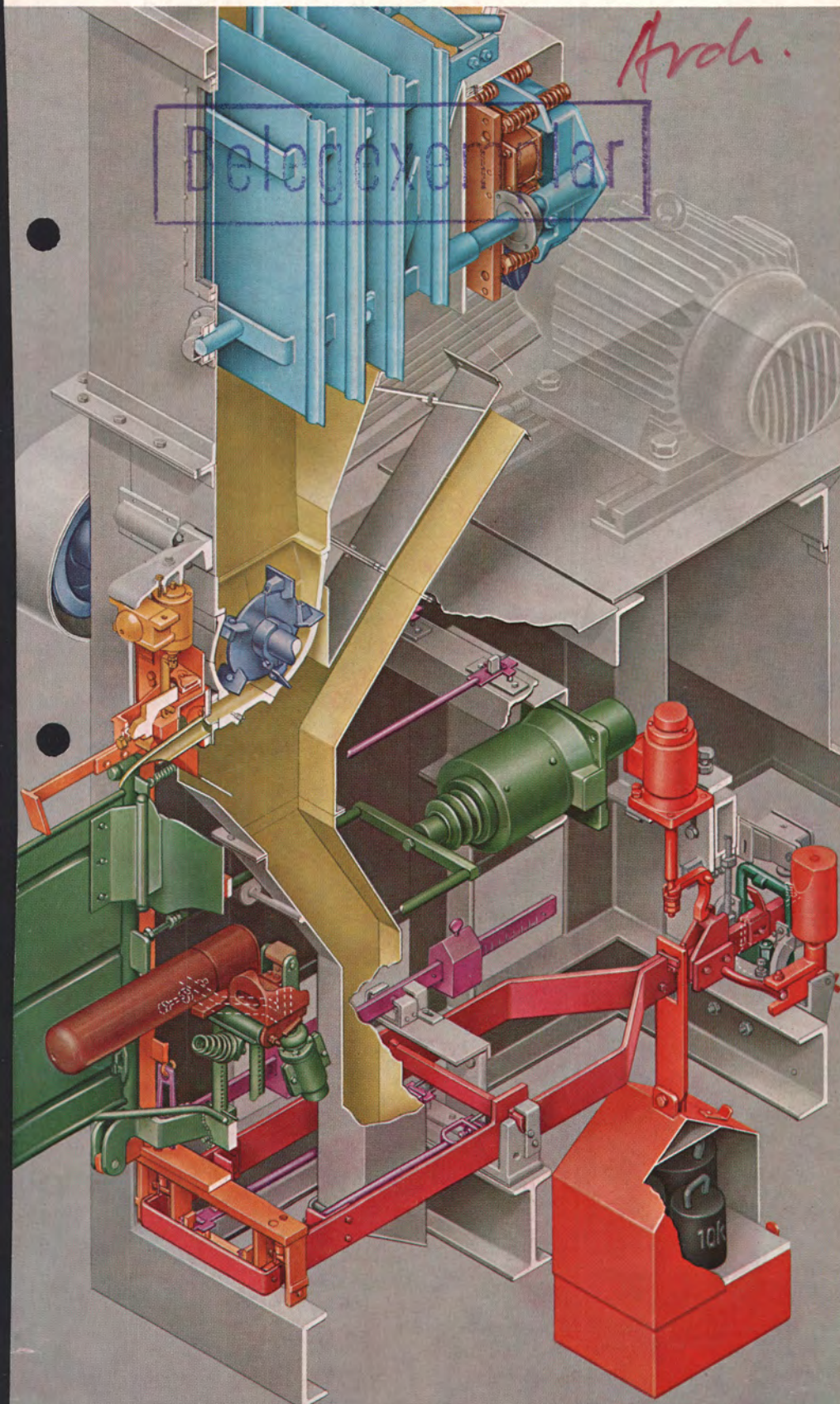


ZEMENT-KALK-GIPS

ZKG

FORSCHUNG · HERSTELLUNG · VERWENDUNG

4 April 1973 · 26. Jahrgang
(62. Jahrgang -Zement-)



Eine Entwicklung wurde zum Maßstab

In den Zementwerken der Welt ist die HAVER-Ventilsack-Packmaschine führend. Das technische Prinzip wurde zum weltweiten Erfolg und Maßstab einer Entwicklung.

Unübertroffen ist die HAVER-Maschine auch heute noch durch ihre

**robuste Konstruktion,
einfache Bedienung,
hohe Leistung,
lange Lebensdauer.**

Sie wird ständig verbessert und stets auf den technisch neuesten Stand gebracht. Auch ein eingespielter Ersatzteil- und Kundendienst sorgt dafür, daß der Vorsprung gehalten wird.

Es gibt Maschinen, die der HAVER-Maschine verblüffend ähnlich sind, aber es gibt nur eine

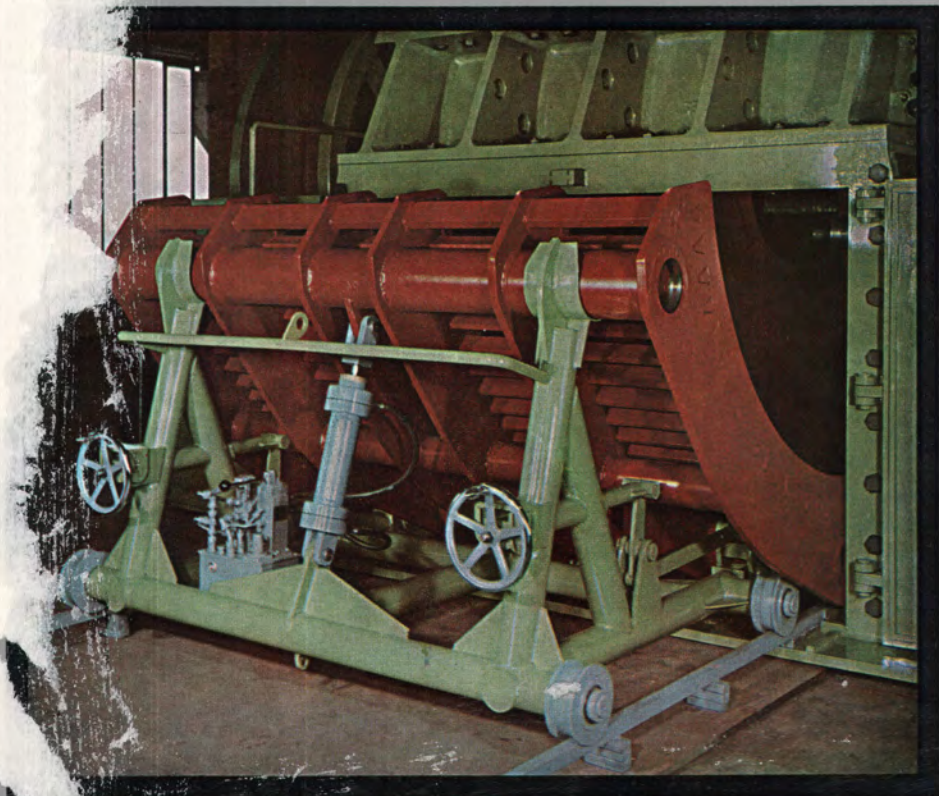
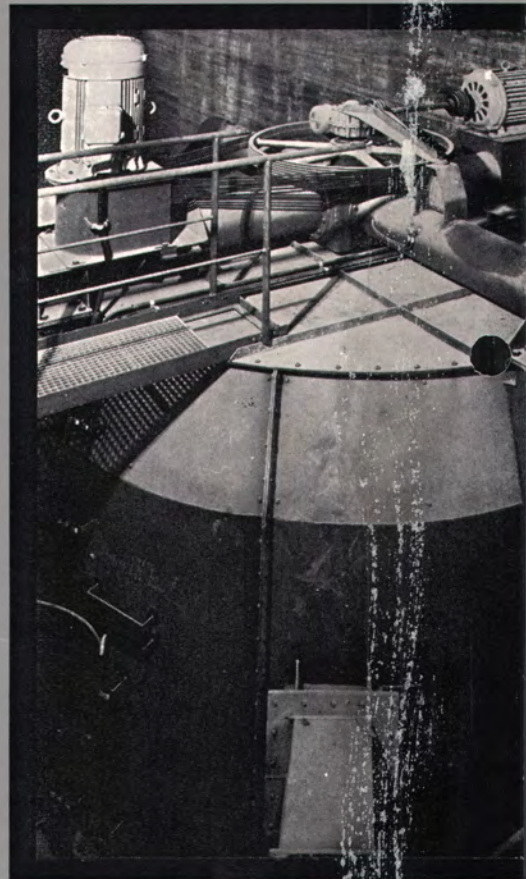
**Original
HAVER-Packmaschine,**

die sich seit fast 50 Jahren im In- und Ausland bewährt hat. Mehr als 4.000 Anlagen sind der Beweis dafür.

Es gibt keine bessere Packmaschine. Sonst würden wir sie bauen.

HAVER & BOECKER

474 OELDE 1 Westfalen · Postfach 163



Mammutbrecher ●

Einwellen-Hammerbrecher (Bild links oben) für die Zerkleinerung von Kalkstein, Dolomit, Gips, Kohle und anderen mittelharten Gesteinen.

Großes Schwungmoment ermöglicht einstufige Zerkleinerung von Aufgabegut mit über 2 500 mm Kantenlänge auf unter 30 mm. Hoher Feinanteil unter 1 mm im gebrochenen Gut.

Unempfindlich gegen Eisenteile im Aufgabegut durch zweckmäßige Ausbildung des Brechraumes.

Beschickung durch schweres Plattenband in freitragender Konstruktion. Optimaler Durchsatz durch automatische Regelung der Plattenbandgeschwindigkeit über Leistungsaufnahme des Brechermotors.

Hydraulische Rostkorb-Anstellvorrichtung zur Spaltveränderung zwischen Hammer und Rostkorb.

Rostkorbausziehwagen mit hydraulischer Hubvorrichtung (Bild links unter) zum schnellen und mühelosen Wechsel der symmetrischen Rostkorbhälften.

Baugrößen des Mammut-Brechers für Durchsatzleistungen bis 1 700 t/h.

Einige physikalische Eigenschaften der Kunststoff-Betone

Some physical properties of plastics-based concretes

Quelques propriétés physiques des bétons plastiques

Von R. Bareš, Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften, Prag/ČSSR

Mit diesem Beitrag wird die Serie von Untersuchungen über die praktischen Ergebnisse der an Kunststoff-Betonen im Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik der Tschechoslowakischen Akademie der Wissenschaften ausgeführten Forschungsarbeiten beendet. Er enthält Angaben über Volumenveränderungen im Verlauf der Erhärtung, Volumenveränderungen ausgehärteter Kunststoff-Betone durch den Einfluß von Temperatur, Feuchtigkeit, Kohäsion der Kunststoff-Betone mit Bewehrung, Adhäsion der Kunststoff-Betone an Beton, Widerstandsfähigkeit der Kunststoff-Betone unter verschiedenen Umständen u. a.

1. Einleitung

So wie die vom Autor früher angeführten^{1, 2, 3)} technologischen und elastischen Eigenschaften der Kunststoffbetone durch charakteristische, von anderen traditionellen Werkstoffen unterschiedliche Merkmale gekennzeichnet sind, kann man ausgeprägte Eigenheiten auch in den übrigen physikalischen Eigenschaften finden. Zusammenfassend lassen sich die Kunststoff-Betone nach ihren Eigenschaften mit keinen bisher verwendeten Werkstoffen vergleichen, sie bilden eine besondere Klasse. Vom Makrostruktur-Standpunkt aus ähneln sie den seit langem verwendeten agglomerierten Systemen, wie z. B. Elementbeton, aber gerade die markante Verschiedenheit der Eigenschaften beider Phasen — des Bindemittels und des Füllstoffes — verleiht dem Ganzen einige neue Charakterzüge. Die im Institut für Theoretische und Angewandte Mechanik ausgeführten Forschungsarbeiten beweisen, daß die Eigenschaften der Kunststoff-Betone überwiegend vom Makrostruktur-System abhängen, und daß es nicht sehr auf die Sorte des verwendeten Harzes ankommt. So wie in den früheren Arbeiten^{1, 2, 3)} wurden für das Bindemittel wieder Epoxidharze verwendet (tschechoslowakisches Erzeugnis Epoxi — ChS 1200, in dem das Äquivalent der Epoxidgruppen annähernd 0,3 auf 100 g Harz beträgt, mit Gehalt von 5% Dibutylphthalat), Polyesterharze (tschechoslowakisches Erzeugnis Polyester ChS 104, in dem der Gehalt an ungesättigtem Polyester ca. 70% ist, wobei der Rest Styrol bildet), Phenolformaldehydharze (tschechoslowakisches Erzeugnis Umacol B, das ist Phenolformaldehyd-Polykondensat des Resoltyps in Acetonlösung, mit durchschnittlichem Gehalt der Harzkomponenten in der Trockenmasse von 72%) und schließlich Furofural-Harze (tschechoslowakisches Erzeugnis ChS Balit FA5, das ist Furfuryl-Alko-

hol-Polykondensat mit Gehalt von 5% Furfurylaldehyd). Für den Füllstoff wurde trockener Elbe-Quarzsand in Naturmischung bis 7 mm mit folgender Körnung (gemäß dem Verhältnis der Sieböffnung in mm und dem Rückstand auf diesem Sieb in Gewichtsprozenten) verwendet: 7/0; 4/7,7; 2/10; 1/9,4; 0,5/32; 0,25/36,2; 0,10/4,4; 0,10/0,3. Die Menge des Bindemittels war im Gewichtsverhältnis zum Füllstoff verschieden: 1:1, 1:5, 1:10, 1:15, 1:20, 1:30, 1:40. Die Verarbeitung, Nachbehandlung und Prüfung aller Körper war einheitlich.

2. Volumenveränderungen im Verlauf der Erhärtung

Die Volumenveränderungen des Bindemittels bei seiner Aushärtung (Polymerisation, Polykondensation) sind die Ursachen der Volumenänderungen auch des ganzen Systems — des Kunststoff-Betons. Die Volumenveränderungen des Kunststoff-Betons sind gewöhnlich wesentlich kleiner als die Volumenveränderungen des Bindemittels allein, und sie sind auch zeitlich einigermaßen verzögert. Die Volumenveränderungen des Bindemittels im System verursachen örtliche, scharfe Spannungskonzentrationen an der Stoßstelle mit den Füllstoffkörnern; außerdem entstehen infolge der Fixierung des aus Kunststoff-Beton hergestellten Körpers (Elements, Konstruktion) Spannungen im Körper als in einem Ganzen.

Bei der Polymerisation oder Polykondensation des Bindemittels kommt es zu einer reihenmäßig in Prozenten ausgedrückten Schwindung des Volumens. Dieses Schwinden übt im Bindemittel eine Zugspannung aus, die sogar ein Mehrfaches seiner Festigkeit erreichen kann; es kommt zu Mikrostörungen im Bindemittel und zur Verringering seiner integralen Festigkeit und ferner insbesondere seiner Dauerhaftigkeit. Den ungünstigen Spannungszustand verbessert einigermaßen die hohe Relaxationsfähigkeit der Harze. Die Füllstoffkörner werden zusammengedrückt, was vom Standpunkt der Erhöhung ihrer Kohäsion mit dem Bindemittel günstig ist.

Das Schwinden der Kunststoff-Betone ist nur ein Bruchteil (weniger als ein Drittel) der Schwindung des Bindemittels und direkt (keineswegs linear) proportional der Menge des Bindemittels im System. Der Zeitverlauf des Schwindens ist abhängig von einer Reihe von Umständen: Zusammensetzung des Bindemittels (insbesondere Sorte und Menge des Härters sowie des Beschleunigers), Bedingungen der Umgebung (Temperatur, Feuch-

the observations made in the early nineteen-sixties that fat powdered quicklime showed different flow behaviour in the loading and discharging of bulk transporter vehicles. A working group specially set up for the purpose by the Technical Committee undertook the investigation of the question why pneumatic discharge times are sometimes excessively long and how this can be remedied.

Some technical shortcomings liable to result in such behaviour were detected. On the other hand, however, it was found again and again that particular lime products do indeed have poor flow properties. This phenomenon was increasingly observed in soft-burnt quicklimes. By modifying the surface condition of the lime with grinding aids it proved not only possible to improve the grinding properties of this lime, but also to obtain better flow behaviour in the finished product.

The problem of predicting the flow behaviour that could be expected was more difficult, as this behaviour was found sometimes to change quite fundamentally during transport or intermediate storage. It has hitherto not been possible to make a quantitative assessment of the precise causes, such as the effects that sudden changes in temperature and atmospheric humidity and, in certain circumstances, electrical charge have upon the surface condition of the lime. Thus it has not yet proved feasible to devise a testing method which can provide a sufficiently accurate description of this behaviour.

It is accordingly endeavoured to present some basic conceptions with regard to these parameters. Whereas for theoretical purposes it may be most suitable to measure the shearing forces in a bulk material for describing the cohesive forces, for purposes of works control the most effective indication is obtained from observing the free outflow of the powdered lime from a specific receptacle.

Résumé

Il y a longtemps que la problématique de l'écoulement des produits en vrac dans les silos est connue. Dans ce domaine, on a pu constater des relations entre la granularité, la répartition granulaire et les caractéristiques spécifiques à la matière du produit en vrac considéré. Au début des années 60, on observait pour la première fois un phénomène nouveau pour l'industrie de

la chaux. Au cours du chargement ou du déchargement des véhicules-citernes, il arrive que la chaux blanche pulvérulente s'écoule de manière différente. Un groupe de travail constitué spécialement par la Commission Technique à cet effet se penche sur la question de savoir pourquoi des durées de vidange prolongées sont parfois nécessaires.

Quelques défauts techniques pouvant conduire à ce comportement ont été précisés. Par ailleurs, il a été constaté à diverses reprises que certaines chaux ont réellement de mauvaises caractéristiques d'écoulement. Ce phénomène a été observé de plus en plus sur des chaux de cuisson ménagée. En agissant sur la surface de la chaux à l'aide d'adjuvants de broyage, on n'a pas seulement amélioré les caractéristiques de broyage de cette chaux, mais bien aussi les qualités d'écoulement du produit fini.

Il était plus difficile de faire des prévisions en matière de comportement à l'écoulement, car celui-ci se modifiait parfois totalement pendant le transport ou pendant un stockage intermédiaire. Une estimation quantitative exacte de l'influence, par exemple de brusques modifications de température ou d'humidité de l'air sur la surface des particules de chaux, ou encore de charges électriques dans les grains n'est pas possible jusqu'ici. De même aucune méthode d'essais n'a été trouvée qui puisse représenter avec assez de précision ce comportement de la chaux.

C'est pourquoi, la tentative de représentation fondamentale de ces grandeurs d'influence est entreprise.

Alors que, dans le domaine des considérations techniques, la mesure des forces de gravité agissant sur un produit en vrac reste ce qu'il y a de plus approprié pour la description des forces de cohésion, en ce qui concerne la surveillance de fonctionnement, l'observation de l'écoulement fluide hors d'un récipient défini de chaux pulvérulente restera comme précédemment le meilleur moyen à mettre en oeuvre.

Schrifttum

- 1) Rumpf, H.: Grundlagen und Methoden des Granulierens. Chemie-Ing.-Techn. 30 (1958), 144.
- 2) Batel, W.: Forsch.-Bericht NRW Nr. 282, Düsseldorf.
- 3) Jenike, A. W.: Quantitative design of mass-flow-bins. Powder Technol. 1 (1967), 237.
- 4) Imse, W.: Messung der Fließfähigkeit von Zement. Zement-Kalk-Gips 25 (1972), 147.

tigkeit), Wärmekapazität des Füllstoffes usw. Die Beendigung des Schwindens kann man nach der vollständigen Beendigung der während der Aushärtung verlaufenden Polymerisations- oder Polykondensationsreaktion erwarten. Bei einem schnellen Verlauf der Reaktion kommt es zu einer wesentlich größeren Schwindung als bei einem langsamen Verlauf der Reaktion, die demgegenüber von größeren Innenspannungen im Bindemittel selbst begleitet ist. Es kommt dabei auf die Geschichte der Entstehung der einzelnen Makromolekularketten an. Die Geschichte der Entstehung des Aushärtens des Harzes ist ein entscheidender Faktor für eine Reihe weiterer Eigenschaften des Kunststoff-Betons (Abhängigkeit der Festigkeit von der Temperatur, Kriechverformung, Dauerfestigkeit usw.).

Das sind die Gründe, warum man den Schwindungsverlauf und die Umstände, die den größten Einfluß auf ihn haben, u. U. die Möglichkeiten seiner Beeinflussung untersuchen muß. Die experimentelle Bestimmung der Volumenveränderungen bei der Erhärtung ist jedoch sehr schwierig, und man muß sich also mit nur annähernden Werten begnügen, die die Bestimmung der Relationen ermöglichen. Fehler entstehen infolge der Unsicherheit bei der Definition des Messungsbegins (im Hinblick auf den Gesamtwert der Schwindung), infolge der Unbestimmtheit des Einflusses der Größe des Körpers, des Einflusses der Größe, des Materials und der Wärmekapazität der Form, und sie entstehen bei der Anwendung der eigentlichen Meßmethoden. Außerdem werden die Polymerisationsvolumenveränderungen durch Temperaturänderungen infolge der Exothermie der Reaktion beeinflusst. Da jedoch der Aushärtungsverlauf bei verschiedenen Harzen verschieden schnell ist und die Messung nach Ablauf von 24 Stunden nach der Herstellung (nach der Methode von L'Hermite) begonnen wurde, wird bei verschiedenen Kunststoff-Betonen ein unterschiedlicher Teil der gesamten Volumenveränderung erfaßt, und ihr Vergleich ist unter diesem Gesichtspunkt nur mit einer gewissen Reserve möglich.

In Bild 1 ist der Verlauf des Gesamtwertes der linearen Schwindung bei der Erhärtung verschiedener Kunststoff-Betone, nach Ablauf von 24 Stunden seit der Herstellung der Proben, in Abhängigkeit von der Zusammensetzung des Gemisches angeführt. Der Beginn der Messung des Schwindens sollte eher als von der Zeit von der erreichten Polymerisationsstufe abhängen, die z. B. mittels der Festigkeit, Härte, Dämpfungsfähigkeit oder anders bewertet wird. Es ist ersichtlich, daß es zu einer markanten Änderung des Schwindungswertes im Bereich der Gemische von 1:5 bis 1:10 gemäß dem Gewicht, d. h. im Übergangsbereich, im zweiten Bereich gemäß der Porosität, kommt. Sobald sich aus dem segregierten Füllstoff im Harz ein zusammenhängendes Aggregat bildet, ist die Schwindung des Ganzen deutlich niedriger und entspricht nur der Schwindung der Summe der Verbindungsbrücken auf der gemessenen Länge. Mit dem Abnehmen des Bindemittels ändert es sich dann nur noch wenig. Die absoluten Schwindungswerte bei praktisch verwendbaren Gemischen (etwa 1:10) bewegen sich um 1 ‰ herum. Man ersieht auch, daß schon eine verhältnismäßig kleine Menge des segregierten Füllstoffes (z. B. eine gleiche Menge des Bindemittels, d. h. bei Gewichtsverhältnis 1:1) den Wert der Schwindung des Harzes allein stark (auf einen Bruchteil) verringert.

3. Volumenveränderungen nach der Aushärtung

Die Volumenveränderungen der Kunststoff-Betone nach der Aushärtung werden vor allem durch Änderungen ihrer Temperatur und ihrer Sättigung durch Wasserdämpfe verursacht.

Bei der Prüfung der Wärmedehnbarkeit, die eine große Bedeutung nicht nur vom Standpunkt des Verhaltens des

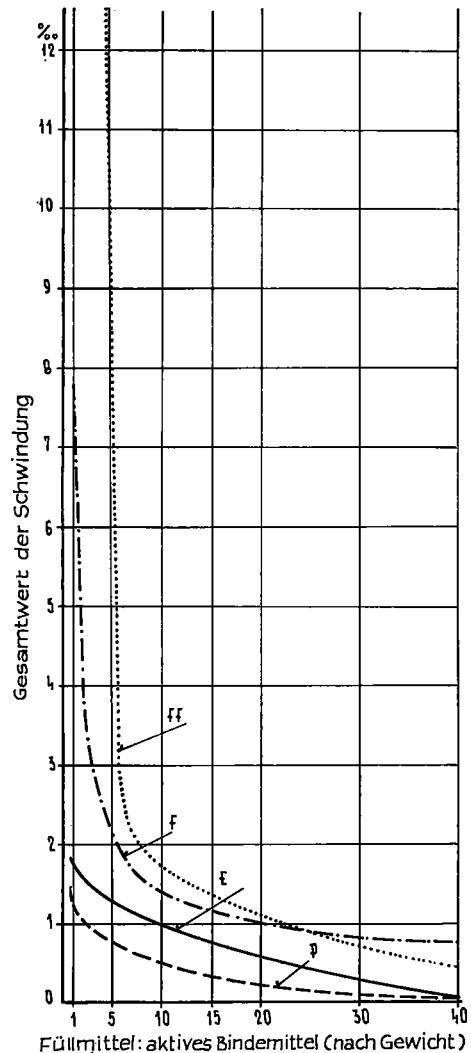
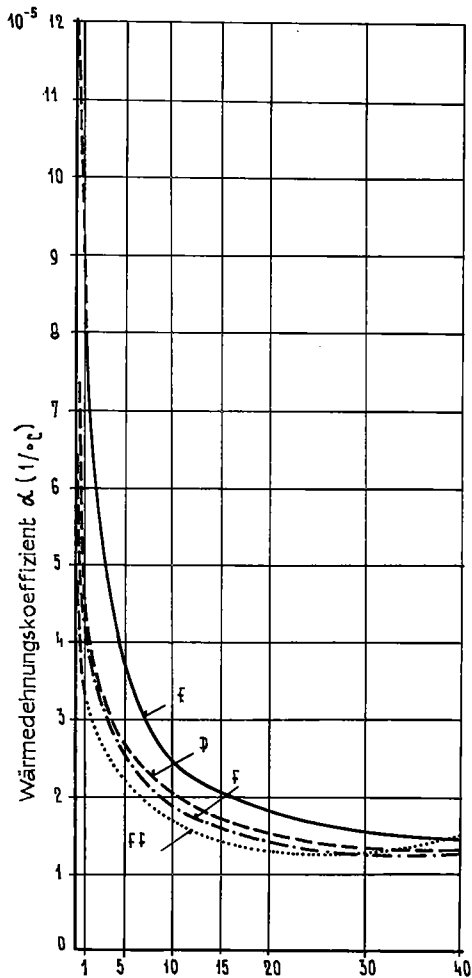


Bild 1: Abhängigkeit des Gesamtwertes der linearen Schwindung bei Erhärtung verschiedener Kunststoff-Betone auf die Zusammensetzung des Gemisches (E/Expoxi-, P/Polyester-, F/Furofural-Berol), FF/ Phenolformaldehyd-Kunststoffbeton)

Materials als eines Systems (z. B. in der Konstruktion), sondern auch unter dem Gesichtspunkt des inneren Spannungszustandes infolge der Konzentrationen an der Grenze hat, ging man von der Grundlänge des Körpers bei 20° C und 35 ‰ RF (relativer Feuchtigkeit) für höhere Temperaturen als 20° C und von der Grundlänge des Körpers bei 20° C und 90 bis 95 ‰ RF für Temperaturen unter 20° C aus. Die Temperatur wurde vorerst schrittweise um je 10° C bis auf 80° C erhöht, bei nachfolgender Senkung der Temperatur auf 20° C wurde die relative Feuchtigkeit geändert, und hierauf wurden weiter die Temperaturen um je 10° C bis auf -30° C erniedrigt. Es folgte die Rückkehr auf die Ausgangstemperatur von 20° C und 90 ‰ RF und ferner in zwei Stufen auch die Rückkehr zur ursprünglichen relativen Feuchtigkeit von 35 ‰.

Bei den einzelnen Kunststoff-Betonen (bis auf den Phenolformaldehyd-Kunststoff-Beton) unterscheidet sich der Verlauf der Wärmedehnkoeffizienten für positive und negative Temperaturen nicht zu sehr und man kann ohne größeren Fehler im ganzen Temperaturbereich von -30° bis +80° C nur mit einem einzigen durchschnittlichen Koeffizienten α rechnen. Alle Kunststoff-Betone unterscheiden sich außerdem nicht sehr voneinander (insbesondere bei den praktisch verwendbaren Gemischen), in bezug auf den absoluten Wert sowie auf den Verlauf des durchschnittlichen Koeffizienten α , wie man aus Bild 2



Füllmittel: aktives Bindemittel (nach Gewicht)

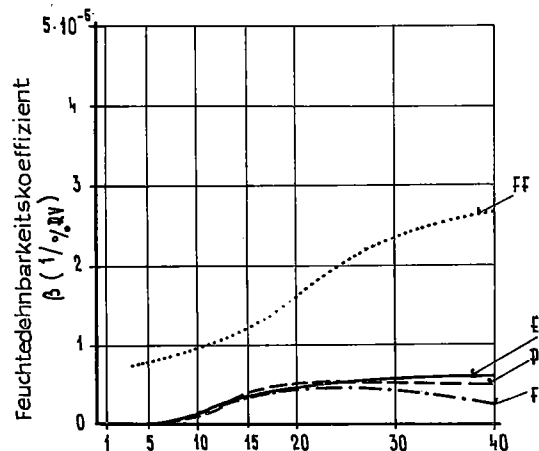
Bild 2: Abhängigkeit des Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener Kunststoff-Betone von der Zusammensetzung des Gemisches

ersieht. Die höchsten absoluten Werte α weist Epoxid-Kunststoff-Beton auf; die übrigen haben einen annähernd gleichen Wert.

Aus dem Verlauf des Koeffizienten α geht deutlich hervor, daß sich gefüllte Bindemittel nicht für die Verwendung in der Funktion von Baustoffen eignen. Eine Reihe von bautechnischen Mißerfolgen läßt sich eben durch die Verwendung gefüllter Bindemittel (Anstriche, Spachtelstoffe u. ä.) in Zusammenarbeit mit traditionellen Materialien (Beton, Stahl) erklären. Gemische mit Bindemittel-Überschuß (gefüllte Bindemittel) haben mehrfach höhere Wärmedehnungskoeffizienten α , als z. B. dieser für Beton beträgt.

Gebundene Füllstoffe haben im Gegenteil einerseits einen wesentlich kleineren absoluten Wert des Koeffizienten α ($2,7$ bis $1,4 \cdot 10^{-5}$), und er ändert sich andererseits sehr wenig mit der Zusammensetzung des Gemisches und mit der Sorte des Bindemittels. Er nähert sich dem Wärmedehnungskoeffizienten des verwendeten Steingemisches eher als dem Koeffizienten des reinen Harzes. Er unterscheidet sich also auch nicht zu sehr vom Koeffizienten üblicher Baustoffe (Stein $0,7$ bis $2,5 \cdot 10^{-5}$, $1,2$ bis $2,0 \cdot 10^{-5}$, Stahl $1,2 \cdot 10^{-5}$), und man kann daraus schließen, daß die Adhäsion der Kunststoff-Betone an Beton oder ähnlichen Werkstoffen mit Rücksicht auf die guten rheologischen Eigenschaften der Kunststoff-Betone nicht durch den vorhandenen Unterschied der Wärmedehnungskoeffizienten bedroht wird. Andererseits kann man, falls die Kunststoff-Betone großen Temperaturänderungen ausgesetzt sind, gewisse Strukturstörungen an der Stoßstelle der festen Phasen nicht ausschließen (infolge des

immer beträchtlich verschiedenen Koeffizienten des Bindemittels, z. B. des Epoxidharzes 9 bis $13,5 \cdot 10^{-5}$, des Polyesterharzes 6 bis $11 \cdot 10^{-5}$, des Phenolformaldehyd-Harzes 8 bis $10 \cdot 10^{-5}$, des Furof-Furalharzes 4 bis $7 \cdot 10^{-5}$, und des Füllstoffes mit $0,7$ bis $2,5 \cdot 10^{-5}$). Entscheidend ist, ob nach anfänglicher Störung der Struktur des Systems, nach der sog. internen Lockerung, ein Beharrungszustand entsteht, d. h. ob bei mehrfacher Wiederholung des Temperaturstoßes keine weiteren Störungen eintreten. Die guten rheologischen Eigenschaften der verwendeten Bindemittel in Verbindung mit den bisherigen Erfahrungen sprechen dafür, daß bei Gemischen außerhalb des ersten Bereiches, also bei gebundenem Füllstoff, ein solcher Beharrungszustand wirklich entsteht. Es verbleibt aber die Tatsache, daß sich bei derart beanspruchten Kunststoff-Betonen ihre Widerstandsfähigkeit gegen aggressive Einflüsse (insbesondere bei der Entstehung von Salzen) und dadurch ihre gesamte Dauerhaftigkeit verringert. Aus dem Vergleich der Wärmedehnungskoeffizienten α der ver-



Füllmittel: aktives Bindemittel (nach Gewicht)

Bild 3: Abhängigkeit des Feuchtedehnbarkoeffizienten verschiedener Kunststoff-Betone von der Zusammensetzung des Gemisches

wendeten Bindemittel (Harze) und des Füllstoffes zeigt sich von diesem Standpunkt aus als günstigster der Furof-Fural-Kunststoff-Beton (Berol).

Der Feuchtigkeitskoeffizient β hat in bezug auf den Ablauf sowie auf den absoluten Wert für alle Kunststoff-Betone einen ähnlichen Verlauf (Bild 3). Der Feuchtigkeitskoeffizient β wird ähnlich definiert wie α : er bedeutet die relative Längenänderung bei einer Änderung der relativen Feuchtigkeit der Umgebung um 1% . Im ersten Bereich mit nicht kommunizierender Porosität verursacht eine Feuchtigkeitsänderung keine Volumenveränderung des Kunststoff-Betons. Eine Volumenveränderung ist kenntlich vom Beginn des zweiten Übergangsbereiches, wo der Koeffizient β das Maximum $0,5 \cdot 10^{-5}$ erreicht und sich weiter nicht mehr ändert. Die absoluten Werte der Längenänderungen können nicht vernachlässigt werden. So z. B. entspricht beim Gemisch $1:20$ einer Änderung der relativen Feuchtigkeit um 60% eine Längenänderung von $0,3\%$, die also einen gleichen Wert aufweist wie bei einer Temperaturänderung um annähernd 15°C .

4. Wasseraufnahmevermögen und Durchlässigkeit

Das Wasseraufnahmevermögen der Kunststoff-Betone ist ein wichtiges Charakteristikum für ihre Dauerhaftigkeit. Es ist gleichfalls ein direkter Richtwert der Stufe der kommunizierenden Porosität. Es wurde durch die Sättigung von Proben aus Kunststoff-Betonen mit destilliertem Wasser bis zur Erreichung eines konstanten Gewichts bestimmt. Es zeigte sich, daß es ohne Rücksicht auf die Sorte des verwendeten Bindemittels zur vollen

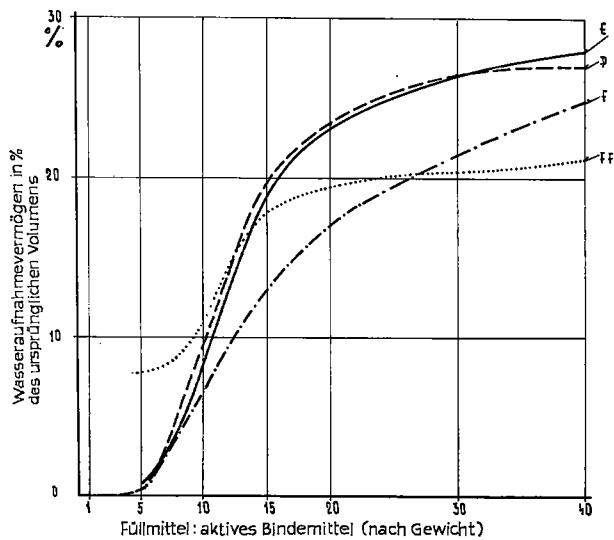


Bild 4: Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens (als Maßstab der kommunizierenden Porosität) verschiedener Kunststoff-Betone von der Zusammensetzung des Gemisches

Sättigung nach etwa 20 Tagen kommt, und zwar in gleichem Maß für alle Gemische. Die gewonnenen Ergebnisse der Wasseraufnahme, ausgedrückt in Prozenten des ursprünglichen Volumens (berechnet aus der Gewichtsänderung — Bild 4) bestätigten die vorher festgestellte Einteilung der Gemische gemäß der Porosität in drei Bereiche. Im ersten Bereich mit nicht kommunizierender Porosität (gefülltes Bindemittel, etwa bis zu 1:5 bis 1:7) kommt es praktisch zu keinem Ansaugen von Flüssigkeit. Im zweiten Übergangsbereich, in dem kommunizierende Poren entstehen, vergrößert sich schnell die Wasseraufnahme, während sie im dritten Bereich (etwa vom Verhältnis 1:12 an) schon annähernd konstant bleibt. Der Beginn des zweiten Intervalls ist gleichfalls durch das größte Raumgewicht charakterisiert.

In Übereinstimmung mit der (drucklosen) Wasseraufnahme steht natürlich auch die Durchlässigkeit: bei einem Gemisch im ersten und teilweise im zweiten Bereich gemäß den Hohlraumvolumen sind die Kunststoff-Betone völlig undurchlässig, wie durch Versuche an Kuchen mit 15 cm Durchmesser und 5 cm Dicke bis zu einem Wasserdruck von 25 atm nachgewiesen wurde. Auch andere Probekörper in der Form einer kreisförmigen Platte mit 4,5 cm Durchmesser und 1 cm Dicke wiesen die gleichen Eigenschaften sowohl für Wasser als auch für technisches Benzin auf. Gemische mit geringerer Bindemittelmenge, d. h. im zweiten und dritten Bereich gemäß den Hohlraumvolumen (bis zu einem Verhältnis von 1:35) werden durch Behandlung mit einem oder zwei Anstrichen aus demselben Harz, aus dem das Bindemittel besteht, gleichfalls vollkommen undurchlässig (bei Prüfung bis zu 25 atm). Dabei ist es wichtig, daß es zur Verbindung der Anstriche mit dem Kunststoff-Beton auch durch chemische Bindungen kommt, so daß eine Befürchtung, daß wie bei der Anwendung desselben Anstriches z. B. auf Beton, Mauerwerk u. ä. ein Abblättern eintreten könnte, völlig unbegründet ist. Man kann dadurch verhältnismäßig billig eine vollkommene Undurchlässigkeit und Dauerhaftigkeit unter den Bedingungen eines aggressiven Mediums oder bei wechselnder Temperatur erreichen. Die Festigkeiten des Kunststoff-Betons erniedrigen sich dabei bei einer geringeren Bindemittelmenge (wie früher¹⁾ bereits erwähnt) nicht wesentlich.

Ein weiterer guter (mit dem Durchlässigkeitsgrad verbundener) Maßstab der Dauerhaftigkeit ist die Widerstandsfähigkeit gegen wiederholtes Gefrieren und Auftauen. Das ausgeführte Experiment, bei dem Probekörper verschiedener Zusammensetzung 50 Zyklen des Gefrierens auf -17 bis -22°C und Auftauens in Wasser

von $+8$ bis $+10^{\circ}\text{C}$ unterzogen wurden, zeigte, daß sich die Dauerhaftigkeit eines wiederholt dem Frost ausgesetzten Kunststoff-Betons, sofern er porenfrei ist, nicht verringert. Die relativen Längen- sowie Gewichtsänderungen nach 50 Zyklen können bei Gemischen im ersten Bereich vernachlässigt werden; sie betragen etwa $0,1\text{‰}$ der Länge und $0,1\text{‰}$ des Gewichts; bei Gemischen mit teilweise oder völlig kommunizierender Porosität betragen die Längenänderungen etwa 1‰ , die Gewichtsänderungen $2\text{—}10\text{‰}$. Bei Gemischen mit kommunizierender Porosität kommt es zu einer zunehmenden Makrostrukturstörung, die eine Verringerung der Festigkeit bis auf ungefähr 30‰ des ursprünglichen Wertes (nach 50 Zyklen) zur Folge hat.

5. Kohäsion mit der Stahlbewehrung

Ein wesentlicher Faktor für die Ausnutzung der Kunststoff-Betone als eines Konstruktionswerkstoffes ist ihre Kohäsion mit der Bewehrung. Diese Eigenschaft ist im Gegensatz zu den meisten vorhergehenden fast ausschließlich eine Funktion der Sorte des verwendeten Bindemittels und einer Adhäsionseigenschaft am Stahl. Die Adhäsion der Polymere (Polyaddukte) und daher die Kohäsion der aus ihnen gefertigten Kunststoff-Betone ist durchweg hoch, und sie ermöglicht eine unbeschränkte Ausnutzung sämtlicher übriger Eigenschaften beider Komponenten der Kompositen. Bei Polykondensaten ist die Adhäsion zur Bewehrung niedriger, und sie wurde deshalb durch eine Reihe von Experimenten mit Furan-Kunststoff-Beton (Berol) an Druckproben überprüft, bei denen die Bewehrung aus einem auf eine feste Unterlage gestützten Prisma herausgezogen wird (pull-out tests). Diese Prüfung gibt am besten reproduzierbare Ergebnisse, obgleich man die gewonnenen Festigkeitswerte in der Kohäsion mit Rücksicht auf den gegenüber gebogenen bewehrten Elementen unterschiedlichen Spannungszustand nicht als absolute betrachten kann. Die durch diese Prüfung gewonnenen Werte sind etwas kleiner als beim wirklichen Spannungszustand und liegen daher auf der sicheren Seite.

Die Kohäsion des Berols wurde in der Zusammensetzung 1:8 und 1:15 (Gewichtsverhältnis des Bindemittels zum Füllstoff) zu normaler Bau-Rundstahlbewehrung von 5, 7, 10 und 16 mm an Proben mit Abmessungen $10 \times 10 \times 40$ cm ermittelt. Es wurde sowohl die Kohäsionsspannung (Haftspannung) bei der ersten Verschiebung am unbelasteten Ende als auch die durchschnittliche Grenzspannung in der Kohäsion (bei Bruch durch Herausziehen oder Durchreißen der Bewehrung) bestimmt. Beide Spannungen sind nur wenig abhängig vom Querschnitt der Bewehrung sowie von der Zusammensetzung des Gemisches. Die durchschnittliche Grenzspannung (Festigkeit) in der Kohäsion (bei Erreichen der Streckgrenze des Stahls) betrug $16,0\text{ kp/cm}^2$, die Spannung bei der ersten Verschiebung war ca. 75‰ der Grenzspannung. Das Verhältnis der Haftfestigkeit zur Biegezugfestigkeit beträgt $0,15\text{—}0,25$, zur Druckfestigkeit $0,03\text{—}0,06$. Es zeigte sich jedoch, daß die Haftfestigkeit bei ungenügendem Aushärtungsgrad jäh absinkt.

Mit Hilfe anderer Versuche wurde auch die Dauerfestigkeit bzw. das Fließen (creep) in der Kohäsion beobachtet (Bild 5). Die durchschnittliche Haftfestigkeit erreichte bei dieser Ermittlung einen etwas höheren Wert als bei der Kurzzeitprüfung, etwa $28,5\text{ kp/cm}^2$. Bei dieser Beanspruchung kam es zum Bruch nach 8 bis 12 Monate dauernder Belastung.

Die häufige Frage, ob es nicht zur Korrosion der Stahlbewehrung innerhalb des Kunststoff-Betons durch Einwirkung von Restmengen der Härter kommt, wurde durch eine mikroskopische Dauerbeobachtung der Bewehrung im Furan-Kunststoffbeton beantwortet, dessen

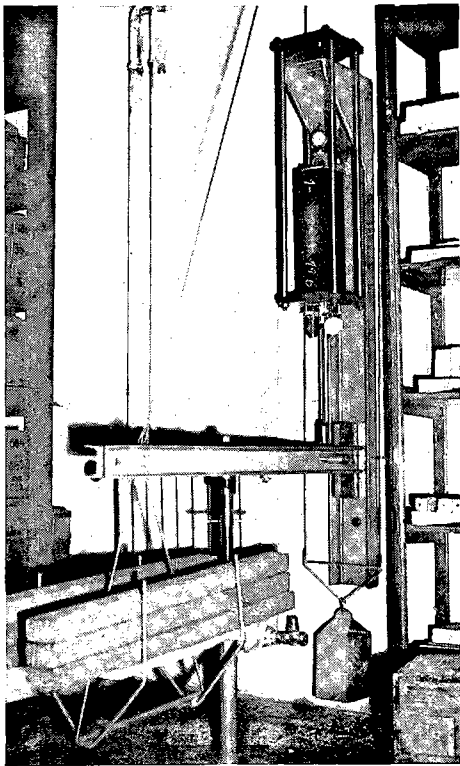


Bild 5: Anordnung einer Langzeitprüfung der Kohäsion des Kunststoff-Betons mit der Stahlbewehrung

Härter auf Stahl die stärkste Korrosionswirkung im Vergleich mit den übrigen beobachteten Kunststoff-Betonen ausübt. Es zeigte sich, daß es in begrenztem Maß zu einer Korrosion kommt: nach fünf Jahren kam es zu einer durchschnittlichen Korrosionstiefe von 0,037 mm (gemessen an einem Durchmesser von 10 mm), so daß man daraus auf eine Dauerhaftigkeit von mindestens 40 Jahren schließen kann, unter der Voraussetzung einer linearen Korrosionsgeschwindigkeit in der Zeit bis zu Reduktion des Bewehrungsquerschnittes auf 50 % des ursprünglichen Wertes.

6. Adhäsion des Kunststoff-Betons an normalem Beton

Bei dieser Eigenschaft ist der Charakter der chemischen Reaktion der Aushärtungssubstanz und schließlich auch des ausgehärteten Kunststoff-Betons entscheidend. Bei alkalisch ausgehärteten Werkstoffen, wie z.B. Epoxidharz, ist die Adhäsion an der alkalischen Betonoberfläche so vollkommen, daß sie die reine Zugfestigkeit des Betons in allen Fällen übersteigt. Dieser Umstand wird vorteilhaft bei modernen Methoden der Prüfung der reinen Zugfestigkeit an Prismen verwendet, mit Hilfe von Verlängerungsköpfen, die durch Epoxid auf die Prüfkörper aufgeklebt und dann in die Backen der Prüfmaschine eingeklemmt werden. Demgegenüber ist die Adhäsion z.B. bei einem sauer ausgehärteten Furan-Kunststoff-Beton bedeutend geringer. Es wurde deshalb eine Reihe

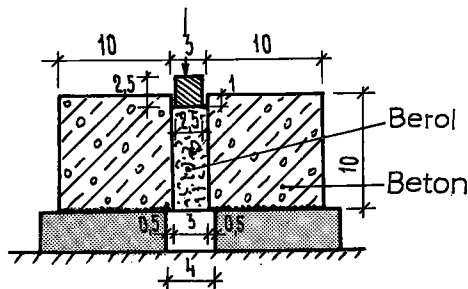


Bild 6: Anordnung eines Abscherversuches für die Bestimmung der Adhäsion des Kunststoff-Betons an normalem Beton

von Versuchen zur Bestimmung des Wertes der Adhäsion dieses Kunststoff-Betons am Beton sowie zur eventuellen Modifizierung dieses Wertes durch vorübergehende Maßnahmen ausgeführt. Beim Schubversuch gemäß Bild 6 wurden die durchschnittlichen Werte der Adhäsion an der glatten Oberfläche von Beton aus einer Stahlform, ohne weitere Behandlung von 5 bis 14 kp/cm² gemäß den weiteren Umständen (Temperatur, Feuchtigkeit, Zementgehalt des Betons sowie Gehalt der Kunststoff-Betone usw.) ermittelt. Der Höchstwert von 25 kp/cm² wurde nach vorhergehendem Anstrich der Stoßfuge mit Epoxidharz erreicht. Andere Prüfungen bewiesen, daß der Wert der erreichten Adhäsion für die praktische Ermittlung des Zusammenwirkens von Beton mit Berol ausreichend



Bild 7: Art des Bruches eines gedrückten Berol-Beton-Berol-Komposits (bei gleicher Gesamtdeformation)

ist; so z. B. zeigt Bild 7 die Art des Bruches einer Zusammenstellung von Berol mit Beton bei Druckbeanspruchung durch gemeinsame Gesamtdeformation. Bei der Prüfung eines gebogenen Stahlbetonelements mit einer Berolschicht auf der gezogenen Seite (mit einer Dicke von 14 % der Höhe des Betonquerschnittes) kam es gleichfalls in keinem Fall zu einer Abtrennung der Kunststoffbetonschicht vom Beton sowohl bei Bruch durch Zerdrücken des Betons als auch bei Schubbruch. Die Adhäsion mußte daher auch in diesem Fall größer sein als 10 kp/cm².

Die Adhäsion des Betons am fertigen Berol ist infolge der neutralen Reaktion der Beroloberfläche höher als im entgegengesetzten Fall; sie erreicht einen durchschnittlichen, aus einem Schubversuch gewonnenen Wert von 15 kp/cm², der völlig ausreichend ist.

7. Chemische Widerstandsfähigkeit der Kunststoff-Betone

Die chemische Widerstandsfähigkeit der Kunststoff-Betone ist von zwei Grundfaktoren abhängig: von der Sorte des verwendeten Bindemittels sowie Füllstoffes und vom Porositätsgrad (oder vom Verhältnis des Bindemittels zum Füllstoff). Für undurchlässige Kunststoff-Betone hängt sie nur von der chemischen Widerstandsfähigkeit des Bindemittels und in geringerem Maße auch des Füllstoffes ab. Für Systeme mit kommunizierender Porosität wird die Beständigkeit außer der unmittelbaren chemischen Einwirkung aggressiver Reagenzien durch

die physikalische Einwirkung bei der Entstehung von Salzen in den Poren stark beeinflusst. Die Innenstruktur des Systems wird stufenweise analog zerstört wie bei Frosteinwirkung mit nachfolgender Verringerung der Materialfestigkeit bis zum eventuell völligen Zerfall.

Von den beobachteten Kunststoff-Betonen zeichnet sich Furan-Kunststoff-Beton durch die höchste chemische Widerstandsfähigkeit aus (Säuren, Alkalien, aliphatische Kohlenwasserstoffe, mit Ausnahme von Oxydationsreagenzien). Die verschiedenen spezifischen Widerstandsfähigkeiten kann man durch gewisse Modifikationen oder Kopolymere gewinnen.

8. Widerstandsfähigkeit gegen UV-Strahlung

So wie alle Plaste sind auch die Kunststoff-Betone gegen Altern durch Einwirkung der UV-Strahlung empfindlich. In dieser Hinsicht sind Epoxid-Kunststoffbetone am vorteilhaftesten; diesen Vorzug verdanken sie der ausgezeichneten relativen Widerstandsfähigkeit der meisten Epoxidharze. Man fand, daß die Wirkung der UV-Strahlung auf Kunststoffbetone von der Zusammensetzung 1:8 an stark erniedrigt wird, und daß sie bei Epoxid-Kunststoff-Betonen vernachlässigt werden kann, da ihre Beständigkeit nicht verringert wird.

Die Wirkung des inerten Füllstoffes im Gemisch ist daraus klar zu ersehen.

9. Schlußfolgerung

Die früheren^{1, 2, 3)} sowie die hier angeführten Erkenntnisse beweisen zusammenfassend, daß man Kunststoff-Betone als gleichwertiges und oft einzig dastehendes Isoliermaterial für Konstruktionen im Bauwesen verwenden kann. Man muß jedoch bei ihrem Entwurf und ihrer Fertigung unbedingt von ihren spezifischen Eigenschaften ausgehen und auf ihre Unterschiede von anderen Werkstoffen achten, um den vollen Erfolg ihrer Verwendung zu sichern.

Zusammenfassung

Als Ergänzung zu den vorhergehenden Aufsätzen über die Eigenschaften der Kunststoff-Betone sind in dieser Arbeit Angaben über einige ihrer weiteren physikalischen Eigenschaften angeführt. Es werden die Volumenveränderungen während des Aushärtens infolge einer Polymerisations- oder Kondensationsreaktion beschrieben, die in üblichen Fällen ca. 1 bis 2 ‰ nicht überschreiten. Ferner wurden die Volumenveränderungen ausgehärteter Kunststoff-Betone durch Einfluß der Änderungen von Temperatur und Feuchtigkeit ermittelt; die Koeffizienten der linearen Wärmedehnbarkeit α bewegten sich um $2,0 \cdot 10^{-5}$, die Koeffizienten der linearen Feuchtigkeitsdehnbarkeit β betragen annähernd $0,5 \cdot 10^{-5}$.

Es wurden ferner das Wasseraufnahmevermögen, die Durchlässigkeit und die damit eng zusammenhängende Frostbeständigkeit sowie die gesamte Beständigkeit der Kunststoff-Betone beobachtet. Es wurde nachgewiesen, daß sie bei geschlossener Porosität unfähig zur Wasseraufnahme, undurchlässig und frostbeständig sind.

Die Kohäsion mit der Bewehrung und die Adhäsion an anderen Materialien hängt stark von der Sorte des verwendeten Harzes ab. Für Konstruktionszwecke sind diese Eigenschaften durchweg ausreichend.

Die chemische Widerstandsfähigkeit ist eine Funktion der Sorte des verwendeten Harzes und Füllstoffes sowie des Porositätsgrades des Materials. Die Einwirkung der UV-Strahlung wird durch den auf das Harz selbst gerichteten Einfluß des Füllstoffes wesentlich reduziert. Im Hinblick auf die chemische Widerstandsfähigkeit ist der Furan-Kunststoffbeton am vorteilhaftesten, im Hinblick auf die Beständigkeit gegen UV-Strahlung der Epoxi-Kunststoffbeton.

Summary

Some further information on the physical properties of plastics-based concretes, complementary to that contained in the previous articles, is presented here.

The volume changes occurring during the curing as a result of a polymerisation or condensation reaction are described. In normal cases such changes do not exceed about 1 to 2 ‰. Also, the volume changes of cured plastics-based concretes under the influence of changes in temperature and humidity were determined. The coefficient of linear thermal expansion α was found to be around 2.0×10^{-5} , while the coefficient of linear moisture expansion β was approximately 0.5×10^{-5} .

Furthermore, the water absorption capacity, the permeability and the closely associated frost resistance were studied. The overall durability of these concretes was likewise investigated. It was shown that with closed pores they are incapable of water absorption, are impermeable and are resistant to frost action.

The bond to the reinforcement and adhesion to other materials depend to a great extent on the type of resin employed. For structural purposes these properties are altogether adequate.

The chemical resistance is a function of the type of resin and filler employed and also of the porosity of the material. The action of ultraviolet radiation is substantially reduced by the effect of the filler upon the resin itself. From the viewpoint of chemical resistance the most advantageous is furane-based concrete; epoxy-based concrete has the best resistance to ultraviolet rays.

Résumé

En complément des articles précédents traitant des caractéristiques des bétons plastiques, les présent travail apporte des informations concernant quelques autres propriétés physiques de ces bétons. L'auteur décrit les changements de volume pendant le durcissement par suite d'une réaction de polymérisation ou de condensation. Ces changements ne dépassent pas 1 à 2 ‰ environ dans les cas habituels. Par ailleurs, des changements de volume ont été constatés sur des bétons plastiques durcis par suite de l'influence des variations de température et d'humidité. Les coefficients de dilatation linéaire par effet de chaleur se situent aux environs de $2,0 \cdot 10^{-5}$ alors que ceux de dilatation linéaire par effet d'humidité approchent $0,5 \cdot 10^{-5}$.

L'auteur a également observé la capacité d'eau, l'étanchéité et la résistance au gel qui y est liée étroitement, ainsi que la résistance en général des bétons plastiques. Il est démontré qu'à pores fermés ces bétons n'absorbent pas d'eau, sont étanches et résistent bien au gel.

La cohésion avec l'armature et la adhérence à d'autres matériaux dépendent beaucoup de la nature de la résine utilisée. Ces propriétés sont toutes assez bonnes pour une utilisation dans la construction.

La résistance aux agents chimiques est fonction de la nature de la résine mise en oeuvre, des matériaux de charge, ainsi que du taux de porosité du matériau. L'action des rayonnements UV est considérablement réduite par l'influence exercée par la charge sur la résine elle-même. En ce qui concerne la résistance aux agents chimiques, le béton plastique au furfurole est le plus indiqué, alors que le béton plastique époxy résiste mieux aux rayonnements UV.

Schrifttum

- 1) Bareš, R.: Über die Technologie der Kunststoff-Betone, Zement-Kalk-Gips 20 (1967), 47.
- 2) Bareš, R.: Über Elastizität und Festigkeit von Kunststoff-Betonen, Zement-Kalk-Gips 22 (1969), 462.
- 3) Bareš, R.: Temperaturbeeinflussung der Elastizität und Festigkeit von Kunststoff-Betonen, Zement-Kalk-Gips 25 (1972).

Festigkeitssteigerung von Zement durch zusätzliche Ettringitbildung

Strength increase of cement by additional ettringite formation

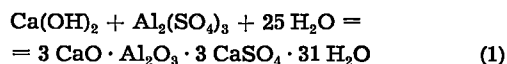
Augmentation des résistances du ciment par formation supplémentaire d'ettringite

Von J. Simeonov und N. Djabarov, Sofia/Bulgarien

Ettringit kann durch verschiedene Rohstoffe gebildet werden, aber seine drei Komponenten CaO, SO₃ und Al₂O₃ müssen mindestens zum Teil löslich sein und in der flüssigen Phase genügend Konzentration haben, um sein Entstehen zu ermöglichen.

Die Herstellungsmethode von Ettringit ist seit W. Michaelis¹⁾ bekannt, sie wurde später noch von mehreren Forschern benutzt. Bei dieser Methode geht man von einer Lösung von Aluminiumsulfat und Kalk, mit oder ohne Zusatz von Gips, aus. Der so gewonnene Ettringit ist mit dem durch Hydratation der Klinkerminerale in Gegenwart von Gips²⁾ identisch.

Es ist notwendig, die Kalkkomponente allmählich aufzutreten zu lassen, damit die Bildung des Ettringits überwiegend erfolgt, nachdem der Zementmörtel angemacht und verformt ist. So kann er nur im ruhigen Zustand der Masse ein für die Struktur nützlich Skelett bilden und nicht einzelne ungebundene Kristalle. Für diesen Zweck eignet sich sehr das bei der Hydratation des Zements abgespaltene Kalkhydrat. Seine Wechselwirkung mit dem in Form einer Lösung hinzugegebenen Aluminiumsulfat kann man mit folgender Gleichung darstellen:



Bei dieser Reaktion wurde der günstige Einfluß des Calciumchlorids für die Erhöhung der Festigkeit des Zements festgestellt. Um eine Wechselwirkung zwischen beiden Zusätzen in größerem Maße möglichst zu verhindern, löst man sie getrennt in kleineren Mengen von Anmachwasser auf.

Nach Ansicht einiger Autoren³⁾ zerstört das Calciumchlorid den Ettringit, aber die meisten sind der Meinung, daß es nicht zerstörend wirkt, sondern sogar dazu beiträgt, ein stabileres und besser geformtes Calciumaluminiumsulfathydrat zu gewinnen⁴⁻⁷⁾.

Unter dem Einfluß des gemeinsamen Zusatzes von Aluminiumsulfat und Calciumchlorid tritt während der ersten Periode der Erhärtung ein höherer Grad der Hydratation des Zements ein.

Um nicht zu einem zu schnellen Erstarren, einem Treiben des Zements und erhöhter Korrosion der Stahleinlagen zu kommen, wurde der gemeinsame Zusatz nur in kleineren Mengen verwendet.

Es sei auch auf andere Untersuchungen verwiesen, bei denen ein größerer Zusatz von Aluminiumsulfat allein oder zusammen mit Aluminiumstaub, Sulfitablauge, Calciumchlorid⁸⁾ oder mit Aluminiumstaub, Sulfitablauge, Calciumnitrat, Calciumnitrit⁹⁾ oder mit Alaun, Calciumsulfat, Aluminiumhydroxyd¹⁰⁾ verwendet wurde, um Zemente von größerer Quellung herzustellen.

Rohstoffe

Die mineralogische Zusammensetzung der Zemente ist in Tabelle 1 angegeben. Die Menge des Gipses betrug ungefähr 2%, berechnet als SO₃. Zement III war etwa drei Monate abgelagert.

Der Standardquarzsand hatte einen SiO₂-Gehalt von über 99% und eine Korngröße von 0,74 bis 1,39 mm.

Aluminiumsulfat und Calciumchlorid waren technische Produkte.

TABELLE 1
Mineralogische Zusammensetzung der Zemente

Bezeichnung	Zusammensetzung in Gew.-%			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	2	3	4	5
Z I	64,30	15,32	7,61	9,60
Z II	66,40	13,33	5,83	9,30
Z III	65,96	14,22	4,45	11,16

Zusammensetzung des Zementmörtels und Art der Versuchskörper

Zur Bestimmung der Erstarrungszeit wurde Zementpaste von Normenplastizität im Vicat-Gerät verwendet. Für die verschiedenen Zementarten betrug der Wasserbedarf: Z I 25%, Z II 28%, Z III 26%.

Zur Prüfung der Druckfestigkeit wurden Zementsandmörtel 1:3 mit den angegebenen Wassermengen hergestellt und daraus 7-cm-Würfel nach den bulgarischen Zementnormen eingeschlagen. Nach 24 Stunden kamen diese aus den Formen und lagerten weiter an der Luft oder unter Wasser.

Zur Untersuchung der Volumenbeständigkeit dienten ebenfalls Zementsandmörtel 1:3, aber mit 50% Wasser,