

# Beton aus aufbereitetem Altbeton

## Technologie und Eigenschaften

Von Karlhans Wesche und Rolf-Rainer Schulz, Aachen \*)

### Übersicht

*Eine Wiederverwertung von Altbeton aus abgebrochenen Bauwerken scheint längerfristig unverzichtbar, weil in Ballungsgebieten große, zunehmende Mengen solchen Altbetons anfallen, weil aus Umweltschutzgründen Zahl und Kapazität geeigneter Deponien in dicht besiedelten Gebieten abnehmen und weil aus Landschaftsschutzgründen die abbaufähigen Mengen an Kiessand für Betonzuschlag ebenfalls abnehmen.*

*Eine systematische Auswertung des Schrifttums sowie ergänzende Untersuchungen am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen haben ergeben, daß es grundsätzlich möglich ist, aus Altbeton, der zu Betonsplitt gebrochen und aufbereitet wird, erneut Konstruktionsbeton herzustellen. Allerdings weist Beton, dessen Zuschlag über 4 mm aus aufbereitetem Altbetonsplitt besteht, nicht die gleichen günstigen Eigenschaften wie sonst gleich zusammengesetzter Beton aus Normalzuschlag auf. Seine Festigkeit kann bis zu einem Viertel kleiner und seine Verformungen aus Kriechen und Schwinden können mehr als ein Drittel größer sein. Außerdem erfordert Beton mit Zuschlag aus aufbereitetem Altbeton besondere technologische Maßnahmen bei seiner Herstellung, weil solcher Zuschlag stärker Wasser saugt als dichter Normalzuschlag.*

### 1. Anfall von Altbeton

Der Gedanke, Baustoffe und Bauteile mehrfach zu verwenden, ist nicht neu. So mußten bereits antike Bauwerke als bequeme Baumaterialquellen herhalten. Zum Teil landeten sie als Kalksteine in den Kalköfen benachbarter neuer Dörfer und Städte, oft dienten sie als Fundamente und Wandbausteine neuer Bauten. Durch Urkunden ist belegt, daß Karl der Große die Erlaubnis zur Ausbeutung der römischen Wasserleitung von der Eifel nach Köln gab, die teilweise aus Beton hergestellt worden war. Aus diesem Beton wurden Hausteine gefertigt, aus denen man wiederum Wohnhäuser, Klöster, Kirchen und Burgen baute. Der so wiederverwendete Beton hat sich im Ver-

---

\*) Nach einem Vortrag von K. Wesche auf der Technisch-wissenschaftlichen Zement-Tagung '81 vom 23. bis 25. September 1981 in Nürnberg

gleich zu manchen Natursteinbauten bis heute relativ gut bewährt [1].

Unmittelbar nach dem zweiten Weltkrieg wurde der in großen Mengen vorhandene Trümmerschutt dazu verwendet, neuen Beton herzustellen. Dies war verhältnismäßig einfach, da man nur das Holz aus den üblichen Holzdecken und das meist aus Mauerziegeln bestehende Mauerwerk zu trennen brauchte. Es entstand ein Leichtbeton, der Ziegelsplittbeton, aus dem Mauersteine und Schüttbetonwände hergestellt wurden [2].

Heute wird Abbruchmaterial fast immer auf Deponien gefahren, deren Kapazität jedoch naturgemäß begrenzt ist. Nehmen wir an, daß nur ein Teil der seit 1920 hergestellten Betonbauten nach 50 Jahren – aus welchen Gründen auch immer – wieder abgerissen wird, so kommt schon in diesem Jahrhundert ein beträchtliches Volumen an Abbruchbeton auf uns zu. Es muß darum schon jetzt überlegt werden, wie man den ständig wachsenden Umweltbelastungen durch Bauschutt entgegenwirken kann, zumal es immer schwieriger wird, geeignete Deponien zu finden. Diesem Problem läuft die Entwicklung parallel, daß die Ausbeutung von Kiessandvorkommen durch Auflagen und Ablehnungen immer schwieriger wird, so daß in absehbarer Zeit mit einer Zuschlagverknappung gerechnet werden muß [3]. Durch die Aufbereitung von Altbeton zu Betonsplitt und die Herstellung von Betonsplittbeton könnte diese Verknappung gemildert werden.

Prognosen zur Entwicklung der jährlichen Altbetonproduktion werden z. B. in [4, 5, 6, 7] gegeben. Die Angaben reichen zum Teil bis zum Jahre 2020 und stützen sich auf die bisherige Entwicklung des Betonverbrauchs sowie auf eine mehr oder weniger differenziert angenommene Lebensdauer der damit hergestellten Bauwerke. Obwohl diese Abschätzungen nur sehr grob sein können, zeigen sie, daß Altbeton bereits heute in nennenswerten Mengen anfällt (allein in der EG rd. 130 Mt/a), die bis zum Jahre 2020 sogar etwa auf das 5- bis 6fache anwachsen können.

In den USA rechnet man zur Zeit mit rd. 18 Mt/a Gebäudeschutt [4], wobei nicht der Schutt von abgerissenen Straßendecken berücksichtigt ist. Es wird geschätzt, daß davon rd. die Hälfte als Zuschlag genutzt werden könnte [8]. Amerikanische Untersuchungen [9] zeigen allerdings, daß Altbeton-Aufbereitungsanlagen erst dann wirtschaftlich sind, d. h. im Dauerbetrieb arbeiten können, wenn im Einzugsgebiet des Standortes jährlich wenigstens 185 000 t Betonschutt anfallen. In den USA dürften solche Voraussetzungen etwa in städtischen Bereichen mit rd. 1 Million Einwohnern vorliegen.

## **2. Zerkleinern von Betonbauwerken**

Da man Bauwerke heutzutage im allgemeinen noch nicht unter dem Gesichtspunkt errichtet, daß sie auch leicht zu demontieren sind, gestaltet sich der Abbruch meist schwierig, kostspielig und manchmal auch gefährlich, insbesondere bei vorgespannten Bauteilen [33]. In bebauter Umgebung wird häufig mit konventionellen Geräten, wie stählernen Fallbirnen, Abbruchhämmern usw., gearbeitet, wobei der Beton zwar zertrümmert wird, die Bewehrung jedoch gesondert mit Schneidbrennern zertrennt werden muß. Diese

Methoden sind sehr kostenintensiv und sollten auf ein unvermeidbares Maß beschränkt werden, d. h. es sollten möglichst große Bauteile abtransportiert und an geeigneter Stelle mit wirtschaftlicheren Mitteln, z. B. Explosivstoffen, weiter zerlegt werden [5]. Versuche [6] zeigen, daß es durch geschickte Anordnung von Sprengladungen gelingen kann, die Bewehrung so vom Beton zu trennen, daß die Bewehrungskörbe praktisch stehen bleiben und der Beton bereits als Granulat anfällt.

Brechanlagen, mit denen man normalerweise ausgediente Maschinenteile, Flugzeugmotoren usw. zertrümmert, scheinen sich nach ersten Versuchen auch hervorragend dazu zu eignen, relativ große (bis zu 1,2 m x 1,2 m x 2 m) bewehrte Betonbauteile zu zerkleinern [6]. Unbewehrter Beton kann relativ problemlos in herkömmlichen Brechanlagen zerkleinert werden. Auf weitere Abbruch- und Zerkleinerungsverfahren soll an dieser Stelle nicht mehr eingegangen werden. Es sei statt dessen auf die Literatur verwiesen, z. B. [10, 11].

### **3. Derzeitige Anwendungsmöglichkeiten**

Wenngleich heute bereits die Zerkleinerung bewehrter Bauteile technologisch lösbar zu sein scheint, sind schwach bewehrte Betonbauteile, wie z. B. Straßendecken und Rollbahnen von Flugplätzen, am ehesten für die Aufbereitung geeignet. Straßenbeton fällt dort an, wo er auch wieder verwendet werden kann, z. B. für die zementgebundene Tragschicht und für den Unterbeton, nicht jedoch für die Verschleißschicht, da diese nach wie vor mit verschleißfestem natürlichen Gestein hergestellt werden sollte. Er ist von relativ gleichmäßiger und insgesamt hoher Qualität, mit weit weniger Verunreinigungen als im Gebäudeschutt, und die Bruchstücke weisen eine gleichmäßige Dicke auf [12 bis 17]. Daher läßt sich solcher Beton mit fahrbaren Brech- und Mischanlagen an Ort und Stelle brechen, absieben und als Zuschlag für neuen Beton wiederverwenden. Die Transportkostenersparnis gegenüber natürlichen Zuschlägen kann dabei die Energiekosten zum Brechen kompensieren bzw. sogar übertreffen. Berger [12] stellt eine Reihe von bemerkenswerten Betonstraßen-Recycling-Projekten vor, die im Zeitraum zwischen 1964 und 1980 in den USA durchgeführt wurden. Er hebt hervor, daß die Zahl der Projekte gerade in jüngster Zeit stark ansteigt.

Der zerkleinerte Beton wird jedoch nicht nur als Zuschlag für neuen Straßenbeton, sondern auch für zementgebundene Tragschichten und Frostschutz- bzw. Filterschichten verwendet. Dem Feinkorn wird noch eine gewisse Reaktivität zugeschrieben, so daß es zur Stabilisierung derartiger Schichten beitragen kann. Andere Nutzungen sind: Sandverfüllungen, Uferbefestigungen (hierzu sind sogar relativ große Bauteile einschließlich Bewehrung geeignet), Gleisunterbau und Neutralisation saurer industrieller Abwässer bzw. saurer Böden in der Landwirtschaft.

Nach Frondistou-Yannas [9] wird zur Zeit in den USA nur Straßenbeton in größerem Umfang wiederverwendet, der dort rd. 15 bis 20 % des gesamten Betonverbrauchs ausmacht. Zur Zeit arbeiten in den USA mehr als 10 Altbetonaufbereitungsanlagen wirtschaftlich. Da

der Altbetonsplitt zum überwiegenden Teil aus Straßendecken gewonnen wird, sind die Anlagen zumeist transportabel.

Um auch Verunreinigungen wie Gips usw. aus dem Gebäudeschutt aussondern zu können, sind wesentlich größere und daher stationäre Anlagen notwendig. Die Separation ist jedoch technisch „machbar“. Verunreinigungen treten in verschiedenen Erscheinungsformen auf: Der Altbeton kann z. B. während seiner vorhergehenden Nutzung mit aggressiven Wässern oder Böden in Berührung gekommen sein. Besteht ein solcher Verdacht, so ist es nach den heutigen Gegebenheiten nicht vertretbar, derartige Betone, außer für untergeordnete Zwecke, wiederzuverwenden [6]. So wird es bei der starken Chloridbelastung unserer Straßen im Gegensatz zu den USA wohl nur in seltenen Fällen möglich sein, Betonsplitt für bewehrte Bauteile aus Betonfahrbahndecken zu gewinnen.

Andere Verunreinigungen sind Ziegelbruchstücke, Holz, Glas, Metall, Kunststoffe, Gips usw. Ziegelbruchstücke wirken z. B. nur dadurch störend, daß sie eine geringere Festigkeit aufweisen als Beton, und können daher in geringen Mengen toleriert werden. Der Gipsanteil sollte dagegen wegen der Treibgefahr gemäß DIN 4226 auf weniger als 1,0 M.-% des Zuschlags begrenzt werden.

Neuere Untersuchungen von Buck [4] zeigen bei 5 M.-% Gipsanteil schädliche Treiberscheinungen, die allerdings bei trockenen Betonen geringer sind. Durch Zemente mit niedrigem  $C_3A$ -Gehalt und Flugaschezusätzen ließen sich die schädlichen Auswirkungen nicht wirksam vermindern.

Sehr umfangreiche Untersuchungen werden zur Zeit von Lambotte und de Pauw [28] durchgeführt, aus denen sich bereits folgende Schlüsse ziehen lassen:

- Alle Verunreinigungen wie feine und grobe Gipszusätze, Kalkmörtel und Ziegelsplitt beeinflussen die Verarbeitbarkeit auf die gleiche Weise: Bei steigendem Anteil verschlechtert sich die Verarbeitbarkeit.
- Verunreinigungen durch Gips vermindern die Druckfestigkeit und andere damit zusammenhängende Eigenschaften. Ziegelsplitt zeigt derartige Auswirkungen nicht bzw. nur, wenn durch erhöhte Wasserzugabe die gleiche Verarbeitbarkeit angestrebt wird.

Nach [4] scheint sich Gips im feineren Betonsplitt zu konzentrieren. Frondistou-Yannas geht in ihrer Studie [9] davon aus, daß Verunreinigungen in Form von Gips, Holz und Kunststoffen mit herkömmlichen Auswaschverfahren bei der Zuschlagaufbereitung ausgeschieden werden können. Da Gipspulver schnellere und stärkere Reaktionen hervorruft als gröbere Gipskörner, sollten nur die groben Anteile des Betonsplitts wiederverwendet werden.

Dieselbe Autorin [9] kommt aufgrund einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu dem Ergebnis, daß die Kosten für Kiessand- und Betonsplittbeton nur dann gleich sind, wenn Betonsplitt höchstens halb so teuer ist wie Kiessand, weil bei Betonsplitt rd. 10 % mehr Zement benötigt wird. Solche Verhältnisse liegen vor, wenn einerseits ausreichend große Altbetonmengen in der näheren Umgebung anfallen und andererseits natürliche Zuschläge über größere Entfernungen herangeschaft werden müßten. (Die Prozeßenergie soll

angeblich für wiederverwendeten und natürlichen – wahrscheinlich gebrochenen – Zuschlag nahezu gleich sein.)

Die bisherigen Erfahrungen in den USA zeigen, daß es in absehbarer Zeit auch in der Bundesrepublik – von den Vorteilen für unsere Umwelt abgesehen – wirtschaftlich sein kann, im Bereich der Millionenstädte Altbeton aufzubereiten und wiederzuverwenden. Dazu sollten heute schon forschungsmäßig die Grundlagen geschaffen werden.

#### **4. Theoretische Überlegungen zum Festigkeits- und Verformungsverhalten von Betonsplittbeton**

##### **4.1 Druckfestigkeit**

Betonsplitt ist nicht als Normalzuschlag, also als Zuschlag im Sinne der DIN 4226 Teil 1, Entw. Nov. 80, anzusehen, da seine Festigkeit in der Regel unter  $100 \text{ N/mm}^2$  liegt. Es kann daher nicht generell angenommen werden, daß der neue Zementstein im Betonsplittbeton die Betonfestigkeit allein bestimmt. Ähnlich wie bei Leichtbetonen sind auch Fälle denkbar, in denen sich die Festigkeiten der beiden Phasen überschneiden, so daß neben der Zementsteinfestigkeit auch die Kornfestigkeit des Betonsplitts für den Beton maßgebend sein könnte.

Andererseits gilt für die Betonfestigkeit noch nicht das Verfahren von Schütz für Leichtbeton [18, 19], weil die obere Anwendungsgrenze dieses Verfahrens (Zuschlag-E-Modul  $E_g = 19000 \text{ N/mm}^2$ ) in der Regel überschritten wird, d. h. daß die Druckfestigkeit des Betonsplittbetons von derjenigen des Altbetons unabhängig sein muß, solange letzterer mindestens etwa der Festigkeitsklasse B 10 entspricht.

Trennt man überlegungsmäßig die im Betonsplitt enthaltenen Phasen und addiert die Matrix zum frischen Zementstein, so kann der Beton gewissermaßen als Normalbeton mit relativ hohem Zementsteinvolumen aufgefaßt werden. Der Einfluß des Zementsteinvolumens auf die Betondruckfestigkeit wird zwar normalerweise vernachlässigt, man weiß jedoch, daß sich die Zementsteinschicht zwischen den Zuschlagkörnern stärker verformen kann, wenn sie dicker ist. Dadurch werden die Zug- und Spaltzugspannungen größer und die Betonfestigkeit niedriger. Die Abnahme kann bei Zementgehalten zwischen  $200$  und  $450 \text{ kg/m}^3$  bis zu rd. 15 % betragen [19].

Für Betonsplittbetone bedeutet dies: Die Festigkeit wird infolge des hohen Gesamtzementsteinvolumens geringer sein als bei vergleichbaren Betonen mit Normalzuschlag. Außerdem wird die Druckfestigkeit dadurch beeinflußt werden, daß der Betonsplitt durch die gebrochene rauhe Oberfläche bei gleicher Konsistenz einen höheren Wasser- bzw. Zementleimanspruch aufweist und daß durch die Zementsteinporen des Altbetons ein Teil des Anmachwassers wie bei Leichtzuschlag aufgesaugt werden kann.

## 4.2 Formänderungsverhalten

Im Normalfall genügt es, Beton nach der Druckfestigkeit zu entwerfen. Der E-Modul sowie das Kriech- und Schwindverhalten werden erforderlichenfalls bei der Bauteilbemessung entsprechend der vorgegebenen Betonfestigkeitsklasse, der Konsistenz und Zementart, dem Alter, den Bauteilabmessungen und Umgebungsbedingungen nach DIN 1045 bzw. DIN 4227 abgeschätzt. Die in den Normen enthaltenen Richtwerte beziehen sich auf Beton mit Zuschlag aus überwiegend quarzitischem Kiessand (z. B. Rheinkiesand). Je nach Zuschlagart können unter sonst gleichen Bedingungen bis zu rd. 40 % niedrigere oder höhere E-Moduln auftreten.

Da Betonsplittbetone höhere Gesamtzementsteinanteile als vergleichbare Normalbetone aufweisen, muß mit einem erheblich veränderten Verformungsverhalten gerechnet werden, so daß untersucht werden muß, ob die Richtwerte bzw. Rechenverfahren nach DIN 1045 bzw. DIN 4227 auch für Betonsplittbetone anwendbar sind.

Da der Wasseranspruch besonders stark durch die Feinanteile im Betonsplitt ansteigt (vgl. Abschn. 3.1), wird allgemein empfohlen [z. B. 4, 20 und 21], nur den Grobzuschlag  $\geq 4$  mm durch Betonsplitt zu ersetzen und als Feinkorn Natursand zu verwenden. Bild 1 veranschaulicht den Mischungsaufbau für Betonsplittbetone, die nach diesem Prinzip hergestellt werden. Um den Einfluß des Betonsplitts beurteilen zu können, müssen Vergleichsbetone mit natürlichem Grobzuschlag und gleicher volumenmäßiger Zusammensetzung hergestellt werden. Die eingetragenen Volumenanteile entsprechen dem Aufbau eigener Versuchsmischungen.

Bild 2 gibt eine Übersicht über mögliche Betonsplittgehalte, wenn vorausgesetzt wird, daß das Volumen des frischen Zementleims  $V_m$  im baupraktischen Bereich, also zwischen etwa 0,2 und 0,4  $\text{m}^3/\text{m}^3$  liegt. Da der Grobzuschlaganteil  $V_g$  zusätzlich von der Sieblinie abhängt, können Betonsplittvolumen von rd. 0,2 bis 0,6  $\text{m}^3/\text{m}^3$  vor-

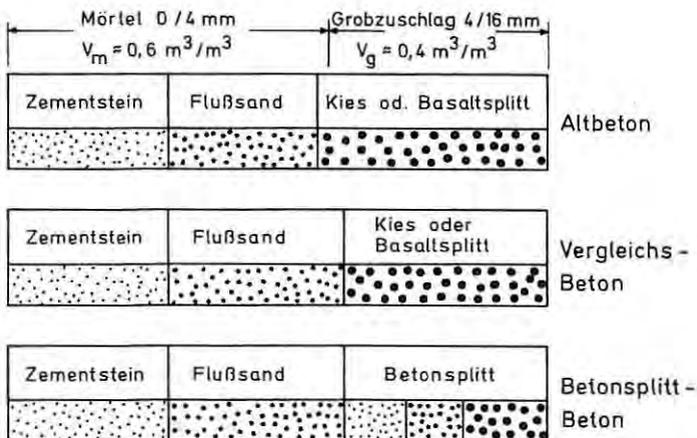


Bild 1 Zusammensetzung der Betone

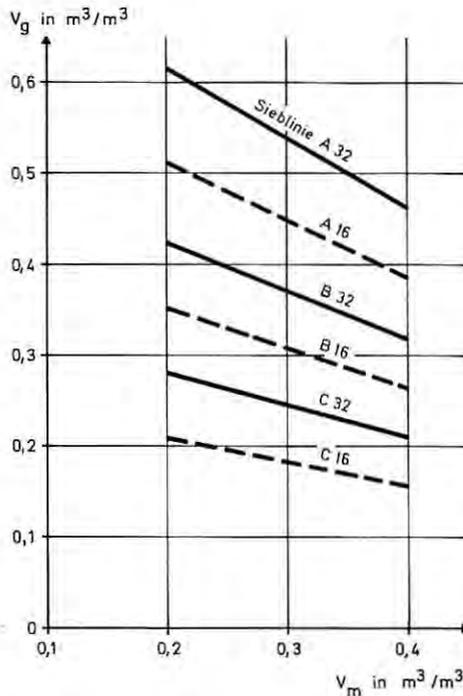


Bild 2 Betonsplittvolumen  $V_g$  als Funktion des Zementleimvolumens  $V_m$ , des Größtkorns und der Sieblinie unter der Voraussetzung, daß Betonsplitt nur als Grobkorn ( $> 4$  mm) verwendet wird

kommen. Die Mischungen nach Bild 1 liegen also mit  $V_g = 0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$  im mittleren Bereich.

Weil der Einfluß des Betonsplitts auf die Eigenschaften des Betonsplittbetons mit dem Volumenanteil variiert, ist die Abschätzung des Formänderungsverhaltens relativ kompliziert. Zunächst soll theoretisch überlegt werden, wie sich die elastischen Eigenschaften von Betonsplittbeton in Abhängigkeit vom Grobzuschlaganteil und E-Modul des Betonsplitts im Vergleich zu Normalbetonen verändern. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen anschließend zur Abschätzung des Langzeitverhaltens benutzt werden.

#### 4.2.1 Elastizitätsmodul

Nach DIN 4227 sind wie erwähnt die Richtwerte für den E-Modul von Beton um bis zu 40 % kleiner, wenn stark wassersaugende Zuschläge verwendet werden. Besteht nur rd. die Hälfte des Zuschlags aus solchem Gestein, müßte logischerweise auch der Abminderungsfaktor reduziert werden, also z. B. auf 20 %. Die Norm berücksichtigt jedoch die Volumenanteile verschiedener Zuschläge ebenso wenig wie das Volumenverhältnis von Zementstein und Zuschlag.

Für den letztgenannten Einfluß kann nach W. Manns [22] folgende Gleichung angegeben werden, die für den statischen E-Modul von wassergesättigtem Beton im Alter von 28 Tagen gilt:

$$\text{stat } E_{b28} = a \cdot \text{stat } E_m = a \cdot b \cdot 12500 \text{ N/mm}^2$$

Dabei ist

a = Beiwert für den E-Modul des Zuschlags und für den Zementstein- bzw. Zuschlaganteil

b = Beiwert für Zementsteinporenraum bzw. -dichtigkeit oder für w/z-Wert und Zementart.

Bei lufttrockenem Beton muß man mit kleineren Werten für stat  $E_m$  rechnen.

Die Beiwerte lassen sich Diagrammen, siehe Bild 3, entnehmen, deren Anwendungsbereich zwischen Zementsteinvolumen von 0,2 und 0,4  $\text{m}^3/\text{m}^3$  liegt.

Diese ursprünglich für Normalbetone aufgestellten Diagramme sind selbstverständlich nicht ohne weiteres auf Betonsplittbetone übertragbar, sondern es sind einige Vorüberlegungen vonnöten. Zunächst muß vorausgesetzt werden, daß der E-Modul des wiederverwendeten Altbetons nicht unter dem des frischen Zementsteins liegen darf. Der Beton muß vereinfachend als Zweistoffsystem aufgefaßt werden, d. h. der Natursandanteil muß rechnerisch entweder dem Zementstein oder dem Grobzuschlag zugeschlagen werden. Im erstgenannten Fall erhält man Matrix- bzw. Mörtelanteile ( $V_m$ ) über 0,4  $\text{m}^3/\text{m}^3$ , die außerhalb des Anwendungsbereiches der Diagramme liegen. Verwendet man die von W. Manns ebenfalls angegebene Formel

$$E = \frac{1}{\frac{1 - \lambda \sqrt[3]{\frac{V_g}{\lambda}}}{E_m} + \frac{\lambda \sqrt[3]{\frac{V_g}{\lambda}}}{\sqrt[3]{\left(\frac{V_g}{\lambda}\right)^2 E_g} + \left(1 - \sqrt[3]{\left(\frac{V_g}{\lambda}\right)^2} E_m}}}$$

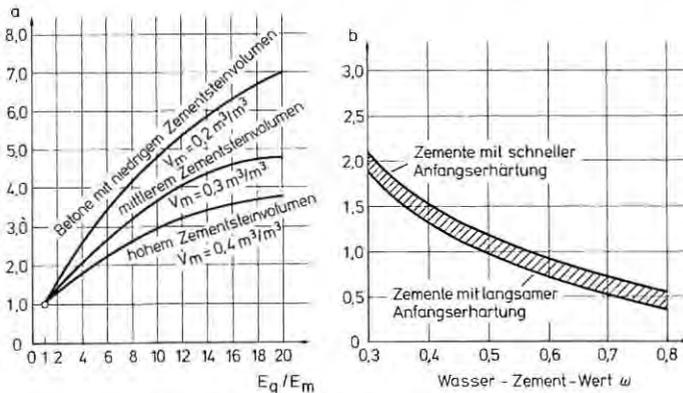


Bild 3 Faktoren a und b zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften bei statischer Beanspruchung von wassersattem Zementstein, Mörtel und Beton [22]

für das allgemeine horizontal geschichtete Modell eines Zweistoffsystems mit der Modellkonstanten

$$\lambda = 0,406 - 0,587 V_m + 0,061 \frac{D}{10} + 0,917 \frac{E_g}{10 E_m} - 0,289 \left( \frac{E_g}{10 E_m} \right)^2$$

$D$  = Größtkorndurchmesser,

dann kann der statische E-Modul des Betons auch in Abhängigkeit von relativ hohen Matrixanteilen angegeben werden.

Daraus wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem man Zementstein und Natursand zusammen als Mörtelmatrix behandelt und Betonsplitt mit dem tatsächlichen Volumen ansetzt. Als Hilfsmittel dienen Diagramme, siehe Bild 4, die nach obengenannter Gleichung aufgestellt wurden und wie folgt benutzt werden können:

a) der E-Modul des Altbetons  $E_g$  wird nach DIN 1048 Teil 1 bestimmt, nach [22] errechnet oder bei bekannter Druckfestigkeit DIN 1045 bzw. 4227 entnommen,

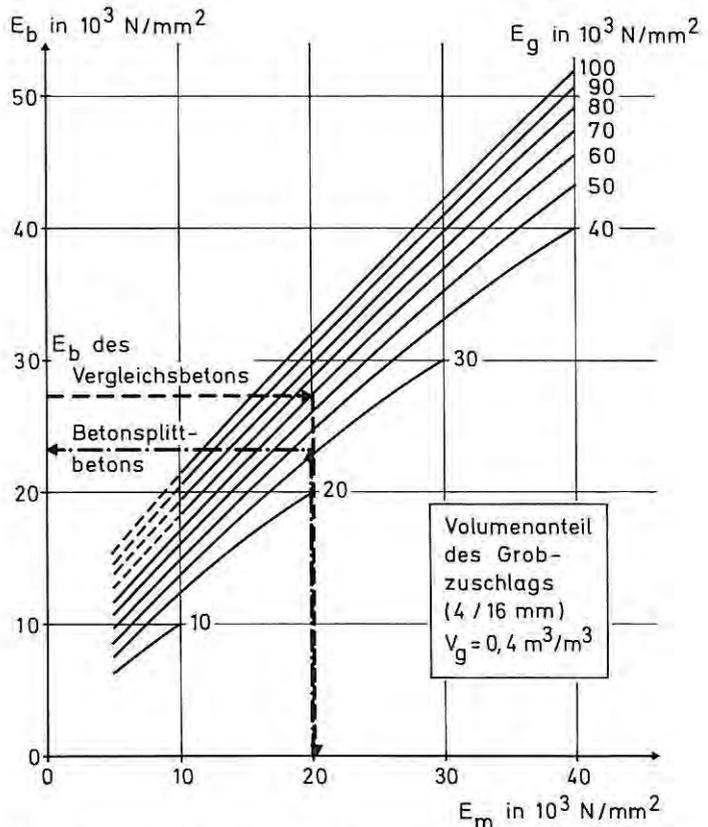


Bild 4 Statischer E-Modul  $E_b$  von Betonsplitt- und Normalbeton in Abhängigkeit vom statischen E-Modul  $E_m$  der Mörtelmatrix und  $E_g$  des Grobzuschlags

b) Der E-Modul der Mörtelmatrix  $E_m$  wird nach [22] abgeschätzt, auf der Abszisse abgetragen und über den Wert  $E_g$  auf der Ordinate der E-Modul des Betonsplittbetons  $E_b$  abgelesen.  $E_m$  kann auch über den E-Modul  $E_b$  eines Vergleichbetons von der Ordinate ausgehend über den Zuschlag-E-Modul  $E_g$  ermittelt werden, der nach [19] eingesetzt werden kann.  $E_b$  des Vergleichbetons wird wie bei a) erhalten.

Wegen der größeren Genauigkeit ist die Prüfung der Beton-E-Moduln gegenüber den anderen Verfahren vorzuziehen.

Bild 4 gilt für einen Volumenanteil des Grobzuschlags von  $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . Bei anderen Zuschlagvolumen sind entsprechende Diagramme zu benutzen. Entsprechend dem Beispiel in Bild 4 muß bei Betonsplittbeton immer mit einem kleineren E-Modul als beim Altbeton gerechnet werden.

#### 4.2.2 Kriechen

Der im Betonsplitt enthaltene Zementstein war in der Regel unbekanntes Umwelt- und Belastungsbedingungen ausgesetzt, und die Zementart sowie das Zementsteinvolumen dürften nur in wenigen Fällen bekannt sein. Lewandowski [23] schätzt, daß das nichtelastische Verhalten etwa im Verhältnis der Zementmatrixanteile höher ist als beim Normalbeton, d. h. der zusätzliche Kriechanteil des Zuschlags könnte z. B. nach Bild 5 bestimmt werden, wobei aber das Alter des Betonsplitts anders als das des neueren Zementsteins berücksichtigt werden müßte.

Zur Berechnung des Kriechmaßes wäre es möglich, die DIN 4227 wie für Normalbeton anzuwenden und sinnvoll zu ergänzen, d. h. der E-Modul wird z. B. entsprechend Abschn. 4.2.1 vermindert und die Grundfließzahl um den Faktor 1,25 erhöht. Der vergrößerte Gesamtzementsteinanteil wird also formell dadurch berücksichtigt, daß

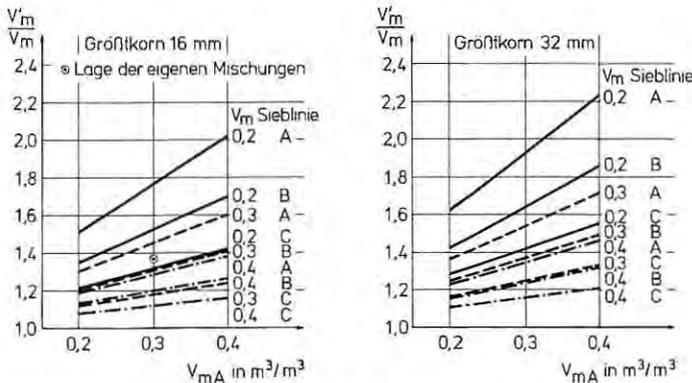


Bild 5 Gesamtzementsteinanteil  $V'_m$  im Betonsplittbeton bezogen auf das Volumen des frischen Zementsteins  $V_m$  als Funktion des Matrixvolumens im Altbeton  $V_{mA}$  für verschiedene Gehalte an frischem Zementleim und für verschiedene Sieblinien

man die Ausgangskonsistenz entsprechend einem höheren Zementleimanspruch um eine Klasse anhebt (vgl. DIN 4227 Teil 1, Tab. 7).

#### 4.2.3 *Schwinden*

Das Schwinden ist nach [19] unter sonst konstanten Bedingungen (Matrix, Zuschlag und Austrocknungsverlauf) zunächst dem Matrixvolumen proportional. Das Schwindmaß wird aber darüber hinaus durch den nicht schwindenden Zuschlag behindert und dadurch verringert. Wendet man diese Erkenntnisse auf Betonsplittbeton an, so kann man erwarten, daß das Schwindmaß größer ist,

a) weil der Betonsplitt einen geringeren E-Modul als z. B. Kiessand aufweist und deshalb das Schwinden des neuen Zementsteins weniger behindert,

b) weil der im Betonsplitt enthaltene Zementstein selbst schwindet, jedoch trotz Durchfeuchtung mit Anmachwasser nicht in dem Maße wie der neue Zementstein. Durch die Wasseraufnahme des Betonsplitts ist der Gesamtwassergehalt größer und die Austrocknungszeit länger. Dadurch kann der Schwindverlauf verzögert werden.

Zur Abschätzung des Schwindmaßes kann wie bei Normal- bzw. Leichtbeton nach DIN 4227 bzw. DIN 4219 vorgegangen werden, d. h. das höhere Schwindmaß wird dadurch berücksichtigt, daß entweder entsprechend der Kriechmaßberechnung die Konsistenz um eine Klasse und damit das Grundswindmaß um 25 % erhöht wird oder daß wie für die höheren Leichtbetonklassen LB 25 bis LB 55 das Grundswindmaß um 20 % größer angenommen wird. Die Vorhersagegenauigkeit hängt unter anderem auch davon ab, welchen Gesamtzementsteinanteil der Betonsplittbeton aufweist (vgl. Bild 5).

## 5. **Bisherige Versuchsergebnisse**

### 5.1 **Verarbeitbarkeit des Frischbetons**

Der Betonsplitt zeigt eine wesentlich höhere Wasseraufnahme als Normalzuschlag. Wenn er jedoch wie bei Leichtzuschlägen vorgegäht wird, lassen sich durchaus übliche Verarbeitbarkeiten mit wenig erhöhten Zementleimgehalten erreichen. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, daß der Betonsand wegen seines hohen Wasseranspruchs ausgesondert und durch Natursand ersetzt wird. Dieser höhere Wasseranspruch wird insbesondere durch die Kornanteile unter 150 µm verursacht, die zumeist hydratisierte Zementpartikel sind [25].

### 5.2 **Druckfestigkeit**

In den Bildern 6 und 7 wird dargestellt, welchen Einfluß die Qualität des Altbetons auf die Festigkeit des damit hergestellten Betonsplittbetons ausübt, und zwar einmal für die 28-Tage-Druckfestigkeit und zum anderen für die 15-Jahre-Druckfestigkeit des Altbetons.

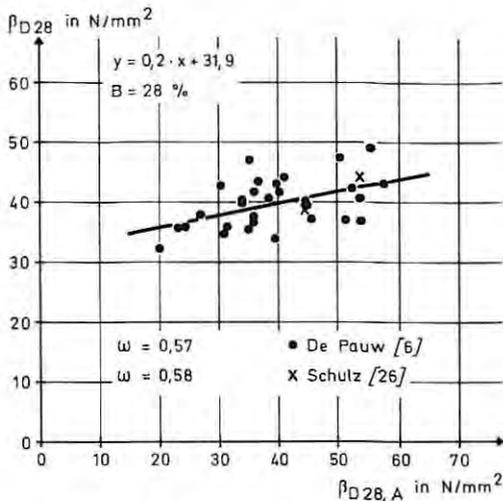


Bild 6 Druckfestigkeit von Betonsplittbeton  $\beta_{D28}$  in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Altbetons  $\beta_{D28,A}$

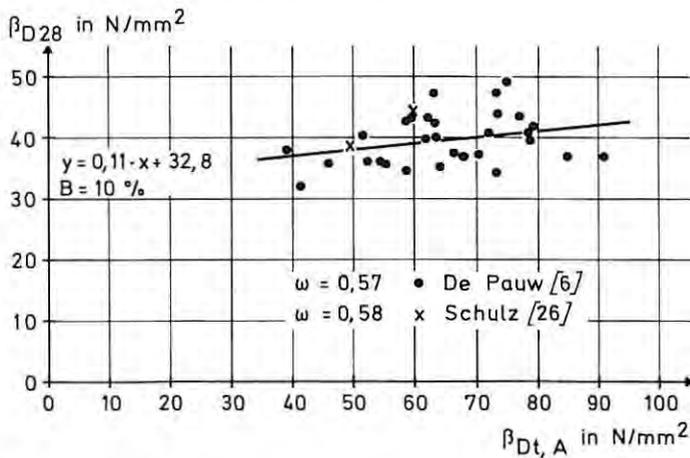


Bild 7 Druckfestigkeit von Betonsplittbeton  $\beta_{D28}$  in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Altbetons zum Zeitpunkt des Brechens  $\beta_{Dt,A}$

tons zum Zeitpunkt des Brechens. Obwohl de Pauw [6] nach detaillierter Auswertung seiner Ergebnisse einzelne Einflüsse hervorhebt, läßt sich insgesamt aus der Auswertung entnehmen, daß die Druckfestigkeit des Betonsplittbetons von der des Altbetons praktisch unabhängig ist (siehe auch Abschn. 4.1) und daß damit die theoretischen Überlegungen bestätigt werden.

Wenn man dagegen Betonsplittbeton mit einem gleich zusammengesetzten Normalbeton vergleicht, so liegt die Druckfestigkeit von Betonsplittbetonen nach weitgehend übereinstimmenden Ergebnissen verschiedener Untersuchungen rd. 10 bis 20 %, in Einzelfällen auch bis zu 30 % niedriger. Wie aus Bild 8 hervorgeht, besteht ein recht strenger Zusammenhang (Bestimmtheitsmaß  $B = 98\%$ ) zwischen den Druckfestigkeiten der Betonsplitt- und der Vergleichsbetone. Die mittleren Abweichungen betragen – entsprechend den Überlegungen zum Einfluß der größeren Zementsteinschichtdicke infolge des höheren Gesamtzementsteinvolumens – etwa 25 % bei niedrigen und etwa 10 % bei hohen Festigkeiten.

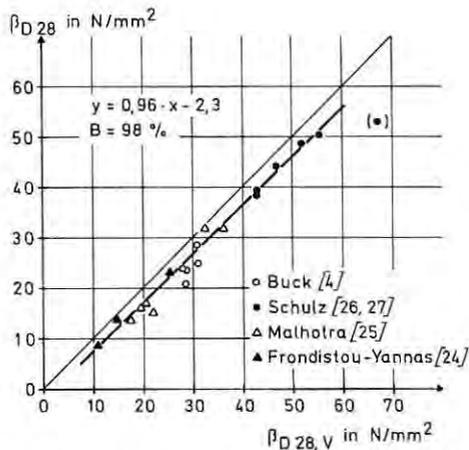


Bild 8 Druckfestigkeit von Betonsplittbeton in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit des Vergleichsbetons  $\beta_{D 28, v}$

### 5.3 Elastizitätsmodul

Der E-Modul von Betonsplittbeton liegt entsprechend den theoretischen Überlegungen deutlich unter dem des Vergleichsbetons. Bisherige Versuchsergebnisse [24, 26, 27] zeigen Unterschiede von rd. 20 bis 30 %, in extremen Fällen sogar bis zu 40 %, wobei sich die Angaben auf Volumenanteile des Betonsplitts von rd. 0,35 bis rd. 0,45  $m^3/m^3$  beziehen. Davon abweichende Volumenanteile werden vermutlich die Grenzen noch weiter verschieben.

In Bild 9 sind der Literatur entnommene und eigene Versuchsergebnisse für Betonsplittbeton in Abhängigkeit von den entsprechenden Werten für Vergleichsbetone aufgetragen. Danach beträgt die Abweichung entsprechend dem Einfluß des niedrigen Betonsplitt-E-Moduls rd. 30 % bei niedrigen und rd. 18 % bei hohen Beton-E-Moduln. Weitere Versuche müßten klären, inwieweit extreme E-Moduln des Altbetons bzw. niedrige und hohe Betonsplittanteile die Verhältniswerte noch verändern.

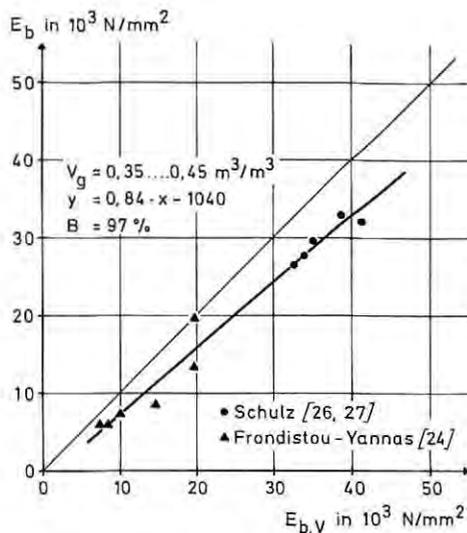


Bild 9 Statischer E-Modul von Betonsplittbeton  $E_b$  in Abhängigkeit vom E-Modul des Vergleichsbetons  $E_{b,v}$

## 5.4 Frostwiderstandsfähigkeit

Die bisher vorliegenden Ergebnisse amerikanischer Untersuchungen [4, 25, 32], nach denen der Frostwiderstand von Betonsplittbetonen zum Teil besser, aber zumindest nicht schlechter ist als bei Betonen mit natürlichen Zuschlägen, dürften nicht ohne weiteres auf europäische Verhältnisse übertragbar sein, da wegen der Porosität des Betonsplitts eigentlich eine Abnahme der Frostbeständigkeit erwartet werden muß, sofern der Altbeton keine Mikroluftporen enthält. Es ist anzunehmen, daß bei den amerikanischen Versuchen die Vergleichsmischungen frostempfindliches Naturgestein enthielten und daß daher durch die Verwendung von Betonsplitt eine relative Verbesserung erzielt wurde.

## 6. Eigene Versuche zum Langzeit-Verformungsverhalten

### 6.1 Ziel und Umfang der Versuche

Da der Literatur bisher noch keine versuchsmäßig belegten Anhaltswerte für das Kriechverhalten von Betonsplittbetonen zu entnehmen sind, wurden hierzu im Institut für Bauforschung der RWTH Aachen orientierende Untersuchungen durchgeführt, die vom Verein Deutscher Zementwerke finanziell unterstützt wurden. Zunächst wurde nur die Art der natürlichen Zuschläge variiert, während andere Faktoren, wie der w/z-Wert ( $\omega = 0,45$ ) und die Zementart (PZ 35 F), bei den hier vorgestellten 4 Mischungen soweit wie möglich kon-

stantgehalten wurden. Auch die Zusammensetzung des wiederverwendeten Altbetons stimmte weitgehend mit dem hier gewählten Mischungsentwurf überein. Der Betonsplitt stammte aus rd. 3 Jahre alten Laborproben, die hinsichtlich der Zusammensetzung (siehe Tafel 1) wie Straßenbeton (vgl. Abschn. 3) aufgebaut waren.

Tafel 1 Zusammensetzung und Druckfestigkeit des Altbetons

| Mischungsverhältnis<br>Zement:Zuschlag:Wasser | Zement-<br>art | Zuschlagart    |                   | Sieb-<br>linie | Druck-<br>festig-<br>keit<br>$\beta_o^{1)}$ |
|-----------------------------------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|---------------------------------------------|
|                                               |                | < 4 mm         | > 4 mm            |                |                                             |
| Massenteile                                   |                |                |                   |                | N/mm <sup>2</sup>                           |
| 1 : 5,50 : 0,45                               | PZ 35 F        | Rhein-<br>sand | Rhein-<br>kies    | A 32 / B 32    | 50                                          |
| 1 : 6,03 : 0,45                               | PZ 35 F        | Rhein-<br>sand | Basalt-<br>splitt | A 32 / B 32    | 60                                          |

1) das Prüfalter lag zwischen 70 und 100 Tagen

Die untersuchten Eigenschaften des gebrochenen und abgesiebten Altbetons sind Tafel 2 zu entnehmen. Da der Altbeton nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stand, mußte die Anzahl der Proben für jede Mischung auf insgesamt 6 Betonzylinder (150 mm/300 mm), d. h. je 2 für E-Modul-, Schwind- und Kriechversuche, sowie drei Würfel mit 150 mm Kantenlänge für die Druckfestigkeitsprüfung beschränkt werden. Die Probenlagerung erfolgte gemäß DIN 1048.

Tafel 2 Kornrohdichte  $\rho_{Rg}$  und Wasseraufnahme nach 30 min  $w_{30}$  von gebrochenem Kiessand- und Basaltsplittbeton

| Zuschlag des<br>Altbetons | Korngruppe              | $\rho_{Rg}$       | $w_{30}$ |
|---------------------------|-------------------------|-------------------|----------|
|                           |                         | kg/m <sup>3</sup> | M.-%     |
| Rheinkliessand            | 4/8                     | 2306              | 4,5      |
|                           | 8/16                    | 2330              | 3,9      |
|                           | A 16/B16 <sup>1)</sup>  | 2455              | 2,1      |
| > 4 mm Basaltsplitt       | 4/8                     | 2591              | 3,9      |
|                           | 8/16                    | 2660              | 3,4      |
| < 4 mm Rheinsand          | 8/16                    | 2660              | 3,4      |
|                           | A 16/B 16 <sup>1)</sup> | 2623              | 2,0      |

1) für die Korngruppe 0/4 wurde Rheinsand verwendet

## 6.2 Durchführung und Ergebnisse der Versuche

### 6.2.1 Frischbetonprüfungen

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in Tafel 3 dargestellt. Nach den bisherigen Erfahrungen wird der zielsichere Entwurf der Frischbetonkonsistenz und die Einhaltung des effektiven Wasser-Zement-Wertes durch das veränderliche Wasseraufsaugverhalten bei unterschiedlichen Wasserangeboten erschwert. Relativ weichen Mischungen mit großem Wasserangebot dürfte mehr Wasser entzogen werden als steifen. Die im Versuch ermittelte Wasseraufnahme nach 30 min (siehe Tafel 2) liefert deshalb nur einen verhältnismäßig groben Anhalt für die erforderliche Zugabewassermenge und für die Berechnung des effektiven w/z-Wertes.

Tafel 3 Betonzusammensetzung und Konsistenzmaße

| Mischung              |     | Betonzusammensetzung               |                 |                    | Konsistenzmaße |                  |
|-----------------------|-----|------------------------------------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|
| Art                   | Nr. | Mischungsverhältnis<br>Massenteile | Zuschlag > 4 mm |                    | Setzmaß<br>mm  | Verdicht.<br>Maß |
|                       |     |                                    | Naturzuschlag   | gebr. Altbeton mit |                |                  |
| Vergleichs-<br>beton  | 2   | 1 : 5,10 : 0,45                    | Kiessand        | –                  | 15             | 1,17             |
|                       | 3   | 1 : 5,48 : 0,45                    | Basaltsplitt    | –                  | 6              | 1,27             |
| Betonsplitt-<br>beton | 5   | 1 : 4,82 : 0,45                    | –               | Kiessand           | 13             | 1,18             |
|                       | 7   | 1 : 5,13 : 0,45                    | –               | Basaltsplitt       | 12             | 1,24             |

### 6.2.2 Druckfestigkeit und E-Modul

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sowie die statischen und dynamischen E-Moduln im Alter von 28 Tagen sind in Tafel 4 wiedergegeben. In Bild 10 wird außerdem die Entwicklung des dynamischen E-Moduls bis zu einem Alter von 56 Tagen gezeigt. Die eingetragenen Regressionskurven wurden nach Weber [29] berechnet. Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit früheren Untersuchungen [21, 26] sind die veränderten Probenabmessungen und Lagerungsbedingungen zu beachten.

Während sich die Druckfestigkeiten der Mischungen 2 und 5 um weniger als 10 % unterscheiden, liegt die Druckfestigkeit der Mischung 7 mehr als 20 % unter der des zugehörigen Vergleichsbetons (Mischung 3). Dieser vergleichsweise große Festigkeitsunterschied wurde möglicherweise durch eine Überschätzung der tatsächlichen Wasseraufnahme hervorgerufen, wodurch sich vermutlich ein zu hoher effektiver w/z-Wert einstellte.

Tafel 4 Druckfestigkeiten  $\beta_D$  und E-Moduln von Betonsplittbeton und Vergleichsbeton im Alter von 28 Tagen

| Mischung          |     | Zuschlag > 4 mm |                     | $\beta_D$         | E-Modul  |           |
|-------------------|-----|-----------------|---------------------|-------------------|----------|-----------|
| Art               | Nr. | Natur-zuschlag  | gebr. Alt-beton mit |                   | statisch | dynamisch |
|                   |     |                 |                     | N/mm <sup>2</sup> |          |           |
| Vergleichs-beton  | 2   | Kiessand        | —                   | 52,0              | 34 100   | 43 900    |
|                   | 3   | Basaltsplitt    | —                   | 67,4              | 38 900   | 49 500    |
| Betonsplitt-beton | 5   | —               | Kiessand            | 48,9              | 27 700   | 37 700    |
|                   | 7   | —               | Basaltsplitt        | 52,8              | 32 900   | 40 700    |

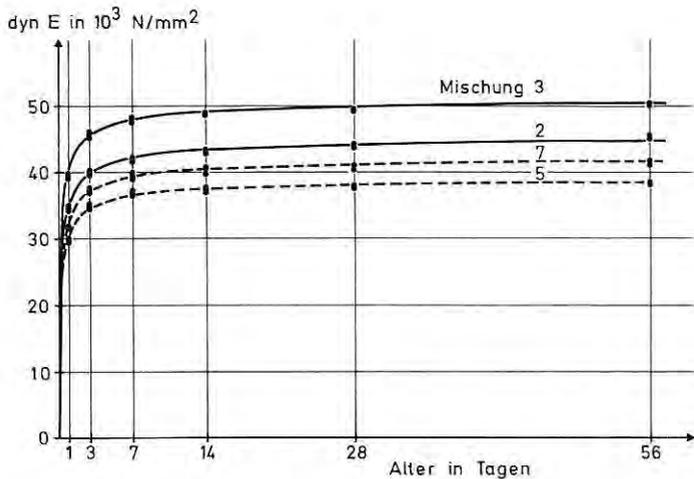


Bild 10 Dynamischer E-Modul dyn E von Betonsplittbeton und Vergleichsbeton in Abhängigkeit vom Prüfalter und von der Betonart (siehe Tafeln 3 und 4)

### 6.2.3 Kriechen

Als Belastungsvorrichtung für die Kriechversuche dienten hydraulisch betriebene Kriechstände, die nach Zuschaltung von Druckluftflaschen den gewünschten Druck in engen Grenzen konstanthielten. Sämtliche Verformungen wurden mittels Dehnungsmeßstreifen von 150 mm Länge gemessen (Raumklima: 20 ° C; 65 % rel. Luft-

feuchtigkeit). Bei Versuchsbeginn im Alter von 28 Tagen wurde eine Druckspannung von  $\beta_{D28}/3$  aufgebracht. Zur Trennung der lastabhängigen und lastunabhängigen Formänderungen wurden parallel zu den Kriechversuchen Schwindmessungen an unbelasteten Proben durchgeführt.

Um die Versuchsergebnisse von Mischungen mit unterschiedlichen Kriechspannungen vergleichen zu können, werden die Versuchsergebnisse in Bild 11 spannungsbezogen angegeben. Für die hier gewählte Auswertung mit der Potenzfunktion von Shank [30] eignen sich am besten die lastabhängigen Gesamtdehnungen. Dieses Auswertverfahren liefert zwar im Gegensatz zu der am häufigsten verwendeten Funktion von Ross [30] keine rechnerischen Endkriechmaße, hat aber den Vorteil, daß sich der Kriechverlauf im gesamten untersuchten Zeitraum zutreffend beschreiben läßt, was durch hohe Bestimmtheitsmaße von rd. 98 % belegt wird.

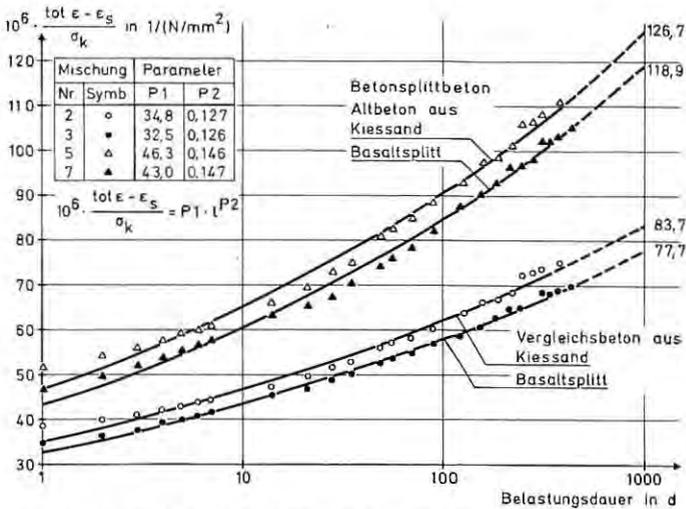


Bild 11 Verlauf der auf die Spannung  $\sigma_k$  bezogenen lastabhängigen Gesamtdehnungen in Abhängigkeit von der Betonart

Die in Bild 11 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen nach einer Belastungsdauer von rd. 360 Tagen bereits recht deutliche Unterschiede zwischen Vergleichs- und Betonsplittbetonen. Bezogen auf die Vergleichsbetone beträgt die Differenz rd. 50 %, und zwar sowohl für Betone mit Kiessand als auch mit Basaltsplitt. Die Kurven divergieren, d. h. nicht nur die absoluten, sondern auch die relativen Unterschiede weisen eine leicht steigende Tendenz auf.

#### 6.2.4 Schwinden

Auch das Schwindverhalten von Betonsplittbetonen ist noch relativ unerforscht, wengleich hierzu bereits einige wenige Versuchser-

gebnisse aus Japan vorliegen (veröffentlicht in [20]). Danach muß für Betonsplittbeton bis zu einem Alter von 90 Tagen mit rd. 30 bis 40 % höheren Schwindmaßen als bei vergleichbaren Normalbetonen gerechnet werden.

Eigene Versuche, die allerdings an Betonen mit niedrigeren w/z-Werten (0,45 statt 0,6) durchgeführt wurden, lieferten nach entsprechender Versuchsdauer rd. 20 % (Kiessandbeton) bis rd. 40 % (Basaltsplittbeton) höhere Schwindmaße. Die Versuchsergebnisse, siehe Bild 12, wurden mit der Gleichung von Weber [29] ausgewertet, die bereits in Abschn. 6.2.2 benutzt worden war, um die zeitliche Entwicklung des dynamischen E-Moduls zu beschreiben. Für den vorliegenden Untersuchungszeitraum wird mit dieser Funktion eine sehr gute Anpassung<sup>1)</sup> an die Meßwerte erzielt. Die Bestimmtheits-

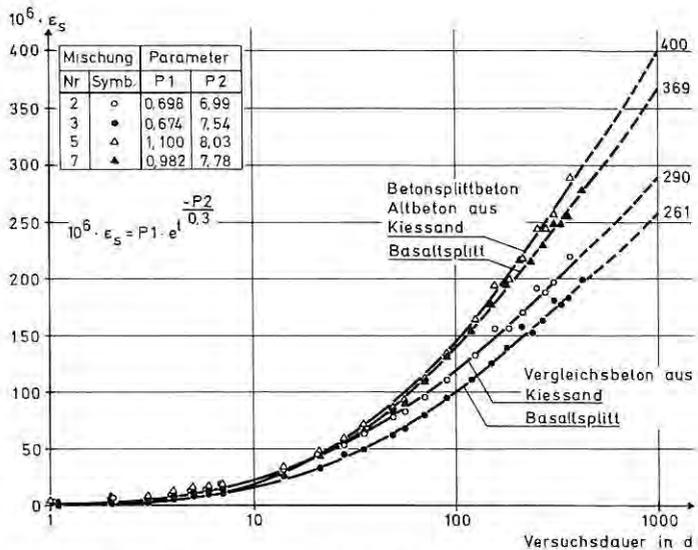


Bild 12 Verlauf der Schwinddehnungen  $\epsilon_s$  in Abhängigkeit von der Betonart

maße betragen durchweg über 99 %. Während sich die absoluten Differenzen zwischen den Kurven für Betonsplitt und Vergleichsbetone vergrößern, bleibt der auf Normalbeton bezogene Unterschied zwischen den Mischungen 3 und 7 (mit Basaltsplitt) relativ konstant und beträgt maximal rd. 40 %. Lediglich bei den Kiessand enthaltenden Betonen (Mischungen 2 und 5) wächst der Abstand auch relativ. Es wird geschätzt, daß sich im Alter von 1000 Tagen die Schwindmaße ähnlich stark unterscheiden werden wie bei den entsprechenden Betonen mit Basalt.

<sup>1)</sup> Bereits nach 90tägiger Versuchsdauer [27] konnten die jetzt nach 360 Tagen vorliegenden Versuchsergebnisse auf 6 % genau vorhergesagt werden.

## 7. Gegenüberstellung von Theorie und Versuchsergebnissen beim Langzeitverhalten

### 7.1 Kriechen

In Bild 13 sind die Abweichungen zwischen den gemessenen und den entsprechend DIN 4227 berechneten lastabhängigen, spannungsbezogenen Gesamtverformungen für verschiedene Belastungsdauern aufgetragen. Dabei wurde für Betonsplittbeton gemäß Abschn. 4.2.2 bzw. 4.2.1 der E-Modul vermindert und die Grundfließzahl erhöht.

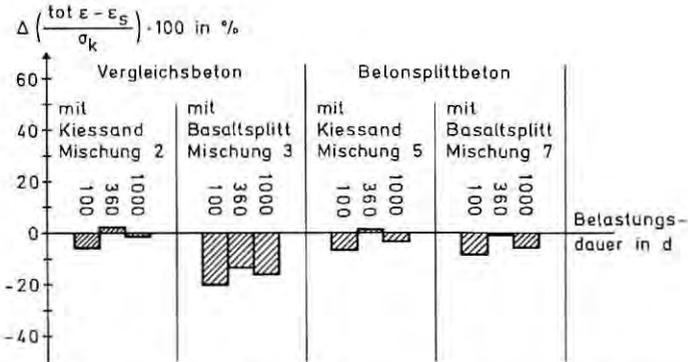


Bild 13 Unterschiede zwischen den nach DIN 4227 abgeschätzten bezogenen lastabhängigen Gesamtdehnungen und den gemessenen bzw. aus den Meßdaten extrapolierten Werten für verschiedene Belastungszeiten

Bis zur Belastungsdauer von 1000 Tagen läßt sich eine relativ gute Übereinstimmung zwischen den Rechenwerten und Meßwerten (bzw. extrapolierten Meßwerten) feststellen. Die maximalen Abweichungen betragen für Kiessandbetone und Betonsplittbetone weniger als 10 % (bezogen auf die Meßwerte).

Bei Normalbeton mit Basalt wird jedoch die wirkliche lastabhängige Gesamtdehnung um 20 % unterschätzt, ein Zeichen dafür, daß die Erhöhung des Tabellenwertes der DIN 4227 für den E-Modul entsprechend dem Basaltanteil um 20 % zu groß war. Bei Einsetzen des gemessenen E-Moduls, der bei Basaltsplittbeton 14 % höher war als bei Kiessandbeton, wäre die Abweichung der Gesamtdehnung höchstens 5 % gewesen, wiederum ein Beweis dafür, daß man sich bei Betonen, die von der üblichen Zusammensetzung abweichen, besser an gemessene als an aus Tabellen entnommene E-Modulwerte halten sollte.

Die geringen Abweichungen bei den Betonsplittbetonen zeigen, daß die entsprechend dem vergrößerten Zementsteinvolumen theoretisch überlegte Änderung der Grundfließzahl sinnvoll ist.

Die zeitabhängigen Kriechanteile  $k_t$  und  $k_v$  im Zementstein des Betonsplitts fallen offenbar nicht so stark ins Gewicht, was die Anwen-

dung des Verfahrens erheblich erleichtert. Einschränkend ist zu bemerken, daß sich diese Angaben zur Zeit nur auf ein Kriechalter bis zu etwa 3 Jahren und auf rd. 3 Jahre alten Altbeton beziehen. Jüngere und entsprechend kriechfähigere Betone können sich grundsätzlich anders verhalten. Im allgemeinen werden Abbruchbetone aber älter als 3 Jahre sein und damit das Kriechen weniger beeinflussen.

## 7.2 Schwinden

Schwindmessungen an der Oberfläche führen in der Regel zu größeren Werten als axiale Messungen [31]. Die Gründe dafür dürften zum einen in der schnelleren Austrocknung der oberflächennahen Schicht und zum anderen im Carbonatisierungsschwinden dieser Zone zu suchen sein. So ist es zu erklären, daß die Rechenwerte nach 360 Tagen bereits rd. 15 % unter denjenigen liegen (siehe Bild 14), die für normalen Kiessandbeton gemessen wurden. Wie die Extrapolation aus den Meßwerten zeigt, wird sich dieser Effekt mit der Zeit noch verstärken, so daß die Meß- und Rechenwerte nach rd. 1000 Tagen um rd. 25 % differieren werden. Entsprechend schlecht trifft auch die Vorausbestimmung der Schwindmaße bei Betonsplittbetonen zu, bei denen das Grundschildmaß entsprechend den Überlegungen in Abschn. 4.2.3 um 25 % erhöht worden war.

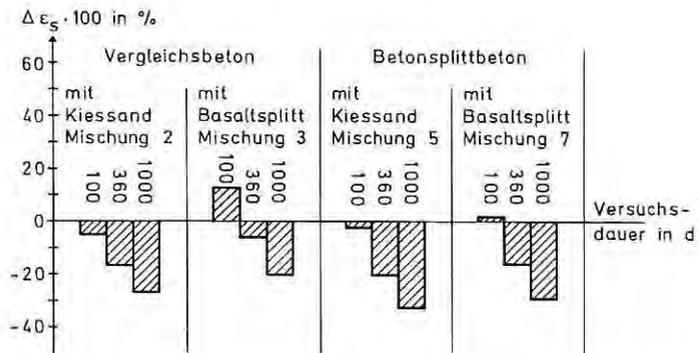


Bild 14 Unterschiede zwischen den nach DIN 4227 abgeschätzten Schwindmaßen und den mit DMS gemessenen bzw. aus den Meßdaten extrapolierten Werten in Abhängigkeit von der Versuchsdauer

Die Unterschiede in den Schwindmaßen zwischen Oberflächen- und Axialmessung bzw. Rechenwerten nach DIN 4227 kann man durch Verringerung der rechnerischen effektiven Dicke weitgehend ausgleichen.

Da andererseits die Abweichungen für alle Betone tendenziell und größenordnungsmäßig gleich sind, kann man annehmen, daß die

Berechnung der Schwindmaße von Bauteilen aus Betonsplittbeton nach DIN 4227 zutreffende Werte liefert, wenn das Grundswindmaß entsprechend erhöht wird.

## 8. Schlußfolgerungen

8.1 Nach den bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen lassen sich die Frischbeton- und Festigkeitseigenschaften von Betonsplittbetonen wie bei Normalbetonen steuern, wenn die nachfolgenden Voraussetzungen erfüllt werden.

Betonsplitt darf nicht chemisch verunreinigt sein. Er darf nur geringe betonschädliche Beimengungen wie Gips usw. enthalten.

Der Altbeton sollte Festigkeiten wie übliche Konstruktions- und Straßenbetone aufweisen, d. h. mindestens der Festigkeitsklasse B 10, besser B 15 entsprechen.

Betonsplitt unter 4 mm sollte möglichst ausgesondert werden.

Das Wasseraufsaugverhalten des Betonsplitts muß berücksichtigt werden, d. h. im allgemeinen, daß der Betonsplitt entweder vorgehäßt oder die Anmachwassermenge entsprechend erhöht werden sollte.

8.2 Bei Betonsplittbetonen sind die nachfolgenden Eigenschaftsänderungen gegenüber gleich zusammengesetzten Vergleichsbetonen mit Normalzuschlag zu berücksichtigen.

Die Druckfestigkeit ist etwa 10 bis 25 % kleiner.

Der E-Modul ist etwa 15 bis 30 % kleiner.

Das Kriechmaß ist entsprechend dem E-Modul und dem größeren kriechfähigen Zementsteinanteil größer, bei den Versuchen um etwa 50 %.

Die Schwindmaße sind um etwa 20 bis 40 % größer.

8.3 Eine Voraussage der Verformungseigenschaften von Betonsplittbeton ist wie nachfolgend beschrieben möglich.

Aus dem E-Modul nach DIN 4227 oder demjenigen eines Vergleichsbetons kann der E-Modul der Mörtelmatrix abgeschätzt werden. Mit diesem E-Modul und demjenigen des Altbetons kann der E-Modul des Betonsplittbetons unter Berücksichtigung des Betonsplittvolumens vorausgesagt werden.

Das Kriechmaß ergibt sich entsprechend DIN 4227 bei Einsetzen des vorhandenen E-Moduls und Erhöhung der Grundfließzahl um 25 %.

Das Grundswindmaß nach DIN 4227 ist um 25 % zu erhöhen.

8.4 Aufgrund der festgestellten Eigenschaften bietet sich Betonsplittbeton für solche Einsatzgebiete an, wo das Verformungsverhalten keine herausragende Rolle spielt und wo auch keine extrem hohen Festigkeiten verlangt werden, also für viele Bereiche im Hoch- und Ingenieurbau. Hochwertige Naturzuschläge sollte man dagegen soweit wie möglich substituieren und nicht für untergeordnete Zwecke verschwenden, damit sie auch in Zukunft dort zur Verfügung stehen, wo sie wirklich gebraucht werden, z. B. für weitgespannte Brücken und Verschleißschichten von Straßen.

## SCHRIFTTUM

- [1] Grün, R.: 1850 Jahre alter Beton und seine Verwendung als Kunststein. „Zement“-Wochenschrift für Hoch- und Tiefbau 24 (1935) Nr. 15, S. 232/237.
- [2] Wedler, B., und A. Hummel: Trümmerverwertung und Ausbau von Brandruinen. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1947.
- [3] Lüttig, G.: Zur Verfügbarkeit oberflächennaher Steine und Erden-Baustoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Beilage zur Bauwirtschaft 26 (1975) H. 26, S. 2/8.
- [4] Buck, A.D.: Recycled Concrete as a Source of Aggregate. Proc. Amer. Concr. Inst. 74 (1977) Nr. 5, S. 212/219.
- [5] Kreijger, P. C.: Recycling of concrete, introduction and stating the problem(s). NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.
- [6] De Pauw, C.: Kringloopbeton. W.T.C.B.-Tijdschrift 2 (1980) Nr. 6, S. 2/15.
- [7] Wohlfahrt, R.: Wiederverwendung von Beton. Diplomarbeit am Institut für Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH), 1979.
- [8] Mather, B.: Crushed concrete as concrete aggregate. NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.
- [9] Frondistou-Yannas, S.: Economics of concrete recycling in the United States. NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.
- [10] Cubaud, J. C., A. Ahmadi-Hachemi und M. Murat: Procédés de destruction des ouvrages en béton armé. Matériaux et Constructions 10 (1977) Nr. 57, S. 127/138.
- [11] Linder, R.: Stand der Technik beim Schälen, Trennen und Abbrechen von Bauteilen aus Beton und Stahlbeton. Betonwerk + Fertigteiltechnik 43 (1977) H. 6, S. 313/317, und H. 7, S. 367/371.
- [12] Berger, R. L., und S. H. Carpenter: Recycling of concrete into new applications. NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.
- [13] Bernard, D.: The alternate aggregate source – recycled concrete. Rural and urban roads, Okt. 1978, S. 52/53.
- [14] N. N.: Recycled rubble saves contractors money. Roads & Streets, April 1973, S. 80/83.
- [15] N. N.: Small crushing plant managed for full productivity. Roads & Streets, März 1973, S. 256/257.
- [16] N. N.: Movable concrete plant. Roads & Streets, Juli 1974, S. 28/29.
- [17] N. N.: Urban concrete paver's strategy: Move plants often, keep hauls short. Roads & Streets, März 1975, S. 128/132.
- [18] Schütz, R.: Der Einfluß der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit. Dissertation TH Aachen 1970.
- [19] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 2: Beton. Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1981.
- [20] Nixon, P. J.: Recycled concrete as an aggregate for concrete – a review. Matériaux et Constructions 11 (1978) Nr. 65, S. 371/378.
- [21] Schulz, R.-R.: Recycling von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 44 (1978) H. 9, S. 492/497.

- [22] Manns, W.: Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Dissertation TH Aachen 1969; ebenso Forschungsberichte des Landes NRW, H. 2112, Westdeutscher Verlag Köln/Opladen 1970.
- [23] Lewandowski, R.: Verwendung von Rückständen industrieller Prozesse zur Herstellung von Beton. Sonderdruck aus: Forschungsbeiträge für die Baupraxis, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München/Düsseldorf 1979.
- [24] Frondistou-Yannas, S.: Waste Concrete as Aggregate for New Concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 74 (1977) Nr. 8, S. 373/376.
- [25] Malhotra, V. M.: Use of Recycled Concrete as a New Aggregate. Proc. of Symposium Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry. CANMET Report Nr. 76-8, Ottawa 1976.
- [26] Schulz, R.-R.: Wiederverwendung von altem Beton als Zuschlag für neuen Beton. 7. internationale Baustoff- und Silikattagung (ibaasil), Weimar 1979.
- [27] Schulz, R.-R.: Das Verformungsverhalten von Betonsplittbeton (Beton aus wiederverwendetem Altbeton). XIII. Konferenz der Silikatindustrie und Silikatwissenschaft – Silicconf., Budapest Juni 1981.
- [28] Lambotte, H., und C. de Pauw: The influence of contaminants on the quality and the behaviour of recycled concrete. NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.
- [29] Weber, J. W.: Empirische Formeln zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung und der Entwicklung des E-Moduls von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 45 (1979) H. 12, S. 753/756.
- [30] Wittmann, F., und M. Setzer: Vergleich einiger Kriechfunktionen mit Versuchsergebnissen. Cement and Concrete Research 1 (1971) Nr. 6, S. 679/689.
- [31] Wischers, G., und J. Dahms: Kriechen von frühbelastetem Beton mit hoher Anfangsfestigkeit. beton 27 (1977) H. 2, S. 69/74, und H. 3, S. 104/108; ebenso Betontechnische Berichte 1977, Beton-Verlag, Düsseldorf 1978, S. 29/54.
- [32] Buck, A.D.: Recycled Concrete. Highway Research Record, Nr. 430, 1973, S. 1/8.
- [33] Lindsay, P.: Demolition of prestressed concrete structures. NATO Advanced Research Institute on Adhesion Problems in Recycling of Concrete, Domaine de St. Paul, Saint-Remy-Les Chevreuse, France, 25. bis 28. November 1980.