

Untersuchungen über den Einfluß
von Flugaschezusätzen auf das
Carbonatisierungsverhalten von Beton.

1. Ergänzung.
Schlußbericht

T 2055

T 2055

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

www.baufachinformation.de

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG
DER UNIVERSITÄT HANNOVER

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG
Nienburger Straße 3 und Appelstraße 9 A · D-3000 Hannover 1

Fernruf:

Nienburger Straße 3 (05 11) 7 62-3101
Appelstraße 9 A (05 11) 7 62-3722
Sachbearbeiter (05 11) 7 62- 3109

Hannover, den 21.07.88

Schlußbericht

zum Forschungsvorhaben

Untersuchungen über den Einfluß von Flugaschezusätzen auf
das Carbonatisierungsverhalten von Beton

I. Ergänzung

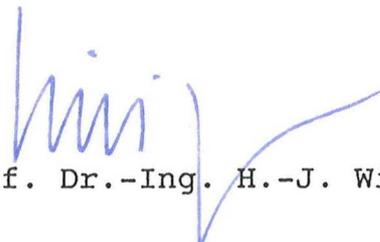
Auftraggeber: Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 72 - 76
1000 Berlin 30
Az.: IV/1-5-518/87

Sachbearbeiterin:

Leiter des Forschungsvorhabens:



Dipl.-Ing. E. Scholz



Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-J. Wierig

Der Bericht umfaßt 12 Seiten und einen Anhang von 33 Seiten

INHALT

	<u>Seite</u>
1. <u>Allgemeines</u>	1
2. <u>Versuchsprogramm</u>	2
3. <u>Versuchsmaterial</u>	2
3.1 Betonausgangsstoffe	2
3.1.1 Zemente	2
3.1.2 Flugaschen	3
3.1.3 Zuschlag	3
3.2 Betone	3
4. <u>Versuchsdurchführung</u>	4
4.1 Nachbehandlung und Exposition (Lagerung)	4
4.2 Druckfestigkeiten	4
4.3 Carbonatisierungstiefen	5
5. <u>Versuchsergebnisse</u>	5
5.1 Druckfestigkeiten	5
5.2 Carbonatisierungstiefen	6
6. <u>Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse</u>	6
6.1 Betone "vergleichbarer" Zusammensetzung	6
6.2 Betone gleicher Druckfestigkeit	8
7. <u>Zusammenfassung</u>	12

Anhang

14 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. Es bestehen jedoch z.Z. noch keine quantifizierten Anforderungen.

Zur Absicherung und Erweiterung der Beurteilungskriterien wurden in den Jahren 1982 bis 1985 zusätzliche Untersuchungen im Rahmen eines vom Institut für Bautechnik (IfBt), Berlin finanzierten und vom Sachverständigenausschuß "Betontechnologie B3: Betonzusatzstoffe" betreuten Forschungsvorhabens durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sind in einem Schlußbericht [1] ausführlich dargestellt worden. Sie umfassen die Carbonisierungstiefen der untersuchten Betone bis zu einer Carbonisierungsdauer von 2 Jahren.

Die Reststücke der untersuchten Betone wurden nach Abschluß des Meßprogramms nach [1] weiter unter definierten Bedingungen gelagert. Der vorliegende Bericht enthält die nach 3- und 5jähriger Carbonisierungsdauer gemessenen Carbonisierungstiefen. Soweit es für die Beurteilung der Meßergebnisse erforderlich ist, werden außerdem einige bereits in [1] mitgeteilte Kenndaten über Eigenschaften der Ausgangsstoffe und der Betone wiederholt.

[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

Zusätzlich zu dem im Auftrag des IfBt durchgeführten Versuchsprogramm sind umfangreiche Ergänzungsversuche im Auftrag der VGB Technischen 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.

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 Institutes 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 A₁₆ und B₁₆ 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 sind im einzelnen nachstehend aufgeführt und bezeichnet:

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 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 CO₂-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 und 5 Jahre.

Die Prüfung der Carbonatisierungstiefen wurde in Anlehnung an [2] durchgeführt. 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.

[2] Measurement of hardened concrete carbonation depth
RILEM Draft Recommendation CPC-18
Matériaux et Constructions
Vol. 17 - No 102, Nov.-Dez. 1984

5.2 Carbonatisierungstiefen

Die mittleren Carbonatisierungstiefen der Betone (Mittelwerte aus allen 4 Seiten der Probe) nach 3- und 5jähriger Carbonatisierungsdauer sind in den Tafeln 11 bis 14 angegeben.

6. Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

6.1 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. 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 5jähriger Carbonatisierungsdauer. Den Auswertungen liegen jeweils die 24 Stunden nach dem Besprühen mit Phenolphthalein gemessenen Carbonatisierungstiefen zu Grunde.

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

Die Bilder 1 und 2 zeigen Carbonatisierungstiefen von Betonen, in denen 30 bzw. 60 kg/m³ Zement durch die gleiche Menge Flugasche ersetzt wurden (Mischungen 02/05/07 und 03/09). Die Flugaschebetone waren nach 5 Jahren überwiegend tiefer carbonatisiert. In beiden Bildern ist außerdem der Einfluß des verwendeten Zementes zu erkennen: Mit abnehmendem Klinkergehalt des Zementes vergrößerten sich die Carbonatisierungstiefen.

Betone aus Portlandzement, in denen 30 kg Zement gegen 60 kg Flugasche ausgetauscht wurden, waren nach 5 Jahren nicht tiefer carbonatisiert als die entsprechenden PZ-Betone ohne Flugasche (Bild 3). Der Austausch von 30 kg HOZ 35 L-NW/HS gegen 60 kg Flugasche führte dagegen nach 5 Jahren zu größeren Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone. Insgesamt war auch hier der Einfluß des verwendeten Zementes auf die Carbonatisierungstiefe größer als der des Flugaschezusatzes.

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

Die Bilder 5 und 6 zeigen den Einfluß der verschiedenen Flugaschen auf die Carbonatisierung. In Bild 5 sind die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 5 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.

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 5jähriger 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 und in der Lagerung im Freien unter Dach verringern sich die Carbonatisierungstiefen unabhängig von der Betonzusammensetzung etwa im gleichen Verhältnis, d.h. daß sich das generelle Niveau verändert, nicht aber die Wirkung der anderen Einflußgrößen.

6.2 Betone gleicher Druckfestigkeit

In den Bildern 8 bis 19 sind die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 5jähriger 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 [3] 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

[3] Wierig, H.-J., E. Scholz: Schlußbericht zum Forschungsvorhaben "Carbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Betone", Juli 1986, Bezug über VGB Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. Essen

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 5jähriger 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 und 5 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. β_{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	304	0,65	11,83	-	-	87,7	1,75
2	119	0,64	12,48	-	-	87,5	2,04
3	112	-0,15	8,94	-	-	90,3	1,14
$d_K = c_0 + \frac{1}{\beta_{D28}} \left[c_1 + \frac{c_2}{CaO_Z^{-46}} + c_3 \frac{F}{Z} \right] \cdot \sqrt{t}$							
1	304	1,17	7,41	11,38	5,32	96,4	0,96
2	119	1,78	6,61	11,31	7,50	95,4	1,26
3	112	0,16	6,54	3,80	5,24	93,1	0,97

- d_K [mm]: Carbonatisierungstiefe
 β_{D28} [N/mm²]: Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen
 CaO_Z [%]: CaO-Gehalt des Zementes
 F [kg/m³]: Flugasche-Gehalt
 Z [kg/m³]: Zement-Gehalt
 t [d]: Carbonatisierungsdauer

Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 bzw. 0 und 100 % annehmen. Bestimmtheitsmaße nahe 1 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 Betondruck-

festigkeit weitere Kenngrößen der Betonzusammensetzung hinzugezogen werden.

Allerdings wird über die Betondruckfestigkeit bereits der größte Teil der zu erwartenden Carbonatisierungstiefe erfaßt. Bei längerer Nachbehandlungsdauer und in der Lagerung im Freien unter Dach (Lagerung 3) hängt die Carbonatisierungstiefe in größerem Maß von der 28-Tage-Festigkeit ab als in den Lagerungen 1 und 2. Der durch den CaO-Gehalt beschriebene zusätzliche Zementeinfluß wirkt sich dagegen bei kürzeren Nachbehandlungszeiten stärker aus.

Das Massenverhältnis F/Z liefert einen weiteren, aber vergleichsweise geringen zusätzlichen Einfluß auf die Carbonatisierungstiefe. Beispielsweise beträgt der für ein Massenverhältnis von $F/Z = 0,25$ und eine Betondruckfestigkeit $\beta_{D28} = 30 \text{ N/mm}^2$ berechnete Anteil an der Gesamtcarbonatisierungstiefe nach 5 Jahren ca. 10 % in der Lagerung 1 und ca. 15 % in den Lagerungen 2 und 3.

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 5 Jahren und 3 F/Z-Werte graphisch 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 5 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 einer früheren Forschungsarbeit [1] war über das Carbonatisierungsverhalten von Betonen mit Zusätzen von Steinkohlenflugaschen bis zu einer Carbonatisierungsdauer von 2 Jahren berichtet worden. Nach 3- und 5jähriger 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 5 Jahren Carbonatisierungsdauer. Der zeitabhängige Carbonatisierungsfortschritt konnte 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 werden. Im wesentlichen bestätigten sich die nach 2jähriger Carbonatisierungsdauer gefundenen Tendenzen.

A N H A N G

14 Tafeln

26 Bilder

Tafel 1

Übersicht über das Versuchsprogramm

Bez.	Z/F [kg/m ³]	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 ³ *)				Massenverhältnisse		
	Zement	Flugasche	Zuschlag	Wasser	W/Z	F/Z	W/(Z+F)
	Z	F	G	W			
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 ² /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 ² *) nach 2d 7d 28d	4,7 - 8,2	- 5,1 8,3	- 5,7 8,7
Biegezugfestigkeit in N/mm ² **) 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 ² *) nach 2d 7d 28d	23,1 - 47,8	- 25,6 49,5	- 26,7 53,3
Druckfestigkeit in N/mm ² **) 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 ₂	20,71	28,86	29,66
Al ₂ O ₃	4,17	6,24	7,96
TiO ₂	0,35	1,46	1,67
Fe ₂ O ₃	2,75	2,36	1,49
Mn ₂ O ₃	0,24	0,56	1,05
CaO	63,10	50,35	48,21
MgO	4,16	4,95	5,18
SO ₃	2,85	3,21	3,24
K ₂ O	1,13	1,13	0,92
Na ₂ O	0,39	0,68	0,39
C ₃ S	59	--	--
C ₂ S	15	--	--
C ₃ A	6	--	--
C ₄ 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 cm^2/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_2	48,1	52,3	55,8
Al_2O_3	27,2	28,3	26,3
Fe_2O_3	10,4	7,76	6,67
CaO	2,88	1,65	3,06
K_2O	5,60	5,85	4,75
Na_2O	0,85	0,62	0,68
TiO_2	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_3 **)	0,65	0,44	0,17
Mn_2O_3 **)	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 9

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 28 Tagen in N/mm²

Bez.	Z/F [kg/m ³]	$\frac{W}{Z+F}$	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/mm²

Bez.	Z/F [kg/m ³]	$\frac{W}{Z+F}$	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 11

Carbonatisierungstiefen in mm nach 3 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Mefswerte 1 Stunde nach Aufsprühen des Indikators)

Bez.	Z/F [kg/m ³]	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	-	5,5	9,0	14,5	8,5	7,3	n.b.	n.b.	7,5	8,2
				6,0	10,5	12,0	8,5	9,3	16,3	n.b.	5,5	7,5
03	270/0	0,67	-	8,1	10,0	14,0	-	-	-	-	-	-
				8,0	11,0	12,5	-	-	-	-	-	-
05	270/30	0,60	1	9,0	11,0	17,5	-	-	-	-	-	-
			2	8,3	11,3	16,0	-	-	-	-	-	-
			3	9,5	10,0	16,5	-	-	-	-	-	-
07	240/60	0,60	1	10,0	12,5	20,5	11,5	14,0	23,0	6,5	12,0	10,5
			2	9,0	11,5	19,0	13,5	12,0	22,0	7,0	9,0	12,0
			3	8,4	14,5	16,0	11,0	15,0	20,5	8,0	10,0	n.b.
09	240/30	0,67	1	11,5	13,5	16,8	-	-	-	-	-	-
			2	10,0	12,5	18,0	-	-	-	-	-	-
			3	10,5	17,5	18,0	-	-	-	-	-	-

Tafel 12

Carbonatisierungstiefen in mm nach 3 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Mefswerte 24 Stunden nach Aufsprühen des Indikators)

Bez.	Z/F [kg/m ³]	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	-	6,0	9,0	14,7	8,5	7,5	14,5	4,0	7,0	8,8
				6,5	11,5	12,5	9,0	9,5	16,3	n.b.	5,5	7,8
03	270/0	0,67	-	8,4	10,0	14,8	-	-	-	-	-	-
				8,0	11,0	12,5	-	-	-	-	-	-
05	270/30	0,60	1	9,0	11,3	18,5	-	-	-	-	-	-
			2	8,8	12,0	16,5	-	-	-	-	-	-
			3	9,5	10,3	15,0	-	-	-	-	-	-
07	240/60	0,60	1	10,5	13,0	21,0	11,8	14,5	23,5	6,8	12,0	11,0
			2	9,0	12,0	19,0	13,5	12,5	22,5	7,0	8,3	12,5
			3	8,5	14,5	17,0	10,0	15,5	21,0	7,5	11,0	10,0
09	240/30	0,67	1	12,0	14,0	17,0	-	-	-	-	-	-
			2	11,5	12,5	18,5	-	-	-	-	-	-
			3	11,3	18,0	18,5	-	-	-	-	-	-

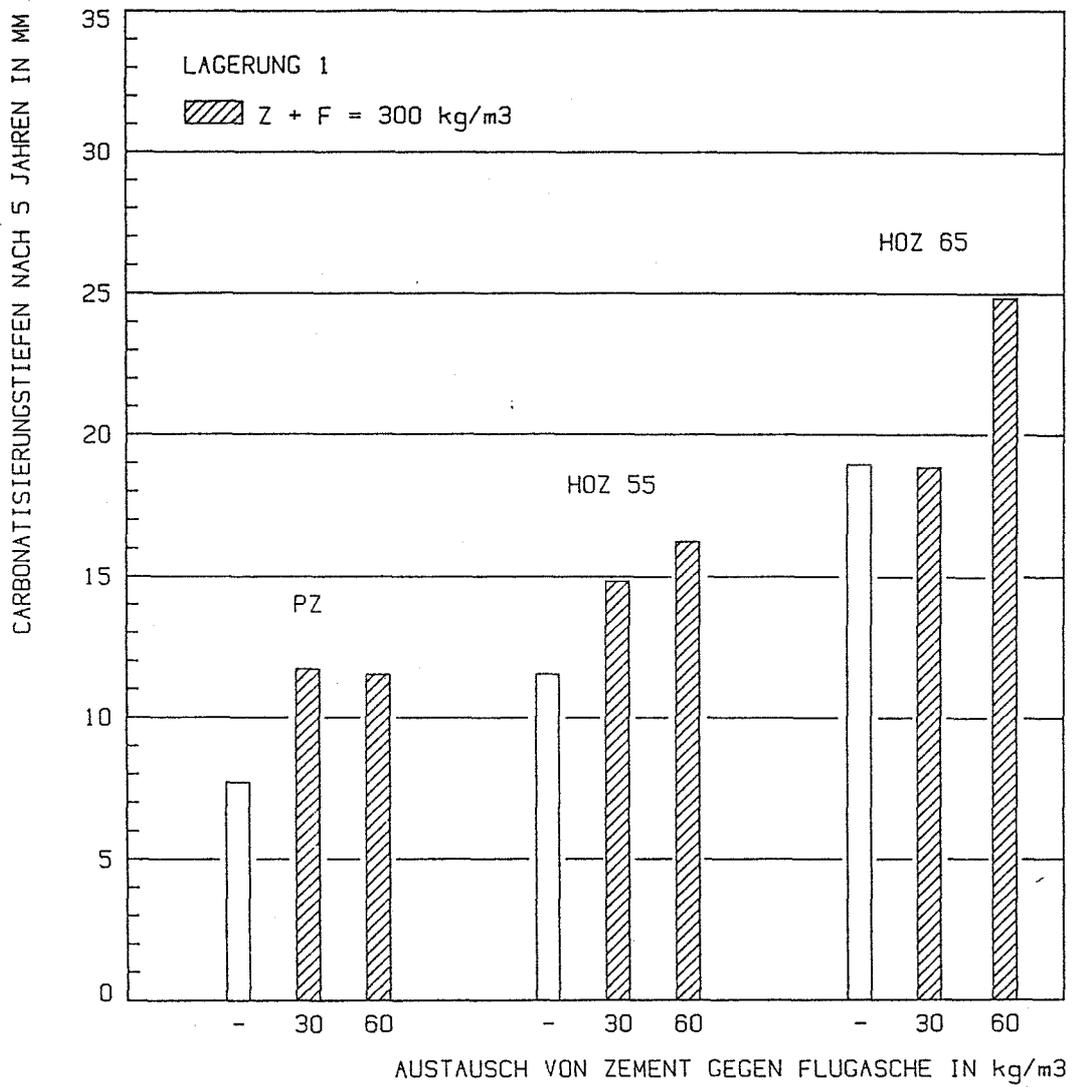


Bild 1: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche. Mischungen 02, 05, 07 (Flugaschen gemittelt)

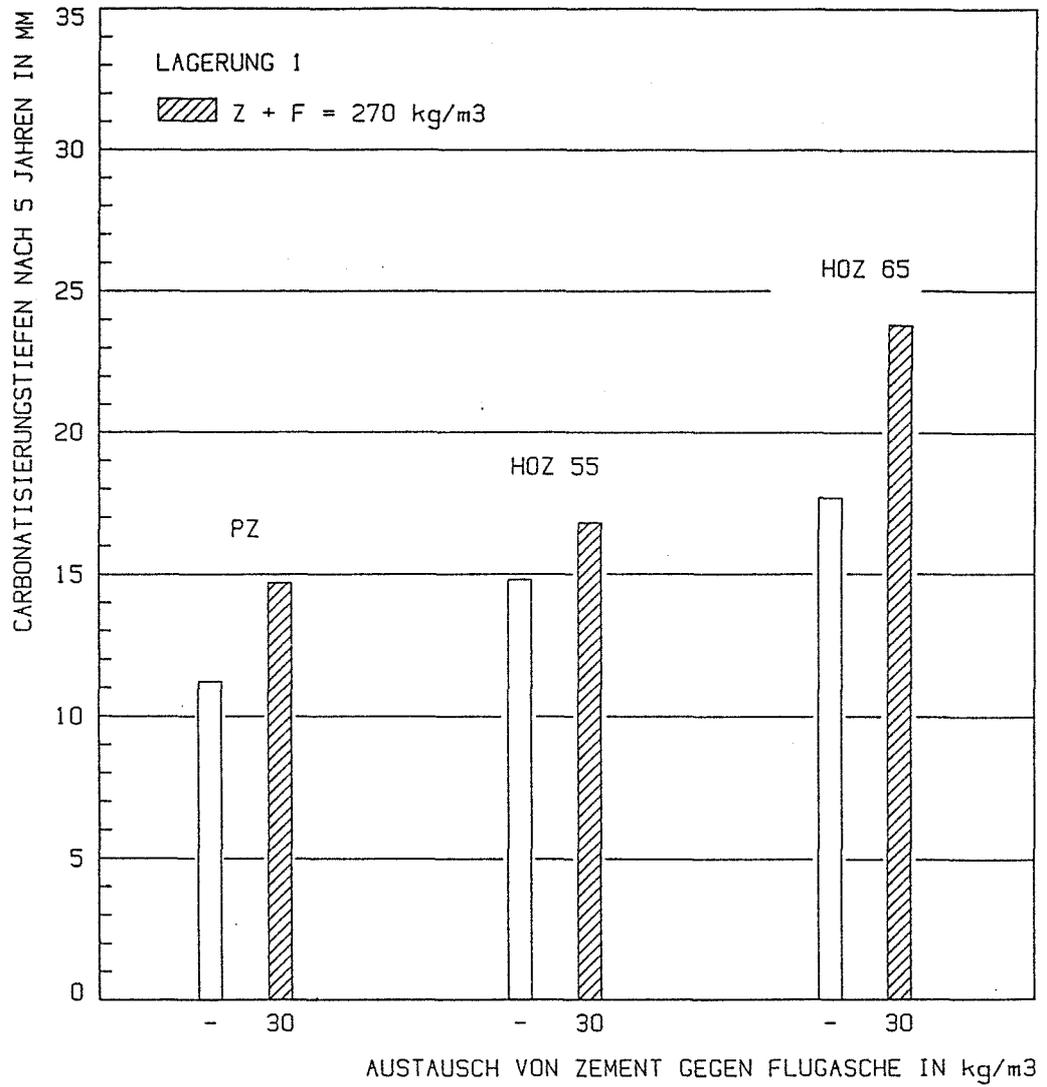


Bild 2: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche. Mischungen 03, 09. (Flugaschen gemittelt)

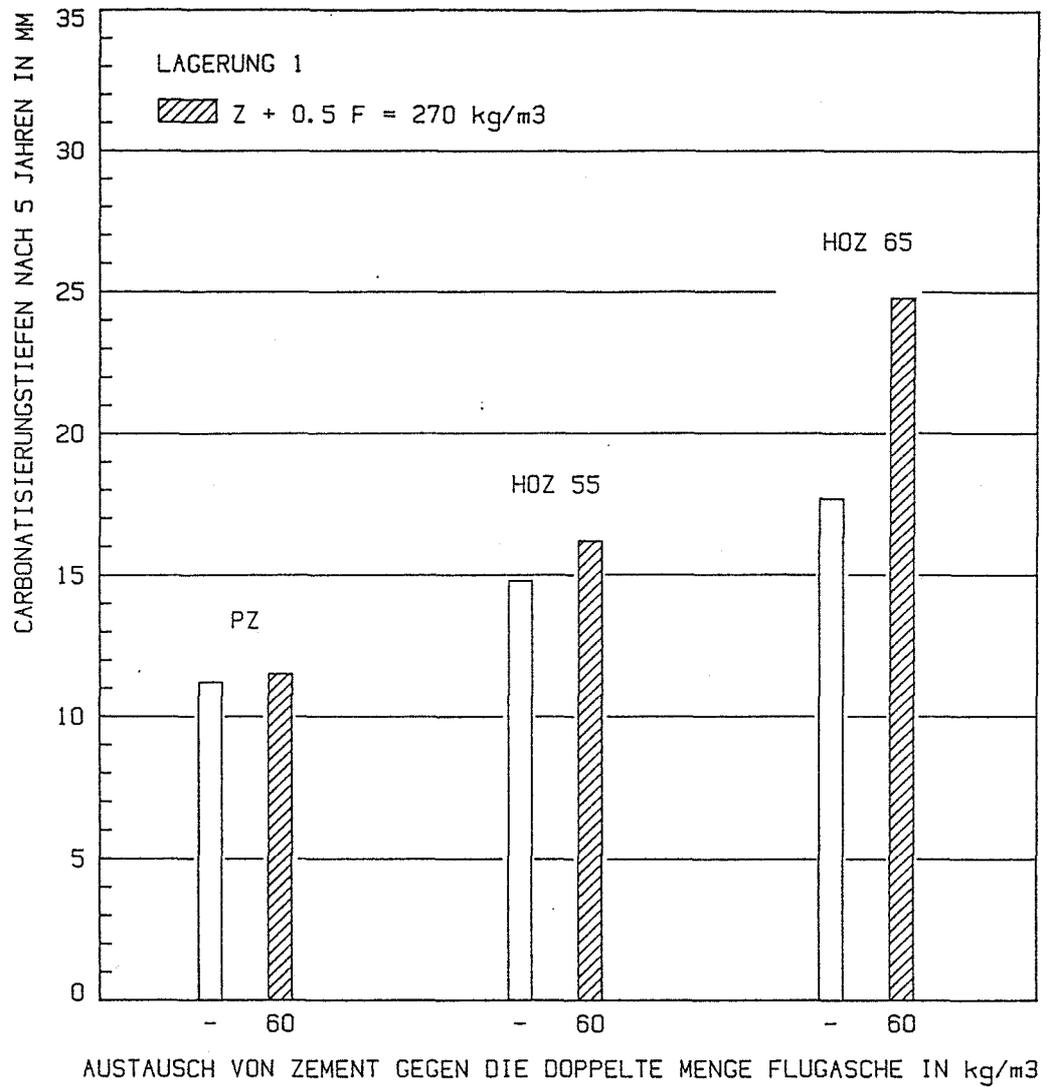


Bild 3: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren bei Austausch von Zement gegen die doppelte Menge Flugasche. Mischungen 03, 07. (Flugaschen gemittelt)

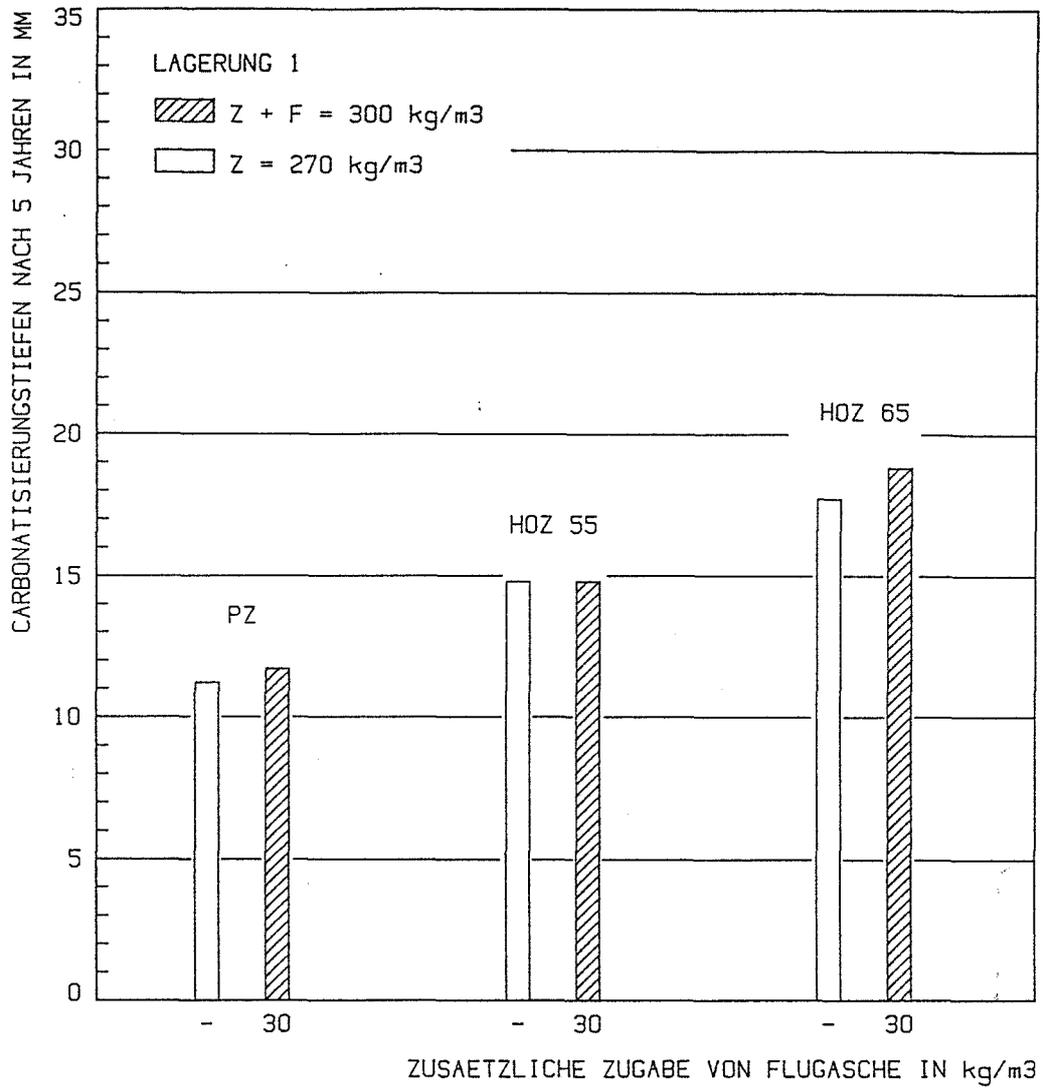


Bild 4: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren bei zusätzlicher Zugabe von Flugasche und unverändertem Zementgehalt. Mischungen 03, 05. (Flugaschen gemittelt)

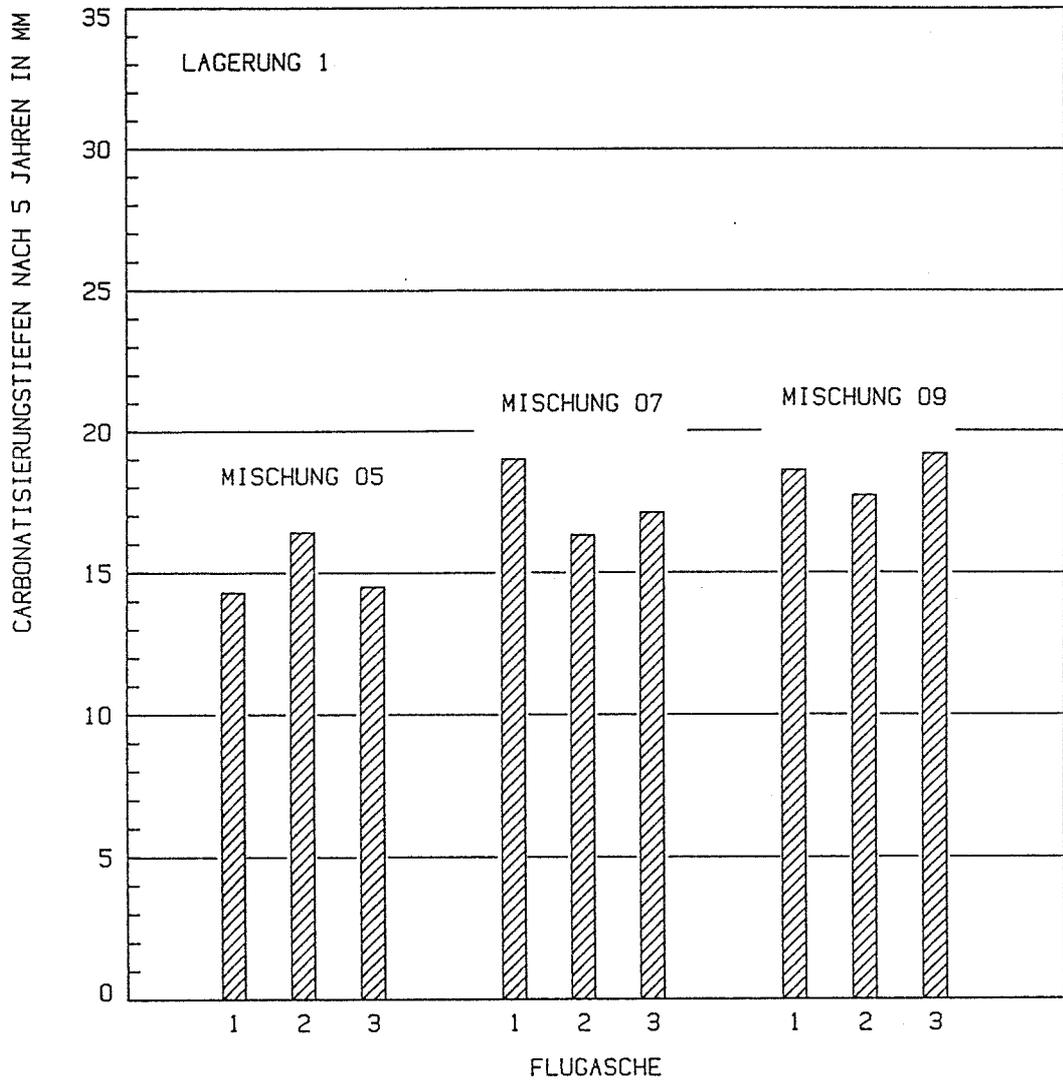


Bild 5: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 5 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Zemente gemittelt)

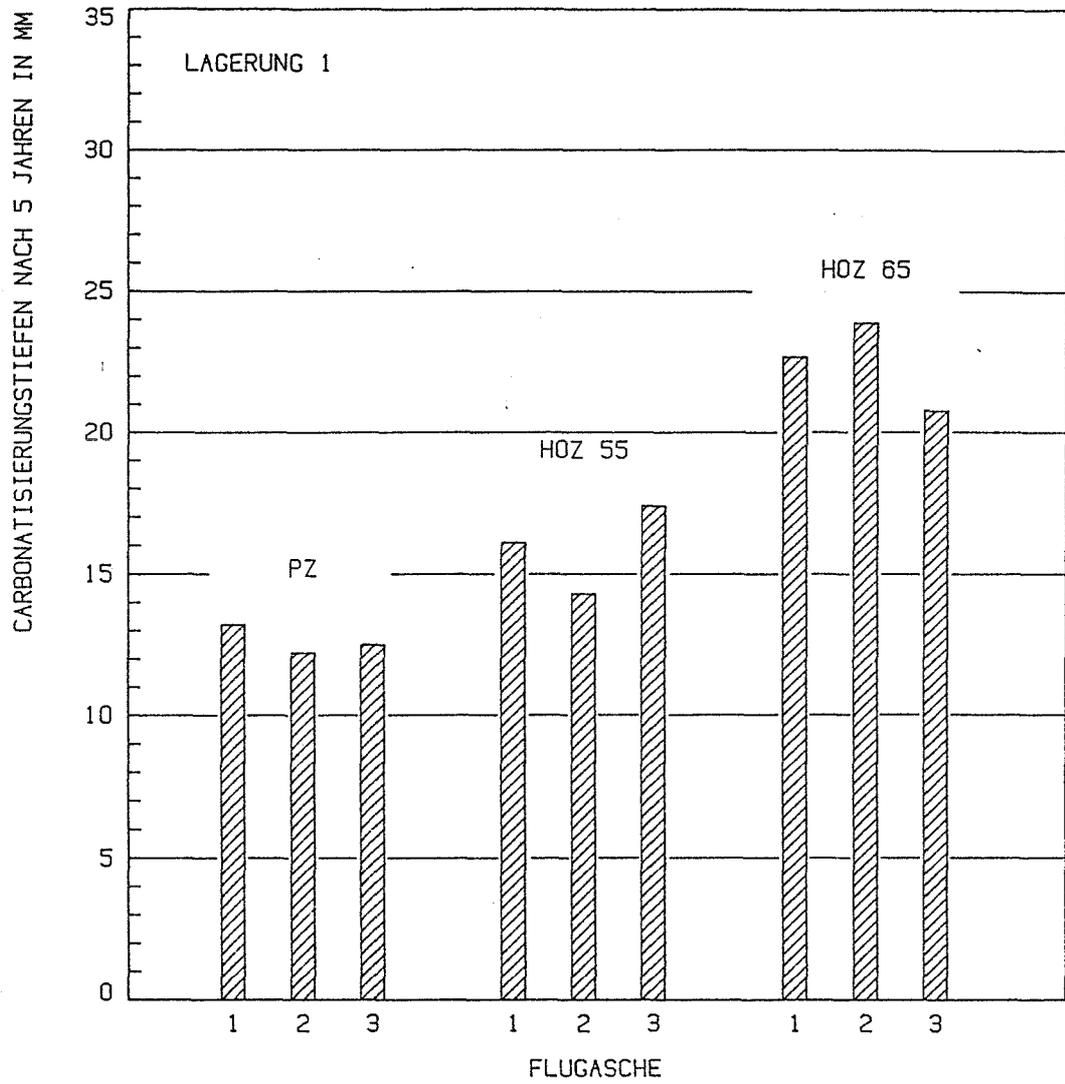


Bild 6: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 5 Jahren. Einfluß der Flugaschen.
(Mittelwerte der Mischungen 05, 07, 09)

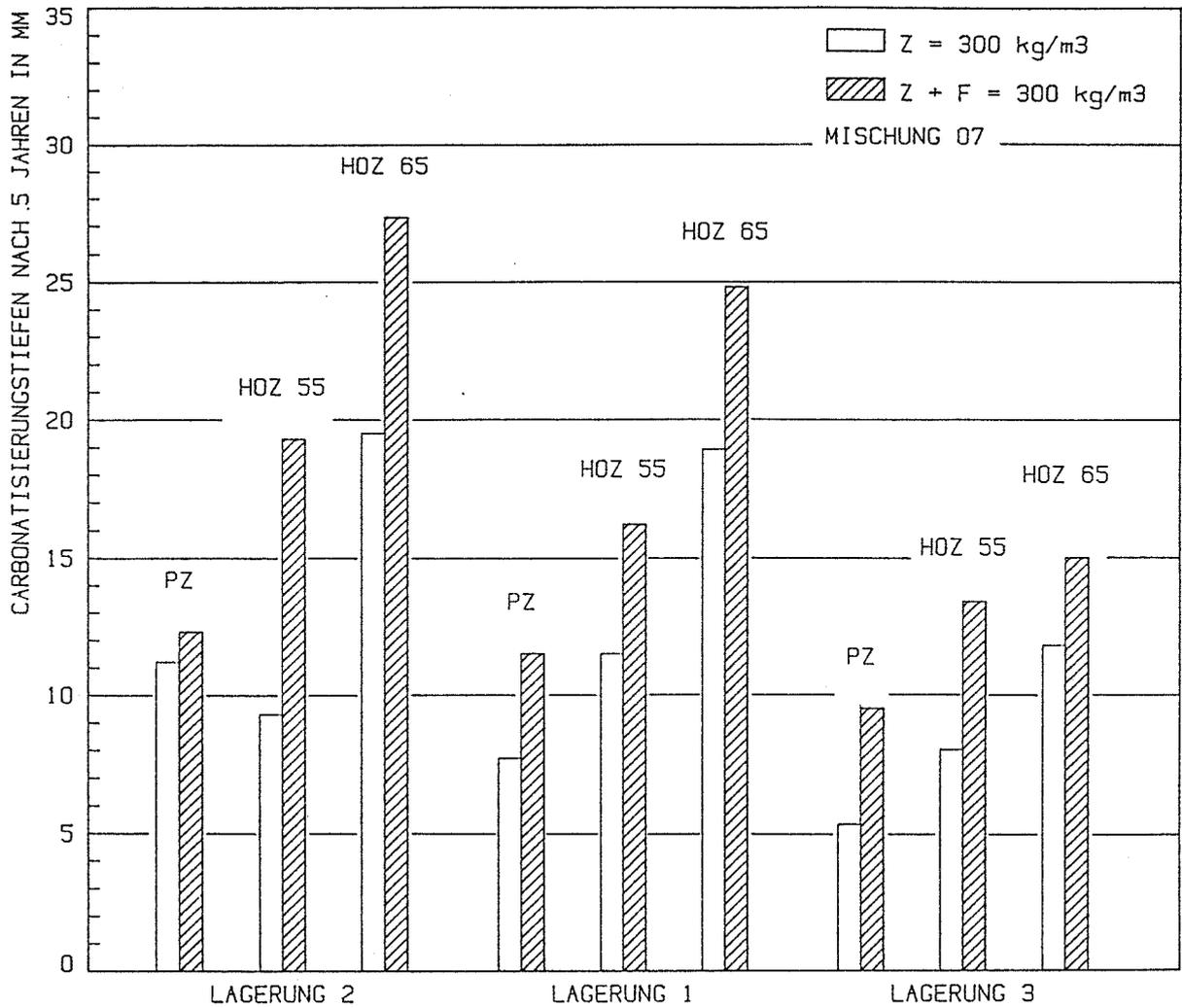


Bild 7: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren.
Einfluß von Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen.
(Flugaschen gemittelt)

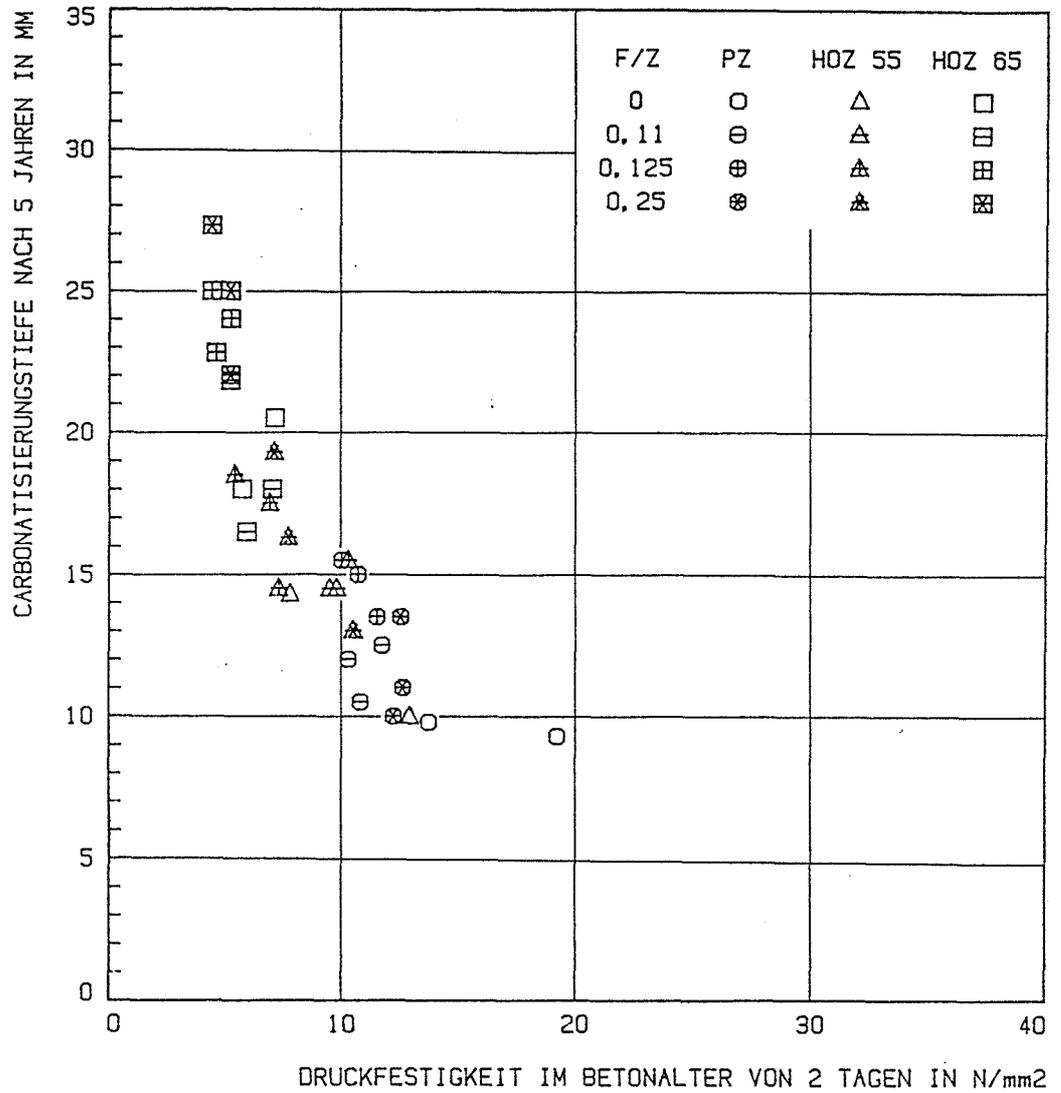


Bild 8: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 1

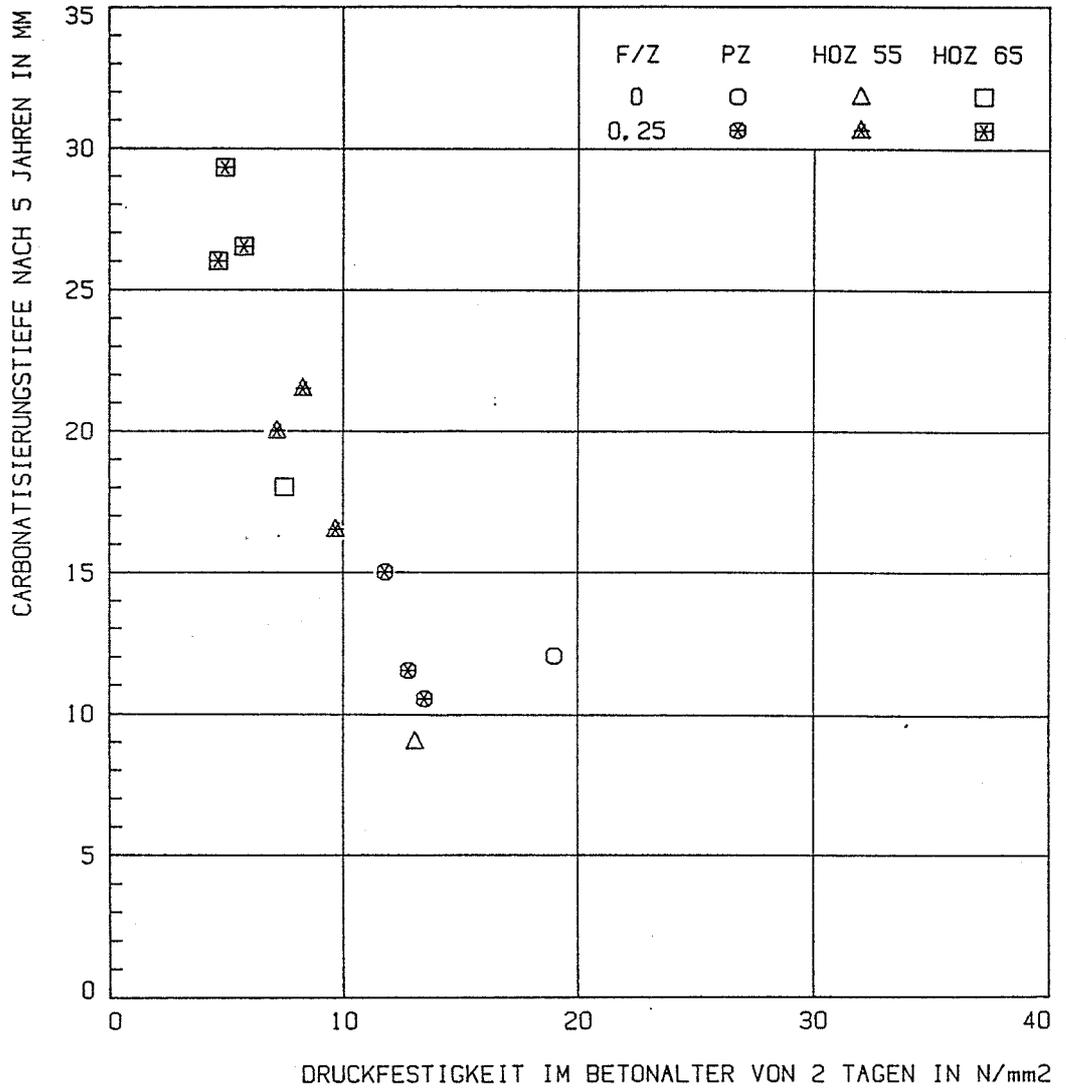


Bild 9: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 2

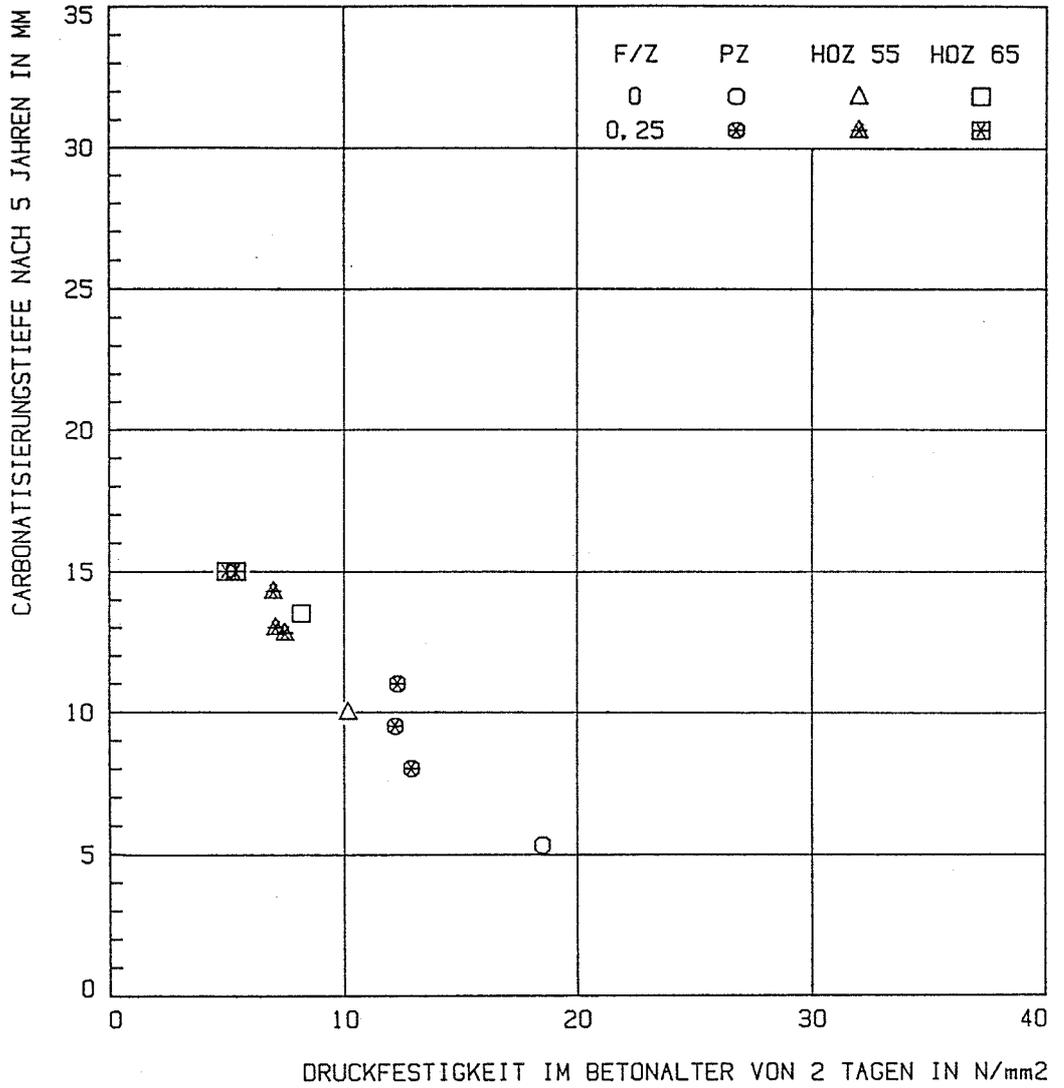


Bild 10: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 3

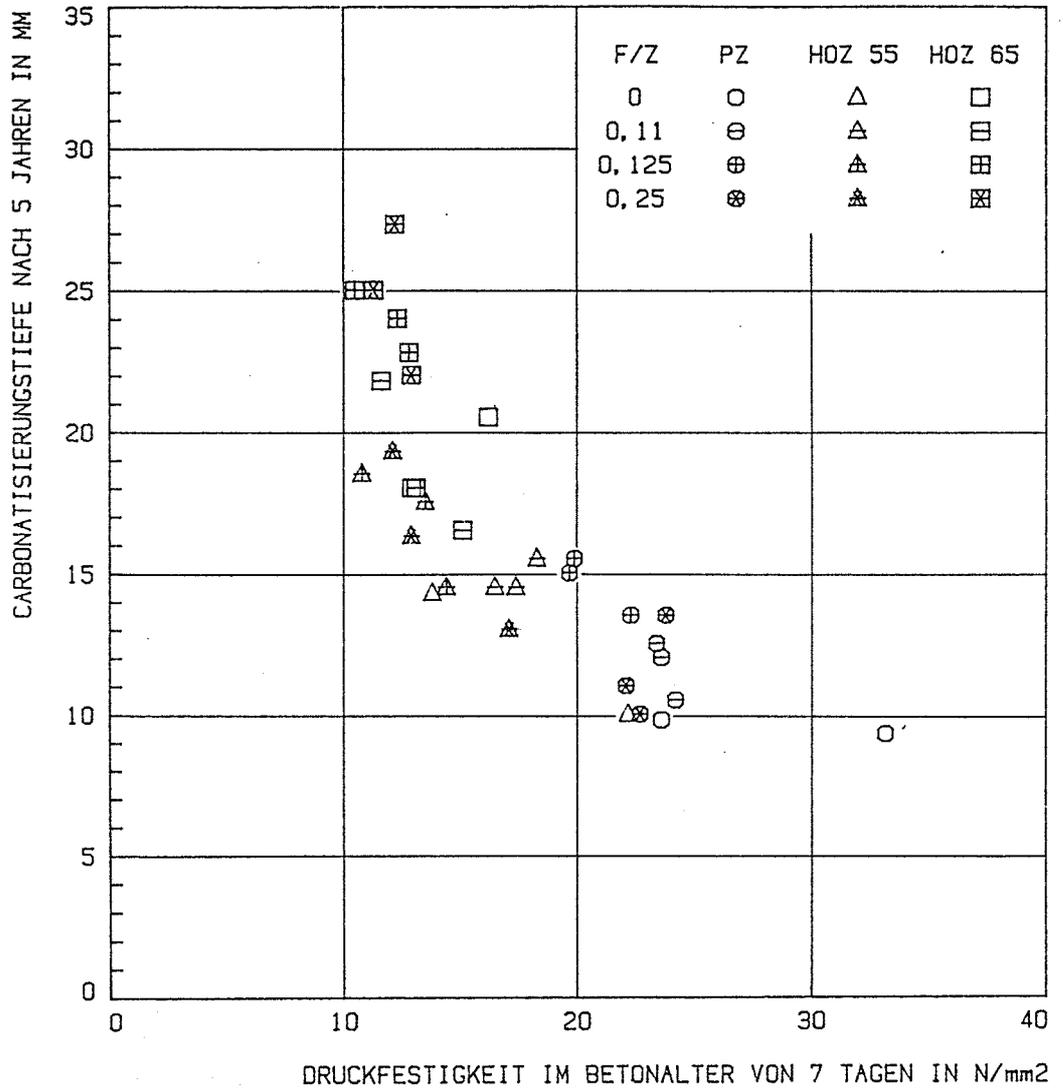


Bild 11: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 1

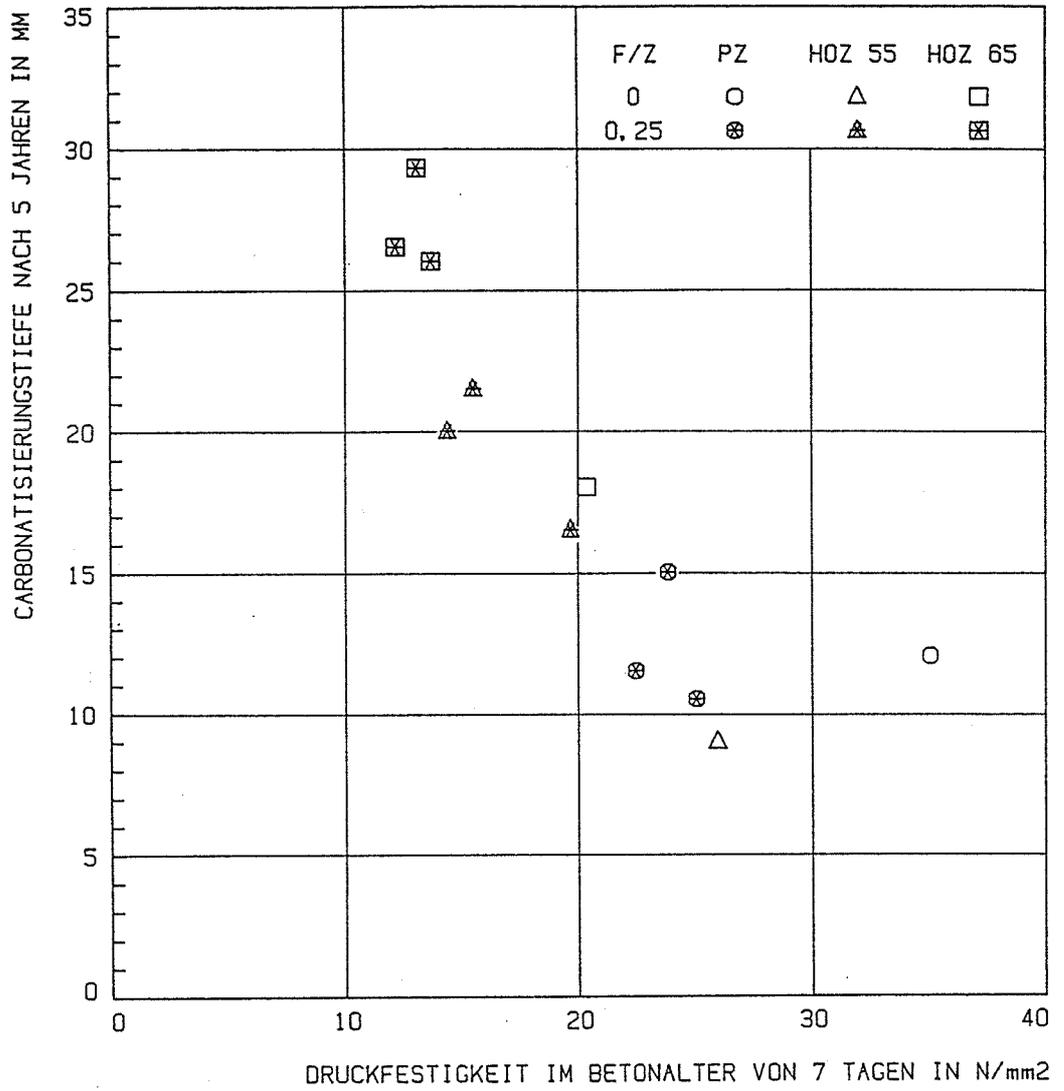


Bild 12: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 2

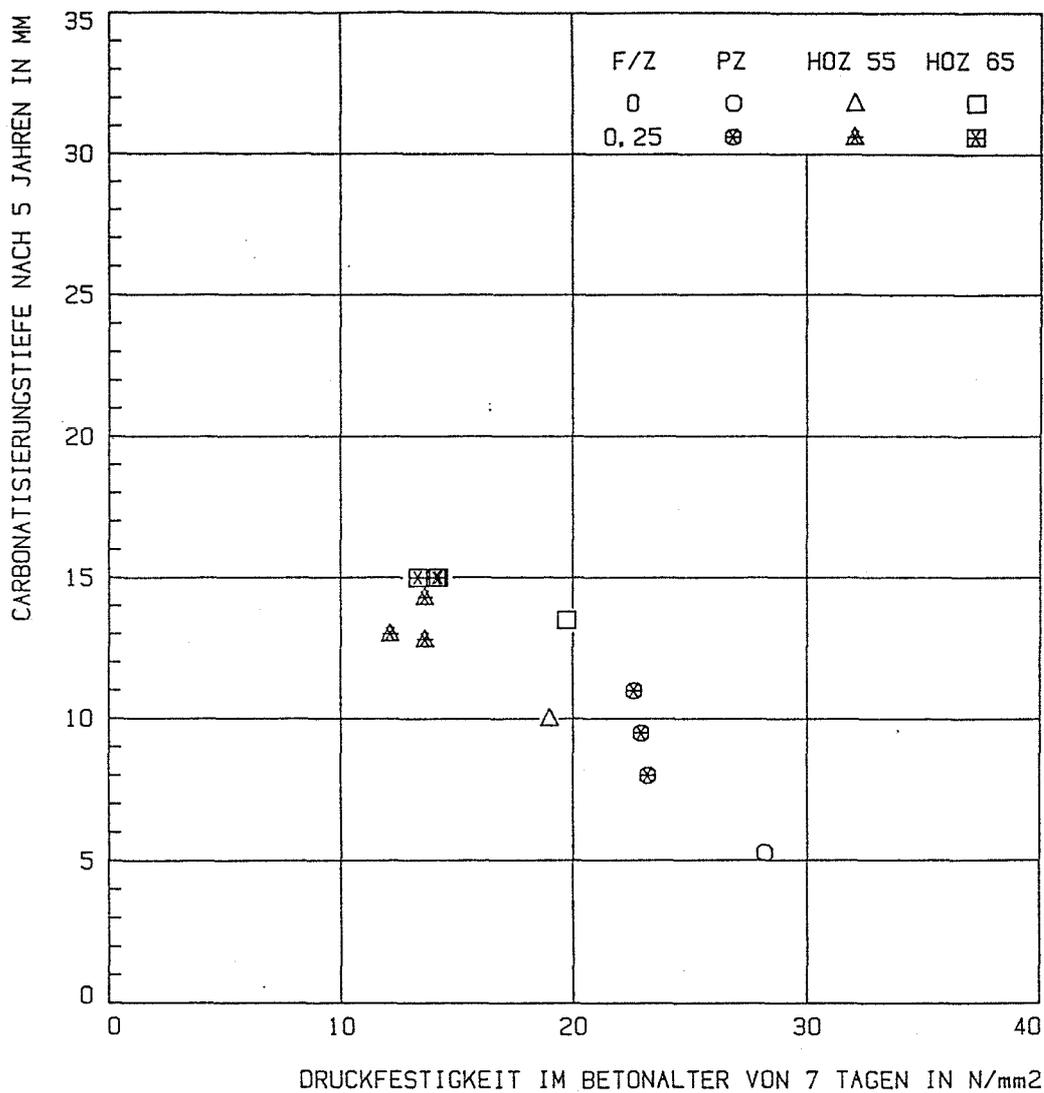


Bild 13: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 3

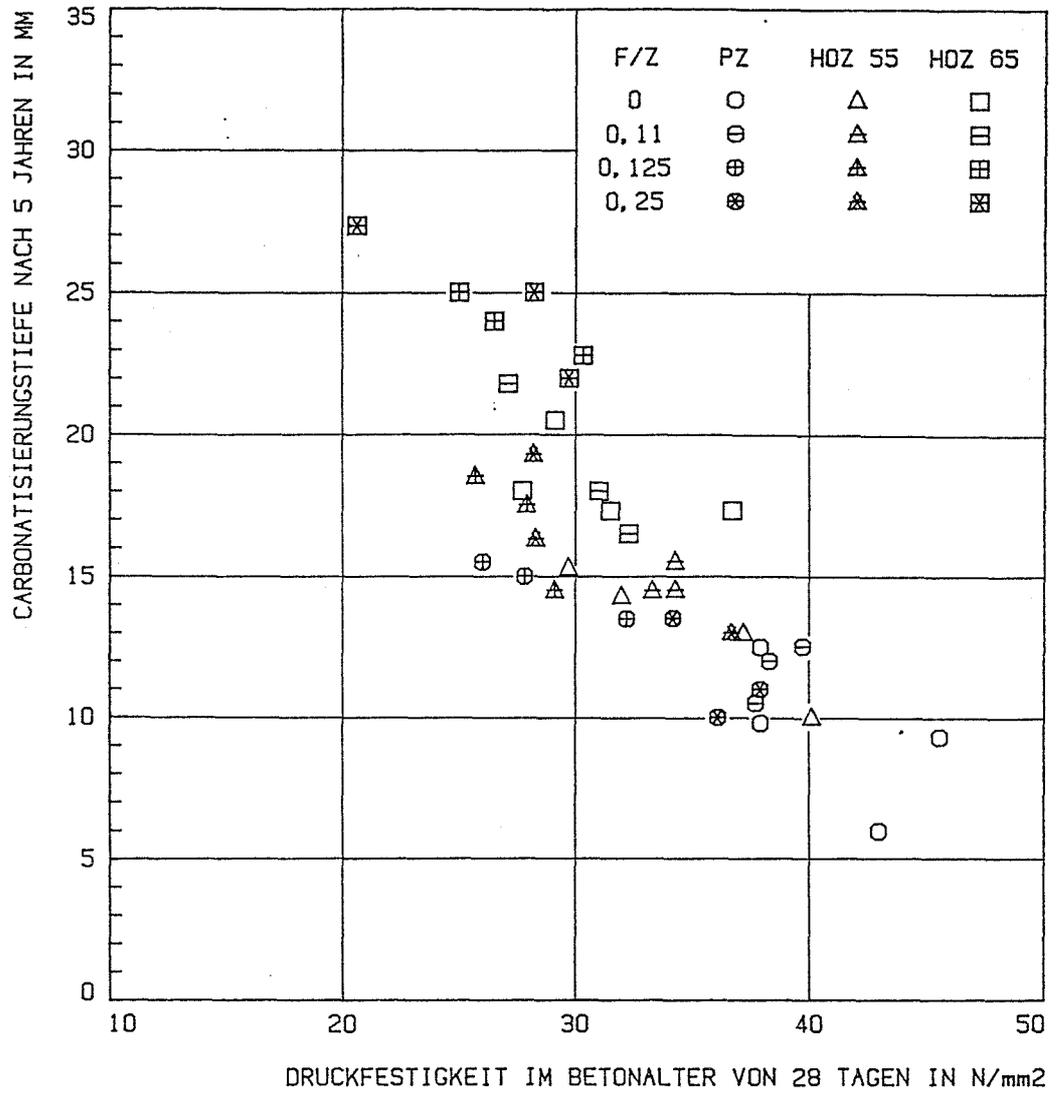


Bild 14: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 1

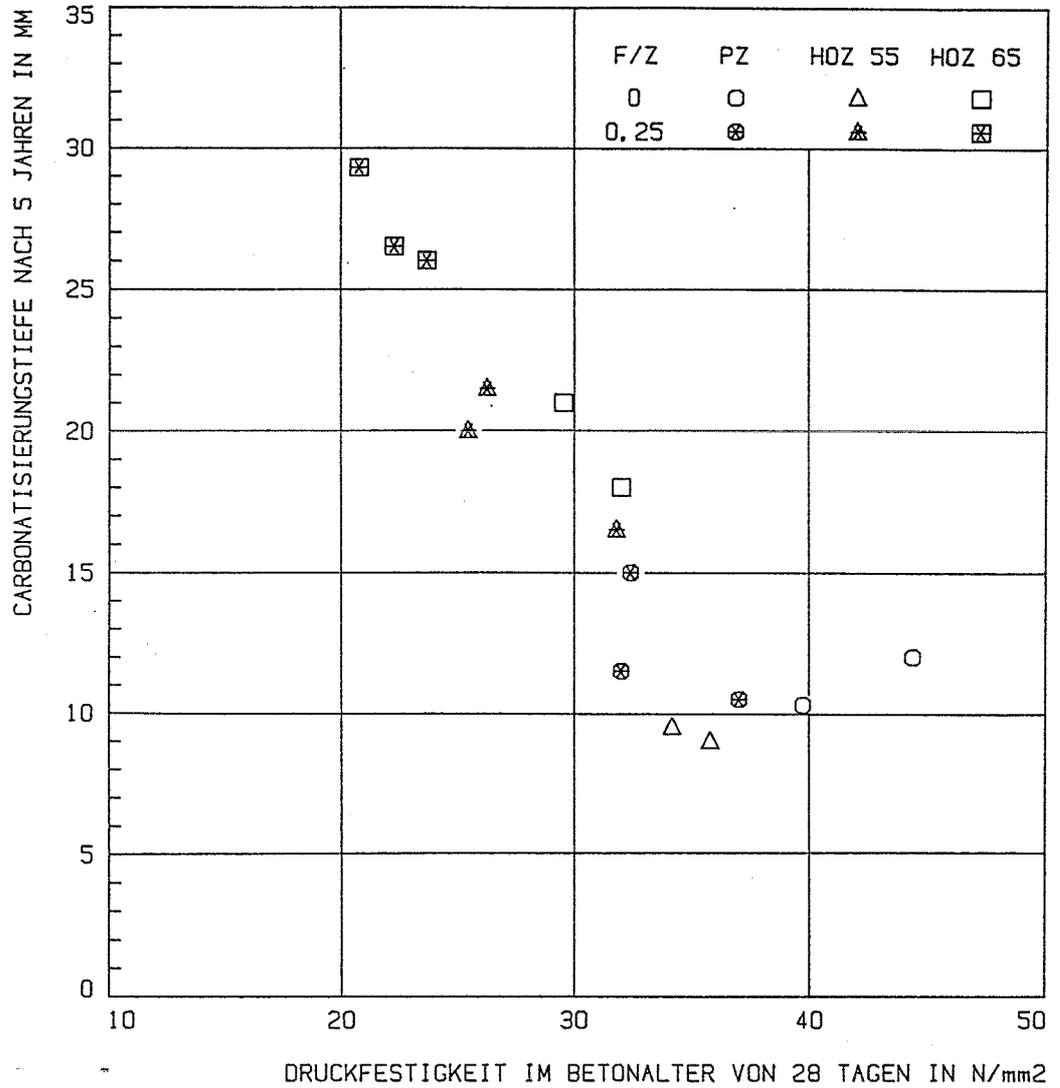


Bild 15: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 2

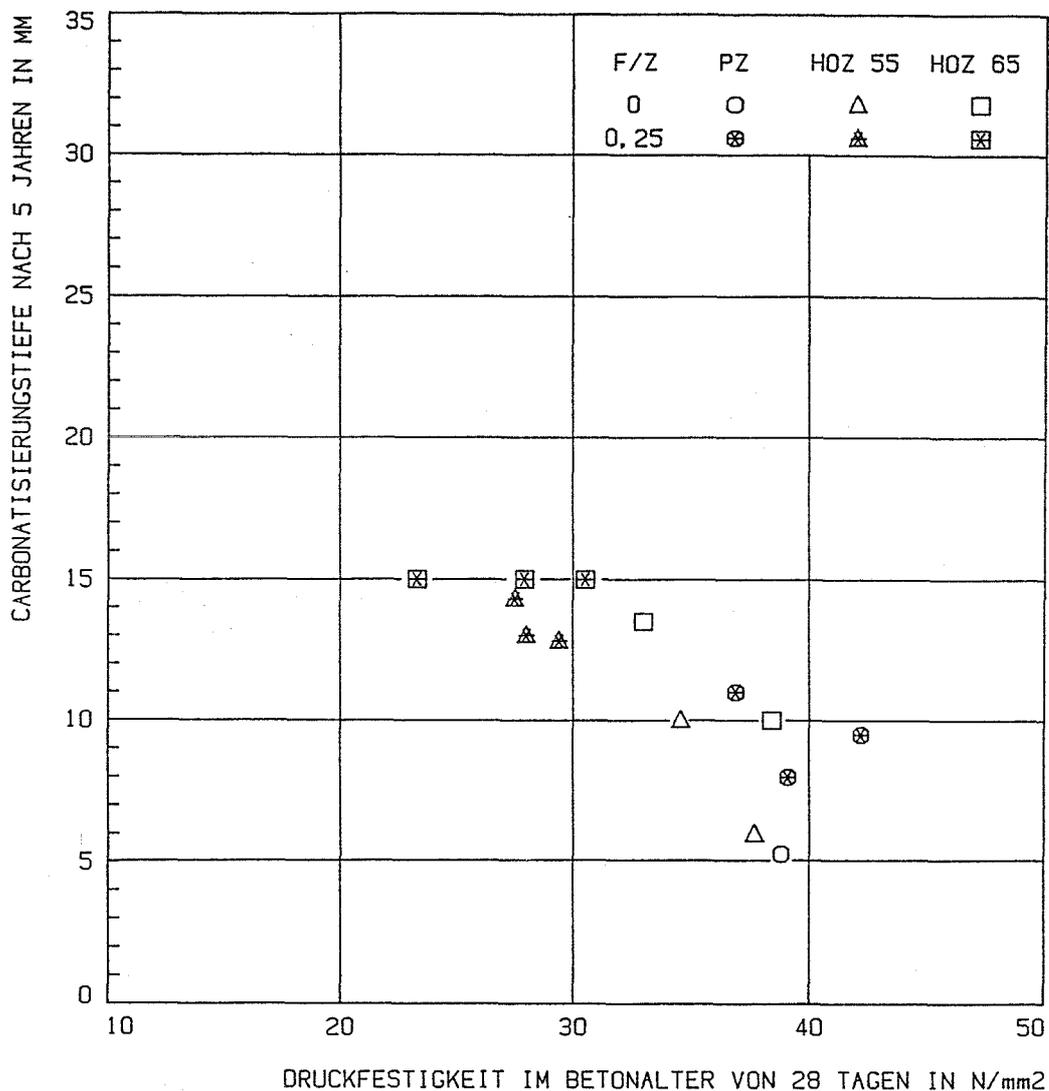


Bild 16: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 3

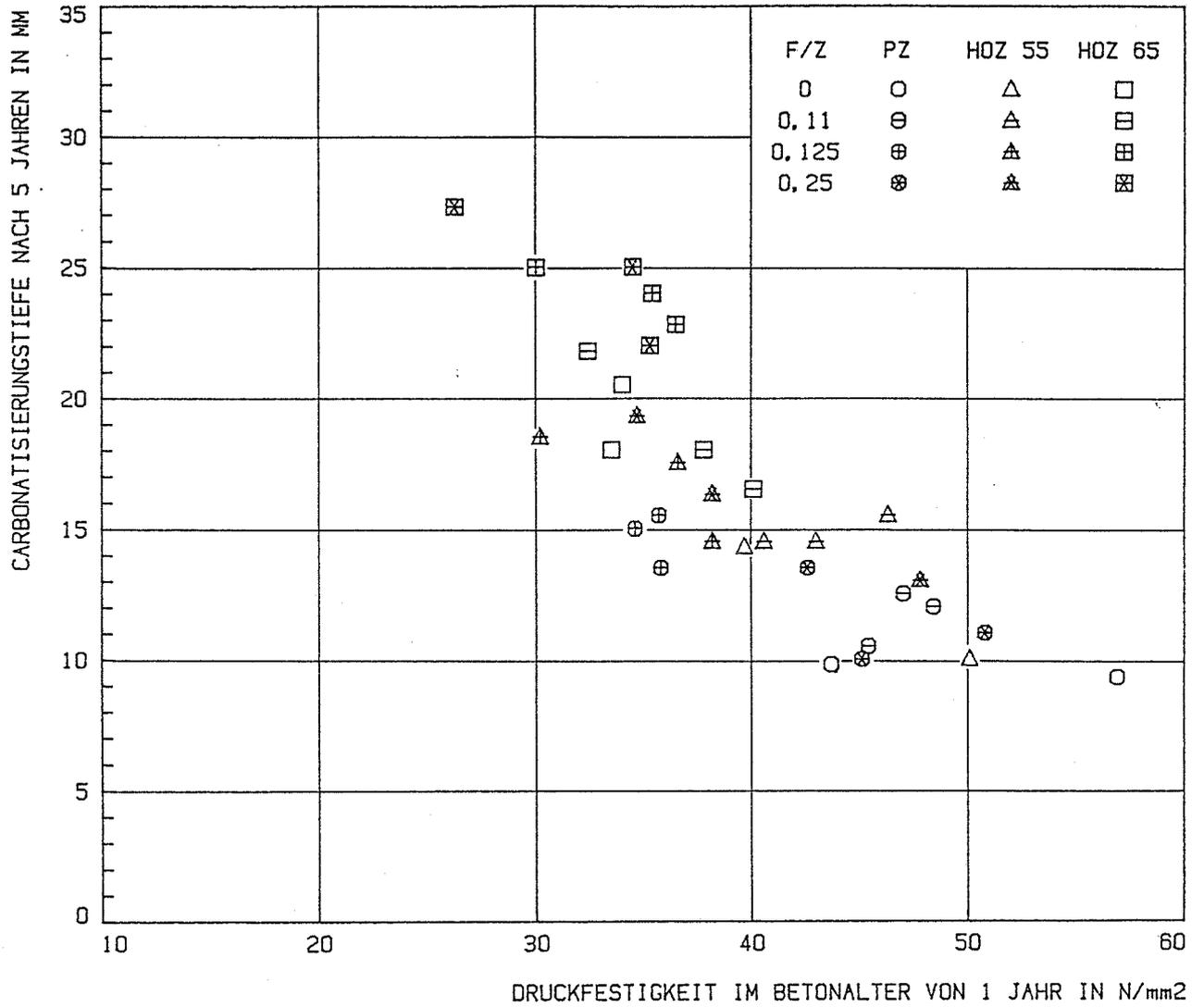


Bild 17: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 1

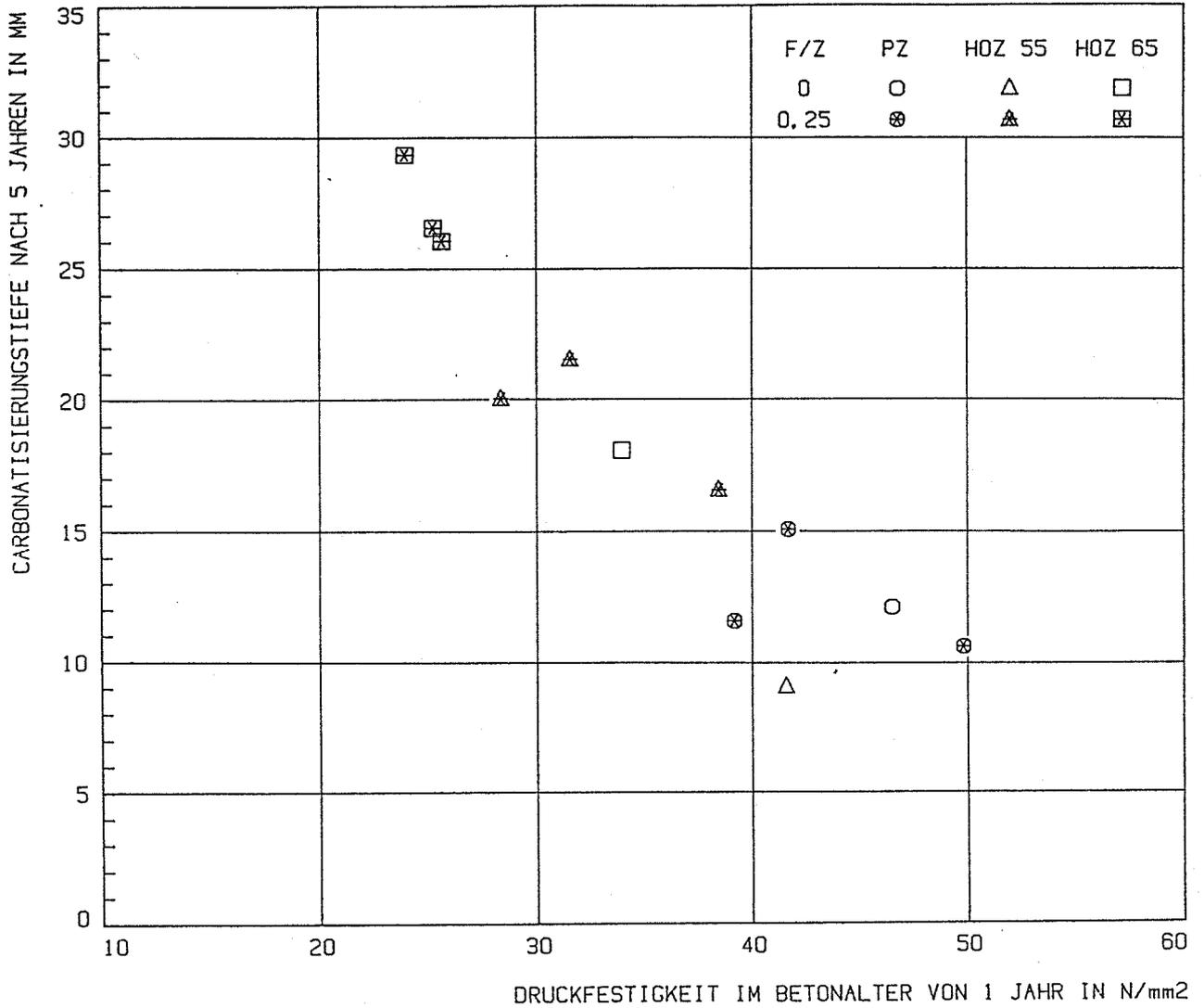


Bild 18: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 2

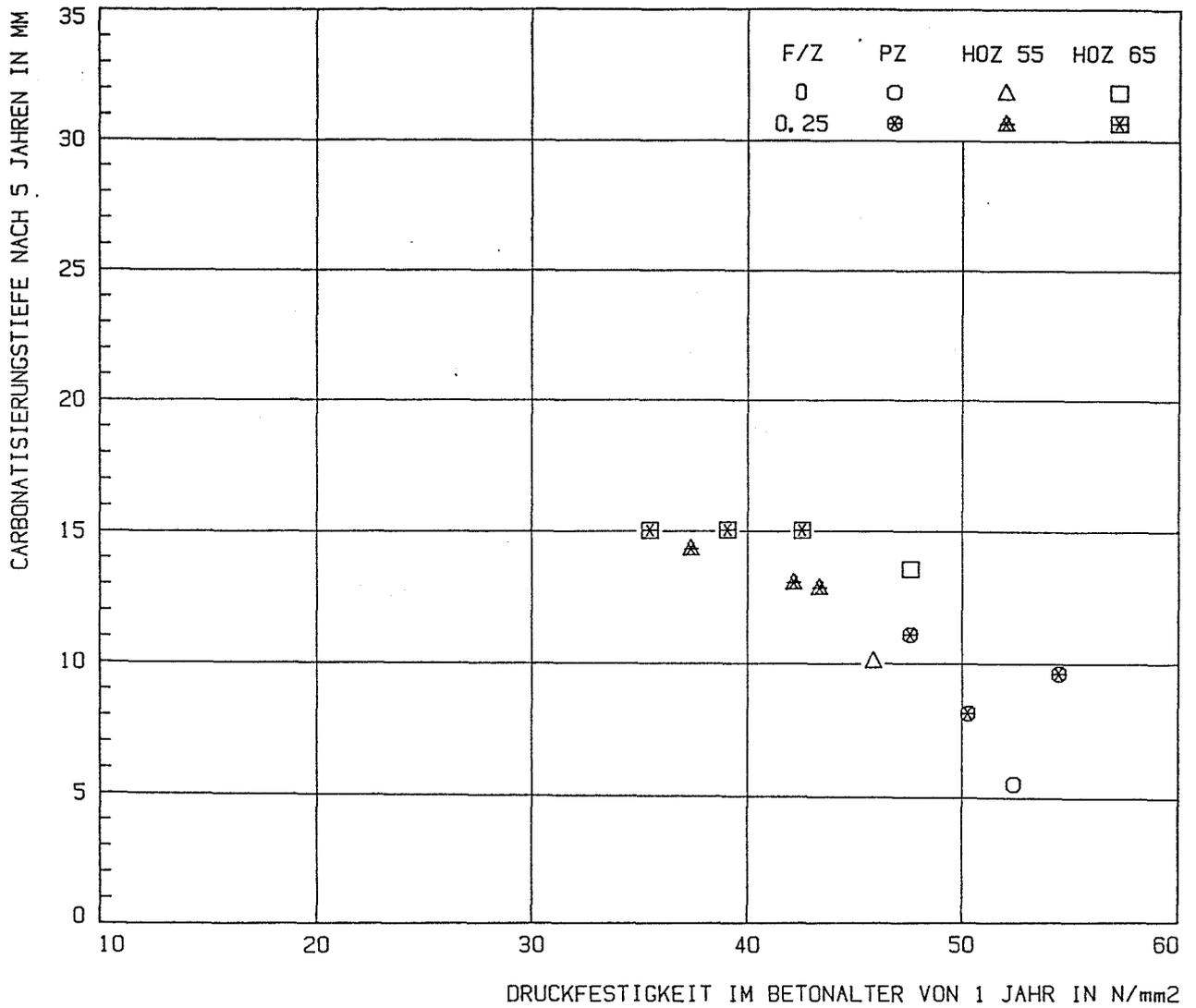


Bild 19: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 3

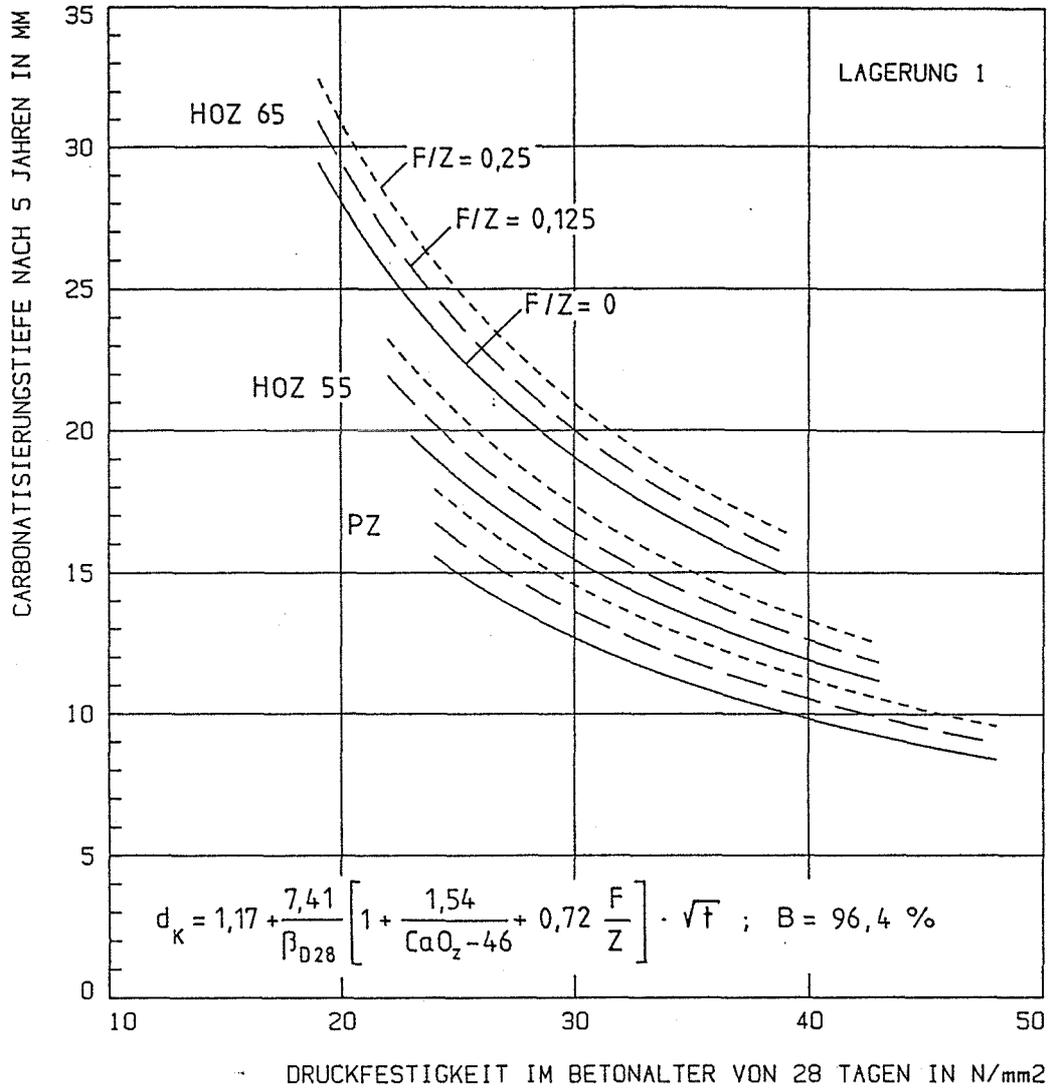


Bild 20: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 5 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1

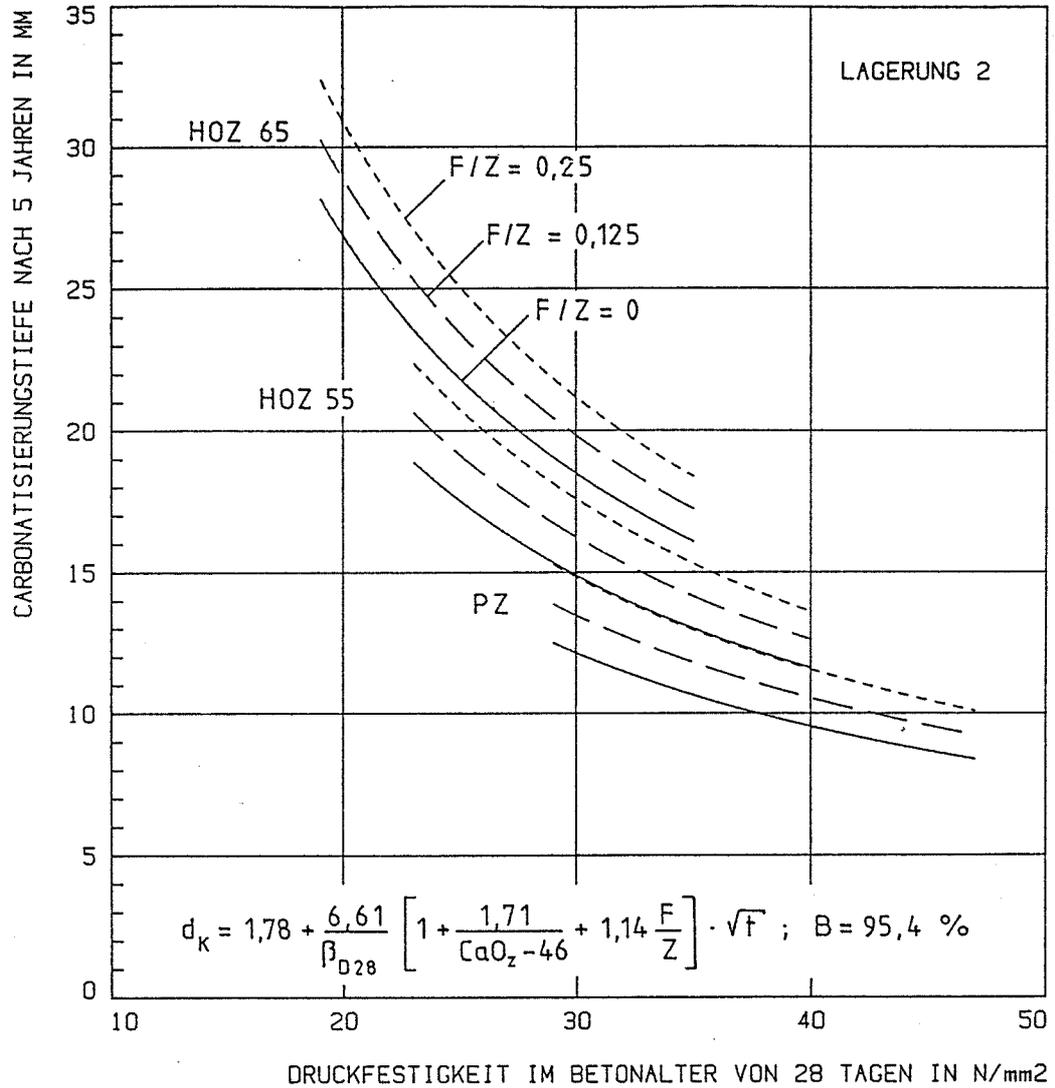


Bild 21: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 5 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 2

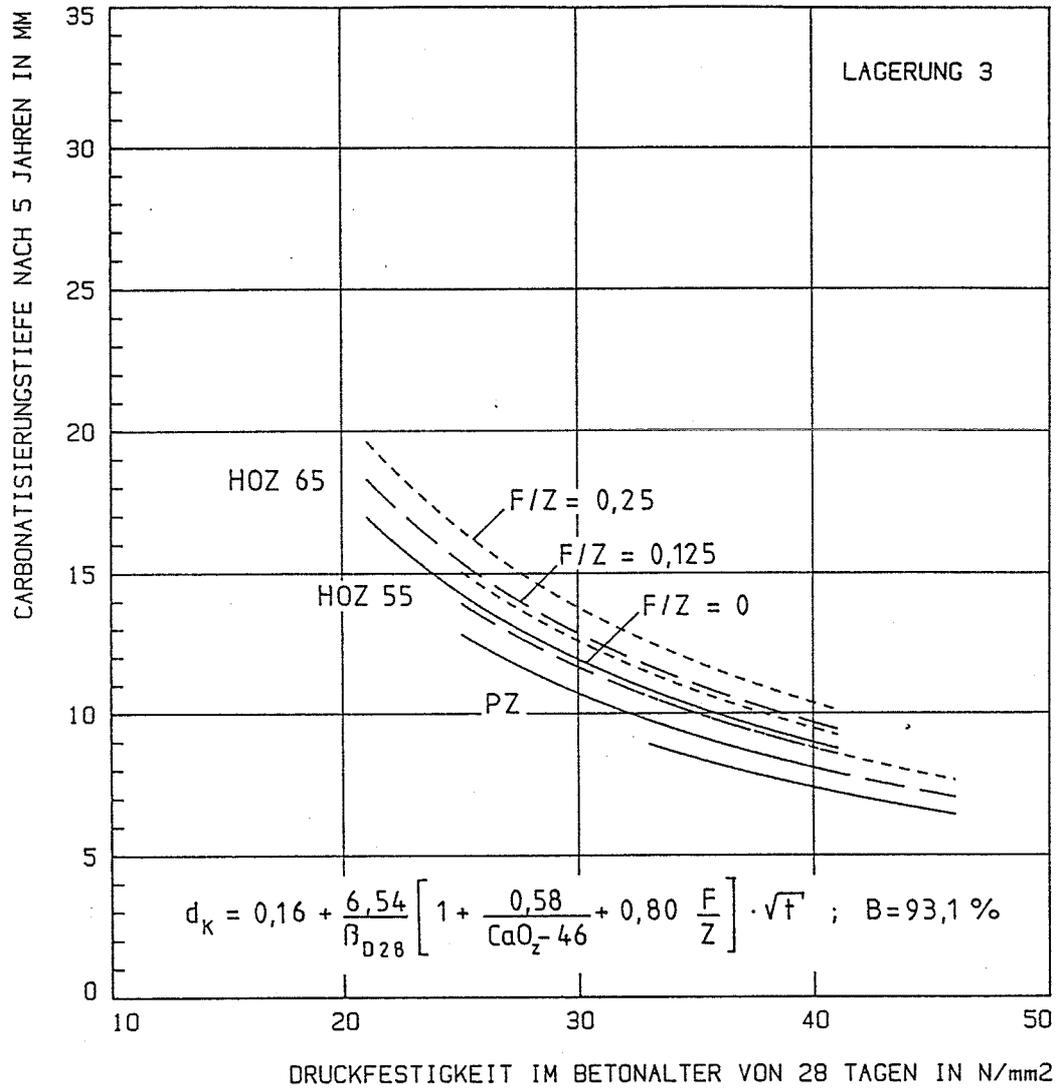


Bild 22: Einfluß von Zement und Flugaschezusatz auf die rechnerischen, festigkeitsbezogenen Carbonatisierungstiefen von Betonen nach 5 Jahren Carbonatisierungsdauer. Lagerung 3

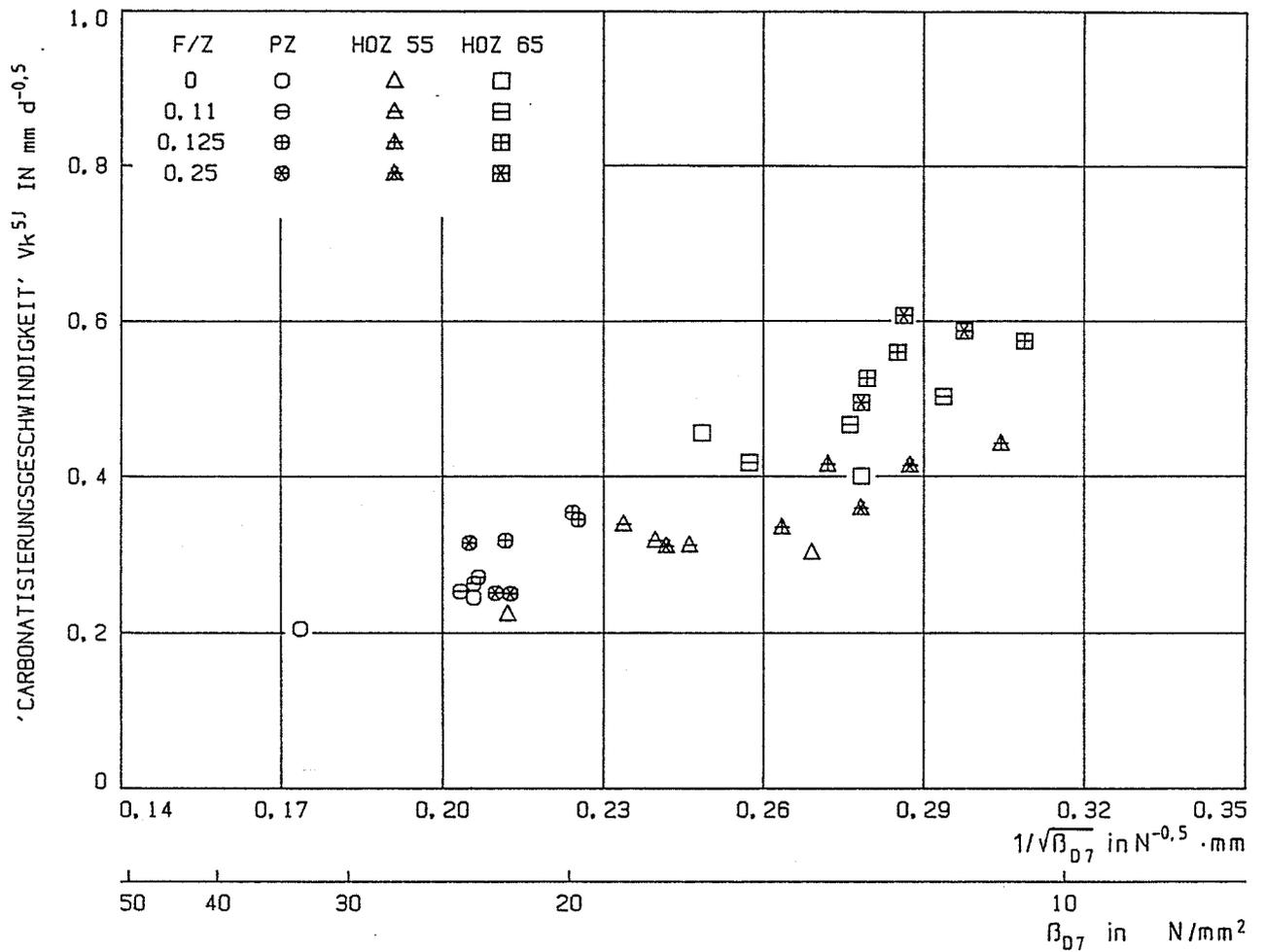


Bild 23: "Carbonatisierungsgeschwindigkeit" v_K in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen (v_K berechnet einschließlich der Meßergebnisse nach 5 Jahren Carbonatisierungsdauer). Lagerung 1

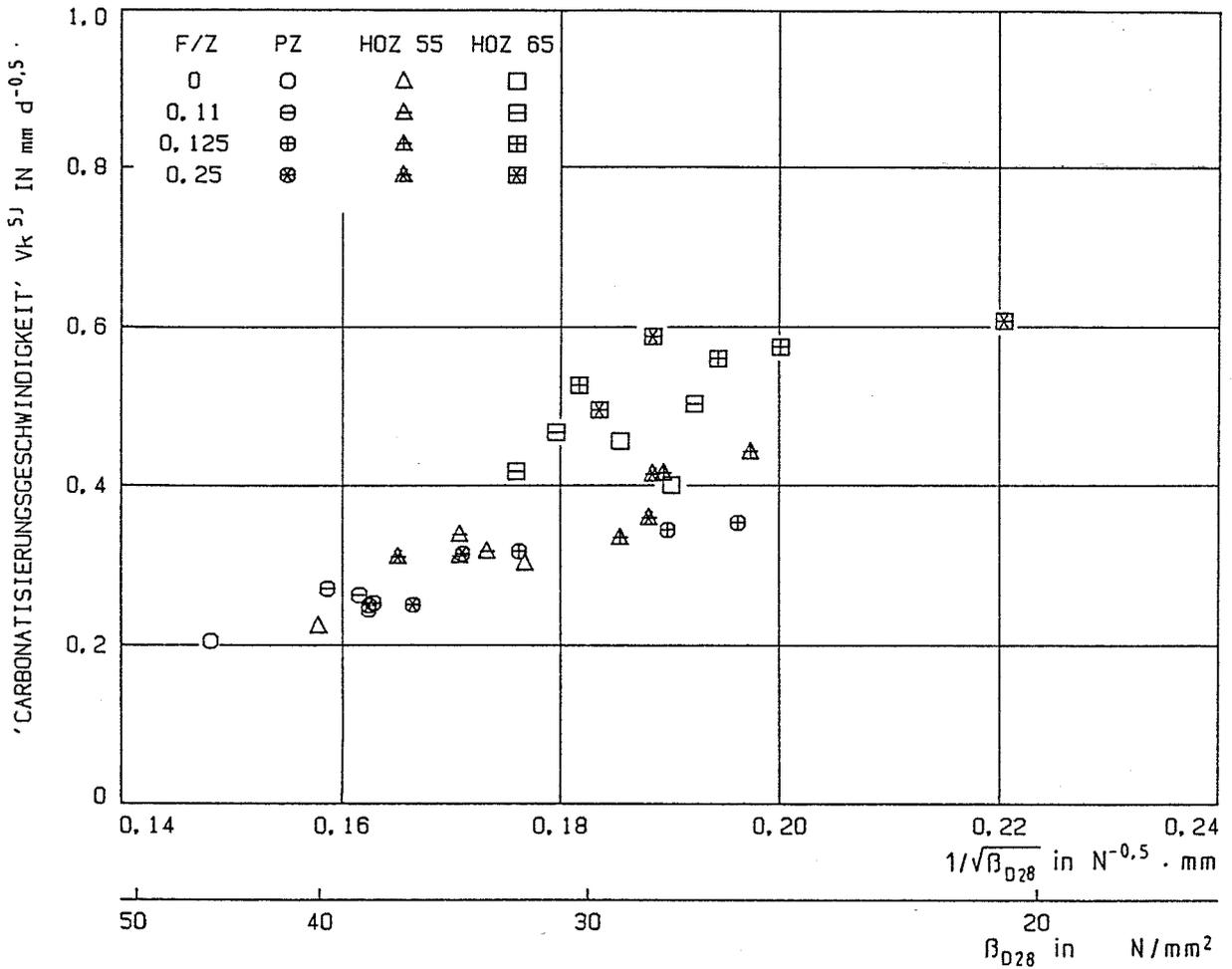


Bild 24: "Carbonatisierungsgeschwindigkeit" v_K in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen (v_K berechnet einschließlich der Meßergebnisse nach 5 Jahren Carbonatisierungsdauer). Lagerung 1

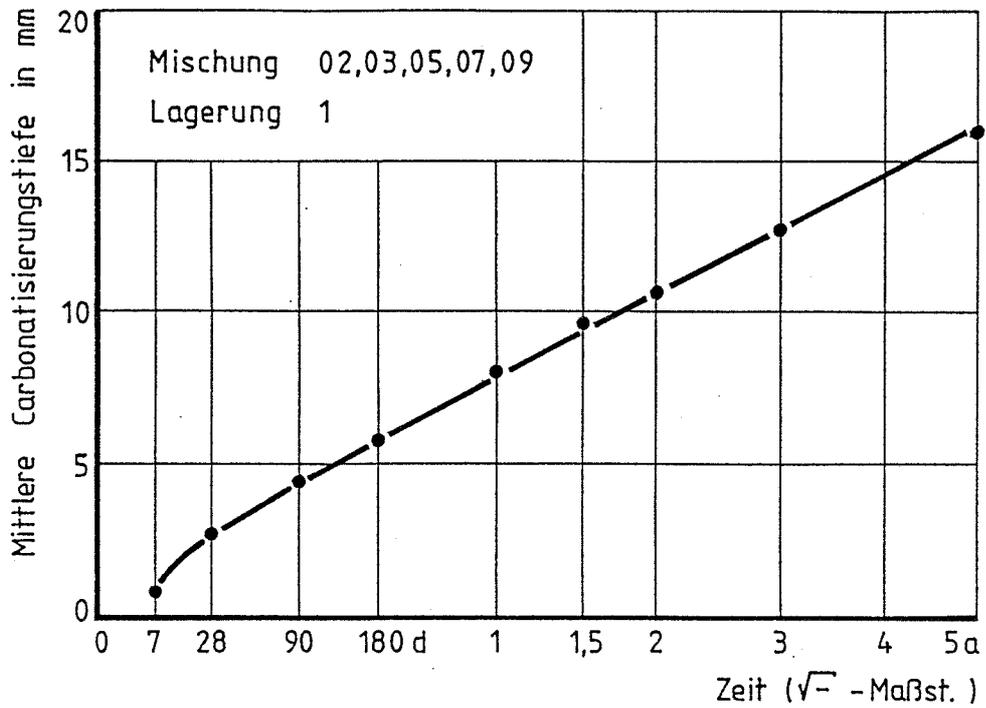


Bild 25: Mittlere Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1

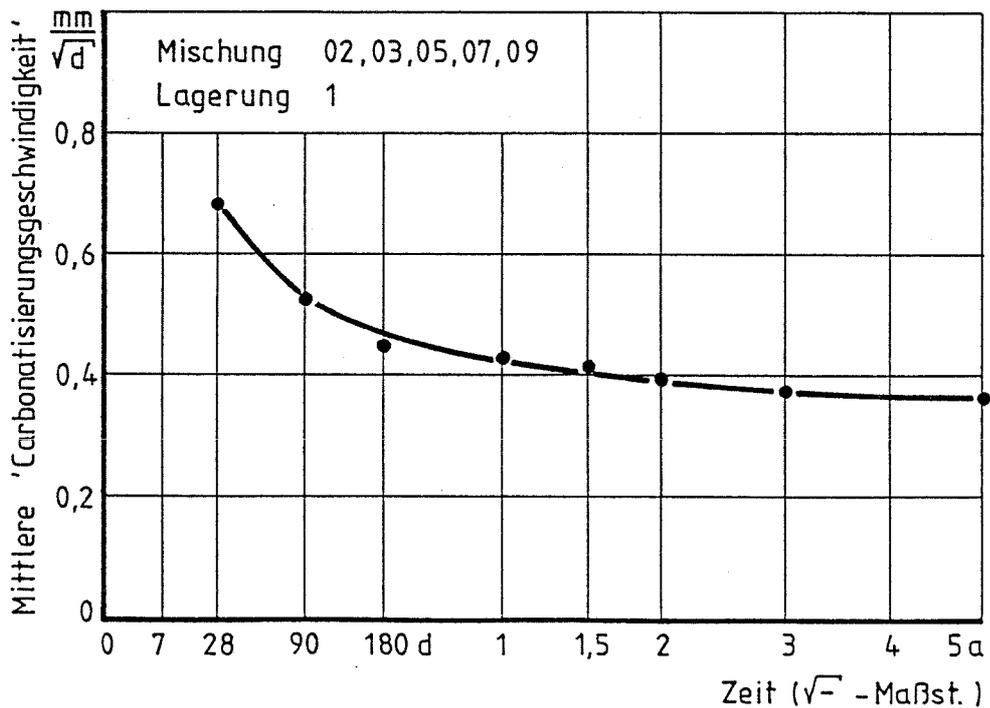


Bild 26: Mittlere "Carbonatisierungsgeschwindigkeiten" in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1

Investigations on the influence of fly ash on the carbonating
behaviour of concrete, 1st supplement

ref. no. IV 1-5-518/87

Summary

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 ealier research work, in which concretes were examined for carbonation over a period of 2 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 a final report [1].

After carbonation periods of 3 und 5 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 5 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 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, available from IRB, Stuttgart

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

Az.: IV 1-5-518/87

Version abrégée

A propos de la délivrance de marques d'épreuve pour des cendres volantes de houille comme produit d'addition de béton selon DIN 1045 ou de l'admission de ciments de cendres volantes, il faut, entre autres, répondre à la question quels sont les effets d'une addition de cendres volantes de houille sur le progrès de carbonatation du béton. A cet effet des bétons avec 5 dosages différents de 3 ciments commerciaux et 3 cendres volantes différentes sous des conditions différentes de cure et d'exposition ont été étudiés dans un travail de recherche précédent. Pendant 2 années durant, les résultats de carbonatation ont été relevés et représentés en détail dans un rapport final [1].

Après les durées complémentaires de 1 et 3 ans, les profondeurs de carbonatation de ces bétons ont été de nouveau mesurées. Le rapport existant contient ces mesures complémentaires sous forme de tableau et une comparaison des profondeurs de carbonatation des bétons de composition semblable, ensuite des bétons de même résistance à la compression après 5 ans de durée de carbonatation. On pourrait décrire le progrès de carbonatation lequel est une fonction du temps sous la considération de la résistance à la compression de béton de 28 jours d'âge, de l'espèce de ciment et les proportions de masse entre la cendre volante et le ciment avec l'aide d'un multiple calcul de régression non linéaire, avec une bonne approximation. En principe les tendances observées après 2 ans de durée de carbonatation se sont confirmées.

[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, référence sur IRB, Stuttgart