t o u - Y a n n a s und S h a h /14/ bei PVAc-Dispersionen eine Reaktion mit Calciumhydroxid fest und beobachteten Festigkeitsminderungen nach Wasserlagerung. Es haben sich in Gegenwart von Wasser keine Filme bilden können. Das bedeutet, daß hohe Alkalität und Hydrolyse hierfür als Ursache anzusehen sind.

D e V e k e y und M a j u m d a r /57/ wiesen auch einen deutlichen Abfall von Biegezug- und Druckfestigkeit während der Wasserlagerung nach. Es läuft eine Reaktion ab, die eine Verminderung des pH-Wertes bewirkt und zur Bildung von Calciumacetaten führt. Dies wird ebenfalls als Folge unzureichender Alkalibeständigkeit von PVAc-Dispersionen gedeutet. Rückschlüsse darauf läßt die Verseifungsgeschwindigkeit, wie bei K r e i j g e r zu. S c h w i e t e, L u d w i g und S c h r o t h /50/ zeigten das auch 1969 in einer Literaturrecherche über Arbeiten aus den vergangenen 20 Jahren.

Diese Autoren konnten nach Experimenten neuere Polymerisationsprodukte als geeignet ansehen, deren Feststoffe auf Polyacrylsäureestern, Vinylpropionat, Butadien und Styrol basierten. Mit solchen Zusatzstoffen sind bis zu diesem Zeitraum nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden. Sie sollen sich jedoch im Gegensatz zu PVAc-Dispersionen unter feuchten Lagerungsbedingungen wesentlich günstiger verhalten. K r e i j g e r weist besonders auf fehlende Erfahrungen über das Langzeitverhalten hin.

Verstärkt gelangen jetzt Zusatzstoffe auf den Markt, die besonders den Mängeln vieler PVAc-Varianten Rechnung tragen. H a r r é u s /19/ und T e i c h m a n n /54/ berichten über solche, die in Deutschland entwickelt worden sind. Als Co- oder Terpolymere zu den Acetaten werden Malein, Acrylate, Vinylester, Ethylen und Vinylchlorid genannt. Neben diesen stehen Produkte wie Propionat/Vinylchlorid, Styrol-Acrylat und Styrol-Butadien zur Verfügung. Von großer Bedeutung sind Dispersionen auf der Basis von Acrylsäureestern als Homo- und Copolymere. In einer Übersicht geben O k a d a und O h a m a /38/ Zusatzstoffe auf der Basis von Styrol-Butadien, Polyacrylsäureestern und Mischpolymerisate aus Ethylen und Vinylacetat als die in Japan am meisten verwendeten Kunststoffdispersionen an. In Schweden haben sich ebenfalls Styrol-Butadien, Polyacrylsäureester und Vinylpropionat durchgesetzt, A l e x a n d e r s o n /2/. F o w l e r und P a u l /13/ berichten über Mischpolymerisate auf der Grundlage von Acryl- und Vinylacetaten, Styrol, Vinylchlorid und Butadien, die in den USA neben PIC

am häufigsten eingesetzt werden. Untersuchungen, vorwiegend mit Dispersionen auf der Basis von Acrylaten zeigten dann auch befriedigende Ergebnisse. D e V e k e y /56/ empfiehlt nach Untersuchungen zahlreicher Zusatzstoffe die Verwendung von Produkten auf der Basis von Styrol-Acrylsäureestern, weil sie die Dichte erhöhten und elastische Eigenschaft und Festigkeit von Zementmörteln verbesserten. K o z l o w s k i und H o w a n i e t z /27/ haben dagegen durch polyacrylesterhaltige Zusätze gegenüber Nullbeton sowohl eine höhere als auch eine geringere Dichte erhalten. Außerdem besteht ein Zusammenhang zwischen E-Modul und Druckfestigkeit. Dies steht aber im Gegensatz zu Untersuchungen von W i e r i g und R u p p e r t /62/, bei denen E-Moduln mit Dichten besser korrelieren als mit Festigkeiten, was jedoch nur an Normalbeton untersucht wurde. Nach Arbeiten von M a n g a t /29/ lassen sich Probekörper bis zum ersten Auftreten von Rissen bei Einsatz derartiger Kunststoffe weit höher belasten als Vergleichsbetone. Ebenfalls wird dadurch ein Ansteigen der Bruchspannung erreicht.

Der Einfluß von polyacrylsäureesterhaltigen Dispersionen auf die Sulfatbindung von Portlandzement ist mit Hilfe der Infrarotspektroskopie untersucht worden /50/. Gips oder Anhydrit können Anfangsreaktionen bei der Hydratation beeinflussen. Die Autoren zeigen, daß die organischen Zusätze besonders in den ersten Stunden die Sulfatbindung stark beschleunigen, was auf eine erhöhte Benetzbarkeit der Zementpartikel durch den Kunststoff zurückgeführt wird. Über eine Dosierung von 10 % hinaus findet keine nennenswerte Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit mehr statt. Nach etwa sechs Stunden Hydratationsdauer haben Vergleichszement ohne Zusatz und modifizierter Zementleim etwa wieder gleiche Reaktionsbeschleunigungen. Darüber hinaus findet kein Eingriff in den weiteren Hydratationsablauf mehr statt. Zum gleichen Ergebnis kamen d e V e k e y und M u j a m d a r /57/. Eine Reaktion mit Zement oder eine Änderung der Ionen-Konzentration konnten sie bei Einsatz derartiger Zusätze nicht beobachten. C h a n d r a et al. /5/ haben dagegen Reaktionen von Carboxylgruppen (COOH) mit Ca(OH)_2 und NaOH festgestellt. Carboxylgruppen polymerer Bestandteile können mit Ca^{2+} Ionen in Wechselwirkung treten, wobei Calciumacrylate

entstehen. Gelbbildung und Fällung sind die Folgen. Wird jedoch NaOH verwendet, so treten keine Salze organischer Säuren auf, die Kunststoffe bilden weiterhin Filme. Für die Reaktion zur Entstehung von Salzen wird das zweiwertige Kation des Calciums verantwortlich gemacht, die Alkalität der Lösung ist ohne Einfluß.

Hinsichtlich der Porengrößenverteilung zeigen K a s a i et al. /22/, daß sich diese durch Polyacrylsäureester zum größeren Bereich hin verschiebt (Häufung bei etwa 300 nm), und sie sich damit wenig von der der Nullprobe unterscheidet. Ein gleicher Carbonatisierungsgrad wird erhalten, der auf das ähnliche Porensystem zurückgeführt wird. Soweit sich Dispersionen und Betonzusammensetzung vergleichen lassen, stellt K a w a n o /23/ dagegen eine Häufung von Poren im feineren Bereich fest und erhält auch ein dichteres Gefüge.

Über die beschriebenen Arbeiten hinaus werden in der Literatur nahezu keine umfassenden Aussagen über Beeinflussung von mechanischen Eigenschaften kunststoffmodifizierter Betone durch Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten gemacht. B l u n k /3/ mißt der Festigkeit und Verformbarkeit in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur große Bedeutung wegen der "Versprödung" bei und fordert weitergehende Untersuchungen. I. w. stehen nur Ergebnisse von Normalbeton zur Verfügung. Diese lassen sich, auch wegen der Widersprüchlichkeit nur bedingt auf die eigenen Versuche übertragen.

T a k e d a /53/ untersuchte Betone im Intervall von 40 bis 80 °C auf Druckfestigkeit. Diese stieg zunächst nach 6 Monaten bis zu 20 % und ging dann nach 12 Monaten wieder zurück, so daß insgesamt nur eine Verbesserung um 10 % erreicht wurde. Der Unterschied zu den Ergebnissen nach 28 Tagen war jedoch so gering, daß dies nur als tendenzielle Aussage gelten kann. Eine Erklärung hierfür steht allerdings noch aus. K i s h i t a n i und K a s a m i /24/ stellten dagegen eine Verminderung der Betondruckfestigkeit von 10 % im Alter von 90 Tagen bei einer Temperatur von 50 °C fest. Eine weitere Verringerung trat bis zur Erwärmung auf 110 °C nicht mehr ein. Erst danach sank die Festigkeit wieder und zwar linear, was auch unabhängig von der Art der Zuschläge war.

Das wird einerseits auf die Ausdehnung von Zementstein und andererseits auf die Änderung der Porosität durch Verdampfen von Wasser zurückgeführt. Dieser Effekt trat bereits dann auf, wenn die Feuchtigkeit 30-40 % des ursprünglichen Wassergehaltes betrug. Angaben über den Zusammenhang zwischen Feuchtigkeit und Festigkeit machen auch K o r d i n a und S c h n e i d e r /25/. Unter der Voraussetzung einer ständigen Trocknung erfährt Normalbeton bis zu Temperaturen von 100 °C keine wesentliche Festigkeitsminderung, solange "höchstens einzelne Temperaturwechsel bzw. Abkühlungen bis auf 20 °C auftreten". Nach Interpolation der angegebenen Tafelwerte beträgt die Festigkeitsabnahme bei 60 °C nur etwa 5-10 %. M i r o n o v et al. /35/ haben Proben mit 120 Temperaturwechselzyklen (20 °C/75 °C) belastet. Dabei konnte ein Anstieg der Festigkeit während der ersten 30-40 Zyklen beobachtet werden. Dieses wird auf weitere Hydratationsfähigkeit des Portlandzementes bei höheren Temperaturen zurückgeführt. Nach 28 Tagen betrug der Feuchtigkeitsgehalt 4-6 %, nach etwa 30 Zyklen nur noch 0,8-1,2 %. Obwohl Mikrorisse und andere strukturelle Schädigungen eintraten, blieb die Druckfestigkeit auf einem konstanten Wert. Nach Ansicht der Autoren konnten sich zusätzliche Spannungen von einer bestimmten Zykluszahl an im Innern des Betons trotz vermehrter Temperaturwechsel nicht mehr ausbilden, und infolgedessen traten auch keine weiteren Gefügezerstörungen mehr auf. F i s c h e r /12/ erklärt einen Festigkeitsanstieg infolge zunehmender Entfeuchtung dadurch, daß die im Probeninnern befindliche Feuchtigkeit wie ein Gleitmittel wirke. Je weniger davon verblieben ist, je stabiler wird das Tragverhalten und desto höher steigt die Festigkeit. Das Zwischenschichtwasser ist hier nicht wirksam, da dessen Anteil mit zunehmendem Probeanter wegen der fortschreitenden Hydratation abnimmt. Der Autor zieht das als Erklärung dafür heran, daß die Festigkeit 84 Tage alter Proben nicht mehr steigt, wenn der Feuchtigkeitsgehalt 6 % des Probengewichtes unterschreitet. Wird der Wassergehalt erhöht, fällt die Festigkeit infolge verminderter innerer Reibung. Dies wird aber als reversibler Vorgang gedeutet. Mögliche Festigkeitseinbußen von etwa 15 % im Bereich 0-300 °C führten K o r d i n a / W a u b k e /26/ auf eine Kapillarentwässerung des Zementsteins zurück. Die dadurch bedingten Mikro-

risse durch Schwinden können pauschal als Gefügeschädigungen im Bereich normaler Austrocknung angesehen werden. S c h n e i d e r /47/ faßt in zwei Aussagen die bisher gemachten Erfahrungen, die unabhängig von der jeweiligen Versuchsdurchführung und der untersuchten Betonmischung gewonnen wurden zusammen: Ursache des Festigkeitsabfalls bei thermischer Beanspruchung sind physikochemische Prozesse und damit verbundene Transportvorgänge; der Festigkeitsabfall erfolgt in zwei Stufen, die jedoch allgemein "verschmiert" in Erscheinung treten. Die letzte Aussage ist durch viele Versuchsreihen bestätigt, jedoch ohne theoretische Begründung.

R o s t á s y und W i e d e m a n n /45/ haben zwar das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Beton bei sehr tiefen Temperaturen untersucht, geben aber auch Auskunft über das Verhalten in der Nähe des Nullpunktes. Das Gefrieren von Wasser erstreckt sich über einen weiten Temperaturbereich, da dies jeweils von den im Porenwasser gelösten Stoffen und den Druckunterschieden in den feinen Kapillaren abhängt. Eis und Wasser sind im Beton etwa bis hinunter zu $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ in ihren Phasen anzutreffen. Bei Frost gelagerte wassersatte Proben zeigen einen ungleich höheren Festigkeitsanstieg als ofentrockene. Die Ursache wird darin gesehen, daß das Eis Kräfte übernimmt. Durch das gefrorene Wasser werden die Poren mit einer Druckvorspannung belastet. Es ergeben sich somit keine Gefügeschwachstellen mehr. Die Festigkeit steigt mit zunehmender Feuchtigkeit und tieferer Temperatur. Die Dehnung des Betons bei $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist im Vergleich zu der bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ um etwa $1\text{ }^{\circ}/\text{oo}$ größer. Bei wechselnder Temperaturbeanspruchung ($20\text{ }^{\circ}\text{C}/-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) führte jeder Zyklus zu einer Schädigung des Gefüges. Dabei sind wassersatte Betone gefährdeter als solche, die nach 40-tägiger Wasserlagerung im Klima 20/65 austrocknen konnten. Diese Proben zeigten dann keine Schäden. Angegeben wird auch eine kritische Feuchtigkeit, bei der die Betone gerade nicht mehr zerstört werden. Diese stellt sich ein, wenn die Proben im Klima 20/85 lagern. W a l z und B o n z e l /60/ untersuchten Mörtel bei $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Druckfestigkeit der bei Frost gelagerten Proben nahm im Mittel um 25 % nach 270 Tagen zu und erreichte damit die Festigkeit derjenigen, die ebenso lang einer Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt waren.

Vergleiche zwischen dauernd unter Wasser und Luft gelagerten Betonen sind von N i s c h e r /36/ angestellt worden. Letztere Betone haben bis zu 30 % geringere Festigkeiten. Dies wird auf Schrumpfspannungen zurückgeführt, die bei einem Beton mit höherem Zementgehalt größer sind als bei einem vergleichbaren mit geringerem Zementanteil. Mikrorisse, die infolgedessen entstehen, können bei Feuchtigkeitszutritt wieder "verheilen", indem die Spannungen durch Quellen und Kriechen abgebaut werden. Schützt man hingegen Betone drei Tage lang vor dem Austrocknen, tritt kein Unterschied im Festigkeitsverhalten zu wassergelagerten Betonen auf. Die Nacherhärtung ist bei Beton mit hohem w/z-Wert nach etwa einem Jahr beendet, während im Falle von niedrigen w/z-Werten auch noch nach 2 Jahren mit einem Festigkeitszuwachs zu rechnen ist. W i t t m a n n /63/ weist auf unmittelbare Zusammenhänge zwischen Quellverformung, Festigkeitsabnahme und Oberflächenenergie hin. Durch adsorbierte Flüssigkeitsfilme werden Oberflächenenergie und somit Oberflächenspannung fester Körper vermindert. Das führt bei porösen Stoffen mit genügend großer innerer Oberfläche zu Längenänderung und Festigkeitsabnahme. Die Bruchspannung fällt mit der Volumenvergrößerung und läßt sich bis zu einer relativen Feuchtigkeit von 40 % als Gerade darstellen. Darüber hinaus wird im Zementstein Zwischenschichtwasser eingelagert, außerdem tritt Kapillarkondensation auf. Beide Vorgänge tragen zusätzlich zur Spannungserhöhung bei, und die Funktion weicht dann bei größeren Feuchtigkeitsgehalten von der Geraden ab. S e t z e r /51/ faßt seine Ergebnisse und die von anderen Autoren folgendermaßen zusammen: Die Festigkeit nimmt proportional zur Oberflächenenergie ab. Dies bedeutet, wenn die Feuchtigkeit im Beton steigt, die Gelpartikel quellen und sich verformen. Außerdem wird infolge eines hohen Wassergehaltes das Gefüge durch Spaltdruck ausgedehnt. Proportional dazu nimmt die Kriechgeschwindigkeit zu. Das Quellen wurde auch als Funktion der freien Oberflächenenergie berechnet. Hier verläuft die Ausdehnung von Gelpartikeln im Bereich von 2-38 % r. F. ebenso linear. Erst ab etwa 40 % nimmt sie überproportional zu. Dies kann sowohl auf eine Abnahme der Krümmungsradien der Menisken bei der Kapillarkondensation, bei gleichzeitigem Abbau von Zugspannungen zurückgeführt werden, als auch auf Spaltdruck, der in den Gelporen erst von diesem Wert ab wirksam wird.

Über das Kriechen bestehen unterschiedliche Auffassungen. Allgemein wird aber angenommen, daß seine Geschwindigkeit von der relativen Luftfeuchte, mit der die Proben im Gleichgewicht sind, beeinflußt wird. Dies gilt natürlich auch für eine Erhöhung der Materialfeuchtigkeit. So konnte eine lineare Abhängigkeit der Kriechgeschwindigkeit von der Ausdehnung des Zementsteingefüges gefunden werden /51/. Eine Schwächung im Bereich van der Waals'scher Bindungen wird als Ursache angesehen. Von den wenigen Autoren, die sich mit dem Kriechverhalten kunststoffmodifizierter Betone auseinandergesetzt haben, weisen M a n g a t et al. (30) nach, daß Endkriechmaße bereits aus sechs Monate alten Werten extrapoliert werden können. In diesem Zeitraum hat A l d a /1/ Abweichungen vom errechneten zum gemessenen Endkriechmaß von etwa 10 % ermittelt. Dies traf jedoch nur für Normalbeton zu.

Aus den Untersuchungen über das elastische Verhalten von S u l l i v a n / P o u c h e r /52/ geht hervor, daß im Temperaturbereich von 20-95 °C eine erhebliche Zunahme der Verformbarkeit von Beton auftritt. Der Elastizitätsmodul fällt dabei um etwa 25 %. Anzeichen für bleibende Schäden im Gefüge werden darin gesehen, daß sich die E-Moduln der Proben bei Versuchstemperatur und die nach Abkühlung auf 20 °C nicht voneinander unterscheiden. Es wird vermutet, daß sich Mikrorisse auch nach Abkühlen nicht mehr schließen können und zu einer Gefügelockerung führten. H a n n a n t /18/ versiegelte Betonproben und stellte nach zwei Jahren unter Dauerlast eine Verminderung des Elastizitätsmoduls im Bereich von 50 bis 77 °C fest. Die Abnahme war beträchtlich, der E-Modul sank von 42 000 auf 7 000 N/mm², was einen Verlust von etwa 80 % bedeutet. Werden die Temperaturen weiter erhöht, so entsprechen aber die Ergebnisse wieder dem Ausgangswert, der bei normaler Temperatur erreicht wird. Bei Proben, die vor dem Belasten getrocknet wurden, verringerte sich der Elastizitätsmodul dagegen nur geringfügig. Aussagen über dieses Verhalten sind nach dem Autor nur bei genauer Kenntnis über die Feuchtigkeit im Beton möglich. Bezugsgrößen werden aber nicht angegeben. Betone, aus der 60 °C-Lagerung, zeigten nach 3 Monaten einen Rückgang des Elastizitätsmoduls bis zu 20 %, wo er dann während der gesamten

Versuchsdauer von einem Jahr konstant blieb /53/. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen K i s h i t a n i / K a s a m i /24/ und F u r u m u r a /15/ nach einer Temperatureinwirkung von 50 °C, wonach der E-Modul etwa 70 - 80 % des ursprünglichen Wertes annahm. Ein Absinken des Kennwertes um 10 - 15 %, interpoliert bei 60 °C, stellt bereits eine merkliche Verminderung dar /25/, was auch W e s c h e /60/ im Bereich hoher Temperaturen mit wechselnder Beanspruchung erkannt hat. R e y n o l d s et al. /41/ haben elastische Eigenschaften an Zementpasten untersucht und diese auf Beton bekannter Zusammensetzung übertragen. Mit der Austrocknung nimmt ebenfalls der E-Modul ab. Proben, die im Exsikkator trockneten, lagen in ihren Dichten über denen ofengetrockneter Betone, die E-Moduln der letzteren zeigten dabei die niedrigsten Werte. Dieser Befund wird nicht allein auf die Vergrößerung der Porosität sondern auch auf zusätzlich auftretende, ausgedehnte Oberflächenrisse zurückgeführt. M a r é c h a l /32/ fand hingegen ein Ansteigen des Elastizitätsmoduls bei Temperaturen um 50 °C. Dies ging mit dem Verflüchtigen des größten Teils von verdampfbarem Wasser einher. Erst oberhalb davon ließ sich ein linearer Abfall beobachten. Der Autor sieht darin ein "Zusammenziehen der Struktur" infolge des Schwindvorganges, welcher den E-Modul vergrößern läßt. Bei weiterer Temperaturerhöhung stellen sich chemische Modifikationen ein, die die Bindungskräfte ändern. Infolgedessen nimmt der E-Modul ab. Das wird als ein irreversibler Vorgang betrachtet.

M a r é c h a l hat auch das elastische Verhalten von Beton bei niederen Temperaturen untersucht. Seine Proben lagerten 18 Monate lang bei -18 °C und 98 % r. F.. Es konnten danach keine signifikante Veränderung des E-Moduls verzeichnet werden. Erst unterhalb von -18 °C stieg dessen Wert an. Ursache dafür war ein Füllen größerer Poren mit Eis, ohne daß sich dabei die Struktur des Betons verändert hatte. Dann nämlich gefror auch das Wasser in den feineren Kapillaren und Poren und trug somit als "Gefügebestandteil" zur Erhöhung des E-Moduls bei. Mit zunehmender Betonfeuchtigkeit erhielten R o s t á s y und W i e d e m a n n /45/ bei -30 °C einen etwa doppelt so großen Betrag, wie nach der Normallagerung. R o t h /46/ unterwarf 56 Tage alten Beton Frost-Tauzyklen

von 4,5 und 15 h bei 20 °C im Wasser und -20 °C im Frost-
raum. Insgesamt erfolgten 50 Wechsel. Der anschließend er-
mittelte dynamische E-Modul betrug etwa 84 % des Ausgangs-
wertes vor Versuchsbeginn. Diese Veränderung stellte eine
Gefügelockerung durch Frostschädigung dar. Bedeutend gerin-
ger ist die Zunahme des E-Moduls bei luftgelagerten Proben
nach dem 28. Tag als bei Betonen, die nicht haben austrock-
nen können. Ein Einfluß der Nachbehandlung auf eine Zunahme
des Kennwertes war nicht feststellbar, N i s c h e r /36/.

3 Ziel der Untersuchungen

Aus den bisherigen Arbeiten geht hervor, daß besonders Untersuchungen über längere Zeiträume über die Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Kunststoffzusätze fehlen. Auch ist ungeklärt, wie kunststoffmodifizierte Betone auf extreme, aber praxisnahe Klimabeanspruchungen reagieren. Erkenntnisse über die Verteilung des Kunststoffes in der Zement-Zuschlag-Matrix sowie deren stoffliche Veränderung während des Hydratationsablaufes von Zement sind kaum vorhanden.

Das Verhalten des Zementes und der Kunststoffdispersionen ist sehr unterschiedlich und gerade in der Frühphase der Betonhärtung gegenläufig. Während der Zement als hydraulisches Bindemittel stets Wasser zur Verfestigung benötigt, erreicht das der Kunststoff nur auf dem Wege der Austrocknung. Daher sind Versuchsbedingungen so gewählt worden, daß dem Zement stets die Möglichkeit zur Hydratation gegeben ist. Temperatur und Feuchtigkeit belasten hingegen den Kunststoff derart, daß seine Erhärtung gestört, verlangsamt oder beschleunigt wird. Erhöhte und niedere Temperaturen bei geringer bzw. hoher Luftfeuchtigkeit sowie beides kombiniert, und zwar im wöchentlichen Wechsel, aber auch Luft- und Unterwasserlagerung sollen Änderungen von Betoneigenschaften durch den Kunststoff hervortreten bzw. erkennen lassen.

Ferner ist es das Ziel der Arbeit, Näheres über die Verteilung und die Wirkungsweise der Kunststoffe in dem Zement-Zuschlag-Gefüge zu erfahren. Auch wird auf die Übertragbarkeit von Verarbeitbarkeit und Verformungseigenschaften von Normalbeton auf kunststoffmodifizierten Beton eingegangen. Dies ist sowohl für den Frischbetonbereich, als auch beim Festbeton vorgesehen, woran Dauerstandsversuche durchgeführt worden sind. Weiterhin tragen vergleichende Untersuchungen zur Klärung der Frage bei, ob Alterungserscheinungen das Verhalten der modifizierten Betone merklich beeinflussen können. Die bessere Kenntnis um die Wirkungsmechanismen im Beton soll schließlich eine zielgerechtere Auswahl der zur Verfügung stehenden Kunststoffdispersionen ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit orientierten sich die Auswahlkriterien für die zur Diskussion stehenden Zusatzstoffe an den Prüfrichtlinien für Versuche zur Beurteilung von Betonzusatzstoffen mit organischen Bestandteilen /42/. Danach mußten die Dispersionen die folgenden Mindestvoraussetzungen erfüllen:

- bei einer Veränderung von Frischbetoneigenschaften dürfen Erstarren und Erhärten der Zemente nicht nachteilig beeinflusst werden
- eine Hydrolyse der Polymerisate durch die hohe Alkalität des Zementleims muß ausgeschlossen sein
- korrosiver Angriff auf die Bewehrung darf nicht stattfinden.

Derart gewonnene Ergebnisse eigener Vorversuche führten mit Erkenntnissen aus der Literatur zu den nachstehenden Produkten, die sich als besonders geeignet herausgestellt hatten.

- Mischpolymerisat aus Ethylen, Vinylacetat und Vinylchlorid, intern bezeichnet mit VA.
- Copolymer aus verschiedenen Acrylsäureestern, intern bezeichnet mit AE.
- Mischpolymerisat aus Styrol-Acrylsäureestern, intern bezeichnet mit SA.
- Mischpolymerisat aus Styrol-Acrylsäureestern, intern bezeichnet mit VM.

Nach Angaben der Hersteller handelte es sich um Dispersionen, die speziell für den Bausektor entwickelt worden sind.

4 Umfang und Durchführung der Versuche

Aus der Zielsetzung der Arbeit kann das Versuchsprogramm in drei Abschnitte unterteilt werden. Im ersten gilt es, stoffliche Zusammenhänge, Reaktionen mit Zementkomponenten, Beeinflussungen im Hydratationsablauf und Verteilung der Kunststoffe in der Matrix zu beschreiben. Diese wird als Grundmasse aus kristallinen und amorphen Bestandteilen verstanden, in die anorganische Zuschlagkörner und Kunststoffpartikel eingelagert sind. Im Frischbetonbereich ist mit Hilfe kalorimetrischer Messungen zu klären, ob Hydratphasen verzögert entstehen. Aus den Temperaturmaxima, ihren zeitlichen Verschiebungen und aufgrund von Erstarrungsmessungen an Zementpasten können Rückschlüsse auf den Wirkungsmechanismus im Beton gezogen werden.

Die Literatur macht unterschiedliche Angaben über das Verhalten der Dispersionen im Festbeton. Einerseits wird inertes Verhalten glaubhaft gemacht, andererseits sind Reaktionen mit Hydratationsprodukten zu beobachten. Eigene Untersuchungen über die Reaktion der Polymerisate mit Zementkomponenten geben Aufschluß über die Wirkungsweise in jungem und altem Beton. Infrarotspektroskopisch und über die Methode der Extraktion von organischen Anteilen im Beton wird eine Aussage über eine Verseifung der Ester und eine Bildung von Salzen organischer Säuren im alkalischen Medium möglich.

Die technologischen Eigenschaften der Betone werden hauptsächlich durch das Porengefüge beeinflusst. Hier ist besonders die Verteilung von Poren und Kapillaren, die nicht allein durch das verdampfbare Wasser gekennzeichnet werden können, von Bedeutung. Da die Kunststoffteilchen vermutlich besonders im Bereich ihrer Partikelgröße Einfluß auf die Porosität nehmen, wurde diese mit dem Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie untersucht. Um eine anschauliche Vorstellung von der Verteilung und der Ausbildung der Kunststoffe im erhärteten Beton zu erhalten, sind rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt worden. Zusammen mit den anderen Untersuchungen entsteht so eine Modellvorstellung über den Aufbau der Matrix.

Der zweite Teil der Untersuchungen befaßt sich mit Veränderungen im Frischbetonbereich und behandelt die Konsistenz als Kriterium der Verarbeitbarkeit. Auch wird das Porenvolumen des Frischbetons erfaßt, das ebenfalls für die mechanischen Eigenschaften des späteren erhärteten Materials eine Rolle spielt.

Der dritte Teil geht auf die Beeinflussung mechanischer Eigenschaften des Festbetons ein. Extreme Klimabeanspruchungen belasten Kunststoff und Beton und fördern bzw. schränken deren Wirksamkeit in dem Gefüge ein. Dadurch treten Eigenschaften in unterschiedlichem Maße hervor, was besonders im Vergleich zu den Mischungen ohne Zusatzstoff erkennbar wird. Große Bedeutung wird dem elastischen Verhalten beigemessen. Vergleiche zwischen dem statischen und dem dynamischen Elastizitätsmodul liefern Anhaltspunkte für die Übertragbarkeit bisheriger Erkenntnisse auf kunststoffmodifizierte Betone. Darüber hinaus wird die Änderung des elastischen Verhaltens über einen Zeitraum von drei Jahren erfaßt. Hier werden die Betone durch die gleichen Klimabeanspruchungen wie bei den Festigkeitsuntersuchungen belastet. Untersuchungen über das Kriechen und Schwinden geben zusammen mit den übrigen mechanischen Ergebnissen eine Beurteilungsgrundlage für das Langzeitverhalten.

4.1 Herstellen von Zementpasten und Beton

Die Änderung der Temperatur in Pasten und frischen Betonen ist ein Kriterium für die Beeinflussung der Hydratation durch Kunststoffdispersionen. Hierzu diente der Temperaturverlauf bei quasi adiabatischer Reaktion in einer selbst entwickelten isolierten Vorrichtung, die jeweils vier Proben auf einmal aufnehmen konnte. In der Mitte der Probengefäße befanden sich Eisen-Konstantan-Thermoelemente. Die Gesamteinwaage der Zementpasten betrug 200 g, wobei der Portlandzement der Festigkeitsklasse 35 F einen Wasseranteil von 30 % bezogen auf die Masse des Bindemittels hatte. Der Zugabe des Anmachwassers und der zuvor darin verrührten Dispersion folgte ein Mischvorgang von drei Minuten. Der Zementleim enthielt vom organischen Material jeweils 2,5; 5 und 10 % bezogen auf die Masse des Bindemittels. Der Wasser-

anteil der Dispersion war bei der Berechnung des Gesamtwasser-
 sergehaltes zu berücksichtigen. Unmittelbar nach dem Verrühren
 gelangte der Zementleim in die Probengefäße, wo die
 Temperaturänderung sofort erfaßt wurde.

Für die Versuche mit Beton, Einwaage jeweils 1700 g, galten
 die gleichen Bedingungen. Sand und Kies lagen im günstigen
 Sieblinienbereich A/B₀ nach DIN 1045 /7/. Der Wasser-Zement-
 Wert betrug 0,60 bei einem Zementgehalt von 270 kg je Kubik-
 meter Beton. Die Mischungen enthielten Dispersionsanteile
 jeweils von 5; 10 und 20 %.

Um Vergleiche zwischen den modifizierten Betonen einerseits
 und mit den Nullmischungen (ohne Zusatzstoff) andererseits
 zu ermöglichen, wurden Rezepturen so gewählt, daß Zementart,
 Zuschlagart und Sieblinie jeweils konstant blieben. Wasser-
 Zement-Wert, Zusatzstoff und dessen Menge variierten aber
 (Bild 1). Bei der Regelsieblinie B₁₆ /7/, läßt das Größtkorn
 auch noch eine optimale Verteilung des Zuschlags in Prismen-
 formen von 10 cm x 10 cm x 30 cm zu. Dosierungen der organi-
 schen Stoffe von 5 und 10 % bezogen auf die Masse des Ze-
 mentes entsprechen der baupraktischen Anwendung und den
 Angaben der Zusatzstoffhersteller. Der Wassergehalt der
 Dispersionen von etwa 50 % wurde auf das Gesamtwasser im

Mischungsbezeichnung		O	SA	AE	VA	VM	SA	AE	VA	VM	O	SA	AE	VA	VM	SA	AE	VA	VM	
w/z-Wert		0,50										0,65								
Zusatzstoff	in % bezo- gen auf die Masse des Zemen- tes	0	5				10				0	5				10				
Zement	kg/m ³	340	340	340	340	340	340	340	340	340	260	260	260	260	260	260	260	260	260	
Wasser (gesamt)		170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
Wasser (Zugabe)		170	161,5	161,2	161,5	161,6	153,0	152,3	153,0	153,2	170	163,5	163,5	163,5	163,6	157,0	156,5	157,0	157,2	
Zusatz- stoff		Feststoff	-	8,5	8,2	8,5	8,6	17,0	16,3	17,0	17,2	-	6,5	6,2	6,5	6,6	13,0	12,5	13,0	13,2
		Wasser	-	8,5	8,8	8,5	8,4	17,0	17,7	17,0	16,8	-	6,5	6,8	6,5	6,4	13,0	13,5	13,0	12,8
Zuschlag (gesamt)		1821	1800	1800	1803	1800	1781	1783	1783	1781	1888	1874	1874	1874	1874	1858	1860	1860	1858	
0 / 0,30 4 % 1)		74	74	74	74	74	72	72	72	72	77	77	77	77	77	77	77	77	77	
0 / 0,25 15 %		273	270	270	270	270	268	268	268	268	283	281	281	281	281	278	278	278	278	
0,50/ 1,0 11 %		200	198	198	198	198	195	195	195	195	208	205	205	205	205	205	205	205	205	
1,0 / 2,0 10 %		182	179	179	179	179	177	179	179	177	187	187	187	187	187	185	185	185	185	
2,0 / 4,0 14 %		255	252	252	252	252	250	250	250	250	265	263	263	263	263	260	260	260	260	
4,0 / 8,0 22 %		400	395	395	398	395	393	393	393	393	416	411	411	411	411	408	408	408	408	
8,0 / 16,0 24 %		437	432	432	432	432	426	426	426	426	452	450	450	450	450	445	447	447	445	
Frischbeton 2)		2331	2319	2318	2322	2319	2308	2309	2310	2308	2318	2311	2310	2311	2311	2301	2303	2303	2301	
Rechnerische Dichte des Frischbetons ohne Luftporen p _{Fbr}		2430	2416				2401	2402	2401	2402	2419	2408				2397	2398	2397	2398	

1) Prozent bezogen auf den gesamten Zuschlag
 2) nach Stoffraumrechnung

Bild 1

Zusammensetzung der Betonmischungen mit und ohne Zusatzstoff

Untersuchung von Betoneigenschaften	Beanspruchung bis zu 3 Jahren im Klima	Anzahl der Würfel W und Prismen P		Benutzter Zwangsmischer
		gesamt	für 28-Tage-Festigkeit ¹⁾	
Druckfestigkeit	"a"	270 W	54 W	Inhalt 150 Liter
dyn. E-Modul	60 °C/10 % r. F.	36 P		
Druckfestigkeit	"b" 3)	270 W	54 W	
dyn. E-Modul	60 °C; -10 °C/ 10 % r. F.; 95 % r. F.	36 P		
Druckfestigkeit	"d"	270 W	54 W	
dyn. E-Modul	-10 °C/95 % r. F.	36 P		
Biegezugfestigkeit	"h" 20 °C/65 % r. F.	270 P	54 W	
Druckfestigkeit 2)		270 W		
dyn. E-Modul		36 P		
dyn./stat. E-Modul		270 P		
Kriechen/ Schwinden		36 P		3 W

1) gelagert vom 2. bis 7. Tag unter Wasser, danach bis zum 28. Tag im Klima 20/65 (DIN 1048 /14/).

2) einschließlich einer Serie von 54 Würfeln für Unterwasserlagerung

3) im wöchentlichen Wechsel

Bild 2

Anzahl der Probekörper, Beanspruchung im Klima bis zu 3 Jahren und der sich anschließenden Untersuchungen von Betoneigenschaften

Beton angerechnet. Ein w/z-Wert von 0,65 in Verbindung mit der hohen Dosierung von 10 % Zusatzstoff stellte die obere Grenze dar, bei der die z. T. sehr dünnflüssigen Betone gerade noch verarbeitbar waren. Bei gleichem Wasseranspruch ließen sich mit w/z-Werten von 0,50 und 0,65 durch Veränderung des Zementleimgehaltes Festigkeitsklassen von B 35 bzw. B 25 erreichen (s. Bild 33). Da vier verschiedene Kunststoffdispersionen (vgl. 3.1) in das Versuchsprogramm übernommen wurden, ergaben sich einschließlich zweier zusatzfreier Vergleichsbetone 18 unterschiedliche Mischungen (Bild 1). Bild 2 gibt die Anzahl der Probekörper je Klima beanspruchung (vgl. 4.3.3.1) und Art der Festigkeitsprüfung wieder. Die insgesamt 1245 Würfel mit Kantenlängen von jeweils 15 cm und die 666 Prismen 10 cm x 10 cm x 30 cm machten insgesamt 45 Betoniertage erforderlich. Dafür standen Zwangsmischer mit 150 und 50 l Inhalt zur Verfügung.

4.2 Frischbetonkennwerte

4.2.1 Konsistenz

An 50 Mischungen mit und ohne Kunststoffzusatz wurden Verdichtungsmaß nach W a l z und Ausbreitmaß /8/ bestimmt. Die Messungen erfolgten unmittelbar und in Abänderung der

üblichen Verfahren 30 Minuten nach Beendigung des Mischvorganges. Das gestattete eine Beurteilung der Verarbeitbarkeit kunststoffmodifizierter Betone untereinander und auch im Hinblick auf die Vergleichsbetone. Darüberhinaus läßt dies Änderungen erkennen, die bereits innerhalb des kurzen Zeitraumes durch den Zusatzstoff bewirkt werden. Vor jeder Messung wurde der Beton noch einmal durchmischt, um mögliches falsches Erstarren des Zementes zu verhindern. Ein eventuell entstandenes Kristallgerüst aus Stuckgips wird durch diese mechanische Beanspruchung zerstört.

Von weiterem Einfluß auf die Konsistenz sind z. B. Temperaturen und auch der Rührvorgang, die aber hier konstant blieben. Diesen Faktoren konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter nachgegangen werden.

4.2.2 Porenvolumen

Mit dem Luftgehaltsprüfer /8/ ist der Luftporengehalt der Frischbetone sofort und abweichend von der Norm, 30 Minuten nach Beendigung des Mischvorganges ermittelt worden. Dabei wurde der Beton ebenso wie bei den Konsistenzmessungen vor jedem Versuch durchmischt. Den Untersuchungen mit dem Druckausgleichsverfahren sind errechnete Werte gegenübergestellt worden. Der Begriff der "rechnerisch ermittelten Dichte" des Betons ist hier nützlich, da der gesamte Porenraum theoretisch erfaßt werden kann. Mit diesem werden dann Frisch- und Festbetonrohndichte verglichen. Der Kennwert ergibt sich aus der Stoffraumrechnung. Grundlage sind die Dichtewerte für Zement, Betonzuschlag und Zusatzstoff, wobei deren Massen auf das Volumen bezogen werden, daß sich theoretisch bei vollständiger Verdichtung ohne Eigen- und Haufwerksporen ergeben würde. Da hier nur Frischbeton vorliegt, ist auch nur die Dichte des Zementes und nicht die des Zementsteins berücksichtigt worden. Aus der somit entstehenden Dichte kann ein ebenfalls "rechnerisch ermittelter Luftporengehalt" nun wie folgt angegeben werden:

$$p_{Fbr} = \left(1 - \frac{\rho_{Fb}}{\rho_{Fbr}} \right) \times 100 \quad (\text{Vol.-%}) \quad (1)$$

p_{Fbr} = rechnerisch ermittelter Luftporengehalt von Frischbeton (Vol.-%)

ρ_{Fbr} = rechnerisch ermittelte Dichte des Frischbetons ohne Luftporen (kg/dm^3), vgl. Bild 1

ρ_{Fb} = Frischbetonrohddichte (kg/dm^3)

4.3 Festbetonkennwerte

4.3.1 Porengrößenverteilung

Das Porengefüge, das besonders durch den Kunststoff beeinflusst wird, läßt sich sowohl durch Art als auch Verteilung der Poren kennzeichnen. Die Messung erfolgte mit einem Quecksilberdruckporosimeter bis 2000 bar, das Porenradien zwischen 4 und $5,5 \cdot 10^4$ nm erfaßte. Kleinere Gelporen sowie entstandene Räume durch Adsorptionswasser unter 4 nm, die etwa 28 % des gesamten Porenraumes bei vollständiger Hydratation ausmachen, können durch das Penetrationsverfahren nicht charakterisiert werden. Das Verfahren und seine Aussagekraft sind u. a. in /21, 43, 49/ beschrieben. Bei den eigenen Untersuchungen wurde 2 Jahre alter Beton zunächst eine Woche im Vakuumschrank bei 50 °C getrocknet. Anschließend an die Evakuierung der Proben im Porosimeter gelangte Quecksilber durch Erhöhung des Luftdruckes stufenweise in die Poren, wobei Volumen- und Druckänderungen ständig ermittelt wurden. Für den Bereich höherer Drücke diente eine hydraulisch gesteuerte Apparatur mit automatischer Registrierung der genannten Kennwerte. Die Porenradien errechneten sich aus dem bekannten Kapillaritätsgesetz, wonach die Haftspannungen an der Kapillarwandung mit dem Randwinkel, den das Quecksilber mit dieser bildet, im Gleichgewicht stehen. Der Quotient aus der doppelten Oberflächenspannung zum Druck multipliziert mit dem Cosinus des Randwinkels ergibt dann den Radius. Für den Randwinkel wurde der Wert 141,3 ° und für die Oberflächenspannung 0,48 N/m eingesetzt. Damit reduziert sich die Beziehung zu:

$$r = \frac{7492}{p} \quad (\text{nm})$$

4.3.2. Rasterelektronenmikroskopie

Aus zwei Jahre alten Betonprismen (vgl. 4.3.3.3) sind nach statistischen Gesichtspunkten verteilt Proben über den Querschnitt entnommen worden. Für eine Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop - Cambridge Stereoscan Mark II A - diente eine mit Gold bedampfte Probe als Anode. Sie wurde mit einer Suspension von kolloidalem Silber auf den Präparateträger geklebt, um einen Kontakt mit dem leitenden Überzug herzustellen. Da die organischen Zusatzstoffe im Vakuum des Probenraumes des Gerätes gasen und somit die Elektronenoptik nach einiger Zeit verschmutzten, waren die Untersuchungen bei hohen Kunststoffgehalten besonders zeitaufwendig. Die Art des Gerätes gestattet lediglich, die gleichzeitig auftretenden Röntgenquanten der chemischen Elemente von der Ordnungszahl 9 an aufwärts zu analysieren. Da jedoch die Elemente, aus denen der Kunststoffe besteht, darunter liegen, war die sonst übliche energiedispersive Analysentechnik nicht darauf anzuwenden. Die Kunststoffe wurden aber dadurch identifiziert, daß sich mit dem Elektronenstrahl Löcher in sie hineinbrennen ließen. Verweilt man längere Zeit an einem Punkte, so können Temperaturen von mehreren 100 Graden auftreten, bei denen die Kristalle noch keinen Schaden nehmen, aber die Kunststoffe schmelzen.

4.3.3 Mechanisches Verhalten

4.3.3.1 Klimabeanspruchung

Temperatur und Feuchtigkeit wirken sich auf Betoneigenschaften aus und beeinflussen Festigkeit und elastische Konstanten. Besonders empfindlich reagieren die kunststoffmodifizierte Betone, zumal Zement und der organische Zusatzstoff unterschiedliches Verhalten im Erhärtungsmechanismus zeigen. Während zur Bildung von Hydratationsprodukten ein Mindestangebot von Wasser vorhanden sein muß, kann die Dispersion im Beton nur durch Wasserentzug wirksam werden. Je nach Feuchtigkeitsangebot beeinflußt dies die Austrocknung der Kunststoffpartikel und führt zu unterschiedlicher Porosität und Hydratation. Extreme, aber der Baupraxis entsprechende Klimabelastungen verändern nun die Langzeit-Reaktionen der jeweiligen Komponenten und machen dadurch ihren Einfluß auf

Betoneigenschaften erkennbar. In Kammern blieben die Proben vom 28. Tag bis zu einem Alter von 3 Jahren im Klima, das in Bild 12 angegeben ist. Zuvor lagerten sie aber einheitlich bis zum 7. Tag unter Wasser und danach im Normalklima 20/65. Dies war zunächst erforderlich, um bei gleicher Vorbehandlung gemeinsame Ausgangsbedingungen zu erhalten und darüber hinaus durch etwa zu frühe Beanspruchung die Proben nicht zu zerstören.

Erhöhte Temperatur (60 °C) und geringe relative Luftfeuchtigkeit (10 %) (Lagerung "a") trocknen den Beton "scharf" aus. Dem Kunststoff wird dadurch die Möglichkeit gegeben, infolge Wasserentzug schneller als unter sonst normalen Bedingungen zusammenzukleben und so zur Festigkeitsentwicklung beizutragen. Infolge der Gefahr des Schwindens ist deswegen auch das Entstehen von Spannungen im Gefüge zu erwarten. Die sogenannte Nacherhärtung durch Bildung von Hydratationsprodukten über den 28. Tag hinaus ist jedoch eingeschränkt. Unter Berücksichtigung der Gefügeschädigung von herkömmlichen Betonen bei erhöhter Temperatur läßt sich der Einfluß des Kunststoffes abschätzen. Tiefere Temperatur (-10 °C) und hohe relative Luftfeuchtigkeit (95 %) (Lagerung "d") schränken einen Festigkeitszuwachs über den 28. Tag hinaus ein, denn die Reaktionsfähigkeit des Zementes ist vermindert und die Austrocknung des Kunststoffes wird weitgehend vermieden. Das Wasser verdunstet nur sehr schwer und der Feuchtigkeitszustand scheint von diesem Tag ab gleichsam eingefroren.

Eine weitere Beanspruchung wurde zwischen diesen beiden Extremfällen gewählt. Proben lagerten in einem wöchentlich wechselnden Klima von hoher Temperatur und geringer relativer Luftfeuchte sowie tieferer Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit (60 °C, -10 °C/10 %, 95 %) (Lagerung "b"). Dieses bewirkt einen sich ständig verändernden, jedoch geringer werdenden Feuchtigkeitsanteil der Betone.

Bei einer dreijährigen Lagerung unter Wasser (Lagerung "w") sollen Festigkeitsminderungen infolge möglicher Hydrolyse des Kunststoffes erkennbar werden. Bei optimalen Bedingungen zur Bildung von Hydratationsprodukten dürfte aber die weite-

re Verklebung der Kunststoffpartikel derart eingeschränkt sein, daß somit Änderungen im Verhalten auf den Einfluß des Kunststoffes zurückgeführt werden können. Zum Vergleich zu den genannten Lagerungsarten wurde weiterhin ein "Normal-klima" bei Raumtemperatur und mittlerer relativer Luftfeuchtigkeit (20/65) gewählt (Lagerung "h"). Hier entwickeln sich sowohl Zement als auch Kunststoffpartikel unter üblichen Bedingungen.

Auf Frost-Tau-Wechsel wurde verzichtet, und sollen wegen des komplexen Gebietes einer speziellen Arbeit vorbehalten bleiben.

4.3.3.2 Druck- und Biegezugfestigkeit

Für die Untersuchungen nach 28, 35, 180, 365, 730 und 1100 Tagen wurden insgesamt 1245 Würfel der Kantenlänge 15 cm benötigt (Bild 2). Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils einem Würfelsatz (3 Stück). Aus dem Klimaraum kommend glichen sich die Proben stets vor der Prüfung der Raumtemperatur an, was einer weiteren Beanspruchung entspricht. So ist aber ein unmittelbarer Vergleich der unterschiedlich gelagerten Proben miteinander möglich. Die Verweilzeit von etwa 24 Stunden bewirkte eine Feuchtigkeitsaufnahme von weniger als 0,01 % bei den getrockneten und von 0,05 % bei den frostgelagerten Proben - bezogen auf die jeweilige Trockenmasse -. Der Feuchtigkeitsaustausch beschränkte sich allerdings nur auf den oberflächennahen Bereich, der Kern der Betone blieb dabei unbeeinflusst.

Die Biegezugfestigkeit wurde an 270 Prismen der Abmessungen 10 cm x 10 cm x 30 cm und nur nach Lagerung im Klima 20/65 ermittelt (Bild 2). Für die 5 Altersstufen (28, 180, 365, 730 und 1100 Tage), standen jeweils 54 Proben zur Verfügung. Einschließlich zweier zusatzfreier Betone ergaben sich hier - wie auch bei der Prüfung auf Druckfestigkeit - bei Variation von Dispersion, Zusatzstoffgehalt und Wasser-Zement-Wert 18 unterschiedliche Mischungen (Bild 1).

4.3.3.3 Elastizitätsmodul

Zur Beurteilung des elastischen Verhaltens und der Veränderungen von Betoneigenschaften infolge Hydratationsfortschritt bzw. Beimischung organischer Zusätze dienen statischer und dynamischer Elastizitätsmodul als Kriterien. Um verwertbare Verformungen für den statischen E-Modul zu erhalten, muß i. a. eine Spannung von etwa 30 % der zu erwartenden Druckfestigkeit aufgebracht werden. Durch periodische Laständerungen werden bleibende Verformungen eliminiert. Beim Beton besteht wegen bleibender Volumenänderung kein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Verformung. Die Spannungs-Dehnungslinie verläuft gekrümmt. Der statische E-Modul wird als Sehnenmodul /8/, dem Verhältnis zwischen einer Druckspannungsdifferenz und der ihr zugehörigen sogenannten elastischen Verformung definiert. Bereits kurze Standzeiten der Last bewirken ein Kriechen des Betons. Eine scharfe Trennungslinie zwischen elastischer und plastischer Verformung ist schwer zu ziehen.

Anders verhält es sich mit der dynamischen Methode. Bei dem zu Schwingungen angeregten Material treten nur sehr geringe mechanische Belastungen innerhalb des Gefüges auf, so daß der elastische Bereich der Spannungs-Dehnungslinie nicht verlassen wird. Obwohl der dynamische E-Modul nur ein einzelner Zahlenwert ist, kann er als Tangente im Ursprung an die Spannungs-Dehnungslinie aufgefaßt werden, $P_{oh} l / 40 /$ (Bild 45). Er ist auch deshalb größer als der Sehnenmodul, der sich aus der statischen Methode ergibt. Während dieser weitgehend vom Kornaufbau und Größtkorn des Zuschlages abhängt, wird der dynamische vorwiegend von den Eigenschaften des Zementsteins, seiner Dichtigkeit /31/ und wie in 5.3.4.2.1 nachgewiesen, auch vom Feuchtigkeitsgehalt im Beton wesentlich beeinflusst. Um nun die unter den verschiedenen Versuchsbedingungen gelagerten Probekörper durch statische Belastung nicht vorzuschädigen - dasselbe Material sollte im Verlaufe von 3 Jahren wiederholt untersucht werden - wurde der dynamischen Methode der Vorzug gegeben. Ebenso lassen sich, wie in 5.3.4.2.2 gezeigt wird, durch Festigkeit und statischen E-Modul nicht erkennbare Schäden des Mikrogefüges durch diesen Wert darstellen.

In einem weiteren Programm diente darüber hinaus der statische Elastizitätsmodul der Überprüfung, in welchem Maße die dynamische Methode bei Verwendung der organischen Zusätze mit bisher aus der Literatur bekannten Beziehungen übereinstimmt. An eigens dafür hergestellten Proben, die bei 20/65 lagerten (Bild 2), wurden die elastischen Kennwerte an jeweils einem Prisma nacheinander mit Hilfe beider Verfahren ermittelt.

Während zur Bestimmung des statischen E-Moduls auf eine Vorschrift /8/ zurückgegriffen werden konnte, mußte für die dynamische Methode die Versuchsanordnung teilweise selbst entwickelt werden. Die Prismen hingen freischwingend an Federn und waren an den Knotenpunkten stehender Wellen aufgehängt. Geber- und Empfängersystem belasteten die Probe nur durch ihr Eigengewicht und wurden in der Längsachse in jeweils 1 cm Entfernung vom äußeren Rand auf die Oberseite aufgesetzt (Bild 47). Die derartige Lage von "driver" und "pick-up" gestatten es, Transversalschwingungen einzuleiten und zu empfangen. Aus der Umgebung stammende Störgeräusche, die der Empfänger besonders bei den auftretenden Frequenzen registrierte hat, ließen sich durch eine schallabsorbierende Haube fernhalten, die über das gesamte Meßsystem gestülpt worden ist. Im Resonanzfall bilden sich stehende Wellen aus, sofern die Länge des Betonprobekörpers ein ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge beträgt. Es interferieren Wellen gleicher Amplitude und Länge, die an der Kontaktfläche Beton/Luft reflektiert werden. Durch Überlagerung dieser mit der ankommenden entsteht dann die stehende Welle. Die Erregerfrequenz ist dann gleich der Eigenfrequenz. Gleichzeitig hat die Amplitude der angeregten Schwingung ihr Maximum. Unter den verschiedenen Möglichkeiten wurde die Schwingungsanregung in Transversalrichtung gewählt. Der dynamische Elastizitätsmodul errechnet sich aus der Biegeschwingung, deren Knoten und Bäuche im Prisma hier gut identifiziert werden konnten. Von den physikalischen Gesetzmäßigkeiten her eignen sich besonders gut Probekörper, deren Querschnittsabmessungen klein gegenüber der Längsausdehnung sind (Stäbe). Mindestens sollten nach Pohl /40/ die Proben jedoch eine 4-6fache Länge der maximalen Querdimension aufweisen. Werden wie im vorliegenden Fall jedoch kurze

Prismen verwendet, stimmt die Theorie nicht mit dem Experiment überein. Dies macht die Einführung eines Korrekturgliedes notwendig, in welchem Einflüsse von Schub- und Trägheitsmomenten berücksichtigt werden müssen (T i m o s h e n k o /55/).

Die Eigenfrequenz f_{tr} der Biegeschwingung ist im transversalen Fall durch die Gleichung 2 gegeben:

$$f_{tr} = \frac{1}{\sqrt{c}} \cdot \frac{a_k^2 \cdot i_z}{2\pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E_D}{\rho_{Rb}}} \quad (\text{Hz}) \quad (2)$$

es bedeuten:

- a_k Parameter für Grund- und Oberschwingung
- i_z Trägheitsradius bezogen auf die Achse, die senkrecht zur Schwingungsebene steht
- c Korrekturfaktor, der den Einfluß von Schub- und Trägheitsmomenten berücksichtigt
- l Länge der Probe
- E_D dynamischer Elastizitätsmodul
- ρ_{Rb} Trockenrohddichte des Betons

G o e n s /17/ leitete aus der von T i m o s h e n k o /55/ aufgestellten Differentialgleichung die für die Eigenfrequenzen benötigten Korrekturfaktoren für Transversalschwingungen her. Diese wurden von M a r t i n ě k /33, 34/ verbessert und wie folgt angegeben (Gl. 3):

$$c = \frac{1}{2} + \frac{a_k^2 \cdot i_z^2}{2 \cdot l^2} \left(1 + \frac{E_D}{\alpha G} \right) + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{a_k^2 \cdot i_z^2}{2 \cdot l^2} \left(1 + \frac{E_D}{\alpha G} \right) + \frac{a_k^4 \cdot i_z^4}{4 \cdot l^4} \left(1 - \frac{E_D}{\alpha G} \right)^2} \quad (3)$$

wobei: α eine Konstante ist, die nach T i m o -
s h e n k o annähernd von der ungleichmäßi-
gen Verteilung der Schubspannungen über den
Probenquerschnitt abhängt und lediglich von
den äußeren Abmessungen bestimmt wird. Die-
ser Wert ist nicht streng berechenbar und
wird von M a r t i n ě k und C r e -
m e r / H e c k l /6/ mit 5/6 für ein
Rechteck angegeben.

i_z Trägheitsradius
 E_D Elastizitätsmodul
 G Gleitmodul
 a_k Parameter für Grund-/Oberschwingung
 1. Oberschwingung $a_1 = 7,8532$
 2. Oberschwingung $a_2 = 10,996$.

Elastizitäts- und Gleitmodul stehen durch die Poisson'sche
Zahl μ miteinander in Beziehung,

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (4)$$

so daß sich der Ausdruck E/G in Gleichung 3 durch die Quer-
kontraktion ersetzen ließ, die gleichzeitig mit dem stati-
schen E-Modul ermittelt wurde.

Für eigene Untersuchungen an Prismen der Abmessungen
10 cm x 10 cm x 30 cm stand der "Elastomat" der Firma
D r . F ö r s t e r zur Verfügung /11/. Das Gerät ist für
Probekörper geeignet, deren Eigenfrequenzen im Bereich von
560 Hz bis 100 kHz liegen. Es ist mit piezoelektrischen
Erreger- und Empfängersystemen ("driver" und "pick-up") aus-
gerüstet. Gemessen wurde mit "Fremderregung". Ein Hochfre-
quenzgenerator erzeugt Schwingungen mit konstanter Schwin-
gungsweite, die Frequenz ist beliebig zu variieren. Über den
Leistungsverstärker regt dann das Gebersystem den Probekör-
per zu mechanischen Schwingungen an. Der Empfänger wandelt
die mechanischen Schwingungen in elektrische um (Bild 46).

4.3.3.4 Kriechen

Das Kriechen und Schwinden hängt vor allem von der Umgebungsfeuchtigkeit, dem Wasser- und Zementgehalt, den äußeren Abmessungen der Proben, der Größe sowie der Art und Dauer der Belastung und nicht zuletzt vom Erhärungsgrad des Betons ab. Daher sind diese Parameter konstant gehalten worden. Weiterhin sind polymere Bestandteile sowie Stabilisatoren und Emulgatoren von Einfluß. Diese Additive absorbieren die Feuchtigkeit und verzögern die Wasserabgabe (M a n g a t et. al /30/). Je feuchter der Zementstein bei Belastungsbeginn ist, und je schneller er austrocknen kann, desto größer ist das Kriechmaß. Über den Beobachtungszeitraum von 3 Jahren wurde im Klima 20/65, das Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Druckbeanspruchung untersucht. Die Probekörper (Bild 2) lagerten zuvor einen Tag nach dem Entformen bis zum 7. Tage unter Wasser und blieben bis zum 28. Tag im Klimaraum, um gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Die vier Wochen dauernde Lagerung bis zum Belastungsbeginn ließen dem Zement und dem Kunststoff genügend Zeit zum Verfestigen. Bei der Untersuchung betrug die aufzubringende konstante Spannung 30 % der Bruchlast. Meßuhren zeigten an zwei gegenüberliegenden Längsseiten der Prismen die Gesamtverformungen an, aus denen man den Mittelwert berechnen konnte. Die Kriechverformung ϵ_K (Gl. 5) ließ sich dadurch ermitteln, daß von der Gesamtverformung $\text{tot}\epsilon$ das Schwinden ϵ_S und der elastische Anteil ϵ_{el} abgezogen wurde.

$$\epsilon_K = \text{tot } \epsilon - \epsilon_S - \epsilon_{el} \quad (^\circ/\text{oo}) \quad (5)$$

Infolge einer Zunahme des E-Moduls mit der Zeit wird jedoch die Gesamtverformung um einen Betrag $\Delta\epsilon_{el}$ kleiner. Bei einem Ausgangsalter der Betone von 28 Tagen ist dieser geringe Wert aber vernachlässigt worden. Der Abzug des Schwindmaßes stellt ebenfalls eine Vereinfachung dar, zumal die Belastung den Austrocknungsvorgang verändert und durch das Feuchtigkeitsgefälle Eigenspannungen über den Querschnitt auftreten, die zusätzlich von Einfluß sind. Die unbelastete Probe kann allein durch den Schwindvorgang kriechen.

Untersuchungen von K a w a n o /23/ haben ergeben, daß das "Drying Shrinkage" durch Zugabe von Kunststoffemulsionen

sogar kleinere Werte annehmen kann, als bei der Vergleichsprobe. Dies wird auf das Vorhandensein von oberflächenaktiven Stoffen und Entschäumern zurückgeführt, die den Beton dichter als die Vergleichsmischung machen. Auf den Betrag, der das Kriechen des unbelasteten kunststoffmodifizierten Betons gegenüber dem Ausgangsbeton verändert, ist nicht näher eingegangen worden.

Es ergab sich bei den eigenen Untersuchungen der elastische Anteil ϵ_{el} zu Belastungsbeginn durch die Spannungs-Dehnungsbeziehung im Zuge der Bestimmung des E-Moduls. Hierbei wurde auch die bleibende Verformung mitbestimmt. Im Normalbeton nimmt die Kriechgeschwindigkeit ständig ab und nähert sich einem asymptotischen Grenzwert. Voraussetzung ist, daß die aufgebrachten Spannungen unterhalb einer kritischen Belastung liegen (hier 30 %), bei der der Beton während einer Dauerbeanspruchung noch nicht zu Bruch geht. R o s s /44/ hat die dabei entstehenden Funktionen in eine Hyperbelgleichung (Gl. 6) gefaßt, deren Gültigkeit nun auch für die kunststoffmodifizierten Betone nachgewiesen werden soll.

$$\epsilon_K = \frac{t}{a + bt} \quad (0/\infty) \quad (6)$$

Hier ist ϵ_K die Kriechverformung und t die Zeit, a und b stellen Parameter der Hyperbel dar. Trägt man den Quotienten aus Zeit und Kriechverformung t/ϵ_K über die Zeit t auf, so ergibt sich für den Normalbeton eine Gerade mit der Steigung b und dem Abschnitt a auf der senkrechten Achse (t/ϵ_K).

4.4 Reaktion des Kunststoffes im Beton

Zur Extraktion und zur Untersuchung der Substanz mit Hilfe der Infrarotspektroskopie sind Betonproben unterschiedlichen Alters in einer Scheibenschwingmühle derart gemahlen worden, daß die Korngröße des Pulvers weniger als 65 μm betrug. Das Mehl wurde anschließend bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Der Zusatzstoff bestand aus verschiedenen Acrylsäureestern, wobei drei Jahre alter Beton 0,7 % Trockensubstanz Kunststoff bezogen auf die Gesamteinwaage und fünf Tage alter Beton 1,2 % aufwies. Methylenchlorid diente zunächst als Extraktionsmittel. Da sich offenbar zu wenig von

den organischen Anteilen herauslöste, wurde mit Methanol nachextrahiert. Nach Entfernen des Lösemittels im Vakuum und Aufbringen des Extraktes als kapillaren Film auf eine Kochsalzscheibe erfolgte die infrarotspektralanalytische Untersuchung.

5 Versuchsergebnisse

5.1 Frischbetoneigenschaften

5.1.1 Wärmeentwicklung im hydratisierenden Zement und Beton

Die Wirkungen der einzelnen Dispersionstypen haben sich nur unwesentlich voneinander unterschieden. Somit repräsentieren die in dem Bild 3 dargestellten Kurven die Mittelwerte aus den Ergebnissen mit allen Dispersionen. Die Pasten erwärmten sich unmittelbar nach ihrem Einsetzen in die Kalorimetergefäße. Ein relatives Maximum trat nach 20 Minuten besonders bei den Mischungen mit höherem Dispersionsanteil auf. Weniger Zusatzstoff bewirkte auch eine geringere Wärmeentwicklung, nach weiteren 3 bis 4 Stunden war ein Minimum zu verzeichnen. Die Nullproben erreichten ihren Höchstwert bei etwa 12 Stunden, die Temperatur sank dann schneller als bei den modifizierten Mischungen.

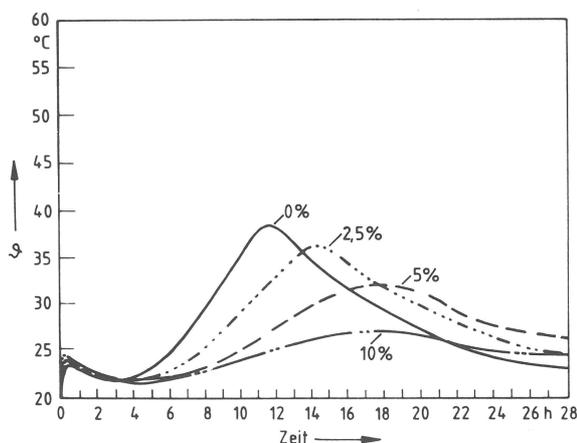


Bild 3
Temperaturverlauf ϑ von Zementpasten mit 0; 2,5; 5 und 10 % Dispersionsgehalt während der Hydratation

Mit der Zugabe von Polyacrylsäureestern verschob sich das Maximum bis zu 7 Stunden und sank dabei auf 75 % des Wertes der Vergleichsmischung. Der erste Temperaturanstieg (Bild 3) kennzeichnet die beginnende Hydratation. Hier wird C_3A in Gegenwart von Gips und/oder Anhydrit zu Ettringit umgesetzt. Je höher der Kunststoffzusatz, desto stärker ist die Reaktion und damit die Wärmeentwicklung aus dem Entstehen dieses Hydratationsproduktes. Das wird auf eine größere Benetzbarkeit der Zementpartikel durch den Zusatzstoff zurückgeführt /50/. Anschließendes Absinken ist auf den Verbrauch des spontan reagierenden C_3A und eine Umhüllung von dessen Partikeln mit Ettringit zu erklären. Das relative Minimum befindet sich bei etwa 3 Stunden.

C₃S, als Hauptfestigkeitsträger reagiert anfangs in geringer Menge zu CSH-Phasen unter Bildung von Calciumhydroxid. Dieses ist im Zementstein in größeren Kristallen vorhanden. Gegenüber einem C₃A Anteil von etwa 11 % wird der Gehalt von C₃S im Portlandzement mit etwa 60 % angegeben /64/, so daß diesen Phasen trotz einer geringeren Wärmeentwicklung wegen des vergleichsweise hohen Mengenanteils der Hauptpeak, der zweite Temperaturanstieg, aber zuzuordnen ist. Eigene frühere Untersuchungen beweisen, daß eine Verzögerung der Erhärtung mit steigendem Kunststoffgehalt auftritt (Bild 4), G i e r l o f f /16/. Dies läßt sich durch den Einschluß von Kunststoffpartikeln in das Gefüge erklären, wodurch ein weiteres Zusammenwachsen von Kristallen erschwert worden ist. Solche Störungen bewirken, daß über einen größeren Zeitraum mehr langfaserige Calciumsilicathydrate als sonst entstehen. Die Reaktion verläuft dann nicht mehr so heftig wie bei der Nullprobe, was auch durch das geringere Maximum und das längere Verweilen bei dieser Temperatur zum Ausdruck kommt.

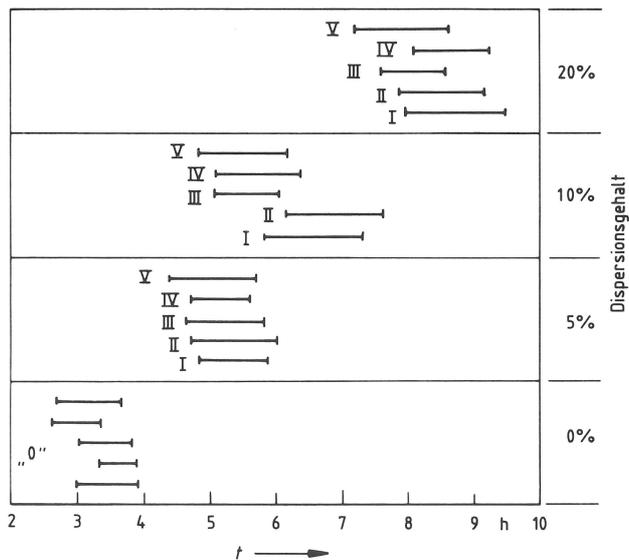


Bild 4
Erstarrungszeiten t von
Zementpasten mit 0; 5;
10 und 20 % Dispersions-
gehalt (Polyacrylsäure-
ester I - V)

Ebenso wie bei den Pasten wiesen die jeweiligen Zusatzstoffe im Beton bei Dosierungen von 5; 10 und 20 % keine signifikanten Unterschiede auf, so daß die Kurven in Bild 5 wieder als Mittelwerte aus allen Versuchen dargestellt werden können. Verglichen mit der Wärmeentwicklung in den Pasten ergeben sich hier absolut höhere Temperaturen, die aber aus dem größeren Zementanteil der Einwaage folgen. Entsprechend sind auch die Maxima um mehrere Stunden verschoben. Die im vorigen Abschnitt beschriebenen Ergebnisse können auch auf den

Beton übertragen werden. Während bei dem Versuch mit Zementleim ab etwa 5 % der Temperaturverlauf sich lediglich um die Höhe des Maximums unterscheidet, kann dies hier erst ab 10 % festgestellt werden. Auch tritt der Unterschied bei 5 % nicht so stark hervor. Vorstellungsgemäß haften jetzt auch Kunststoffpartikel an der Oberfläche des Zuschlages, und können somit nicht wie bei den Pasten voll zur Wirkung kommen. Eine höhere Zugabe von Dispersion zum Beton ist daher erforderlich, um vergleichbare Resultate zu erzielen.

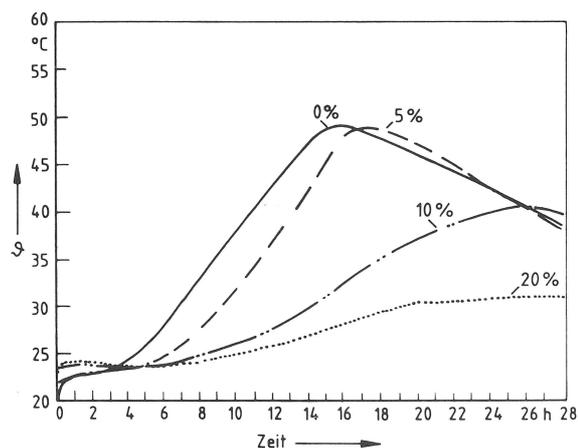


Bild 5
Temperaturverlauf ϑ von Betonen mit 0; 5; 10 und 20 % Dispersionsgehalt während der Hydratation

5.1.2 Konsistenz

Im frischen Zustand sowie im Stadium des Ansteifens wurde die Konsistenz des Betons über Ausbreitmaß a und Verdichtungsmaß v beurteilt. Die Vergleichsbetone waren - unabhängig von ihrem w/z -Wert - einem K 2 zuzuordnen. Das Verdichtungsmaß betrug bei ihnen im Mittel 1,17; das Ausbreitmaß sofort nach dem Mischen 34 cm. Dieses verringerte sich jedoch nach 30 Minuten auf 31 cm. Vom Betonzusatzstoff "VM" einmal abgesehen, zeigen die Dispersionen "AE", "SA" und "VA" hinsichtlich des Verdichtungsmaßes vergleichbare Werte. Bei einem Zusatzstoffgehalt von 5 % betragen sie im Mittel 1,06 und bei 10 % 1,04 (Bilder 6 und 7). Hier macht sich eine verflüssigende Wirkung bei höherer Dosierung bemerkbar. Im Falle des Zusatzstoffes "VM" sind Differenzen zwischen unterschiedlichen Dosierungen nicht erkennbar, das Verdichtungsmaß von 1,02 liegt eben noch an der Grenze des Verfahrens. Nach der herkömmlichen Betontechnologie entspricht das dem Bereich K 3. Bildet man den Kehrwert $1/v$ so lassen sich

Bezeichnung	Verdichtungs- maß v	Ausbreitmaß a (cm)		
		unmittelbar nach der Herstellung	30 Minuten	
OS 050 00	1,16	34	31	
OS 065 00	1,17	33	30	
AE	050 05	1,07	46	43
	050 10	1,04	54	57
	065 05	1,06	48	44
	065 10	1,06	55	52
SA	050 05	1,06	47	41
	050 10	1,02	54	47
	065 05	1,05	47	49
	065 05	1,04	57	50
VA	050 05	1,06	43	37
	050 10	1,03	50	46
	065 05	1,08	44	40
	065 10	1,07	45	42
VM	050 05	1,02	56	49
	050 10	1,02	68	59
	065 05	1,02	55	52
	065 10	1,03	63	59

Bild 6
Verdichtungsmaß und Ausbreitmaß von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt

Bezeichnung	Verdichtungsmaß v	Ausbreitmaß a (cm)		
		unmittelbar nach der Herstellung	30 Minuten	
OS	1,17	34	31	
AE 5 %	1,06 ± 0,01	46 ± 2	42 ± 4	
SA 10 %	1,04 ± 0,02	53 ± 4	49 ± 5	
VM	5 %	1,02	56	51
	10 %	1,02	66	59

Bild 7
Verdichtungsmaß und Ausbreitmaß von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt (Mittelwerte aus Bild 6)

Festbetonmengen bei praktisch vollständiger Verdichtung aus einem Raumteil lose geschütteten Frischbetons für die Vergleichsmischungen von etwa 86 % und für die modifizierten von etwa 96 % errechnen. Hinsichtlich der Ausbreitmaße, ergeben sich jedoch andere Zuordnungen für die Konsistenz. Ausgenommen sei wiederum der Betonzusatzstoff "VM". Die anderen Dispersionen weisen zusammengefaßt in einer Menge von 5 % unmittelbar nach der Mischzeit 46 cm und nach 30 Minuten 42 cm, und bei einer Dosierung von 10 % entspre-

chend 53 cm bzw. 49 cm auf. (Bild 8). Die Mischungen mit 5 % sind einem weichen K 3 zuzuordnen, während diejenigen mit 10 % einen Übergang vom K 3 zum Fließbeton bilden. Die Betone mit der Dispersion "VM" verhalten sich auch noch nach 30 Minuten wie Fließbeton.

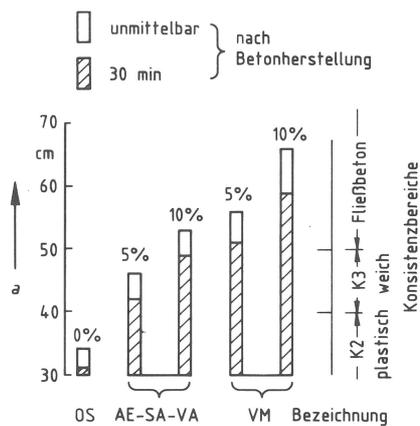


Bild 8
 Ausbreitmaß a von Betonen der Bezeichnungen OS, AE, SA, VA, VM mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt unmittelbar sowie 30 Minuten nach der Betonherstellung

5.1.3 Luftporengehalt

Der Luftporengehalt (p) ist in Bild 9 unmittelbar sowie 30 Minuten nach dem Mischvorgang dargestellt. Die im Wasser-Zement-Wert unterschiedlichen Vergleichsbetone (0,50 und 0,65) zeigten nahezu einheitliche Ergebnisse. Auch trat nach 30 Minuten keine Veränderung auf. Große Unterschiede bewirkten jedoch die Zusatzstoffe. Allgemein führten hier geringe Zugabemengen von 5 % mehr Luftporen ein als solche von 10 %. Nach einer halben Stunde vergrößerte sich der Luftporengehalt. Während dieser bei den Proben mit 5 % Dispersionsanteil von etwa 4,5 auf 6 Vol.-% anstieg, nahm er bei den höher dosierten nur von etwa 2,5 auf 3 Vol.-% zu (Bilder 9 und 10). Da auch hier ein Einfluß des Wasser-Zement-Wertes nicht erkennbar war, konnten die im Betonierzeitraum von 1 Jahr erzielten Ergebnisse zusammengefaßt werden (Bild 11). Grundsätzlich ist dann festzustellen, daß sich der Luftporengehalt bei doppelter Dosierungsmenge sowohl unmittelbar als auch nach 30 Minuten um die Hälfte derjenigen Werte vermindert, die mit der geringeren Menge erzielt werden (hier von ca. 5 auf 2,5 bzw. 6 auf 3 Vol.-%). Vergleicht man die modifizierten mit den Nullbetonen, so liefert ein Dispersionsgehalt von 5 % einen erhöhten Luftporenanteil und einer von 10 % einen geringeren. Das wird auf den Einschluß von Kunststoffpartikeln zurückgeführt, wobei mehr Teilchen

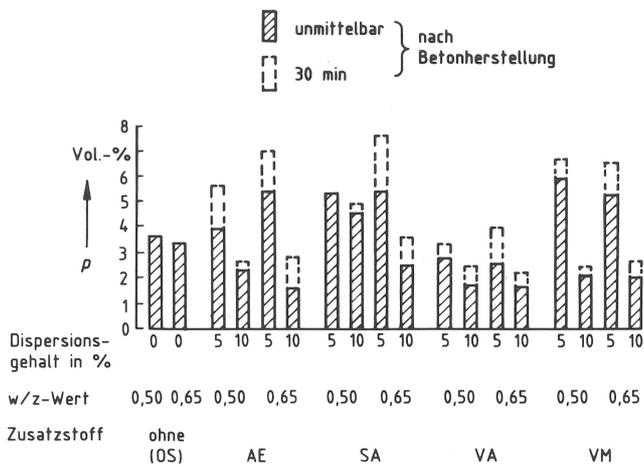


Bild 9

Luftporengehalt p in % bezogen auf das Volumen von Frischbeton mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt sowie unterschiedlichen Wasser-Zement-Werten w/z und Zusatzstoffen

Luftporengehalt $p^{1)}$ in Vol.-% von Frischbeton			
p_{Fbr}	ermittelt mit dem Luftgehaltsprüfer		Dispersionsgehalt %
	unmittelbar	nach 30 Minuten	
4,8	3,5	3,6	0
7,5	4,6	5,8	5
3,7	2,4	2,9	10

1) Der Variationskoeffizient liegt bei allen Werten zwischen 1,0 und 1,5 Vol.-%

Bild 10

Rechnerischer p_{Fbr} und ermittelter Luftporengehalt von frischen Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt. (Mittelwerte aus Mischungen, die im Verlauf eines Jahres hergestellt wurden)

durch die veränderte Konsistenz zu einer verbesserten Fließfähigkeit und Verdichtung des Betons führen (vgl. 5.1.2). Im Schauglas war auch zu beobachten, wie sich kleinere Luftporen zu größeren zusammenschlossen und in größerer Anzahl entweichen konnten. Bei geringerer Dosierung machte sich dieser Effekt nicht bemerkbar. Die zur Schaumbildung führenden Emulgatoren können infolge verminderter Verdichtungswilligkeit der frischen modifizierten Phase sogar einen größeren Luftporenanteil als der Nullbeton bewirken. Die steifere Konsistenz verhindert dann einen Zusammenschluß kleinerer Luftporen, die auch bei sorgfältiger Verdichtung nicht an die Oberfläche gelangen. Infolge von Adhäsion und Oberflä-

chenspannung haften diese dann an den Betonkomponenten. Bild 11 zeigt den Luftporengehalt, der sich aus der Berechnung des Stoffraumes für vollständig verdichteten Beton ohne Eigen- und Haufwerksporen herleiten läßt (vgl. Gl. 1). Es wird qualitativ das gleiche Ergebnis erzielt wie mit dem Luftgehaltsprüfer (Bild 11, linke Hälfte). Mit diesem werden allerdings im Mittel etwa 1,5 Vol.-% an Luftporen weder bei den Vergleichsbetonen noch bei den mit 10 % kunststoffmodifizierten erfaßt. Für die 5 %-Proben beträgt die Differenz sogar etwa 3 Vol.-%. Diese Verringerung um die Hälfte wird auch durch die Rechnung bestätigt. Signifikante Unterschiede zwischen den Betonen mit $w/z = 0,50$ und $0,65$ sind nicht erkennbar. Da sich dieser theoretisch ermittelte Kennwert und somit auch die darin enthaltene "rechnerische Dichte von Frischbeton" (Bild 1, letzte Zeile) gut auf die praktischen Verhältnisse übertragen lassen, sind sie und Ableitungen davon in den nachstehenden Untersuchungen verwendet worden.

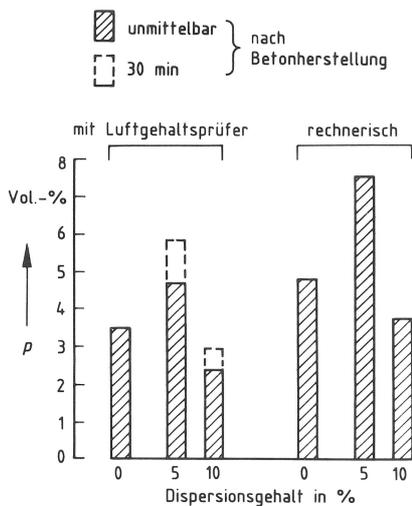


Bild 11
Rechnerischer und mit dem Luftgehaltsprüfer ermittelter Luftporengehalt p in % bezogen auf das Volumen von Frischbeton mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt. (Mittelwerte aus den gesamten Betonmischungen, die im Verlaufe eines Jahres hergestellt wurden)

5.2 Reaktion des Kunststoffes mit Calciumhydroxid in jungem und altem Beton

Die in 4.4 beschriebenen Proben wurden daraufhin untersucht, in welchem Maße Zusatzstoffe auf der Basis von Polyacrylsäureestern mit den Zementkomponenten reagieren und dabei im alkalischen Medium verseifen können. Zu diesem Zweck wurde der organische Anteil extrahiert und der Infrarotspektalanalyse unterworfen. Bei dem drei Jahre alten Beton ließ sich - wie aus dem Mittelwert einer Doppelbestimmung hervorgeht - trotz Verwendung polarer Lösemittel nur etwa ein

Drittel extrahieren. Das IR-Spektrum (Bild 12) weist aber gar keine Ester-Bande ($-\text{COOR}$) bei 1720 cm^{-1} auf. Dafür tritt das durch Verseifung entstandene Calciumacrylat ($-\text{COO}^-$) bei 1560 cm^{-1} deutlich hervor. Dieses Salz der organischen Säure fällt mit der Absorptionsbande von Natriumacrylat zusammen (Bild 13), das zur Identifizierung diente. Zur Überprüfung, ob solche Reaktionen bereits in jungen Betonen auftreten, wurde eine fünf Tage alte Probe untersucht. Auch hier ließ sich die organische Komponente nur bis zu einem Drittel der ursprünglichen Menge extrahieren. Die Absorptionsbande bei etwa 1720 cm^{-1} deutet auf Vorhandensein von restlichem Ester hin. Calciumacrylat war in diesem Falle nicht nachweisbar, da es offenbar durch andere Banden überlagert wird. Demnach findet also eine teilweise Verseifung der Ester in jungem und eine vollständige in altem Beton durch Hydrolyse im alkalischen Medium statt. Dabei kommt es zur Bildung von Calciumacrylaten, die aber besonders zur Festigkeit des Betons beitragen (vgl. 5.3.4.1).

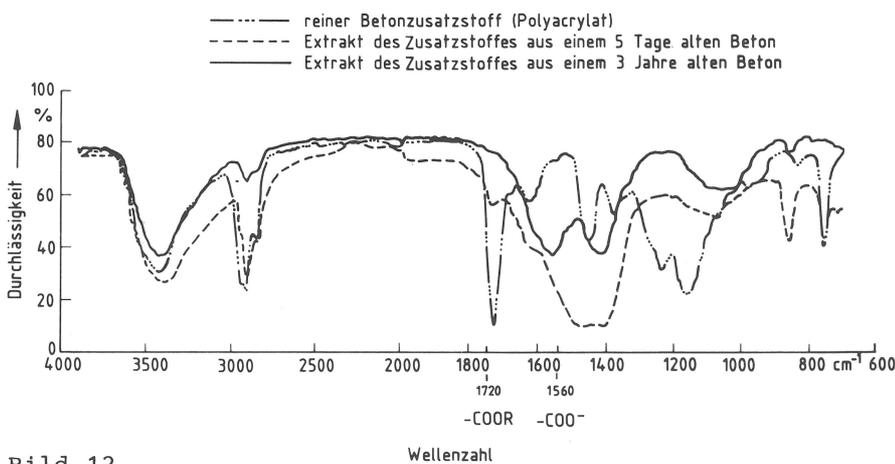


Bild 12

Infrarot-Spektren von reinem Betonzusatzstoff auf der Basis von Polyacrylat und von extrahiertem Betonzusatzstoff aus 5 Tage sowie 3 Jahre alten kunststoffmodifizierten Betonen

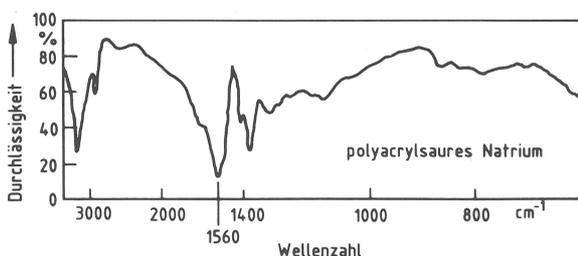


Bild 13

Infrarot-Spektrum von polyacrylsaurem Natrium $-\text{COO}^-$ Bande des Natriumacrylats (1560 cm^{-1})

5.3 Festbetoneigenschaften

5.3.1 Porenvolumen

Die Differenz aus der Dichte von Frischbeton und Festbeton nach der jeweiligen Klimalagerung (Bild 14) stellt die Änderung des Gehaltes an verdampfbarem Wasser dar. Bezieht man diesen Wert auf die rechnerisch ermittelte Dichte, die sich bei theoretisch vollständiger Verdichtung ergeben würde (Bild 1), kann daraus geschlossen werden, um welchen Betrag sich das Porenvolumen gegenüber dem rechnerisch ermittelten Luftporengehalt vergrößert bzw. verkleinert hat (Gl. 7).

$$p_R = \frac{\rho_{Fb} - \rho_{Rbt}}{\rho_{Fbr}} \times 100 \quad (\text{Vol.-%}) \quad (7)$$

ρ_{Fb} = Frischbetonrohddichte

ρ_{Rbt} = Rohddichte des Betons in unterschiedlichem Alter

ρ_{Fbr} = rechnerisch ermittelte Dichte von Frischbeton
(Bild 1)

Kurzbezeichnung	Temperatur °C	rel. Luftfeuchte %
"a"	60	10
"b" 1)	60/-10	10/95
"d"	-10	95
"h"	20	65
"w"	20	unter Wasser

1) im wöchentlichen Wechsel

Bild 14

Klimabeanspruchung (Kurzbezeichnung) der Betone

Bild 15 gibt den Porenraum als Mittelwert des Wasserverlustes aller für die Festigkeitsuntersuchungen hergestellter Betone wieder. Die Ergebnisse für den Frischbeton sind schraffiert, während die weißen und schwarzen Säulen die Wasserabgabe des Festbetons nach 28 Tagen und 3 Jahren zum Ausdruck bringen. Bis zum 28. Tag waren alle Proben gleich

vorbehandelt und lagerten im Klima 20/65. Bild 16 liefert die Resultate für Austrocknung und Wasseraufnahme jeweils als Mittelwert aus Bild 15. Während die vorangegangenen Darstellungen nur einen Zeitpunkt charakterisieren, zeigt Bild 17 die Feuchtigkeitsänderung infolge unterschiedlicher Klimalagerung im Verlaufe von 3 Jahren.

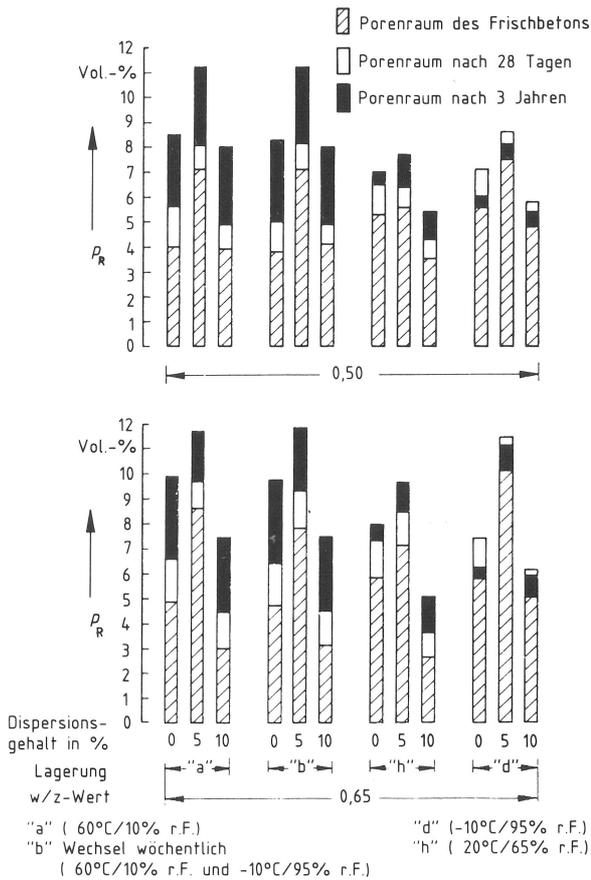


Bild 15
Veränderung des Porenraumes P_R von Beton mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ infolge unterschiedlicher Klimabeanspruchung "a", "b", "h", "d"

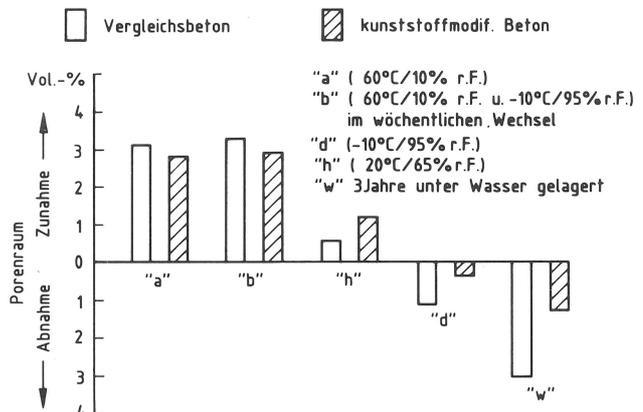


Bild 16
Änderung des Porenraumes von Vergleichsbeton und kunststoffmodifizierten Betonen nach dem 28. Tag infolge dreijähriger Klimabeanspruchung (Mittelwerte aus Bild 15) und Unterwasserlagerung

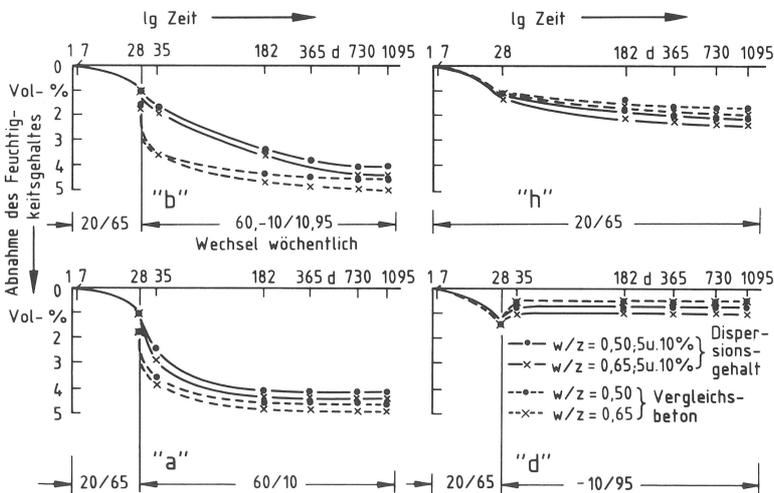


Bild 17
Feuchtigkeitsgehalt von Betonen infolge unterschiedlicher Klimalagerung:
 "a" (60 °C/10% r.F.)
 "b" Wechsel wöchentlich (60 °C/10% r.F. und -10 °C/95% r.F.)
 "d" (-10 °C/95%r.F.)
 "h" (20 °C/65% r.F.)

Die Vorlagerung der Vergleichsbetone bis zum 28. Tag im Klima 20/65 hatte unabhängig vom Wasser-Zement-Wert ca. 1,5 Vol.-% Feuchtigkeitsabgabe zur Folge. Die modifizierten Betone ließen keine signifikanten Unterschiede bei 5 und 10 % Dispersionsgehalt untereinander und im Hinblick auf die unterschiedlichen w/z-Werte erkennen. Die Feuchtigkeitsabnahme betrug hierbei etwa 1 Vol.-%. Die sich anschließende Lagerung von 3 Jahren im Klima "h" (20 °C/65 % r. F.) bewirkte eine geringe zusätzliche Feuchtigkeitsabnahme, die bei den Nullbetonen und bei den modifizierten zwischen etwa 0,5 und 1 Vol.-% lag. Wesentlich höhere Austrocknungsgrade verursachten dagegen die Lagerungsarten "a" (60 °C/10 % r. F.) und "b" (60 °C; -10 °C/10 % r. F.; 95 % r. F.). In allen Proben war der Porenraum um etwa 3 Vol.-% vergrößert, wobei jedoch die modifizierten Betone stets eine geringe Feuchtigkeitsabgabe erkennen ließen (Bild 17). Dies ist auf das feinere Kapillarsystem zurückzuführen, das ein Verdampfen von Wasser erschwert. Auch kommt hinzu, daß die Kunststoffpartikel Feuchtigkeit länger an sich binden und bei der Austrocknung schwerer abgeben. Nach etwa einem Jahr erreichen jedoch alle Betone eine dann konstant bleibende Ausgleichsfeuchtigkeit und zeigen unter vergleichbaren Lagerungsbedingungen nur sehr geringe Unterschiede. Die sich im Wasser-Zement-Wert unterscheidenden Betonsorten zeichnen sich dadurch aus, daß höhere w/z-Werte schneller als geringere zu einem gemeinsamen von der Lagerungsart abhängenden maximalen Austrocknungsgrad nach 3 Jahren führen. Dies gilt in der gleichen Weise für die kunststoffhaltigen Varianten. Wie ferner aus dem Bild 17 ersichtlich, vergrößerten die Proben während der Lagerung bei tieferer Temperatur "d" (-10 °C/ 95 % r. F.) nach dem 28. Tag wieder ihre Masse durch Feuchtigkeitsaufnahme und blieben vom 50. Tag an konstant. Da die nachfolgenden Untersuchungen bei Raumtemperatur durchgeführt werden mußten, nahm der Beton mit Erreichen der Umgebungstemperatur innerhalb von 24 Stunden maximal 1 Vol.-% an Wasser durch Kondensation wieder auf. Der Probenkern blieb allerdings davon unberührt. Dies hatte gegenüber dem Wert nach 28 Tagen eine geringfügige Erhöhung der Rohdichte zur Folge. Auch hier fand wieder eine zweite Klimabeanspruchung statt, die jedoch im Hinblick auf die Vergleichbarkeit untereinander in Kauf genommen wurde. In

ihrer Wasserabgabe unterschieden sich die Betone nur unwesentlich voneinander. Nach drei Jahren Wasserlagerung "w", die unmittelbar nach dem Ausschalen der Proben im Alter von 1 Tag begann, wiesen alle Betone eine höhere Rohdichte als Frischbeton auf (Bild 16). Die Vergleichsmischungen erreichten dadurch einen Feuchtigkeitszuwachs gegenüber dem Frischbeton von 3 Vol.-%, die modifizierten 1,3 Vol.-%. Hier sind die im Frischbeton während seiner Verarbeitung entstandenen und nicht durch den Verdichtungs Vorgang ausgetriebenen Luftporen bei der Langzeitlagerung erneut mit Wasser gefüllt worden. Das dichtere Gefüge des modifizierten Betons bewirkt daher auch eine geringere Wasseraufnahme. Diese Untersuchungen sind unmittelbar vor der Prüfung auf Druckfestigkeit durchgeführt worden. Da sich die dabei zerstörten Proben für darauffolgende Porositätsuntersuchungen nicht eigneten, wurden Prismen aus derselben Mischung verwendet (Bild 2). Deren Abmessungen betragen 10 cm x 10 cm x 30 cm. Sie waren vorher für die Bestimmung des dynamischen E-Moduls herangezogen worden und hatten drei Jahre lang im Klima 20/65 gelagert. An ihnen wurden Rohdichte, Reindichte, Porenraum des verdampfenden Wassers bei 105 °C und Gesamtporosität ermittelt (Bild 18). Die Differenz der Trockenrohichte zur "rechnerischen Dichte" ergab den Porenraum in Vol.-%. Die Bestimmung der Reindichte erfolgte nach DIN 52 102 /10/ mit dem Flüssigkeitspyknometer. Als Prüfliquidität diente Alkohol, um Restreaktionen mit teilweise unhydratisiertem Zement in dem fein gemahlten Beton zu vermeiden. Die weiter benötigten Proben (10 cm-Würfel) wurden aus den Prismen herausgeschnitten, der Rest im Backenbrecher vorzerkleinert und in einer Scheibenschwingmühle so aufgemahlen, daß auf dem Sieb mit 63 µm Maschenweite kein Rückstand verblieb. Aus dem Quotienten von Rohdichte und Reindichte errechnet sich die Gesamtporosität P (Bild 18).

Die Porosität W_v , nach Verdampfen von Wasser bei 105 °C, liegt zwischen 11 und 12 Vol.-%, wobei die Betone mit $w/z = 0,65$ geringfügig höhere Werte von ungefähr 1 % gegenüber den anderen aufweisen. Unterschiede, die etwa in der zugesetzten Dispersion begründet sind, lassen sich nicht erkennen. Die Nullbetone wiesen auch vergleichbare Werte auf (Bild 19). Die Rohdichte der kunststoffmodifizierten Betone lag im all-

Bezeichnung	$\rho_{Fbr}^{1)}$	$\rho_{Rb}^{2)}$	$w_v^{3)}$	$\rho_o^{4)}$	$p^{5)}$
OS 050 00	2,430	2,257	11,1	2,685	15,9
OS 065 00	2,419	2,224	11,8	2,685	17,2
AE 050 05	2,416	2,159	11,2	2,570	16,0
AE 050 10	2,402	2,245	11,2	2,530	11,3
AE 065 05	2,408	2,063	12,2	2,640	21,9
AE 065 10	2,398	2,160	11,9	2,595	16,8
SA 050 05	2,416	2,207	11,0	2,640	16,4
SA 050 10	2,401	2,253	11,0	2,560	12,0
SA 065 05	2,408	2,079	12,1	2,590	19,7
SA 065 10	2,397	2,187	11,2	2,555	14,4
VA 050 05	2,416	2,224	10,9	2,685	17,2
VA 050 10	2,402	2,279	10,7	2,600	12,4
VA 065 05	2,408	2,216	12,2	2,610	15,1
VA 065 10	2,398	2,267	12,0	2,570	11,8
VM 050 05	2,416	2,149	11,6	2,600	17,3
VM 050 10	2,401	2,266	11,1	2,580	12,2
VM 065 05	2,408	2,107	12,9	2,630	19,9
VM 065 10	2,396	2,192	12,5	2,620	16,3

- 1) rechnerische Dichte des Frischbetons ohne Luftporen in kg/dm^3 (siehe auch Bild 1)
- 2) Rohdichte des 3 Jahre alten Festbetons in kg/dm^3 , getrocknet bei 105°C
- 3) Volumen des verdampfenden Wassers in Vol.-%
- 4) Reindichte in kg/dm^3
- 5) Gesamtporosität in Vol.-%

Bild 18

Dichte und Porosität von Beton mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt

gemeinen unter der der Nullbetone. Diejenigen mit einer Dosierung von 10 % haben höhere Werte als die Mischungen mit 5 %. Das verhält sich bei den Reindichten umgekehrt, d. h., diejenigen mit hohem Kunststoffanteil zeigen eine geringere Dichte als die mit niedrigem Dispersionsgehalt. Wasser- und Zementgehalt sind für die untereinander vergleichbaren Betone konstant. Wird Kunststoff zugesetzt, muß sich der Zuschlag zwangsläufig um das Volumen des organischen Materials verringern. Die Masse des Betons reduziert sich dann um die verminderte Zuschlagmenge, zuzüglich des sie ersetzenden Feststoffanteils in der Dispersion. Bei einem Dispersionszusatz von 10 % (5 % Feststoff) entspräche das einer Verminderung der Dichte von etwa 1 %. Die Reindichte nimmt dann auch für die kunststoffmodifizierten Betone kleinere Werte an. Unter der Annahme gleichen Luftporengehaltes würde diese

Tendenz ebenso für die Rohdichte gelten. Da die Dispersionen jedoch gemäß ihrer Zugabemenge unterschiedlich Luftporen in den Beton einführen (siehe 5.1.3), verändert sich die Rohdichte entsprechend, d. h., die geringer dosierten Betone haben die niedrigsten Werte.

Bezeichnung	$\rho_{Fbr}^{1)}$	$\rho_{Rb}^{2)}$	$W_V^{3)}$	$\rho_O^{4)}$	$p^{5)}$	
OS 050 00	2,430	2,257	11,1	2,685	15,9	
OS 065 00	2,419	2,224	11,8	2,685	17,2	
kunststoffmodifizierter Beton	050 05	2,416	2,185±0,04	11,2±0,3	2,624±0,03	16,7 ±1,4
	050 10	2,402	2,261±0,06	11,0±0,2	2,568±0,04	12,0 ±2,9
	065 05	2,408	2,116±0,07	12,4±0,4	2,618±0,02	19,2 ±2,9
	065 10	2,397	2,202±0,05	11,9±0,5	2,585±0,03	14,8 ±2,3

- 1) rechnerische Dichte des Frischbetons ohne Luftporen in kg/dm³
- 2) Rohdichte des 3 Jahre alten Festbetons in kg/dm³, getrocknet bei 105 °C
- 3) Volumen des verdampfbaren Wassers in Vol.-%
- 4) Reindichte in kg/dm³
- 5) Gesamtporosität in Vol.-%

Bild 19

Dichte und Porosität von Beton mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt (Mittelwerte aus Bild 18)

Die Gesamtporosität (P) ist sowohl bei dem Nullbeton mit $w/z = 0,65$ als auch bei den entsprechenden kunststoffmodifizierten Varianten größer als bei denen mit geringem Wasser-Zement-Wert (0,50). Eine hohe Kunststoffdosierung beeinflusst die offene Porosität indem die Poren und Kapillaren durch feine Kunststoffpartikel gefüllt werden. Die mit 5 % Dispersion versehenen Betone weisen hingegen eine Gesamtporosität gleicher Größenordnung wie die Nullbetone auf.

5.3.2 Porengrößenverteilung

Nach vereinfachter Darstellung enthält der gemahlene Zement Klinkerteilchen bis zu etwa 100 μm Durchmesser. Die Hydratationsprodukte sind jedoch um den Faktor 1000 kleiner, liegen also im Bereich von Nanometern. Die Hohlräume zwischen dem Zementgel werden durch die sogenannten Gelporen eingenommen, an deren Stelle man sich ursprünglich Adsorptionswasser vorzustellen hat. Ein weiteres Intervall umfaßt die Kapillarporen, deren Durchmesser oberhalb von etwa 4 μm liegen. Während mit dem Alter des Zementsteins der Anteil an Gelporen zunimmt, indem immer mehr Hydratationsprodukte gebildet werden, verringern sich die Kapillarporen, da das ständig neu gebildete Gel in sie hineinwächst. Die Kunststoffpartikel, als frei bewegliche Teilchen im grünen Beton, werden nun von den Hydratationsprodukten in ihrer Lage so verändert, daß sie in die verbleibenden Räume ausweichen müssen. Daraus resultieren unregelmäßige Verteilung und Konzentration. In der Frischbetonphase liegen die Teilchen noch in disperser Form vor und sind durch das Wasser der Dispersion und das zusätzliche Anmachwasser voneinander und von den Betonkomponenten getrennt. Dies ist auch noch nach siebentägiger Wasserlagerung des Betons der Fall. Erst bei Luftlagerung wird dem Kunststoff Gelegenheit gegeben, durch Wasserentzug Filme zu bilden und zu Verbindungen, wie sie in 5.3.3 beschrieben sind, zusammenzukleben. Das geschieht jedoch zu einem Zeitpunkt, da der Zement schon zum größten Teil hydratisiert ist. Dabei ist der Feststoffanteil der Dispersion weitgehend in die ihm bleibenden Hohlräume verdrängt worden und beeinflußt dort im Bereich von etwa $<1 \mu\text{m}$ in erster Linie die Verteilung der Poren. Untersuchungen mit Hilfe des Quecksilber-Druckporosimeters haben gezeigt, daß die Porengrößenverteilung sich tatsächlich zum feinen Bereich hin verschiebt, während Änderungen im Makrobereich (hier Durchmesser $>$ etwa 6 μm) kaum stattfinden. Aus Bild 20 geht hervor, daß die Poren bis zu einem Durchmesser von 100 nm etwa 80 Vol.-% einnehmen, während es bei dem Vergleichsbeton (Bild 21) nur etwa 45 % sind. Im Falle des kunststoffmodifizierten Betons beträgt der Porenraum 15 % bis hin zur Grenze des Makrobereichs, die Vergleichsmischung enthält demgegenüber mit 45 % erheblich mehr.

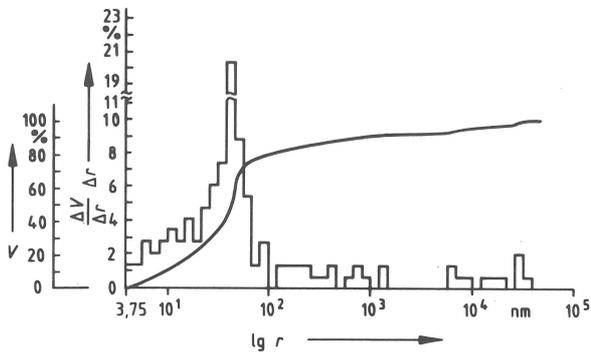


Bild 20
Summenhäufigkeit und Häufigkeit V bzw. $\Delta V \cdot \Delta r / \Delta r$ des Porenvolumens von Beton mit 10 % Dispersionsgehalt in Abhängigkeit vom Porenradius r

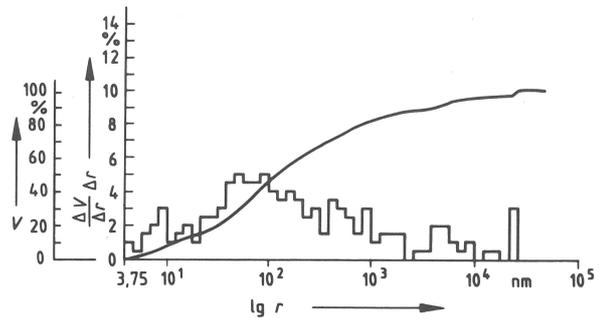


Bild 21
Summenhäufigkeit und Häufigkeit V bzw. $\Delta V \cdot \Delta r / \Delta r$ des Porenvolumens von Beton ohne Zusatzstoff in Abhängigkeit vom Porenradius r

5.3.3 Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop

Die Bilder 22 bis 32 zeigen Bruchflächen der unter 4.3.2 beschriebenen Proben. Da sich der Betonzuschlag in den Aufnahmen z. T. sehr schlecht von den Zementpartikeln unterscheiden ließ, wurde er durch Glasperlen mit 0,3 mm im Durchmesser ersetzt. Durch Gasen der organischen Bestandteile verschmutzte die Elektronenoptik derart, daß in kürzester Zeit unscharfe Bilder entstanden. Auch führte die Oberflächenerwärmung durch den Elektronenstrahl dazu, daß die Teilchen ihre ursprüngliche Form verloren, wenn sie diesem lange genug ausgesetzt waren. Dennoch ließen sie sich bis zu etwa 0,5 μm bei einer 10 000-fachen Vergrößerung gut darstellen. Eine Beobachtung im Größenbereich der Kunststoffteilchen war nicht bzw. nur sehr unvollständig möglich. Filmbildende Überzüge konnte man erkennen, sofern sie ausgedehnte Flächen einnahmen. Am häufigsten fanden sich stäbchenartige Verbindungen zu den Glasperlen hin, und zwischen den Hydratationsprodukten untereinander (Bilder 22 bis 26). Die Photographien 22 und 23 stellen diese mit beginnender Einschnürung an der Basis dar. Bild 25 zeigt ein ähnliches, aber abgerissenes Element, das vergleichbar mit dem eines gezogenen Stahlstabes ist. Die entsprechende Bruchstelle ist noch einmal in Bild 26 vergrößert zu sehen. Auf der Oberfläche befinden sich granulatartige Ansammlungen, die auf nicht zusammengeklebte Kunststoffteilchen in Originalgröße hindeuten. Eine ebensolche jedoch intakte Verbindung ist auch in Bild 24 zu erkennen. Der Kunststoff haftet hier zwischen Hydratationsprodukten und einer Glasperle

(untere linke Bildseite 24). Aus dem Überzug, aus dem übrigens auch Kristalle herausragen, formt sich dieses stäbchenartige Element und klebt mit einer Verbreiterung seiner Basis an der Perle. Weniger häufig zu sehen, weil auch schlechter identifizierbar, waren die Kunststofffilme. Die Bilder 24 (rechts oben) und 25 weisen diese Erscheinungsform auf. Von überdurchschnittlicher Länge (mehr als 100 μm) sind der fadenartige Kunststoff in Bild 27 und die Stäbchenform in Bild 28. Es läßt vermuten, daß diese sich als strangartige Verbindungen durch das Makroporensystem gezogen haben, da sie keine Einschnürungen aufweisen und somit offenbar ursprünglich nicht mit anderen Komponenten verbunden gewesen sind. Entsprechende Vergrößerungen des Stäbchens liefern die Bilder 29 bis 32. An dessen Enden befinden sich eben diese fadenförmigen und noch nicht abgerissenen Elemente des Bildes 27. In Bild 32 ist die Methode zur Identifizierung von Kunststoffen erkennbar. Hier ist durch Flächenanalyse (selected area) ein Rechteck in das organische Material eingebrannt worden. Dadurch hat sich die ursprüngliche Form in Bild 30 verändert. Aus den drei verschiedenen Erscheinungsformen kann geschlossen werden, daß der Kunststoff unterschiedliche Aufgaben in der Zement-Zuschlag-Matrix erfüllt. Die Einschnürungen der Stäbchen, die während des Brechens der Proben entstanden sind, deuten auf eine mittragende Funktion hin, bei der die Zusatzstoffe Zug- und Druckkräfte übertragen können. Die länglichen Formen, die lose auf den Bruchflächen lagen, sind vermutlich aus größeren Kapillaren und Hohlräumen herausgezogen worden. Sie füllen diese offenbar nur aus und stützen aber dadurch Schwachstellen des Gefüges ab. Filmartige Überzüge auf Hydratationsprodukten können darunter liegende Poren und Kapillaren abschließen, so daß es dort beispielsweise zu veränderten Dampfdruckverhältnissen und somit zu ungleichmäßiger Spannungsverteilung kommen kann. Solche "Versiegelungen" sowie die oben erwähnten Verbindungen sind nur zufällig und lokal gefunden worden, was auf die im Frühstadium des Betons noch frei beweglichen Kunststoffpartikeln zurückgeführt wird (vgl. 5.3.2). Dem Zustandekommen dieser Erscheinungsformen, ihrer Verteilung und Konzentration konnte hier jedoch nicht weiter nachgegangen werden und muß einer späteren Untersuchung vorbehalten bleiben.

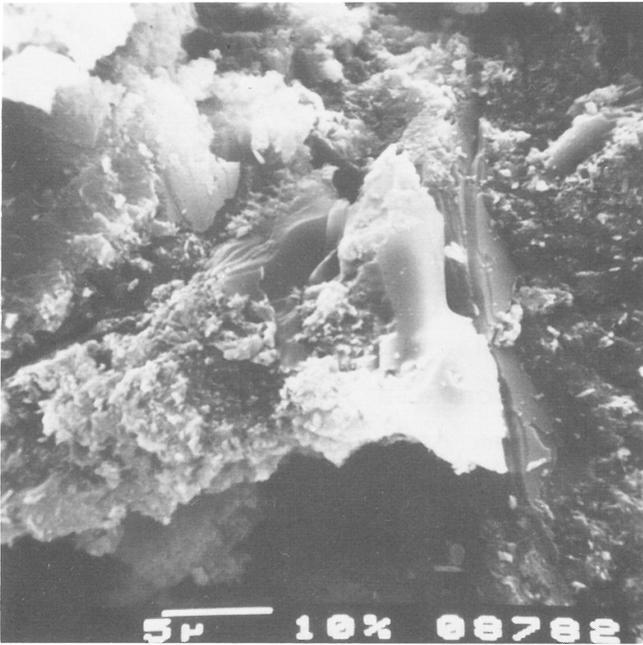


Bild 22
Eingeschnürtes stäbchen-
artiges Kunststoffteil an
Hydratationsprodukten der
Bruchfläche haftend

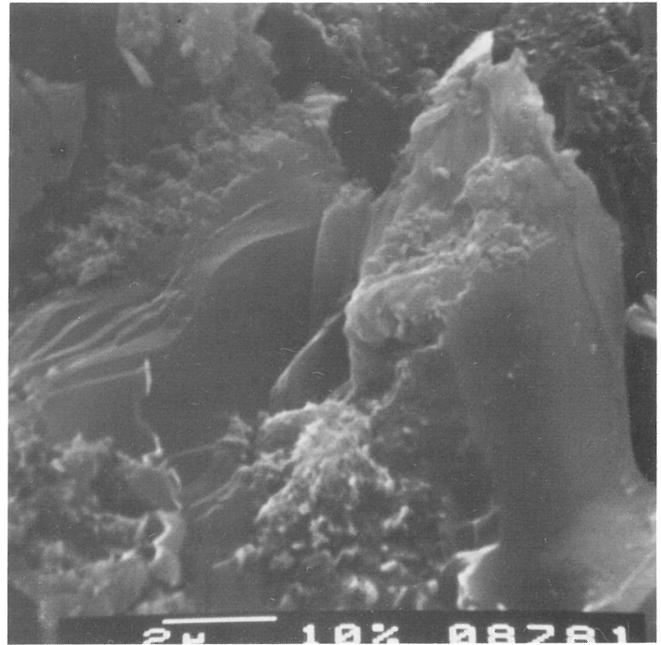


Bild 23
Ausschnittvergrößerung
der Einschnürung in
Bild 22

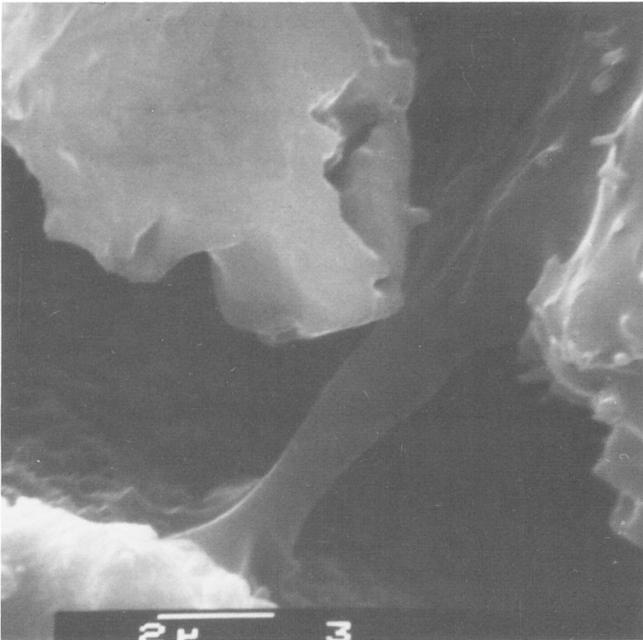


Bild 24
Kunststoffverbindung in-
nerhalb einer Pore aus
einem Film herauswachsend,
und zwar von den Hydrata-
tionsprodukten zur Glas-
perlenoberfläche hin

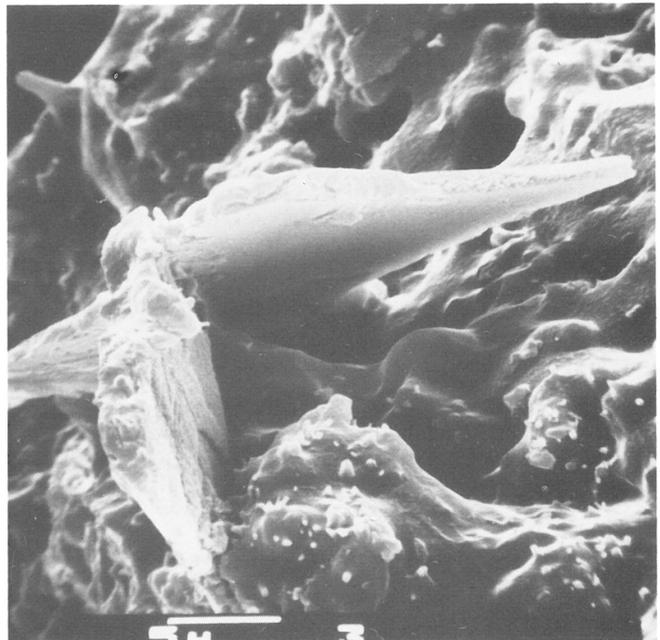


Bild 25
Plättchenartiges, abgeris-
senes und eingeschnürtes
Kunststoffelement. Hydra-
tationsprodukte auf der
Bruchfläche sind mit ei-
nem Film überzogen

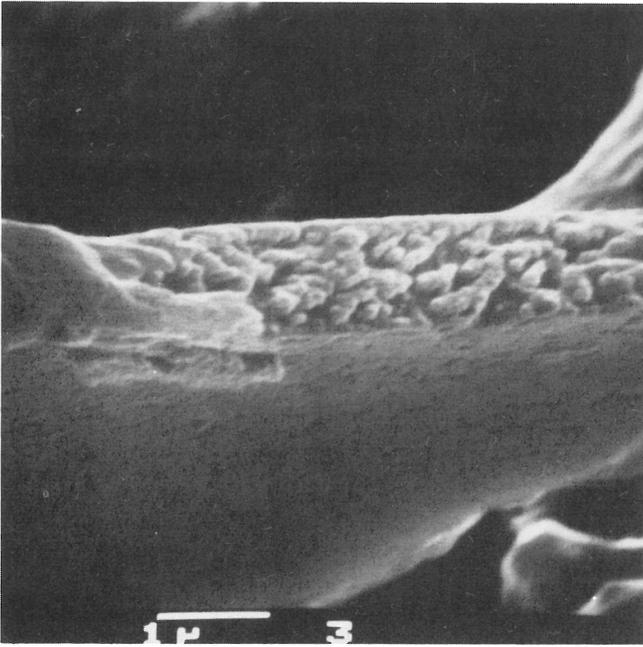


Bild 26
Vergrößerung des Elementes ("Granulat") in
Bild 25

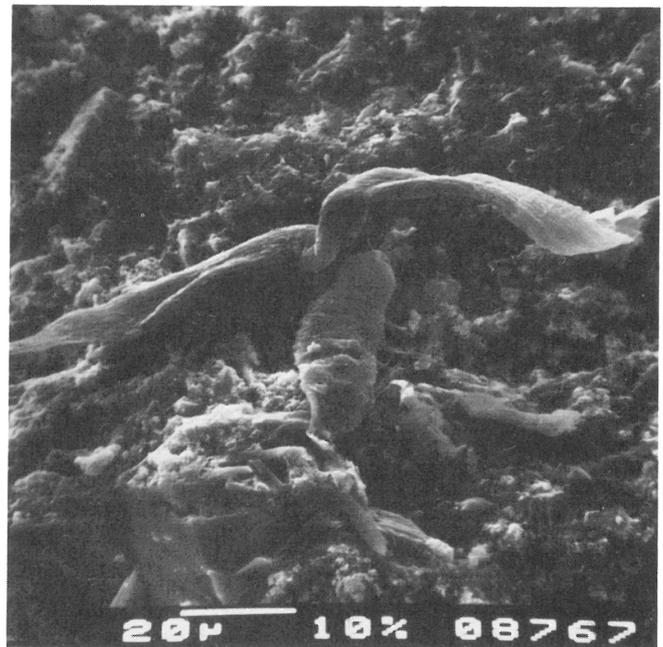


Bild 27
Fadenförmige Kunststoffteilchen, lose auf dem
Beton (Bruchfläche) liegend

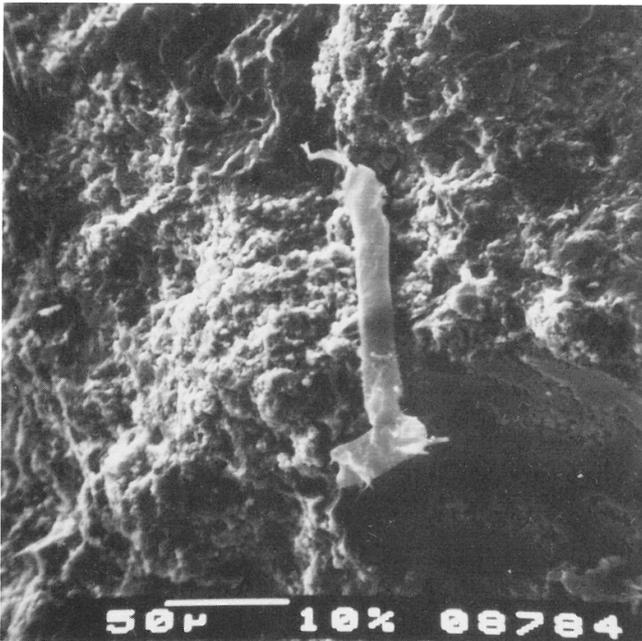


Bild 28
Herausgezogenes Kunststoffteilchen, lose auf dem
Beton (Bruchfläche) liegend. Glasperle im
Vordergrund

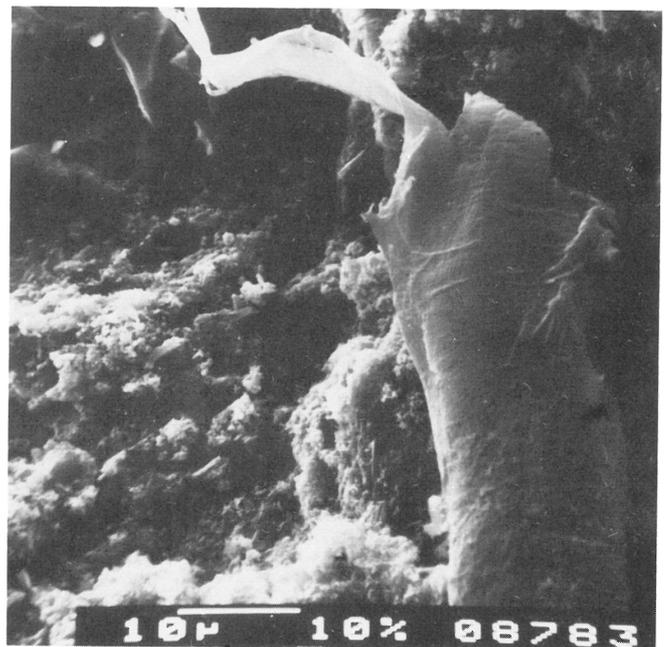


Bild 29
Vergrößerung des Teilchens
in Bild 28, oberer Abschnitt

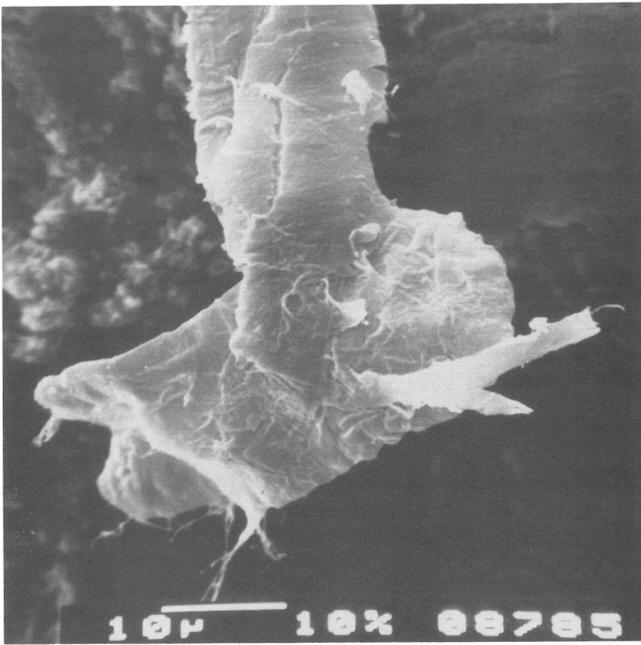


Bild 30
Vergrößerung des Teilchens
in Bild 28, unterer Ab-
schnitt

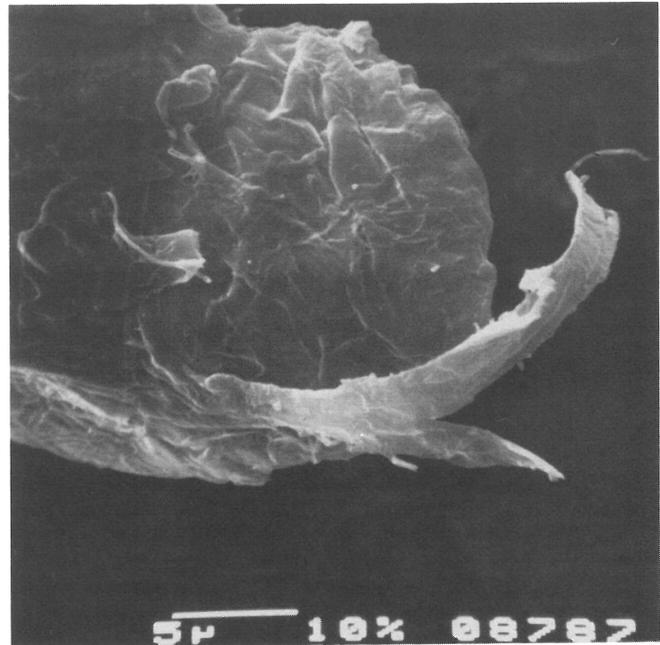


Bild 31
Ausschnittvergrößerung des
Teilchens in Bild 28, un-
terer Abschnitt, rechter
Teil

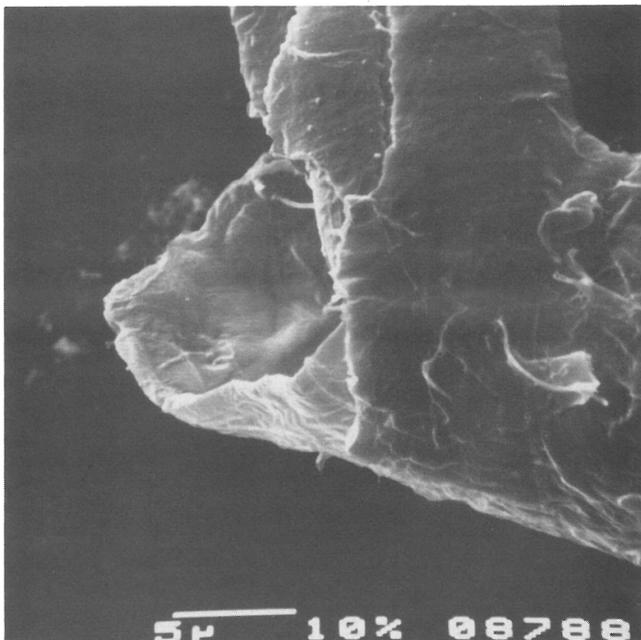


Bild 32
Ausschnittvergrößerung des
Teilchens in Bild 28, un-
terer Abschnitt, linker
Teil. Veränderung der
Form (vgl. Bild 30) durch
eingebrennten Elektronen-
strahl

5.3.4 Mechanisches Verhalten bei unterschiedlichen Klimabedingungen

5.3.4.1 Druck- und Biegezugfestigkeit

Die Festigkeitsuntersuchungen des Abschnittes 4.3.3.2 sind nach den unter 4.3.3.1 beschriebenen Klimabeanspruchungen durchgeführt worden (Bilder 2 und 14). Die gewählten Beton-
sorten und die sich daraus ergebenden Festigkeitsklassen wer-

den in 4.1 aufgeführt. Zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit des verwendeten Bindemittels (Portlandzement) dienten 61 Einzelproben, deren 2- und 28-Tage-Werte Aufschluß über mögliche Schwankungen der Druckfestigkeit während des gesamten Betonierzeitraumes geben sollten. Der kleinste Einzelwert betrug nach 2 Tagen 13,4, der größte 26,2 N/mm², sowie nach 28 Tagen entsprechend 45,7 bzw. 55,0. Die mittlere Druckfestigkeit lag bei 19,6 ± 3,0 und 50,3 ± 2,1 N/mm². Die Standardabweichung schließt somit unerwünschte Schwankungen aus. Der Zement genügte den Anforderungen der Norm /9/ und ließ sich der Festigkeitsklasse 35 F zuordnen. Die damit hergestellten kunststoffmodifizierten Betone höherer Dosierung entsprachen ungeachtet ihrer Festigkeitsklasse den 28-Tage-Werten der Vergleichsmischungen, während die mit geringerem Anteil versehenen etwa 10 % darunter lagen (Bild 33). Allgemein erhöhten sich die Werte um so mehr, je kleiner sie nach 28 Tagen und je größer die Wasser-Zement-Faktoren ausfielen. Das zeigt auch der Vergleichsbeton mit einem w/z von 0,65 nach der Klimalagerung 20/65 ("h"). Dies kann unter Heranziehung der Feststellungen von W a l z /59/ dadurch erklärt werden, daß durch ein geringes Verhältnis von Wasser zu Zement, wegen der dünnen Wasserschichten zwischen den Teilchen, ein unmittelbares Ineinanderwachsen von Hydratationsprodukten begünstigt wird. Daraus resultiert die hohe Anfangsfestigkeit. In Betonen mit höherem w/z-Wert und demnach dickeren Wasserschichten füllen zunächst die Hydrate den Raum um die ursprünglichen Zementkörner aus, bevor sie mit einander verfilzen können. Erst wenn ein erheblicher Teil des Zementes reagiert hat, kommt es zu einem merklichen Festigkeitsanstieg. Es wachsen größere Calciumhydroxidkristalle in das anfänglich aus feinen Calciumsilicat- und Calciumaluminathydraten bestehende Gerüst hinein. Wird Kunststoff zugesetzt, beeinflusst das früh gebildete

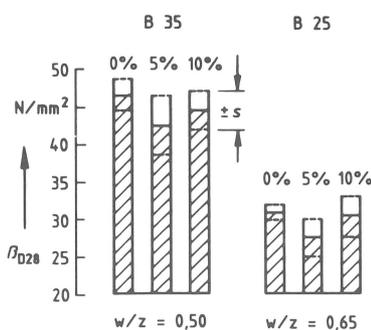


Bild 33
Druckfestigkeiten β_{D28} und Standardabweichung s nach 28 Tagen von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/65$

Calciumacrylat die Festigkeit, indem eine größere Dosierungsmenge gegenüber einer geringeren und dem Vergleichsbeton eine Zunahme des mechanischen Kennwertes bewirkt. Polymere Bestandteile werden von den Kristallen in übriggebliebene und neu entstandene Hohlräume geschoben, bilden dort je nach den örtlichen Gegebenheiten und Konzentrationen Filme und stäbchenartige Verbindungen oder füllen nur Poren und Kapillaren aus, die unter sonst gleichen Verhältnissen aber ohne Kunststoffzusatz offen geblieben wären. Dadurch entsteht ein dichteres Gefüge, die Gesamtporosität wird geringer (vgl. 5.3.1). Trocknet der Beton aus, so trägt der Kunststoff entsprechend seiner Erscheinungsform zur Festigkeitsbildung bei (3.3.3.1.2). Außerdem wird der Beton durch die polymeren Bestandteile länger als üblich feucht gehalten, und es können in größerem Maße lange faserförmige Calciumsilicathydrate entstehen. Erhöht sich aber der Anteil an diesen Kristallen, und sinkt dabei die Menge an Calciumhydroxid, so steigt auch die Festigkeit /60/. Diese wird allerdings wieder durch einen zu niedrigen Dispersionsgehalt gemindert. Die Grenze liegt bei etwa 5 %. Im Vergleich zum höher dosierten und zum Nullbeton wird eine geringere Rohdichte erzielt (vgl. Bild 19) die ihrerseits wieder auf vermehrte Luftporeneinführung zurückzuführen ist (vgl. 5.1.3). Werden nun die Betone einer Klimabeanspruchung unterworfen, so läßt sich der Einfluß des Zusatzstoffes auf mechanische Eigenschaften wie folgt beschreiben:

Im Normalklima "h" (20 °C/ 65 % r. F.) weisen alle Betone den für diese Lagerungsart typischen Festigkeitsverlauf mit Beginn des 28. Tages auf (Bild 34). Mischungen mit der höheren Dosierung liegen oberhalb der Vergleichsbetone, die mit einer geringeren darunter. Die relative Festigkeitsentwicklung der beiden Nullmischungen zeigt in Bild 35, daß mit höherem Wasser-Zement-Wert allgemein auch ein größerer Festigkeitszuwachs erreicht wird. Insgesamt erfahren alle kunststoffmodifizierten Betone schon nach etwa einem Jahr eine Steigerung um 20 bis 30 %. Diese Beträge bleiben dann bis zum Ende der Untersuchung konstant. Gleichzeitig mit den Proben für das Klima 20/65 (Bild 2) wurden auch solche für die Unterwasserlagerung "w" hergestellt. Bild 36 gibt die Ergebnisse im Vergleich zur Klimalagerung "h" nach drei Jahren wieder. Gegenüber den 28-Tage-Werten führt die Was-

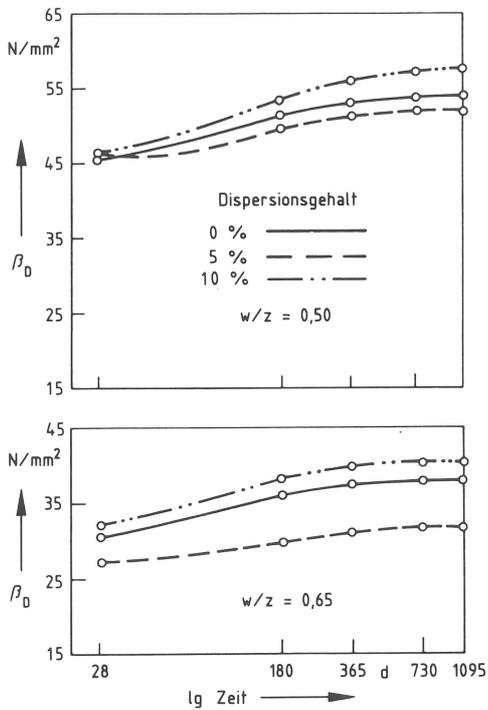


Bild 34
Druckfestigkeitsverlauf β_D von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.)

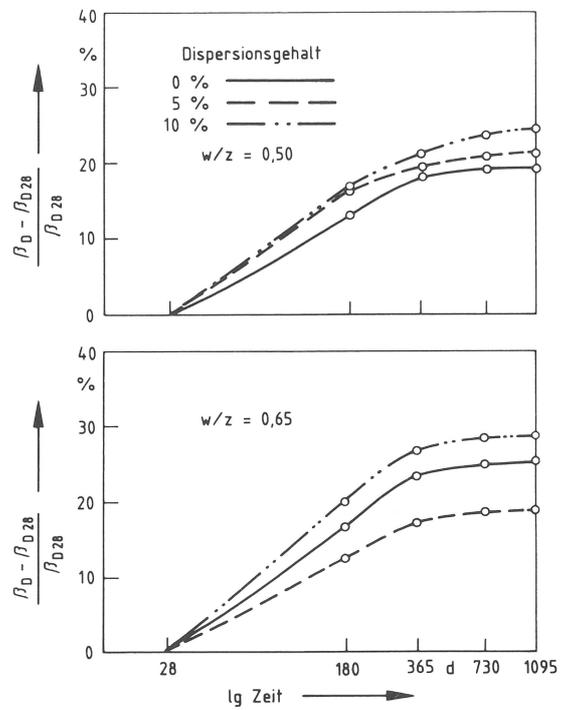


Bild 35
Änderung der Druckfestigkeit ($\beta_D - \beta_{D28}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{D28}

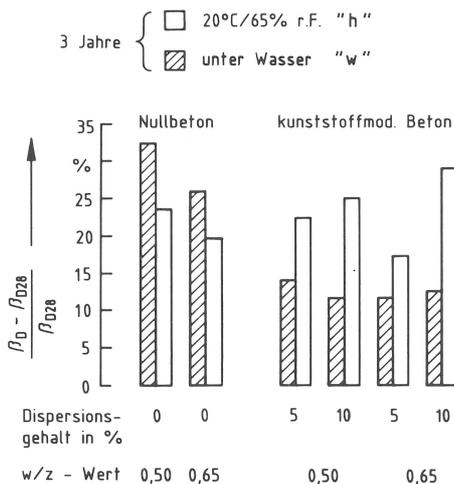


Bild 36
Änderung der Druckfestigkeit ($\beta_D - \beta_{D28}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach dreijähriger Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r.F.) und Wasserlagerung "w" bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{D28}

serlagerung allgemein zur Festigkeitssteigerung. Bei den Nullbetonen sind es um 30, bei den modifizierten etwa 13 %. Verglichen mit den luftgelagerten Proben steigt die Festigkeit bei den Vergleichsmischungen um 10 %, fällt aber bei den Kunststoffvarianten um eben diesen Betrag ab. Es war kein Einfluß der Dispersionsmenge auf diese Minderung festzustellen. Infolge Wasseraufnahme liegt der Kunststoff noch in disperser Form vor. Nach Literaturangaben /12/ werden in-

folgedessen Gleitebenen zwischen den Kristallen gebildet, die die Festigkeit mindern. Außerdem entstehen aber mehr Hydrate. Die vorgenannten Ergebnisse lassen sich durch diese Mechanismen erklären, die im Hinblick auf die Festigkeit gegenläufig sind. Die festigkeitsmindernde Wirkung der nicht ausgehärteten Dispersion kann gegenüber dem Vergleichsbeton nach Wasserlagerung mit 20 % und gegenüber dem kunststoffmodifizierten nach Klimalagerung mit etwa 10 % abgeschätzt werden. Dieser Unterschied wird praktisch jedoch noch größer, zumal beim Vergleich von trockenen zu Wasser gesättigten Proben die Festigkeit der letzteren i. a. ohnehin geringer ist.

Die Biegezugfestigkeit (Bilder 37 und 38) liefert vergleichbare Ergebnisse, wie bei der Druckfestigkeit nach der Lagerung "h" (Bilder 37 und 38). Mischungen mit höherer Dosierung verlaufen oberhalb der Vergleichsbetone, die mit geringerem Gehalt darunter. Allgemein zeigt auch Material

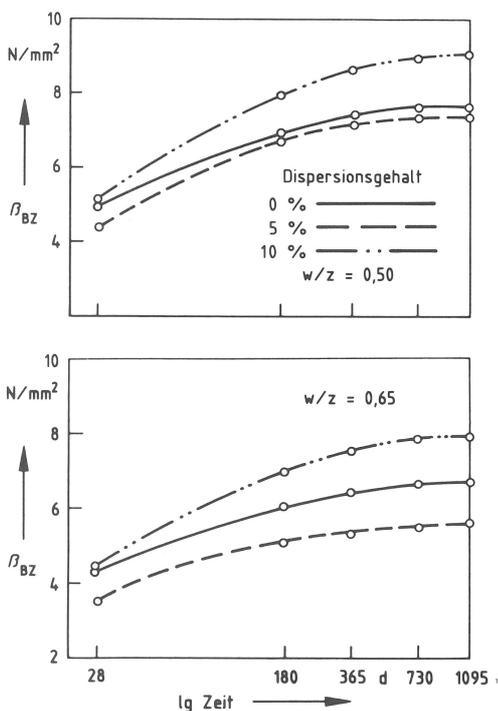


Bild 37
Biegezugfestigkeitsverlauf β_{BZ} von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.)

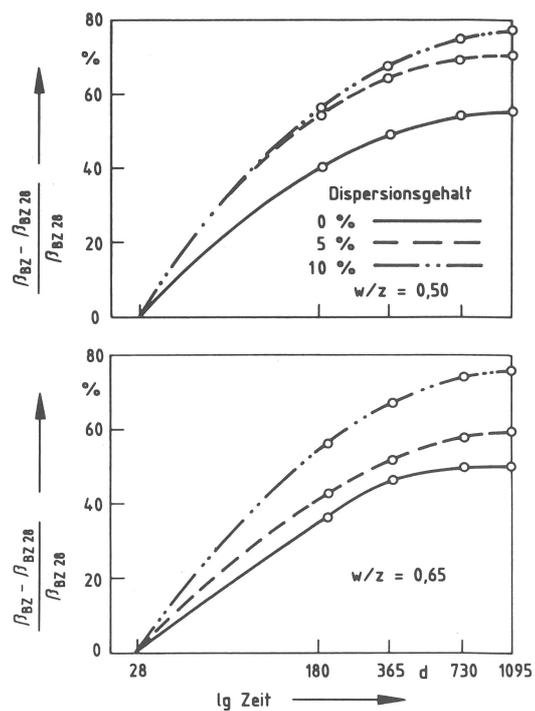


Bild 38
Änderung der Biegezugfestigkeit $(\beta_{BZ} - \beta_{BZ28}) / \beta_{BZ28}$ von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{BZ28}

mit niedrigem Wasser-Zement-Verhältnis größere Absolutwerte. Bezieht man jedoch die Änderung der Biegezugfestigkeit auf die der 28-Tage-Lagerung (Bild 38), so verschwindet dieser Einfluß. Nach einem Jahr ist kaum noch mit einem Ansteigen der Kurven zu rechnen. Die Nullbetone weisen nach Abschluß der Untersuchungen Steigerungen um 50 %, die modifizierten je nach Kunststoffgehalt etwa 60-75 % auf.

Werden Proben im Klima "d" (-10 °C/95 % r. F.) gelagert, so ergeben sich keine deutlichen Unterschiede im Festigkeitsverlauf zwischen den modifizierten und den Nullbetonen (Bild 39). Allgemein tritt aber ein Festigkeitsanstieg auf. Bei Frostdauerlagerung bewirkt hier ein höherer Wasser-Zement-Wert eine höhere Festigkeit als ein geringer. Im ersten Fall werden im Mittel etwa 30 % und im zweiten etwa 15 % mehr als nach 28 Tagen erreicht. Dies ist auch unabhängig von der Höhe des Kunststoffgehaltes (Bild 40). Infolge

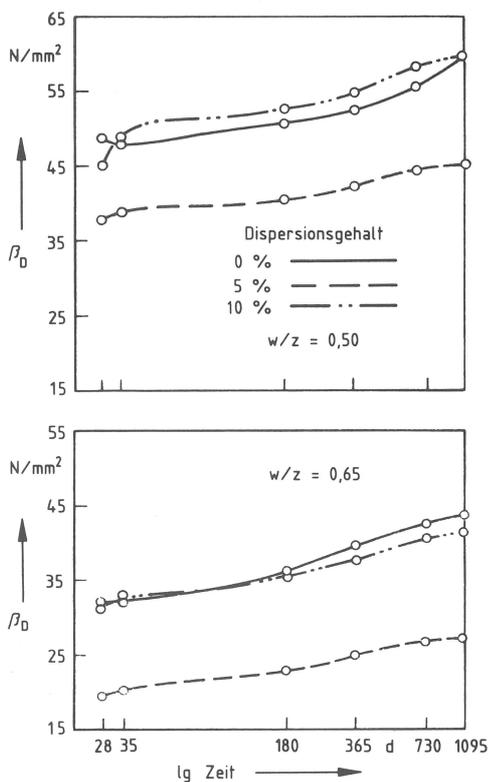


Bild 39
Druckfestigkeitsverlauf β_D von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "d" (-10 °C/95 % r. F.)

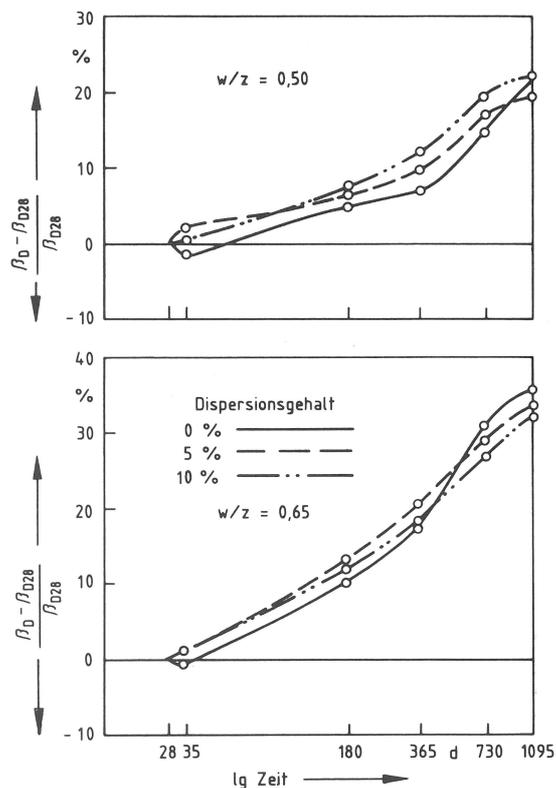


Bild 40
Änderung der Druckfestigkeit $(\beta_D - \beta_{D28}) / \beta_{D28}$ von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "d" (-10 °C/95 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{D28}

des auch nach mehreren Jahren noch hohen Wassergehaltes konnten die Dispersionen nicht - wie unter sonst normalen Bedingungen - aushärten und somit im Betongefüge wirksam werden. Infolge der langen Lagerungszeit und der günstigen Hydratationsbedingungen trotz niedriger Temperatur können nun Porenräume geschlossen werden, die zuvor infolge geringer Kunststoffzugabe entstanden sind (vgl. 5.3.1). Ein im Vergleich zur Lagerung 20/65 besseres Kristallwachstum führt hier offenbar zur Festigkeitssteigerung.

Der Festigkeitsverlauf nach erhöhter Temperatur (Klimabeanspruchung "a") und geringer relativer Luftfeuchtigkeit ist im Bild 41 dargestellt. Darin erzielen die mit 5 % modifizierten Betone weniger Festigkeit als die mit 10 %. Nach anfänglich leichtem Abfallen der Kurve vom 28. Tag an, d. h., nach einer Woche Klimalagerung, steigen die Werte

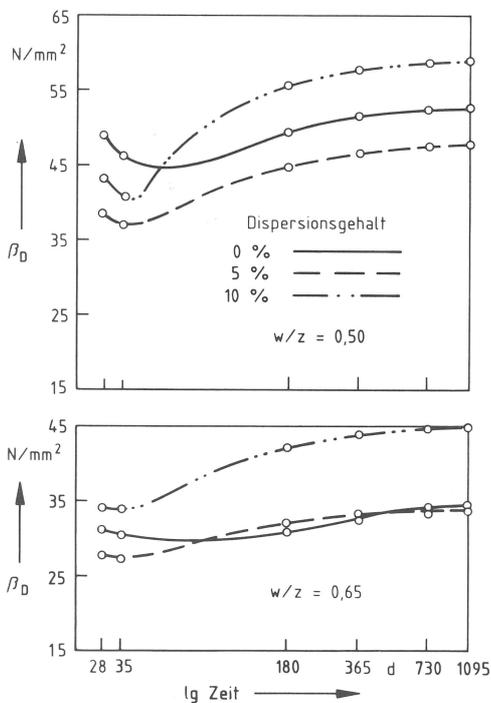


Bild 41
Druckfestigkeitsverlauf β_D von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "a" (60 °C/10 % r. F.)

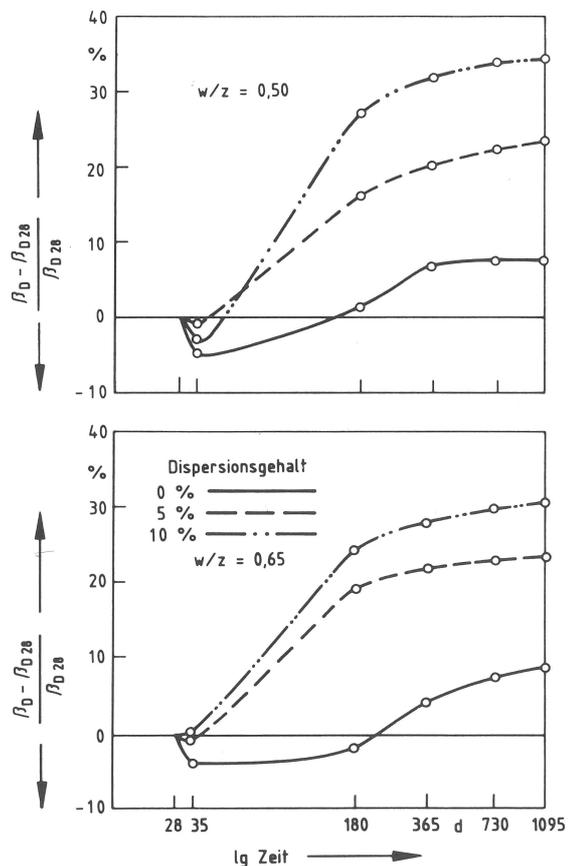


Bild 42
Änderung der Druckfestigkeit $(\beta_D - \beta_{D28}) / \beta_{D28}$ von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "a" (60 °C/10 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{D28}

aller Proben wieder an und zeigen dann nach 3 Jahren kaum noch einen Zuwachs. Bezieht man die Festigkeit auf den jeweiligen 28-Tage-Wert, so ergibt sich die Darstellung in Bild 42. Hier beträgt der Verlust nach einer Woche Lagerung (vom 28. bis zum 35. Tag) allgemein bis zu 5 %. Während die modifizierten Varianten bereits nach einem halben Jahr Steigerungen von 15 bis nahezu 30 % aufweisen, erreichen die Vergleichsmischungen gerade wieder ihren Bezugswert. Bei diesen ist nach etwa ein bis anderthalb Jahren die Festigkeitsentwicklung nahezu abgeschlossen. Es werden dann Verbesserungen von weniger als 10 % erzielt. Nach ein bis zwei Jahren ist die Entwicklung bei den kunststoffmodifizierten Betonen ebenfalls beendet. Deren Zuwachs beträgt jedoch 25 bzw. 30 %, und zwar je nach Kunststoffanteil. Der Wassergehalt der Betone sank dabei auf 1 bis 1,5 Vol.-%. Anfänglich trocknen jedoch nur oberflächennahe Bereiche aus, während der Kern der Proben davon noch unberührt bleibt. Das kann wie hier im Falle einer scharfen Austrocknung zu Schwindspannungen und zu Mikrorissen führen. Zwischen dem 35. und dem 180. Tag (Bild 42) steigt die Festigkeit wieder an, die Feuchtigkeit hat ihren Minimalwert erreicht (Bild 17). Durch steten Wasserentzug wird im Beton die unter sonst üblichen Bedingungen stattfindende Nachhydratation über den 28. Tag hinaus eingeschränkt. Andererseits begünstigt die erhöhte Temperatur in Verbindung mit dem Restwassergehalt eine beschleunigte Bildung von Hydratphasen, was sich jedoch angesichts des abnehmenden Feuchtigkeitsgehaltes immer weniger ausprägt. Das anfangs in dickeren Schichten adsorbierte Wasser nimmt an den inneren Oberflächen des Betons ab und vergrößert dadurch die freie Oberflächenenergie /63/, was mit einer zusätzlichen Festigkeitssteigerung verbunden ist. Der durch zunehmende Austrocknung verfestigende Kunststoff trägt wegen seines großen Formänderungsvermögens und seiner guten Haftzugfestigkeit dazu bei, Zugspannungen, die zu Rissen führen, zum großen Teil aufzunehmen. Es ist gezeigt worden, daß mit dem Alter des Betons mehr Calciumacrylat entsteht. Dieses ließ sich mit der eingetrockneten Dispersion im Ausgangsstadium, also noch nicht mit Calciumhydroxid in Verbindung gekommen, über die Mikrohärtigkeit vergleichen. Nach eigenen Untersuchungen mit Hilfe der Mikrohärtigkeit (DIN 53 519) hat danach Calciumacrylat

einen um den Faktor 20 größeren Elastizitätsmodul. Auch wird durch die länger im kunststoffmodifizierten Beton verbleibende Feuchtigkeit im Vergleich zur Nullmischung das Wachsen und Ausbilden von Kristallen günstiger beeinflusst, was ebenfalls zur Festigkeitssteigerung beiträgt.

Bei den Proben im wöchentlich wechselnden Klima "b" (60 °C/10 % r. F.) sind Tendenzen ähnlich wie nach der Lagerung bei erhöhter Temperatur erkennbar (Bild 43). Höhere Dosierungen führen hier ebenfalls zu größeren Festigkeiten. Diese fallen jedoch zunächst bis zum 35. Tag ab und steigen danach wieder an. Die Werte der mit einer geringen Zusatzstoffmenge versehenen Proben unterscheiden sich nach einem Jahr mit ±5 %

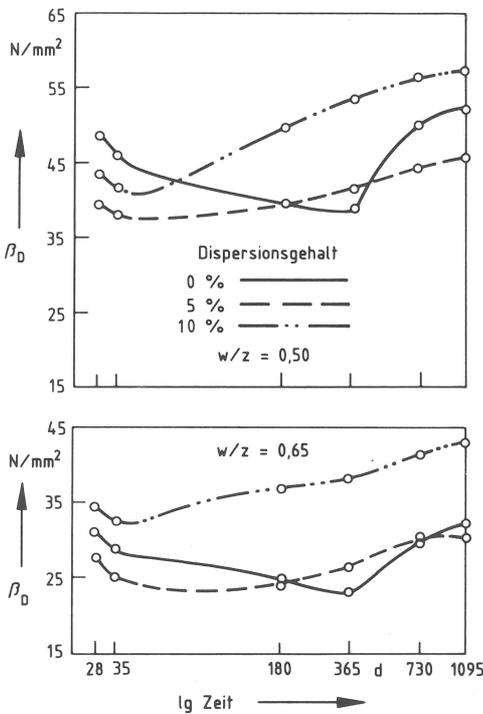


Bild 43
Druckfestigkeitsverlauf β_D von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "b" (60 °C/10 % r. F.; -10 °C/95 % r. F.)

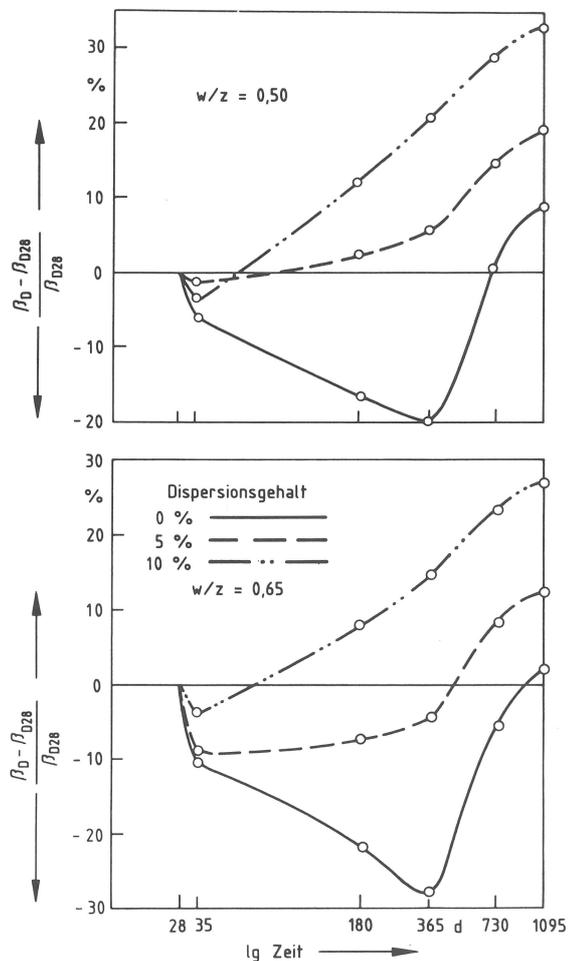


Bild 44
Änderung der Druckfestigkeit $(\beta_D - \beta_{D28}) / \beta_{D28}$ von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "b" (60 °C/10 % r. F.; -10 °C/95 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert β_{D28}

nur wenig von den nach 28 Tagen. Erst anschließend ist ein merklicher Zuwachs zu verzeichnen, der nach drei Jahren etwa 15 bis 20 % ausmacht. Betone mit mehr Zusatz haben dagegen einen kontinuierlichen Anstieg und verbessern ihre Druckfestigkeit während der Langzeitlagerung um 30 %. Anders verhalten sich die Nullbetone. Ihre Festigkeit sinkt bis zu einem Jahr merklich, und zwar bei den Mischungen mit $w/z = 0,65$ um 30 % und den mit $w/z = 0,50$ um 20 %. Auch nach Abschluß der Versuche wird nur der Bezugswert wieder erreicht, bzw. um weniger als 10 % überschritten (Bild 44). Man erkennt an den Nullbetonen Risse, die von der Oberfläche ausgehend etwa 5 bis 10 mm tief sind (Bild 56). Die Druckfestigkeit zeigt in diesem Falle die Gefügezerstörung auch an. Wird aber Kunststoff zugesetzt, so waren derartige Schäden nicht zu beobachten. Der zu Beginn der Lagerung stattfindende Festigkeitsverlust, der Nullbetone läßt in Verbindung mit den sichtbaren Rissen vermuten, daß die Klimabeanspruchung auch bei den modifizierten Varianten latente Mikrorisse hervorgerufen hat, die nicht mehr "verheilen" konnten. Wie aufgrund der Untersuchungen zum E-Modul gezeigt wird, ist jedoch die Druckfestigkeit allein ist kein geeignetes Kriterium, um derartige Schäden feststellen zu können, denn Risse dieser Größenordnung werden bei der Prüfung auch überdrückt und somit nicht erkannt.

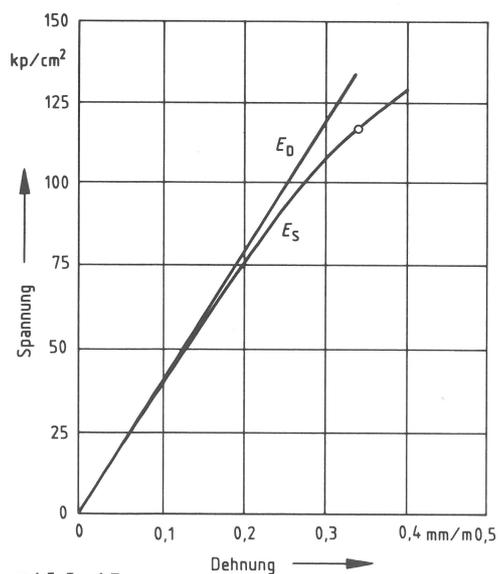


Bild 45

Dynamischer E_D und statischer Elastizitätsmodul E_S von Normalbeton.

Abb. aus Pohl/40/

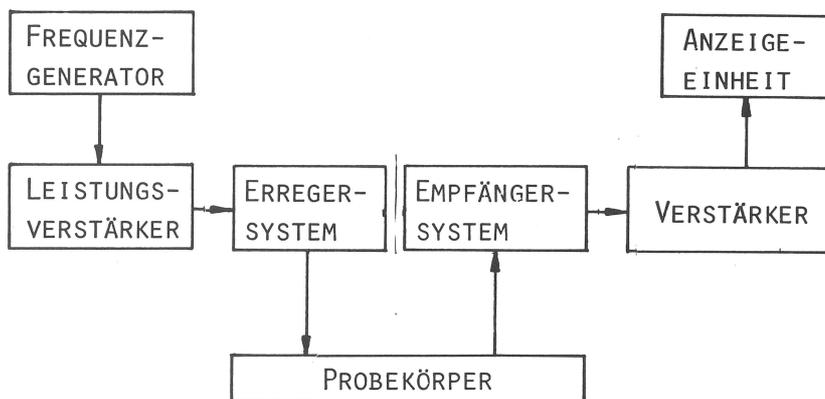


Bild 46

Schematische Darstellung der Erregungsart "Fremderregung" mit dem Elastomaten - Institut Dr. Förster - /11/

5.3.4.2 Elastizitätsmodul

Die Anordnung des Systems von Geber und Empfänger (Bild 47), die Geometrie der freischwingenden Auflagerung der Proben unter einer schallabsorbierenden Haube sowie die Abmessungen der Prismen lieferten gute Voraussetzungen für die Messung der Resonanzfrequenzen. Die betreffenden Werte lagen in Bereichen um 7000 und 11000 Hz, entsprechend der 1. und 2. Oberwelle der Transversalschwingung. Der "driver" wurde 1 cm von der Stirnseite entfernt in der Mittellinie der Prismenlängsrichtung aufgesetzt und das piezoelektrische "pick-up"-Element in dieser Richtung so lange verschoben, bis Knoten und Bäuche der Wellen durch Amplitudennullpunkt/-maximum am Anzeigegerät zu erkennen waren. Für die Oberwellen der Transversalschwingungen erhält man die in den Bildern 48 und 49 gezeigten Resultate. Es stimmen hier die theoretischen mit den sich tatsächlich einstellenden Schwingungszuständen gut überein, so daß die Anordnung von "driver" und "pick-up"

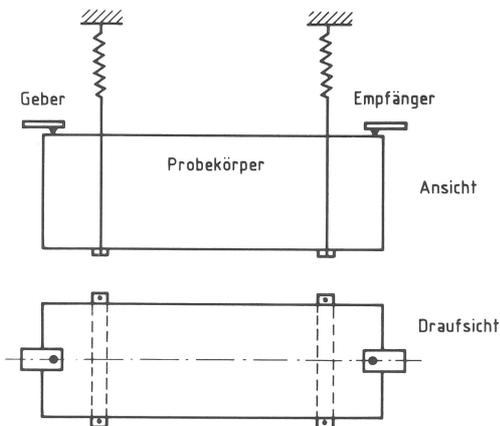
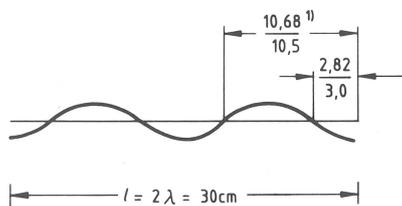


Bild 47

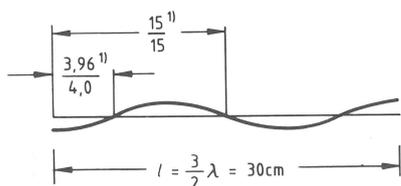
Aufhängung des Probekörpers an Federn sowie Anordnung des Gebers und Empfängers bei der Messung des dynamischen E-Moduls



$$^1) \frac{\text{Abstand rechnerisch}}{\text{Abstand gemessen}} \text{ (cm)}$$

Bild 48

Errechnete und am Probekörper gemessene Lage der Knoten für die 1. Oberwelle der Transversalschwingung



$$^1) \frac{\text{Abstand rechnerisch}}{\text{Abstand gemessen}} \text{ (cm)}$$

Bild 49

Errechnete und am Probekörper gemessene Lage der Knoten für die 2. Oberwelle der Transversalschwingung

gemäß RILEM Empfehlung /4/ in der beschriebenen Weise abgewandelt werden konnte. Denn das hat sich bei dieser Art von eigens dafür entwickelten Meßvorrichtungen als günstig erwiesen.

Zunächst wurde jedoch vor Beginn der Untersuchungen der nach der dynamischen Methode auftretende Größtfehler mit Hilfe der Beziehung 8 abgeschätzt. Dabei lag die Fehlerbetrachtung von V i n k e l o e /58/ zugrunde.

$$\frac{\Delta E_o}{E_o} \cdot 100 (\%) = \frac{2\Delta f_{tr}}{f_{tr}} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{3\Delta l}{l} - \frac{\Delta b}{b} - \frac{3\Delta h}{h} \quad (8)$$

Die relativen Fehler der rechten Seite der Gleichung lassen sich wie folgt angeben: Für die Resonanzfrequenz f_{tr} beträgt die Genauigkeit nach Angaben des Geräteherstellers /11/ ± 10 Hz. Im relevanten Meßbereich von etwa 10 000 Hz bedeutet das einen Fehler von $\pm 0,1$ %. Wegen des quadratischen Anteils ergibt das eine Ungenauigkeit von $\pm 0,2$ %. Eine elektronische Waage gibt die Masse m der Probekörper mit ± 1 g Genauigkeit an, was im Wägebereich von 6 000 g einem Fehler von etwa $\pm 0,02$ % entspricht. Mit Hilfe eines Meßschiebers ließen sich die geometrischen Abmessungen der Betonkörper auf $\pm 0,5$ mm genau bestimmen. Daraus folgt für die Länge l von 300 mm ein Fehler von $\pm 0,2$ %, was wegen der dritten Potenz zu $\pm 0,6$ % führt. Die Querschnitte mit der Breite b und Höhe h sind ebenfalls auf $\pm 0,5$ mm genau zu messen und liefern mögliche Fehler von $\pm 0,5$ % bzw. $\pm 1,5$ %. Gemäß einer pythagoreischen Addition ergibt sich aus Gl. 8 als mittlerer Fehler ein Wert von $\pm 1,7$ %. Zur Überprüfung des rechnerischen Ergebnisses dienten Messungen an einem über 10 Jahre alten Betonprisma, das einem Klima 20/65 angepaßt worden war. Innerhalb eines Zeitraumes von 12 Monaten ergaben sich die in Bild 50 aufgeführten dynamischen E-Moduln mit Mittelwert und Standardabweichung von 30800 ± 400 N/mm². Demnach betragen die Streuungen der Werte über die lange Meßdauer an der einzelnen Probe $\pm 1,3$ %. Als maximale Einzelabweichung vom Mittelwert ist eine Differenz von 700 N/mm² oder 2,3 % aus dem obengenannten Bild ersichtlich. Demnach stimmen die Ergebnisse aus der Rechnung mit denen des Versuchs gut überein.

Bei Betonen nach den Rezepturen des Bildes 1 wurden für die folgenden Untersuchungen Zement- und Zuschlagart, Probentemperatur und Sieblinie konstant gehalten, da dies sonst die Elastizität zusätzlich beeinflussen würde. Unter Voraussetzung eines gleichen Zuschlaganteils bewirkt ein größerer Wasser-Zement-Wert einen kleineren E-Modul. Verantwortlich hierfür ist die Dichtigkeit des Zementsteins. Diese wird als Quotient von Stoffraum des Zementes zu chemisch gebundenem Wasser betrachtet. Berücksichtigt ist dabei auch das Schrumpfen infolge des Volumenunterschiedes der Ausgangsstoffe (Zement und Wasser) zu den Hydratationsprodukten. Mit Abnahme der Dichtigkeit fällt ebenfalls der E-Modul und zwar unabhängig von der verwendeten Zementart und Festigkeitsklasse. M a n n s /31/ gibt dies für wassergesättigte Proben an. Die Übertragbarkeit dieser Aussage auf jedoch bis zur Massekonstanz getrocknete und 28 Tage alte kunststoffmodifizierte Betone wurde an 124 Proben mit $w/z = 0,65$ und 94 Proben mit dem Wasser-Zement-Verhältnis $0,50$ nachgeprüft. Mit Werten von $28\ 600 \pm 2600$ N/mm² und $34\ 800 \pm 1100$ N/mm² konnte das bestätigt werden. Die hier im Vergleich zu den vorerwähnten Ergebnissen großen Standardabweichungen von etwa $\pm 9\ %$ bei Beton B 25 und $\pm 3\ %$ bei B 35 sind weitgehend durch die verschiedenen Mischungen bestimmt. Für die Untersuchungen wurden jedoch ein und dieselben Proben nach unterschiedlicher Lagerungsdauer verwendet, so daß mit der geringen Abweichung gerechnet werden konnte, wie sie aus Bild 50 bzw. aus der Rechnung (Gl. 8) hervorgeht.

Messung nach Monaten	dynamischer E-Modul N/mm ²
1	30 900
2	30 800
3	31 000
4	31 100
5	31 100
6	31 200
7	31 300
8	31 300
9	30 200
10	30 100
11	30 300
12	30 800

Bild 50
Dynamischer E-Modul eines 10 Jahre alten Betons, wiederholte Messungen über 12 Monate

Mittelwert $30\ 800 \pm 400$ N/mm²

5.3.4.2.1 Feuchtigkeitseinfluß

Von den zahlreichen Faktoren hat besonders die Feuchtigkeit Einfluß auf die sich im Innern der Probekörper einstellenden Schwingungszustände. Für die unterschiedlich gelagerten Betone war daher ein Feuchtigkeitszustand zu fordern, um Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Eine Trocknung des Materials bis zur Massekonstanz hätte eine unkontrollierte Beanspruchung des Gefüges bedeutet und schied daher aus. Deshalb waren Korrekturen notwendig, die auf rechnerischem Wege gestatteten, unterschiedlichen Wassergehalt der Proben zu eliminieren. Aufgrund von Ergebnissen der Laufzeitmessung gaben Jones und Fac ě o ě r u /20/ grob abgestufte Korrekturfaktoren an, die Temperatureinwirkung auf lufttrockenen und wassersatten Beton berücksichtigen sollen. Diese waren jedoch auf das eigene Verfahren bei der Bestimmung der Resonanzfrequenz nicht übertragbar, weil die damit korrigierten Werte von den tatsächlichen zu sehr abwichen. Die Feuchtigkeit hatte aber, wie eigene Untersuchungen ergaben, einen weit größeren Einfluß, als von den Autoren beschrieben. Ebenso hatte W e s c h e /61/ Aussagen zu diesem Thema gemacht. Er errechnete über die Rohdichte stets zu kleine Werte und verwendete daraufhin "Reinwichten", worauf sich dynamische E-Moduln dann besser mit statischen vergleichen ließen. Auch dies führte hier bei den kunststoffmodifizierten Betonen nicht zum gewünschten Erfolg.

Es wird im Folgenden nun der Einfluß der Feuchtigkeit auf die Veränderung der Resonanzfrequenz quantitativ ermittelt, der auch für die kunststoffmodifizierten Varianten Gültigkeit hat. Als Standardproben dienten dazu drei Jahre alte Prismen aus Beton mit einem Wasser-Zement-Wert von 0,50 bzw. 0,65 und einem Kunststoffanteil von jeweils 5 und 10 %. Dazu gehörte die entsprechende Nullprobe (10 cm x 10 cm x 30 cm). Bei diesem Betonalter ist damit zu rechnen, daß der Hydratationsprozeß und die Austrocknung der Kunststoffdispersion weitgehend abgeschlossen sind, weshalb also ein möglicher Einfluß von daher als vernachlässigbar klein betrachtet werden kann. Um einen möglichst großen Bereich zu erfassen waren die bei 105 °C vorgetrockneten Proben nach ihrer Dichte

so gewählt worden, daß die entsprechenden Resonanzfrequenzen in einem relativ breiten Spektrum lagen. Die Ergebnisse daraus sollen die Bezugswerte für die anschließenden Messungen darstellen. In einem Klimakasten lagerten diese Proben dann bei Raumklima bis Ausgleichsfeuchtigkeit eingetreten war. Bis zum Erreichen dieses Stadiums wurde in regelmäßigen Abständen der dynamische Elastizitätsmodul bestimmt. Anfangs wiesen die äußeren Bereiche der Betone einen höheren

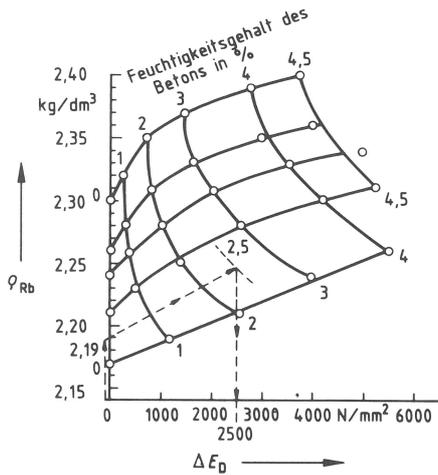


Bild 51

Änderung des dynamischen E-Moduls ΔE_D von Normal- und kunststoffmodifizierten Betonen in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte ρ_{Rb} und vom Feuchtigkeitsgehalt

Feuchtigkeitsgehalt auf als der Kern. Die sich demnach ständig verändernden Werte blieben aber nach 4 bis 6 Wochen im Rahmen der Streuung konstant. Die Feuchtigkeit im Probekörper konnte nun als gleichmäßig verteilt angesehen werden. Nach abgestufter Variation der Klimabedingungen wurde der dynamische E-Modul in der beschriebenen Weise erneut bestimmt, und zwar so lange, bis sich ein Wassergehalt von etwa 5 % eingestellt hatte. Jetzt schloß sich an die Befuchtung eine stufenweise Austrocknung an, und nach der oben beschriebenen Weise wurden die Werte erneut bestimmt. Vergleicht man nun beide miteinander, so läßt sich ein Verlauf nach Art einer Hysterese nicht erkennen. Die Untersuchungen waren wegen des nur sehr langsamen hygrischen Ausgleichs zeitaufwendig und dauerten über anderthalb Jahre. Bild 51 gibt die Veränderung des E-Moduls bei bekannter Trockenrohddichte und Feuchtigkeit als Polynom 3. bis 5. Grades wieder. Demnach wird der elastische Kennwert um so größer, je feuchter der Beton und je kleiner dessen Dichte ist. Das hat zur Folge, daß bei mittleren Beträgen und unberücksichtigtem Wassergehalt Unterschiede mit mehr als 30 % auftreten. Während Wasser-Zement-Wert und Kunststoffdosie-

Die absolute Größe dieses Kennwertes sonst mitbestimmen, spielten diese Parameter für die Änderung der Resonanzfrequenzen, zwischen vorgetrockneten und feuchten Betonen offenbar keine Rolle. Die Berechnung des dynamischen E-Moduls (4.3.3) unter Bezug auf den jeweiligen Feuchtigkeitszustand erfolgte mittels eines Computerprogrammes, wobei die Polynome als Funktionen eingespeichert waren.

5.3.4.2.2 Klimaeinfluß

Die hier verwendeten Prismen waren wie die Würfel für die Druckfestigkeit dem gleichen Klima ausgesetzt und wurden auch zum selben Zeitpunkt geprüft. Dabei ergaben sich für die Nullbetone ($w/z = 0,50$ und $0,65$) im Klima "h" (20/65) nach 3 Jahren etwa nur um 5 % erhöhte Werte, bezogen auf die ersten Meßergebnisse nach 14 Tagen (Bild 52). Während die Mischungen mit 5 und 10 % Dispersionsmenge und einem w/z -Wert von $0,65$ einen noch geringeren Betrag aufwiesen, verzeichnete die modifizierte Variante mit dem geringeren Wasser-Zement-Wert ($0,50$) dagegen eine Steigerung von etwa 10 %. Solche Unterschiede werden durch das dichtere Gefüge und den hohen Kunststoffzusatz gemeinsam bewirkt.

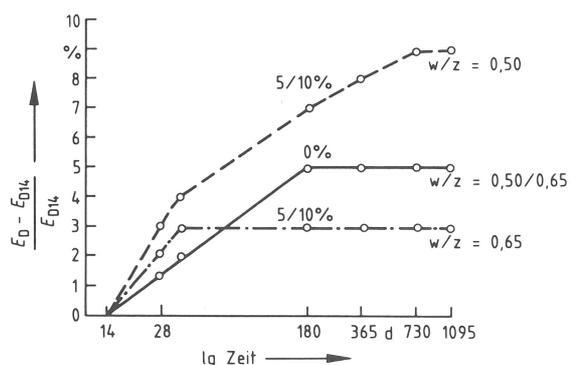


Bild 52
Änderung des dynamischen E-Moduls ($E_D - E_{D14}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 14-Tage-Wert E_{D14}

Vor der Belastung durch den Dauerfrost "d" (-10/95) blieben die Proben bis zum 28. Tag im Klima 20/65. Nach einem bei dieser Vorlagerung zu erwartenden Anstieg des elastischen Kennwertes während der Lagerung 20/65 hatte die anschließend einwirkende niedrigere Temperatur auf die weitere Entwicklung keinen Einfluß mehr (Bild 53). Wie bei den Festigkeitsuntersuchungen können auch hier keine Zusammenhänge mit dem Kunststoffgehalt festgestellt werden. Versucht man z. B. die Festigkeit bei dieser Temperatur mit den auftretenden

E-Moduln in Zusammenhang zu bringen, so ergibt sich ebensowenig ein Bezug wie mit der Dichte.

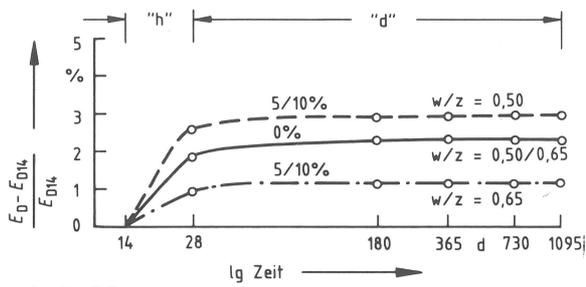


Bild 53

Änderung des dynamischen E-Moduls ($E_D - E_{D14}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "d" (-10 °C/95 % r. F.) und "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 14-Tage-Wert E_{D14}

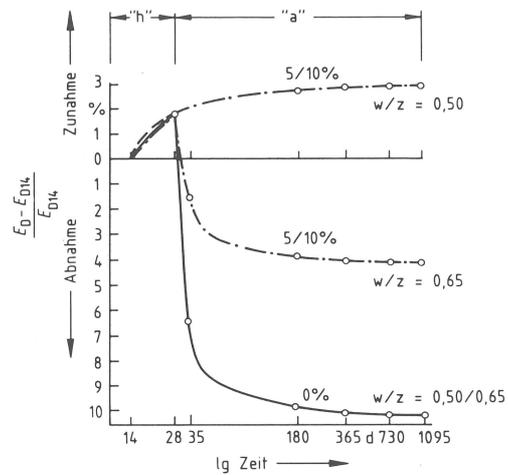


Bild 54

Änderung des dynamischen E-Moduls ($E_D - E_{D14}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z = 0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "a" (60 °C/10 % r. F.) und "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 14-Tage-Wert E_{D14}

Alle Nullbetone weisen im Falle erhöhter Temperatur (Lagerungsart "a") eine Abnahme des E-Moduls von 10 % auf (Bild 54). Da dies innerhalb der ersten Woche beginnender Klimabeanspruchung geschah und mit hoher Austrocknung verbunden war (vom 28. auf den 35. Tag), werden Schwindspannungen dafür verantwortlich gemacht, zumal der Kennwert infolge der Vorlagerung ("h") bereits angestiegen ist. Für kunststoffmodifizierte Betone kann dagegen ein Anstieg charakteristisch sein. So zeichnen sich diejenigen mit höherer Dichte durch einen Zuwachs aus, während die mit der geringeren noch unter den mechanischen Bezugswert nach 14 Tagen fallen. Der Kunststoff überbrückt mit Austrocknung in zunehmendem Maße die Risse im Mikrobereich und beseitigt weitgehend die sich infolge Schwindspannungen ergebenden Schwachstellen. Die elastische Wirkung der Zusätze verhindert somit einen größeren Grad der Gefügezerstörung wie er bei den Vergleichsbetonen auftritt.

Gut erkennbar wird eine solche Schädigung der Nullbetone als Folge der Lagerung "b" (Wechselklima). In Bild 56 zeigen sich deutlich Risse an der Oberfläche. Hier nimmt auch die

Druckfestigkeit besonders niedrige Werte an. Bei Vergleichsmischungen mit geringer Dichte sinkt der E-Modul bis zu 14 % ab (Bild 55). Wohl durch "Ausheilung" von Spannungsrisen im Zementstein bedingt, kann der elastische Kennwert wieder seinen Ausgangswert nach einer Zeitdauer von 3 Jahren erreichen. Die scharfe Trocknung besonders in der ersten Phase der Klimabeanspruchung führten bei Zuschlag und Zementstein zu unterschiedlichen Schwindraten und rief eine Gefügeschädigung hervor. Letztlich stellte sich ein Feuchtigkeitsgleichgewicht zwischen Beton und Umgebung sowie zwischen Zuschlag und Zementstein ein. Modifizierte Betone sind zwar rissefrei, verringern aber ihren elastischen Kennwert so, daß er im Falle höherer Dichte nur wenige Prozent unter dem Vergleichswert nach 14 Tagen liegt. Die mit höherem w/z-Wert erreichen zwar die Größenordnung der E-Modul-Verminderung von Vergleichsmischungen, zeigen aber nach 3 Jahren keine steigende Tendenz wie diese. Der Rückgang des elastischen Kennwertes wird ebenfalls durch Mikrorisse begründet, ob sie jedoch zu einem späteren Zeitpunkt "ausheilen" können, ist hier nicht weiter verfolgt worden. Es sind aber die modifizierten Varianten größerer Dichte weniger

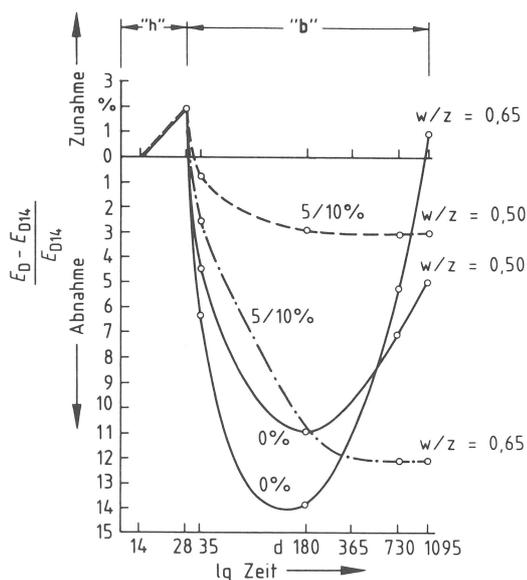


Bild 55

Änderung des dynamischen E-Moduls ($E_D - E_{D14}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten w/z=0,50/0,65 nach Klimabeanspruchung "b" (60 °C/10 % r. F.; -10 °C/95 % r. F.) und "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 14-Tage-Wert E_{D14}

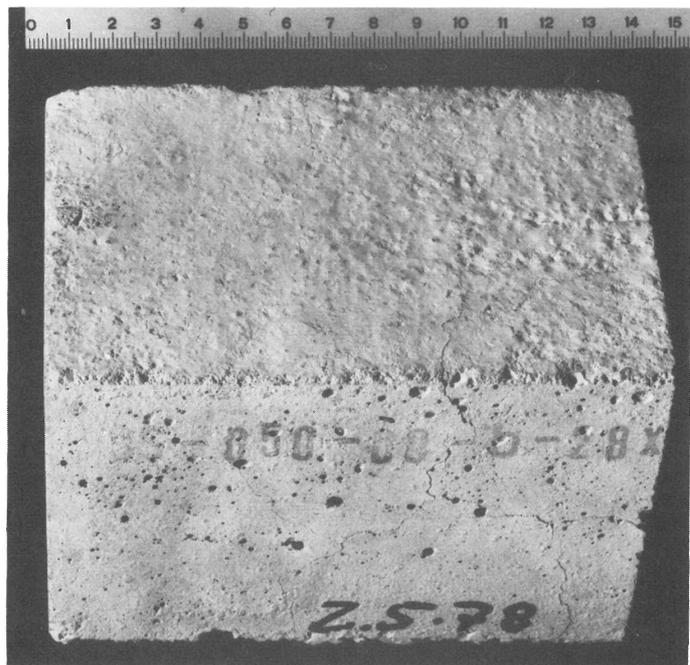


Bild 56

Risse im Vergleichsbeton nach Klimabeanspruchung "b" (60 °C/10 % r. F.; -10 °C/95 % r. F.)

anfällig gegen diese extreme Klimabeanspruchung als die dichteren Vergleichsbetone.

5.3.4.3 Verhältnis von statischem zu dynamischem Elastizitätsmodul

Unbekannt ist das viskoelastische Verhalten kunststoffmodifizierter Betone über einen langen Zeitraum. Die nachfolgenden Untersuchung dient der Klärung, in welchem Verhältnis der dynamische E-Modul zum statischen im Hinblick auf eine Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes und mit fortschreitendem Alter steht. Ob dabei die bekannten Gesetzmäßigkeiten für beide Varianten sich von Normalbeton auf den modifizierten übertragen lassen, wird anhand eines unmittelbaren Vergleiches bleibender Formänderungen im Verlaufe von drei Jahren überprüft. Was das statische Verfahren betrifft, so sind in Bild 57 die Bezugswerte für 270 Proben vom 28. Tage an dargestellt. Die modifizierten Betone entsprechen den gerasterten Flächen, die durchgezogene Linie den Vergleichsbetonen. Die Ergebnisse stimmen bei allen Proben bis zu einem Jahr weitgehend überein und divergieren erst nach weiteren 2 Jahren, wobei der Beton mit dem höherem Kunststoffzusatz auch einen größeren Zuwachs für den statischen E-Modul aufweist. Die Nullmischung liegt weiterhin zwischen beiden Varianten. Ein Einfluß des Wasser-Zement-Wertes ist kaum erkennbar. Auch bei diesem Verfahren zeigt sich, daß dichtere kunststoffmodifizierte Betone eine größere Steigerung des elastischen Kennwertes aufweisen. Verglichen mit den Nullbetonen trifft dies nicht zu, da deren Entwicklung trotz höherer Dichte zwischen beiden Varianten verläuft. Die Ursache für einen Anstieg des E-Moduls ist also nicht allein auf Dichteunterschiede zurückzuführen. Hier verfestigt offenbar Calciumacrylat mit dem Alter das Gefüge, so daß bei der, dem Druckversuch ähnlichen Beanspruchung Spannungen zusätzlich übernommen werden können. Die Methode hat aber den Nachteil, daß die Streuung der Einzelwerte wesentlich größer ist und wie bei der Würfelprüfung nach N i s c h e r und S o r e t z /37/ bis zu etwa $\pm 20\%$ betragen kann. Somit eignet sich die dynamische wesentlich besser zur Beurteilung derartiger Betone, zumal durch sie auch Gefügeschäden erkannt werden können.

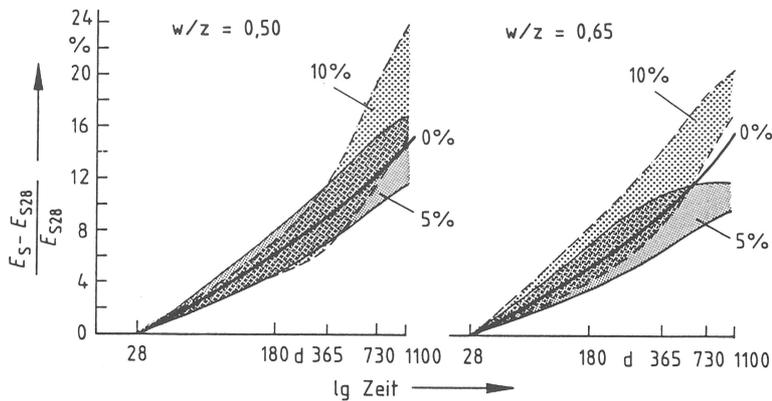


Bild 57

Änderung des statischen E-Moduls ($E_S - E_{S28}$) von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt und Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den 28-Tage-Wert E_{S28}

Alter in Tagen nach Klimabeanspruchung	Feuchtigkeitsgehalt in % bezogen auf die bei 105 °C getrockneten Proben ¹⁾
28	3,5 ± 0,5
180	2,8 ± 0,5
365	1,8 ± 0,5
730	1,5 ± 0,4
1100	1,5 ± 0,3

1) für jede Altersstufe standen 54 Prismen zur Verfügung

Bild 58

Feuchtigkeitsgehalt und Standardabweichung von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.)

Das Verhältnis zwischen dynamischem und statischem E-Modul wird im kunststoffmodifizierten Beton auch in großem Maße von dessen Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Um dieses quantitativ zu erfassen, sind die in Bild 2 angegebenen Proben hergestellt und bis zum jeweiligen Tag der Prüfung im Klima 20/65 gelagert worden. Bild 58 zeigt Feuchtigkeitsänderung bis zu einem Alter von drei Jahren. Zu fünf Altersstufen (1, 6, 12, 24 und 36 Monate) wurde der dynamische und anschließend der statische E-Modul bei unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten in der bekannten Weise bestimmt (vgl. 4.3.3.3). Die Werte sind sowohl ohne Berücksichtigung der Feuchtigkeit als auch nach erfolgter Ausgleichsrechnung (vgl. Bild 51) in Bild 59 über das Alter der Proben aufgetragen. Während die obere Linie den Beton mit abnehmendem Wassergehalt darstellt, repräsentiert die untere den gleichen Beton aber trocken, d. h. ohne das verdampfbare Wasser ("0 %"). Die Differenz (schraffierter Bereich) gibt den Einfluß der Feuchtigkeit wieder. Mit fortschreitendem Alter

der Proben sind beide Untersuchungen nacheinander an ein und demselben Betonprisma durchgeführt worden. Im frühen Stadium weisen Proben mit nur etwa 3,5 % Feuchtigkeit gegenüber den trockenen einen um 10 % größeren Wert auf. Mit dem Alter verringert sich jedoch diese Differenz. Wenn der Feuchtigkeitsanteil ungefähr 1,5 % erreicht hat, nämlich nach ca. zwei Jahren, sind die beiden E-Moduln nahezu gleich. Nach diesem Zeitraum wird auch bei relativ altem Beton die bleibende Verformung geringer, d. h., der Sekantenmodul verläuft im Spannungsdehnungsdiagramm steiler und nähert sich dem Tangentenmodul, der vorstellungsgemäß gleichzeitig den dynamischen E-Modul darstellt.

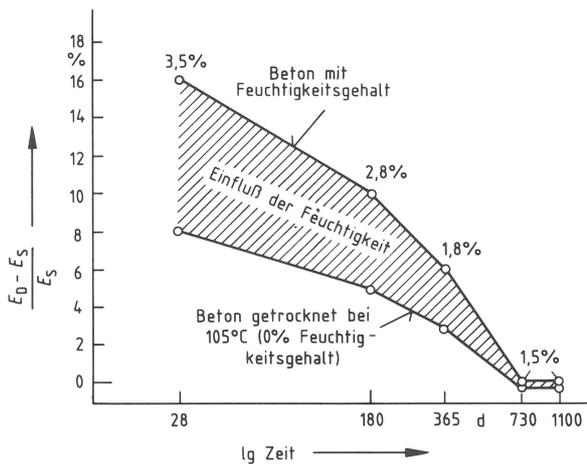


Bild 59

Differenz des dynamischen zum statischen E-Modul $E_D - E_S$ von kunststoffmodifizierten- und Vergleichsbetonen mit Wasser-Zement-Werten $w/z=0,50/0,65$ nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.) bezogen auf den jeweiligen statischen E-Modul E_S

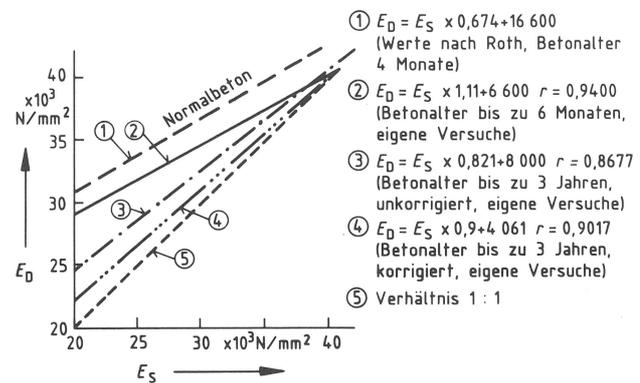


Bild 60

Zusammenhang zwischen dynamischem E_D und statischem E-Modul E_S von Normalbeton (1) und Betonen mit 5 und 10 % Dispersionsgehalt (2) bis (4) nach Klimabeanspruchung "h" (20 °C/65 % r. F.)

Die Resultate der Korrelationsrechnung aus den 540 Einzelwerten sind in Bild 60 dargestellt. Es ergibt sich für die kunststoffmodifizierten Betone bis zum Alter von 6 Monaten eine Gerade, die sich nur wenig von der Beziehung nach Roth /46/ für Normalbeton unterscheidet. Nach den Untersuchungen dieses Autors beträgt der Unterschied zwischen den statischen und dynamischen Moduln für mittlere Werte etwa 20 % bis zu einem Probenalter von 4 Monaten. Berücksichtigt man die bis zu 3 Jahre alten modifizierten Proben, so nähert

sich der Kurvenverlauf der Geraden, wo die E-Moduln gleiche Beträge annehmen (Verhältnis 1:1). Unter Bezugnahme auf den Trockenzustand weichen die Werte für die Kunststoffvarianten noch geringer von dieser Funktion ab. Im Bereich niedriger E-Moduln war die Abweichung größer als bei hohen Werten. Für mittlere Beträge von etwa 30 000 N/mm² beträgt die Differenz nur etwa 3 %. Dieser Unterschied ist jedoch für die Beton-technologie ohne praktische Bedeutung.

5.4 Kriechen

Die Ergebnisse aus den Kriechversuchen sind mit Hilfe der Ross'schen Beziehung (Gl. 6) ausgedrückt worden. In Bild 61 ist der Quotient aus Zeit und Kriechverformung über die Beanspruchungsdauer aufgetragen. Von etwa einem halben Jahr ab ergibt sich für alle Proben ein linearer Verlauf, d. h., die Parameter genügen der genannten Hyperbelgleichung (vgl. 4.3.3.4). Innerhalb der ersten sechs Monate beträgt jedoch die Abweichung der errechneten Endkriechmaße von den gemessenen bis zu 10 %. Es empfiehlt sich daher, die kunststoffmodifizierten Betone über mindestens 1 Jahr zu beobachten, um die Werte aus der Gleichung 6 auf ein Endkriechmaß extrapolieren zu können. Nach über 900 Tagen treten beim Vergleichsbeton Kriechverformungen von etwa $1,1 \cdot 10^{-3}$ auf.

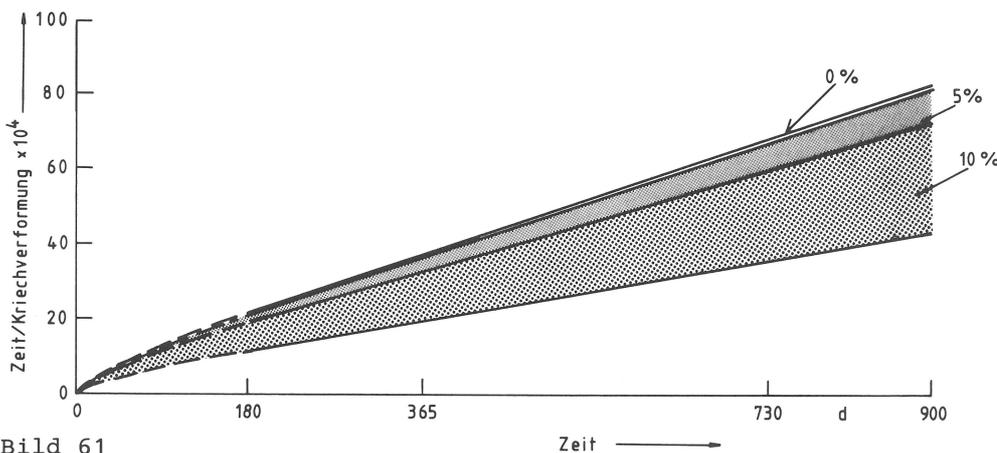


Bild 61
Zeit/Kriechverformung von Betonen mit 0; 5 und 10 % Dispersionsgehalt

Im Falle der modifizierten Varianten, die durch Schraffuren gekennzeichnet sind, erstrecken sich die mit geringerem Zusatz zwischen $1,0$ und $1,2 \cdot 10^{-3}$, die mit höherem sind zwischen $1,2$ und $2,3 \cdot 10^{-3}$ begrenzt. Das wird vorwiegend auf den Einfluß des Kunststoffes zurückgeführt, denn andere Fak-

toren sind wegen gleichartiger Zusammensetzung, Vorbehandlung und konstanten Versuchsbedingungen während der Belastungsdauer hier von untergeordneter Bedeutung. So wirkt sich auch der Wasser-Zement-Wert, mit dem die Kriechverformung im allgemeinen zunimmt ebensowenig aus wie die Festigkeit bei Lastaufnahme, die wiederum weitgehend vom Zusatzstoff abhängt (vgl. 5.3.4.1).

Die den Verformungszuwachs erfassende Kriechzahl ψ_t kann für konstante Spannung durch die Gleichung 9 dargestellt werden:

$$\psi_t = \frac{\epsilon_K \cdot E}{\sigma} \quad (9)$$

Sie beträgt für die Vergleichsbetone etwa 2,4 und liegt bei den Kunststoff-Varianten je nach Zugabe und w/z-Wert zwischen 2,9 und 3,2 bzw. 3 und 5. Der für die höher dosierten Betone im Vergleich zur Nullmischung doppelte Betrag ist nach DIN 1045 Tabelle 12 /7/ zwar noch an der unteren Grenze von Normalbeton, läßt sich aber keiner dort aufgeführten Luftfeuchtigkeit zuordnen.

Dem Anmachwasser von Mörteln und Betonen werden Kunststoffdispersionen mit dem Ziele zugegeben, deren Eigenschaften im frischen und erhärteten Zustand gezielt verbessern zu können. Durch entsprechende Schutzkolloide und Emulgator-Systeme oder Kunststoffe, die nicht der Hydrolyse unterliegen, lassen sich zur Zeit Zusatzstoffe herstellen, die den Mängeln zu Beginn der Entwicklung Rechnung tragen. Für die eigene Arbeit fiel die Wahl auf Produkte, die eine weite Verbreitung gefunden haben. Bisher sind jedoch damit nur einzelne Untersuchungen angestellt worden, und zwar eher mit Zementleim und Mörtel als an Beton. Hier fehlen weitgehend Aussagen über das Langzeitverhalten, die Verteilung des Kunststoffes in der Zement-Zuschlag-Matrix sowie die stofflichen Veränderungen während des Hydrationsablaufes und praxisnaher Klimabeanspruchungen. Diese Erscheinungen werden nun zunächst an "normal" zusammengesetzten aber modifizierten Mischungen studiert und können künftig als Grundlage für die Übertragung auf Betone für spezielle Aufgaben dienen.

Mit dem Dispersionsgehalt wird bei gleichzeitiger Verringerung der Wärmeentwicklung gegenüber dem Nullbeton das Maximum der Temperatur hinausgeschoben. 10 % bewirken eine Verzögerung um die doppelte Zeit. Kunststoffpartikel lassen die Erhärtung von Zementleim und somit die Kristallisation von langfaserigen Calciumsilicathydraten langsamer vor sich gehen, was letztlich jedoch zu deren besserem Wachstum und einer höheren Endfestigkeit führt.

Bereits geringe Dosierungen von 5 % verändern die Konsistenz merklich, und zwar vom plastischen Bereich bis an die Grenze zum Fließbeton. Bei Zugaben von 10 % wird diese deutlich überschritten. Infolge der stark verflüssigenden Wirkung versagt dann die Beurteilung der Konsistenz auf dem Wege über das Verdichtungsmaß. Nach 30 Minuten tritt bei den modifizierten und den Vergleichsbetonen eine Verringerung des Ausbreitmaßes auf. Beginnendes Erstarren bzw. Ansteifen kündigt sich an. Die größere Benetzbarkeit der Kunststoffpartikel schränkt offenbar gegenüber reinem Zementleim das Abstoßen und Verdunsten von Zugabewasser weitgehend ein und

erhöht gleichzeitig die Dispersität des Zementes, die als wesentliche Voraussetzung für die Verflüssigung des Betons gilt.

Im Vergleich zur Nullmischung ruft eine geringe Zusatzmenge eine Erhöhung des Luftporengehaltes hervor, während dieser sich bei höherer Dosierung verringert. Ein Dispersionsgehalt von 5 % führt gegenüber einem von 10 % das Doppelte an Luftporen ein.

Vom 7. bis zum 28. Tag gaben die kunststoffmodifizierten Betone etwa 1 Vol.-% Feuchtigkeit im Klima 20/65 ab, die Vergleichsmischungen etwa 1,5 %. Die größten Austrocknungsgrade wurden bei hoher Temperatur und bei der Wechsellagerung erreicht. Frostlagerung bewirkte lediglich eine geringe Austrocknung. Nach Erwärmung bis auf Raumtemperatur nahmen diese Betone jedoch infolge von Kondensation etwa 1 % Wasser innerhalb von 24 Stunden auf. Der Porenraum, entstanden durch das bei Frostlagerung verdampfte Wasser, war im Vergleich zu dem nach 28 Tagen größer. Unterwasserlagerung förderte natürlich die Wasseraufnahme. Gegenüber dem Frischbeton bedeutete das für die Vergleichsbetone eine Feuchtigkeitszunahme bis zu 3 %, für die modifizierten etwa die Hälfte.

Im Vergleich zu den mit 5 % modifizierten Betonen haben die mit höheren Zusätzen eine größere Rohdichte aber geringere Reindichte. Dies scheint zunächst widersprüchlich zu sein. Berücksichtigt man jedoch die vermehrte Luftporeneinführung als Folge einer geringen Kunststoffzugabe sowie den Umstand, daß höhere Konzentrationen den Luftporengehalt im Vergleich zum Nullbeton sogar vermindern können, wird dies verständlich. Der Wasser-Zement-Wert wirkt sich offensichtlich bei der Rohdichte aus, indem dort die Werte für Betone mit $w/z = 0,65$ unterhalb derer mit $w/z = 0,50$ liegen. Die geringere Reindichte der mit 10 % versehenen Betone im Vergleich zu denen mit 5 % ist auf den Beitrag des im Gegensatz zum Zuschlag und Zement spezifisch leichteren Kunststoffes zurückzuführen. Bei gleichem Volumen haben dann die mit 5 % Dispersion versehenen Betone und besonders der Nullbeton die größere Masse und somit die größte Reindichte.

Die Gesamtporosität weist für die höher dosierten einen um etwa 4,5 Vol.-% geringeren Wert auf. Der Unterschied zwischen dem entstandenen Porenraum durch das bei 105 °C verdampfte Wasser und der Gesamtporosität ist bei den Betonen mit 10 % geringer als bei denjenigen mit 5 %. Hier ist zu vermuten, daß feine Poren, die noch nicht bei dieser Temperatur entwässern, mit Kunststoffpartikeln verstopft sind. Die niedrige Gesamtporosität bringt dies auch zum Ausdruck. Die Betone sind folglich dichter, der Unterschied zwischen Roh- und Reindichte ist vergleichsweise gering. Demgegenüber sind bei den Betonen mit 5 % Zusatzstoff und den Vergleichsbetonen, Kapillaren und Gelporen offenbar nicht in dem Maße verstopft. Der Porenraum, entstanden durch das verdampfbare Wasser, ist aber von gleicher Größenordnung wie der der Nullbetone.

Im alkalischen Medium findet als Folge der Hydrolyse eine teilweise Verseifung der Ester im jungen Beton und eine vollständige im alten Beton statt. Dabei kommt es zur Bildung von Calciumacrylaten, die besonders zur Festigkeit des Betons beitragen. Untersuchungen mit Hilfe der Mikrohärtetechnik ergaben bei dem Salz dieser organischen Säure einen um den Faktor 20 größeren E-Modul als bei dem äquivalenten Material, das noch nicht mit Calciumhydroxid reagiert hat.

Mit der Dosierung verschiebt sich die Porengrößenverteilung in den Bereich der Teilchengröße der Kunststoffe ($< 1 \mu\text{m}$), während Änderungen im Makrobereich der Poren ($> 6 \mu\text{m}$) kaum stattfinden. Es waren sowohl filmbildende Überzüge als auch stäbchenartige Verbindungen im Rasterelektronenmikroskop festzustellen. Aus den verschiedenen Erscheinungsformen kann geschlossen werden, daß der Kunststoff unterschiedliche "Aufgaben" in der Zement-Zuschlag-Matrix erfüllt. Eingeschnürte Stäbchen deuten auf mittragende Funktion hin, bei der Zug- und (Druck-) Kräfte von dem Zusatzstoff übertragen werden. Längliche, lose auf den Bruchflächen liegende Formen sind vermutlich aus größeren Kapillaren und Hohlräumen herausgezogen worden. Sie füllen diese offenbar nur aus und stützen dadurch aber Schwachstellen im Gefüge ab. Filmartige Überzüge können darunter liegende Poren "versiegeln". Ob es dort beispielsweise zu veränderten Dampfdruckverhältnissen

und ungleichmäßiger Spannungsverteilung kommen kann, kann nur vermutet werden. Die Klärung der Erscheinungsformen und die Verteilung der organischen Komponente gehen über den Rahmen dieser Arbeit hinaus und müssen daher einer weiteren Untersuchung vorbehalten bleiben.

Werden die Betone über längere Zeit klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt, so zeigen Zement und organischer Zusatzstoff Unterschiede in ihrem Erhärtungsverhalten und lassen je nach Temperatur- und Feuchtigkeitseinwirkung ihren Einfluß auf Stoffeigenschaften erkennen. Im Normalklima 20/65 weisen die Versuchsbetone den für diese Lagerungsart typischen Festigkeitsverlauf auf. Mischungen mit höherer Dosierung liegen etwa 10 % oberhalb der Vergleichsbetone, die mit geringerer z. T. darunter. Unterwasserlagerung führt allgemein zur Festigkeitssteigerung, und zwar bei den Nullbetonen um 30 % und den modifizierten um wenig mehr als 10 %. Im Vergleich zu den luftgelagerten Proben bedeutet dies für die Vergleichsmischungen einen Anstieg um 10 %, für die Varianten mit Kunststoff aber eine Verringerung um eben diesen Betrag. Während bei Austrocknung eine zusätzliche Verfestigung durch vermehrt gebildetes Calciumacrylat stattfindet, wirkt sich im Falle der Wasserlagerung der Kunststoff als störend zwischen den Kristallen aus. Frostlagerung ruft einen allgemeinen Festigkeitsanstieg hervor, läßt aber keinen Unterschied zwischen den Betonen erkennen. Der Feuchtigkeitszustand scheint dann gleichsam zu Versuchsbeginn eingefroren. Die niedere Temperatur verhindert nämlich die Feuchtigkeitsabgabe und verursacht ein langsames Kristallwachstum, weshalb man eine höhere Festigkeit erwarten kann. Während der Vergleichsbeton im Falle höherer Temperatur eine Festigkeitsminderung durch Schwind- und Mikrorisse erfährt, trägt der Kunststoff zur Verbesserung der Druckfestigkeit bei, indem die zu Risse führenden Zugspannungen aufgenommen werden. Auch kann länger im Beton verbleibende Feuchtigkeit zu einer Steigerung gegenüber der Nullmischung führen. Wöchentlich wechselndes Klima mit höheren und niederen Temperaturen schädigt den Vergleichsbeton, dessen Risse offenbar nach einem Jahr durch Spannungsumlagerung "verheilen", so daß die Anfangsfestigkeit wieder erreicht wird. Kunststoffzusätze vermindern derartige Schäden, die Druckfestig-

keit steigt sogar. Da der dynamische E-Modul in diesem Falle kleiner wurde, ist zu vermuten, daß diese extreme Beanspruchung auch bei den kunststoffmodifizierten Varianten latente Mikrorisse hervorgerufen haben muß, die bei der Prüfung auf Druckfestigkeit überdrückt und somit nicht erkannt worden sind.

Die allgemeine Steigerung des dynamischen E-Moduls mit der Kunststoffzugabe ist auf eine zunehmende Dichte des Betons und eine vermehrte Bildung von Calciumacrylat zurückzuführen. Während Wasser-Zement-Wert und Kunststoffdosierung die absolute Größe des Kennwertes sonst mitbestimmen, spielen diese Parameter für die Änderung der Resonanzfrequenzen zwischen vorgetrockneten und feuchten Betonen aber keine Rolle. Hier zeigt sich ein Zusammenhang zwischen Feuchtigkeitsgehalt und Trockenrohichte. Aufgrund einer eigens dafür entwickelten komplexen Beziehung kann jetzt der Einfluß auf das elastische Verhalten berechnet werden. Läßt man nämlich den Wassergehalt außer acht, so beträgt der Unterschied zwischen trockenem und feuchtem Material im Gebrauchszustand etwa 10 %. Diese Differenz wird jedoch mit zunehmendem Betonalter geringer und ist nach etwa zwei Jahren ausgeglichen. Bis zum Alter von 6 Monaten erreicht der kunststoffmodifizierte Beton etwa die in der Literatur angegebene Korrelation zwischen dynamischem und statischem E-Modul. Bezieht man jedoch älteren Beton in die Rechnung mit ein, so nähert sich die Regression immer mehr der Geraden, wo die E-Moduln gleich große Beträge annehmen (Verhältnis 1:1). Der Unterschied zwischen den beiden Kennwerten ist zu vernachlässigen, besonders dann wenn man überdies auf den Trockenzustand bezieht. Alter Beton weist kleiner bleibende Verformungen auf als junger. Somit nähern sich auch beim kunststoffmodifizierten die beiden Moduln und die steiler werdende Sekante wird zur Tangente an den Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie. Der Beziehung zwischen Trockenrohichte und Änderung des E-Moduls ist über diesen Rahmen hinaus nicht weiter nachgegangen worden. Man sollte unter Verwendung weiterer Mischungen überprüfen, ob die vorerwähnte komplexe Beziehung entsprechend erweitert werden kann und Allgemeingültigkeit findet.

Im Langzeitversuch können erhöhte Temperatur sowie Temperaturwechsel besonders im Fall der Nullbetone zu sichtbaren Rissen führen, während Kunststoff das verhindert. Darüber hinaus sind die kunststoffmodifizierten Varianten mit höherer Dichte den Klimabelastungen wesentlich besser gewachsen. Nach Normal- und Frostlagerung lassen sich keine Anzeichen für eine Beeinträchtigung des Gefüges feststellen, auch nicht durch den dynamischen E-Modul. Im Gegensatz zur Entwicklung im Klima 20/65 tritt keine weitere Festigkeitssteigerung bei Frostlagerung auf, weil ein Aushärten des Kunststoffes durch die zurückgehaltene Feuchtigkeit nicht stattfindet.

Kunststoffmodifizierte Betone folgen dem für Normalbeton gültigen, von Ross aufgestellten Gesetz über das Kriechen. Zur Extrapolation auf ein gesichertes Endkriechmaß ist jedoch ein Beobachtungszeitraum von mindestens einem Jahr erforderlich, da die Abweichung der errechneten von den gemessenen Werten innerhalb der ersten Zeit besonders groß ist. Mehr Kunststoff führt zu einer höheren Kriechzahl, die jedoch bei der vorliegenden Betonzusammensetzung noch an der unteren Grenze der Werte liegt, die in DIN 1045 /7/ für Normalbeton angegeben sind. Da aber keine Zuordnung zu den in der Norm aufgeführten Parametern möglich ist, wären demnach für diesen Baustoff neue Geltungsbereiche zu definieren, sofern derartige Betone für tragende Funktionen vorgesehen und im Sinne der Norm verwendet werden sollen. Das hohe Kriechmaß kann zwar zum Abbau unerwünschter Zwängungsspannungen führen, inwieweit aber auf Biegung beanspruchte Bauteile sich zusätzlich verformen und Spannungen in der Druckzone auf die Bewehrung umgelagert werden oder in Spannbeton gar eine Verringerung der Vorspannung stattfindet, müßte noch geklärt werden.

Schrifttum

- /1/ Alda, W.:
Zum Schwingkriechen von Beton.
Diss. TU Braunschweig 1978.
- /2/ Alexanderson, J.:
Polymer cement concrete for industrial flooring.
Third International Congress on Polymers in
Concrete, Koriyama, Japan; 13/05/ - 15/05/1981,
pre-prints, vol. I, session 2.18, 358 - 371.
- /3/ Blunk, G.:
Über die Eigenschaften von Kunststoffen und deren
Verarbeitung im Betonbau. Der Bauingenieur 40
(1965) No. 8, 301 - 306.
- /4/ Brunarski, L.:
Recommendations for the use of resonance methods
for testing concrete. Matériaux et Constructions 2
(1969) No. 10, 269 - 273.
- /5/ Chandra, S.; Berntsson L.; Flodin, P.:
Behaviour of calcium hydroxide with styrene -
methacrylate polymer dispersion. Cement and
Concrete Research 11 (1981) No. 1, 125 - 129.
- /6/ Cremer/Heckl:
Körperschall. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg/
New York.
- /7/ DIN 1045:
Beton- und Stahlbetonbau - Ausgabe Januar 1972.
- /8/ DIN 1048:
Prüfverfahren für Beton - Ausgabe Januar 1972.
- /9/ DIN 1164:
Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und
Traßzement, Blatt 7 - Ausgabe November 1978.
- /10/ DIN 52 102:
Bestimmung der Dichte - Ausgabe September 1965.
- /11/ Elastomat 1.024, Gerätebeschreibung und
Bedienungsanleitung des Instituts Dr. Förster,
Reutlingen, 90 pp.
- /12/ Fischer, R.:
Über das Verhalten von Zementmörtel und Beton
bei höheren Temperaturen. Diss. Techn. Hochschule
Darmstadt. Darmstadt 1967.
- /13/ Fowler, W.; Paul, R.:
Status of concrete-polymer materials in the United
States. Third International Congress on Polymers in
Concrete, Koriyama, Japan; 13/05/ - 15/05/1981,
pre-prints, vol. I, session 1.2, 20 - 34.

- /14/ Frondistou-Yannas, S. A.; Shah, S. P.:
Polymer latex modified mortar. ACI Journal (1972)
No. 69 - 7, 61 - 65.
- /15/ Furumura, F.:
Studies on the stress-strain relationship in
compression of concrete at high temperatures.
Trans. Archit. Inst. Japan (1970) No. 174, 1 - 7.
- /16/ Gierloff, M.:
Kunststoffdispersionen auf der Basis von Poly-
acrylsäureestern als Betonzusatzstoff.
Amts- und Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für
Materialprüfung (BAM) 9 (1979) No. 1, 2 - 7.
- /17/ Goens, E.:
Über die Bestimmung des Elastizitätsmoduls von
Stäben mit Hilfe von Biegungsschwingungen. Ann.
Phys., 5. Folge, 11 (1931) No. 6, 649 - 678.
- /18/ Hannant, D. J.:
Strain behaviour of concrete up to 95 °C under
compressive stresses. Conference on Prestressed
Concrete Pressure Vessels, London; 13/03/ -
17/03/1967, London: Institution of Civil Engineers
1968, group C, paper 17, 177 - 191.
- /19/ Harréus, A.:
Synthetic resin dispersions as a mortar and
concrete admixture. First International Congress on
Polymer Concretes, London; 05/05/ - 07/05/1975,
London: Concrete Society et al. 1975, session D,
paper 3, 6 pp.
- /20/ Jones, R.; Facăoăru, I.:
Recommendations for testing concrete by the
ultrasonic pulse method. Matériaux et
Constructions 2 (1969) No. 10, 275 - 284.
- /21/ Jüntgen, H.; Schwuger, M.:
Aussagekraft der Quecksilber-Porosimetrie bei der
Charakterisierung poröser Stoffe.
Chemie-Ing.-Techn. 38 (1966) No. 12, 1271 - 1278.
- /22/ Kasai, Y.; Matsui, I.; Fukushima, Y.:
Physical properties of polymer - modified mortars.
Third International Congress on Polymers in
Concrete, Koriyama, Japan; 13/05/ - 15/05/1981,
pre-prints, vol. I, session 2.4, 162 - 176.
- /23/ Kawano, T.:
Studies on the mechanism for reducing drying
shrinkage of cement mortar modified by rubber
latex. Third International Congress on Polymers in
Concrete, Koriyama, Japan; 13/05/ - 15/05/1981,
proceedings, vol. I, session 2.2, 147 - 162.
- /24/ Kishitani, K.; Kasami, H.:
Effects of elevated temperature exposure on the
properties of concrete. Proceedings of the 1974
Symposium on Mechanical Behaviour of Material,
Kyoto, Japan; 21/08/ - 24/08/1974, 453 - 463.

- /25/ Kordina, K.; Schneider, U.:
Über das Verhalten von Beton unter hohen
Temperaturen. Betonwerk + Fertigteil-Technik 41
(1975) No. 12, 572 - 582.
- /26/ Kordina, K.; Waubke, N. V.:
Die mechanischen Eigenschaften von Schwerbeton bei
hohen Temperaturen. Materialprüf. 14 (1972) No. 8,
239 - 241.
- /27/ Kozłowski, A.; Howanietz, F.:
Entwicklung von Beton mit besonderen Eigenschaften
für Straßenbeläge. Wien: Perlmooser Zementwerke
1980, Forschungsvorhaben Nr. 865.
- /28/ Kreijger, P. C.:
Improvement of concretes and mortars by adding
resins. Matériaux et Constructions 1 (1968) No. 3,
187 - 217.
- /29/ Mangat, P. S.:
Strength and deformation characteristics of an
acrylic polymer-cement composite. Matériaux et
Constructions 11 (1978) No. 66, 435 - 443.
- /30/ Mangat, P. S.; Baggott, R.; Evans, D. A.:
Creep characteristics of polymer modified concrete
under uniaxial compression. Third International
Congress on Polymers in Concrete, Koriyama, Japan,
13/05/ - 15/05/1981, pre-prints, vol. I,
session 2.5, 177 - 192.
- /31/ Manns, W.:
Elastizitätsmodul von Zementstein und Beton. beton
20 (1970) No. 9, 401 - 405; No. 10, 455 - 460.
- /32/ Maréchal, J. C.:
Variations in the modulus of elasticity and
Poisson's ratio with temperature. A.C.I. -
International. Seminar on Concrete for Nuclear
Reactors Berlin, October 1970.
- /33/ Martinček, G.:
Die Bestimmung der Elastizitätsmoduln aus Eigen-
schwingungen von Würfeln und kurzen Prismen.
Acustica 13 (1963) No. 3, 123 - 130.
- /34/ Martinček, G.:
The determination of Poisson's ratio and the dyna-
mic modulus of elasticity from the frequencies of
natural vibration in thick circular plates.
J. Sound Vib. 2 (1965) No. 2, 116 - 127.
- /35/ Mironov, S. A.; Malinskyi, E. N.; Vakhitov M. M.:
Durability assessment criterion for concrete
exposed to dry hot climate conditions. Durability
of Building Materials 1 (1982) No. 1, 3 - 14.
- /36/ Nischer, P.:
Festigkeitsentwicklung und E-Modul in Abhängigkeit
von der Lagerung. Zement und Beton 22 (1977) No. 4,
140 - 144.

- /37/ Nischer, P.; Soretz, S.:
Die Prüfstreuung bei der Bestimmung des E-Moduls von Beton. Forschungsvorhaben des Forschungsinst. Österr. Zementfabrikanten, hrsg. v. Bundesminist. für Bauten und Technik, Wien: 1978, 79 - 91.
- /38/ Okada, K.; Ohama, Y.:
Status of concrete - polymer composites in Japan. Third International Congress on Polymers in Concrete, Koriyama, Japan; 13/05/ - 15/05/1981, pre-prints, vol. I, session 1.1, 3 - 19.
- /39/ Perényi, C.:
Polymer modified mortars. Matériaux et Constructions 1 (1968) No. 1, 13 - 21.
- /40/ Pohl, E.:
Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- /41/ Reynolds, W. N.; Wilkinson, S. J.; Spooner, D. C.:
Ultrasonic wave velocities in concrete. Magazine of Concrete Research 30 (1978) No. 104, 139 - 144.
- /42/ Richtlinien für Versuche zur Beurteilung von Beton-zusatzstoffen mit organischen Bestandteilen. Sachverständigenausschuß für Betonzusatzmittel im Institut für Bautechnik (IfBt) in Berlin, IfBt: Juli 1969.
- /43/ Romberg, H.:
Einfluß der Zementart auf die Porengrößenverteilung im Zementstein. Tonind.-Ztg. 95 (1971) No. 4, 104 - 115.
- /44/ Ross, A. D.:
Concrete creep data. The Structural Engineer 15 (1937) No. 8, 314 - 326.
- /45/ Rostásy, F. S.; Wiedemann, G.:
Festigkeit und Verformung von Beton bei sehr tiefer Temperatur. beton 30 (1980) No. 2, 54 - 59.
- /46/ Roth, H.:
Verwendbarkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls, insbesondere für die Frostbeständigkeit des Betons. Zement und Beton 22 (1977) No. 1, 32 - 35.
- /47/ Schneider, U.:
Kinetische Untersuchungen an Normalbeton unter thermischer Beanspruchung. Betonwerk + Fertigteil-Technik 41 (1975) No. 9, 445 - 449.
- /48/ Schulz, G.:
Die Kunststoffe. Carl Hauser Verlag 1964, München, 2., überarbeitete und ergänzte Auflage, 555 pp.

- /49/ Schwiete, H. E.; Ludwig, U.:
Über die Bestimmung der offenen Porosität im
Zementstein. Tonind.-Ztg. 90 (1966) No. 12,
562 - 574.
- /50/ Schwiete, H. E.; Ludwig, U.; Schroth, G.:
Der Einfluß von Kunststoffdispersionen auf die
Eigenschaften von Zementmörteln. Betonstein-Ztg. 36
(1969) No. 1, 7 - 16.
- /51/ Setzer, M. J.:
Einfluß des Wassergehalts auf die Eigenschaften des
erhärteten Betons in: Schriftenreihe des Deutschen
Ausschusses für Stahlbeton, H. 280, Berlin: Wilh.
Ernst u. Sohn 1977, 43 - 117.
- /52/ Sullivan, P. J.; Poucher, M. P.:
The influence of temperature on the physical pro-
perties of concrete and mortar in the range 20 C to
400 C. Symposium on the effects of temperature on
concrete. Memphis, Tenn., Nov. 1968, Detroit:
American Concrete Institute (ACI), 1971, Spec.
Publ. 25, 103 - 135.
- /53/ Takeda, J.:
Strengths and elasticities of concrete cured for
long periods at temperatures of 40 to 80 °C. A.C.I.
- International. Seminar on Concrete for Nuclear
Reactors, Berlin, October 1970.
- /54/ Teichmann, H.:
Polymer dispersions for cement and concrete. First
International Congress on Polymer Concretes,
London; 05/05/ - 07/05/1975, London: Concrete
Society et al. 1975, session D, paper 2, 14 pp.
- /55/ Timoshenko, S. P.:
On the correction for shear of the differential
equation for transverse vibrations of prismatic
bars. Phil. Mag. 41 (1921), Ser. 6, 744 - 746.
- /56/ de Vekey, R. C.:
The properties of polymer-modified, cement pastes.
First International Congress on Polymer Concretes,
London; 05/05/ - 07/05/1975, London: Concrete
Society et al. 1975, session D, paper 1, 8 pp.
- /57/ de Vekey, R. C.; Majumdar, A. J.:
Durability of cement pastes modified by polymer
dispersions. The VI International Congress on the
Chemistry of Cement, Moscow Sept. 1974, Moscow:
VNIIÉSM des Ministeriums der Bauindustrie der
UdSSR 1974, suppl. paper III-9, 16 pp.
- /58/ Vinkeloe, R.:
Prüfverfahren zur Ermittlung des dynamischen
Elastizitätsmoduls von Betonprismen. Tonind.-Ztg.
86 (1962) No. 10, 272 - 276.

Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/September 1968

Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)
Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/Juli 1970 (vergriffen)

Zum Problem des Feuchtigkeitsschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern
von Dr.-Ing. Götz Andreae

Nr. 3/September 1970 (vergriffen)

Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile
von Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 4/Dezember 1970 (vergriffen)

Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit — Grundlagen und Vergütungsverfahren
von Dr. rer. nat. Arno Burmester

Nr. 5/März 1971

Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken
von Dr. rer. nat. Norbert Steiner

Nr. 6/April 1971

Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen
von Prof. Dr.-Ing. Paul Schneider

Nr. 7/Juli 1971

Chromatographie und chemische Konstitution — Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Petrowitz

Nr. 8/November 1971

Zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Helmut Veith

Nr. 9/November 1971

Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Möller

Nr. 10/Januar 1972

Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode
von Dr.-Ing. Dietmar Aurich und Prof. Dr. phil. Erich Martin

Nr. 11/Februar 1972

Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütwerte beim Brennschneiden
von Dr.-Ing. Hans-Joachim Krause

Nr. 12/Mai 1972

Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren
von Dir. u. Prof. Dr. rer. nat. Hubert Feuerberg

Nr. 13/Juni 1972

Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen 760 und $2 \cdot 10^{-7}$ Torr
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig (Berichter), Prof. Dr.-Ing. Kurt Kirschke, Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig und Dipl.-Phys. Harald Tischer

Nr. 14/Juli 1972

Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz
von Eberhard Fischer

Nr. 15/August 1972

Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Heinz Pohl

Nr. 16/August 1972

Über Ausführung und Aussagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer
von Dr.-Ing. Erwin Knublauch

Nr. 17/August 1972

Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen
von Dr.-Ing. Peter Reimers

Nr. 18/Januar 1973

Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten

Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches

von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 19/Januar 1973

Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. K. Kaffanke und Dr.-Ing. H. Czichos

Nr. 20/April 1973

Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 21/Juli 1973

Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung
Literaturrecherche von Dipl.-Phys. D. Klaffke und Dr.-Ing. W. Maennig

Nr. 22/Juli 1973

Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen
von Dipl.-Ing. R. Rudolphi und Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 23/November 1973

Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen
von Prof. Dr. rer. nat. habil. Walter Ruske

Nr. 24/November 1973

Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung
von Dipl.-Ing. J. Stanke, Ing. grad. E. Klement und Dipl.-Ing. R. Rudolphi

Nr. 25/Dezember 1973

Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen
von Dr.-Ing. E. Knublauch

Nr. 26/August 1974

Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM — Eigenschaften und erste Anwendungen —
von Dipl.-Ing. P. Jost, Dr.-Ing. P. Reimers und Dr.-Ing. P. Weise

Nr. 27/August 1974

Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Hermann Wüstenberg

Nr. 28/August 1974

Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern
von Prof. Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Heinrich

Nr. 29/August 1974

Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelett für senkrechten, schrägen und allseitigen Schalleinfall
von Prof. Dr.-Ing. P. Schneider

Nr. 30/September 1974 (vergriffen)

The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology
von Dr. Horst Czichos und Dr. Geert Salomon

Nr. 31/August 1975

Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung
von Dr.-Ing. Gerhard Fuhrmann

Nr. 32/September 1975

Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen
von Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi und Dr.-Ing. Bernhard Böttcher

Nr. 33/November 1975

Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens
von Dipl.-Ing. Armin Wagner, Dipl.-Phys. Gerhard Kieper und Dipl.-Ing. Reinald Rudolphi

Nr. 34/Januar 1976 (vergriffen)

Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoffen
von Dipl.-Forsting. Dr. rer. sylv. Hans-Joachim Deppe

Nr. 35/Januar 1976

Der Widerstand von Platten, die als Bepankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dipl.-Ing. Ernst Limberger

Nr. 36/Januar 1976 (vergriffen)

Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles
von Dipl.-Ing. Jürgen Hundt

Nr. 37/Februar 1976

Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen — Vorschlag für ein Prüfverfahren —
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 38/Juni 1976

Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4
von Dr.-Ing. Karl-Heinz Habig

Nr. 39/Juni 1976

Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung
von Prof. Dr.-Ing. K. Kirschke und Dipl.-Phys. G. Kempf

Nr. 40/Juni 1976

Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren
von Dr. rer. nat. H. Hantsche

Nr. 41/Okttober 1976

Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten
von Dr. rer. nat. Bernhard Böttcher

Nr. 42/Okttober 1976

Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft
von Dr.-Ing. Siegmund Dietlen

Nr. 43/Okttober 1976

Das Sprödbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 44/November 1976

Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“
von Dipl.-Ing. W. Matthees

Nr. 45/Dezember 1976

Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten
von Dr.-Ing. W. Paatsch

Nr. 46/Mai 1977 (vergriffen)

Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung
Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses
von Dipl.-Ing. Gerald Schickert und Dipl.-Ing. Helmut Winkler

Nr. 47/Juni 1977

Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen
von Dr.-Ing. Arno Plank

Nr. 48/Okttober 1977

Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn
von Dr.-Ing. U. Holzlöhrner

Nr. 49/Dezember 1977

Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung
von Dr.-Ing. Günther Wittig

Nr. 50/Juni 1978 (vergriffen)

Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern
von Prof. Dipl.-Phys. Norbert Czaika, Dipl.-Phys. Norbert Mayer, Dipl.-Ing. Claus Amberg, Dipl.-Ing. Götz Magiera, Dr.-Ing. Götz Andreae und Dipl.-Ing. Winfried Markowski

Nr. 51/Juni 1978

Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungsstoffen
von Dr. rer. nat. J. Sickfeld

Nr. 52/August 1978

Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung
von Dr.-Ing. Aleksandar Tomov

Nr. 53/Okttober 1978

Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge
von Rolf Günter Rohrmann und Reinald Rudolphi

Nr. 54/Okttober 1978

Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Harro Sander

Nr. 55/November 1978

Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 %-Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke

Nr. 56/Januar 1979

Stabilität von Sandwichbauteilen
von Dipl.-Ing. W. Brünner und Prof. Dr.-Ing. C. Langlie

Nr. 57/März 1979

Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpulverprüfung
Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing
von Dipl.-Ing. Meinhard Stadthaus

Nr. 58/März 1979

Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau
von Dr.-Ing. Werner Struck

Nr. 59/Juli 1979

Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl
von Dr.-Ing. Günther Plauk

Nr. 60/August 1979

Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken
von Dr.-Ing. H. Spreckelmeyer, Dr.-Ing. R. Helms und Dr.-Ing. J. Ziebs

Nr. 61/Dezember 1979

Beschreibung von Problemen der höheren Farbmeterik mit Hilfe des Gegenfarbensystems
von Dr. Klaus Richter

Nr. 62/Dezember 1979

Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle
von Dir. u. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Gerisch und Prof. Dr. habil. Dr. h. c. Günther Becker

Nr. 63/Dezember 1979

Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase
von Dipl.-Ing. E. Behrend und Dipl.-Ing. J. Ludwig

Nr. 64/Februar 1980

Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung
von Dr.-Ing. Werner Rücker

Nr. 65/Februar 1980

Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte
von Dr.-Ing. Peter Schmidt, Dr.-Ing. Dietmar Aurich, Dr.-Ing. Rolf Helms, Dr.-Ing. Helmut Veith und Dr.-Ing. Josef Ziebs

Nr. 66/Mai 1980

Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung
von Dr. rer. nat. Martin Hattwig

Nr. 67/Mai 1980

Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees

Nr. 68/Mai 1980

Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Steormeißtechnik.
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisions-Goniometers
von Dr. rer. nat. Dieter Petersohn

Nr. 69/Juni 1980

Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitschillen (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise
von Dr.-Ing. Frank Buchhardt und Dipl.-Ing. Peter Brandl

Nr. 70/August 1980 (vergriffen)

Schwellenwerte beim Betondruckversuch
von Dr.-Ing. Gerald Schickert

Nr. 71/August 1980

Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen
von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees und Dipl.-Ing. Götz Magiera

Nr. 72/September 1980

Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi

- Nr. 73/November 1980
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfvorschriften und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen
von Dipl.-Ing. Peter Wegener
- Nr. 74/November 1980
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz
von Dr.-Ing. Reinald Rudolphi und Dipl.-Inform. Renate Müller
- Nr. 75/November 1980
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen
von Dir. u. Prof. Dr. Hans-Jürgen Heinrich
- Nr. 76/November 1980
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegebelastung im Rasterelektronenmikroskop
von Dr.-Ing. Dieter Klaffke und Prof. Dr.-Ing. Wolfgang-Werner Maennig
- Nr. 77/April 1981
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen
von Dipl.-Ing. Michael Gierloff und Dr.-Ing. Matthias Maultzsch
- Nr. 78/September 1981
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwelensystems mit dem Untergrund
von Dr.-Ing. Werner Rücker
- Nr. 79/Dezember 1981
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltrißneigung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch
von Dr.-Ing. Volker Neumann
- Nr. 80/Dezember 1981
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten
von Dr.-Ing. Arno Plank, Dr.-Ing. Werner Struck und Dr.-Ing. Manfred Tzschätzsch
- Nr. 81/Dezember 1981
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik
von Dipl.-Ing. Jürgen Schmidt
- Nr. 82/April 1982
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test
von Rolf Helms, Hans-Joachim Kühn und Siegmund Ledworowski
- Nr. 83/Juli 1982
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen — Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen —
von Prof. Dr.-Ing. Horst Czichos und Dr.-Ing. Paul Feinle
- Nr. 84/Juli 1982
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)
von Dipl.-Inform. Renate Müller und Dr.-Ing. Reinald Rudolphi
- Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/Oktober 1982
Technische Materialforschung und -prüfung — Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ — Materials Research and Testing — Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme „Basic Technological Research“ —
von Prof. Dr. Horst Czichos
- Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/November 1982
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale
von Dr.-Ing. Konrad Niesel und Dr. rer. nat. Peter Schimmelwitz
- Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/Dezember 1982
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren
von Dr.-Ing. Bernd Isecke und Dr.-Ing. Wolfgang Stichel
- Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/Februar 1983
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall
von Dr.-Ing. Anton Erhard
- Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/April 1983
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid
von Dr. rer. nat. Dietrich Conrad und Dr.-Ing. Siegmund Dietlen
- Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/April 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/April 1983
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz
von Dr.-Ing. Michael Weber
- Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/August 1983
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden
von Dipl.-Ing. Lutz Auersch
- Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/August 1983
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen
von Dr. rer. nat. Peter Studt
- Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/August 1983
Untersuchungen der Störschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen
von Dr.-Ing. Xian-Quan Dong
- Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/August 1983
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten
von Dr.-Ing. Manfred Römer
- Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/Oktober 1983
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken
von Dr.-Ing. Heinz Eifler
- Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/November 1983
Typische Bruchflächenausbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung
von Dipl.-Ing. Gerhard Fuhrmann und Prof. Dr. rer. nat. Wolfram Schwarz
- Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/Dezember 1983
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschenwaren — Stretch- und Erholungsvermögen —
von Dr. rer. nat. Edmund Schnabel
- Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/Dezember 1983
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members
von Dr.-Ing. Klaus Brandes, Dipl.-Ing. Ernst Limberger und Dipl.-Ing. Jürgen Herter
- Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/Januar 1984
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand
von Günter Klamrowski und Paul Neustupny
- Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/Februar 1984
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie
von Dr.-Ing. Peter Reimers, Dr. rer. nat. Jürgen Goebbels, Dr.-Ing. Heinrich Heidt, Dr.-Ing. Hans-Peter Weise und Dipl.-Phys. Kay Wilding
- Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/März 1984
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton
von Dr.-Ing. Götz Magiera
- Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/März 1984
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien
von Dr.-Ing. Dierk Schnitger
- Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/April 1984
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen
von Dr.-Ing. Michael Gierloff

