

# Strukturanalyse von Beton

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 13

**bast**

# **Strukturanalyse von Beton**

## **Entwicklung eines Verpreßverfahrens mit fluoreszierendem Harz**

von

Hans-Peter Gatz  
Peter Gusia

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 13**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A – Allgemeines
- B – Brücken- und Ingenieurbau
- F – Fahrzeugtechnik
- M – Mensch und Sicherheit
- S – Straßenbau
- V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74–76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44-0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 88204:**  
Entwicklung eines Verpreßverfahrens mit fluoreszierendem Harz zur Strukturanalyse von Beton

**Herausgeber:**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon (0 22 04) 43-0  
Telefax (0 22 04) 43-6 74

**Redaktion:**  
Referat Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag:**  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 9 45 44-0  
Telefax (04 71) 9 45 44 77

ISSN 0943-9293  
ISBN 3-89429-767-0

Bergisch Gladbach, November 1996

## Kurzfassung · Abstract · Résumé

### Strukturanalyse von Beton

Die Erhaltung von Bauwerkssubstanz im Zuge von Verkehrswegen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die wirtschaftliche Optimierung der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen erfordert die frühzeitige Erkennung von Schäden, die Abschätzung von Schadensentwicklungen, die Vermeidung von Schadensvergrößerungen und die planmäßige und wirtschaftliche Vermeidung oder Beseitigung von Schäden.

Der Hauptanteil der Finanzmittel wird für Arbeiten an Betonoberflächen verwendet. Um eine dauerhafte Instandsetzung zu erzielen, ist vor der Einleitung der notwendigen Maßnahmen eine Schadensanalyse durchzuführen, die die Kenntnis der Struktur des vorliegenden Betons voraussetzt. Die bisherigen Verfahren haben u. a. den Nachteil, daß das Verpreßharz nicht ausreichend tief in die Proben eindringt.

Zielsetzung dieses Projekts ist die Entwicklung eines neuen Verpreßverfahrens, mit dem die vorhandene Betonstruktur von Bauwerken bis in größere Tiefen zu erfassen und leichter und besser zu analysieren ist.

Das Verpreßverfahren mit fluoreszierendem Harz ermöglicht die Analyse an ungestörten Proben. Mit diesem Verfahren können nahezu alle weiteren porösen Materialien verpreßt werden, also auch Naturstein für den Denkmalschutz und Asphaltbeton im Straßenbau. Das mit Harz verpreßte Porensystem kann unter dem Mikroskop bei ultraviolettem Auflicht sichtbar gemacht und so Hohlräume, Poren und Risse abgebildet werden.

### Structural analysis of concrete

The maintenance of the substance of structures on highways is gaining increasingly in importance. If maintenance measures are to be economically optimized in terms of scheduling and execution, damage must be detected at an early stage, the development of damage estimated, spread of damage prevented and the damage repaired in a scheduled and economically efficient manner.

The largest part of the funds are used for work on concrete surfaces. If repairs are to be carried out in such a way that their effect will last, an analysis of the damage must be carried out before the initiation of the measures necessary, based on knowledge of

the structure of the concrete in question. The methods used up to the present time have – amongst other things – the disadvantage that the injection resin does not penetrate deeply enough into the cores.

The objective of this project was to develop a new injection method with the aid of which the existing structure of the concrete can be registered down to greater depths and the results then analyzed in a simpler and better manner.

The injection method with fluorescing resin makes it possible for undisturbed samples to be analyzed. With the aid of this process nearly all other porous materials can be grouted such as natural rock where monuments are to be protected and asphaltic concrete in the highway field. The pore system as injected with the resin can be made visible under the microscope with ultraviolet light so that cavities, pores and cracks can be shown.

### Analyse structurale de béton

Maintenir en bon état la substance des ouvrages de l'infrastructure routière est une tâche qui gagne de plus en plus en importance. Si l'on veut optimiser du point de vue économique la réalisation des mesures d'entretien, il faut que les dommages soient détectés le plus tôt possible, que leur développement soit évalué et leur prolifération évitée. En plus, il faut veiller à ce que la prévention et la réparation des dommages soient bien organisées, en observant les impératifs économiques.

La plus grande partie des moyens financiers est attribuée aux travaux à réaliser dans le domaine des surfaces en béton. Afin d'assurer que l'effet des mesures de réparation soit durable, il faut, avant de prendre les mesures nécessaires, procéder à une analyse des dommages ce qui présuppose que la structure du béton en question soit connue. Les procédés utilisés à cet effet jusqu'à l'heure actuelle présentent, entre autres, le désavantage que les résines d'injection ne pénètrent pas assez profondément dans les échantillons.

L'objectif de ce projet est de développer une nouvelle méthode d'injection capable de pénétrer plus profondément dans la structure, permettant ainsi une analyse plus facile et de meilleure qualité.

Avec la méthode d'injection de matières résineuses fluorescentes il est possible d'analyser des échan-

tillons non remaniés. C'est un procédé qui permet d'injecter des matières résineuses dans presque toutes les structures poreuses, p. ex. dans la pierre naturelle ce qui est intéressant pour la conservation de monuments ou dans le béton dans le domaine de la construction routière. Le système des vides remplis de résine fluorescente peut être rendu visible sous un microscope à éclairage incident ultraviolet ce qui fait bien ressortir les vides, les pores et les fissures.

## Inhalt

1	Einleitung . . . . .	7
2	Verpreßverfahren . . . . .	8
2.1	Allgemeines . . . . .	8
2.2	Probenvorbereitung . . . . .	8
2.2.1	Trocknung der Proben . . . . .	8
2.2.2	Vorbehandlung der getrockneten Proben . . . . .	9
2.2.3	Füllen der Probe mit dem Harzgemisch . . . . .	10
2.3	Verpreßanlage . . . . .	11
2.3.1	Übersicht über die Anlage . . . . .	11
2.3.2	Druckluftteil . . . . .	13
2.3.3	Öldruckteil . . . . .	14
2.3.4	Betrieb der Verpreßanlage . . . . .	14
2.4	Präparation der verpreßten Proben . . . . .	15
3	Beispiele zur Anwendung des Verpreßverfahrens. . . . .	15
4	Zusammenfassung und Ausblick . . . .	18
5	Literatur . . . . .	20
Anhang	. . . . .	21
	Verpressen der Betonproben; Verfahrensschritte, Betriebsanleitung . .	22



## 1 Einleitung

Die Erhaltung der Bauwerkssubstanz im Zuge von Verkehrswegen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die wirtschaftliche Optimierung der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen erfordert nach [1] auch weiterhin die

- frühzeitige Erkennung von Schäden
- Abschätzung von Schadensentwicklungen
- Vermeidung von Schadensvergrößerungen und
- planmäßige und wirtschaftliche Vermeidung oder Beseitigung von Schäden.

Der Hauptanteil an Geldmitteln wird dabei für Arbeiten an Betonoberflächen aufgebracht. Um eine dauerhafte Instandsetzung zu erzielen, ist vor der Einleitung notwendiger Maßnahmen eine sorgfältige Schadensanalyse durchzuführen.

Wesentlicher Ausgangspunkt für die Schadensanalyse ist die Kenntnis der Struktur des vorliegenden Betons. Die bisher übliche Dünnschliffmethode hat den Nachteil, daß durch die Präparation bedingte Gefügeänderungen vielfach nicht ausgesondert werden können. Mit dem hier beschriebenen Verfahren ist es möglich, größere Betonproben mit einem fluoreszierenden Harz zu verpressen und sie nach Aushärtung ohne Störung des Gefüges zu schneiden. Damit ergibt sich eine gute Präparation der Probekörper auch für mikroskopische Betrachtungen des Gefüges. Dieses Verpreßverfahren ermöglicht somit auch eine einfachere Probenpräparation als die bisher angewandte Dünnschliffmethode.

Die mikroskopische Auswertung kann bereits an den sägerauhen Oberflächen ohne Polieren und Anschleifen erfolgen. Die Vorbereitung des Harzes beschränkt sich einerseits auf die Zugabe des Härter für den Erhärtungsvorgang und andererseits auf die Zugabe des Pigmentes zur Fluoreszenzmarkierung (Verpreßharzimpregnierung) der Hohlräume, Poren und Risse. Damit ist ein ausreichendes Differenzierungsverfahren zur Unterscheidung von den übrigen Komponenten gegeben, mit dem alle auftretenden Hohlräume bzw. Hohlraumformen erkannt werden können. Das mit Harz verpreßte Porensystem kann unter dem Mikroskop mit ultraviolettem Auflicht sichtbar gemacht werden.

Mit bisherigen Verpreßverfahren konnten nur geringe Eindringtiefen des Harzes in die Proben erzielt werden.

Um ein Materialgefüge mit einem Stoff füllen und Strukturstörungen darstellen zu können, sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- Die Probe muß trocken sein. Durch die Trocknung dürfen keine schädigenden Einflüsse auf die Matrix ausgehen.
- Das Verpreßmaterial darf weder eine chemische Verbindung mit der Probe eingehen, noch diese an- bzw. auflösen. Der Kunststoff darf in seiner Reaktion nicht durch die Zusammensetzung der Probe beeinflusst werden.
- Das Verpreßmaterial muß niedrigviskos sein und in alle Bereiche der Probe eindringen können.
- Das Verpreßmaterial muß, solange der Füllvorgang nicht für ausreichend befunden wird und demzufolge nicht abgeschlossen ist, in fließfähigem Zustand gehalten werden.
- Der Kunststoff muß als Träger von löslichen Pigmenten die zu untersuchende Struktur ausreichend kontrastreich darstellen können.

Die Zielsetzung des Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens, mit dem der Beton der vorhandenen Bausubstanz besser, schneller und wirtschaftlicher zu analysieren ist. In einem ersten Schritt wurde im Rahmen dieses Projektes ein Verfahren zur Verpressung von Betonproben mit fluoreszierendem Harz entwickelt. In weiteren Projekten sollen Auswerteverfahren, basierend auf der Auflichtmikroskopie an Anschnitten verpreßter Proben aus Festbeton, entwickelt werden, um Angaben machen zu können über:

- Luftporenkennwerte, Porosität (mikroskopische Porenanalyse)
- Mikrorisse und Fehlstellen (Alkalitreiben, Spannungsrisse)
- die Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlägen
- die verwendete Sieblinie der Zuschläge, Kornverteilungs- und Korngrößenanalysen
- den W/Z-Wert des eingebauten Frischbetons und des erhärteten Betons
- den Verlauf der Karbonatisierung
- Analogien zu anderen Meßverfahren, z. B. Quecksilberporosimetrie.

Mit dem Verpreßverfahren können nahezu alle porösen Materialien verpreßt werden, also auch Naturstein für den Denkmalschutz und Asphaltbeton im

Straßenbau, wenn die genannten Anforderungen, die sowohl an das Proben- als auch an das Verpreßmaterial zu stellen sind, erfüllt werden. Die Untersuchungen im Rahmen der Erprobung des Verfahrens beschränken sich jedoch ausschließlich auf den Baustoff Beton.

## 2 Verpreßverfahren

### 2.1 Allgemeines

Hauptbestandteil des Verpreßverfahrens ist der Drucktopf (Bilder 1 bis 6). In diesem Drucktopf werden die zu untersuchenden Proben mit Kunststoff verpreßt, anschließend geschnitten, ggf. angeschliffen und poliert und danach deren Oberflächenstruktur analysiert. Eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Verpressung ist, daß die Proben vor der Tränkung mit Harz und anschließender Verpressung ausreichend getrocknet sind. Dies kann im einfachsten Fall in einem Trockenschrank stattfinden. Wird in einigen Fällen eine thermische Trocknung allein für nicht ausreichend gehalten, so kann das verbliebene Wasser anschließend noch chemisch gebunden werden (chemische Trocknung). Poröse, durchlässige und gerissene Proben erfordern in der Regel keine chemische Trocknung.

Die getrockneten Proben werden zunächst im Exsikkator unter Vakuum mit dem Verpreßharz gefüllt. Anschließend erfolgt die Verpressung im Drucktopf. Die Darstellung der Hohlräume wird durch eine Pigmentzugabe im Harz ermöglicht. Nach der Aushärtung können die Proben untersucht werden. Die Probengröße ist durch die Abmessungen des Drucktopfes begrenzt. Es können z. Z. Bohrkern mit einem Durchmesser von bis zu 14 cm und Prismen mit einer Kantenlänge von bis zu 10 cm eingesetzt werden. Die Probenhöhe ist auf ca. 15 cm begrenzt.

Im folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte näher erläutert, und es werden auch weitere Möglichkeiten aufgezeigt, um ein noch besseres Eindringverhalten des Harzgemisches in die Probe zu erzielen.

### 2.2 Probenvorbereitung

#### 2.2.1 Trocknung der Proben

Bevor eine Betonprobe – sie besteht in der Regel aus einem Bohrkern – verpreßt werden kann, ist diese zu trocknen, um die Feuchtigkeit aus den Ka-

pillaren zu entfernen. Die Trocknung der Probe für das Verpressen umfaßt in der Regel die beiden Schritte:

1. Thermische Trocknung im Trockenschrank, u. U. mehrere Tage lang, bis zur annähernden Gewichtskonstanz, um überschüssiges Kapillarwasser zu entfernen. Anschließend werden die Proben auf Silicagel abgekühlt und bis zum Verpressen aufbewahrt.
2. Chemische Trocknung mit Hilfe einer auf das Verpreßharz abgestimmten Hydrophobierung. Dieser Behandlungsschritt der chemischen Trocknung ist nicht erforderlich bei hohlraumreichen und gerissenen Texturen, da diese erfahrungsgemäß ausreichend durchlässig sind für die zu verdampfende bzw. zu verdunstende Feuchtigkeit und auch für das einzupressende Harz.

Die Gründe für die Trocknung sind:

1. Auf einer feuchten Grenzfläche bilden Verpreßharze negative Randwinkel, die dazu führen, daß das Harz nicht druckverlustfrei und freiwillig die Grenzfläche benetzt [2]. Um diese Druckverluste zu kompensieren, wären höhere Ausgangsdrücke erforderlich, die beim Verpressen zu Gefügestörungen führen könnten.
2. Das auf der Grenzfläche befindliche Wasser wirkt zwischen dem Substrat und dem Harz als Trennschicht. Trocknet diese „Trennschicht“ nach der Verpressung aus, könnte dies zu Fehlstellen bzw. Störungen bei der weiteren Präparation führen.
3. Ist eine chemische Trocknung erfolgt, so stellt die dazu verwendete Hydrophobierung zusätzlich eine Haftvermittlungsschicht auf dem Substrat für das Harz dar.

Bei Temperaturen um 105 °C würde das Kapillarwasser (Porenlösung) nahezu vollständig aus der Zementsteinmatrix entweichen. Bei derart hohen Temperaturen wären allerdings Schäden in der Betonstruktur durch Trocknungsschwinden, Temperaturspannungen etc. in erheblichem Maße zu befürchten. Daher sollten die Trocknungstemperaturen im Trockenschrank nach eigenen Erfahrungen die maximal auftretenden Gebrauchstemperaturen des Betons von 70 °C nicht überschreiten. Denn bei der Trocknung der Proben müssen Schäden und Veränderungen am Material vermieden werden; eine weitergehende und nicht unbedingt vollständige Entfernung des Kapillarwassers ist für die Verpressung ausreichend.

Erfahrungsgemäß kann anhand des Ablaufes der Trocknung auch eine qualitative Abschätzung der Proben vorgenommen werden. Je höher die Trocknungsgeschwindigkeit, desto größer ist der mittlere Porendurchmesser und im allgemeinen der W/Z-Wert des untersuchten Probenbetons. Aus der Trocknungsgeschwindigkeit läßt sich auch abschätzen, wie sich die Probe beim Verpressen verhalten wird, so daß darauf die erforderlichen Druckstufen und die Verpreßdauer eingestellt werden können.

### 2.2.2 Vorbehandlung der getrockneten Proben

Die Hohlräume der zu verpressenden Matrix (Poren/Kapillaren/Risse) sind unterhalb einer bestimmten Größe mit einem Harz nicht mehr ohne weiteres füllbar. Infolge der Restfeuchte in den Hohlräumen entsteht weiterhin Kapillardepression. Reicht eine thermische Trocknung für den Verpreßerfolg in einem bestimmten Porengrößenbereich nicht aus, wählt man als zusätzliche Maßnahme eine Hydrophobierung, um den Vorgang der Verpressung in den Bereich kleinerer Porengrößen zu unterstützen.

Mit einer Hydrophobierung läßt sich der Verpreßerfolg verbessern, indem

1. die Silikonöle in der Hydrophobierung als „Gleitmittel“ für den später eingepreßten Kunststoff wirken
2. eine verbesserte Bindung zum Beton erzielt wird. Funktionelle Silane dienen dabei als Haftvermittler
3. die chemische Trocknung der Probe gefördert wird.

#### Zu 1.

Die Reaktionsprodukte der Hydrophobierung zeigen ein besonders hohes Ausbreitungsvermögen auf der Oberfläche der Kapillaren, das eine Folge der geringen intermolekularen Bindungskräfte ist. Dieses äußert sich in dem relativ niedrigen Wert der Oberflächenspannung (siehe hierzu die nachfolgende Tabelle).

Produkte	Oberflächenspannung [mN/m]
Wasser	75
Tenside	30
Polysiloxane (Silicone)	20

Tabelle 1: Oberflächenspannung einiger Produkte im Vergleich, entnommen aus [2]

Ziel der Hydrophobierung einer Verpreßprobe ist es, die Polarität eines Substrates zu verändern und es damit hydrophob zu machen. Dies geschieht in der Form, daß die polare Oberfläche anorganischer Materialien unpolar eingestellt wird und damit die Benetzbarkeit mit einem Harz erhöht und das Dispergierverhalten verbessert wird. Nach der Literatur [2, 3] ist mit Erfolg zu rechnen, wenn die noch minimal benetzbaren Porendurchmesser etwa 10mal größer als die Molekülgröße der verwendeten Silane sind. Auf Grund der geringen Molekülgröße der Silane tritt praktisch keine Veränderung der Kapillardurchmesser auf. Der gesamte Porenquerschnitt bleibt praktisch offen, und der Wasserdampftransport wird nicht beeinträchtigt. Die nach durchgeführter Hydrophobierung an den Hohlraumwänden befindlichen Verbindungen lassen damit noch ausreichend Raum für das Verpreßharz. Der Penetrationsvorgang des Verpreßharzes wird durch die Siliconöle an der Hohlraumoberfläche sogar gefördert.

In Vorversuchen wurde geklärt, inwieweit durch eine Hydrolyse des Silans eine Verbesserung der Eindringenschaften des Hydrophobierungsmittels in die Poren erzielt werden kann. Es handelt sich bei der Hydrolyse um eine Vorbehandlung in wäßrigem Medium, um die Reaktionsbedingungen des Silans günstig zu verändern [3]. Der Wasseranteil ist dabei entscheidend für den Erfolg der Hydrolyse. Das Silan kann auch mit Methanol, Ethanol oder Propanol verdünnt, anschließend angesäuert und vorhydratisiert werden. Mit Wasser reagieren Silane in Gegenwart von Katalysatoren (Säuren oder Basen) zu Silanolen unter zusätzlicher Bildung der entsprechenden Alkohole [3]. Zur Anregung der Hydrolyse in den Betonporen wurde in einem ersten Schritt versucht, das Hydrophobierungsmittel mit Essigsäure anzusäuern. Eine solche Vorbehandlung führte zu keiner feststellbaren Verbesserung der Eindringenschaften des Harzes. Das Porenwasser des Zementsteins ist basisch und kann deshalb ebenfalls als Katalysator wirken, so daß sich ein Hydrolysevorgang ohnehin in den Poren einstellt.

Um mit dem Harz auch in enge und feine Bereiche der Betonmatrix gelangen zu können, wurde die Viskosität des Harzes herabgesetzt, indem ihm als Additiv zwischen 1 Gew.-% und 5 Gew.-% Silan in Form eines Hydrophobierungsmittels zugesetzt wurden. Je dichter die Betonmatrix ist, um so höher sollte der Anteil des Silans im Harzgemisch sein, um ein optimales Eindringverhalten der Proben zu erzielen.

Für die Beobachtungen und Auswertungen an den präparierten Probekörpern ist es im Regelfall nicht erforderlich, bis in solche sehr feinen Bereiche vorzudringen, die aufgrund der Auflösung des Mikroskopes und der Größe des auszuwertenden Bildes ohnehin nicht betrachtet werden können.

## Zu 2.

Will man eine Steigerung der Haftvermittlung erreichen, so ist ein funktionelles Silan zu verwenden, das längere Molekülketten aufweist als z. B. Alkylsilane. Die längeren Molekülketten der funktionellen Silane haben jedoch gegenüber den kürzeren Molekülketten der Alkylsilane den Nachteil, daß nicht immer die erstrebte Grenzkapillare erreicht werden kann. Die angestrebte Eindringtiefe kann vermutlich ausschließlich durch die erhöhte Haftvermittlung der funktionellen Silane selbst erreicht werden.

Das Lösemittel stellt für Silan ein Fließmittel dar. Bei den meisten auf dem Markt befindlichen Silanprodukten, die im Bautenschutz eingesetzt werden, handelt es sich um bereits in Lösemittel gelöste Silane; sie haben im allgemeinen einen Wirkstoffgehalt von mindestens 10 %. Die Verwendung der Lösemittel hat den Vorteil, daß eine größere Mobilität des Gemisches erreicht wird (mobile Phase) und deshalb eine geringere Menge an Silan als Haftvermittler benötigt wird.

Von erheblicher Bedeutung für den Erfolg der Hydrophobierung im Hinblick auf die Erhöhung der Eindringtiefe ist die Art der Lösemittel. Im Zusammenhang mit dem Restwassergehalt in der Porenmatrix ist zu klären, ob Alkohole oder Kohlenwasserstoffverbindungen besser geeignet sind. Die Verwendung von Ethanol oder Aceton hat allgemein den Vorteil, daß eine hohe Flüchtigkeit gegeben ist und damit keine Lösemittelreste in der Porenmatrix verbleiben. Zur Verdünnung sind Kohlenwasserstoffe besser geeignet als polare Lösemittel (mit Wasser mischbare) als Alkohole. Andererseits sind jedoch aus Arbeits- und Umweltschutzgründen Alkohole zu bevorzugen. In Vorversuchen wurden allerdings bessere Ergebnisse mit Lösemitteln auf Basis von alkoholischen Verbindungen erreicht. Eine Begründung dafür kann derzeit nicht gegeben werden. In weiteren Untersuchungen zeigte sich, daß auch Alkylsilane, deren Wirkstoffgehalt über 98 % liegt, ohne Lösemittel verwendet werden können. Dies führte schließlich dazu, die ursprünglichen Überlegungen, funktionelle Silane mit Lösemittel zu verdünnen, zu verwerfen.

Es stellte sich in eigenen Vorversuchen heraus, daß die Affinität zwischen Verpreßharz und der hydrophobierten Porenoberfläche nicht das entscheidende Kriterium für den Verpreßerfolg ist. Vielmehr hat sich gezeigt, daß sich mit Alkylsilanen, die einen sog. Alkylrest haben, wegen ihrer geringen Molekülgröße die besten Erfolge erzielen lassen. Nach [3] sind Alkylsilane nicht als Haftvermittler für die einzupressenden Verpreßharze wirksam. Demnach sind eine erhöhte Fließfähigkeit des flüssigen Harzes und ein ausreichender Trocknungsgrad der Probe bedeutsamer für den Verpreßerfolg.

## Zu 3.

Hier wird das nach der thermischen Trocknung noch verbliebene Porenwasser durch die Hydrolyse des Silans über Silanol zu Polysiloxanen (Silicone) umgesetzt [2].

### 2.2.3 Füllen der Probe mit dem Harzgemisch

Der zum Verpressen verwendete Kunststoff ist auf die zu verpressende Probe und das Auswertungsziel abzustellen. Eine Betonstruktur sollte mit einem Acrylat verpreßt werden. Ein Epoxidharz ist wegen der Alkali-Epoxidharzreaktion und/oder der dadurch vorzeitig ausgelösten Erhärtungsreaktion nicht geeignet. Eine mit einem bituminösen Bindemittel hergestellte Struktur, z. B. Asphalt, könnte mit einem EP-Harz verpreßt werden. Für Sandstein, Stahl und Holz sind beide Produktgruppen anwendbar.

Zur Betrachtung und Beurteilung der Poren und Fehlstellen in einem präparierten Probekörper wird UV-Licht eingesetzt. Dadurch wird das Fluoreszenzmittel im Harz zum Selbstleuchten angeregt. Um die Fluoreszenz zu ermöglichen, wird dem verwendeten Harz ein fluoreszierendes Pigment beigemischt. Das Pigment muß sich im Harz vollständig lösen können und darf nicht koagulieren, da sonst die Gefahr besteht, daß sich die Poren verstopfen. Es können daraus, wie auch bei unterschiedlich intensiver Vermischung des Fluoreszenzmittels, Zonen unterschiedlicher Farb- und Lichtintensität resultieren. Eine Auswertung der Ergebnisse von Proben mit unterschiedlichen Farbinintensitäten kann zu Fehlinterpretationen führen. Zur Auswertung mit Hilfe der Auflichtmikroskopie hat sich eine Menge von 2 Gew.-% Pigment, bezogen auf das angerührte Harzgemisch, als vorteilhaft erwiesen. Dieser Pigmentanteil liegt im Vergleich zu den in der Literatur genannten Mengen, die sich allerdings auf Durchlichtmikroskopie an Dünnschliff beziehen, sehr hoch. Damit die getrocknete Probe

nach dem Einfüllen des Kunststoffes weitgehend luftfrei und vom druckübertragenden Öl getrennt bleibt, befindet sie sich in einem zunächst unverschlossenen Folienbeutel (Foliendicke ca. 0,25 mm). Die Probe wird in ein temperatur- und formstabiles Kunststoffgefäß (bestehend beispielsweise aus einem Einwegkunststoffbehälter) und unter Teilvakuum im Exsikkator (mind. 50 mbar und ca. 15 min. lang) entlüftet. Das Kunststoffgefäß sollte nicht zu groß sein, um für die spätere Verpressung – ggf. kombiniert mit einer vorangehenden Hydrophobierung – mit dem Verpreßharz nicht unnötig viel Verpreßmaterial zu verbrauchen. Im Beutel muß andererseits jedoch genügend Überschußmaterial vorhanden sein, um genügend Verpreßmaterial für die zu verpressenden Hohlräume im Versuchskörper verfügbar zu haben. Danach wird das Gefäß samt Probe mit dem Verpreßharz (Harz, Härter, Pigment und ggf. sonstigen erforderlichen Additiven) gefüllt und ca. 15 min. lang dem atmosphärischen Druck ausgesetzt. Der Folienbeutel wird danach verschlossen, und aus Sicherheitsgründen wird der Behälter in eine weitere Folienhülle gegeben, diese verschlossen und in den Drucktopf hineingestellt. Der Drucktopf wird annähernd bis zur Höhe des Topfdeckels von Hand mit einem Paraffinöl befüllt. Das Paraffinöl dient dazu, im Drucktopf die Drücke gleichmäßig auf die Probe aufzubringen.

## 2.3 Verpreßanlage

### 2.3.1 Übersicht über die Anlage

Die Verpreßanlage dient der Verpressung von Probekörpern aus Beton mit fluoreszierendem Harz. Sie schafft die Voraussetzung für eine anschließende mikroskopische Betrachtung der Proben.

Der Drucktopf besteht aus massivem Aluminium. Er steht in einer Edelstahlblechwanne, die in einen Tisch eingelassen ist und ein Wasserbad des Drucktopfes ermöglicht. Im Wasserbad kann je nach Bedarf die Probe gekühlt oder beheizt werden. Um einen möglichst gleichmäßigen Temperaturanstieg bzw. -abfall zu erzielen und möglichst geringe Temperaturschwankungen zu erhalten, wird das Wasser mit Hilfe einer Umwälzpumpe umgewälzt. Die Temperaturen des Wasserbades können an einem Thermometer abgelesen werden.

Für die Dauer des Verpreßvorganges – erfahrungsgemäß kann dies je nach Untersuchungsziel bis zu einer Woche in Anspruch nehmen – darf das Wasserbad 20 °C nicht überschreiten. Zur Einleitung der Polymerisation wird das Wasserbad anschließend

auf 70 °C erwärmt, der Druck wird dabei konstant gehalten. Das Harz härtet dann unter Temperatur und Druck aus.

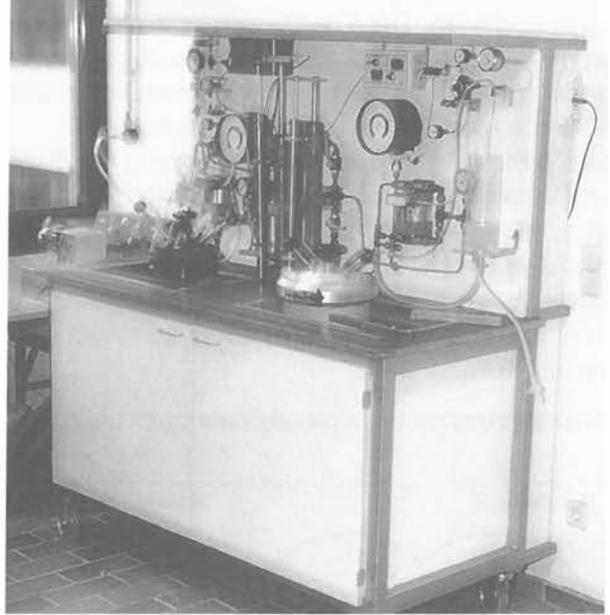


Bild 1: Gesamtansicht der Verpreßanlage

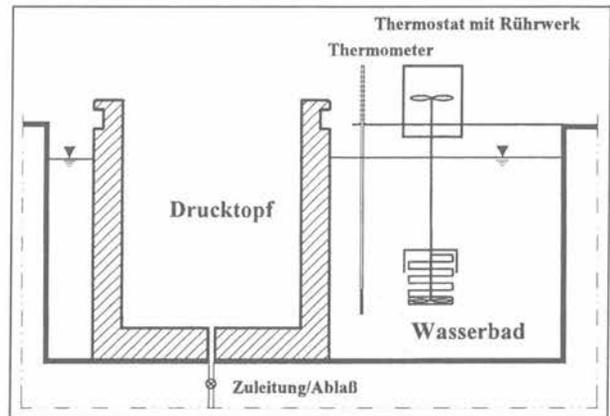


Bild 2: Drucktopf im Wasserbad (Schnitt)

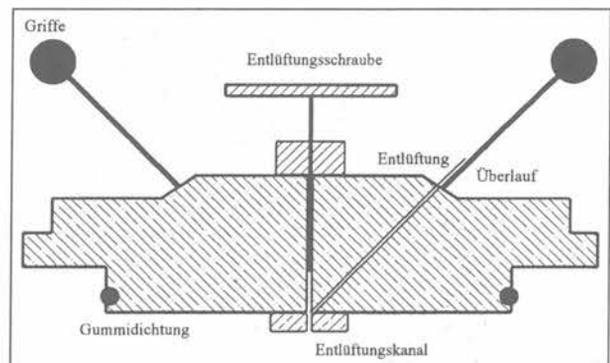


Bild 3: Schnitt durch den Drucktopfdeckel

Nach Verschließen des dickwandigen Drucktopfes mit dem massiven Deckel kann durch das Öffnen der Entlüftungsschraube der Drucktopf entlüftet

werden. Erst wenn nach dem Füllvorgang das Öl blasenfrei aus der Entlüftungsöffnung fließt, kann das System mit Hilfe der Entlüftungsschraube verschlossen werden und der Druckaufbau im Topf kann beginnen. Der Topfbereich und der Deckel werden über eingelassene Gummiringe gegeneinander abgedichtet. Zum leichteren Abnehmen und Einsetzen des Deckels sind Griffe angebracht. Der Verschlussring zur festen Verbindung von Topf und Deckel besteht aus zwei halbkreisförmigen Bügeln, die über ein Gelenk miteinander verbunden sind. Der Ring ist im Querschnitt so geformt, daß er nach Verschließen mit einem Schraubverschluß Topf und Deckel fest untereinander verbindet (siehe Bild 4).

Anstelle einer großen Probe können auch bis zu vier

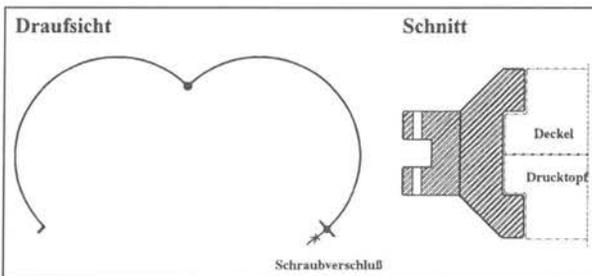


Bild 4: Verschlussring zur Verbindung von Drucktopf und Deckel

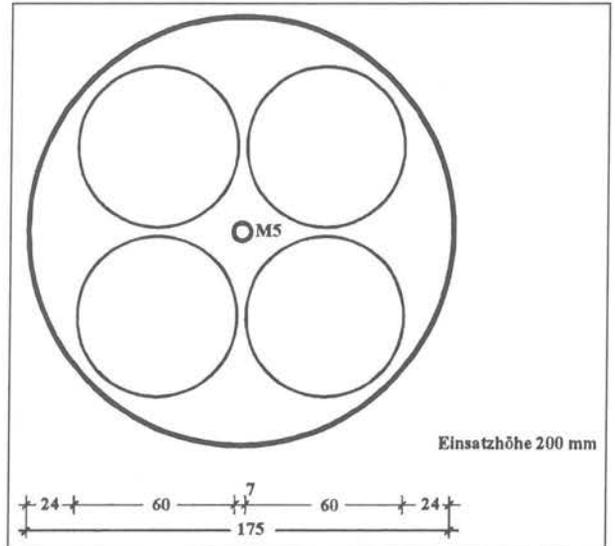


Bild 5: Einsatz für 4 Proben  $\varnothing$  50 mm

kleinere Proben (Bohrkerne) mit bis zu je 50 mm Durchmesser gleichzeitig verpreßt werden (s. Bild 5). Um diese in ihrer gewünschten Lage zu halten, besteht die Möglichkeit, einen speziellen Einsatz zu verwenden.

Die Verpreßanlage besteht aus einem Druckluftteil zur Druckerzeugung und einem Hydraulikteil, welcher für die Druckübertragung in den Drucktopf und damit auf die eingesetzte Probe sorgt.

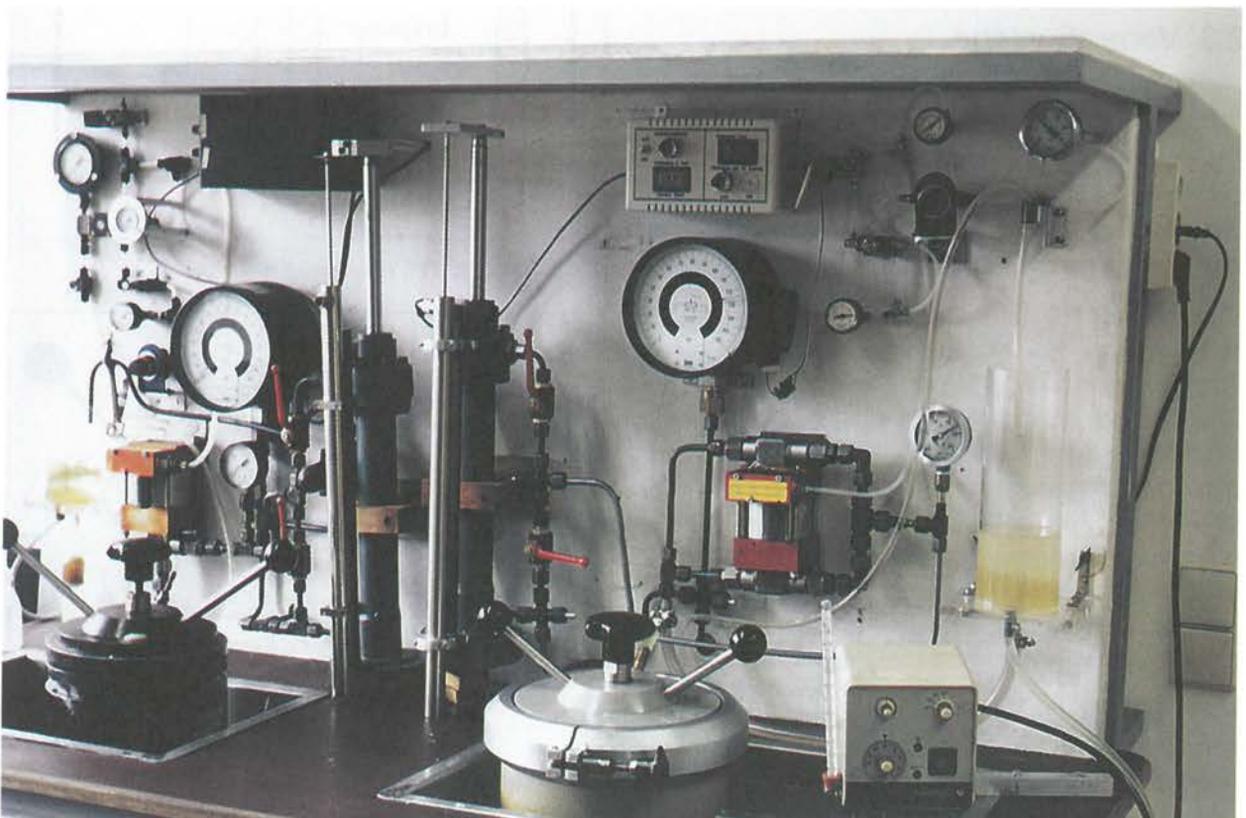


Bild 6: Verpreßanlage; rechter Teil der gesamten Verpreßanlage mit Druckluft- und Ölkreislauf  
Tiefe

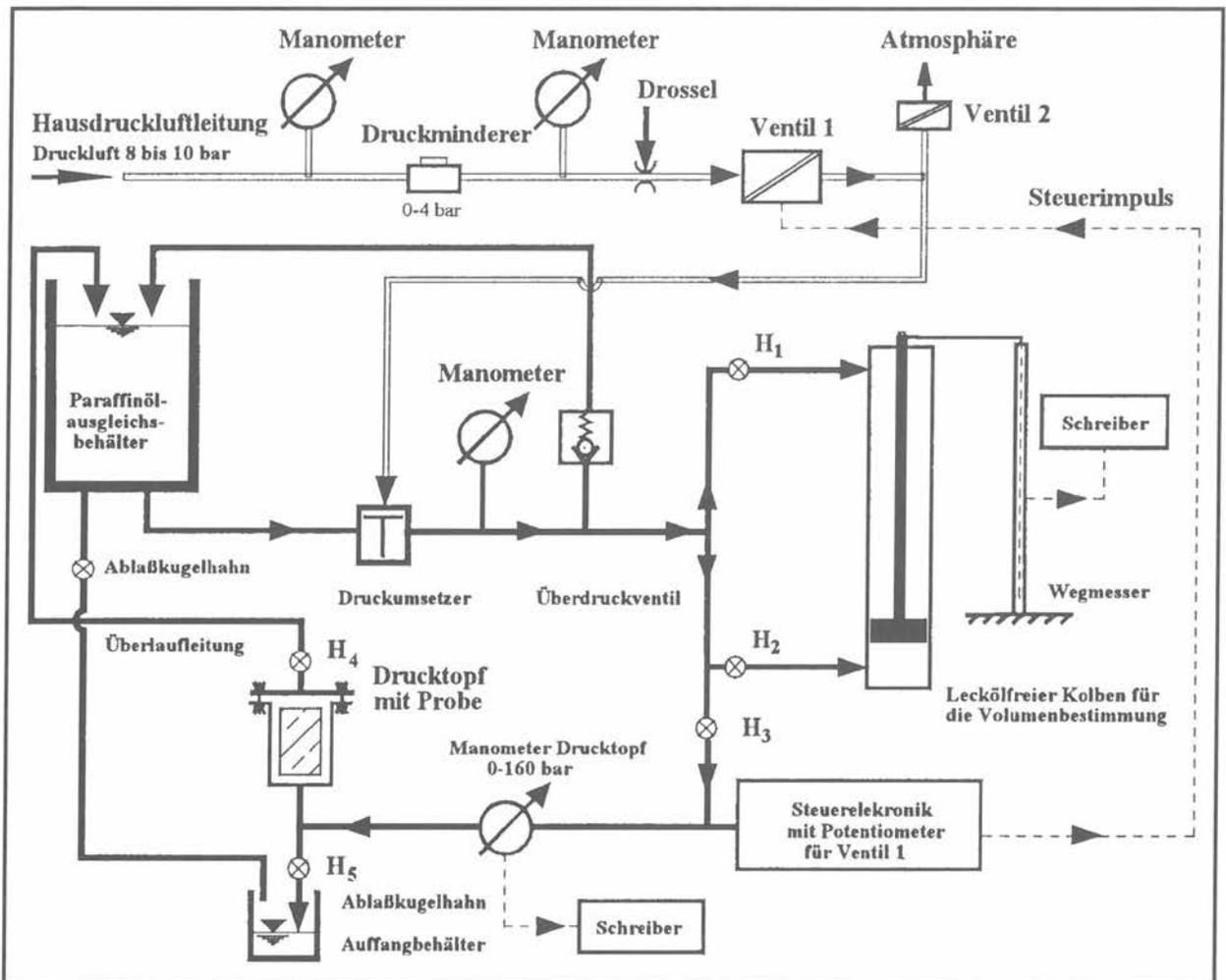


Bild 7: Funktionsweise der Verpreßanlage; schematische Darstellung

### 2.3.2 Druckluftteil

Bild 7 zeigt eine schematische Darstellung der einzelnen Komponenten der Verpreßanlage. Die dünnen doppelten Linien zeigen die Bauteile, in denen die Druckluft geführt wird. Die dünnen gestrichelten Linien zeigen die elektronische Steuerung, und die dicken Linien verbinden die einzelnen Komponenten des Öldruckteils miteinander.

Die primäre Druckluft von 8 bis 10 bar wird dem Netz der Hausdruckluftleitung entnommen. Der Eingangsluftdruck wird über das Eingangsdrukmanometer angezeigt. Mit einem Druckminderer wird die Druckluft aus der Hausdruckluftleitung bereits im Drucklufteingang auf den maximal möglichen Luftdruck herabgeregelt, der nach der Übersetzung den maximalen Öldruck im Drucktopf nicht überschreiten darf (erste Sicherheitsmaßnahme).

Dieser Luftdruck wird im Luftdruck-Öldruckumsetzer (Pumpe) mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:40 verstärkt. Der maximal erforderliche Eingangs-

luftdruck des Druckumsetzers errechnet sich aus dem max. Öleinsatzdruck von 160 bar im Drucktopf und dem Verhältnis des Druckumsetzers von 1:40, es ergibt sich also  $\max P_{\text{Luft, ein}} = 160/40 \leq 4,00 \text{ bar}$  Eingangsluftdruck im Druckluftsystem der Verpreßanlage.

Mit einer Drossel wird der Leitungsquerschnitt der Luftleitung so verringert, daß das Ventil 1 dem Druckübersetzer ausreichend schnell und genügend Luft innerhalb einer Regeleinheit zuführen kann, damit die Regelgenauigkeit von  $\pm 0,25 \text{ bar}$  vom eingestellten Soll-Druckwert erreicht wird. Aus der Einstellung des Drosselquerschnittes ergibt sich die Pumpgeschwindigkeit im Ölkreislauf. Die Luftzufuhr der Pumpe wird über einen elektrischen Regelkreis gesteuert. Dieser Regelkreis besteht aus einem Manometer mit Potentiometer und einer elektronischen Sollwertüberprüfung. Der Sollwert wird über das Potentiometer vorgegeben, und nach Ermittlung der Potentiometerdifferenzen zur Ansteuerung des Magnetventiles wird die Freigabe bzw. Sperrung der Druckluft für die druckluftbetrie-

bene Ölpumpe (Druckumsetzer) bewirkt. Das Überdruckventil öffnet bei Unterschreiten des Öldrucks den Ölkreislauf und schließt bei Überschreiten des oberen Schwellendrucks ( $\pm 0,25$  bar). Das Ventil 2 öffnet bei Luftüberdruck (bei Störung des Ventiles 1) unmittelbar vor dem Druckumsetzer und ist zugleich eine zweite Sicherheitseinrichtung für kritische Zustände.

Die in Bild 7 dargestellten Komponenten und Bauteile haben folgende Aufgaben:

- Das Manometer dient zur Anzeige des Arbeitsdruckes im Drucktopf (Meßbereich 0 bar bis 160 bar).
- Das Überdruckventil dient der Druckentlastung bei Drücken im Topf über 160 bar.
- Ein leckfreier Kolben dient der exakten Volumenbeobachtung des eingepreßten Harzes. Nach Erreichen einer frei wählbaren Druckstufe sind nur noch Füllmengen von wenigen Kubikmillimetern je Zeiteinheit für die sich langsam füllenden Porenräume nachzuverpressen.
- Ein induktiver Weggeber, der als Wegmesser an den Kolben angeschlossen ist, ermöglicht über die zurückgelegten Kolbenwege die Ermittlung der eingepreßten Volumenmenge des Harzes.
- Die Kugelhähne  $H_1$  bis  $H_5$  dienen der Steuerung des Ölkreislaufes und des Öldrucksystems.

### 2.3.3 Öldruckteil

Die Schnittstelle zwischen Druckluft- und Öldruckteil ist der Druckumsetzer. Der Druckumsetzer – eine Öldruckpumpe, deren Eingangsdruck dem Ausgangsdruck proportional ist – saugt aus einem Vorratsbehälter Paraffinöl an. Auf diese Weise wird im geschlossenen Drucktopf schließlich ein Druck zwischen 0 bar und 160 bar erzeugt. Der in dem Druckumsetzer maximal erzielbare Öldruck liegt bei ca. 250 bar, vorausgesetzt, der hierfür notwendige Luftdruck würde am Eingang zum Umsetzer anstehen.

Das Paraffinöl ist im Bereich des verwendeten Druckes praktisch inkompressibel. Für das Verpressen kann immer eine ausreichende Ölmenge zur Verfügung gestellt werden. Der Vorratsbehälter bzw. Paraffinölausgleichsbehälter dient auch als Auffangbehälter beim Füllen des Drucktopfes.

Als drittes Sicherheitselement ist ein im Abzweig liegendes, federbelastetes Überdruckventil mit Öldruckwaage vorhanden. Dieses Ventil ist so ein-

gestellt, daß der zulässige Betriebsdruck des Drucktopfes von höchstens 160 bar nicht überschritten werden kann.

Bei einer Temperatur von über  $40^\circ\text{C}$  beginnt die Polymerisation des Harzes. Für die Aushärtung des Harzgemisches unter Temperatur und Druck muß sichergestellt sein, daß das Überdruckventil voll funktionsfähig ist. Während der Aushärtung des Harzes treten gleichzeitig eine Druckabnahme durch das Schwinden des Harzes und eine entgegengesetzt wirkende thermische Ausdehnung auf, die zur Druckerhöhung führt. Der Betrieb der Verpreßanlage bedarf in dieser Phase ständiger Beobachtung.

Nach dem Verpreßvorgang wird der Drucktopf völlig entleert und das gebrauchte Paraffinöl mit Aceton gereinigt, um bei Folgeversuchen Schäden an der Pumpe durch ausgehärtetes Harz im Ölkreislauf zu vermeiden. Die Reinigung erfolgt, indem einer Menge von 5 l Paraffinöl ca. 0,2 l Aceton zugegeben und das Gemisch ca. 10 min. in einem hochdrehenden Rührer vermischt werden. Das Gemisch wird dann unter einem Dunstabzug ca. 3 h lang auf  $250^\circ\text{C}$  erhitzt. Danach wird das verbliebene Paraffinöl abgekühlt und mit Hilfe eines  $125\ \mu\text{m}$  feinen Analysensiebes (DIN 4488) abgefiltert.

### 2.3.4 Betrieb der Verpreßanlage

Im Anhang werden die einzelnen Verfahrensschritte zum Verpressen der Betonproben und zur Steuerung des Verpreßdruckes in Form einer Betriebsanleitung beschrieben. Hier sollen die jeweiligen Betriebszustände der Verpreßanlage erläutert werden, die im einzelnen über die Kegelventile (Kugelhähne) eingestellt werden können (Bezeichnungen beziehen sich auf das Bild 7):

#### Betriebszustand 1 (Vorbereitung des Systems)

Der leckölfreie Kolben ( $\varnothing_A = 40$  mm) wird in die Ausgangsposition (die obere Position entspricht der Ausgangslage = in dieser Stellung ist der genannte Hubraum gefüllt) gebracht. (H steht für Hahn)

offen:  $H_1, H_2, H_3$   
geschlossen:  $H_4, H_5$

Die untere wirksame Kolbenfläche ist um die Querschnittsfläche der Kolbenstange größer als die obere Kolbenfläche ( $A_{\text{oben}}/A_{\text{unten}} < 1$ ). Beim Aufbringen gleicher Drücke über  $H_1$  und  $H_2$  bildet sich daher ein Differenzdruck aus (Differentialkolben), der bewirkt, daß sich der Kolben bei gleichem Druck auf beiden Flächen nach oben in die Ausgangsposition bewegt.

### Betriebszustand 2 (Füllen und Entlüften des Drucktopfes)

In diesem Betriebszustand wird während des Füllens im noch offenen System das Paraffinöl solange umgepumpt, bis sich ein luftblasenfreier Ölstrom aus der Entlüftungsschraube des Drucktopfes einstellt.

Umpumpen:   offen           H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub>  
                  geschlossen: H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>5</sub>

Füllen:       offen:           H<sub>3</sub>  
                  geschlossen: H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>4</sub>, H<sub>5</sub>

### Betriebszustand 3 (Druckerzeugung und -aufrechterhaltung im Drucktopf)

Für den Verpreßzustand, d. h. für die Bestimmung der Harzvolumina, die in die Matrix bzw. Hohlräume gepreßt werden muß, ist die Messung des Hubweges, den der Kolben zurücklegt, erforderlich. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn das Volumen eines Kolbenhubes zur Füllung der Poren nicht ausreicht.

offen:           H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>  
geschlossen: H<sub>4</sub>, H<sub>5</sub>

Das Paraffinöl drückt über den offenen Kugelhahn H<sub>1</sub> auf die obere Kolbenfläche. Daraus ergibt sich ein Druck, von dem das Druckumsetzverhältnis  $A_{\text{oben}}/A_{\text{unten}}$  und die Kolbenreibung abzuziehen sind. Dieser Druck wirkt auf die untere Kolbenfläche und damit auf die Probe in dem allseitig geschlossenen Drucktopf. Der Öldruck wird über ein Manometer angezeigt und kann auf einem Schreiber registriert werden. Das Ventil 1 steuert den Öldruck über eine Steuerelektronik.

Der Drucktopf wird je nach dem gewünschten Untersuchungsziel in variablen Druckstufen zwischen 0 bar und 160 bar und/oder Zeitstufen betrieben. Der Verpreßdruck und die Verpreßdauer richten sich nach dem Untersuchungsziel sowie nach Anzahl und Größe der zu füllenden Poren und nicht zuletzt nach der Dichte der Betonmatrix. Der eingestellte Öldruck kann auf  $\pm 0,25$  bar genau gesteuert werden; es können also sehr kleine Volumina zugeführt und gemessen werden. Die Anzeige des Kolbenweges erfolgt von 0 mm bis 200 mm (s. Bild 8) und kann bis auf 1/1000 mm mit Hilfe einer Lupe abgelesen werden. Eine Einstellung des Nullpunktes zur Beobachtung der noch eindringenden Menge über den zurückgelegten Kolbenweg ist möglich. Die eingepreßte Harzmenge kann über die Kolbenvolumina bestimmt und protokolliert werden.

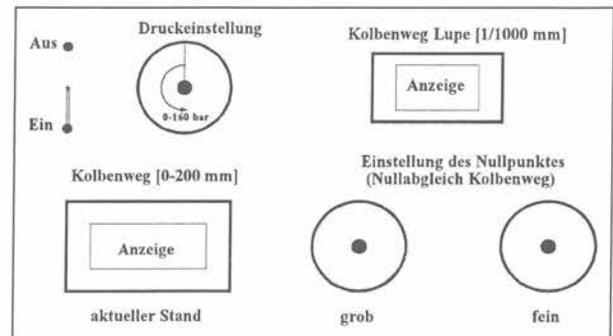


Bild 8: Anzeige der Druck-Steuerung

Der Verpreßvorgang ist beendet, wenn der angeählte Enddruck erreicht ist und keine wesentliche Volumenabnahme im druckübertragenden Paraffinöl je Zeiteinheit mehr stattfindet, also kein Harz mehr in die zu verpressende Matrix eindringt. Dies kann über das Zeit-/Kolbenweg-Diagramm beobachtet werden. (Kolbenfläche =  $\pi \cdot (4/2)^2 = 12,57 \text{ cm}^2$ ; 0,796 mm Kolbenweg entsprechen  $1 \text{ cm}^3$  Öl. Die Menge der Volumenabnahme wird durch das Untersuchungsziel festgelegt mit z. B. weniger als  $100 \text{ mm}^3$  innerhalb von 24 h).

## 2.4 Präparation der verpreßten Proben

Erst wenn der gesamte Füll- und Verpreßvorgang beendet ist, wird die Polymerisation des Harzgemisches eingeleitet, und das Aushärten kann beginnen. Nach Aushärten des Verpreßharzes und nach dem Schneiden bzw. ggf. auch Anschleifen und Polieren der Probe ist die Präparation abgeschlossen. Die verpreßten Proben werden entsprechend dem Untersuchungsziel und der geplanten Strukturauswertung in einzelne Scheiben, zumindest jedoch in zwei Hälften zerschnitten, und zwar parallel oder senkrecht zur ursprünglichen Oberfläche. Die Probe kann dann unter einem Mikroskop ausgewertet werden. Sollen darüber hinaus ganz gezielte Strukturanalysen durchgeführt werden, können die Proben zur besseren Erkennbarkeit spezieller Details auch angeschliffen und poliert werden.

## 3 Beispiele zur Anwendung des Verpreßverfahrens

Zur Beurteilung spezieller Struktureigenschaften werden die präparierten Betonproben unter dem Mikroskop betrachtet. Mit Hilfe eines Fotoapparates oder einer Videokamera können Ausschnitte aufgenommen und festgehalten werden, die dann die Grundlage für die Beurteilung darstellen. Im fol-

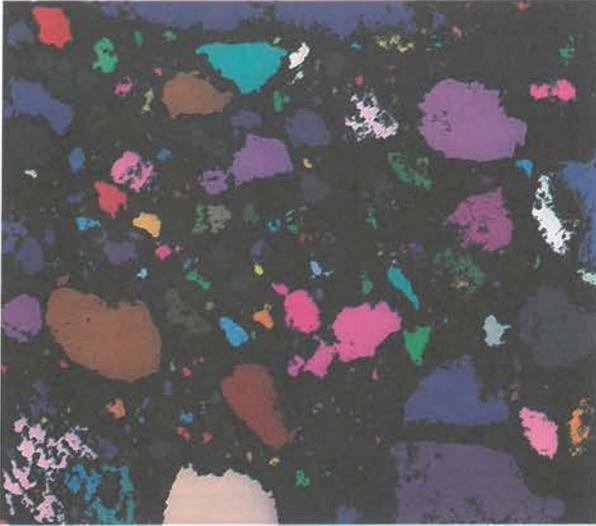


Bild 9: Zuschläge einer Betonoberfläche in Falschfarben  
(Bildausschnitt ca. 5,6 mm x 5,6 mm)

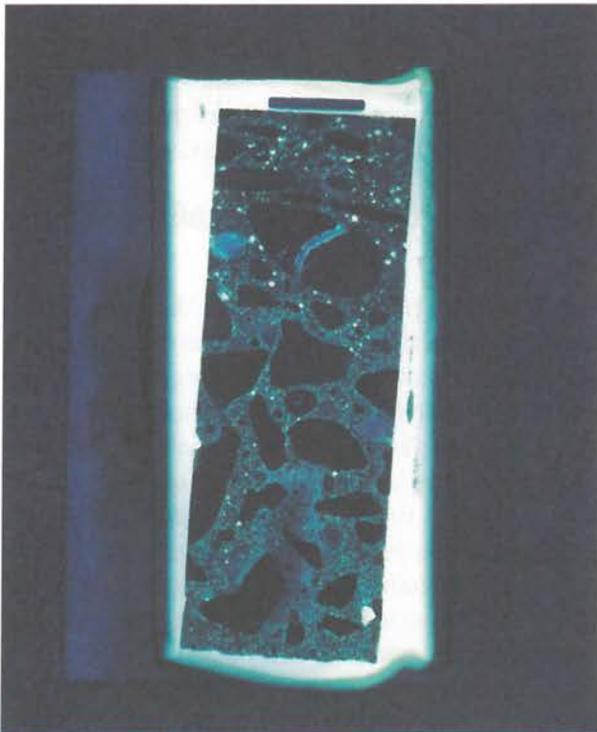


Bild 10: Luftporenbeton

genden sollen an Einzelbeispielen Möglichkeiten aufgezeigt werden, die dieses Verpreßverfahren öffnet.

Das Bild 9 zeigt Zuschläge einer Betonoberfläche in Falschfarben. Zur Sieblinienanalyse sind die verschieden großen Zuschläge als einzelne Objekte erkennbar.

Bild 10 zeigt Luftporen nach der Größe verteilt. Ist die Mischung beim Einbau nicht plastisch genug, bzw. wurde die Verdichtung nicht optimal auf die Betonkonsistenz abgestimmt, so entstehen viele

große Verdichtungsporen; die Luftporen liegen dann fast ausschließlich direkt am Zuschlag. Ist hingegen die Konsistenz zu weich eingestellt, so schwimmen die Poren oben auf.

Bild 11 zeigt kugelige Luftporen verschiedener Größen, gleichmäßig verteilt. Die vermutliche Entstehungsursache der Risse im Zuschlagkorn ist das Brechen des Ausgangsmaterials bei der Verarbeitung zu Splitt (abspringende Ecken des Splittkorns). Hiermit ist eine Aussage über die Qualität unterschiedlicher Brecher von Zuschlägen möglich.

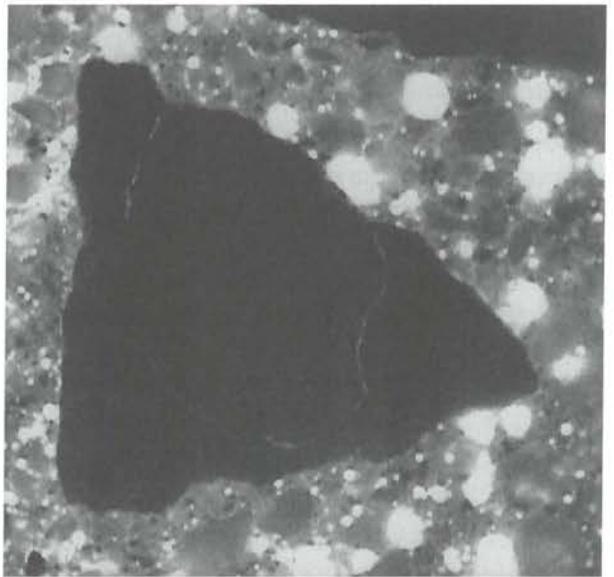


Bild 11: Luftporen im Festbeton  
(Bildausschnitt ca. 5,6 mm x 5,6 mm)

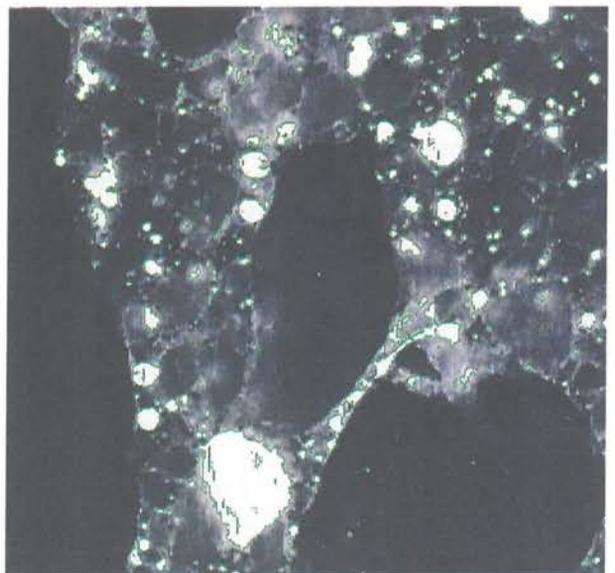


Bild 12: Konturendarstellung der angeschnittenen Luftporen  
(Bildausschnitt ca. 5,6 mm x 5,6 mm)

Bild 12 zeigt angeschnittene Luftporen im Festbeton (weiß), es können z. B. Flächenanteil, Größen-

verteilung und Abstand der erkannten Luftporen bestimmt werden. Der graue Hintergrund stellt die Zementsteinporosität dar.

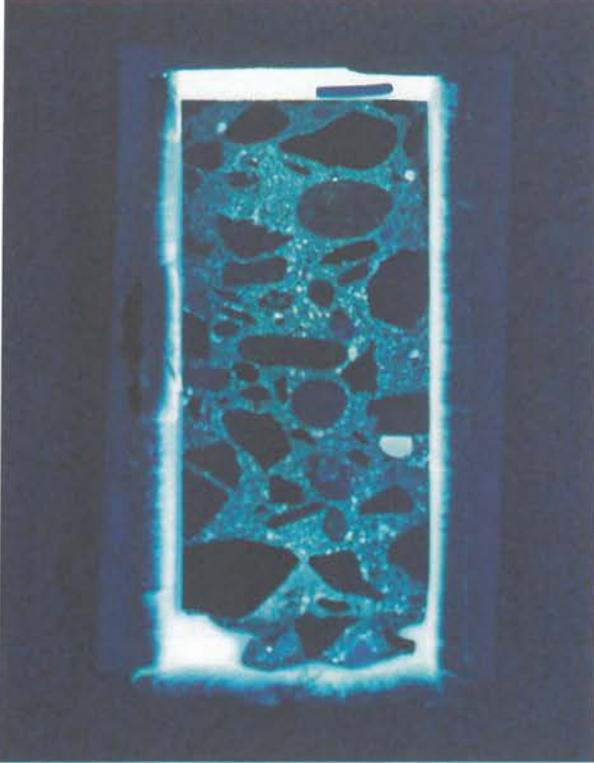


Bild 13: Rüttelgasse

Bild 13 zeigt eine Rüttelgasse im Luftporenbeton. An diesem Übersichtsbild läßt sich an der erhöhten Konzentration der Luftporen im mittleren Bereich der Probe die unterschiedliche Verdichtung des Betons erkennen.

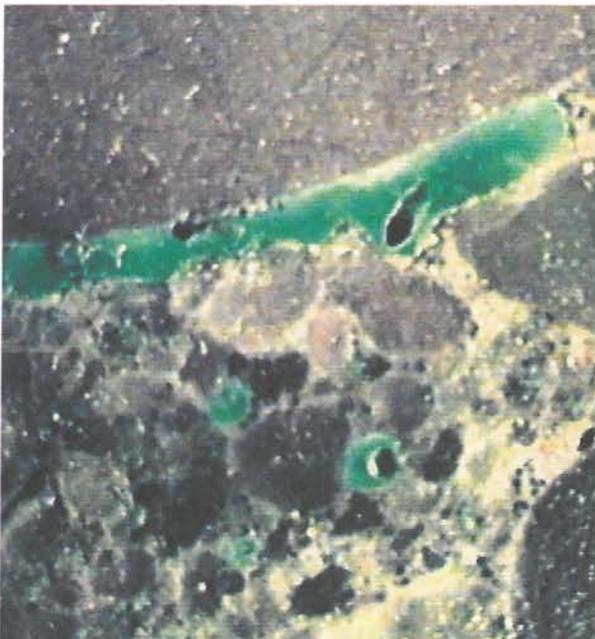


Bild 14: Diffuse Zementsteinzone um die Zuschläge

Bild 14 zeigt, daß beispielsweise mangelhaftes Mischen, falsche Betonzusammensetzung zu mangelhaftem Verbund in der Zementsteinmatrix führt. Flächenporen, insbesondere an der Unterseite der Zuschläge, können somit beobachtet werden.

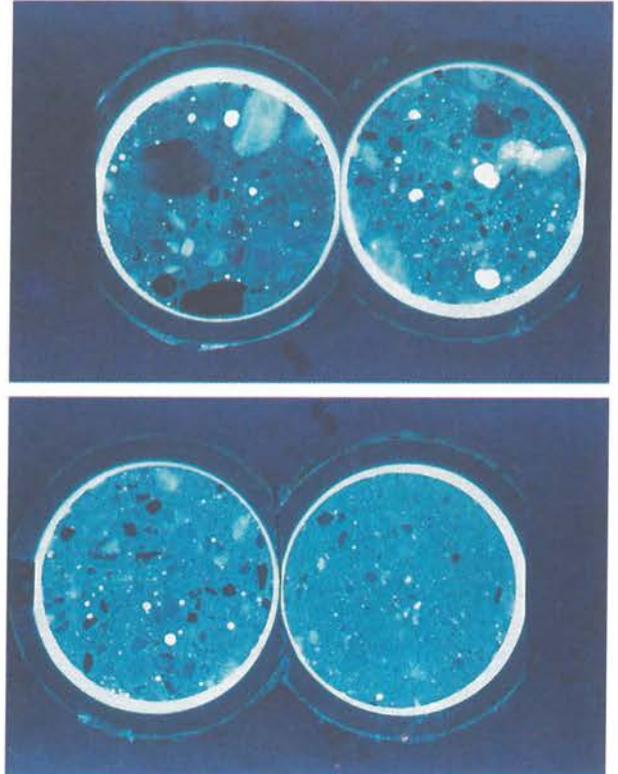


Bild 15: Vergleich von Betonproben mit unterschiedlichen W/Z-Werten

Wie Bild 15 zeigt, ist die jeweilige Helligkeit der Aufnahmen, aufgenommen bei derselben Lichtintensität, ein Hilfsmittel, um vergleichende Aussagen über den Gesamtporenraum zu treffen. Je heller das Bild, um so mehr Harz ist im Beton und demzufolge um so größer der Gesamtporenraum in der angeschnittenen Probenoberfläche. Durch Vergleich mit Referenzproben lassen sich daraus Schlüsse z. B. auf den W/Z-Wert der untersuchten Proben ziehen. Das obere Bild zeigt bei niedrigen W/Z-Werten im Anschnitt eine Sieblinie, die über einen größeren Bereich reicht als die Sieblinie bei deutlich höheren W/Z-Werten im unteren Bild (Hinweis auf Entmischungen beim Einbau).

Bild 16 a zeigt einen senkrechten Schnitt durch den Stabstahl und das Bohrloch. Das Bohrloch ist mit einer Diamantkrone hergestellt und der Stabstahl mit Vergußmörtel eingegossen.

Die Bohrlochwandung links von der Bildmitte ist an der geraden Schnittlinie des Diamantbohrers erkennbar. Rechts von der Bildmitte ist die Rippe des

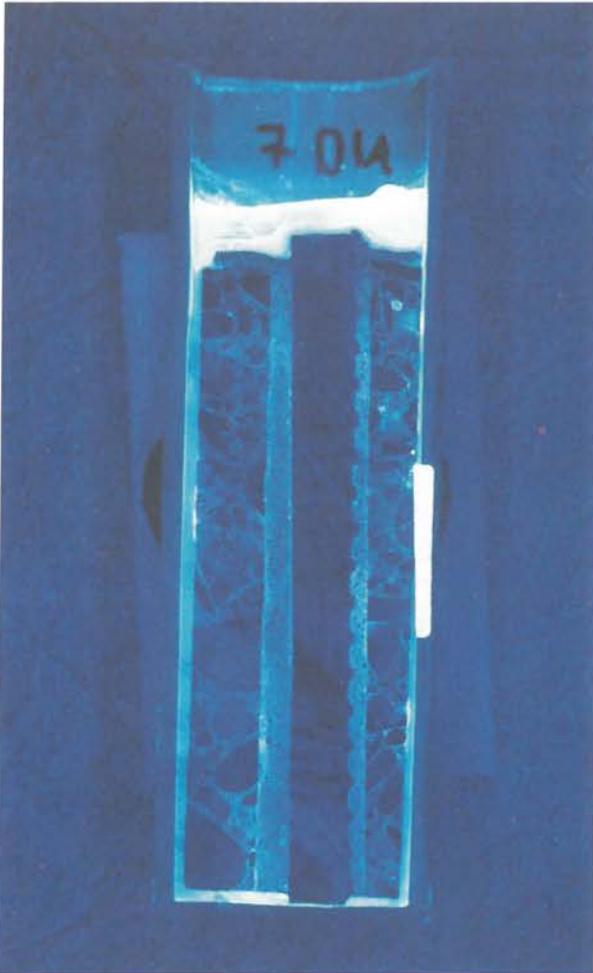


Bild 16 a: Beton nach Zugversuch an einer Stabstahlverankerung; Übersichtsbild

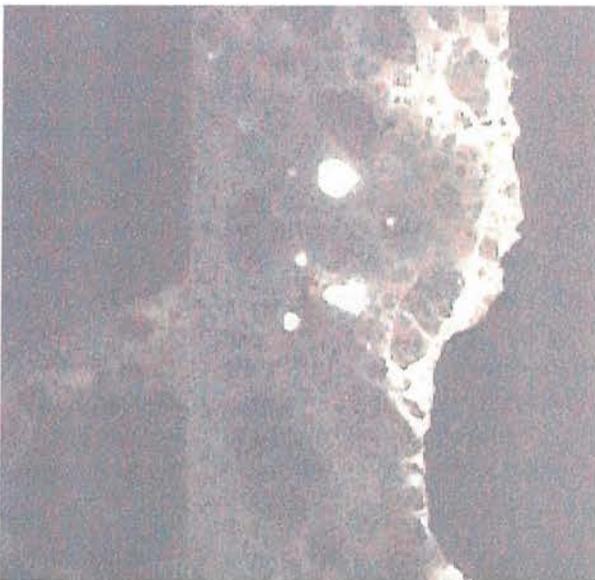


Bild 16 b: Beton nach Zugversuch an einer Stabstahlverankerung, Detailaufnahme  
(Das Bild 16 b zeigt eine Detailaufnahme des Bildes 16 a, Bildausschnitt ca. 5,6 mm x 5,6 mm)

Stabstahles erkennbar; die links vom Stabstahl vertikal verlaufende helle Zone stellt die beim Zugver-

such beschädigte Verbundzone zwischen Stabstahl und Vergußmörtel dar. Verbundriß-Haupttrichtungsverlauf zeichnet sich unter  $45^\circ$  ab.

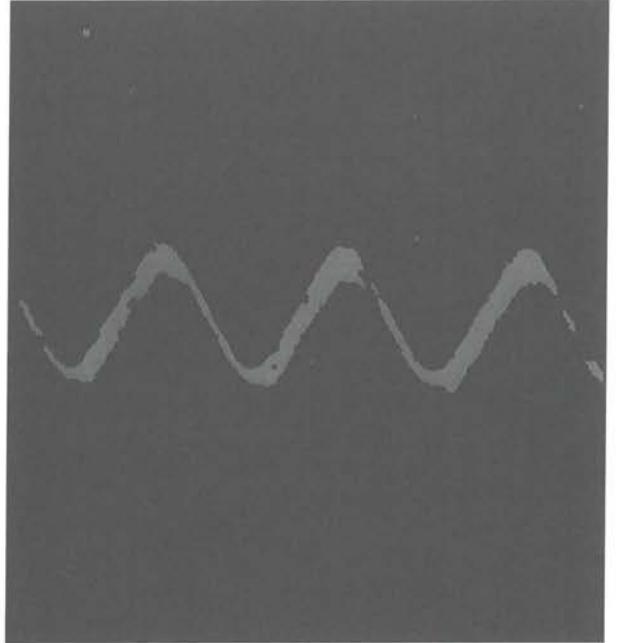


Bild 17: Kupplungsstück einer Spanngliedkoppelstelle  
(Bildausschnitt ca. 5,6 mm x 5,6 mm)

Das Bild 17 zeigt den mit einem Harz ausgefüllten Hohlraum eines Kupplungsstückes einer Spanngliedkoppelstelle in Falschfarben. Die schwarze Fläche stellt die beiden Kupplungsstücke dar. Die Steigung der Gewindegänge verläuft nicht gleichmäßig, somit kein Kraftschluß im mittleren Bereich.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verpreßverfahren ist entwickelt worden, um Fehlstellen, Störungen usw. feststellen und Strukturanalysen an Betonprobekörpern durchführen zu können. Dabei werden größere Betonproben mit einem fluoreszierenden Harz gefüllt und nach Aushärtung ohne Störung des Gefüges geschnitten. Die Verpreßanlage ist geeignet für die Präparation der Proben, mit deren Hilfe Fragen im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit von Beton und zur Begutachtung von Schadensfällen geklärt werden können. Die Verpreßanlage bietet dabei die Voraussetzung für eine anschließende mikroskopische Betrachtung der Proben. Es ist eine mikroskopische Betrachtung an geschnittenen Proben und sowohl an Anschliff- als auch an Dünnschliffpräparaten möglich.

Die Probengröße ist durch die Abmessungen des Drucktopfes begrenzt. Es können für die Auswertung Bohrkern mit einem Durchmesser von bis zu 14 cm und Prismen mit einer Kantenlänge im Querschnitt von bis zu 10 cm verwendet werden. Die Probenhöhe ist auf ca. 15 cm begrenzt. Außer Betonproben können auch andere poröse Stoffe verpreßt werden (z. B. Asphaltbeton, Naturstein und Holz).

Voraussetzung für eine erfolgreiche Verpressung ist, daß die Proben vor der Verpressung ausreichend getrocknet sind. Bei der Trocknung der Proben müssen Schäden und Veränderungen am Material vermieden werden. Dabei ist zu beachten, daß die zu verpressende Probe mit einer noch strukturverträglichen Temperatur zu trocknen ist. Eine weitgehende, jedoch nicht vollständige Entfernung des Kapillarwassers aus dem Zementstein ist für die Verpressung der meisten Proben ausreichend. Noch verbleibendes Porenwasser des Zementsteins kann, wenn dies erforderlich ist, darüber hinaus mit Hilfe einer geeigneten Hydrophobierung entfernt werden. Die Hohlräume der zu verpressenden Matrix sind unterhalb einer bestimmten Größe mit einem Harz nicht mehr ohne weiteres füllbar. Es werden Möglichkeiten aufgezeigt, die ein besseres Eindringvermögen des Harzgemisches in die Probe ermöglichen.

Die Art des zum Verpressen verwendeten Kunststoffes ist abhängig von der zu verpressenden Probe und von den an die Auswertung gestellten Anforderungen. Bei der Auswertung wird UV-Licht zur Anregung der Fluoreszenz eingesetzt. Die Vorbereitung des Harzes beschränkt sich auf die Zugabe eines Pigmentes für die Fluoreszenzmarkierung zur Darstellung der Hohlräume, Poren und Risse.

In einem Drucktopf werden die zu untersuchenden Proben mit fluoreszierendem Kunststoff verpreßt. Der Drucktopf besteht aus massivem Aluminium und kann in einem Wasserbad temperiert werden. Das primäre Druckmedium ist Druckluft von 8 bar bis 10 bar. Die Schnittstelle für das Luft- und Öldruckteil ist der Druckumsetzer. Der Eingangsluftdruck des Druckumsetzers ist dem Ausgangsöldruck proportional. Der Drucktopf wird je nach gewünschtem Untersuchungsziel in variablen Druck- und/oder Zeitstufen betrieben. Der eingestellte Öldruck kann genau gesteuert werden. Die eingepreßte Harzmenge kann über Veränderungen des Kolbenweges bestimmt und protokolliert werden.

Der Verpreßvorgang ist beendet, wenn der angewählte Enddruck erreicht ist und dabei keine nen-

nenswerte Menge Harzgemisch mehr in die zu verpressende Matrix eindringt. Das Harz härtet danach unter Temperatur und Druck aus. Für die Aushärtung des Harzgemisches muß sichergestellt sein, daß alle Sicherheitsmaßnahmen voll funktionsfähig sind. Der Betrieb der Verpreßanlage bedarf während der Harzaushärtung ständiger Beobachtung. Nach der Aushärtung werden die Proben so geschnitten und ggf. geschliffen und poliert, wie es die Strukturauswertung erfordert. Die Probe kann dann unter einem Mikroskop ausgewertet werden. Gegenüber den Untersuchungsmethoden an Dünnschliffproben sind mit Hilfe des Verpreßverfahrens auch andere Untersuchungen am Anschliff möglich geworden.

Durch noch zu entwickelnde Techniken der Probenpräparation werden in Zukunft vielfältige Untersuchungen möglich sein. Z. B. kann durch Herausätzen der Matrix der verbleibende Harzkörper die Hohlräume dreidimensional darstellen und damit die Hohlraumstruktur sichtbar machen. Denkbar sind auch noch zu entwickelnde Behandlungsmethoden, mit denen in der zu untersuchenden Probe mit Hilfe von Farbindikatoren beispielsweise Verteilung und Gehalt schädigender Stoffe, wie z. B. Chloride bestimmt werden können.

In Analogie zur Quecksilberporosimetrie ist eine Aussage über Hohlraumgehalt und einzelne Porengrößen möglich. Durch Kalibrierung, z. B. mit der Methode der Quecksilberporosimetrie, könnten zusätzliche Probeninformationen gewonnen werden.

Das vorgestellte Verpreßverfahren kann zur Diagnose des Ist-Zustandes oder zur Schadensanalyse von Beton herangezogen werden. Es ist ein Werkzeug zum Fixieren des jeweiligen Zustandes der untersuchten Probe in Kunststoff. Es stellt sich als gutes Werkzeug für die Beobachtung von Schadensfällen heraus. Die Auswertung der Proben kann mit Hilfe eines Computers automatisiert werden. Vor jedem Verpreßvorgang müssen jedoch die Untersuchungsziele bekannt sein, denn eine Verpressung kann nur erfolgreich sein, wenn die Präparation der Proben im Hinblick auf die Auswertekriterien und das Auswertziel erfolgt.

## 5 Literatur

- [1] Zweiter Bericht über Schäden an Bauwerken der Bundesverkehrswege; Pressemitteilung Nr. 27/96, Bundesministerium für Verkehr, 1995
- [2] TOMANEK A., Silicone & Technik, Hanser Verlag, 1990
- [3] Hüls AG, Anwendung von organofunktionellen Silanen DYNASYLAN®
- [4] KLEINE-BÜHNUNG H./SCHEER O., Herstellung von Dünnschliffen für die automatische Bildanalyse von Betonproben, Beton- + Fertigteil-Technik H. 04.1980, S. 240 ff.

## Anhang

Verpressen der Betonproben  
Verfahrensschritte, Betriebsanleitung

## Verpressen der Betonproben

### **Verfahrensschritte, Betriebsanleitung**

Die Vorbereitung der Proben muß im Hinblick auf das jeweilige Untersuchungsziel erfolgen!

#### **I Trocknen der Betonproben**

1. Trockenschrank mit Luftabzug auf 60 °C bis 70 °C regeln, zufriedenstellende Gewichtskonstanz abwarten.
2. Abkühlen und Aufbewahren der Proben bei Raumtemperatur auf Silicagel, um z. B. beim Hydrophobieren einen Übergang des Hydrophobierungsmittels in Dampfform zu verhindern. Der entstehende Partialdruck behindert sonst ein Benetzen des inneren Probengefüges.

#### **II Anleitung zum Füllen der Proben im Exsikkator**

(für Hydrophobierung und für Harzverpressung)

1. Getrocknete Probe im Probebehälter mit 2 Folienbeuteln in den Vakuumexsikkator einsetzen. Der Exsikkatordeckel wird mit Hilfe von Exsikkatorfett (Fa. Merc Art.-Nr.: 4318) abgedichtet.
2. Der Druckmesser muß eingeschaltet und die Leitungen geöffnet werden (seitlichen Hahn in Vakuumierstellung bringen, Hähne am Exsikkator seitlich offen, oben zu).
3. Nachdem ca. 50 mbar erreicht sind, wird weiterhin mindestens 15 min lang evakuiert.
4. Der Kunststoffbehälter wird über einen aufgesetzten Trichter einschließlich Küken und Schlauch mit dem Gemisch befüllt (mind. 1 cm oberhalb des Versuchskörpers).
5. Das Küken kann geöffnet werden (es darf jedoch keine Außenluft in das Vakuum eingezogen werden), und die Befüllung des Kunststoffbehälters mit dem jeweiligen Gemisch kann erfolgen. Der dann meßbar wachsende Dampfdruck rührt aus dem Partialdampfdruck des Gemisches, das aufgefüllt worden ist.
6. Nach der Füllung des Kunststoffbehälters kann ein Druckausgleich erfolgen. Die seitliche Zuführungsleitung und das Ventil in der Nähe der Pumpe wird vorsichtig geöffnet. Der unter dem Luftdruck einer Atmosphäre stehende Außendruck preßt das Gemisch in die Hohlräume. Beutel schließen.
7. Probe kann entnommen werden, Reinigen des Exsikkators, Einfülltrichter ist nach Hydrophobierung mit Brennspritus und nach Füllung mit Harz mit Aceton zu reinigen



11. Ausbau der Probe am darauffolgenden Tag
  - Heizung ausschalten
  - Druck abbauen, Hahn H<sub>4</sub> am Drucktopf auf
  - Gebrauchtes Paraffinöl ablassen, Hahn H<sub>5</sub> unten auf
  
12. Probenreinigung

Probe entnehmen und Harz und Paraffinöl entfernen. Bei 30 °C in den Trockenschrank mit eingeschalteter Abluft stellen. Benutzte Geräte und Teile mit Aceton reinigen, jedoch nicht die mit Harz verpreßte Probe selbst, da Harz von Aceton angegriffen wird. Paraffinöl reinigen.

## **B „mitteldichte Proben“ Silanzugabe zum Harz**

Wenn es nicht erforderlich ist, bis in sehr feine Bereiche vorzudringen und bei mitteldichten Proben, kann mit folgender Vorbehandlung verpreßt werden: Man kann ca. 3 Gew.-% Silan direkt dem Harz beimischen. Mit zunehmender Dichte der Betonmatrix soll der Silananteil im Harz zunehmen.

Reihenfolge des Ansatzes:

1. Harz mit 3 % bis 5 % Härter mischen.
2. Fluoreszenzmittel begeben.
3. Silan beimischen.
4. 5 min in Ruhe reifen lassen.
5. Weiterhin verfahren wie vor unter **III A**.

## **C „dichte Proben“ vorangehendes Hydrophobieren**

Hierbei muß in zwei Arbeitsgängen gehandelt werden.

1. Hydrophobieren des Probekörpers.
2. Verpressen des hydrophobierten Probekörpers mit Harz.

Hydrophobierungsmittel ... Fa. ... % Wirkstoffgehalt bzw. Gehalt des Produktes im Lösemittel bzw. ... % Hydrophobierungsmittel gelöst im Harz.

1. Bestimmung des Trockengewichtes der Probe vor der Hydrophobierung.
2. Wie unter **II**, jedoch Füllen mit Hydrophobierungsmittel, Messung der Aufnahme des Hydrophobierungsmittels unter Druck; Dauer und Druckhöhe? (im Normalfall 2 h ausreichend).
3. Beutel mit Probe verschließen und 1 Tag im Hydrophobierungsmittel lagern.
4. Aufnahme des Hydrophobierungsmittels nach der Vakuumfüllung ermitteln.
5. Nach erfolgter Hydrophobierung unter Abzug abdunsten lassen bis kein wahrnehmbarer Geruch mehr von der Probe ausgeht.
6. Im Trockenschrank bei 30 °C trocknen.
7. Eventuell den Vorgang 6. wiederholen bis Probe ausreichend ausgetrocknet ist, danach auf Blaugel abkühlen.
8. Weiterhin verfahren wie vor unter **III A/B**.

