

# Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonati- sierungsverhalten von Beton

## 2. Ergänzung

**T 2562**

T 2562

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

# INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG DER UNIVERSITÄT HANNOVER

Nienburger Straße 3 und Appelstraße 9 A - D-30167 Hannover

Telefon: Geschäftszimmer: 0511/762-3722, Sachbearbeiter: 0511/762-3109, Vermittlung Uni: 0511/762-0  
Telex 923 868 unihn d, Telefax: 0511/762-4001

## Schlußbericht zum Forschungsvorhaben

Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen  
auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton

### II. Ergänzung

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik  
Reichpietschufer 74-76  
10785 Berlin  
Az.: IV/1-5-681/92

Hannover, im November 1993

Sachbearbeiterin



(Dr.-Ing. E. Scholz)

Leiter des Forschungsvorhabens



(Univ.-Prof.em.Dr.-Ing.H.-J.Wierig)

Der Bericht umfaßt 15 Seiten und einen Anhang von 33 Seiten.

I n h a l t

	Seite
1. Allgemeines	3
2. Versuchsprogramm	4
3. Versuchsmaterial	4
3.1 Betonausgangsstoffe	4
3.1.1 Zemente	4
3.1.2 Flugaschen	5
3.1.3 Zuschlag	5
3.2 Betone	5
4. Versuchsdurchführung	6
4.1 Nachbehandlung und Exposition (Lagerung)	6
4.2 Druckfestigkeiten	7
4.3 Carbonatisierungstiefen	7
5. Versuchsergebnisse	7
5.1 Druckfestigkeiten	7
5.2 Carbonatisierungstiefen	8
6. Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse	8
6.1 Vorbemerkung	8
6.2 Betone "vergleichbarer" Zusammensetzung	8
6.3 Betone gleicher Druckfestigkeit	10
7. Zusammenfassung	14
Literatur	15
Anhang	
12 Tafeln	
26 Bilder	

## 1. Allgemeines

Im Zusammenhang mit der Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 oder der Zulassung von Flugaschezementen ist u. a. die Frage zu beantworten, wie sich der Zusatz von Steinkohlenflugaschen auf den Carbonatisierungsfortschritt der Betone auswirkt. Aus diesem Grund wird das Carbonatisierungsverhalten an Feinbetonen und Betonen mit festgelegten Mischungsverhältnissen geprüft. Die Flugasche enthaltenden Betone dürfen festigkeitsbezogen kein deutlich ungünstigeres Verhalten hinsichtlich Carbonatisierungstiefe und Carbonatisierungsgeschwindigkeit aufweisen als Betone ohne Flugasche. Es bestehen jedoch keine quantifizierten Anforderungen.

Zur Absicherung und Erweiterung der Beurteilungskriterien wurden in den Jahren 1982 bis 1985 zusätzliche Untersuchungen im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIfB), Berlin, finanzierten und vom Sachverständigenausschuß "Betontechnologie B 3: Betonzusatzstoffe" betreuten Forschungsvorhabens durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sind in einem Schlußbericht [1] ausführlich dargestellt worden. Sie umfassen die Carbonatisierungstiefen der untersuchten Betone bis zu einer Carbonatisierungsdauer von 2 Jahren.

Die Reststücke der untersuchten Betone wurden nach Abschluß des in [1] beschriebenen Meßprogramms weiter unter definierten Bedingungen gelagert. Im Betonalter von 3 und 5 Jahren wurden die Carbonatisierungstiefen erneut gemessen. Über die Ergebnisse wurde in [2] berichtet. Der vorliegende Bericht enthält die nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer gemessenen Carbonatisierungstiefen. Darüber hinaus wurde eine Auswertung des zeitabhängigen Carbonatisierungsfortschritts unter Berücksichtigung aller zwischen 28 Tagen und 10 Jahren gemessenen Carbonatisierungstiefen vorgenommen. Soweit es für die Beurteilung der Meßergebnisse erforderlich ist, wer-

den außerdem einige bereits in [1] mitgeteilte Kenndaten über Eigenschaften der Ausgangsstoffe und der Betone wiederholt.

Zusätzlich zu dem im Auftrag des DIfB durchgeführten Versuchsprogramm sind umfangreiche Ergänzungsversuche im Auftrag der VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen, dem Bundesverband Kraftwerksnebenprodukte e.V. (BVK), Aachen, sowie aus Eigenmitteln des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover (IBH) durchgeführt worden, über die an anderer Stelle berichtet wird [3].

## 2. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfaßte die Variation folgender Einflußgrößen:

- 3 handelsübliche Zemente
- 3 handelsübliche Flugaschen
- 5 Beton-Mischungsverhältnisse
- 3 Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen ("Lagerungen").

Tafel 1 im Anhang zeigt eine Übersicht über das Versuchsprogramm.

## 3. Versuchsmaterial

### 3.1 Betonausgangsstoffe

#### 3.1.1 Zemente

Für die Versuche waren drei handelsübliche Zemente der Festigkeitsklasse Z 35 verwendet worden:

- PZ 35 F
- HOZ 35 L
- HOZ 35 L-NW/HS.

Die Ergebnisse der mechanischen Zementprüfungen nach DIN 1164 sind in Tafel 3 zusammengestellt. Tafel 4 gibt eine Übersicht über die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Zemente.

### 3.1.2 Flugaschen

Die Auswahl der für die Versuche verwendeten Flugaschen war nach folgenden Gesichtspunkten getroffen worden:

Zwei der untersuchten Flugaschen sollten sich deutlich in ihrer Feinheit unterscheiden. Von der dritten Flugasche sollte aus den Zulassungs- und Überwachungsprüfungen ein relativ hoher Carbonatisierungsfortschritt bei gleichzeitig nur geringem Wassereinsparvermögen bekannt sein.

Die verwendeten Flugaschen besaßen ein Prüfzeichen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045. Die granulometrischen Eigenschaften der Flugaschen sind in Tafel 5, die chemischen Zusammensetzungen in Tafel 6 zusammengefaßt.

### 3.1.3 Zuschlag

Als Zuschlag wurde "Wesermaterial" aus den Beständen des Instituts in den Korngruppen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/16 mm verwendet. Die Sieblinie des Zuschlaggemisches lag im günstigen Bereich zwischen den Regelsieblinien A<sub>16</sub> und B<sub>16</sub> nach DIN 1045.

## 3.2 Betone

Mit den in Pkt. 3.1 beschriebenen Ausgangsstoffen waren Betone mit 5 verschiedenen Mischungsverhältnissen hergestellt worden. Tafel 2 enthält eine Übersicht über die Zusammensetzung und Bezeichnung der Versuchsbetone.

#### 4. Versuchsdurchführung

##### 4.1 Nachbehandlung und Exposition (Lagerung)

Alle Prüfkörper blieben einheitlich nach der Herstellung 2 Tage in der Form, wobei die freien Oberflächen mit Folie abgedeckt waren. Die anschließenden Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen ("Lagerungen") sind im einzelnen nachstehend aufgeführt und bezeichnet:

Lagerung 1:

2 d Form, 5 d Wasser, > 7 d Klima 20 °C/65 % r. Lf.

Lagerung 2:

2 d Form, 1 d Wasser, > 3 d Klima 20 °C/65 % r. Lf.

Lagerung 3:

2 d Form, 5 d Wasser, 21 d Klima  $\approx$  20 °C/85 % r. Lf.

> 28 d im Freien unter Dach.

Mit der Lagerung 2 wurde der Einfluß verkürzter Nachbehandlung gegenüber der Lagerung 1 bei sonst gleicher Exposition untersucht. In der Lagerung 3 wird bei gleicher Dauer der Wasserlagerung wie in der Lagerung 1 der Einfluß veränderter Klimabedingungen auf die Carbonatisierung erfaßt. Da nicht sämtliche für die Lagerung im Freien unter Dach vorgesehenen Prüfkörper am selben Tag hergestellt werden konnten, wurde darüber hinaus im Anschluß an die 5tägige Wasserlagerung zusätzlich eine 21tägige Vorlagerung im Labor bei etwa 20 °C und 85 % rel. Luftfeuchte vorgenommen, um den Einfluß unterschiedlicher Klimabedingungen auf die jungen Betone bei der Auslagerung zu vermindern.

Nach dem Ende der Wasserlagerung war zu allen Seiten der Prüfkörper ständig ein ungehinderter Luftzutritt möglich. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der umgebenden Luft entsprach der natürlichen Konzentration.

#### 4.2 Druckfestigkeiten

Die Betondruckfestigkeiten wurden im Betonalter von 2, 7, 28 und 365 Tagen an jeweils 2 Würfeln von 15 cm Kantenlänge geprüft. Die Würfel wurden in gleicher Weise nachbehandelt und gelagert wie die Balken, an denen die Carbonatisierungstiefen gemessen wurden.

#### 4.3 Carbonatisierungstiefen

Die Carbonatisierungstiefen wurden an Balken mit einer Querschnittsfläche von 10 cm x 15 cm und einer Anfangslänge von 70 cm zu folgenden Terminen nach Ende der Wasserlagerung gemessen:

7, 28, 90, 180 Tage, 1, 1,5, 2 (Ergebnisse s. [1]),  
3, 5 (Ergebnisse s. [2]) und 10 Jahre.

Die Carbonatisierungstiefen wurden in Anlehnung an [4] geprüft. Als Indikator wurde Phenolphthalein (1 %ig in 70 %igem Äthanol) verwendet. Von den Balken wurden etwa 5 cm dicke Scheiben abgespalten und die von losem Material und Staub gereinigten frischen Bruchflächen unmittelbar danach mit Phenolphthalein besprüht. Die Tiefe des unverfärbten, carbonatisierten Bereiches wurde an allen 4 Seiten der Probe 1 Stunde und 24 Stunden nach dem Besprühen ausgemessen.

Die Carbonatisierungstiefen der Betone ohne Flugasche wurden an zwei Serien von Balken (vgl. Tafel 1) bestimmt, von denen jeweils eine zu Beginn, die zweite nach Abschluß der Herstellung aller Flugaschebetone betoniert wurde.

### 5. Versuchsergebnisse

#### 5.1 Druckfestigkeiten

Die Druckfestigkeiten im Betonalter von 2, 7, 28 und 365 Tagen sind in den Tafeln 7 bis 10 zusammengestellt.

## 5.2 Carbonatisierungstiefen

Die mittleren Carbonatisierungstiefen der Betone (Mittelwerte aus allen 4 Seiten der Probe) nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer sind in den Tafeln 11 und 12 angegeben.

## 6. Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

### 6.1 Vorbemerkung

Um einen unmittelbaren Vergleich mit den bereits früher veröffentlichten Ergebnissen dieser Untersuchungen zu ermöglichen, wurde die folgende Auswertung weitgehend in gleicher Weise wie in [1] und [2] vorgenommen.

### 6.2 Betone "vergleichbarer" Zusammensetzung

Unter Betonen "vergleichbarer" Zusammensetzung werden solche Betone verstanden, die sich bei sonst gleicher Mischungszusammensetzung nur durch die Anteile Zement und Flugasche unterscheiden (vgl. Tafel 2). Diese Betone können neben den hier interessierenden unterschiedlichen Carbonatisierungstiefen auch unterschiedliche Frischbetoneigenschaften und Festigkeiten aufweisen.

Die folgenden Auswertungen beziehen sich auf vergleichende Gegenüberstellungen von Carbonatisierungstiefen nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer. Den Auswertungen liegen jeweils die 24 Stunden nach dem Besprühen mit Phenolphthalein gemessenen Carbonatisierungstiefen zugrunde.

In den grafischen Darstellungen werden die beiden Hochofenzemente ihren unterschiedlichen Hüttensand-Gehalten entsprechend verkürzt als "HOZ 55" und "HOZ 65" bezeichnet.

#### a) Austausch von Zement gegen Flugasche 1:1:

Die Bilder 1 und 2 zeigen Carbonatisierungstiefen von Betonen, in denen 30 bzw. 60 kg/m<sup>3</sup> Zement gegen die gleiche Menge Flugasche ausgetauscht wurden (Mischungen 02/05/07 und

03/09). Die Flugaschebetone waren nach 10 Jahren tiefer carbonatisiert. In beiden Bildern ist außerdem der Einfluß des verwendeten Zementes zu erkennen: Unter sonst gleichen Randbedingungen vergrößerten sich die Carbonatisierungstiefen mit abnehmendem Klinkergehalt des Zementes.

b) Austausch von Zement gegen die doppelte Menge Flugasche:

Wurden in Betonen aus PZ und HOZ mit mittlerem Hüttensandgehalt 30 kg Zement gegen 60 kg Flugasche ausgetauscht, vergrößerten sich die Carbonatisierungstiefen nur geringfügig, bei Beton aus HOZ mit höherem Hüttensandgehalt dagegen deutlich (Bild 3). Generell war aber auch bei einem Austausch von Zement gegen Flugasche im Massenverhältnis 1:2 der Einfluß des verwendeten Zementes auf die Carbonatisierungstiefe größer als der des Flugaschezusatzes.

c) Zusätzliche Zugabe von Flugasche:

Bild 4 zeigt einen Vergleich der Carbonatisierungstiefen der Betone 03 und 05. Die zusätzliche Zugabe von Flugasche ( $30 \text{ kg/m}^3$ ) bei unverändertem Zementgehalt ( $270 \text{ kg/m}^3$ ) beeinflusste die Carbonatisierungstiefen insgesamt nur wenig.

d) Verschiedene Flugaschen:

Die Bilder 5 und 6 zeigen den Einfluß der verschiedenen Flugaschen auf die Carbonatisierung. In Bild 5 sind die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer für die Mischungen 05, 07 und 09 nach Flugaschen getrennt dargestellt. Dabei wurden jeweils Mittelwerte aus den Carbonatisierungstiefen der Betone aus allen 3 Zementen gebildet. Bild 6 zeigt die gleichen Versuchsergebnisse, jedoch nach Zementen getrennt. Jeder Balken stellt in diesem Fall den Mittelwert der Carbonatisierungstiefen aus den Mischungen 05, 07 und 09 dar.

Es zeigt sich, daß der Einfluß der nach verschiedenen Kriterien ausgewählten Flugaschen auf die Carbonatisierungstiefen keine Systematik erkennen läßt. Dies gilt auch, wenn die Wirkung der Flugaschen jeweils in Kombination mit einem bestimmten Zement betrachtet wird.

e) Nachbehandlung und Expositionsbedingungen:

Der Einfluß unterschiedlicher Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen ("Lagerungen") auf den Carbonatisierungsfortschritt wurde an 2 Mischungen (02 und 07, vgl. Tafel 1) untersucht. Bild 7 zeigt die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer in Abhängigkeit von den verschiedenen Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen. Bei den Flugaschebetonen handelt es sich um Mittelwerte der Betone aus allen drei untersuchten Flugaschen. Der Einfluß einer verkürzten Nachbehandlung auf die Carbonatisierungstiefen ergibt sich aus einem Vergleich der "Lagerung 2" mit der "Lagerung 1". Der Einfluß unterschiedlicher Exposition bei gleicher Wasserlagerung geht aus einem Vergleich der "Lagerungen 1" und "3" hervor. Mit zunehmender Nachbehandlungsdauer in der Lagerung im Freien unter Dach verringern sich die Carbonatisierungstiefen in allen untersuchten Betonen etwa im gleichen Verhältnis, d. h., unterschiedliche Nachbehandlungsdauern und Expositionsbedingungen verändern das generelle Niveau der Carbonatisierungstiefen, nicht aber die grundsätzliche Wirkung der anderen Einflußgrößen.

### 6.3 Betone gleicher Druckfestigkeit

Untersucht wurden Betone mit vorgegebenen festen Mischungsverhältnissen (vgl. Tafel 2). Diese Betone unterscheiden sich in ihrer Festigkeit. Unter "Betonen gleicher Druckfestigkeit" wird daher eine in Bezug auf  $\beta_D$  vergleichende Auswertung der an diesen Betonen gewonnenen Meßergebnisse verstanden. Es handelt sich nicht um Betone, die gezielt mit gleicher Festigkeit hergestellt wurden.

In den Bildern 8 bis 19 sind die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer (Meßwerte 24 Stunden nach dem Aufsprühen der Indikator-Lösung) in Abhängigkeit von den Betondruckfestigkeiten im Betonalter von 2, 7, 28 Tagen und 1 Jahr - getrennt für die verschiedenen Lagerungen - dargestellt. Sie zeigen zunächst in allen Fällen den bekannten qualitativen Sachverhalt, daß die Carbonatisierungstiefen von Betonen geringerer Betondruckfestigkeiten tendenziell größer sind als diejenigen von Betonen hoher Druckfestigkeit. Darüber hinaus ist zu erkennen, daß der Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Carbonatisierungstiefe mit zunehmendem Bezugsalter der Betondruckfestigkeit ungenauer wird.

In [1] und [5] war gezeigt worden, daß sich die Carbonatisierungstiefen von unterschiedlich zusammengesetzten Betonen gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit besser abschätzen ließen, wenn zusätzlich zu der Betondruckfestigkeit der CaO-Gehalt des verwendeten Zementes und das Massenverhältnis von Flugasche zu Zement im Beton entsprechend Gl. (1) berücksichtigt wurden.

$$d_K = c_0 + \frac{1}{\beta_{D28}} \left[ c_1 + \frac{c_2}{CaO_z-46} + c_3 \frac{f}{z} \right] \quad (1)$$

In Betonoberflächen, die ständig der Luft ausgesetzt sind, dringt die Carbonatisierungsfront über längere Zeiträume etwa mit der Quadratwurzel aus der Zeit vor (vgl. Bild 25). Unter Berücksichtigung dieser Gesetzmäßigkeit wurden nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer für jede untersuchte Lagerungsart Regressionsrechnungen mit den Ansätzen entsprechend Gl. (2) und (3) durchgeführt.

$$d_K = c_0 + \frac{c_1}{\beta_{D28}} \cdot \sqrt{t} \quad (2)$$

$$d_K = c_0 + \frac{1}{\beta_{D28}} \left[ c_1 + \frac{c_2}{CaO_z-46} + c_3 \frac{f}{z} \right] \cdot \sqrt{t} \quad (3)$$

Die Datenfelder umfaßten in allen Fällen die nach 28, 90 und 180 Tagen sowie 1, 1,5, 2, 3, 5 und 10 Jahren gemessenen Carbonatisierungstiefen. In der nachstehenden Tabelle sind die Anzahl n der einbezogenen Meßwerte, die ermittelten Werte der Regressionskoeffizienten  $c_i$  sowie zur Beurteilung der Güte des gewählten Ansatzes das Bestimmtheitsmaß B und die Reststandardabweichung  $s_R$  zusammengestellt.

Das Bestimmtheitsmaß stellt den relativen Anteil der Summe der quadratischen Abweichungen dar, der durch den funktionalen Zusammenhang zwischen Zielgröße ( $d_K$ ) und Einflußgrößen (z.B.  $\beta_{D28}$ ) erklärt werden kann. Der unerklärte "Rest" ist auf Meßungenauigkeiten (Schwankungen im Bereich der Meßgenauigkeit) und auf die Differenz zwischen dem "wahren" und dem gewählten mathematischen Ansatz zurückzuführen.

#### Regressionsansätze und Ergebnisse

Lag	n	$c_0$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	B [%]	$s_R$ [mm]
$d_K = c_0 + \frac{c_1}{\beta_{D28}} \cdot \sqrt{t}$							
1	342	0,57	11,85	-	-	90,6	2,09
2	133	0,60	12,35	-	-	91,0	2,32
3	125	-0,27	9,15	-	-	91,7	1,50
$d_K = c_0 + \frac{1}{\beta_{D28}} \left[ c_1 + \frac{c_2}{CaO_z - 46} + c_3 \frac{f}{z} \right] \cdot \sqrt{t}$							
1	342	1,05	7,75	10,98	5,04	97,4	1,10
2	133	1,61	7,28	10,59	6,32	97,0	1,35
3	125	0,00	6,63	4,65	5,54	94,8	1,20

$d_K$  [mm]: Carbonatisierungstiefe  
 $\beta_{D28}$  [N/mm<sup>2</sup>]: Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen  
 $CaO_z$  [%]: CaO-Gehalt des Zementes  
 $f$  [kg/m<sup>3</sup>]: Flugasche-Gehalt  
 $z$  [kg/m<sup>3</sup>]: Zement-Gehalt  
 $t$  [d]: Carbonatisierungsdauer  
 $B$  [%]: Bestimmtheitsmaß  
 $s_R$  [mm]: Reststreuung

Das Bestimmtheitsmaß  $B$  kann Werte zwischen 0 und 100 % annehmen. Bestimmtheitsmaße nahe 100 % bedeuten, daß die Carbonatisierungstiefe für vorgegebene Werte der Einflußgrößen durch den gewählten Ansatz mit nur geringer Reststreuung gut geschätzt werden kann. Als Maß für die Reststreuung wurde die Reststandardabweichung der Carbonatisierungstiefe ( $s_R$ ) ermittelt.

Die Ergebnisse bestätigen die bereits früher getroffene Feststellung, daß sich die zu erwartenden Carbonatisierungstiefen besser abschätzen lassen, wenn zusätzlich zu der Betondruckfestigkeit weitere Größen, z. B. Kenngrößen der Betonzusammensetzung, hinzugezogen werden. Allerdings wird über die Betondruckfestigkeit bereits der größte Teil der zu erwartenden Carbonatisierungstiefe erfaßt.

Die berechneten Zusammenhänge zwischen Betondruckfestigkeit, verwendetem Zement sowie dem Massenverhältnis von Flugasche zu Zement und der Carbonatisierungstiefe sind in den Bildern 20 bis 22 für eine Carbonatisierungsdauer von 10 Jahren und 3 f/z-Werte grafisch dargestellt.

Im Rahmen der Zulassungsprüfungen von Flugaschezementen werden anstelle der Carbonatisierungstiefen der Betone zu einem bestimmten Zeitpunkt die gelegentlich als "Carbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$ " bezeichneten Regressionskoeffizienten  $c_1$  der Gleichung  $d_K = c_0 + c_1 \cdot \sqrt{t}$  herangezogen. Die Hilfsgröße  $v_K$  gleicht Meßungenauigkeiten einzelner Meßtermine aus und soll einen besseren Vergleich von Betonen, an denen die Carbonatisierungstiefen zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen wurden, ermöglichen.  $v_K$  wird in Abhängigkeit von der transformierten Betondruckfestigkeit  $1/\sqrt{\beta_{D7}}$  dargestellt und beurteilt.

Bild 23 zeigt eine entsprechende Auswertung der Ergebnisse dieses Forschungsauftrages. In Bild 24 sind die gleichen  $v_K$ -Werte über der transformierten Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen aufgetragen. Die Werte  $v_K$  wurden einschließlich der

bis zu 10 Jahren Carbonatisierungsdauer gemessenen Carbonatisierungstiefen berechnet. Es ist zu beachten, daß sich für  $v_K$  niedrigere Werte ergeben, wenn längere Carbonatisierungszeiten berücksichtigt werden. Zur Verdeutlichung zeigt Bild 26 die mittleren  $v_K$ -Werte aller untersuchten Betone in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer.

## 7. Zusammenfassung

In zwei früheren Forschungsarbeiten [1, 2] war über das Carbonatisierungsverhalten von Betonen mit Zusätzen von Steinkohlenflugaschen bis zu einer Carbonatisierungsdauer von 2 bzw. 5 Jahren berichtet worden. Nach 10jähriger Carbonatisierungsdauer wurden die Carbonatisierungstiefen dieser Betone erneut gemessen. Der vorliegende Bericht enthält diese ergänzenden Meßwerte in tabellarischer Form sowie eine Gegenüberstellung der Carbonatisierungstiefen von Betonen vergleichbarer Zusammensetzung und von Betonen gleicher Betondruckfestigkeit nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer. Der zeitabhängige Carbonatisierungsfortschritt wurde unter Berücksichtigung der 28-Tage-Betondruckfestigkeit, der Zementart und des Massenverhältnisses von Flugasche zu Zement mit Hilfe einer mehrfachen nichtlinearen Regressionsrechnung mit guter Näherung beschrieben. Die nach 5jähriger Carbonatisierungsdauer gefundenen Tendenzen wurden durch die Langzeit-Untersuchung bis zu 10 Jahren im wesentlichen bestätigt.

L i t e r a t u r

- [1] Wierig, H.-J., E. Scholz: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton", Mai 1985, Bezug über IRB, Stuttgart
  
- [2] Wierig, H.-J., E. Scholz: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton. I. Ergänzung", Juli 1988
  
- [3] Wierig, H.-J., E. Scholz: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Carbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Betone. II. Ergänzung", Nov. 1993
  
- [4] Measurement of hardened concrete carbonation depth. RILEM Draft Recommendation CPC-18, Matériaux et Constructions, Vol. 17 - No 102, Nov.-Dez. 1984
  
- [5] Wierig, H.-J., E. Scholz: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Carbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Betone", Juli 1986, Bezug über VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen.

## Anhang

Tafel 1

Übersicht über das Versuchsprogramm

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition									
				1 Zement			2 Zement			3 Zement			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	
02	300/0	0,60	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
03	270/0	0,67	-	x	x	x							
05	270/30	0,60	1 2 3	x	x	x							
07	240/60	0,60	1 2 3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
09	240/30	0,67	1 2 3	x	x	x							

Zement 1: PZ 35 F  
 Zement 2: HOZ 35 L  
 Zement 3: HOZ 35 L - NW/HS

Flugasche 1: geringe Feinheit  
 Flugasche 2: große Feinheit  
 Flugasche 3: ungünstiges Carbonatisierungs-  
 verhalten vermutet

Lagerung 1: 2d Form, 5d Wasser, > 7d Klima 20°C/65 % r.Lf.  
 Lagerung 2: 2d Form, 1d Wasser, > 3d Klima 20°C/65 % r.Lf.  
 Lagerung 3: 2d Form, 5d Wasser, 21d Klima -20°C/85 % r.Lf., >28d im Fr. u. Dach

Tafel 2

Zusammensetzung der Versuchsbetone (Übersicht)

Bez.	Anteile in kg/m <sup>3</sup> *)				Massenverhältnisse		
	Zement z	Flugasche f	Zuschlag g	Wasser w	w/z	f/z	w/(z+f)
02	300	0	1860	180	0,60	0	0,60
03	270	0	1880	180	0,67	0	0,67
05	270	30	1850	180	0,67	0,11	0,60
07	240	60	1850	180	0,75	0,25	0,60
09	240	30	1880	180	0,75	0,125	0,67

\*) Werte gerundet

Tafel 3

Ergebnisse der Zementprüfungen nach DIN 1164

Eigenschaft	Prüfergebnis für Zement		
	1 PZ 35 F	2 HOZ 35 L	3 HOZ 35 L -NW/HS
Mahlfeinheit Siebrückstand > 0,2 mm in % spez.Oberfläche nach Blaine in cm <sup>2</sup> /g	0,12 2880	0,01 3550	0,02 4150
Erstarren in h : min Beginn Ende	2:22 3:00	2:53 3:35	4:02 4:54
Biegezugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> *) nach 2d 7d 28d	4,7 - 8,2	- 5,1 8,3	- 5,7 8,7
Biegezugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> **) nach 2d 7d 28d	3,3 6,6 8,7	3,2 5,1 7,9	2,0 6,4 9,0
Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> *) nach 2d 7d 28d	23,1 - 47,8	- 25,6 49,5	- 26,7 53,3
Druckfestigkeit in N/mm <sup>2</sup> **) nach 2d 7d 28d	15,4 35,2 49,0	12,6 23,0 46,0	8,1 24,7 48,7

\*) ermittelt zu Beginn des Herstellungszeitraumes der Betone

\*\*) ermittelt nach Abschluß der Herstellung der Betone

Tafel 4

Chemische und mineralogische Zusammensetzung  
der Zemente

Bestandteil	Anteil in M.-% für Zement		
	1 PZ 35 F	2 HOZ 35 L	3 HOZ 35 L -NW/HS
Glühverlust	0,64	1,06	0,84
unl. Rückstand	0,15	0,22	0,23
SiO <sub>2</sub>	20,71	28,86	29,66
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,17	6,24	7,96
TiO <sub>2</sub>	0,35	1,46	1,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,75	2,36	1,49
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24	0,56	1,05
CaO	63,10	50,35	48,21
MgO	4,16	4,95	5,18
SO <sub>3</sub>	2,85	3,21	3,24
K <sub>2</sub> O	1,13	1,13	0,92
Na <sub>2</sub> O	0,39	0,68	0,39
C <sub>3</sub> S	59	--	--
C <sub>2</sub> S	15	--	--
C <sub>3</sub> A	6	--	--
C <sub>4</sub> AF	8	--	--
Hüttensandgehalt	--	54	66

Tafel 5

Granulometrische Zusammensetzung der Flugaschen\*)

Prüfgröße	Prüfergebnis für Flugasche		
	1	2	3
Dichte in $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2,38	2,48	2,18
Kornanteil in M.-%			
< 0,02 mm	59	89	56
< 0,04 mm	78	96	73
spez.Oberfläche in $\text{cm}^2/\text{g}$	3150	5000	2800

\*) Nach Untersuchungen des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen.

Tafel 6

Chemische Zusammensetzung der Flugaschen\*)

Bestandteil	Anteil in M.-% für Flugasche		
	1	2	3
SiO <sub>2</sub>	48,1	52,3	55,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,2	28,3	26,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,4	7,76	6,67
CaO	2,88	1,65	3,06
K <sub>2</sub> O	5,60	5,85	4,75
Na <sub>2</sub> O	0,85	0,62	0,68
TiO <sub>2</sub>	1,23	1,32	1,18
MgO	1,82	1,08	1,03
PbO	0,65	0,41	0,07
ZnO	0,42	0,24	0,12
Glühverlust **)	1,35	1,94	2,91
SO <sub>3</sub> **)	0,65	0,44	0,17
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> **)	0,33	0,21	0,13

\*) Nach Untersuchungen des Instituts für Gesteins-  
hüttenkunde der RWTH Aachen.

\*\* ) Die gekennzeichneten Werte wurden nach DIN 1164,  
alle anderen Werte röntgenfluoreszenzanalytisch  
oder atomabsorptionsspektrofotometrisch bestimmt

Tafel 7

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 2 Tagen in N/mm<sup>2</sup>

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
				1 Zement			2 Zement			3 Zement		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	0,60	—	19,2 n.b.	12,9 n.b.	7,1 n.b.	19,0 n.b.	13,1 n.b.	7,5 n.b.	18,5 n.b.	10,2 n.b.	8,2 n.b.
03	270/0	0,67	—	13,7 n.b.	7,8 n.b.	5,7 n.b.	— —	— —	— —	— —	— —	— —
05	270/30	0,60	1	10,8	9,5	7,0	—	—	—	—	—	—
			2	10,3	10,3	5,2						
			3	11,7	9,8	5,9						
07	240/60	0,60	1	12,5	7,7	4,4	11,8	8,3	5,0	12,9	7,0	5,4
			2	12,6	10,5	5,2	13,5	9,7	5,8	12,2	7,5	5,0
			3	12,2	7,1	5,2	12,8	7,2	4,7	12,3	7,1	5,4
09	240/30	0,67	1	10,0	6,9	4,6	—	—	—	—	—	—
			2	11,5	7,3	4,4						
			3	10,7	5,4	5,2						

Tafel 8

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 7 Tagen in N/mm<sup>2</sup>

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
				1 Zement			2 Zement			3 Zement		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	0,60	—	33,2 n.b.	22,2 n.b.	16,2 n.b.	35,1 n.b.	26,0 n.b.	20,4 n.b.	28,2 28,3	19,0 n.b.	19,7 n.b.
03	270/0	0,67	—	23,6 n.b.	13,8 n.b.	12,9 n.b.	— —	— —	— —	— —	— —	— —
05	270/30	0,60	1	24,2	16,5	13,1	—	—	—	—	—	—
			2	23,6	18,3	11,6						
			3	23,4	17,4	15,1						
07	240/60	0,60	1	23,8	12,9	12,2	23,9	15,5	13,1	23,2	13,6	14,2
			2	22,1	17,1	11,3	25,1	19,7	12,2	22,9	13,6	13,3
			3	22,7	12,1	12,9	22,5	14,4	13,7	22,6	12,1	14,1
09	240/30	0,67	1	19,9	13,5	12,8	—	—	—	—	—	—
			2	22,3	14,4	10,5						
			3	19,7	10,8	12,3						

Tafel 9

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 28 Tagen in N/mm<sup>2</sup>

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
				1 Zement			2 Zement			3 Zement		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	0,60	—	45,6	40,1	29,1	44,4	35,8	32,0	38,8	34,6	33,0
				43,0	37,2	36,7	39,7	34,2	29,5	43,2	37,7	38,4
03	270/0	0,67	—	37,9	32,0	27,7	—	—	—	—	—	—
				n.b.	29,7	31,5	—	—	—	—	—	—
05	270/30	0,60	1	37,7	34,3	31,0	—	—	—	—	—	—
			2	38,3	34,3	27,1	—	—	—	—	—	
			3	39,7	33,3	32,3	—	—	—	—	—	
07	240/60	0,60	1	34,2	28,3	20,6	32,4	26,6	20,7	39,1	27,5	27,9
			2	37,9	36,7	28,2	37,0	31,8	22,2	42,2	29,4	23,3
			3	36,1	28,2	29,7	32,0	25,4	23,6	36,9	28,0	30,5
09	240/30	0,67	1	26,0	27,9	30,3	—	—	—	—	—	—
			2	32,2	29,1	25,0	—	—	—	—	—	
			3	27,8	25,7	26,5	—	—	—	—	—	

Tafel 10

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 1 Jahr in N/mm<sup>2</sup>

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
				1 Zement			2 Zement			3 Zement		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	0,60	—	56,9	50,1	34,0	46,5	41,6	34,0	52,4	45,9	47,6
				n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	53,6	n.b.	n.b.
03	270/0	0,67	—	43,7	39,7	33,5	—	—	—	—	—	—
				n.b.	n.b.	n.b.	—	—	—	—	—	—
05	270/30	0,60	1	45,4	43,0	37,8	—	—	—	—	—	—
			2	48,4	46,3	32,4	—	—	—	—	—	
			3	47,0	40,6	40,1	—	—	—	—	—	
07	240/60	0,60	1	42,6	38,2	26,3	41,7	31,6	24,0	50,3	37,4	35,5
			2	50,8	47,8	34,5	49,8	38,5	25,3	54,5	43,4	39,1
			3	45,1	34,7	35,3	39,2	28,4	25,7	47,6	42,2	42,6
09	240/30	0,67	1	35,7	36,3	36,5	—	—	—	—	—	—
			2	35,8	38,2	30,0	—	—	—	—	—	
			3	34,6	30,2	35,4	—	—	—	—	—	



Tafel 12

Carbonatisierungstiefen in mm nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer  
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	z/f [kg/m <sup>3</sup> ]	$\frac{w}{z+f}$	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
				1			2			1		
				Zement			Zement			Zement		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	0,60	—	10,5	16,8	27,3	14,3	15,8	27,5	9,8	16,3	18,5
				11,8	17,3	21,3	14,3	16,8	28,3	n.b.	10,5	16,8
03	270/0	0,67	—	15,3	22,5	28,0	16,8	24,3	33,0	11,0	14,8	17,3
				15,8	20,8	23,3	17,8	24,0	30,8	12,5	16,3	18,0
05	270/30	0,60	1	15,0	20,8	25,5	—	—	—	—	—	—
			2	15,3	21,8	29,8	—	—	—	—	—	—
			3	18,5	20,8	25,0	—	—	—	—	—	—
07	240/60	0,60	1	19,5	22,3	39,5	21,8	30,5	41,5	13,5	21,5	20,3
			2	18,0	21,0	33,5	18,0	21,3	38,5	14,3	20,3	24,8
			3	16,5	26,5	29,0	19,5	26,8	34,3	14,5	19,8	21,8
09	240/30	0,67	1	20,8	26,0	30,8	—	—	—	—	—	—
			2	18,3	26,5	35,0	—	—	—	—	—	—
			3	21,0	30,0	31,8	—	—	—	—	—	—

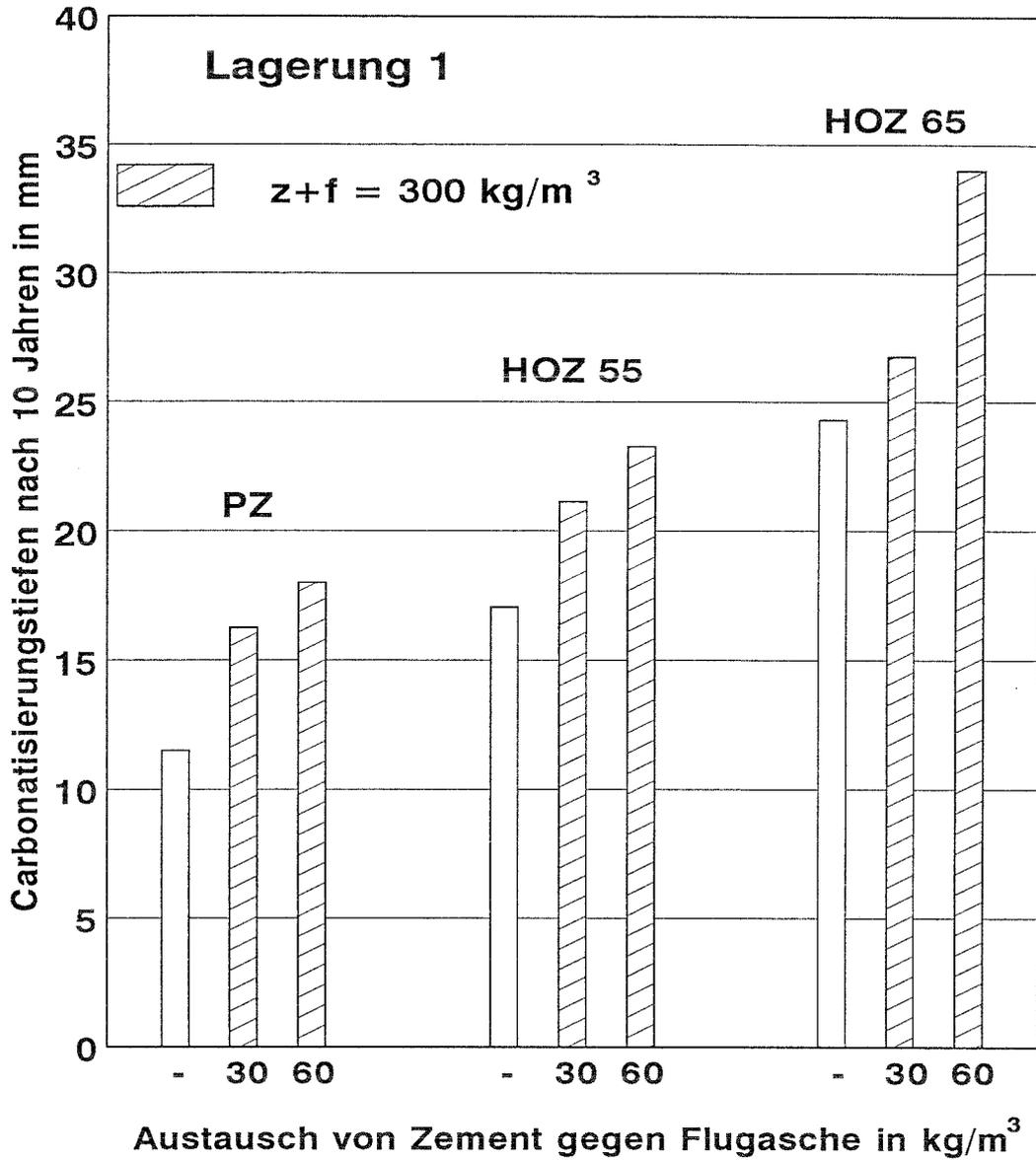


Bild 1: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche. Mischungen 02, 05, 07 (Flugaschen gemittelt).

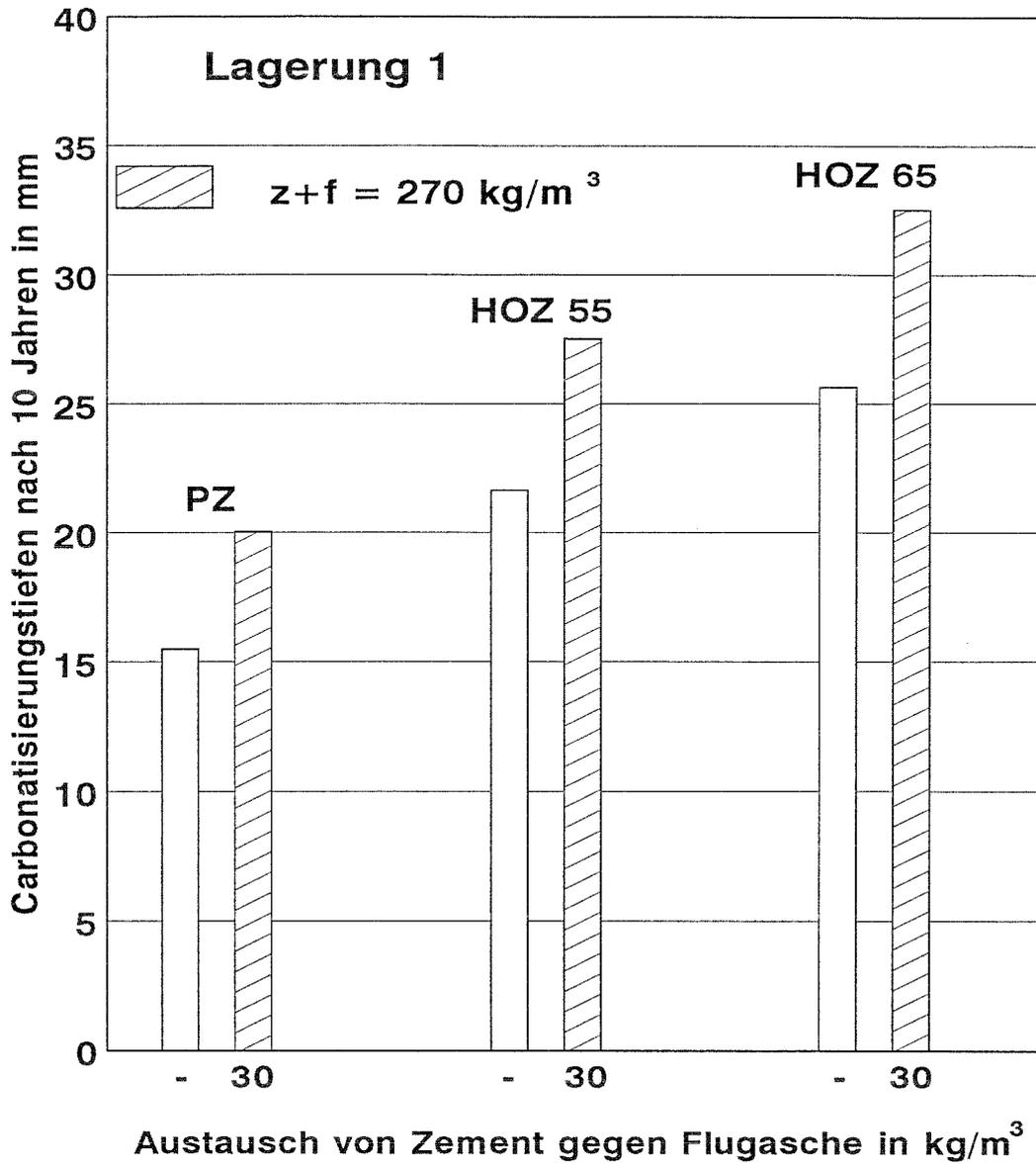


Bild 2: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche. Mischungen 03, 09 (Flugaschen gemittelt).

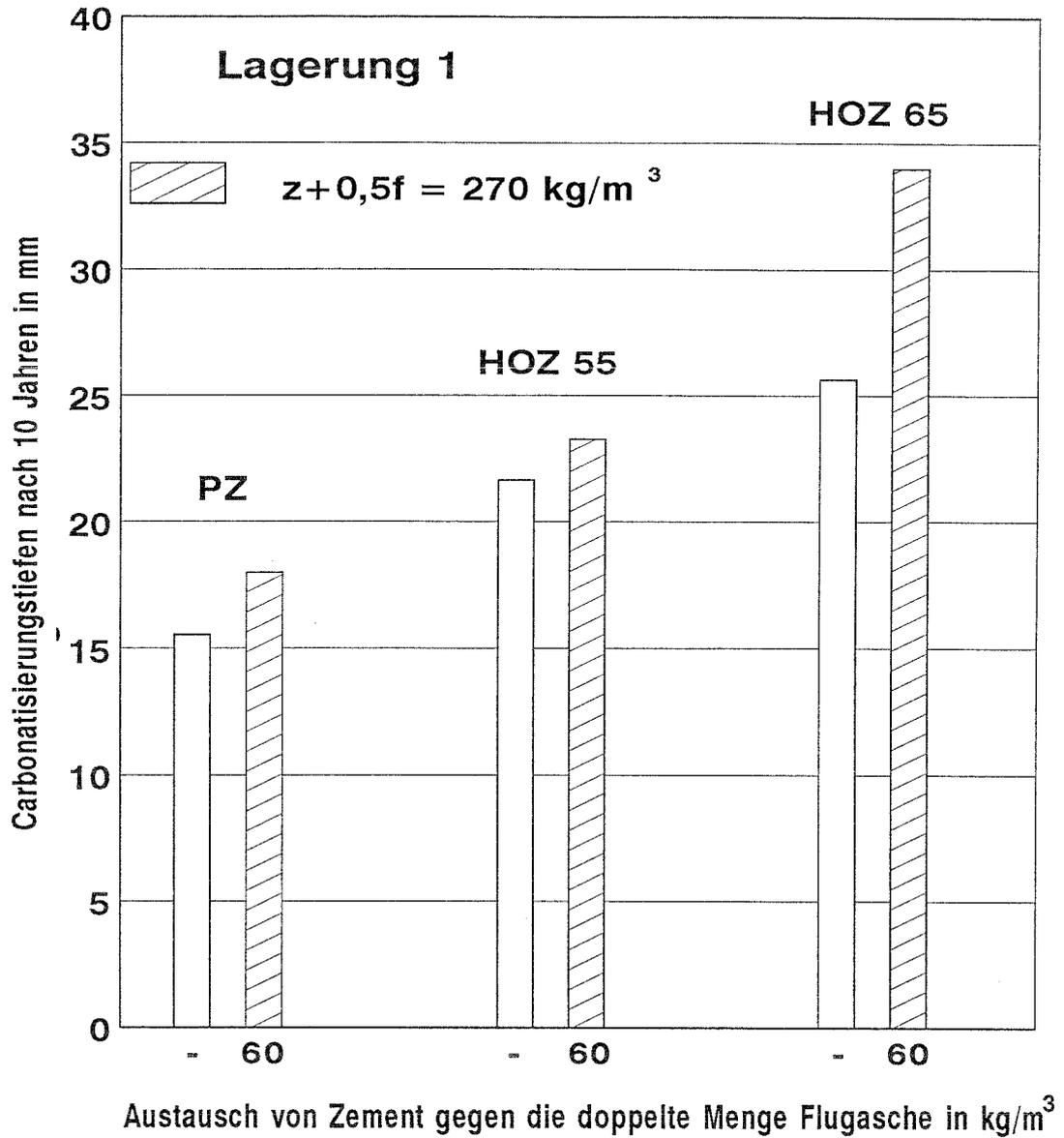


Bild 3: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren bei Austausch von Zement gegen die doppelte Menge Flugasche. Mischungen 03, 07 (Flugaschen gemittelt).

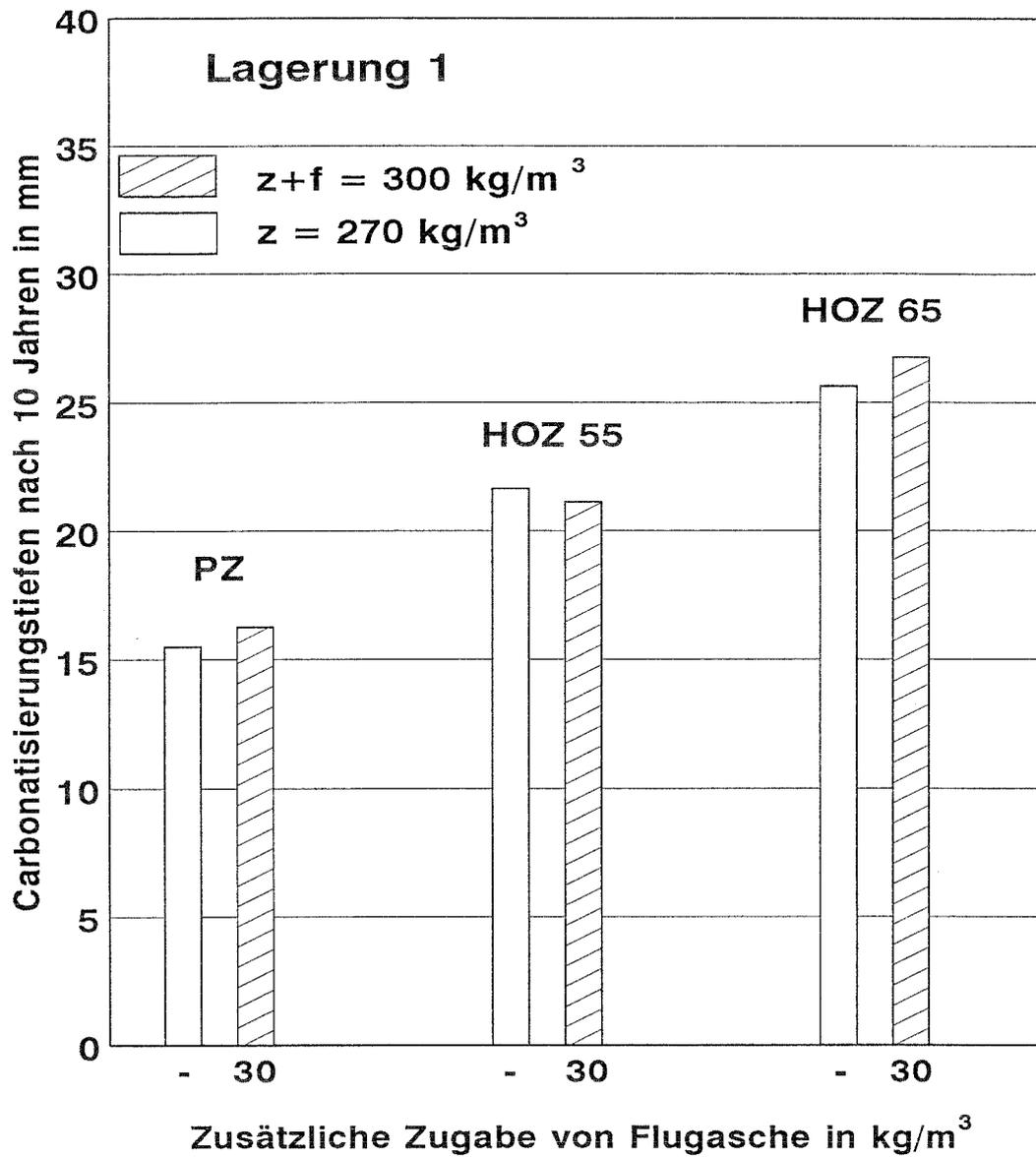


Bild 4: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren bei zusätzlicher Zugabe von Flugasche und unverändertem Zementgehalt. Mischungen 03, 05 (Flugaschen gemittelt).

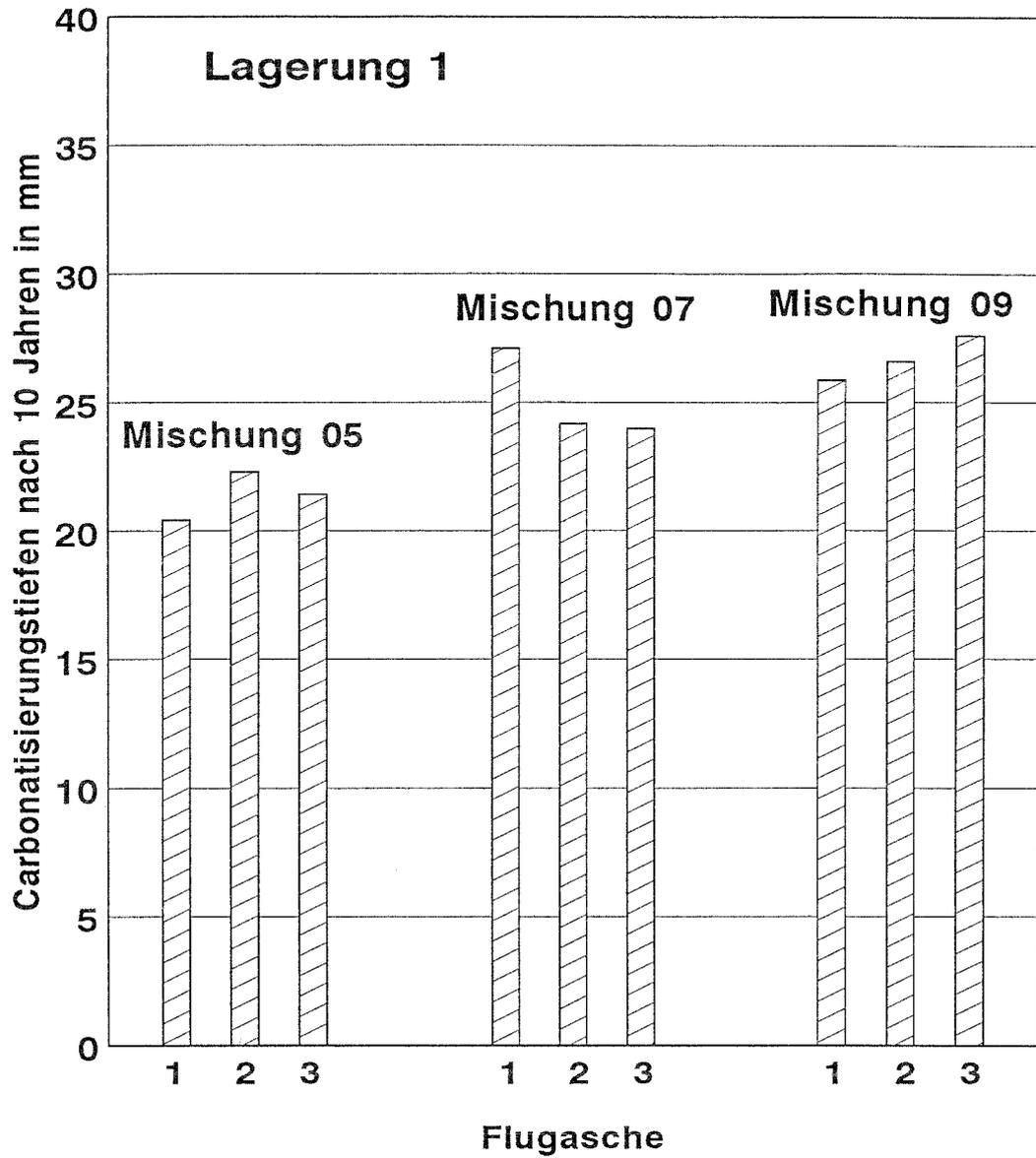


Bild 5: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 10 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Zement gemittelt).

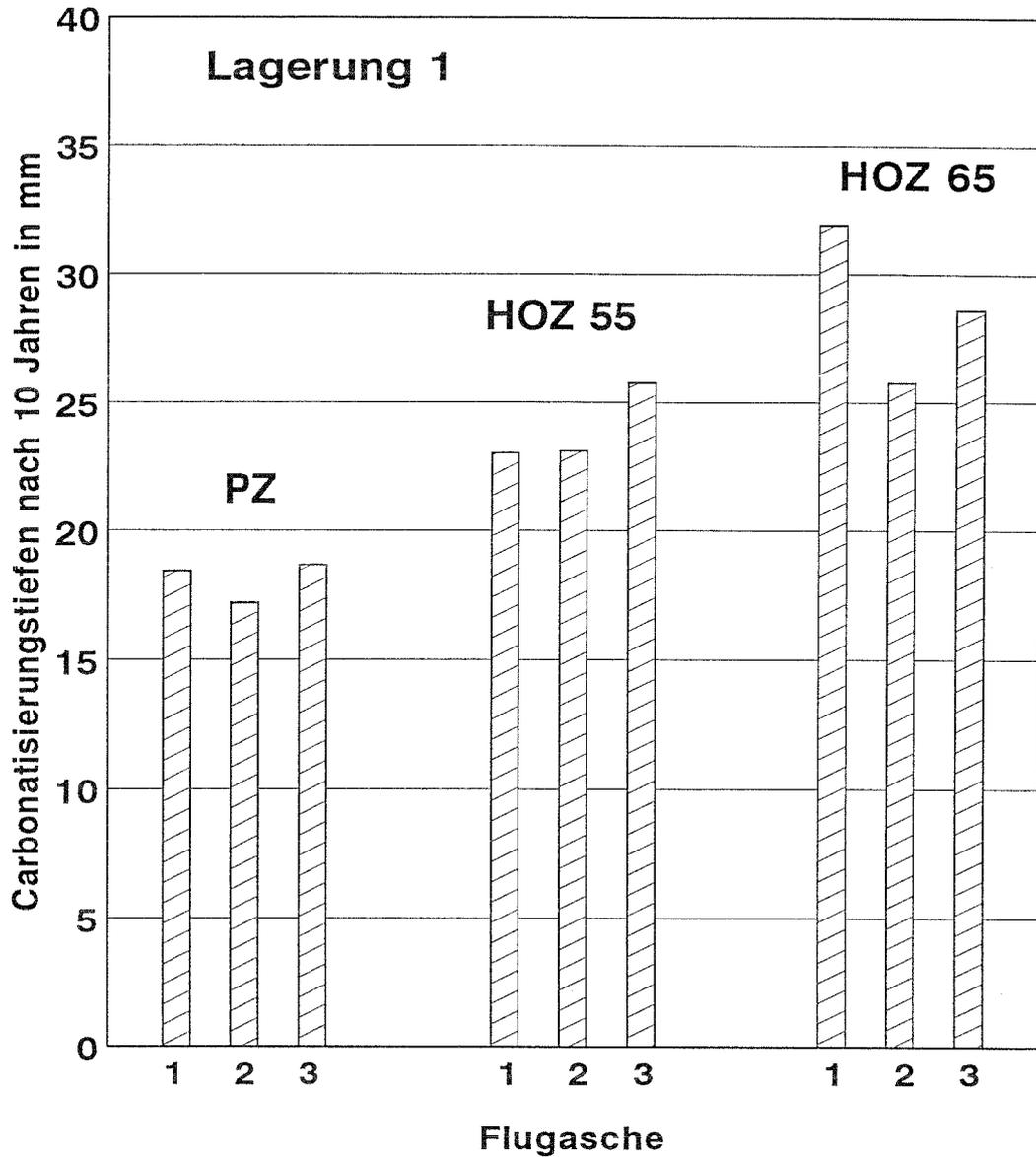


Bild 6: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 10 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Mittelwerte der Mischungen 05, 07, 09).

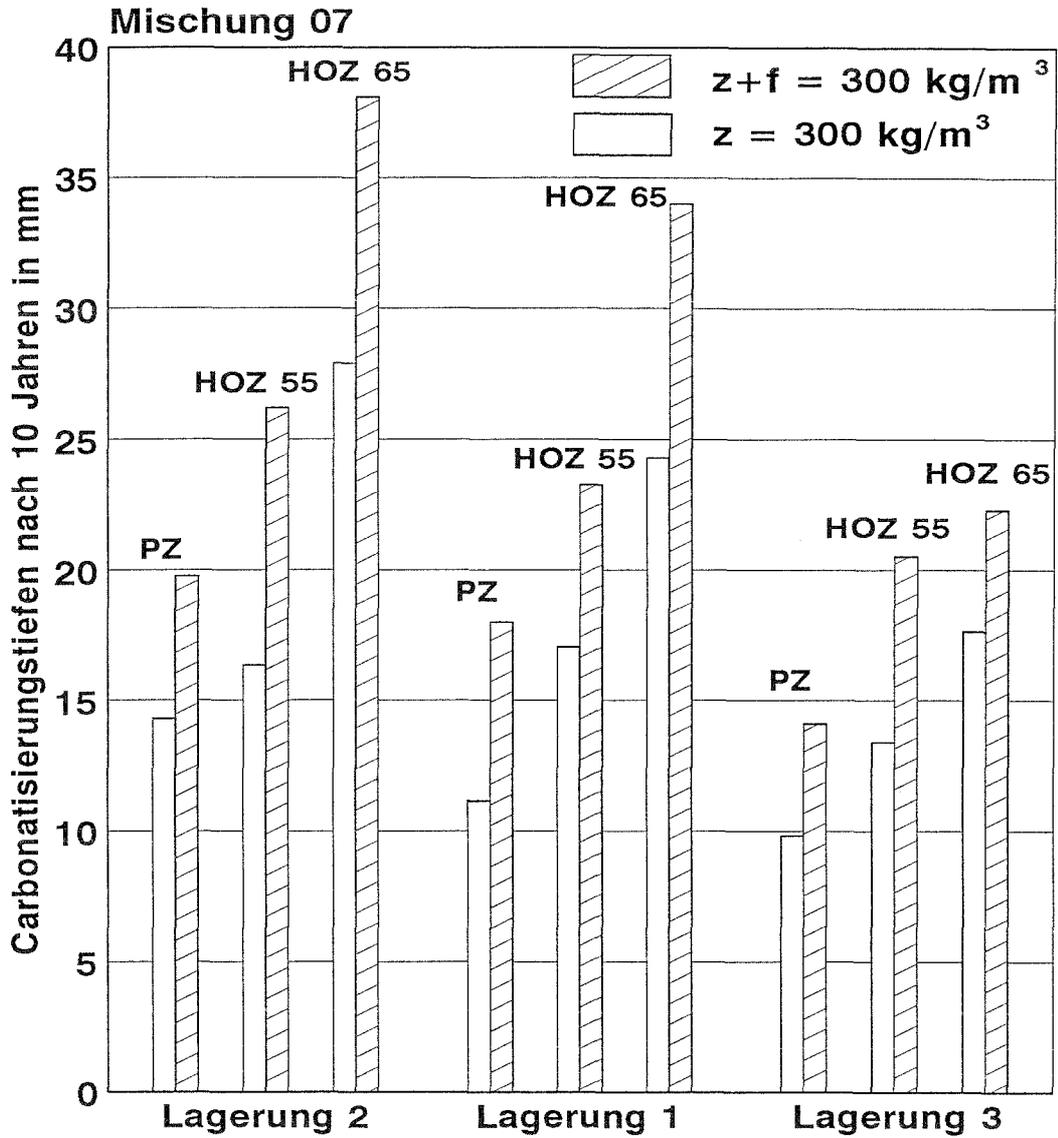


Bild 7: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren. Einfluß von Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen (Flugaschen gemittelt).

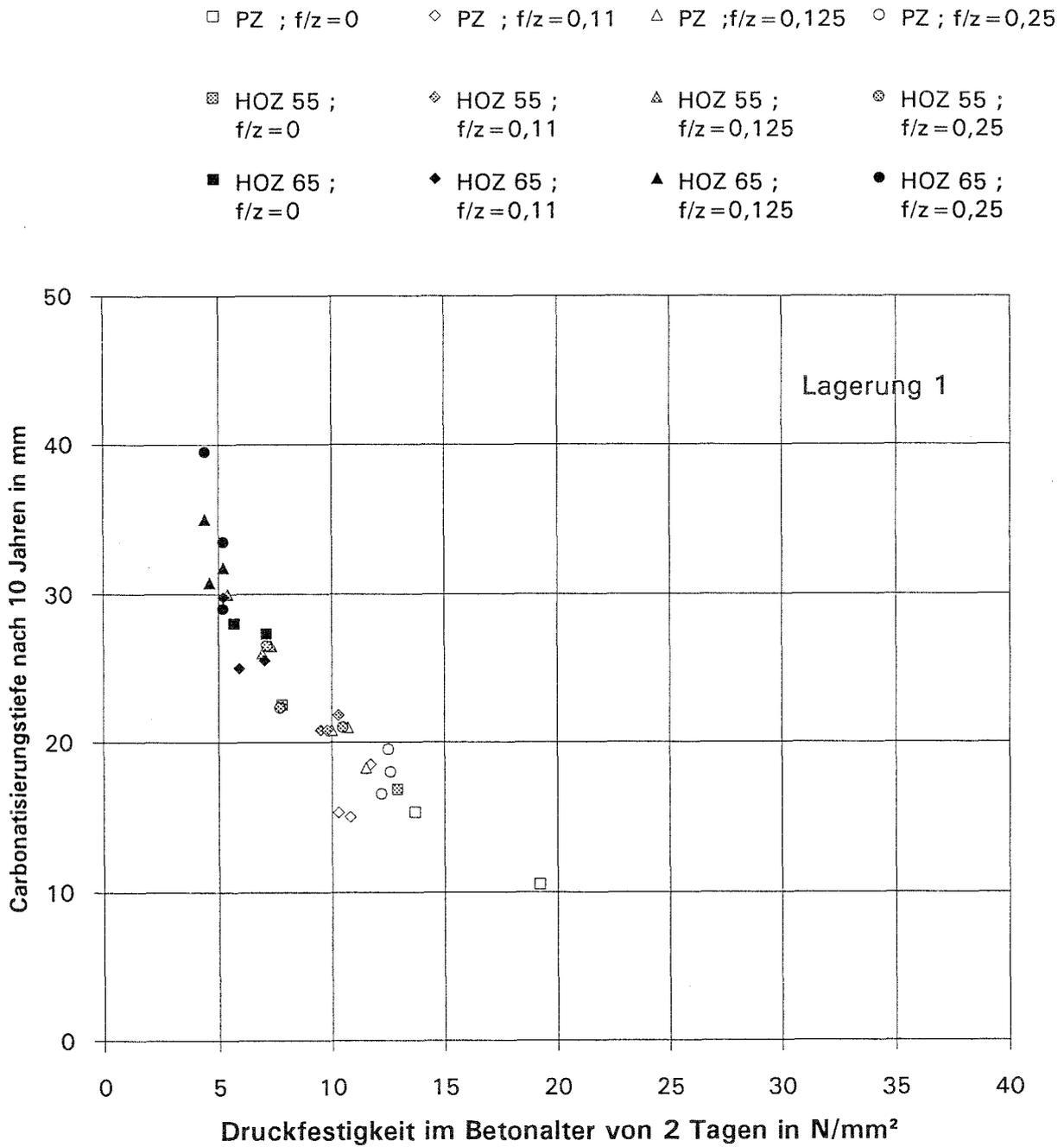


Bild 8: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 1.

- |                  |                     |                      |                     |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| □ PZ ; f/z=0     | ◇ PZ ; f/z=0,11     | △ PZ ; f/z=0,125     | ○ PZ ; f/z=0,25     |
| ⊠ HOZ 55 ; f/z=0 | ◇ HOZ 55 ; f/z=0,11 | △ HOZ 55 ; f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ; f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ; f/z=0 | ◆ HOZ 65 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ; f/z=0,125 | ● HOZ 65 ; f/z=0,25 |

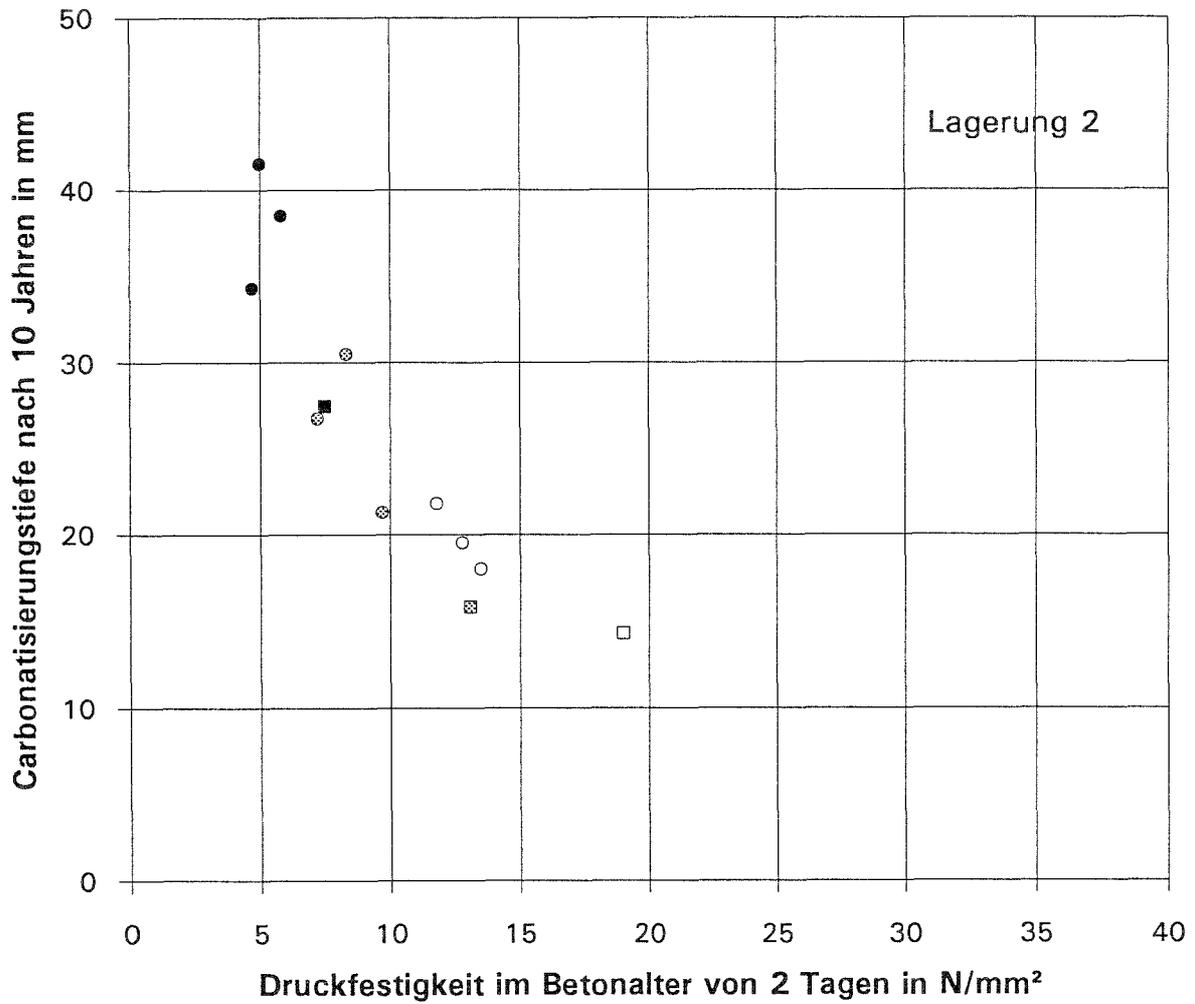


Bild 9: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 2.

- |                  |                     |                      |                     |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| □ PZ ; f/z=0     | ◇ PZ ; f/z=0,11     | △ PZ ; f/z=0,125     | ○ PZ ; f/z=0,25     |
| ▣ HOZ 55 ; f/z=0 | ◆ HOZ 55 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ; f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ; f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ; f/z=0 | ♦ HOZ 65 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ; f/z=0,125 | ● HOZ 65 ; f/z=0,25 |

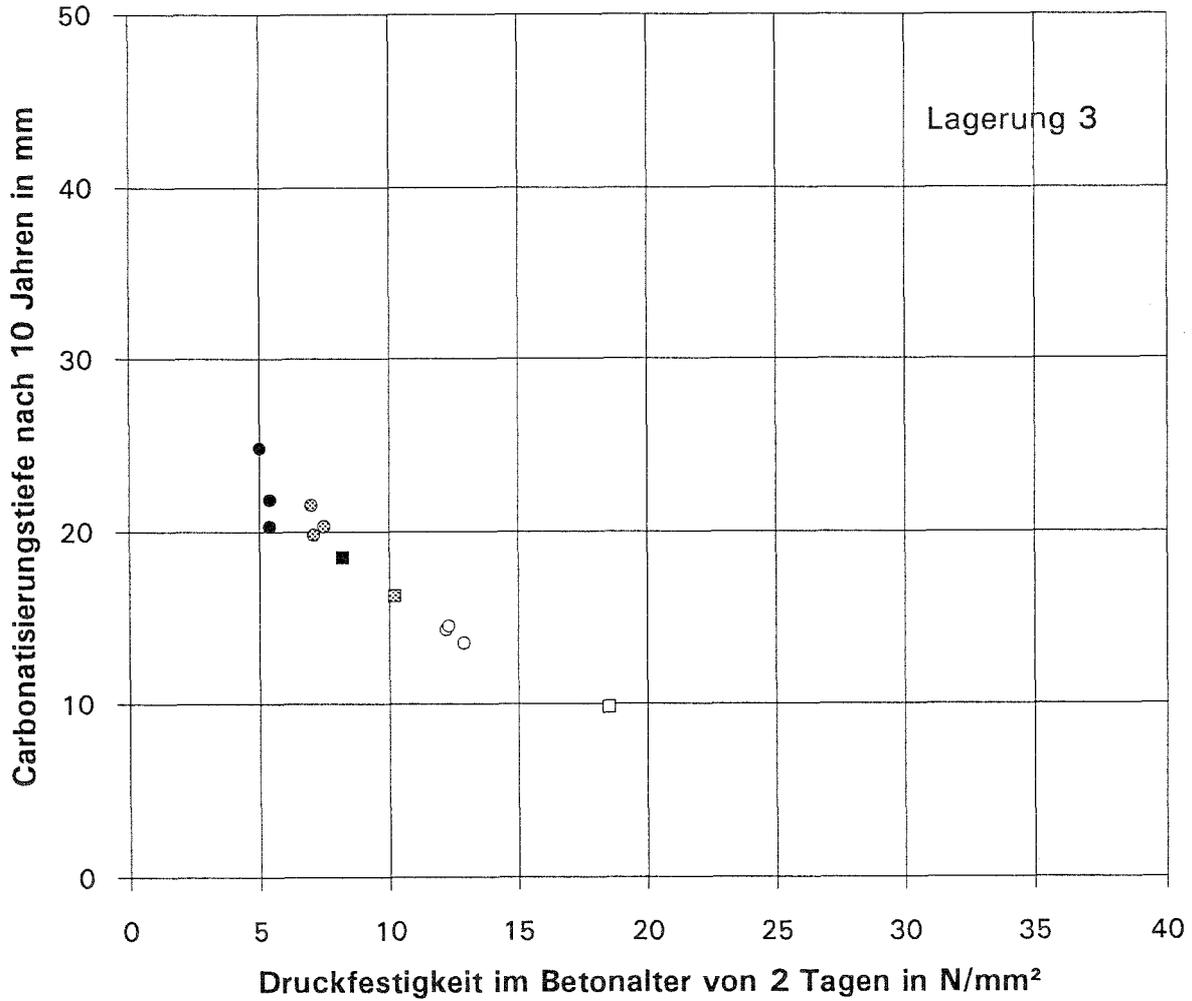


Bild 10: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 3.

- |                     |                        |                         |                        |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| □ PZ ; f/z=0        | ◇ PZ ; f/z=0,11        | △ PZ ; f/z=0,125        | ○ PZ ; f/z=0,25        |
| ▣ HOZ 55 ;<br>f/z=0 | ◊ HOZ 55 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ;<br>f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ;<br>f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ;<br>f/z=0 | ◆ HOZ 65 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ;<br>f/z=0,125 | ● HOZ 65 ;<br>f/z=0,25 |

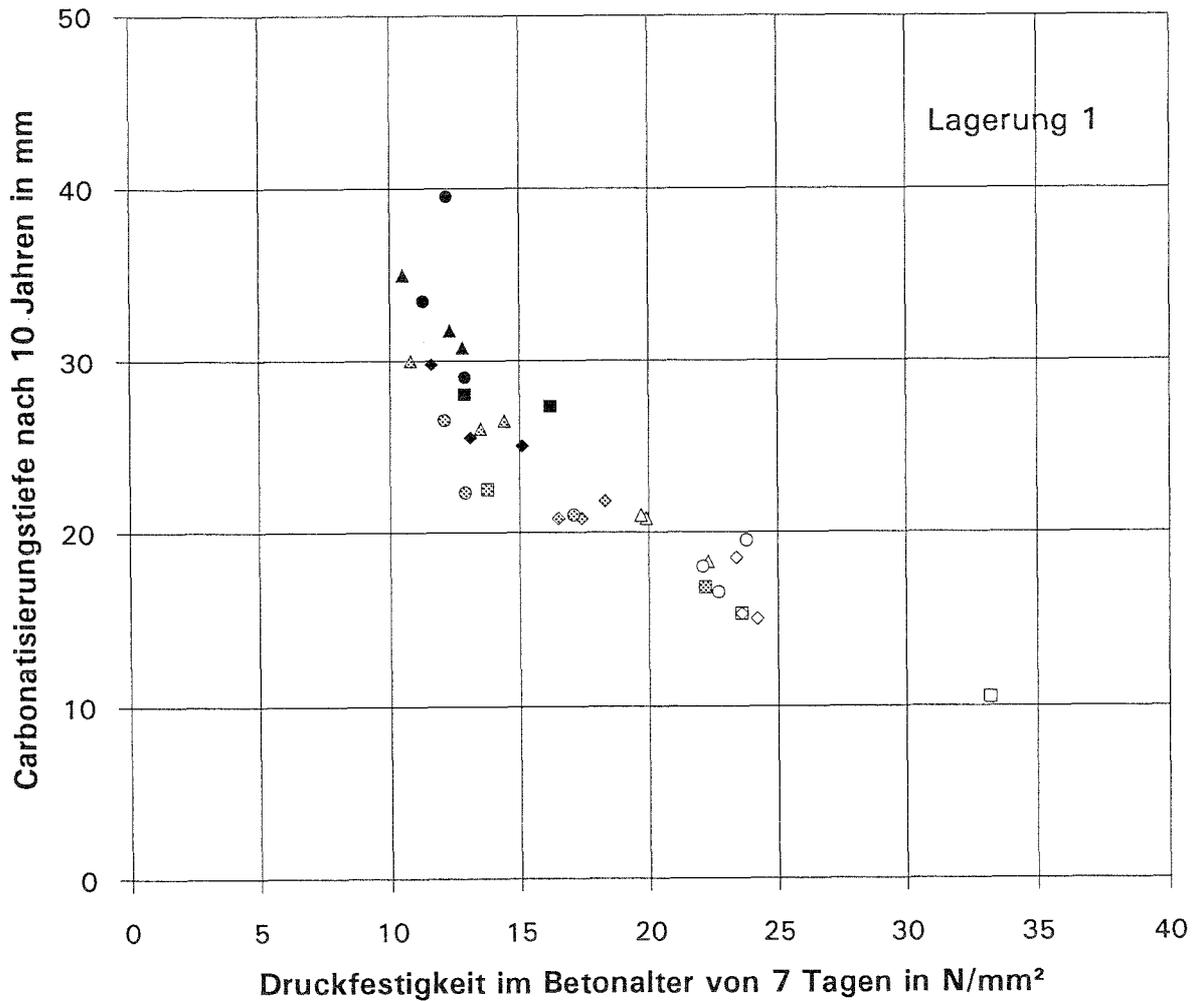


Bild 11: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 1.

- |                     |                        |                         |                        |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| □ PZ ; f/z=0        | ◇ PZ ; f/z=0,11        | △ PZ ; f/z=0,125        | ○ PZ ; f/z=0,25        |
| ⊠ HOZ 55 ;<br>f/z=0 | ◊ HOZ 55 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ;<br>f/z=0,125 | ⊙ HOZ 55 ;<br>f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ;<br>f/z=0 | ◆ HOZ 65 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ;<br>f/z=0,125 | ● HOZ 65 ;<br>f/z=0,25 |

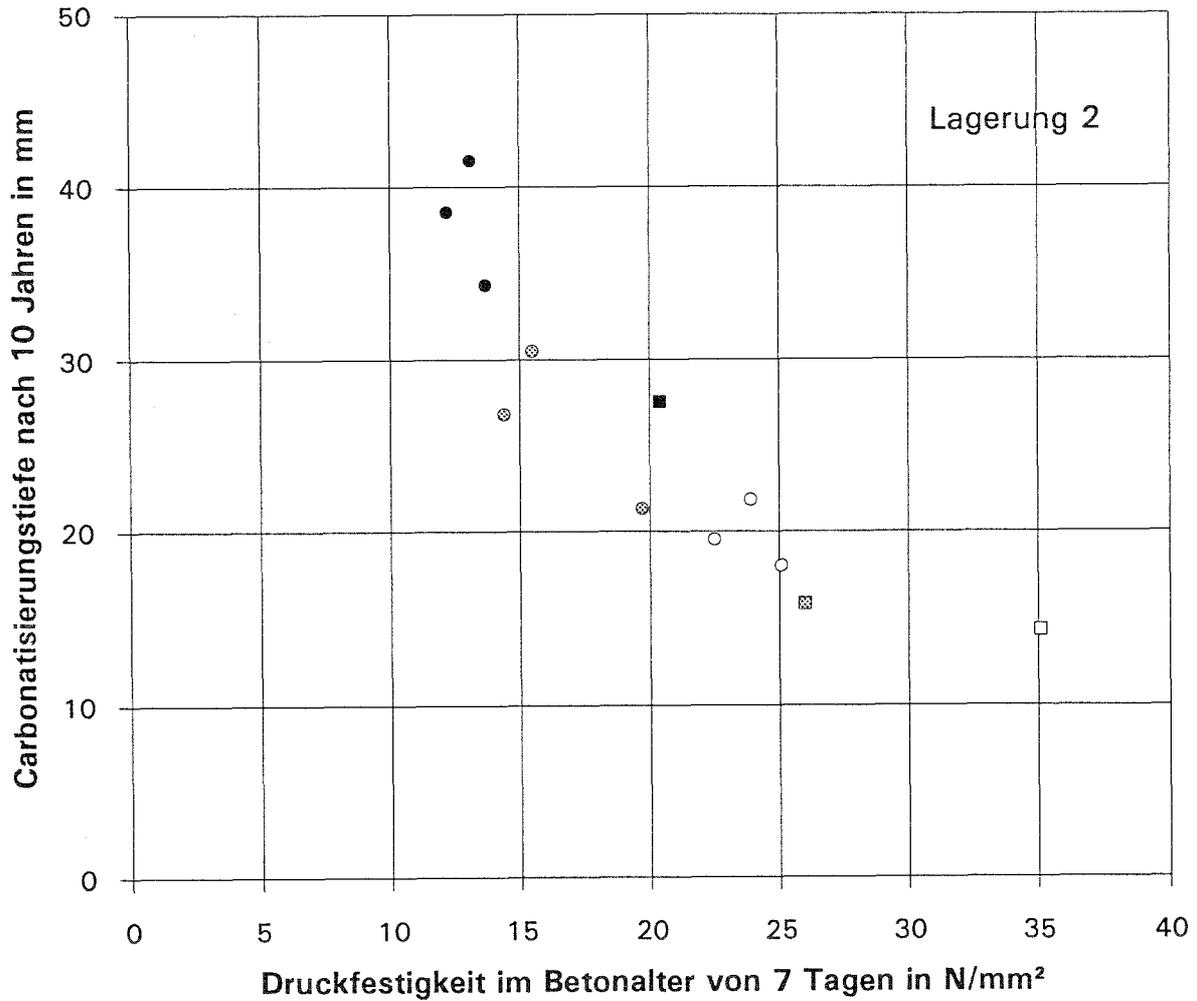


Bild 12: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 2.

- |                  |                     |                      |                     |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| □ PZ ; f/z=0     | ◇ PZ ; f/z=0,11     | △ PZ ; f/z=0,125     | ○ PZ ; f/z=0,25     |
| ⊠ HOZ 55 ; f/z=0 | ◊ HOZ 55 ; f/z=0,11 | △ HOZ 55 ; f/z=0,125 | ⊙ HOZ 55 ; f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ; f/z=0 | ◆ HOZ 65 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ; f/z=0,125 | ● HOZ 65 ; f/z=0,25 |

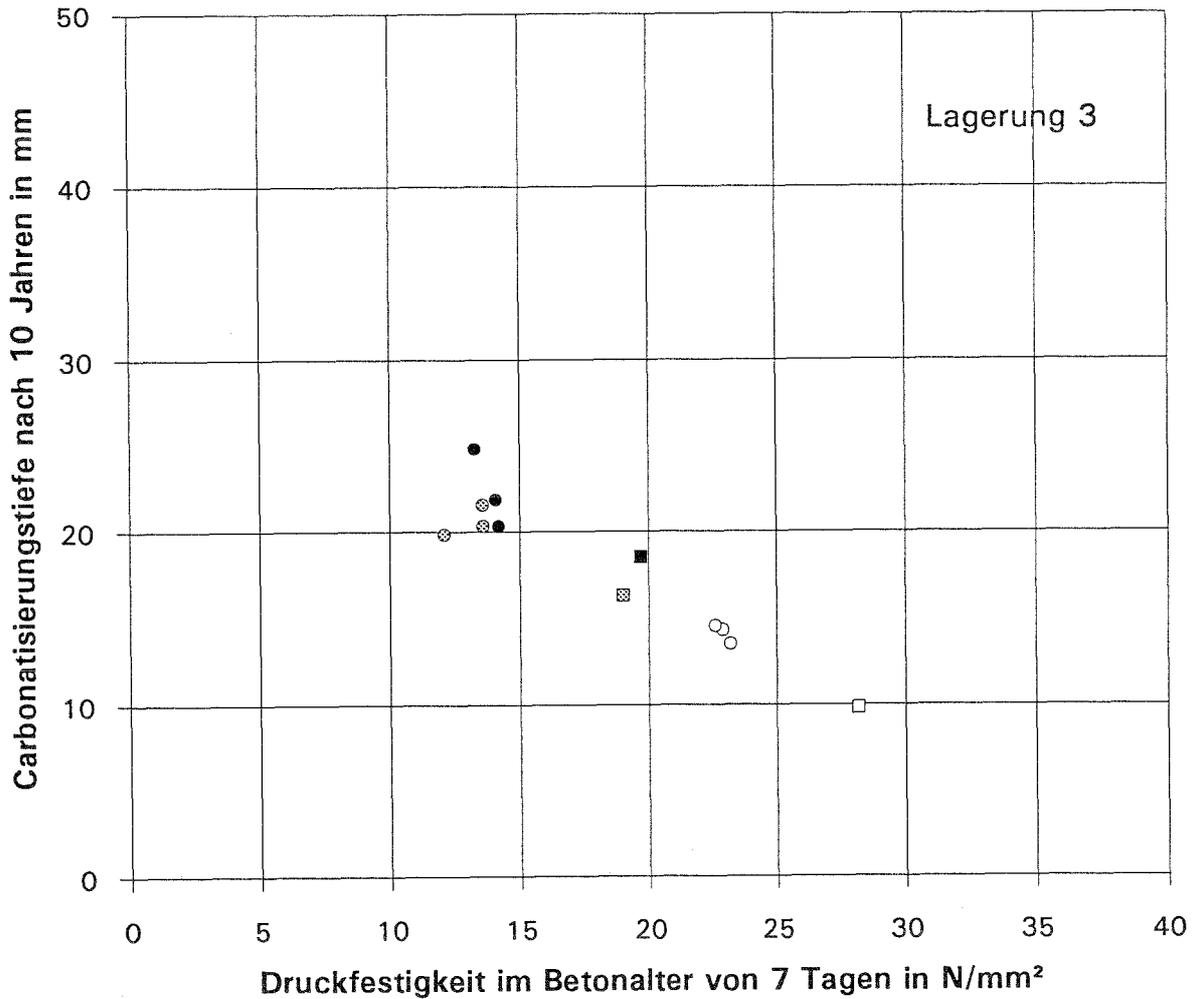


Bild 13: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 3.

- |                  |                     |                      |                     |
|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| □ PZ ; f/z=0     | ◇ PZ ; f/z=0,11     | △ PZ ; f/z=0,125     | ○ PZ ; f/z=0,25     |
| ▣ HOZ 55 ; f/z=0 | ◊ HOZ 55 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ; f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ; f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ; f/z=0 | ◆ HOZ 65 ; f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ; f/z=0,125 | ● HOZ 65 ; f/z=0,25 |

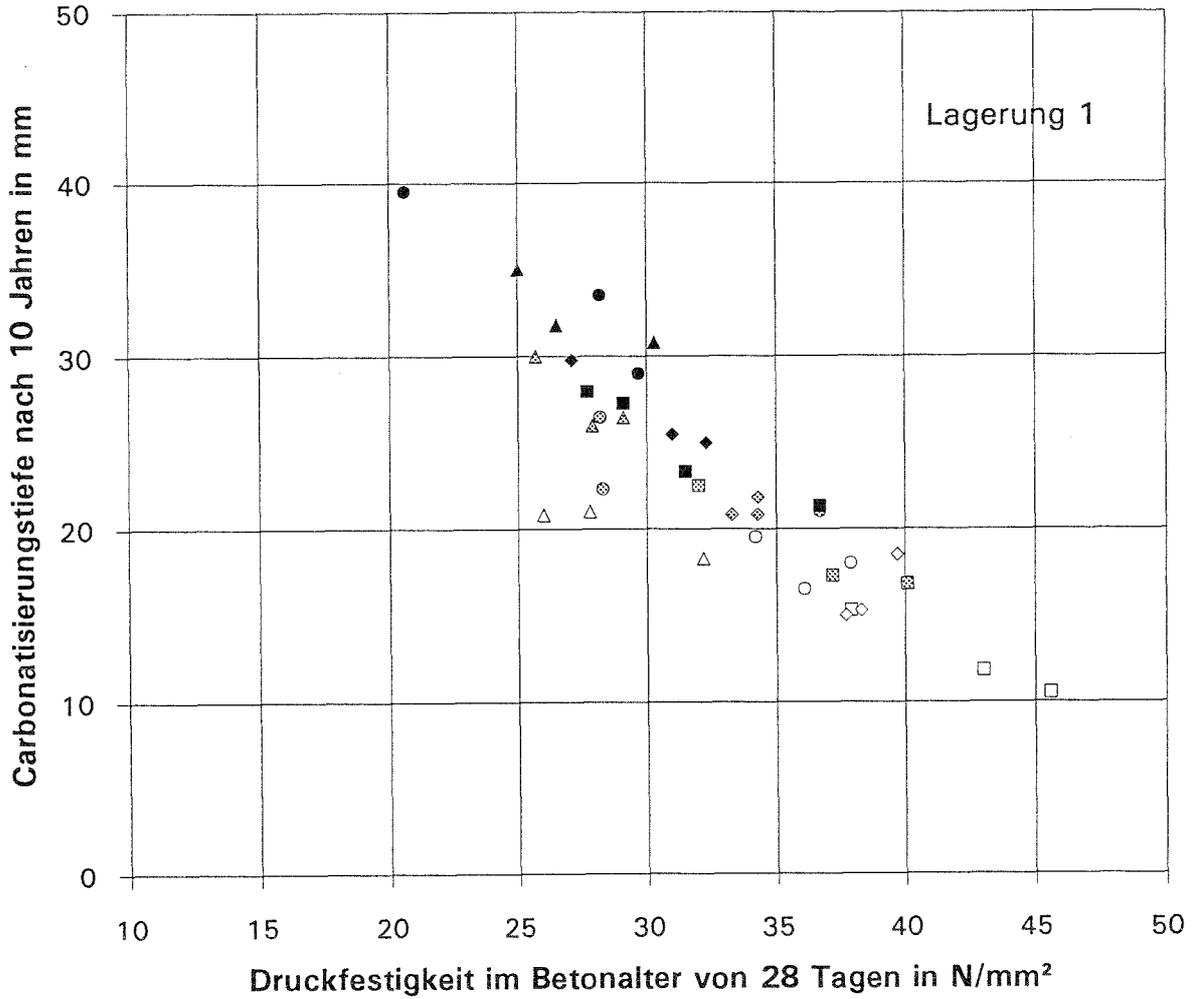


Bild 14: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 1.

- |                     |                        |                         |                        |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| □ PZ ; f/z=0        | ◇ PZ ; f/z=0,11        | △ PZ ; f/z=0,125        | ○ PZ ; f/z=0,25        |
| ▣ HOZ 55 ;<br>f/z=0 | ◊ HOZ 55 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ;<br>f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ;<br>f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ;<br>f/z=0 | ◆ HOZ 65 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ;<br>f/z=0,125 | ● HOZ 65 ;<br>f/z=0,25 |

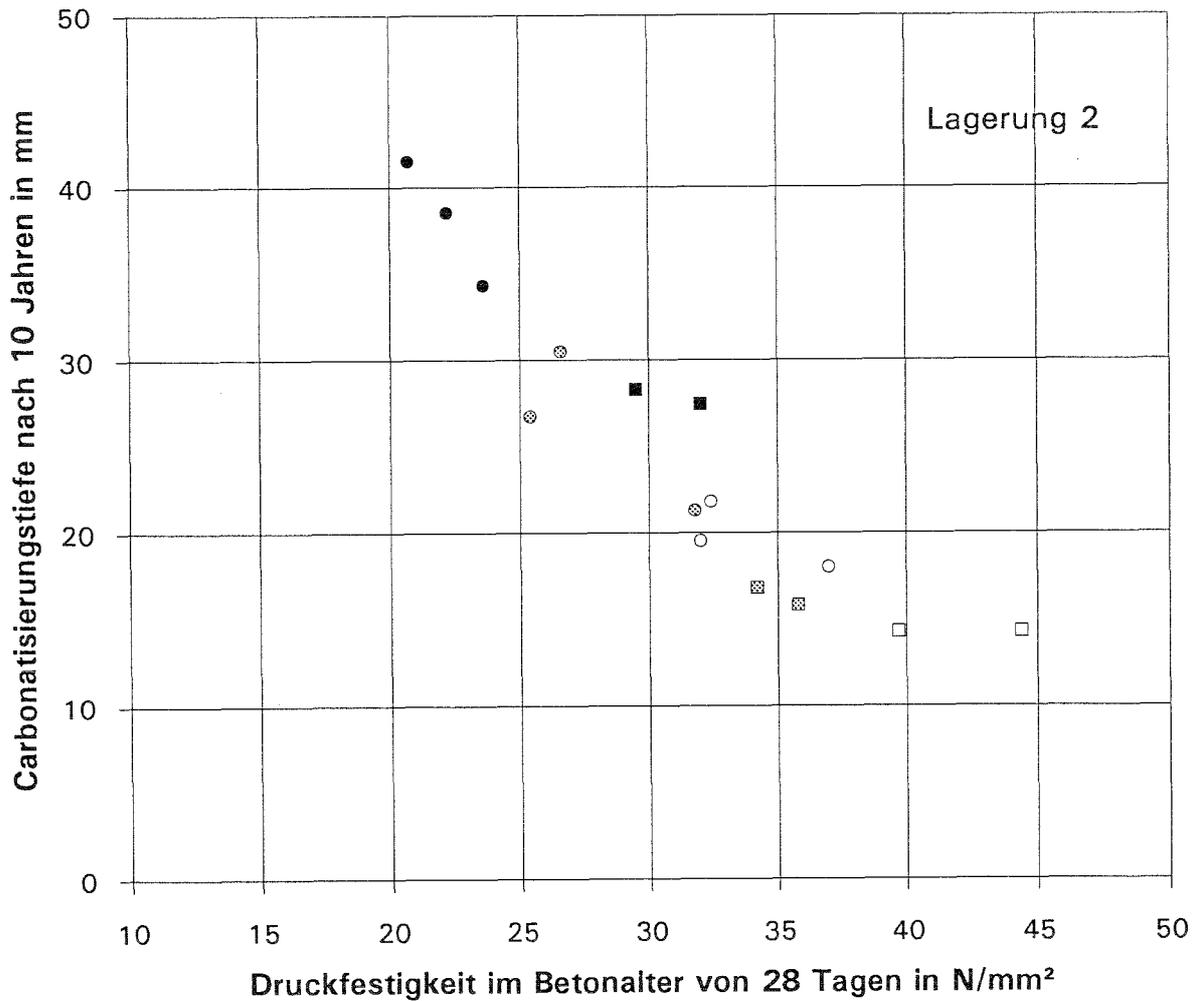


Bild 15: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 2.

- |                     |                        |                         |                        |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| □ PZ ; f/z=0        | ◇ PZ ; f/z=0,11        | △ PZ ; f/z=0,125        | ○ PZ ; f/z=0,25        |
| ▣ HOZ 55 ;<br>f/z=0 | ◊ HOZ 55 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 55 ;<br>f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ;<br>f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ;<br>f/z=0 | ◆ HOZ 65 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ;<br>f/z=0,125 | ● HOZ 65 ;<br>f/z=0,25 |

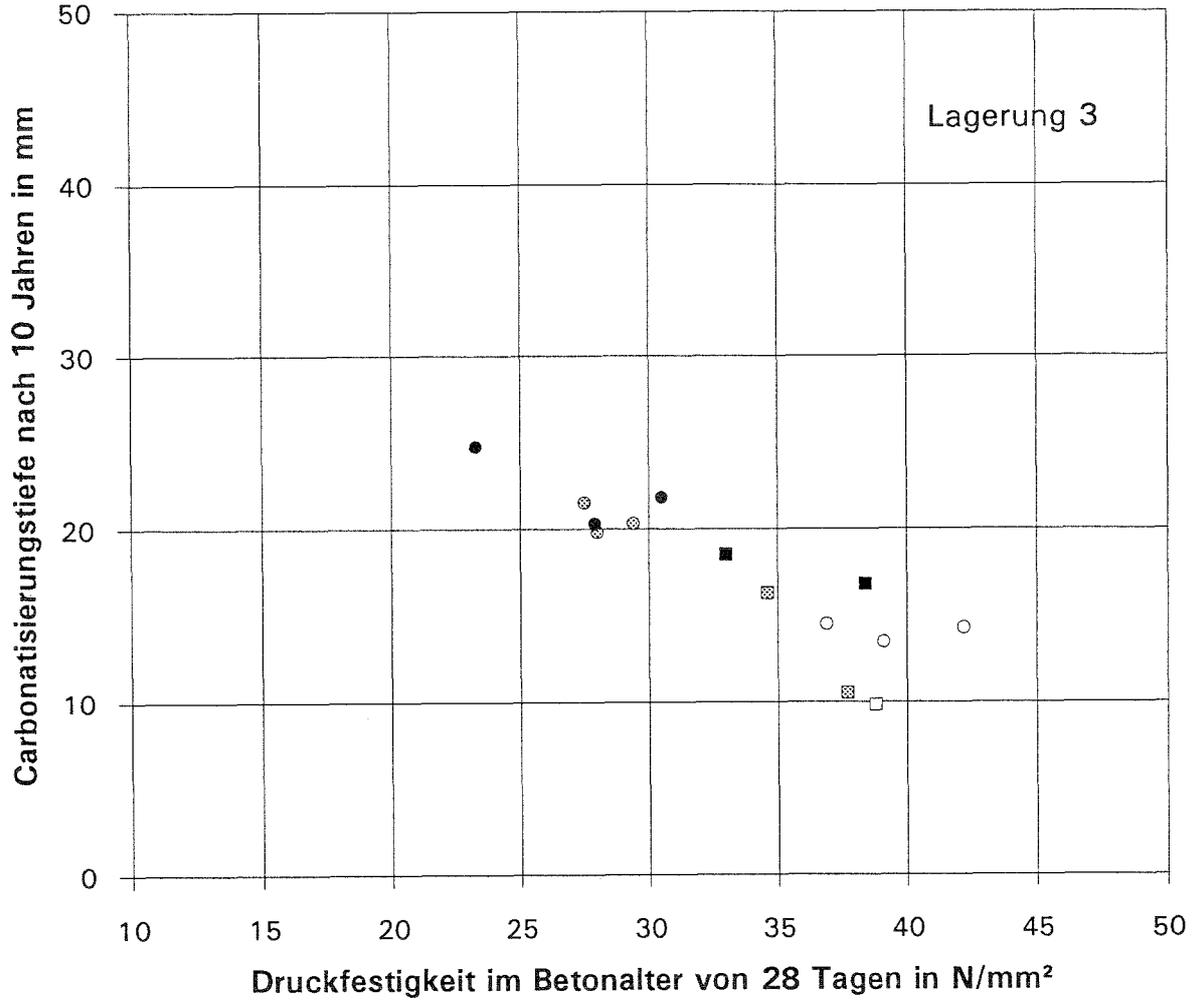


Bild 16: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 3.

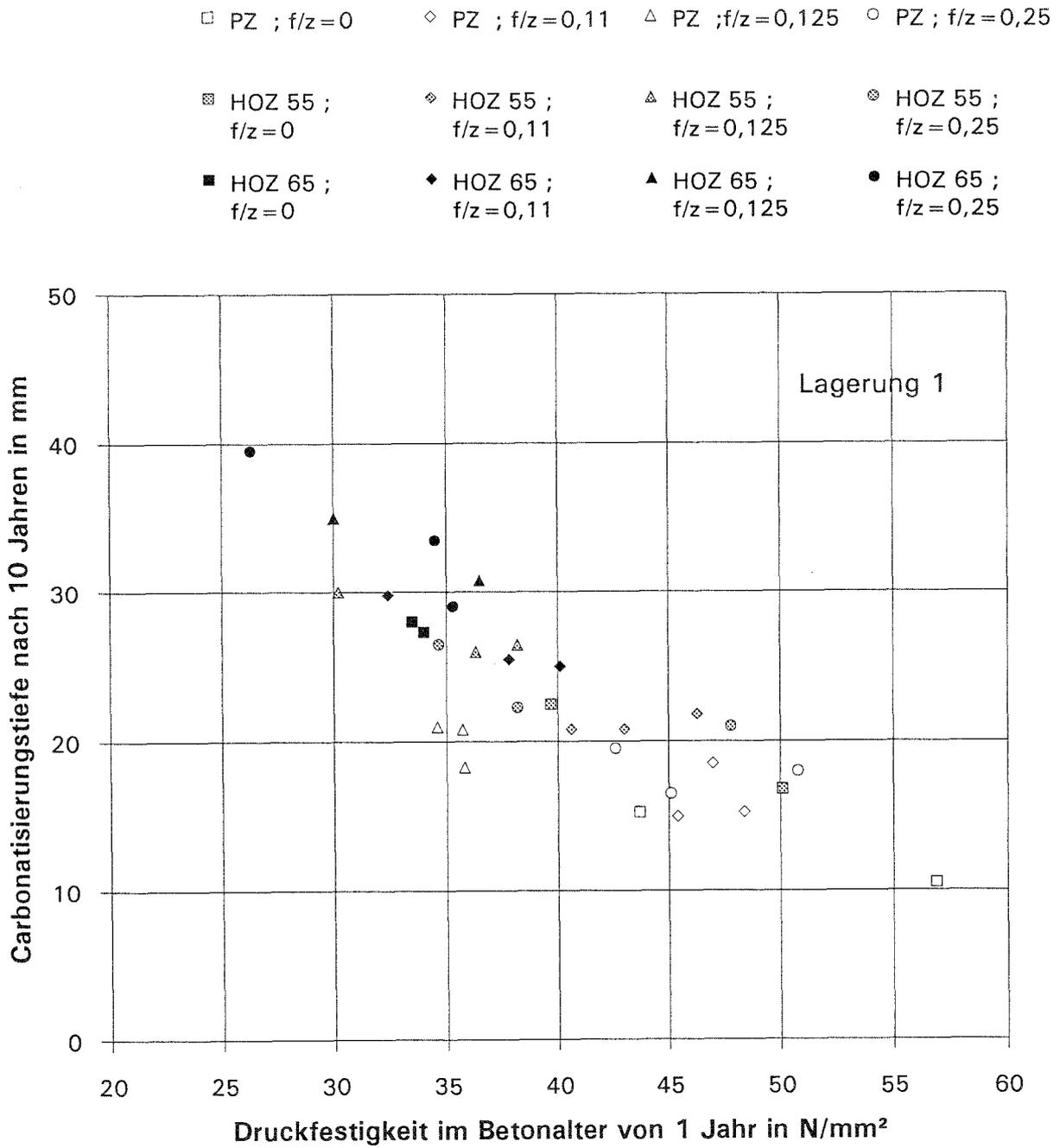


Bild 17: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 1.

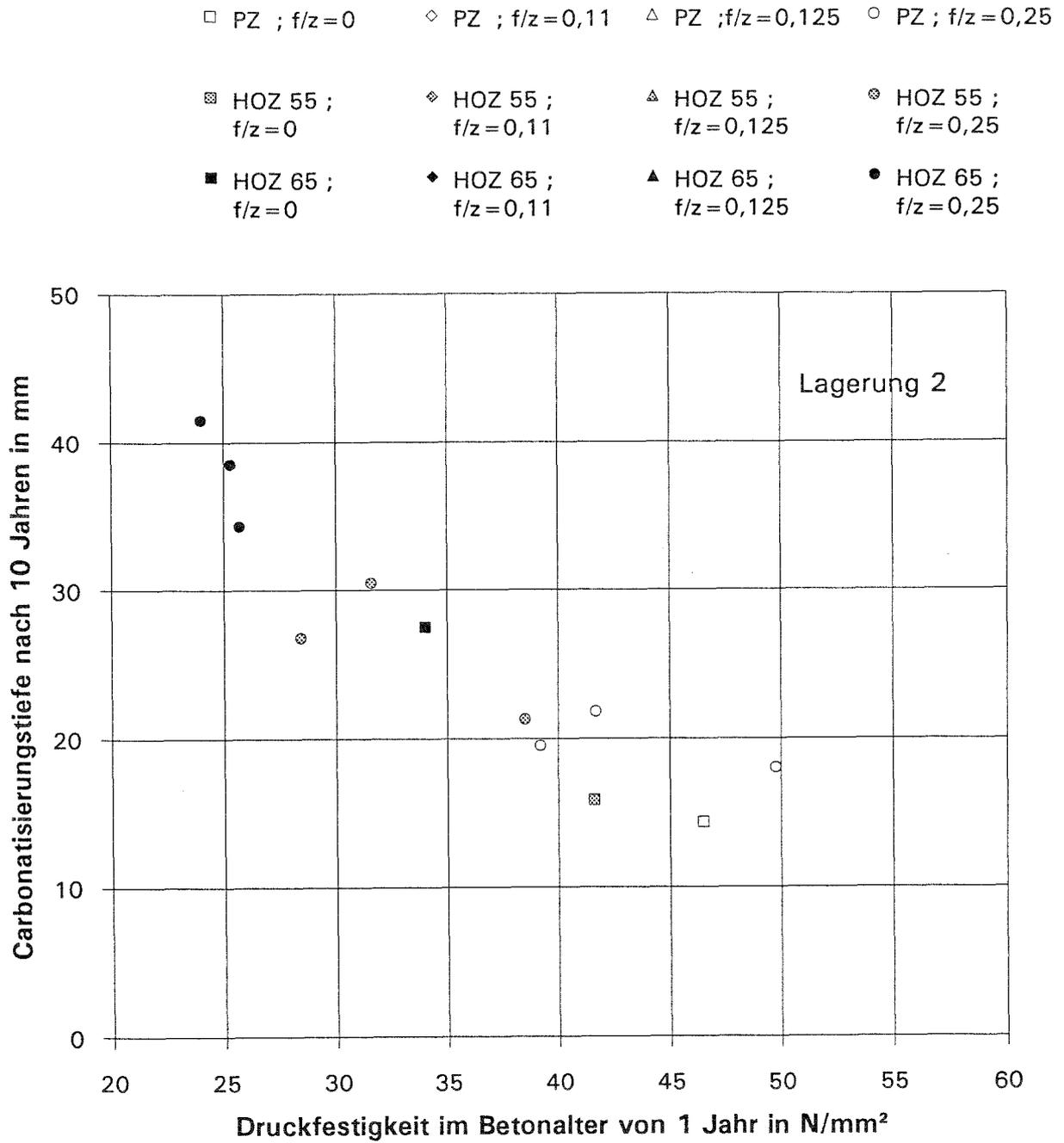


Bild 18: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 2.

- |                     |                        |                         |                        |
|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| □ PZ ; f/z=0        | ◇ PZ ; f/z=0,11        | △ PZ ; f/z=0,125        | ○ PZ ; f/z=0,25        |
| ⊠ HOZ 55 ;<br>f/z=0 | ◇ HOZ 55 ;<br>f/z=0,11 | △ HOZ 55 ;<br>f/z=0,125 | ⊗ HOZ 55 ;<br>f/z=0,25 |
| ■ HOZ 65 ;<br>f/z=0 | ◆ HOZ 65 ;<br>f/z=0,11 | ▲ HOZ 65 ;<br>f/z=0,125 | ● HOZ 65 ;<br>f/z=0,25 |

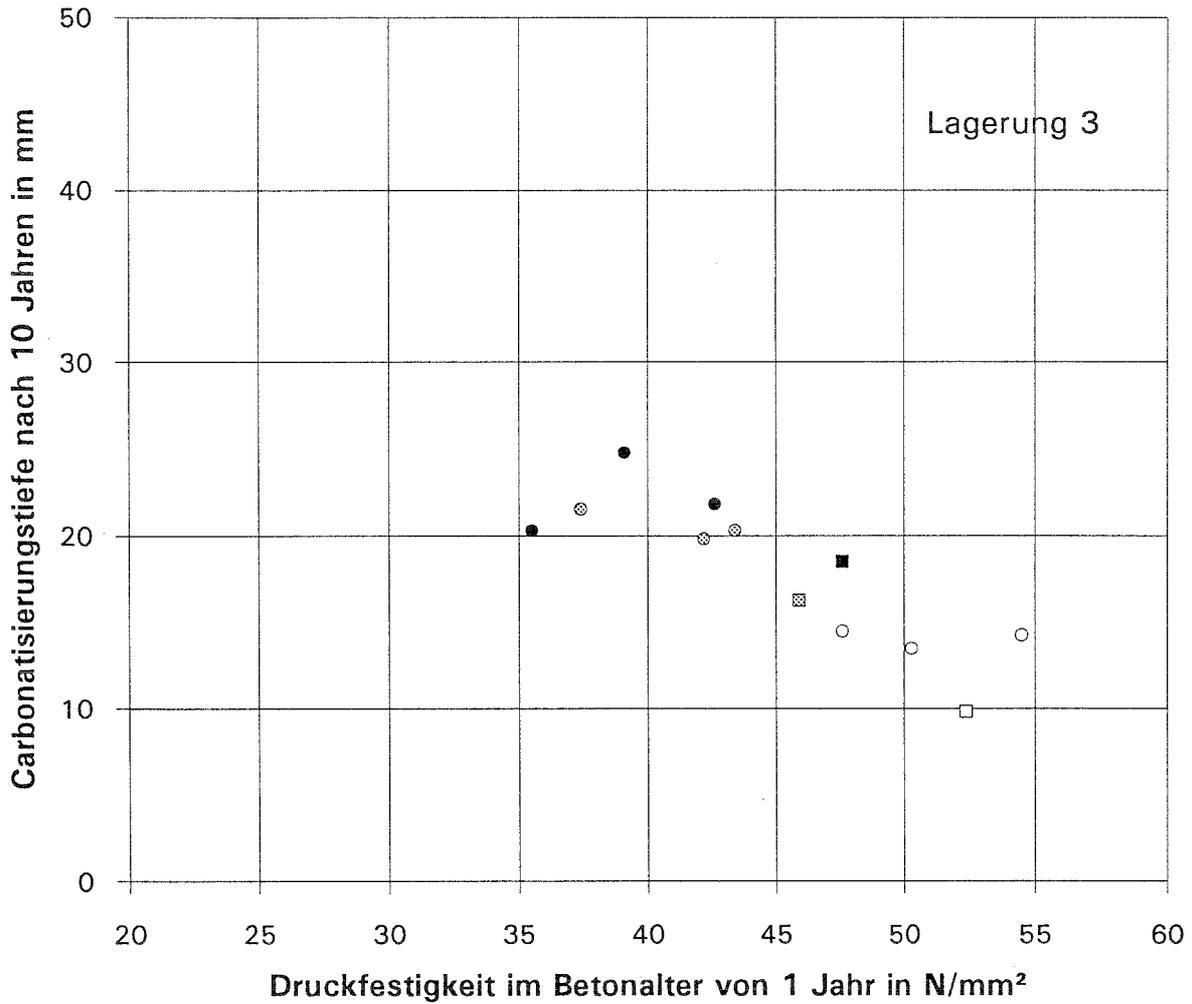


Bild 19: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 10 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 3.

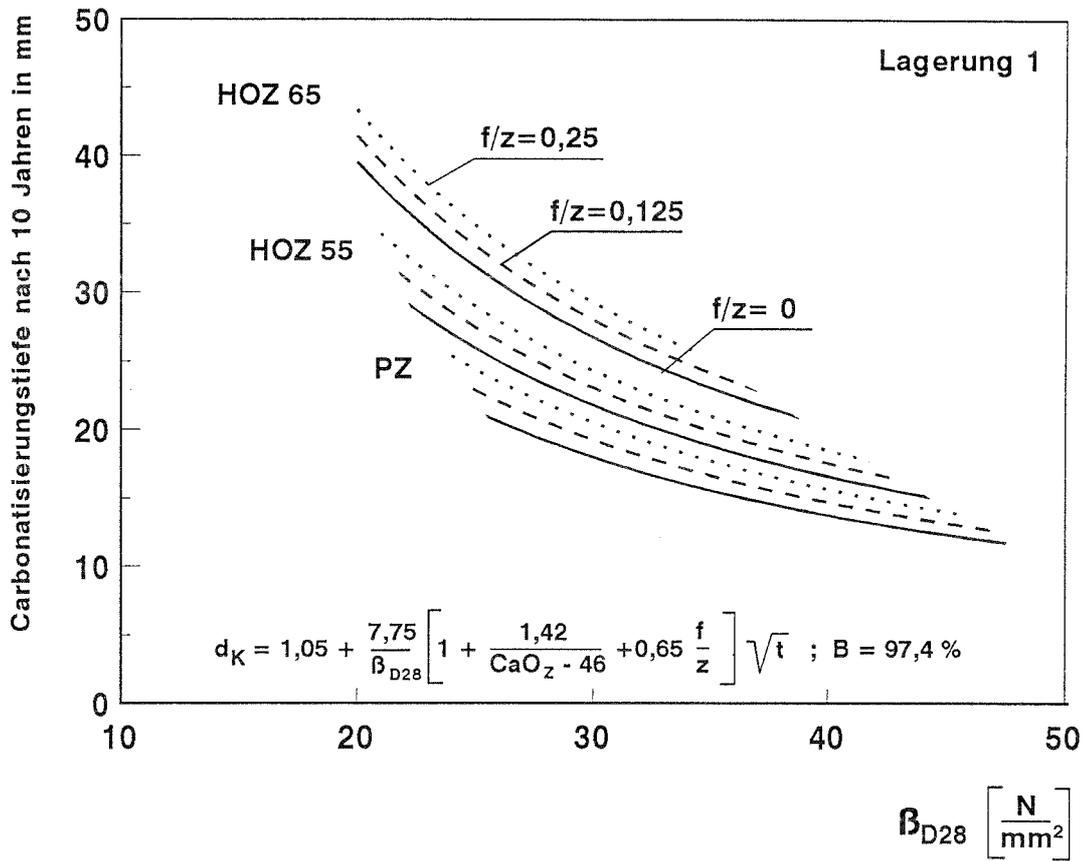


Bild 20: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1.

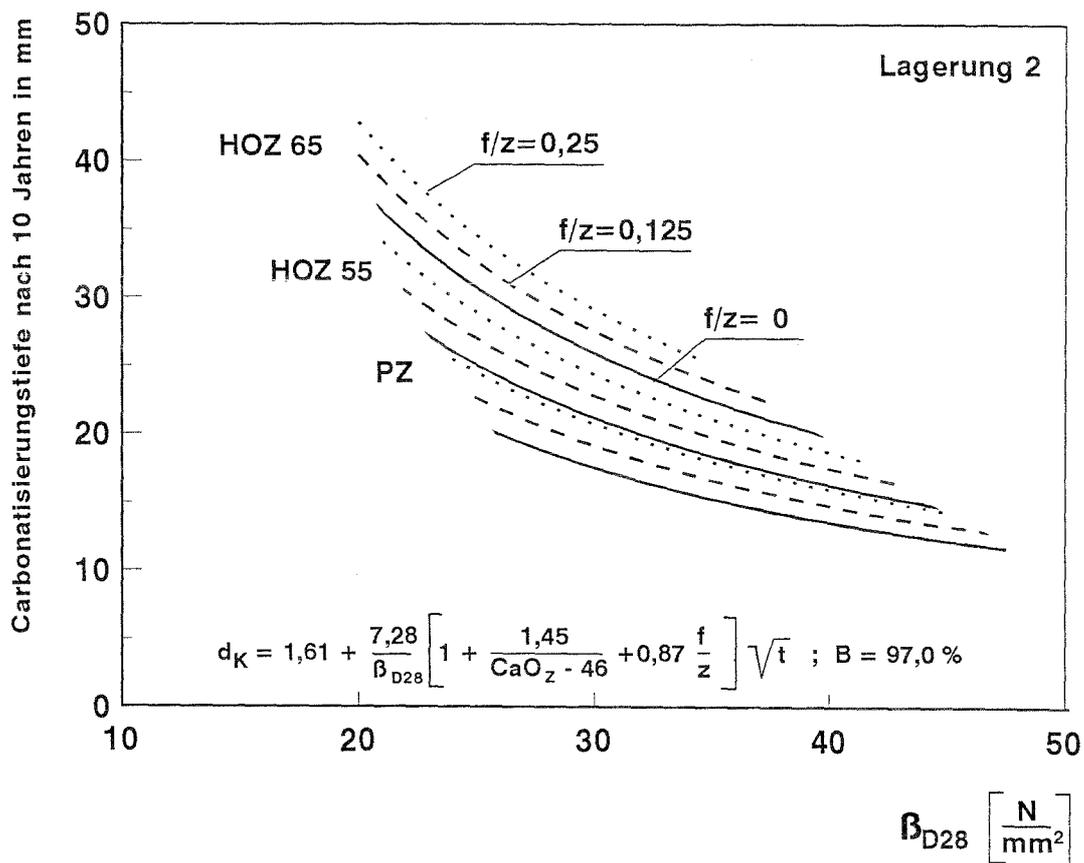


Bild 21: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 2.

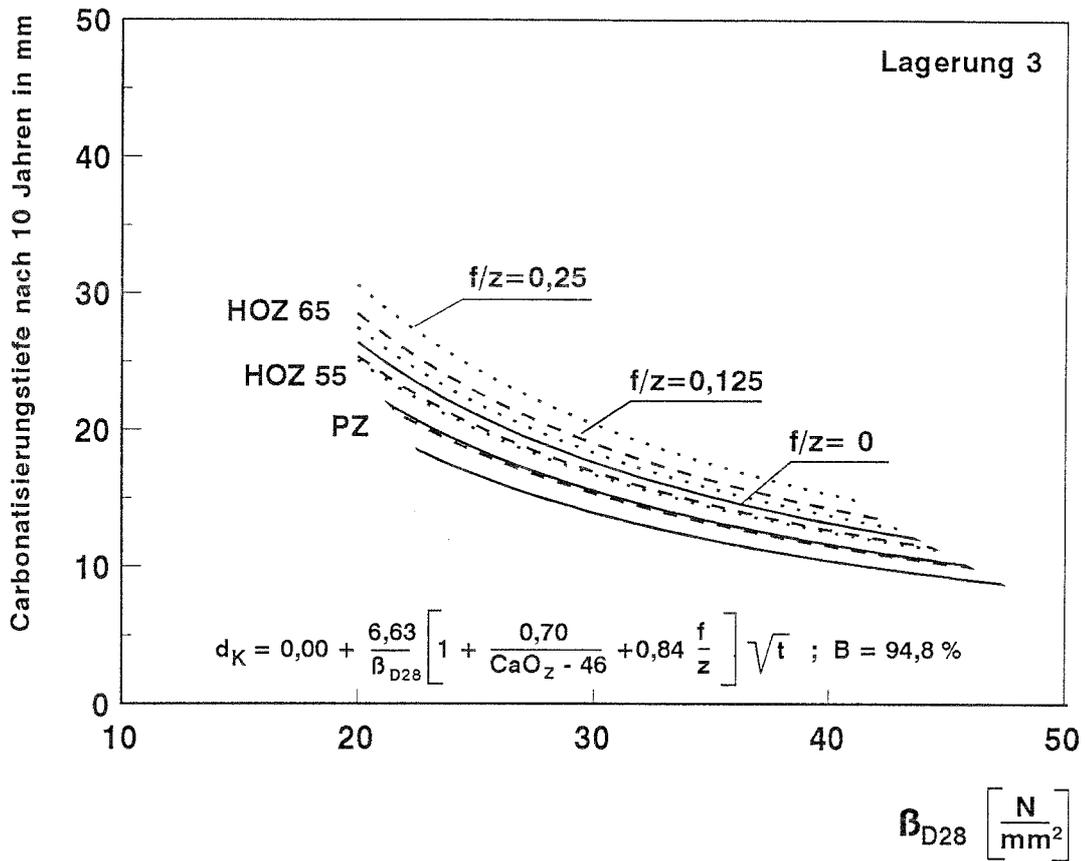
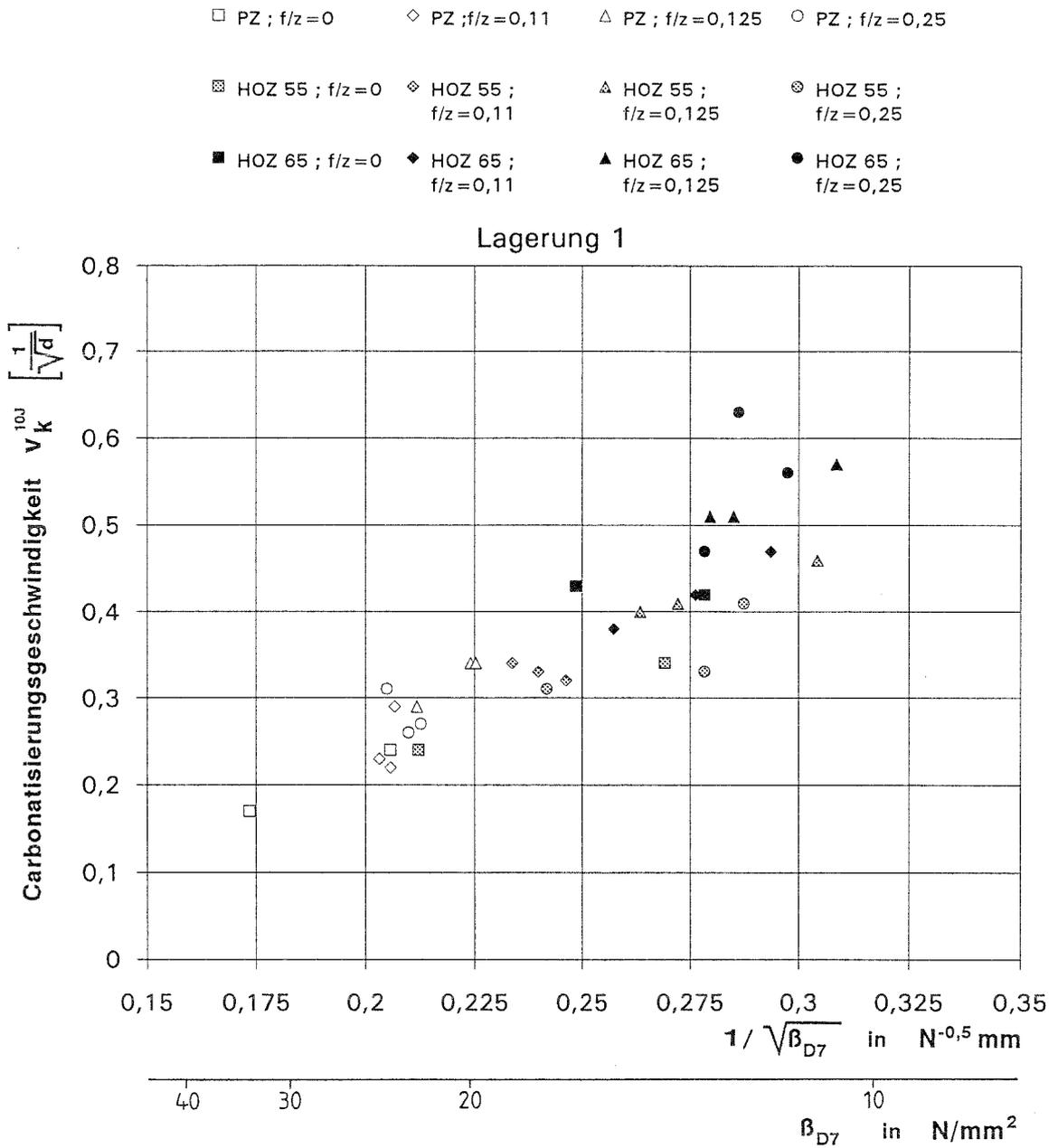


Bild 22: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 3.



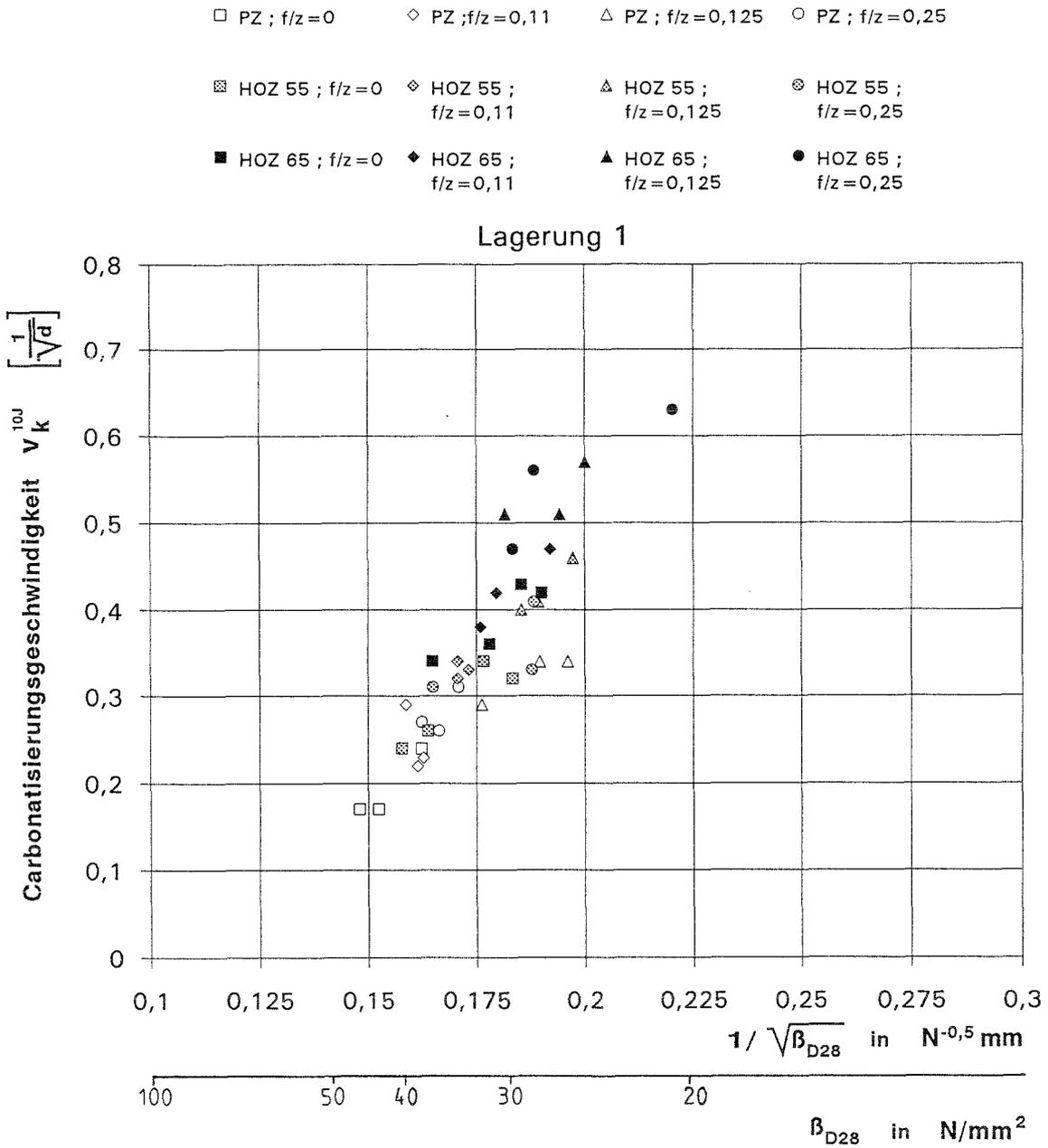


Bild 24: "Carbonatisierungsgeschwindigkeit"  $v_k$  in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen ( $v_k$  berechnet einschließlich der Meßergebnisse nach 10 Jahren Carbonatisierungsdauer). Lagerung 1.

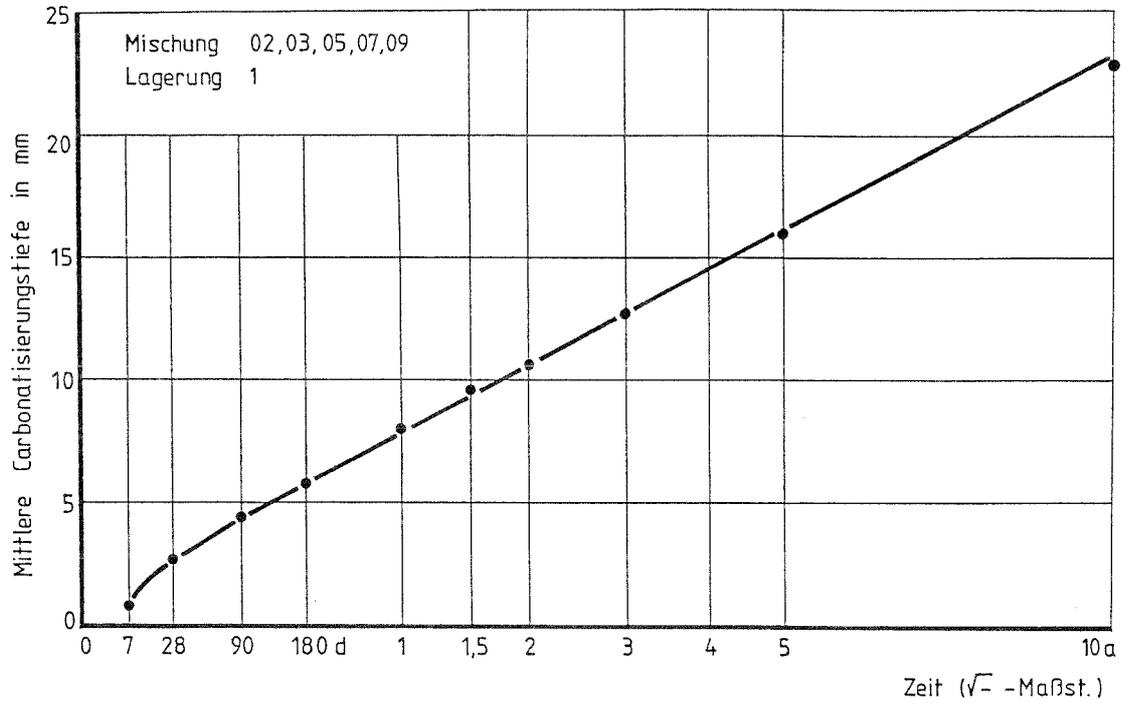


Bild 25: Mittlere Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1.

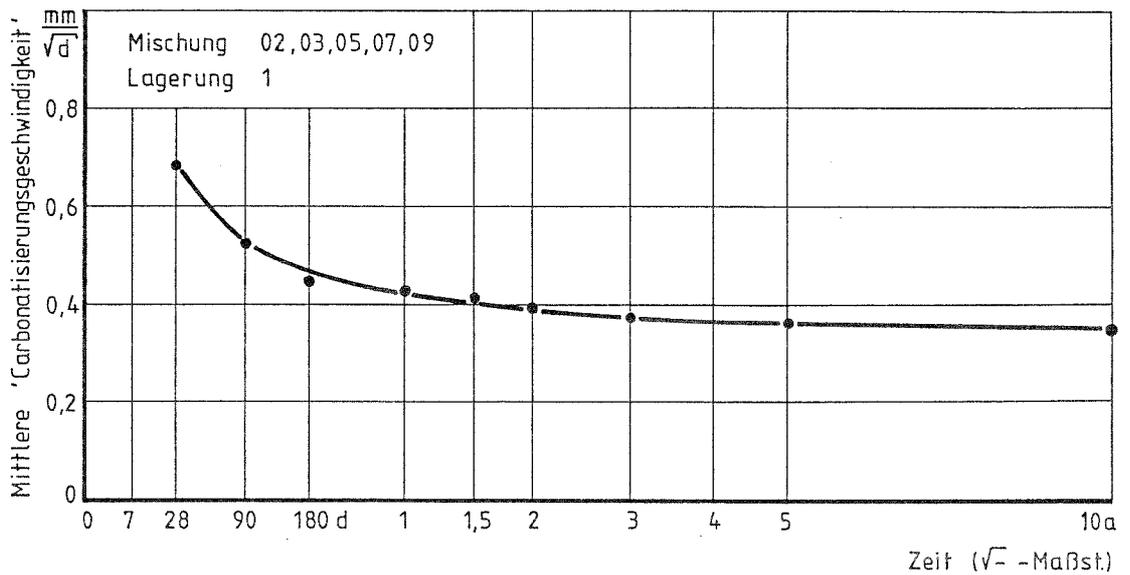


Bild 26: Mittlere "Carbonatisierungsgeschwindigkeiten" in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1.

T 2562

Investigations on the influence of fly ash on the carbonating  
behaviour of concrete, 2<sup>nd</sup> supplement  
ref.no. IV 1-5-681/92

Summary

R

In connection with the licencing of fly ash as a concrete additive according to DIN 1045 or with permits for fly ash cement, we must answer the question of what effect the addition of fly ash has on the carbonation of concretes. This was the inducement for earlier research work, in which concretes were examined for carbonation over a period of 5 years, using 5 different mixes, 3 cements, 3 fly ashes and 3 different curing and storing methods. The results have been given in detail in 2 final reports [~~1, 2~~].

After a carbonation period of 10 years, the depths of carbonation of these concretes were again measured. The present report gives these supplementary values. Comparisons are made between concretes of comparable mixes and of equivalent strengths based on the carbonation depths after 10 years. It was possible to achieve a good estimate of the depth of carbonation with progressing time, based on the 28-day compressive strength of the concrete, the type of cement and the relationship of fly ash mass to cement mass, using multiple, nonlinear regression analysis. On the whole, the trends observed after 2 and 5 years of carbonation are corroborated here.

---

[1] Wierig, H.-J., E. Scholz: Final report "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton", May 1985.

[2] Wierig, H.-J., E. Scholz: Final report "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton. I. Ergänzung", July 1988.

2562

Recherches sur l'influence des produits d'addition de cendres  
volantes sur la carbonatation du béton. II. complément

Az.: IV 1-5-681/92

Version abrégée

A propos de la délivrance de marques dépreuved pour des cendres volantes de houille comme produit d'addition de béton selon DIN 1045 ou de l'admission de ciments au cendres volantes, il faut, entre autres, répondre à la question quels sont les effets d'une addition de cendres volantes sur le progrès de la carbonatation du béton. A cet effet, des études ont été faites dans 2 travaux de recherches précédents [1, 2] sur des bétons avec 5 dosages différents de 3 ciments et 3 cendres volantes de houille sous 3 différentes conditions de cure et d'exposition. La tenue à la carbonatation a été étudiée durant un interval de temps de 2 ans respectivement 5 ans.

Après une durée de carbonatation de 10 ans, les profondeurs de carbonatation de ces bétons ont été de nouveaux mesurées. Le rapport existant présente ces mesures complémentaires sous forme de tableau, comme comparaison des profondeurs de carbonatation des betons de composition semblable et ensuite des bétons de même résistance à la compression après une durée de carbonatation de 10 ans. Le progrès de la carbonatation dépendant du temps pourrait être décrit en tenant compte de la résistance à la compression du béton après 28 jours, de l'espèce du ciment et des proportions de masses entre cendre volante et ciment, à l'aide d'un multiple calcul de régression non linéaire avec bonne approximation. Les tendances observées après une durée de carbonatation de 2 et 5 ans se sont en principe confirmées par les recherches de longues durée.

---

[1] Wierig, H.-J., E. Scholz: Rapport final au projet de recherche "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton", Mai 1985.

[2] Wierig, H.-J., E. Scholz: Rapport final au projet de recherche "Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton. I. Ergänzung", Juillet 1988.