

# Betonprüfung zur Überwachung von Recyclingzuschlag aus Bauschutt

**T 2791**

T 2791

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1998, ISBN 3-8167-5417-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail [irb@irb.fhg.de](mailto:irb@irb.fhg.de)

URL <http://www.irb.fhg.de>



FORSCHUNGS- UND MATERIALPRÜFUNGS-  
ANSTALT  
BADEN-WÜRTTEMBERG  
OTTO-GRAF-INSTITUT  
ABTEILUNG I - BAUSTOFFE

**FMPA**

---

Stuttgart, den 15.07.1997

Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30

10829 Berlin

## **FORSCHUNGSBERICHT**

12-24858(206)-Wi/Re

# **Betonprüfung zur Überwachung von Recyclingzuschlag aus Bauschutt**

DIBt-Geschäftszeichen IV 1-5-821/96

Prof. Dr.-Ing. W. Manns

Dr. rer. nat. S. Wies

## Inhalt

		Seite
	Vorwort	3
1	Ziel des Forschungsvorhabens	4
2	Angaben zum verwendeten Recyclingzuschlag	5
2.1	Herkunft	5
2.2	Stoffliche Zusammensetzung, Anteil an höherfesten Bestandteilen	5
2.3	Kornzusammensetzung	5
2.4	Kornfestigkeit	5
2.5	Schütt- und Kornrohichte	6
2.6	Wasseraufsaugvermögen innerhalb 30 Minuten	6
3	Betonversuche	6
3.1	Versuchsserie „Hochfester Beton“	6
3.1.1	Herstellung der Betone, Frischbetonprüfungen	7
3.1.2	Festbetonprüfungen	8
3.1.3	Bewertung der Ergebnisse	8
3.2	Versuchsserie „Warmbeton“	9
3.2.1	Herstellung der Betone, Frischbetonprüfungen	10
3.2.2	Festbetonprüfungen	12
3.2.3	Bewertung der Ergebnisse	12
4	Zusammenfassung	12
	Literatur	15

## Vorwort

Die vorliegende Untersuchung zur Eignung einer Betonprüfung zur Überwachung von Recyclingzuschlag aus Bauschutt wurde aus Mitteln des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, gefördert. Die Betreuung übernahm dankenswerterweise der Sachverständigenausschuß „Betontechnologie B 4 - Beton-Zuschläge“.

Der Firma Mainfränkische Baustoffaufbereitung und Wiederverwertung GmbH & Co. KG, Eltmann-Roßstadt, gilt zudem der besondere Dank für die sofortige Bereitschaft, das für die Prüfungen notwendige Recyclingmaterial unentgeltlich zur Verfügung zu stellen.

## 1 Ziel des Forschungsvorhabens

Bei einer Zulassungsprüfung von Zuschlag aus mineralischem Baustoffgemisch (Recyclingzuschlag aus Bauschutt) [1] wurde keine befriedigende Korrelation zwischen Zuschlageigenschaften, die die Kornfestigkeit beschreiben sollen, wie Anteil an höherfesten Bestandteilen, Kornfestigkeit oder Schütt- und Kornrohichte, und der erzielbaren Betondruckfestigkeit festgestellt.

Bislang legt die aufgrund dieser Prüfungen vom Deutschen Institut für Bautechnik erteilte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung [2] als Freigabekriterium fest, daß Recyclingmaterial nur dann als Betonzuschlag verwendet werden darf, wenn die Summe der höherfesten Anteile mindestens 80 M.-% beträgt. Als höherfeste Anteile gelten hiernach Beton außer Porenbeton, Sand, Kies, Naturwerkstein, Ziegel, Kalksandstein und Klinker.

Der hinsichtlich einer erzielbaren Betondruckfestigkeit nur geringe Aussagewert dieser Kenngröße ist für Betonfestigkeitsklassen bis B 15 und eventuell B 25 hinnehmbar, für höherfeste Betone könnte dieser Sachverhalt die Bausicherheit gefährden.

Die naheliegende Forderung, ähnlich wie für Leichtzuschlag die erzielbare Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen zu überprüfen, wäre wegen der Möglichkeit großer produktionstäglicher Schwankungen in der Zusammensetzung des Materials begründet, ist aber gleichzeitig aufgrund der begrenzten Lagerkapazität der Recyclingwerke nicht praxisnah.

Dennoch erscheint eine Betonprüfung sinnvoll; sie müßte jedoch in wesentlich kürzerer Zeit – möglichst nach 24 Stunden – verwertbare Ergebnisse liefern.

Hierzu bieten sich zur Herstellung von Prüfbetonen unter anderem zwei Möglichkeiten an:

1. Herstellung eines hochfesten Betons mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von rd. 100 N/mm<sup>2</sup> (bei Verwendung von Normalzuschlag), der den in Frage kommenden Festigkeitsbereich von 30 bis 40 N/mm<sup>2</sup> bereits nach etwa 24 Stunden durchläuft [3], siehe Bild 1, Beilage 1.
2. Herstellung eines Betons mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von rd. 35 N/mm<sup>2</sup>, der als „Warmbeton“ (Frischbeton- und Lagerungstemperatur 40 - 60 °C) nach etwa 24 Stunden die entsprechende Festigkeit erreicht.

Könnte die Brauchbarkeit einer dieser beiden Prüfmethode nachgewiesen werden, stünde eine zuverlässige, kurzzeitige Freigabepfung für Zuschlag aus mineralischem Baustoffge-

misch zur Verfügung. Die Anwendbarkeit dieses Zuschlages wäre auch für höhere Festigkeiten als B 15 oder B 25 ohne Risiken für die Bausicherheit gewährleistet.

## **2 Angaben zum verwendeten Recyclingzuschlag**

### **2.1 Herkunft**

Der für das im weiteren beschriebene Prüfprogramm verwendete Recyclingzuschlag wurde von der Fa. Mainfränkische Baustoffaufbereitung und Wiederverwertung GmbH & Co. KG (MBW) in Eltmann-Roßstadt zur Verfügung gestellt. Hierbei handelt es sich um die Korngruppen 0/2a, 2/8 und 8/16 mm, die entsprechend der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-3.43-1003 [2] produziert und überwacht werden.

Herstelltag des Zuschlags war der 10.12.1996.

Anzumerken ist, daß die Sandfraktion entsprechend der Zulassung rd. 50 M.-% Natursand (Mainmaterial) enthält.

### **2.2 Stoffliche Zusammensetzung, Anteil an höherfesten Bestandteilen**

Die stoffliche Zusammensetzung des Recyclingmaterials – ermittelt an der Korngruppe 8/16 mm – ist Tabelle 1, Beilage 1, zu entnehmen. Die Summe höherfester Bestandteile lag mit 84,5 M.-% über dem geforderten Mindestwert von 80 M.-%, der Gehalt an Asphaltgranulat überschritt mit 3,8 M.-% den insgesamt für nichtmineralische Bestandteile zulässigen Wert von 2 M.-%.

### **2.3 Kornzusammensetzung**

Die in Tabelle 2, Beilage 2, dargelegte Kornzusammensetzung entsprach für alle drei Korngruppen den Anforderungen der Zulassung bzw. der DIN 4226 [4] Teil 1.

### **2.4 Kornfestigkeit**

Die Kornfestigkeit (Tabelle 3, Beilage 2) wurde mit dem Druckzylinderverfahren gemäß DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 7.2, bestimmt. Die für die Korngruppen 4/8 und 8/16 mm erhaltenen Mittelwerte von 55,5 bzw. 54,0 kN lagen deutlich über dem von der Zulassung geforderten Mindestdruckwert von 30 kN.

## 2.5 Schütt- und Kornrohddichte

Die Bestimmung der Schüttdichte erfolgte gemäß DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 3.3, die Kornrohddichte wurde pyknometrisch in Anlehnung an DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 3.4.1.2, ermittelt. Die Schüttdichten bewegten sich mit Werten zwischen 1,27 und 1,34 kg/dm<sup>3</sup> in dem von der Zulassung vorgegebenen Rahmen. Die Kornrohddichten lagen zwischen 2,25 und 2,42 kg/dm<sup>3</sup>. Nur die Kornrohddichte des Sandes 0/2a war dabei etwas geringer als die in der Zulassung genannte Untergrenze. Dies könnte einerseits auf die relativ große Prüfstreuung bei dem hierfür mitzubestimmenden Wasseraufsaugvermögen des Sandes zurückzuführen sein, andererseits wäre auch vorstellbar, daß der angestrebte Natursandanteil von 50 M.-% nicht ganz eingehalten wurde.

## 2.6 Wasseraufsaugvermögen innerhalb 30 Minuten

Für die vorgesehenen Betonversuche war das Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags zu bestimmen. Es wurde für die Korngruppen 2/8 und 8/16 mm in Anlehnung an das Merkblatt für Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge [5] durch 30minütige Wasserlagerung ermittelt. Das Wasseraufsaugvermögen der Sandfraktion wurde abgeschätzt, indem der getrocknete Sand so lange mit Wasser aus einem Gefäß mit aufgeschraubtem Zerstäuber besprüht wurde, bis der Sand gerade noch rieselfähig war, d.h. sich noch kein Wasserfilm zwischen den einzelnen Körnern gebildet haben konnte. Die Rieselfähigkeit wurde geprüft, indem der besprühte Sand in eine Kegelform (Aufsatz vom Ausbreittisch nach DIN EN 459-2 [6]) eingefüllt wurde, die man anschließend vorsichtig wieder entfernte.

Das so ermittelte Wasseraufsaugvermögen lag für die einzelnen Korngruppen zwischen 2,7 und 5,9 M.-% (Tabelle 5, Beilage 3).

## 3 Betonversuche

### 3.1 Versuchsserie „Hochfester Beton“

Als Orientierung für die Zusammensetzung der für diese Versuchsserie hergestellten Betone diente eine in [3] angegebene Rezeptur eines frühhochfesten, weichen Betons für Verkehrsflächen, der bei Verwendung von Oberrheinmaterial als Zuschlag im Alter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von rd. 100 N/mm<sup>2</sup> aufgewiesen hatte. Zur Festigkeitsentwicklung innerhalb der ersten Tage sei nochmals auf Bild 1, Beilage 1, verwiesen.



Diese Referenzzusammensetzung wurde dahingehend modifiziert, daß anstelle des damals verwendeten Silikastaubes die gleiche Menge Zement zusätzlich zugegeben und auf den Einsatz eines Verzögerers verzichtet wurde. Dies schien gerechtfertigt, weil der puzzolanisch wirkende Silikastaub zu den angestrebten Frühfestigkeiten keinen Beitrag liefern kann und angesichts der vergleichsweise geringen Betonmenge ein schnelleres Erstarren hinnehmbar war.

Hergestellt wurden ein Vergleichsbeton unter Verwendung von natürlichem Zuschlag (Oberrheinmaterial) und ein Recyclingbeton mit 50 Vol.-% Recyclingzuschlaganteil in allen Kornfraktionen. Dieser Anteil entspricht dem in der Zulassung geforderten Wert für eine Zielfestigkeit B 25 bei Verwendung eines Zementes der Festigkeitsklasse 32,5. Die Sieblinien der Kornmische dieser Betone sind in Bild 2, Beilage 4, dargestellt; deren Zusammensetzung ist Tabelle 6, Beilage 5, zu entnehmen.

### **3.1.1 Herstellung der Betone, Frischbetonprüfungen**

Für die Herstellung der Betone stand ein Zwangsmischer zur Verfügung.

Für den Vergleichsbeton wurden die Ausgangsstoffe in der Reihenfolge Zuschlag, Zement, Wasser zugegeben. Die vorgesehene Fließmittelmenge wurde dabei dem letzten Drittel des Zugabewassers beigemischt. Die Mischzeit nach Beendigung der Wasserzugabe betrug 2 Minuten.

Für den Recyclingbeton wurde in einem ersten Ansatz der Zuschlag einige Zeit mit der Menge Wasser vorgeätzt, die zuvor als Wasseraufsaugvermögen innerhalb 30 Minuten bestimmt worden war. Anschließend wurden Zement und Wasser zugegeben, wobei wiederum das Fließmittel dem letzten Drittel des Zugabewassers beigemischt wurde. Die Mischzeit nach Beendigung der Wasserzugabe betrug ebenfalls 2 Minuten.

Da die Konsistenz nach dieser Vorgehensweise erheblich weicher als beim Vergleichsbeton war (KF statt KP), mußte davon ausgegangen werden, daß das Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags in der Mischung mit natürlichem Zuschlag und nur mit der berechneten Wassermenge wesentlich geringer als beim Vorversuch an reinem Recyclingmaterial mit Wasserüberschuß war. Hinzu kommt die mögliche Prüfstreuung beim Wasseraufsaugvermögen der Sandfraktion des Recyclingzuschlags.

Aus diesem Grunde wurde in einem zweiten Ansatz Zuschlag und Zement zunächst nur soviel Wasser zugegeben, daß jegliches Wasseraufsaugen der Zuschläge unberücksichtigt blieb; die Fließmittelmenge entsprach der des Vergleichsbetons. Die Mischzeit betrug wiederum 2 Minuten. Anschließend wurde der nunmehr sehr trockenen Mischung innerhalb weiterer 1,5 Minuten soviel Wasser zugegeben, daß der Frischbeton augenscheinlich die gleiche Konsistenz wie der Vergleichsbeton aufwies.

In allen Fällen wurden die für die Prüfung vorgesehenen Würfel auf einem Rütteltisch verdichtet (Rüttelzeit rd. 30 s), mit dauerhaften Kennzeichen versehen und in den Feuchtlagerraum (20 °C/100 % r.F.) gebracht. Die Würfel verblieben 24 Stunden in der Schalung, anschließend erfolgte die Lagerung bis zur Prüfung nach DIN 1048 Teil 5 [7]. Jeweils eine Würfelserie wurde darüber hinaus bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen durchgehend im Feuchtlagerraum gelagert.

Die nach dem Mischen festgestellten Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 7, Beilage 6, zusammengestellt.

Anzumerken bleibt, daß auch die Betone mit einem Ausbreitmaß von rd. 35 cm wegen ihrer gummiartigen Konsistenz eine gute Verarbeitbarkeit aufwiesen.

### **3.1.2 Festbetonprüfungen**

Die Rohdichte und die Druckfestigkeit der Betone wurden an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von 24 und 48 Stunden sowie 28 Tagen gemäß DIN 1048 Teil 5 [7] bestimmt. Wegen des vorwiegend vergleichenden Charakters der Prüfungen wurde auf die Umrechnung auf Würfel mit 20 cm Kantenlänge verzichtet. Die Ergebnisse dieser Prüfungen sind in Tabelle 8, Beilage 7, zusammengestellt und in Bild 3, Beilage 8, graphisch aufgetragen.

### **3.1.3 Bewertung der Ergebnisse**

Aus der Versuchsserie "Hochfester Beton" läßt sich folgendes ableiten:

- Die 28-Tage-Festigkeit des Vergleichsbetons erreichte mit  $72 \text{ N/mm}^2$  nicht den in [3] angegebenen Wert von  $100 \text{ N/mm}^2$  für einen frühhochfesten Beton ähnlicher Zusammensetzung. Der Unterschied beruht auf der Nichtzugabe von Silikastaub und Verzögerer.
- Die 28-Tage-Festigkeit des Recyclingbetons lag mit 69 bzw.  $70 \text{ N/mm}^2$  nur ganz geringfügig unter dem entsprechenden Wert des Vergleichsbetons, unabhängig, ob das Wasserauf-

saugvermögen der Recyclingzuschläge durch 30minütige Wasserlagerung bestimmt oder durch Konsistenzabgleich mit dem Vergleichsbeton abgeschätzt wurde.

- Wurden die Würfel anstelle der normgemäßen dreiwöchigen Trockenlagerung bis zur Prüfung durchweg bei 20 °C/100 % r. F. gelagert, so ergaben sich Festigkeitsminderungen zwischen 5 und 10 %; dies gilt für den Vergleichsbeton und die Recyclingbetone gleichermaßen. Die beobachtete Abminderung lag damit innerhalb des hierfür bekannten Bereichs [8].
- Die im Alter von 24 und 48 Stunden ermittelten Festigkeiten von 31 bis 55 N/mm<sup>2</sup> lagen sowohl für den Vergleichsbeton als auch für die Recyclingbetone in, z.T. auch über dem für die 28-Tage-Festigkeitsklasse B 25 und B 35 maßgeblichen Bereich und stimmten sehr gut mit den in [3] genannten Frühfestigkeiten überein (siehe auch Bild 1, Beilage 1).
- Die Festigkeit nach 24 Stunden betrug 45 bis 63 %, die Festigkeit nach 48 Stunden 70 bis 76 % der jeweiligen 28-Tage-Festigkeit. Zwischen dem Vergleichsbeton und dem Recyclingbeton, bei dem das Wasseraufsaugen der Zuschläge durch Konsistenzabgleich abgeschätzt wurde, bestanden diesbezüglich kaum nennenswerte Unterschiede. Demgegenüber lag die Festigkeit des Recyclingbetons, bei dem das Wasseraufsaugen der Zuschläge durch 30minütige Wasserlagerung bestimmt wurde und dessen Konsistenz deutlich weicher als die des Vergleichsbetons war, nach 24 Stunden noch um eine Festigkeitsklasse tiefer; nach 48 Stunden fiel der Unterschied dann allerdings schon nicht mehr so gravierend aus.

### 3.2 Versuchsserie „Warmbeton“

Die Zusammensetzung der für diese Versuchsserie hergestellten Betone orientierte sich an Versuchen, die im Rahmen der Erweiterung einer Zulassungsprüfung von Zuschlag aus mineralischem Baustoffgemisch auf die Festigkeitsklasse B 25 [9] durchgeführt worden waren und die zu einer 28-Tage-Druckfestigkeit von rd. 35 N/mm<sup>2</sup> geführt hatten.

Hergestellt wurden ein Vergleichsbeton unter Verwendung von natürlichem Zuschlag (Oberrheinmaterial) und drei bezüglich der Zusammensetzung identische Recyclingbetone mit jeweils 50 Vol.-% Recyclingzuschlaganteil in allen Kornfraktionen. Dieser Anteil entspricht dem in der Zulassung geforderten Wert für eine Zielfestigkeit B 25 bei Verwendung eines Zementes der Festigkeitsklasse 32,5 und ist identisch mit dem für die Versuchsserie „Hochfester Beton“ gewählten Anteil.

Während der Vergleichsbeton und ein Recyclingbeton bei rd. 20 °C hergestellt und bis zur Prüfung entsprechend DIN 1048 Teil 5 [7] gelagert werden sollten, waren für die beiden verbleibenden Recyclingbetone Frisch- und Lagerungstemperaturen von 40 bzw. 60 °C vorgesehen. Die erhöhten Temperaturen sollten ein entsprechend schnelleres Erhärten des Betons gewährleisten und im Idealfall dazu führen, daß bereits nach 24 oder 48 Stunden Festigkeitswerte nahe der 28-Tage-Normfestigkeit erreicht werden.

Im folgenden werden die Recyclingbetone mit den geplanten Frischbetontemperaturen von 20, 40 und 60 °C kurz als RC20, RC40 und RC60 bezeichnet.

Die Sieblinien der Korngemische der Versuchsserie „Warmbeton“ entsprachen denen der Versuchsserie „Hochfester Beton“ (Bild 2, Beilage 4); die Zusammensetzung der Betone aus der Versuchsserie „Warmbeton“ ist Tabelle 9, Beilage 9, zu entnehmen.

### **3.2.1 Herstellung der Betone, Frischbetonprüfungen**

Wie bei der Versuchsserie „Hochfester Beton“ wurden auch die hier zu besprechenden Betone in einem Zwangsmischer hergestellt.

Beim Vergleichsbeton wurden Zuschlag und Zement zunächst eine Minute trocken vorgemischt. Anschließend erfolgte innerhalb von zwei Minuten die Wasserzugabe. Zur besseren Verarbeitbarkeit wurde entsprechend den Erfahrungen der Zulassungsprüfung [9] eine geringe Menge Fließmittel zugegeben, welches dem letzten Drittel des Zugabewassers beigemischt wurde. Die Mischzeit nach Beendigung der Wasserzugabe betrug eine Minute.

Der Recyclingbeton RC20 wurde auf die gleiche Weise hergestellt, wobei die das Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags berücksichtigende zusätzliche Wassermenge durch Konsistenzabgleich mit dem Vergleichsbeton ermittelt wurde. Diese Wassermenge wurde auch den Recyclingbetonen RC40 und RC60 zugegeben. Während mit diesen Vorgaben für den Recyclingbeton RC40 noch in etwa die gleiche Konsistenz erzielt wurde, war beim Recyclingbeton RC60 eine Nachdosierung des Fließmittels (9,5 statt 5,5 ml/kg Zement) erforderlich.

Bei den Warmbetonen RC40 und RC60 wurde die Reihenfolge der Zugabe dahingehend abgeändert, daß der vorher erwärmte Zuschlag zusammen mit rd. 80 % der Gesamtwassermenge eine Minute vorgemischt und erst anschließend der ebenfalls vorgewärmte Zement mit der

Restwassermenge und dem darin enthaltenen Fließmittel zugegeben wurde. Die Nachmischzeit betrug 2,5 Minuten.

Vor dem jeweiligen Betoniertermin waren Zuschlag und Zement für den Recyclingbeton RC40 bei 50 °C und für den Recyclingbeton RC60 bei 70 °C rd. 24 Stunden erwärmt worden; die Temperatur des Wassers wurde anschließend aus folgender Formel errechnet und unmittelbar vor dem Betonieren eingestellt:

$$T_B = \frac{0,84 \cdot G \cdot T_G + 0,84 \cdot Z \cdot T_Z + 4,19 \cdot W \cdot T_W}{0,84 \cdot G + 0,84 \cdot Z + 4,19 \cdot W}$$

mit  $T_B$  = Temperatur des Frischbetons in °C

$T_G$  = Temperatur des Zuschlags in °C       $G$  : Zuschlaggehalt in kg/m<sup>3</sup> Beton

$T_Z$  = Temperatur des Zements in °C,       $Z$  : Zementgehalt in kg/m<sup>3</sup> Beton

$T_W$  = Temperatur des Wassers in °C,       $W$  : Wassergehalt in kg/m<sup>3</sup> Beton

Angabe der spezifischen Wärme in kJ/(kg K)

Die Temperatur des Frischbetons wurde bei dieser Rechnung aufgrund der vermuteten Abkühlung infolge des Mischens für den Recyclingbeton RC40 um 3 K und für den Recyclingbeton RC60 um 5 K erhöht.

Die tatsächlichen Temperaturen der Ausgangsstoffe sowie die nach dem Mischen festgestellten Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 10, Beilage 10, zusammengestellt.

Wie bei der Versuchsserie „Hochfester Beton“ wurden die für die Prüfung vorgesehenen Würfel auf einem Rütteltisch verdichtet (Rüttelzeit rd. 30 s) und mit dauerhaften Kennzeichen versehen. Danach verblieben sie bis zum Ausschalen nach 24 Stunden im Feuchtlagerraum (20 °C/100 % r. F.) bzw. in Klimaschränken (40 bzw. 60 °C/100 % r. F.).

Die weitere Lagerung erfolgte für den Vergleichsbeton und den Recyclingbeton RC20 gemäß DIN 1048 Teil 5 [7]. Die verbleibenden Würfelserien der Betone RC40 und RC60 wurden dagegen bis zum jeweiligen Prüftermin unter Wasser gelagert, das eine Temperatur von 40 bzw. 60 °C aufwies.

### 3.2.2 Festbetonprüfungen

Die Rohdichte und die Druckfestigkeit der Betone wurden an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge im Alter von 24 und 48 Stunden sowie 28 Tagen gemäß DIN 1048 Teil 5 [7] bestimmt. Auch hier wurde wiederum auf die Umrechnung auf Würfel mit 20 cm Kantenlänge verzichtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11, Beilage 11, zusammengestellt und in Bild 4, Beilage 12, graphisch aufgetragen.

### 3.2.3 Bewertung der Ergebnisse

Aus der Versuchsserie „Warmbeton“ läßt sich folgendes ableiten:

- Die beiden mit Frischbetontemperaturen von 20 °C hergestellten Betone, der Vergleichsbeton und der Recyclingbeton RC20 ergaben mit Festigkeitswerten von 36 bzw. 32 N/mm<sup>2</sup> im Alter von 28 Tagen jeweils einen Beton der Festigkeitsklasse B 25. Die Festigkeit des Recyclingbetons erreichte dabei rd. 89 % des Vergleichsbetons.
- Die Festigkeitsentwicklung dieser beiden Betone war relativ ähnlich. Etwas überraschend lag die 24-Std.-Festigkeit des Recyclingbetons dabei mit 6,0 N/mm<sup>2</sup> deutlich über der des Vergleichsbetons (4,2 N/mm<sup>2</sup>).
- Die Recyclingbetone RC40 und RC60, die Frischbetontemperaturen von knapp 40 bzw. 60 °C aufwiesen und entsprechend gelagert wurden, hatten nach 24 Std. eine Druckfestigkeit von 15 bzw. 16 N/mm<sup>2</sup>. Sie erreichte damit etwa die Hälfte der 28-Tage-Festigkeit des Recyclingbetons RC20.
- Bei den Recyclingbetonen RC40 und RC60 gab es hinsichtlich der Nacherhärtung bis zum 28. Tag nur geringe Unterschiede. Die 28-Tage-Festigkeit betrug mit 24 bzw. 23 N/mm<sup>2</sup> 75 bzw. 72 % der 28-Tage-Festigkeit des Recyclingbetons RC20. Diese Festigkeitseinbußen liegen innerhalb des in [10] genannten Bereichs von bis zu 40 %.

## 4 Zusammenfassung

Da bislang keine befriedigende Korrelation zwischen den Eigenschaften eines Zuschlags aus mineralischem Baustoffgemisch (Recyclingzuschlag aus Bauschutt) und der hiermit erzielbaren Betondruckfestigkeit festgestellt werden konnte und das bisherige Freigabekriterium einer bauaufsichtlichen Zulassung [2], die augenscheinliche Ermittlung höherfester Bestandteile (mind. 80 M.-%), für Festigkeitsklassen ab B 25 zu Sicherheitsrisiken führen könnte, erschie-

nen Betonprüfungen mit dem Ziel einer hohen Frühfestigkeit erfolgversprechend.

Zwei Wege zur Herstellung der Prüfbetone wurden beschrrieben:

1. Herstellung eines Recyclingbetons in Anlehnung an eine Rezeptur eines frühhochfesten Betons für Verkehrsflächen mit natürlichem Zuschlag [3], der bereits in den ersten Tagen den hier relevanten Festigkeitsbereich von 30 bis 40 N/mm<sup>2</sup> durchläuft.
2. Herstellung eines Recyclingbetons mit einer 28-Tage-Druckfestigkeit von rd. 35 N/mm<sup>2</sup> und Frischbeton- und Lagerungstemperaturen von 40 und 60 °C, der als „Warmbeton“ bereits in kurzer Zeit den entsprechenden Festigkeitsbereich erreicht.

Bei der Versuchsserie „Hochfester Beton“ wurden für einen Recyclingbeton Druckfestigkeiten im Alter von 24 und 48 Stunden zwischen 31 und 55 N/mm<sup>2</sup> bestimmt.

Die Druckfestigkeiten der Recyclingbetone aus der Versuchsserie „Warmbeton“ im Alter von 24 und 48 Stunden erreichten dagegen nur 15 bis 19 N/mm<sup>2</sup>.

Im Hinblick auf die Zielsetzung, eine Freigabeprüfung zur Überwachung von Recyclingzuschlag bei angestrebten Festigkeitsklassen ab B 25 zu entwickeln, ist deshalb eindeutig die geprüfte Variante „Hochfester Beton“ zu bevorzugen.

Sie hat zudem gegenüber der Variante „Warmbeton“ den Vorteil, auch in einem einfach ausgerüsteten Betonlabor ohne Trocknungseinrichtungen und Klimaschränke angewandt werden zu können.

Bei der Durchführung der Versuche hat sich gezeigt, daß die Abschätzung des tatsächlichen Wasseraufsaugens der Recyclingzuschläge beim Betonieren und damit die Angabe des wirk-samen Wasserzementwertes schwierig ist. Die Berücksichtigung des Wasseraufsaugens der Zuschläge innerhalb 30 Minuten – wie bei Leichtzuschlag üblich [5] – führte dabei zu einer im Vergleich zu einem parallel mit natürlichem Zuschlag hergestellten Beton erheblich weicheren Konsistenz. Die gleiche Konsistenz konnte danach mit deutlich geringerer Wasserzugabe erzielt werden.

Die unterschiedlichen Wasserzugabemengen spiegelten sich erwartungsgemäß in Druckfestigkeitsunterschieden wider, die jedoch mit zunehmendem Alter geringer wurden.

Nach den hier durchgeführten Versuchen empfiehlt sich deshalb die Abschätzung des Wasser-aufsaugvermögens durch Konsistenzabgleich mit einem mit natürlichem Zuschlag hergestellten Vergleichsbeton. Als Prüfalter sind 48 Stunden der Zeit von 24 Stunden vorzuziehen, weil

Vergleichsbeton. Als Prüfalter sind 48 Stunden der Zeit von 24 Stunden vorzuziehen, weil dennoch mögliche Fehler oder Prüfstreuungen bei der Wasserzugabe sich hier weniger gravierend auswirken, jedoch scheint auch das Prüfalter von 24 Stunden aussagekräftige Prüfergebnisse zu liefern, wenn die Vorgehensweise mit Konsistenzabgleich gewählt und genauestens eingehalten wird.

Werden Prüfbetone mit einer Zusammensetzung gemäß der hier durchgeführten Versuche – jedoch mit dem für jede bauaufsichtliche Zulassung individuell festgelegten Anteil an Recyclingzuschlag – eingesetzt, kann bereits im Alter von 48 bzw. 24 Stunden sicher beurteilt werden, ob das Recyclingmaterial einen gleichbleibenden Festigkeitsbeitrag liefert.

Welche Grenzwerte für die 48- bzw. 24-Stunden-Druckfestigkeit für die einzelnen Betonfestigkeitsklassen angesetzt werden müßten, kann aufgrund der vorliegenden Untersuchung nicht entschieden werden. In erster Näherung könnten die in der DIN 1045 [11], Tabelle 1, für die einzelnen Festigkeitsklassen geforderten Serienfestigkeiten herangezogen werden.

Die hier entwickelte Betonkurzzeitprüfung ist für beantragte Betonfestigkeitsklassen bis B 15 entbehrlich, während sie ab B 35 in jedem Fall relevant erscheint. Falls als höchste Festigkeitsklasse B 25 beantragt wurde, sollte in Abhängigkeit von der Qualität des zu beurteilenden Recyclingzuschlags (Ausgangsmaterialien, Herstellung und Aufbereitung) im Einzelfall entschieden werden, ob diese Betonkurzzeitprüfung als Freigabekriterium vorzusehen ist.



## Literatur

- [1] Zulassungsprüfung von mineralischem Recyclingzuschlag zur Verwendung wie Zuschlag nach DIN 4226 für Beton nach DIN 1045 bis zur Festigkeitsklasse B 15 - Teilbericht Betonprüfungen. Untersuchungsbericht 12-17971-c der FMPA Baden-Württemberg vom 22.3.1995
- [2] Recyclingzuschlag der Korngruppen 0/2a-vF, 2/8-vF und 8/16-vF; Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.43-1003 des DIBt, Berlin, vom 8.9.1995 (bis einschließlich Betonfestigkeitsklasse B 15) bzw. Erweiterung vom 17.2.1997 (bis einschließlich B 25)
- [3] Manns, W., und B. Neubert: Frühhochfester Beton für Verkehrsflächen. Beton 45 (1995), H. 5, S. 312-316
- [4] DIN 4226 – Zuschlag für Beton. Ausgabe April 1983
- [5] Merkblatt für Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge, Fassung Juli 1974. Beton 24 (1974), H. 7, S. 266
- [6] DIN EN 459-2 – Baukalk. Teil 2: Prüfverfahren. Ausgabe März 1995
- [7] DIN 1048 Teil 5 – Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Ausgabe Juni 1991
- [8] Dahms, J.: Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. Betontechnische Berichte 1968, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1969, S. 113-126
- [9] Prüfungen von Frisch- und Festbeton mit mineralischem Recyclingzuschlag zur Erweiterung der erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Z-3.43-1003 des DIBt, Berlin, auf die Festigkeitsklasse B 25. Untersuchungsbericht 12-23279 der FMPA Baden-Württemberg vom 17.9.1996
- [10] Weigler, H., und S. Karl: Beton. Arten – Herstellung – Eigenschaften. Ernst Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1989, S. 198
- [11] DIN 1045 – Beton und Stahlbeton, Ausgabe Juli 1988

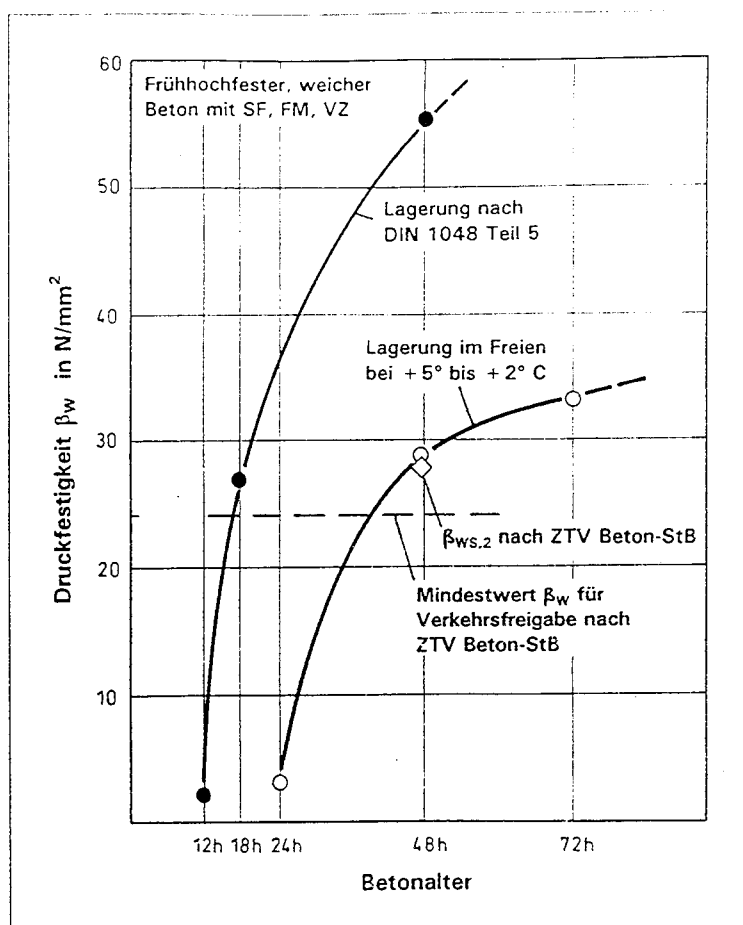


Bild 1. Festigkeitsentwicklung eines frühhochfesten Betons mit natürlichem Zuschlag, nach [3]

Tabelle 1. Stoffliche Zusammensetzung des Recyclingzuschlags und Anteil höherfester Bestandteile (augenscheinliche Beschreibung und Auswiegen des sortierten Materials)

Korngruppe [mm]	Höherfeste Bestandteile [M.-%]				Niedrigerfeste Bestandteile [M.-%]			
	Beton	Naturstein	Ziegel, Klinker, Keramik	Summe	Putz, Mörtel	Blähton, Leichtbeton	Asphaltgranulat	Summe
8/16	62,5	12,6	9,4	84,5	9,5	2,2	3,8	15,5
Anforderungen der Zulassung Z 3.43-1003:				≥ 80				≤ 20

Tabelle 2: Kornzusammensetzung des Recyclingzuschlags,  
bestimmt nach DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 3.1

Korngruppe [mm]	Durchgang <sup>1)</sup> [M.-%] durch das Prüfsieb mit								
	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
	mm Maschenweite nach DIN 4188 Teil 1					mm Quadratlochweite nach DIN 4187 Teil 2			
0/2a	1	11	39	75	96	100	100	100	100
Anforderungen der Zulassung:		≤ 25	≤ 60		≥ 90	100			
2/8	1	1	1	2	7	48	99	100	100
Anforderungen der Zulassung:		≤ 3			≤ 20	10-65	≥ 90	100	
8/16	0	1	1	1	1	1	14	99	100
Anforderungen der Zulassung:		≤ 3					≤ 20	≥ 90	100

<sup>1)</sup> Mittel aus zwei Einzelsiebungen

Tabelle 3: Kornfestigkeit des Recyclingzuschlags,  
bestimmt nach DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 7.2

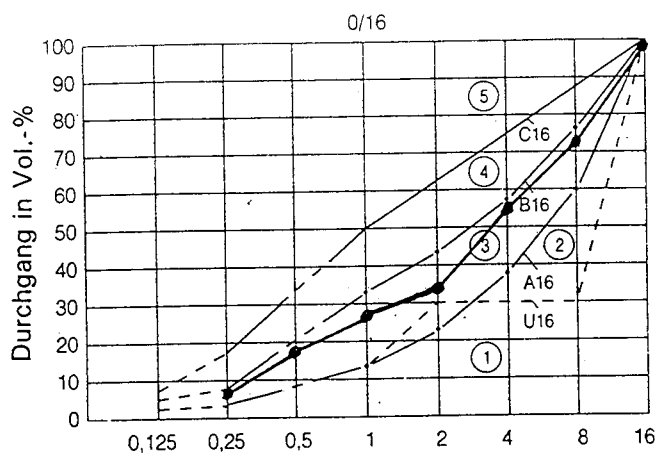
Korngruppe [mm]	Druckwert [kN]			Mittelwert
	Einzelwerte			
4/8	53,8	55,5	57,1	55,5
8/16	56,4	53,0	52,6	54,0
Anforderungen der Zulassung:				≥ 30

Tabelle 4. Schütt- und Kornrohddichte des Recyclingzuschlags, bestimmt nach DIN 4226 [4] Teil 3, Abschnitt 3.3 bzw. in Anlehnung an Abschnitt 3.4.1.2 (Pyknometerverfahren)

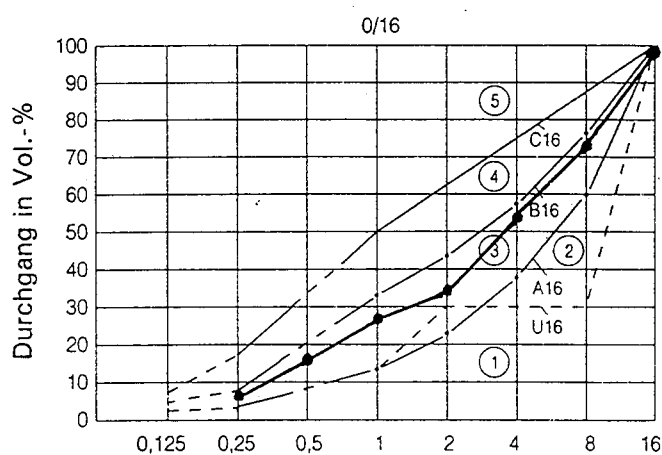
Korngruppe [mm]	Schüttdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]			Mittelwert	Kornrohddichte [kg/dm <sup>3</sup> ]		
	Einzelwerte				Einzelwerte		
0/2a	1,29	1,30	1,30	1,30	2,27	2,23	2,25
Anforderungen der Zulassung:				1,35 ± 0,15			2,50 ± 0,15
2/8	1,34	1,34	1,34	1,34	2,24	2,25	2,25
Anforderungen der Zulassung:				1,15 ± 0,20			2,40 ± 0,20
8/16	1,27	1,27	1,27	1,27	2,42	2,42	2,42
Anforderungen der Zulassung:				1,15 ± 0,20			2,25 ± 0,20

Tabelle 5. Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags nach 30minütiger Wasserlagerung gemäß [5] (Korngruppen 2/8 und 8/16 mm) bzw. ermittelt durch Besprühen (Korngruppe 0/2a mm), vgl. Text, Abschnitt 2.6

Korngruppen [mm]	Wasseraufsaugvermögen der Zuschläge [M.-%]		
	Einzelwerte		Mittelwert
0/2a	5,4	6,4	5,9
2/8	5,4	5,4	5,4
8/16	2,7	2,7	2,7



a) Sieblinie Vergleichsbeton  
(natürlicher Zuschlag),  
Körnungsziffer  $k = 3,86$



b) Sieblinie Recyclingbeton  
(50 Vol.-% natürlicher Zuschlag,  
50 Vol.-% Recyclingzuschlag),  
Körnungsziffer  $k = 3,92$

Bild 2. Sieblinien der Korngemische der Betone der beiden Versuchsserien „Hochfester Beton“ und „Warmbeton“

Tabelle 6. Stoffliche Zusammensetzung der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Hochfester Beton“

			Vergleichsbeton	Recyclingbeton	
Zement CEM I 42,5 R	kg/m <sup>3</sup>		485	485	
Zuschlag (trocken)	0/2 mm	kg/m <sup>3</sup>	N <sup>2)</sup> 594	N <sup>2)</sup> 297	RC <sup>2)</sup> 257
	2/8 mm	kg/m <sup>3</sup>	589	295	257
	8/16 mm	kg/m <sup>3</sup>	563	281	260
	Σ	kg/m <sup>3</sup>	1746	1647	
Gesamtwassergehalt <sup>1)</sup>	l/m <sup>3</sup>		160	195 <sup>3)</sup>	177 <sup>4)</sup>
Wirksamer Wassergehalt <sup>1)</sup>	l/m <sup>3</sup>		160	160	160
Wasserzementwert <sup>1)</sup>			0,33	0,40 <sup>3)</sup>	0,36 <sup>4)</sup>
Wirksamer Wasserzementwert <sup>1)</sup>			0,33	~ 0,33	~ 0,33
Fließmittel FM <sup>5)</sup>	ml/kg Zement		40	40	
<sup>1)</sup> einschließlich Fließmittel <sup>2)</sup> N = natürlicher Zuschlag (Oberrheinmaterial), RC = Recyclingzuschlag; Stoffraumanteile beim Recyclingbeton N : RC = 50 : 50 <sup>3)</sup> inklusive zusätzlicher Wasserzugabe entsprechend des Wasseraufsaugvermögens der Recyclingzuschläge, er- durch 30minütige Wasserlagerung (1. Ansatz) <sup>4)</sup> inklusive zusätzlicher Wasserzugabe entsprechend des Wasseraufsaugvermögens der Recyclingzuschläge, er- mittelt durch Konsistenzabgleich mit Vergleichsbeton (2. Ansatz) <sup>5)</sup> Wirkstoffe: Naphthalinsulfonat und modifiziertes Melaminharz					

Tabelle 7: Frischbetonkennwerte der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Hochfester Beton“

	Vergleichsbeton	Recyclingbeton	
		1. Ansatz <sup>1)</sup>	2. Ansatz <sup>2)</sup>
Konsistenz			
Ausbreitmaß a <sub>5</sub> cm	35	60,5	34
Verdichtungsmaß v <sub>10</sub>	1,27	-	1,15
Frischbetontemperatur                      °C	22	22	22
Rüttelzeit                                      s	30	30	30
Frischbetonrohddichte, ermittelt im Lufttopf                      kg/dm <sup>3</sup>	2,35	2,26	2,31
Luftgehalt nach dem Druckausgleichsverfahren                      Vol.-%	2,4	2,7	2,4
<sup>1)</sup> Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags ermittelt als Wasseraufnahme innerhalb 30 Minuten <sup>2)</sup> Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags ermittelt durch Konsistenzabgleich mit Vergleichsbeton			

Tabelle 8. Rohdichte und Druckfestigkeit der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Hochfester Beton“;  
Probekörper: Würfel mit 15 cm Kantenlänge

	Vergleichsbeton		Recyclingbeton			
			1. Ansatz <sup>1)</sup>		2. Ansatz <sup>2)</sup>	
Probenalter	Rohdichte <sup>3)</sup>	Druckfestigkeit	Rohdichte <sup>3)</sup>	Druckfestigkeit	Rohdichte <sup>3)</sup>	Druckfestigkeit
	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
24 Std.	2,35	45	2,31	29	2,35	45
	2,35	46	2,30	32	2,33	44
	2,33	45	2,34	33	2,35	42
	i.M.	2,34	45	2,32	31	2,34
48 Std.	2,35	55	2,32	48	2,30	54
	2,35	52	2,33	49	2,33	53
	2,37	57	2,28	48	2,32	50
	i.M.	2,36	55	2,31	48	2,32
28 Tage (Normlagerung)	2,35	68	2,30	66	2,31	71
	2,35	74	2,30	72	2,33	76
	2,36	73	2,31	69	2,31	63
	i.M.	2,35	72	2,30	69	2,32
28 Tage (Lagerung durchweg bei 20°C/100 % r.F.)	2,37	62	2,31	60	2,34	65
	2,38	63	2,32	63	2,32	66
	2,36	69	2,33	65	2,34	67
	i.M.	2,37	65	2,32	63	2,33

<sup>1)</sup> Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags ermittelt als Wasseraufnahme innerhalb 30 Minuten  
<sup>2)</sup> Wasseraufsaugvermögen des Recyclingzuschlags ermittelt durch Konsistenzabgleich mit Vergleichsbeton  
<sup>3)</sup> 24- und 48-Std.-Werte: im feuchten Zustand,  
28-Tage-Werte: im lufttrockenen bzw. feuchten Zustand



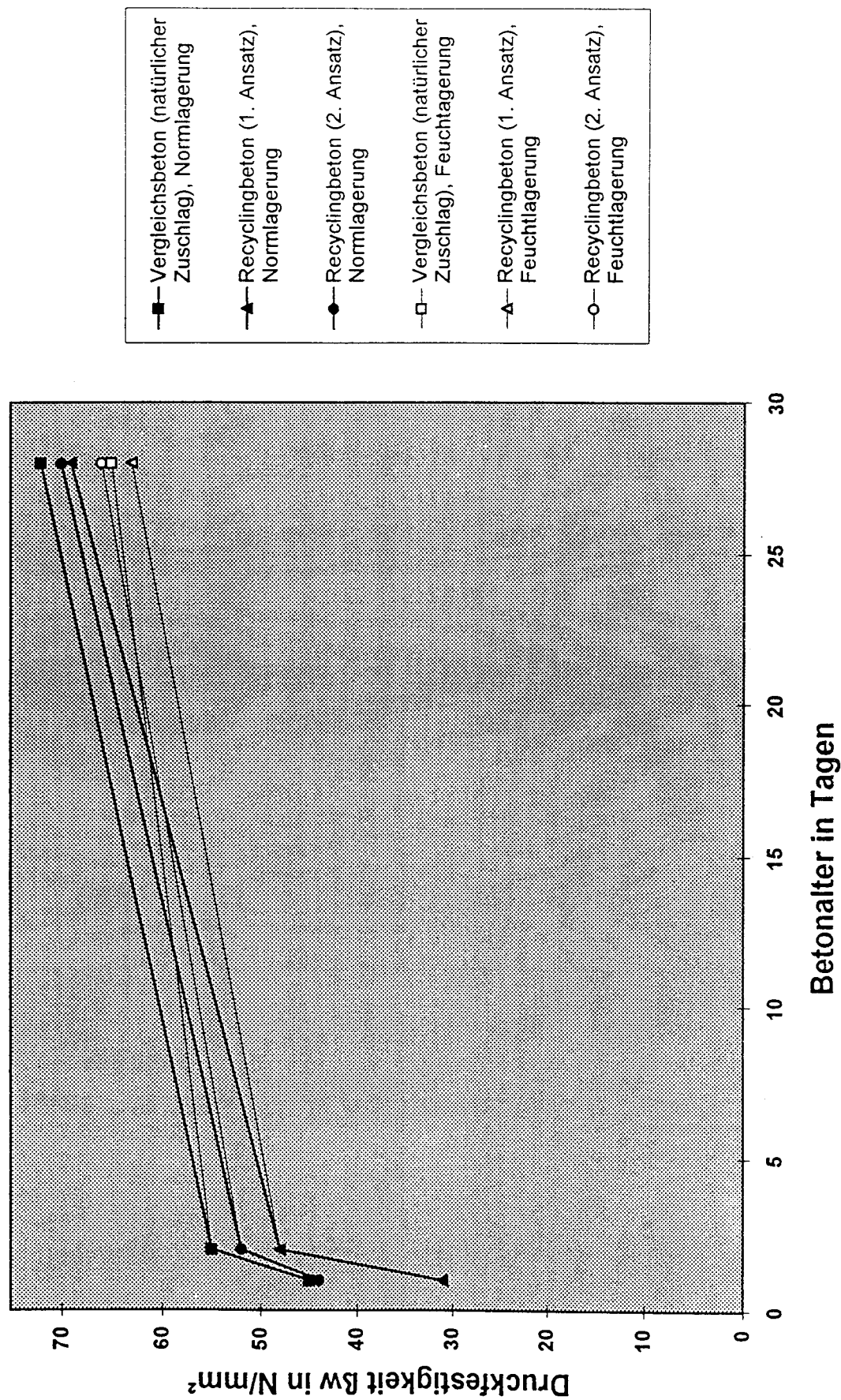


Bild 3. Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Hochfester Beton“. Graphische Darstellung der Werte aus Tabelle 8, Beilage 7.

Tabelle 9. Stoffliche Zusammensetzung der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Warmbeton“

		Vergleichsbeton	Recyclingbetone	
Zement CEM I 32,5 R	kg/m <sup>3</sup>	300	300	
Zuschlag		N <sup>2)</sup>	N <sup>2)</sup>	RC <sup>2)</sup>
0/2 mm	kg/m <sup>3</sup>	631	316	276
(trocken) 2/8 mm	kg/m <sup>3</sup>	626	313	284
8/16 mm	kg/m <sup>3</sup>	599	300	282
Σ	kg/m <sup>3</sup>	1856	1771	
Gesamtwassergehalt <sup>1)</sup>	l/m <sup>3</sup>	176	209 - 210	
Wirksamer Wassergehalt <sup>1)</sup>	l/m <sup>3</sup>	176	176 - 177	
Wasserzementwert <sup>1)</sup>		0,59	0,70 <sup>3)</sup>	
Wirksamer Wasserzementwert <sup>1)</sup>		0,59	~ 0,59	
Fließmittel FM <sup>4)</sup>	ml/kg Zement	5	5,5 - 9,5	
<sup>1)</sup> einschließlich Fließmittel <sup>2)</sup> N = natürlicher Zuschlag (Oberrheinmaterial), RC = Recyclingzuschlag; Stoffraumanteile beim Recyclingbeton N : RC = 50 : 50 <sup>3)</sup> inklusive zusätzlicher Wasserzugabe entsprechend des Wasseraufsaugvermögens der Recyclingzuschläge, ermittelt durch Konsistenzabgleich mit Vergleichsbeton <sup>4)</sup> Wirkstoffe: Naphthalinsulfonat und modifiziertes Melaminharz				

Tabelle 10. Frischbetonkennwerte der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Warmbeton“

	Vergleichsbeton	Recyclingbetone		
		RC20 <sup>1)</sup>	RC40 <sup>1)</sup>	RC60 <sup>1)</sup>
Temperatur der Ausgangsstoffe				
Zuschlag °C	-	-	49	67
Zement °C	-	-	50	68
Wasser °C	-	-	28	60
Konsistenz				
Ausbreitmaß a <sub>5</sub> cm	40,5	39,5	36,5	38
Frischbetontemperatur °C	21	19	38	56
Rüttelzeit s	30	30	30	30
Frischbetonrohddichte, ermittelt im Lufttopf kg/dm <sup>3</sup>	2,30	2,26	2,24	2,25
Luftgehalt nach dem Druckausgleichsverfahren Vol.-%	2,1	1,9	2,2	2,2
<sup>1)</sup> angestrebte Frischbetontemperaturen: 20, 40 und 60 °C				

Tabellë 11. Rohdichte und Druckfestigkeit der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Warmbeton“;  
 Probekörper: Würfel mit 15 cm Kantenlänge

Probenalter	Vergleichsbeton		Recyclingbetone					
	Rohdichte <sup>3)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	RC20 <sup>1)</sup>		RC40 <sup>1)</sup>		RC60 <sup>1)</sup>	
			Rohdichte <sup>2)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte <sup>3)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Rohdichte <sup>2)</sup> [kg/dm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
24 Std.	2,33	4,2	2,28	6,2	2,25	16	2,21	16
	2,32	4,4	2,24	6,1	2,22	15	2,24	16
	2,31	4,0	2,26	5,8	2,22	15	2,25	16
	i.M.	2,32	4,2	2,26	6,0	2,23	15	2,23
48 Std.	2,30	13	2,25	14	2,20	19	2,25	17
	2,30	15	2,24	14	2,23	19	2,24	17
	2,30	14	2,24	14	2,18	19	2,25	18
	i.M.	2,30	14	2,24	14	2,20	19	2,25
28 Tage <sup>3)</sup>	2,28	34	2,19	35	2,23	24	2,26	25
	2,26	38	2,23	31	2,25	23	2,27	24
	2,28	35	2,20	31	2,23	25	2,26	20
	i.M.	2,27	36	2,21	32	2,24	24	2,26

<sup>1)</sup> angestrebte Frischbetontemperaturen: 20, 40 und 60 °C  
<sup>2)</sup> 28-Tage-Werte von Vergleichsbeton und Recyclingbeton RC20: im lufttrockenen Zustand, alle anderen Werte: im feuchten Zustand  
<sup>3)</sup> Vergleichsbeton und Recyclingbeton RC20 Normlagerung, Recyclingbetone RC40 und RC60 bis zur Prüfung in Wasser von 40 bzw. 60 °C

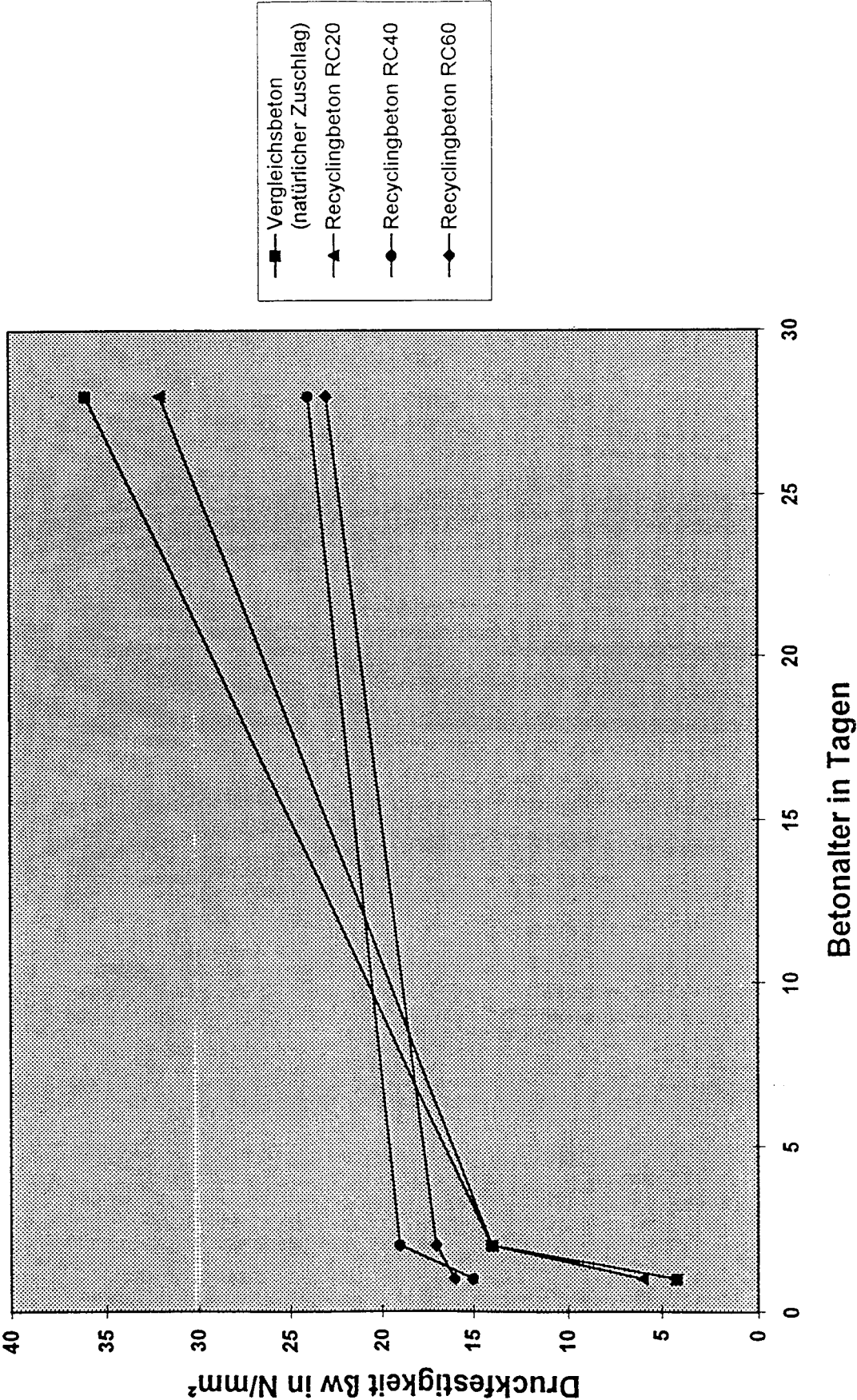


Bild 4. Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betone aus der Versuchsserie „Warmbeton“. Graphische Darstellung der Werte aus Tabelle 11, Beilage 11.