

T 1464: Untersuchungen über den Einfluss von Flugaschezusätzen auf das Carbonatisierungsverhalten von Beton

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG
DER UNIVERSITÄT HANNOVER

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

7.58

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND MATERIALPRÜFUNG
Nienburger Straße 3 · 3000 Hannover 1

Fernruf:

Geschäftszimmer: (05 11) 762-3104

Sachbearbeiter: (05 11) 762-3109

Hannover, den 21.05.85

Schlußbericht

zum Forschungsvorhaben

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

Auftraggeber: Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 72 - 76
1000 Berlin 30
Az.: IV/1-5-286/81

Sachbearbeiterin:

Leiter des Forschungsvorhabens:



Dipl.-Ing. E. Scholz



Professor Dr.-Ing. H.-J. Wierig

Der Bericht umfaßt 26 Seiten und einen Anhang von 57 Seiten

INHALT

	<u>Seite</u>
1. <u>Allgemeines</u>	1
2. <u>Versuchsprogramm</u>	2
3. <u>Versuchsmaterial</u>	3
3.1 Betonausgangsstoffe	3
3.1.1 Zemente	3
3.1.2 Flugaschen	3
3.1.3 Zuschlag	4
3.2 Betone	4
3.2.1 Zusammensetzung	4
3.2.2 Herstellung	5
3.2.3 Frischbetoneigenschaften	5
4. <u>Versuchsdurchführung</u>	5
4.1 Nachbehandlung und Exposition (Lagerung)	5
4.2 Druckfestigkeiten	6
4.3 Carbonatisierungstiefen	6
5. <u>Versuchsergebnisse</u>	7
5.1 Druckfestigkeiten	7
5.2 Carbonatisierungstiefen	7
6. <u>Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse</u>	7
6.1 Frischbetoneigenschaften	7
6.2 Betone "vergleichbarer" Zusammensetzung	8
6.2.1 Allgemeines	8
6.2.2 Austausch eines Teiles des Zementgehaltes gegen die gleiche Menge Flugasche	8
6.2.3 Austausch eines Teiles des Zementgehaltes gegen die doppelte Menge Flugasche	9

	<u>Seite</u>	
6.2.4	Zusätzliche Zugabe von Flugasche bei unverändertem Zementgehalt	9
6.2.5	Einfluß der verschiedenen Flugaschen auf die Carbonatisierung	9
6.2.6	Einfluß von Nachbehandlung und Expositions- bedingungen	10
6.3	Betone gleicher Druckfestigkeit	10
6.3.1	Allgemeines	10
6.3.2	Einfluß des Bezugsalters der Betondruck- festigkeit	11
6.3.3	Einfluß des Zementes	12
6.3.4	Einfluß des Flugaschezusatzes	13
6.3.5	Einfluß von Nachbehandlung und Expositions- bedingungen	14
7.	<u>Vergleich der Versuchsergebnisse mit Ergebnissen von Zulassungsprüfungen von Flugaschezementen</u>	14
8.	<u>Literaturangaben über das Carbonatisierungsverhalten von Betonen mit Flugaschezusätzen</u>	17
9.	<u>Zusammenfassung</u>	22
10.	<u>Literatur</u>	24
	<u>Anhang</u>	

1. Allgemeines

Eine der Voraussetzungen für die Dauerhaftigkeit des Verbundbaustoffes Stahlbeton ist der ausreichende Korrosionsschutz der Bewehrung. In diesem Zusammenhang kommt der Carbonatisierung des Betons eine besondere Bedeutung zu. Sofern Bauteile korrosionsfördernden Expositionsbedingungen ausgesetzt sind, muß gewährleistet sein, daß die Carbonatisierungsfront während der Nutzungsdauer des Bauwerkes die Stahleinlagen nicht erreicht.

Im Zusammenhang mit der Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 oder der Zulassung von Flugaschezementen ist daher 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. Bei der Beurteilung wird davon ausgegangen, daß der Carbonatisierungsfortschritt in Abhängigkeit von der Zeit im Rahmen des bisherigen Erfahrungsbereiches über Betone gleicher Druckfestigkeit liegen muß. Dabei wird angenommen, daß das Carbonatisierungsverhalten der Betone unabhängig von der Art des Zementes bzw. des Flugaschezusatzes ausschließlich festigkeitsbezogen betrachtet werden kann /10/.

Zur Absicherung und Erweiterung der Beurteilungskriterien wurden zusätzliche Untersuchungen im Rahmen eines vom Institut für Bautechnik (IfBt), Berlin finanzierten und vom Sachverständigenausschuß "Betontechnologie B3: Betonzusatzstoffe"¹⁾ betreuten Forschungsvorhabens durchgeführt.

1) Dem Sachverständigenausschuß gehören an:

Prof. Dr.-Ing. Bonzel, Prof. Dr.-Ing. Blunk, Dr.-Ing. Kern,
Prof. Scheer, Prof. Dr.-Ing. Ludwig, Dr.-Ing. Lühr,
Prof. Dr.-Ing. Wesche, Prof. Dr.-Ing. Wierig

Das Versuchsprogramm wurde mit den Betreuern am 24.06.81 in Aachen im Detail abgestimmt.

Umfangreiche Ergänzungsversuche mit den gleichen Ausgangsstoffen werden in einem von der VGB Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V., Essen, dem Bundesverband Flugstaub und andere Kraftwerksnebenprodukte e.V. (BVK), Aachen und mit Eigenmitteln des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover finanzierten Forschungsvorhaben durchgeführt. Parallel zu den vom IfBt geförderten Versuchen werden am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (Professor Dr.-Ing. Wesche) Versuche an Feinbetonen durchgeführt.

2. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm sah die Variation folgender Einflußgrößen vor:

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

Tafel 1 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Versuche.

3. Versuchsmaterial

3.1 Betonausgangsstoffe

3.1.1 Zemente

Für die Versuche wurden folgende Zemente verwendet:

PZ 35 F Bonn,
HOZ 35 L Bonn,
HOZ 35 L - NW/HS Oberhausen

Alle drei Zemente sind handelsübliche Erzeugnisse nach DIN 1164 der Festigkeitsklasse Z 35. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung. Mit der Auswahl des Portlandzementes Z 35 F und des Hochofenzementes Z 35 L wurde der Anschluß an frühere, am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen durchgeführte Versuche gewahrt. Der dritte Zement (HOZ 35 L - NW/HS) wurde auf Empfehlung von Herrn Dr. Smolczyk, Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Duisburg, gewählt.

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 wurde nach folgenden Gesichtspunkten getroffen:

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. Im einzelnen wurden die nachstehend aufgeführten Flugaschen verwendet:

Safament F III (geringe Feinheit)
Safament W II (große Feinheit)
Moris Füller (ungünstiges Carbonatisierungsverhalten)

Alle drei Flugaschen besitzen ein Prüfzeichen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045. Die granulometrischen Eigenschaften der Flugaschen sind in Tafel 5, die chemischen Zusammensetzungen in Tafel 6 zusammengefaßt. Weitere Angaben zu den einzelnen Flugaschen können dem Schlußbericht "Ergänzungsversuche zum Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Mörtel" des Instituts für Bauforschung, Aachen (vgl. S. 2) entnommen werden.

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

3.2.1 Zusammensetzung

Mit den in Pkt 3.1 beschriebenen Ausgangsstoffen wurden Betone mit 5 verschiedenen Mischungsverhältnissen hergestellt. Von der Möglichkeit, Betone gleicher Verarbeitbarkeit (z.B. gleiches Ausbreitmaß) zu untersuchen, wurde abgesehen, um an die bisherige Praxis der Untersuchungen in den Zulassungsprüfungen (konstante Mischungsverhältnisse) anzuknüpfen.

Tafel 2 enthält eine Übersicht über die Zusammensetzung und Bezeichnung der Versuchsbetone.

3.2.2 Herstellung

Die einzelnen Betonmischungen wurden in einem Zwangsmischer von 150 l Nenninhalt gemischt. Würfel für Festigkeitsprüfungen und Balken zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefen wurden jeweils aus derselben Mischung hergestellt.

3.2.3 Frischbetoneigenschaften

Die Konsistenzen der Frischbetone, unmittelbar nach dem Mischen als Verdichtungsmaß, Ausbreitmaß und Slump gemessen, sind in den Tafeln 7, 8 und 9 enthalten. Als weitere Kenndaten der Frischbetone sind in Tafel 10 die Frischbetonrohdsichten zusammengestellt.

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^oC/65% r.Lf.

Lagerung 2: 2d Form, 1d Wasser, > 3d Klima 20^oC/65% r.Lf.

Lagerung 3: 2d Form, 5d Wasser, 21d Klima ~20^oC/85% r.Lf.

>28d im Freien unter Dach

Mit der Lagerung 2 wird 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

darüberhinaus im Anschluß an die 5-tägige Wasserlagerung zusätzlich eine 21-tägige 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 von 10 cm x 15 cm x 70 cm zu folgenden Terminen nach Ende der Wasserlagerung gemessen:

7, 28, 90, 180 Tage, 1, 1,5, 2 Jahre.

Weitere Messungen nach 3 Jahren sind vorgesehen. Die Prüfung der Carbonatisierungstiefen wird in Anlehnung an /17/ durchgeführt. Als Indikator wird Phenolphthalein (1-%ig in 70%igem Äthanol) verwendet. Von den Balken werden 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 wird 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 15 bis 18 zusammengestellt. Ergänzend sind in den Tafeln 11 bis 14 die an den Würfeln ermittelten Rohdichten der Betone zu den jeweiligen Festigkeitsprüfterminen angegeben.

5.2 Carbonatisierungstiefen

Die mittleren Carbonatisierungstiefen der Betone (Mittelwerte aus allen 4 Seiten der Probe) sind in den Tafeln 19 bis 32 zusammengestellt.

6. Auswertung und Diskussion der Versuchsergebnisse

6.1 Frischbetoneigenschaften

Der Zusatz von Flugasche verändert i.a. die Frischbetonkonsistenz. In den durchgeführten Versuchen führten die Flugaschen i.M. zu einer etwas weicheren Konsistenz. Insgesamt war die Wirkung jedoch relativ gering und der Umfang der Versuche zu klein, um eine etwaige "wassereinsparende" Wirkung der Flugaschen bestimmen zu können. Da sich die Herstellung der Proben über einen längeren Zeitraum erstreckte, und die Frischbetonkonsistenz erfahrungsgemäß u.a. auch vom Alter des Zementes beeinflusst wird, sind die gemessenen Konsistenzmaße ohnehin nur bedingt vergleichbar.

6.2 Betone "vergleichbarer" Zusammensetzung

6.2.1 Allgemeines

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, die nach 1,5-jähriger Carbonatisierungsdauer gemessen wurden. Den Auswertungen liegen jeweils die 24 Stunden nach dem Besprühen mit Phenolphthalein gemessenen Carbonatisierungstiefen zu Grunde.

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

6.2.2 Austausch eines Teiles des Zementgehaltes gegen die gleiche Menge Flugasche

Die Bilder 1 und 2 zeigen Carbonatisierungstiefen von Betonen, in denen 30 bzw. 60 kg/m³ Zement durch Flugasche ersetzt wurden (Mischungen 02/05/07 und 03/09). In allen Fällen sind die Flugaschebetone tiefer carbonatisiert. Der Austausch von 60 kg/m³ Zement gegen Flugasche führte zu größeren Carbonatisierungstiefen als der Ersatz von 30 kg/m³ Zement durch Flugasche. Die Carbonatisierungstiefen werden außerdem mit abnehmendem Gehalt an Portlandzementklinker des Zementes größer. Betone, in denen Portlandzement mit Flugasche verwendet wurde, verhalten sich etwa wie Betone aus HOZ 35 L ohne Flugasche, Betone aus HOZ 35 L mit Flugasche ähnlich wie Betone

aus HOZ 35 L - NW/HS ohne Flugasche.

6.2.3 Austausch eines Teiles des Zementgehaltes gegen die doppelte Menge Flugasche

Auch bei einem teilweisen Ersatz von Zement (30 kg/m^3) durch die doppelte Menge Flugasche (60 kg/m^3) sind die Flugaschebetone nach 1,5 Jahren tiefer carbonatisiert (Bild 3). Der Einfluß des verwendeten Zementes ist jedoch größer als der des Flugaschezusatzes.

6.2.4 Zusätzliche Zugabe von Flugasche bei unverändertem Zementgehalt

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) wirkt sich auf die Carbonatisierungstiefen insgesamt nur relativ gering aus.

6.2.5 Einfluß der verschiedenen Flugaschen auf die Carbonatisierung

Die Bilder 5, 6 und 7 zeigen den Einfluß der verschiedenen Flugaschen auf die Carbonatisierung. In Bild 5 sind die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 1,5 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. Im Bild 7 sind schließlich sämtliche für die Mischung 07 erhaltenen Versuchsergebnisse einschließlich der Lagerungen 2 und 3 zusammengefaßt.

Es zeigt sich, daß der Einfluß der nach verschiedenen Krite-

rien ausgewählten Flugaschen auf die Carbonatisierungstiefen keine Systematik erkennen läßt. Er liegt im Rahmen der üblichen Streuungen. Dies gilt auch, wenn die Wirkung der Flugaschen jeweils in Kombination mit einem bestimmten Zement betrachtet wird.

6.2.6 Einfluß von Nachbehandlung und Expositionsbedingungen

Der Einfluß unterschiedlicher Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen (Lagerungen) auf den Carbonatisierungsfortschritt wurde an 2 Mischungen (O2 und O7, vgl Tafel 1) untersucht. Bild 8 zeigt die Carbonatisierungstiefen der Betone nach 1,5-jähriger 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 sehr kurzen 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 bei allen untersuchten Betonen unabhängig von der Zusammensetzung etwa im gleichen Verhältnis, d.h. daß sich das generelle Niveau verändert, nicht aber die Wirkung der anderen Einflußgrößen.

6.3 Betone gleicher Druckfestigkeit

6.3.1 Allgemeines

Unterschiedliche Betonzusammensetzungen wirken sich nicht nur auf das Carbonatisierungsverhalten sondern auch auf andere Betoneigenschaften, z.B. auf die Druckfestigkeit aus. Es ist daher üblich, sowohl die Carbonatisierungstiefen von Betonen vergleichbarer Zusammensetzungen als auch von Betonen gleicher Druckfestigkeiten gegenüberzustellen.

In /1/ wurde der Einfluß verschiedenener Zemente auf die Carbonatisierung sowohl an Betonen mit gleichen Mischungsverhältnissen als auch an Betonen gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit dargestellt. Die Unterschiede in den Carbonisierungstiefen der Betone gleicher Festigkeit waren geringer als die von Betonen gleichen Zementgehaltes. Auf Grund der festgestellten Unterschiede wurde jedoch die alleinige Kenntnis der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen zur Beurteilung des Carbonisierungsverhaltens unterschiedlich zusammengesetzter Betone nicht als hinreichend angesehen.

In den Bildern 9 bis 20 sind die Carbonisierungstiefen der Betone nach 1,5-jähriger Carbonisierungsdauer (Meßwerte nach 24 Stunden) 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 (s. z.B. /8/) Sachverhalt, daß die Carbonisierungstiefen von Betonen geringerer Betondruckfestigkeiten tendenziell größer sind als diejenigen von Betonen hoher Druckfestigkeit.

6.3.2 Einfluß des Bezugsalters der Betondruckfestigkeit

In der Literatur /10/, /11/ ist auch die Auffassung vertreten worden, daß die Carbonisierungstiefen unterschiedlich zusammengesetzter Betone dem Kehrwert aus der Quadratwurzel der Betondruckfestigkeiten proportional sind. Auch für Betone mit Flugaschezusätzen sind entsprechende Auswertungen vorgenommen worden /10/. Um diese Auffassung zu überprüfen, sind zunächst unabhängig von der Mischungszusammensetzung für alle Betone gemeinsam Regressionsrechnungen mit dem Ansatz

$$d_K = c_0 + c_1 * \beta_D^{-0,5}$$

durchgeführt worden. Für die Betone der Lagerung 1 sind die Regressionskoeffizienten und die erzielten Bestimmtheitsmaße in Abhängigkeit vom Bezugsalter der Betondruckfestigkeit (2,

7, 28 und 365 Tage) in Tafel 6/1 zusammengefaßt.

Tafel 6/1

Koeffizienten und Bestimmtheitsmaße der Regression

$$d_K^{540} = c_0 + c_1 * \beta_D^{-0,5}$$

(Lagerung 1)

	β_{D2}	β_{D7}	β_{D28}	β_{D365}
c_0	-2,80	-5,46	-15,30	-15,13
c_1	35,77	61,78	140,80	156,00
B	87,0%	73,8%	68,1%	67,6%

Die in Tafel 6/1 aufgeführten Bestimmtheitsmaße zeigen, daß die Korrelation zwischen Carbonatisierungstiefe und Festigkeit vom Bezugsalter der Betondruckfestigkeit abhängig ist. Die größten Bestimmtheitsmaße ergeben sich bei Bezug auf die Frühfestigkeiten im Betonalter von 2 Tagen. Sie nehmen mit größerem Betonalter bis zur 28-Tage-Festigkeit ab und bleiben danach etwa gleich. Es zeigt sich also, daß eine ausreichend gute Übereinstimmung nur bei Bezug auf die Frühfestigkeiten der Betone vorhanden ist. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen bereits frühere Untersuchungen /1/.

6.3.3 Einfluß des Zementes

Sowohl die Carbonatisierung als auch die Betonfestigkeit werden von der Art des verwendeten Zementes (Bindemittels) beeinflusst. Die relativ niedrigen Druckfestigkeiten der Betone

aus "langsamen" Bindemitteln im Alter von 2 Tagen korrespondieren mit höheren Carbonatisierungstiefen. Nach 28 Tagen haben sich die Festigkeiten relativ stärker angeglichen. In den sich überschneidenden Festigkeitsbereichen führen die "langsameren" Bindemittel bei gleicher Betondruckfestigkeit jedoch zu größeren Carbonatisierungstiefen.

Es wurden daher im nächsten Schritt zementspezifische Kenngrößen in die Regression einbezogen, um die Wechselwirkungen zwischen dem Einfluß der Festigkeit und dem Einfluß des Bindemittels auf die Carbonatisierung zu erfassen. Als Bezugsgröße für die Betondruckfestigkeit wurde die Druckfestigkeit nach 28 Tagen gewählt, weil es sich dabei i.a. um die Zielgröße bei der Zusammensetzung einer Betonmischung handelt. Beispielhaft ergab sich für eine Regression mit dem Ansatz

$$d_{K540} = c_0 + c_1 * \beta_{D28}^{-0,5} + c_2 * (w/z) * (CaO - 46)^{-0,5}$$

ein Bestimmtheitsmaß von $B = 85,4\%$ für die Betone der Lagerung 1, d.h. der Ansatz nach Abschnitt 6.3.2 wurde für die 28-Tage-Druckfestigkeit wesentlich verbessert, wenn zusätzlich der Wasserzementwert und der CaO-Gehalt des verwendeten Zementes berücksichtigt wurden.

6.3.4 Einfluß des Flugaschezusatzes

Betone mit Flugaschezusätzen wiesen schwerpunktmäßig auch festigkeitsbezogen geringfügig höhere Carbonatisierungstiefen auf als Betone aus gleichen Zementen ohne Flugasche. Die Flugaschebetone besaßen allerdings teilweise gleichzeitig auch etwas niedrigere Druckfestigkeiten. Die Anzahl der untersuchten verschiedenen Mischungsverhältnisse reichte nicht aus, um größere Überschneidungen der Festigkeitsbereiche von Betonen mit und ohne Flugasche aus dem gleichen Zement zu erhalten. Es läßt sich jedoch feststellen, daß der Einfluß des Flugaschezusatzes auf das festigkeitsbezogene Carbonatisie-

rungsverhalten der Betone i.a. nicht größer war als der verschiedener Zementarten. Der Zusatz von Flugasche zu Portlandzementbetonen führte in den untersuchten Mengenanteilen bei gleicher Druckfestigkeit nicht zu größeren Carbonatisierungstiefen als die Verwendung von HOZ 35 L - NW/HS ohne Flugasche (s. z.B. Bild 15).

6.3.5 Einfluß von Nachbehandlung und Expositionsbedingungen

Bei der relativ kurzen Nachbehandlung (Lagerung 2) treten die größten Carbonatisierungstiefen auf. Bei längerer Nachbehandlung und Exposition im Freien unter Dach (Lagerung 3) sind die absoluten Carbonatisierungstiefen und gleichzeitig die Unterschiede zwischen den untersuchten Betonen am kleinsten (s. z.B. Bild 15, 16, 17).

7. Vergleich der Versuchsergebnisse mit Ergebnissen von Zulassungsprüfungen von Flugaschezementen

Im Rahmen der Zulassungsprüfungen von Flugaschezementen werden anstelle der Carbonatisierungstiefen der Betone zu einem bestimmten Zeitpunkt die als "Carbonatisierungsgeschwindigkeit v_K " bezeichneten Regressionskoeffizienten c_1 der Gleichung $d_K = c_0 + c_1 * t^{-0,5}$ 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.

Eine entsprechende Darstellung der Ergebnisse des Forschungsauftrages ist in den Bildern 21 und 22 für die Betone der Lagerung 1 gegeben. Die Werte v_K wurden einschließlich der nach 1,5 Jahren Carbonatisierungsdauer gemessenen Carbonatisierungstiefen berechnet und über der transformierten Betondruckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen (Bild 21) bzw. 28 Tagen (Bild 22) aufgetragen. Es ergeben sich prinzipiell die

gleichen Aussagen wie in Abschnitt 6.3.

Für einen Vergleich mit den aus den bisherigen Zulassungsprüfungen für Flugaschezemente erhaltenen Werten wurden rechnerisch v_K^{140} -Werte als Mittelwerte aus den einschließlich der Messungen nach 90 und 180 Tagen Carbonatisierungsdauer ermittelten v_K -Werten bestimmt. Mit diesen Werten wurde eine Regression mit dem Ansatz

$$v_K^{140} = c_0 + c_1 * 1/\sqrt{\beta_{D7}}$$

durchgeführt. Die Regressionsgerade sowie der für eine Aussagewahrscheinlichkeit von $1-\alpha = 95\%$ berechnete Vertrauensbereich der Regressionsgeraden (d.h. des Mittelwertes) sind in Bild 23 dargestellt. Berücksichtigt wurden dabei alle Betone der Lagerung 1. Die auf der Grundlage von 12 Zulassungsprüfungen vom IfBt ermittelte Regressionsgerade mit Vertrauensbereich /16/ ist ebenfalls in Bild 25 eingezeichnet.

Die in den Zulassungsprüfungen ermittelten Regressionskoeffizienten v_K sind im Mittel etwas größer als die des Forschungsauftrages. Es muß jedoch bei der Bewertung berücksichtigt werden, daß die gegenübergestellten Betone sich in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Außerdem werden die berechneten v_K -Werte nicht nur von betontechnologischen und klimatischen Einflüssen, sondern auch von den Randbedingungen der Auswertung (Anzahl der einbezogenen Meßtermine, Betonalter) beeinflusst. Die Ursache hierfür ist u.a. darin zu suchen, daß der Carbonatisierungsverlauf zu Beginn der Carbonatisierungsphase noch nicht so weitgehend dem \sqrt{t} -Gesetz entspricht wie bei der Betrachtung längerer Zeiträume. Eine gute Übereinstimmung ist von ständig an der Luft lagernden Betonen nach mehrjähriger Carbonatisierungsdauer bekannt /15/. Es ergeben sich im Mittel zu große Steigungsmaße für den zeitabhängigen Carbonatisierungsverlauf, wenn nur frühe Meßtermine in die Regressionsrechnung eingeführt werden.

Zur Verdeutlichung sind in Bild 24 für sämtliche in der Lagerung 1 untersuchten Betone die Mittelwerte der Carbonatisierungstiefen zu den verschiedenen Meßzeitpunkten über der Quadratwurzel aus der Zeit aufgetragen. Bild 25 zeigt die für jeden Meßtermin berechneten zugehörigen Koeffizienten v_K . Bis zu dem bisher letzten Meßzeitpunkt (2 Jahre) nehmen die Werte für v_K ab. Es ist daher Vorsicht geboten, wenn v_K -Werte miteinander verglichen werden, die für unterschiedliche Betonalter bestimmt wurden, insbesondere dann, wenn sich darunter auch sehr junge Betone befinden.

Versucht man, bei nur kurzen Carbonatisierungsdauern und geringen Carbonatisierungstiefen den Nachteil weniger Meßwerte mit relativ größeren Meßungenauigkeiten dadurch auszugleichen, daß zu Beginn der Carbonatisierungsphase häufiger gemessen wird, so führt diese Häufung von Meßwerten zu einer Überbewertung der Anfangsphase und damit auch bei Hinzunahme späterer Meßwerte zu größeren v_K -Werten.

In den Zulassungsprüfungen liegen der Berechnung von v_K^{140} Meßwerte nach 0, 3, 7, 14, 28, 42, 56, 70, 98, 126, 140 Tagen nach Ende der Wasserlagerung zugrunde. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Carbonatisierungstiefen nach 7, 28, 90 und 180 Tagen gemessen. Im Hinblick auf den hier zu beurteilenden Sachverhalt bedeutet dies, daß nach den vorherigen Ausführungen im großen und ganzen von einer Übereinstimmung der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

8. Literaturangaben über das Carbonatisierungsverhalten von Betonen mit Flugaschezusätzen

In der Literatur wurde mehrfach über das Carbonatisierungsverhalten von Mörteln und Betonen mit Flugaschezusätzen berichtet. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse ist jedoch i.a. nicht möglich, weil entscheidende Randbedingungen der Versuchsdurchführung deutlich voneinander abweichen (Ausgangsmaterial, Beton- oder Mörtelzusammensetzung, Nachbehandlung, Expositionsbedingungen wie z.B. CO_2 -Konzentration) oder unvollständig angegeben sind. Untersucht wurden sowohl Betone gleicher Verarbeitbarkeit, vergleichbarer Mischungsverhältnisse als auch gleicher Festigkeit.

Im folgenden soll daher nur ein kurzer Überblick über eine begrenzte Anzahl von Untersuchungen und die von den Autoren gezogenen Schlußfolgerungen gegeben werden.

Über Carbonatisierungsversuche an Betonen mit Flugasche wird u.a. in /2/, /4/, /5/, /6/, /9/, /10/, /12/, /13/ berichtet. BUTTLER, DECTER und SMITH /3/ führten Untersuchungen ausschließlich an Mörteln durch. Teilweise wurde das Carbonatisierungsverhalten unter erhöhter CO_2 -Konzentration ermittelt /3/, /4/, /5/.

Übereinstimmend wird i.a. auf den generellen Einfluß von Zement- bzw. (Zement + Flugasche)-Gehalt, Wasserzementwert, Nachbehandlung und Expositionsbedingungen verwiesen. Abnehmender (Zement + Flugasche)-Gehalt, hohe Wasserzementwerte sowie verkürzte oder fehlende Nachbehandlung wirken sich bei allen Betonen ungünstig auf die Carbonatisierung aus. Ein "Austausch" von Zement gegen Flugasche im Verhältnis 1:1 führt nach Angaben einiger Autoren ebenfalls zu größeren Carbonatisierungstiefen /4/, /5/, /9/, /12/.

Betone mit gleichen Mischungsverhältnissen wurden in /5/ und /2/ untersucht. A. KOZLOWSKI /5/ berichtet über Carbonatisie-

rungsversuche an Betonen mit konstantem Zementgehalt von 240 kg/m^3 und Wasserzementwerten von 0,70. Neben handelsüblichen Portland- und Hochofenzementen wurden Flugaschezemente aus Portlandzementklinker und Flugasche mit Massenanteilen von 20, 30 und 40 % Flugasche in den Lagerungen "im Freien ungeschützt", "im Freien unter Dach" und bei erhöhter CO_2 -Konzentration von 0,1 - 0,3 % untersucht. Nach 3 Jahren Carbonatisierungsdauer waren die Betone mit einem Anteil von 40 % Flugasche im Zement in allen Lagerungen deutlich tiefer carbonatisiert als die übrigen untersuchten Betone. Bei der Lagerung unter erhöhter CO_2 -Konzentration zeigten auch bereits die Zemente mit 30 % Flugascheanteil größere Carbonatisierungstiefen.

BRAUN/GEBAUER /2/ untersuchten ebenfalls Betone aus Portlandzementen und Flugaschezementen mit Flugaschegehalten von 10 - 20 %. Aus Betonen mit Wasserzementwerten von 0,50, 0,55 und 0,60 wurden 50 mm dicke Platten hergestellt und im Freien gelagert. Nach 5 Jahren betrug die Carbonatisierungstiefen weniger als 3 mm. Es wurde ein linearer Zusammenhang zwischen der Carbonatisierungstiefe und der Festigkeit der Betone zum gleichen Zeitpunkt gefunden, der unabhängig von der Zusammensetzung des Zementes war.

Auf den Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und Carbonatisierung beziehen sich auch einige andere Autoren. Dabei wird sowohl über Versuchsergebnisse berichtet, nach denen bei gleicher Betondruckfestigkeit kein oder kein nennenswerter Einfluß der Flugasche auf die Carbonatisierungstiefen besteht /6/, /9/, /10/, /13/, als auch über gegenteilige Ergebnisse /4/, /12/. Überwiegend wurden in diesen Untersuchungen Betone gleicher Verarbeitbarkeit (Slump, Ausbreitmaß) gegenübergestellt, wobei die Flugasche enthaltenden Betone in der Regel einen etwas niedrigeren Wassergehalt aufwiesen.

In /10/ und /13/ werden Ergebnisse aus Zulassungsprüfungen und weiteren Untersuchungen zusammenfassend ausgewertet. Die

Mörtel und Betone wurden mit festen Mischungsverhältnissen hergestellt und lagerten vor Beginn der Carbonatisierungsphase i.a. 28 Tage unter Wasser. Es wird die Auffassung vertreten, daß das Carbonatisierungsverhalten von Mörteln und Betonen mit Portland- und Hochofenzementen durch Austausch von Zement gegen Flugasche bis zu einem Verhältnis von $F/Z = 0,25$ nicht wesentlich verändert wird, wenn auf gleiche Druckfestigkeiten bezogen wird.

Über Versuchsreihen mit Betonen gleicher Verarbeitbarkeit aus verschiedenen Zementen (PZ 35 F, PZ 45 F, HOZ 35 L) und Flugaschezusätzen berichtet R. LEWANDOWSKI /6/. Bei Zementgehalten von $240 - 360 \text{ kg/m}^3$ variierten die Anteile Flugasche am Gesamtgehalt Zement + Flugasche zwischen 0 und 43 %. Die Betone wurden sowohl im Freien als auch im Labor bei 20°C und 60 - 70 % rel. Luftfeuchte gelagert. Nach 2,5- bis 3-jähriger Carbonatisierungsdauer wurde innerhalb der gleichen Betondruckfestigkeitsklasse B25 "praktisch kaum ein Unterschied zwischen den Betonen mit und ohne Flugaschezusatz" festgestellt.

TSUKAYAMA, ABE und NAGATAKI /12/ untersuchten Betone mit Gesamtgehalten Zement + Flugasche von 250, 290 und 330 kg/m^3 , in denen bei konstanter Frischbetonkonsistenz (Slump) Zement zu 0, 15 und 30 % gegen Flugasche ausgetauscht wurde. Bei gleichem Zement fanden sie unabhängig vom Flugaschezusatz eine lineare Abhängigkeit zwischen Carbonatisierungstiefe und Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen. Für unterschiedliche Zemente ergaben sich verschiedene Ausgleichsgeraden. Bezogen auf die Betondruckfestigkeit nach 2 Jahren waren die Flugaschebetone zum gleichen Zeitpunkt sowohl bei Lagerung im Freien als auch in Innenräumen tiefer carbonatisiert als die Betone ohne Flugasche.

SAMARIN, MUNN und ASHBY /9/ berichten, daß bei Auslagerungsversuchen im Freien in Australien nach 10 bis 20 Jahren Beobachtungsdauer zwischen Betonen mit und ohne Flugasche bei

gleicher Verarbeitbarkeit (Slump) und 28-Tage-Festigkeit keine signifikanten Unterschiede in den Carbonatisierungstiefen aufgetreten waren.

Demgegenüber fanden HO/LEWIS /4/ in Carbonatisierungsversuchen bei erhöhter CO_2 -Konzentration von 4 % CO_2 , daß Betone, in denen ca 20 % des Zementes gegen Flugasche ausgetauscht wurden, bei gleicher Verarbeitbarkeit (Slump) und gleicher Festigkeit nach 28 Tagen tiefer carbonatisiert waren. An Betonen, die im Freien ausgelagert worden waren, wurde nach 10 Jahren eine auf die Carbonatisierung bezogene zementäquivalente Wirkung der untersuchten Flugaschen von 0,46 festgestellt, d.h. Betone wiesen theoretisch dann gleiche Carbonatisierungstiefen auf, wenn Teile des Zementes durch etwa die doppelte Menge Flugasche ersetzt wurden.

Carbonatisierungsversuche an Mörteln aus Portlandzement und Mörteln aus 75 % Portlandzement und 25 % Flugasche wurden von BUTTLER, DECTER und SMITH /3/ durchgeführt. Die Proben wurden nach 4-wöchiger Versiegelung der Oberflächen teilweise starken Austrocknungsbedingungen ausgesetzt und in einer 100-prozentigen CO_2 -Atmosphäre carbonatisiert. Als Ergebnis wird mitgeteilt, daß Mörtel mit Flugasche infolge starker Austrocknung schneller carbonatisieren können als vergleichbare Portlandzement-Mörtel. Zu beachten ist, daß bei den angewendeten Versuchsbedingungen die puzzolanische Reaktion der Flugaschen im Vergleich zu den Zementkomponenten geringer ist. Wurden die Mörtel ohne zusätzliche Austrocknung carbonatisiert, so verhielten sich Mörtel mit und ohne Flugasche ähnlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß mit abnehmenden Zement- bzw. (Zement + Flugasche)-Gehalten und mit zunehmenden Wasserzementwerten größere Carbonatisierungstiefen festgestellt wurden. Ein "Austausch" von Zement gegen Flugasche in gleichen Gewichtsteilen und sonst unveränderten Randbedingungen (MV) erhöhte die Carbonatisierungstiefen ebenfalls. Ver-

kürzte Nachbehandlung vergrößert die Carbonatisierungstiefen bei allen Betonen und wirkt sich insbesondere bei hohen Wasserzementwerten und einer späteren Lagerung bei Luftfeuchten von 50 - 70 % ungünstig aus. Bei einer Exposition im Freien sind die Carbonatisierungstiefen nach gleichen Zeiten i.a. deutlich kleiner. Auf gleiche Festigkeiten der Betone bezogen wird überwiegend die Auffassung vertreten, daß eine hinreichend gute Korrelation zwischen der Betondruckfestigkeit β_{D28} (bzw. β_{D7}) und der Carbonatisierung unabhängig vom Flugaschegehalt besteht. HO/LEWIS kommen dagegen zu dem Schluß, daß bei gleicher 28-Tage-Festigkeit Betone mit Flugaschen tiefer carbonatisieren als reine Portlandzement-Betone. Unterschiede im festigkeitsbezogenen Carbonatisierungsverhalten geben auch TSUKAYAMA, ABE und NAGATAKI an.

9. Zusammenfassung

Es wurden vergleichende Carbonatisierungsversuche an Betonen ohne und mit Zusätzen von Steinkohlenflugaschen durchgeführt. Untersucht wurden Betone mit 5 verschiedenen Mischungsverhältnissen aus 3 handelsüblichen Zementen und 3 verschiedenen Flugaschen unter 3 unterschiedlichen Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen.

Nach 2-jähriger Carbonatisierungsdauer haben die Untersuchungen folgendes ergeben:

Die (zusätzliche) Zugabe von Steinkohlenflugasche zu einem Beton verändert das Carbonatisierungsverhalten gegenüber der Vergleichsmischung ohne Flugasche nur unwesentlich. Wird in einem Beton ein Teil des Zementes (ca 10 bis 20 %) gegen Flugasche ausgetauscht, vergrößern sich die Carbonatisierungstiefen zu vergleichbaren Prüfterminen. Die Carbonatisierungstiefen von Betonen aus Portlandzement, in denen ca 10 bis 20 % des Zementes durch Flugasche ersetzt wurden, werden etwa so groß wie die von Betonen aus Hochofenzement Z 35 L ohne Flugasche. Die Carbonatisierungstiefen von Betonen aus HOZ 35 L, in denen ein Teil des Zementes durch Flugasche ersetzt wird, werden etwa so groß wie die von Betonen aus HOZ 35 L-NW/HS ohne Flugasche. Die größten Carbonatisierungstiefen überhaupt traten bei Betonen aus HOZ 35 L-NW/HS auf, in denen ein Teil des Zementes durch Flugasche ersetzt war.

Werden nicht Betone "vergleichbarer Zusammensetzung" sondern "gleicher 28-Tage-Druckfestigkeit" gegenübergestellt, werden die Unterschiede geringer. Es bleiben jedoch grundsätzlich Unterschiede bestehen. Bei Bezug auf die Frühfestigkeiten im Betonalter von 2 Tagen verschwinden diese Unterschiede praktisch.

Wird anstelle der absoluten Carbonatisierungstiefen die "Carbonatisierungsgeschwindigkeit v_K " im Alter ≤ 140 Tage als Be-

urteilungskriterium für das Carbonatisierungsverhalten benutzt, setzt dies Vereinbarungen über die genauen Randbedingungen der Ermittlung von v_K voraus.

Zwischen den 3 untersuchten Flugaschen waren keine signifikanten Unterschiede im Carbonatisierungsverhalten der Betone zu erkennen.

Verschiedene Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen beeinflussen das generelle Niveau der Carbonatisierungstiefen erheblich. Sie wirken sich jedoch kaum auf die o.e. Unterschiede aus.

Anhand der verfügbaren Literatur wurde ein Überblick über eine begrenzte Anzahl weiterer Untersuchungen zum Carbonatisierungsverhalten von Betonen mit Flugaschezusätzen gegeben.

10. Literatur

- /1/ Autorenkollektiv:
Carbonatisierung des Betons
Beton
Heft 7, 1972, S. 296-299
- /2/ BRAUN, H. und J. GEBAUER:
Möglichkeiten und Grenzen der Verwendung von Flugaschen
im Zement
Zement-Kalk-Gips
Heft 5, 1983, S. 254-258
- /3/ BUTTLER, F.G., DECTER, M.H., SMITH, G.R.:
Studies on the Desiccation and Carbonation of Systems
Containing Portland Cement and Fly Ash
Proceedings of the CANMET/ACI First International
Conference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag
and other Mineral By-Products in Concrete,
31.7. - 5.8. 1983, Montebello, Quebec, Canada
ACI Publication SP 79, Vol. I, SP 79-19
- /4/ HO, D.W.S and R.K. LEWIS:
Carbonation of Concrete Incorporating Fly Ash or a Che-
mical Admixture
Proceedings of the CANMET/ACI First International Con-
ference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and
other Mineral By-Products in Concrete,
31.7. - 5.8. 1983, Montebello, Quebec, Canada
ACI Publication SP 79, Vol. I, SP 79-17
- /5/ KOZLOWSKI, A.:
Flugasche aus kalorischen Werken und deren Einsatz
in Österreich
Zement und Beton
Heft 4, 1984, S. 167-173

- /6/ LEWANDOWSKI, R.:
Einfluß unterschiedlicher Flugaschequalitäten und
-zugabemengen auf die Betoneigenschaften
Betonwerk + Fertigteil-Technik
Heft 1, 1983, S. 11-15
- /7/ MEYER, A., WIERIG, H.-J., HUSMANN, K.:
Karbonatisierung von Schwerbeton
Schriftenreihe DAfStb
Heft 182
- /8/ NISCHER, P.:
Einfluß der Betongüte auf die Karbonatisierung
Zement und Beton
Heft 1, 1984, S. 11-15
- /9/ SAMARIN, A., R.L. MUNN and J.B. ASHBY:
The Use of Fly Ash in Concrete - Australien Experience
Proceedings of the CANMET/ACI First International Con-
ference on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and
other Mineral By-Products in Concrete,
31.7. - 5.8. 1983, Montebello, Quebec, Canada
ACI Publication SP 79, Vol. I, SP 79-6
- /10/ SCHUBERT, P. und W. VOM BERG:
Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen als Betonzusatz-
stoff nach DIN 1045, Teil 2
Betonwerk + Fertigteil-Technik
Heft 11, 1979, S. 692 - 696
- /11/ SMOLCZYK, H.G.:
Explorations to the German longtime-study on the rate
of carbonation
RILEM Symposium "Carbonation of Concrete"
Wexham Springs, England, 1976

- /12/ TSUKAYAMA, R., ABE, H., NAGATAKI, S.:
Long-term experiments on the neutralization of concrete
mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement
International Symposium on Chemistry of Cement
VII -ISCC, Paris 1980
- /13/ WESCHE, K., P. SCHUBERT, J.W. WEBER:
Zur Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton bei Zusatz
von Steinkohlenflugaschen
Betonwerk + Fertigteil-Technik
Heft 6, 1984, S. 367-374
- /14/ WIERIG, H.-J.:
Schreiben vom 21. 04. 1980 an Herrn Professor Dr.-Ing.
Schimmelwitz
- /15/ WIERIG, H.-J.:
Longtime studies on the carbonation of concrete under
normal outdoor exposure
Proceedings of the RILEM Seminar "Durability of
Concrete Structures under normal outdoor exposure"
Hannover, 26.- 29.03.1984
- /16/ -
Anlage 12 der Beratungsunterlagen des SVA "Betontechno-
logie B1: Bindemittel" für die 10. Sitzung am
16. 11. 1984 in Hannover
- /17/ -
Measurement of hardened concrete carbonation depth
RILEM Draft Recommendation CPC-18
Materiaux et Constructions
Vol. 17 - No 102, Nov.-Dez. 1984

A N H A N G

Tafel 1

Übersicht über das Versuchsprogramm

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Lagerung									
			1			2			3			
			Zement			Zement			Zement			
			1	2	3	1	2	3	1	2	3	
02	300/0	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
03	270/0	-	x	x	x							
05	270/30	1 2 3	x	x	x							
07	240/60	1 2 3	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
09	240/30	1 2 3	x	x	x							

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

Flugasche 1: Safament F III
 Flugasche 2: Safament W II
 Flugasche 3: Moris Füller

Lagerung 1: 2d Form, 5d Wasser, >7d Klima 20^oC/65% r.Lf.
 Lagerung 2: 2d Form, 1d Wasser, >3d Klima 20^oC/65% r.Lf.
 Lagerung 3: 2d Form, 5d Wasser, 21d Klima ~20^oC/85% r.Lf.
 >28d im Freien unter Dach

Tafel 2

Zusammensetzung der Versuchsbetone

Übersicht

Bez.	Anteile in kg/m ³				Massenverhältnisse		
	Zement Z	Flugasche F	Zuschlag G	Wasser W	W/Z	F/Z	W/(Z+F)
02	300	--	1860	180	0,60	--	0,60
03	270	--	1880	180	0,67	--	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

Tafel 3

Ergebnisse der Zementprüfungen nach DIN 1164

Eigenschaft	Prüfergebnis bei 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
Druckfestigkeit in N/mm ² nach 2d 7d 28d	23,1 - 47,8	- 25,6 49,5	- 26,7 53,3

Tafel 4

Chemische und mineralogische Zusammensetzung
der Zemente

Bestandteil	Anteil in M.-% bei 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	58,78	--	--
C ₂ S	14,57	--	--
C ₃ A	6,35	--	--
C ₄ AF	8,27	--	--
Hüttensandgehalt	--	54	66

Tafel 5

Granulometrische Zusammensetzung der Flugaschen*)

Prüfgröße	Prüfergebnis bei 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 Gesteinshüttenkunde RWTH Aachen.

Tafel 6

Chemische Zusammensetzung der Flugaschen*)

Bestandteil	Anteil in M.-% bei Flugasche		
	1	2	3
SiO ₂	48,1	52,3	55,8
Al ₂ O ₃	27,2	28,3	26,3
Fe ₂ O ₃	10,4	7,76	6,67
CaO	2,88	1,65	3,06
K ₂ O	5,60	5,85	4,75
Na ₂ O	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 ₂ O ₃ **)	0,33	0,21	0,13

- *) Nach Untersuchungen des Instituts für Gesteins-
hüttenkunde RWTH Aachen.
- **) Die gekennzeichneten Werte wurden nach DIN 1164,
alle anderen Werte röntgenfluoreszenzanalytisch
oder atomabsorptionsspektrofotometrisch bestimmt

Tafel 7

Verdichtungsmaße der Frischbetone nach dem Mischen

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	n.b.	1,16	1,19	n.b.	1,16	1,12	1,16	1,14	1,15
			1,20	1,16	1,14	1,20	1,17	1,16	1,15	1,16	n.b.
03	270/0	-	1,15	1,17	1,18	—			—		
			1,16	1,16	n.b.	—			—		
05	270/30	1	1,17	1,12	1,15	—			—		
		2	1,17	1,13	1,08	—			—		
		3	1,17	1,17	1,10	—			—		
07	240/60	1	1,16	1,09	1,15	1,16	1,09	1,15	1,08	1,11	1,10
		2	1,07	1,16	1,14	1,07	1,16	1,14	1,07	1,08	1,11
		3	1,13	1,10	1,15	1,13	1,10	1,15	1,14	1,10	1,15
09	240/30	1	1,19	1,12	1,17	—			—		
		2	1,17	1,12	1,15	—			—		
		3	1,17	1,08	1,18	—			—		

Tafel 8

Ausbreitmaße der Frischbetone nach dem Mischen in cm

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	35,5	34,0	36,5	35,5	34,0	38,0	37,0	34,0	36,0
			37,0	35,5	33,5	37,0	35,5	35,0	42,5	35,5	33,5
03	270/0	-	-	37,5	42,0						
			38,0	37,5	37,0	—			—		
05	270/30	1	36,0	33,5	35,0						
		2	36,0	36,0	35,0						
		3	35,0	33,5	30,0						
07	240/60	1	32,0	33,5	29,5	32,0	33,5	29,5	36,5	36,0	34,0
		2	37,0	33,0	30,0	37,0	33,0	30,0	37,0	38,0	32,0
		3	34,0	36,5	30,5	34,0	36,5	30,5	35,0	36,0	31,0
09	240/30	1	37,0	-	37,0						
		2	38,0	41,0	38,5						
		3	36,0	39,5	36,0						

Tafel 9

Slumpmaße der Frischbetone nach dem Mischen in cm

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	n.b. 1,40	1,20 2,15	n.b. 2,60	n.b. 1,40	1,20 1,85	1,50 4,00	1,50 2,25	1,90 2,15	2,30 2,60
03	270/0	-	n.b. 1,10	0,50 2,75	0,60 2,50	—			—		
05	270/30	1 2 3	n.b. n.b. n.b.	2,50 2,60 2,00	0,90 3,00 0,60	—			—		
07	240/60	1 2 3	n.b. 6,70 4,60	4,50 2,30 4,30	1,35 2,30 2,10	n.b. 6,70 4,60	4,50 2,30 4,30	1,35 2,30 2,10	4,00 6,55 3,40	6,10 5,55 5,60	4,30 4,70 4,00
09	240/30	1 2 3	n.b. n.b. n.b.	2,50 1,50 5,00	0,65 0,70 0,50	—			—		

Tafel 10

Frischbetonrohddichten in kg/dm³

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,35 2,35	2,34 2,35	2,35 2,39	2,35 2,35	2,34 2,34	2,35 2,35	2,35 2,36	2,34 2,35	2,36 2,39
03	270/0	-	2,34 2,34	2,33 2,34	2,34 2,36	—			—		
05	270/30	1 2 3	2,36 2,36 2,35	2,34 2,35 2,34	2,34 2,34 2,34	—			—		
07	240/60	1 2 3	2,35 2,36 2,36	2,35 2,35 2,34	2,35 2,34 2,34	2,35 2,36 2,36	2,35 2,35 2,34	2,35 2,34 2,34	2,36 2,37 2,35	2,37 2,35 2,34	2,34 2,34 2,35
09	240/30	1 2 3	2,34 2,34 2,34	2,35 2,35 2,34	2,33 2,34 2,33	—			—		

Tafel 11

Rohdichten im Betonalter von 2 Tagen in kg/dm³

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,33 n.b.	2,36 n.b.	2,33 n.b.	2,34 n.b.	2,36 n.b.	2,36 n.b.	2,38 n.b.	2,34 n.b.	2,34 n.b.
03	270/0	-	2,32 n.b.	2,34 n.b.	2,32 n.b.	—			—		
05	270/30	1 2 3	2,33 2,33 2,33	2,34 2,35 2,35	2,34 2,33 2,35	—			—		
07	240/60	1 2 3	2,34 2,35 2,35	2,37 2,36 2,34	2,34 2,35 2,34	2,33 2,35 2,36	2,35 2,38 2,35	2,33 2,33 2,33	2,33 2,34 2,34	2,35 2,32 2,31	2,34 2,32 2,34
09	240/30	1 2 3	2,33 2,34 2,34	2,35 2,35 2,34	2,34 2,35 2,33	—			—		

Tafel 12

Rohdichten im Betonalter von 7 Tagen in kg/dm³

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,35 n.b.	2,35 n.b.	2,32 n.b.	2,32 n.b.	2,32 n.b.	2,32 n.b.	2,40 n.b.	2,36 n.b.	2,36 n.b.
03	270/0	-	2,36 n.b.	2,36 n.b.	2,36 n.b.	—			—		
05	270/30	1	2,36	2,34	2,36	—			—		
		2	2,36	2,38	2,36	—			—		
		3	2,34	2,37	2,35	—			—		
07	240/60	1	2,34	2,35	2,29	2,31	2,32	2,28	2,34	2,36	2,34
		2	2,35	2,39	2,37	2,34	2,35	2,30	2,35	2,35	2,34
		3	2,35	2,36	2,34	2,31	2,30	2,27	2,34	2,32	2,34
09	240/30	1	2,31	2,36	2,34	—			—		
		2	2,32	2,37	2,35	—			—		
		3	2,32	2,35	2,33	—			—		

Tafel 13

Rohdichten im Betonalter von 28 Tagen in kg/dm³

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,32	2,34	2,29	2,31	2,31	2,30	2,35	2,33	2,35
			2,32	2,31	2,32	2,30	2,30	2,30	2,36	2,33	2,36
03	270/0	-	2,31	2,31	2,29	—			—		
			n.b.	2,29	2,29						
05	270/30	1	2,31	2,30	2,31	—			—		
		2	2,31	2,32	2,30	—			—		
		3	2,30	2,33	2,31	—			—		
07	240/60	1	2,30	2,30	2,25	2,30	2,29	2,28	2,32	2,31	2,34
		2	2,33	2,34	2,30	2,33	2,31	2,27	2,32	2,32	2,32
		3	2,31	2,30	2,31	2,30	2,28	2,29	2,32	2,32	2,34
09	240/30	1	2,29	2,30	2,31	—			—		
		2	2,31	2,30	2,36	—			—		
		3	2,30	2,29	2,32	—			—		

Tafel 14

Rohdichten im Betonalter von 1 Jahr in kg/dm³

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,28 n.b.	2,28 n.b.	2,26 n.b.	2,27 n.b.	2,27 n.b.	2,25 n.b.	2,35 2,34	2,30 n.b.	2,33 n.b.
03	270/0	-	2,28 n.b.	2,29 n.b.	2,26 n.b.	—			—		
05	270/30	1 2 3	2,28 2,27 2,27	2,29 2,28 2,26	2,26 2,25 2,27	—			—		
07	240/60	1 2 3	2,27 2,32 2,28	2,29 2,31 2,27	2,26 2,26 2,25	2,28 2,32 2,27	2,25 2,27 2,25	2,25 2,25 2,24	2,31 2,32 2,31	2,30 2,31 2,30	2,34 2,32 2,30
09	240/30	1 2 3	2,26 2,27 2,25	2,27 2,29 2,27	2,27 2,24 2,27	—			—		

Tafel 15

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 2 Tagen in N/mm²

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	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	-	13,7 n.b.	7,8 n.b.	5,7 n.b.	—			—		
05	270/30	1 2 3	10,8 10,3 11,7	9,5 10,3 9,8	7,0 5,2 5,9	—			—		
07	240/60	1 2 3	12,5 12,6 12,2	7,7 10,5 7,1	4,4 5,2 5,2	11,8 13,5 12,8	8,3 9,7 7,2	5,0 5,8 4,7	12,9 12,2 12,3	7,0 7,5 7,1	5,4 5,0 5,4
09	240/30	1 2 3	10,0 11,5 10,7	6,9 7,3 5,4	4,6 4,4 5,2	—			—		

Tafel 16

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 7 Tagen in N/mm^2

Bez.	Z/F kg/m^3	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	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	-	23,6 n.b.	13,8 n.b.	12,9 n.b.	—			—		
05	270/30	1	24,2	16,5	13,1	—			—		
		2	23,6	18,3	11,6	—			—		
		3	23,4	17,4	15,1	—			—		
07	240/60	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	1	19,9	13,5	12,8	—			—		
		2	22,3	14,4	10,5	—			—		
		3	19,7	10,8	12,3	—			—		

Tafel 17

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 28 Tagen in N/mm²

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	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	-	37,9	32,0	27,7	—			—		
			n.b.	29,7	31,5						
05	270/30	1	37,7	34,3	31,0	—			—		
		2	38,3	34,3	27,1	—			—		
		3	39,7	33,3	32,3						
07	240/60	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	1	26,0	27,9	30,3	—			—		
		2	32,2	29,1	25,0	—			—		
		3	27,8	25,7	26,5						

Tafel 18

Würfeldruckfestigkeiten im Betonalter von 1 Jahr in N/mm²

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	56,9 n.b.	50,1 n.b.	34,0 n.b.	46,5 n.b.	41,6 n.b.	34,0 n.b.	52,4 53,6	45,9 n.b.	47,6 n.b.
03	270/0	-	43,7 n.b.	39,7 n.b.	33,5 n.b.	—			—		
05	270/30	1 2 3	45,4 48,4 47,0	43,0 46,3 40,6	37,8 32,4 40,1	—			—		
07	240/60	1 2 3	42,6 50,8 45,1	38,2 47,8 34,7	26,3 34,5 35,3	41,7 49,8 39,2	31,6 38,5 28,4	24,0 25,3 25,7	50,3 54,5 47,6	37,4 43,4 42,2	35,5 39,1 42,6
09	240/30	1 2 3	35,7 35,8 34,6	36,3 38,2 30,2	36,5 30,0 35,4	—			—		

Tafel 19

Carbonatisierungstiefen in mm nach 7 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	0,2 0,0	0,0 0,4	1,0 0,5	0,1 0,0	0,0 0,0	0,5 0,5	0,0 n.b.	0,1 0,0	0,0 0,0
03	270/0	-	0,2 0,1	0,4 0,1	1,4 0,4	—			—		
05	270/30	1 2 3	0,0 0,1 0,1	0,1 0,1 0,1	0,6 1,1 0,1	—			—		
07	240/60	1 2 3	0,2 0,8 0,0	0,2 0,5 1,6	2,4 0,5 0,6	0,8 0,0 0,0	0,5 0,2 0,6	3,0 1,6 1,6	0,0 0,0 0,0	0,2 0,0 0,0	0,0 0,0 0,0
09	240/30	1 2 3	0,5 0,6 0,5	0,8 1,3 0,8	1,3 0,8 0,4	—			—		

Tafel 20

Carbonatisierungstiefen in mm nach 7 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	0,7 0,0	0,5 0,8	1,3 0,5	0,6 0,0	0,3 0,1	1,0 0,8	0,0 n.b.	0,3 0,0	0,0 0,0
03	270/0	-	0,6 0,2	0,9 0,0	1,8 0,4	—			—		
05	270/30	1 2 3	0,6 0,4 0,5	1,1 0,9 0,5	0,4 1,3 0,2	—			—		
07	240/60	1 2 3	0,4 1,0 0,4	0,6 1,0 1,8	2,8 0,6 0,6	1,3 0,4 0,5	0,6 0,8 1,0	3,5 1,9 2,0	0,0 0,0 0,0	0,4 0,0 0,0	0,0 0,0 0,1
09	240/30	1 2 3	1,0 0,8 1,0	0,9 1,5 1,4	0,8 1,1 0,4	—			—		

Tafel 21

Carbonatisierungstiefen in mm nach 28 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	1,0 1,1	2,1 3,0*	2,8 2,2	1,9 1,3	2,4 1,5	1,6 3,1	0,3 n.b.	0,8 0,3	0,1 0,1
03	270/0	-	0,9 1,8	2,9 2,8	2,9 2,8	—			—		
05	270/30	1 2 3	1,2 2,3 2,8	2,8 2,5 2,5	2,3 3,1 2,0	—			—		
07	240/60	1 2 3	1,6 0,6 1,5	3,5 2,4 3,8	3,9 3,0 3,9	2,9 0,6 1,1	3,3 3,4 4,6	4,0 4,1 4,1	0,6 0,5 0,5	0,9 0,8 0,6	0,5 0,8 0,5
09	240/30	1 2 3	1,8 2,0 1,5	2,9 2,5 2,8	3,3 3,9 2,8	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 65 Tagen

Tafel 22

Carbonatisierungstiefen in mm nach 28 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	1,1 1,2	2,3 3,5*	2,9 2,5	2,4 1,6	2,6 2,0	1,9 3,4	0,4 n.b.	1,0 0,4	0,3 0,1
03	270/0	-	0,9 1,6	3,0 3,2	2,9 3,0	—			—		
05	270/30	1 2 3	1,4 2,6 2,8	3,3 2,8 2,8	2,6 2,9 2,1	—			—		
07	240/60	1 2 3	1,9 2,0 1,9	3,6 2,4 4,0	3,8 3,0 3,9	2,8 2,8 2,0	3,8 3,5 4,8	4,4 4,1 4,4	1,1 1,2 1,2	1,3 1,0 1,0	0,5 0,8 -
09	240/30	1 2 3	2,1 1,8 1,5	2,8 2,9 3,4	3,3 3,9 3,1	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 65 Tagen

Tafel 23

Carbonatisierungstiefen in mm nach 90 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1 Zement			2 Zement			3 Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,6 1,9	3,5 3,3	4,0 3,8	3,8 2,8	4,1 3,0	3,3 5,6	0,6 n.b.	2,8 1,0	2,3 1,7
03	270/0	-	2,0 2,3	3,9 3,8	5,8 3,4	—			—		
05	270/30	1 2 3	3,8 4,0 3,4	3,8 3,8 3,5	4,4 5,8 4,4	—			—		
07	240/60	1 2 3	3,8 2,6 2,0	4,3 3,5 4,5	7,0 5,3 5,5	3,8 3,3 n.b.	6,3 4,8 6,0	6,8 8,0 8,3	2,0 2,6 2,0	3,0 2,3 3,0	3,6 3,3 3,0
09	240/30	1 2 3	3,9 3,9 3,6	3,9 4,0 5,1	5,0 5,4 6,5	—			—		

Tafel 24

Carbonatisierungstiefen in mm nach 90 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,5 1,9	4,0 3,5	5,0 3,9	4,1 3,0	5,0 3,0	3,9 5,9	1,1 n.b.	3,3 1,6	3,0 1,8
03	270/0	-	2,4 2,3	4,4 4,0	6,1 3,8	—			—		
05	270/30	1 2 3	4,1 4,8 3,4	4,4 4,3 3,8	4,5 6,0 5,1	—			—		
07	240/60	1 2 3	3,8 3,0 2,5	5,1 4,3 5,4	7,3 6,0 6,5	4,4 3,8 n.b.	6,3 5,5 7,0	9,0 8,5 9,0	2,5 3,1 2,4	4,0 3,0 3,5	3,8 3,9 3,5
09	240/30	1 2 3	4,5 4,0 3,8	4,5 4,1 5,5	5,5 5,8 7,0	—			—		

Tafel 25

Carbonatisierungstiefen in mm nach 180 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	2,9 3,6*	4,0 6,0*	7,8 7,3*	4,5 4,5*	3,9 5,8*	5,3 10,0*	1,8 n.b.	3,5 3,5*	3,3 4,0*
03	270/0	-	3,5 2,5	4,2 4,9	7,0 7,5	—			—		
05	270/30	1 2 3	3,8 3,9 3,5	4,5 5,0 4,0	5,8 6,9 8,0*	—			—		
07	240/60	1 2 3	4,9 4,5 2,8	6,3 5,0 6,5	8,8 7,0 6,5	5,1 3,3 4,0	6,6 6,4 8,1	8,9 8,8 7,5	2,5 2,9 3,0	3,9 3,6 5,0	3,9 4,5 4,3
09	240/30	1 2 3	4,0 5,2 4,6	6,3 5,5 6,8	6,0 7,0 8,0*	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 270 Tagen

Tafel 26

Carbonatisierungstiefen in mm nach 180 Tagen Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	3,1 4,0*	4,5 6,5*	8,5 8,0*	5,1 5,0*	4,1 6,5*	5,5 10,0*	2,1 n.b.	3,8 3,8*	4,0 4,5*
03	270/0	-	3,8 3,0	5,1 5,3	7,8 8,0	—			—		
05	270/30	1 2 3	4,1 4,8 4,3	5,0 6,0 5,0	6,0 7,5 9,0*	—			—		
07	240/60	1 2 3	4,5 5,0 2,9	7,0 5,5 7,5	9,5 8,0 7,0	5,9 3,8 4,1	6,9 7,3 8,6	9,5 10,0 9,3	2,5 3,2 3,5	4,3 4,1 5,1	4,5 4,5 4,5
09	240/30	1 2 3	4,5 5,6 5,0	6,5 6,0 7,2	7,0 8,0 9,4*	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 270 Tagen

Tafel 27

Carbonatisierungstiefen in mm nach 1 Jahr Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	3,8 4,0	5,8 6,0	9,5 7,8	5,3 4,5	5,8 6,5	8,1 10,0	0,9 n.b.	5,3 3,0	6,0 3,9
03	270/0	-	5,1 6,3	6,6 8,0	9,6 7,5	—			—		
05	270/30	1 2 3	5,6 5,8 5,1	7,3 7,5 6,6	9,0 12,5 8,8	—			—		
07	240/60	1 2 3	5,6 6,8 6,3	8,0 8,5* 9,6*	11,9 9,5 9,0	7,4 7,3 5,3	7,5 9,1 10,4	14,1 12,8 11,0	4,0 3,8 4,1	7,8 5,5 7,0	6,5 7,9 6,9
09	240/30	1 2 3	6,7 6,5 7,2	9,3 9,0 11,4	10,0 10,8 9,6	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 410 Tagen

Tafel 28

Carbonatisierungstiefen in mm nach 1 Jahr Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	4,1 4,8	5,9 6,5	9,8 7,5	5,8 5,3	6,5 7,0	9,1 10,0	2,8 n.b.	5,5 3,5	6,5 5,0
03	270/0	-	5,6 6,5	7,0 8,0	9,4 8,0	—			—		
05	270/30	1 2 3	6,0 6,1 5,5	8,0 7,5 6,9	10,0 12,3 9,5	—			—		
07	240/60	1 2 3	6,3 7,0 6,0	8,0 8,5* 10,0*	12,8 10,0 9,8	7,6 7,3 5,5	8,0 9,6 11,8	15,0 14,0 11,8	4,3 3,9 4,5	7,5 5,5 7,4	6,6 8,5 6,9
09	240/30	1 2 3	7,4 7,0 7,8	9,5 9,2 10,9	n.b. 11,0 9,5	—			—		

*) Carbonatisierungstiefe nach 410 Tagen

Tafel 29

Carbonatisierungstiefen in mm nach 1,5 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	5,4 5,6	6,0 7,0	11,0 9,5	8,0 6,3	7,5 7,0	10,0 10,3	3,0 n.b.	5,5 5,1	6,5 6,1
03	270/0	-	6,5 6,0	8,0 7,9	11,5 10,4	—			—		
05	270/30	1 2 3	6,8 7,3 5,5	7,5 7,0 7,3	10,0 12,0 11,5	—			—		
07	240/60	1 2 3	7,1 7,0 7,0	10,0 8,0 9,8	15,0 13,0 9,9	8,0 8,3 7,0	11,2 9,0 11,5	17,5 15,8 13,0	4,8 5,0 6,3	8,8 7,5 7,0	7,3 7,5 6,5
09	240/30	1 2 3	8,8 8,3 7,5	12,0 9,8 9,8	12,0 13,5 12,0	—			—		

Tafel 30

Carbonatisierungstiefen in mm nach 1,5 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	5,6 6,0	6,8 7,3	11,5 9,9	8,5 6,4	8,0 7,5	11,0 10,5	3,0 n.b.	6,0 5,3	7,3 6,2
03	270/0	-	6,9 6,1	9,0 8,0	12,0 10,5	—			—		
05	270/30	1 2 3	7,2 9,0 6,0	8,3 7,5 7,5	10,8 13,0 12,5	—			—		
07	240/60	1 2 3	7,5 7,5 8,0	10,9 9,0 11,0	16,0 13,8 10,5	9,0 8,5 7,5	12,1 10,0 12,0	18,5 18,0 13,5	5,0 5,0 6,5	9,3 8,3 8,0	7,5 9,5 7,5
09	240/30	1 2 3	9,0 9,0 8,0	12,5 10,3 10,8	12,8 14,5 13,0	—			—		

Tafel 31

Carbonatisierungstiefen in mm nach 2 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 1 Stunde)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	5,5 6,0	6,0 7,5	13,5 10,5	7,5 7,5	7,0 8,5	10,7 12,5	3,0 n.b.	5,8 5,0	6,8 6,3
03	270/0	-	6,8 6,5	8,0 10,5	11,8 11,5	—			—		
05	270/30	1 2 3	8,8 8,0 7,5	9,0 9,5 8,5	11,0 14,3 12,0	—			—		
07	240/60	1 2 3	9,0 8,0 7,8	9,8 10,0 13,0	16,0 14,3 13,3	10,0 9,0 8,0	12,3 10,7 13,8	20,0 18,0 18,5	6,0 5,2 6,0	9,5 7,8 8,5	8,3 9,3 7,5
09	240/30	1 2 3	9,0 8,5 9,3	11,8 10,2 12,3	14,0 15,0 14,0	—			—		

Tafel 32

Carbonatisierungstiefen in mm nach 2 Jahren Carbonatisierungsdauer
(Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Z/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	6,3 6,0	6,8 7,8	13,5 10,8	8,0 7,8	8,0 8,0	11,0 11,8	3,0 n.b.	6,0 5,3	7,0 6,5
03	270/0	-	7,2 7,0	9,0 11,0	12,5 11,8	—			—		
05	270/30	1 2 3	9,0 9,0 7,5	9,0 9,5 9,3	11,5 15,0 12,5	—			—		
07	240/60	1 2 3	9,0 8,0 8,0	10,3 10,0 13,0	16,8 15,3 13,8	10,8 9,3 8,3	13,0 10,5 13,5	20,0 18,5 18,8	6,0 5,0 6,5	10,0 8,0 8,5	8,5 9,5 8,0
09	240/30	1 2 3	9,5 9,0 9,5	12,5 10,8 12,5	14,0 16,0 15,0	—			—		

Tafel 33

Regressionskoeffizient c_1 in $d_k = c_0 + c_1 \cdot \sqrt{t}$, berechnet einschl. d_{k720}
 (Meßwerte nach 24 Stunden)

Bez.	Δ/F kg/m ³	Flug- asche	Nachbehandlung und Exposition								
			1			2			3		
			Zement			Zement			Zement		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
02	300/0	-	0,232 0,259	0,250 0,286	0,493 0,421	0,303 0,298	0,297 0,332	0,456 0,439	0,134 n.b.	0,247 0,237	0,327 0,300
03	270/0	-	0,297 0,286	0,328 0,391	0,452 0,447	—			—		
05	270/30	1 2 3	0,327 0,335 0,246	0,315 0,321 0,327	0,468 0,574 0,529	—			—		
07	240/60	1 2 3	0,333 0,305 0,329	0,391 0,373 0,435	0,611 0,588 0,469	0,372 0,353 0,313	0,465 0,387 0,475	0,713 0,704 0,598	0,233 0,195 0,272	0,411 0,348 0,367	0,357 0,430 0,327
09	240/30	1 2 3	0,358 0,355 0,361	0,503 0,407 0,452	0,535 0,601 0,557	—			—		

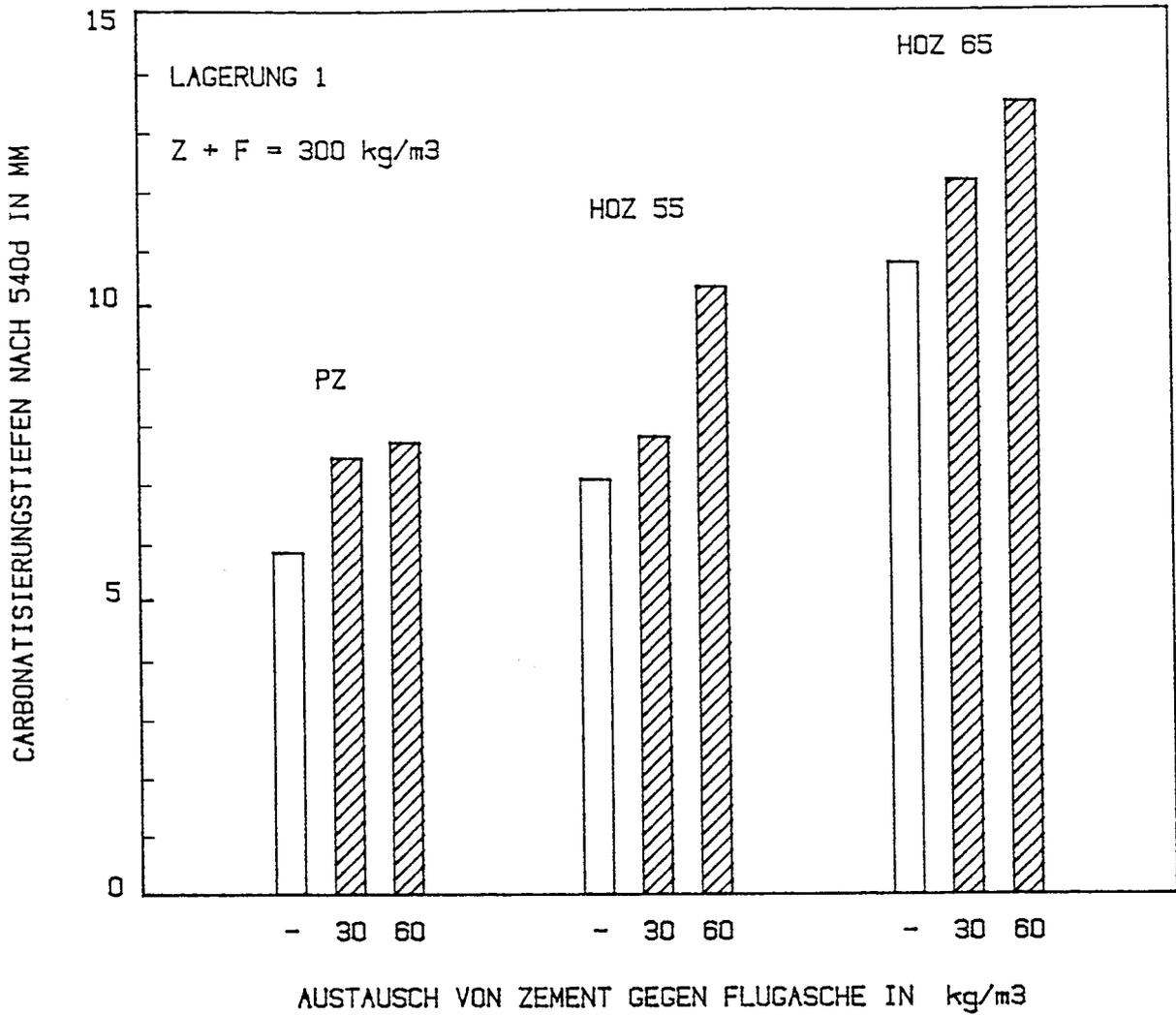


Bild 1: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche (Flugaschen gemittelt). Mischungen 02, 05, 07

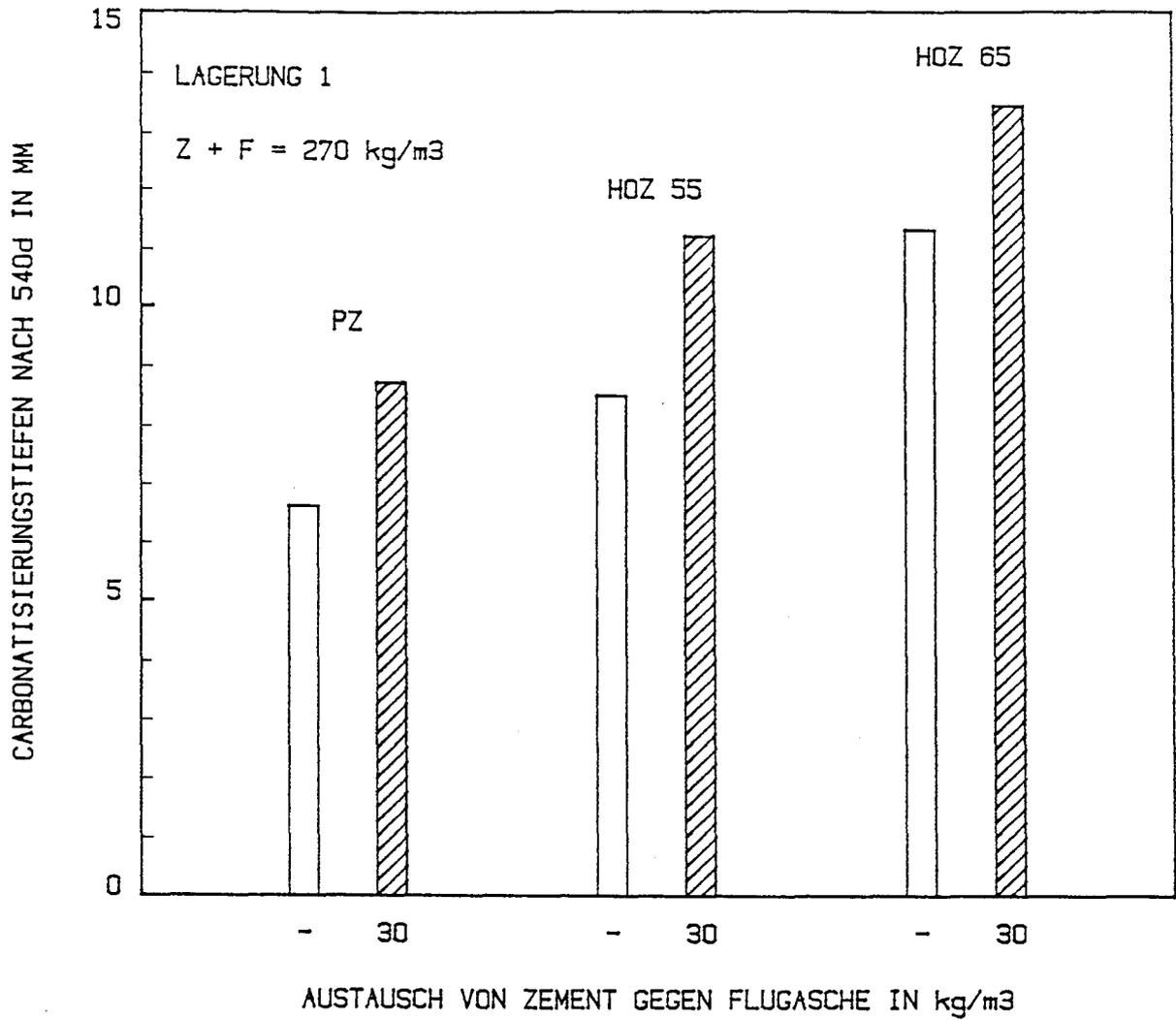


Bild 2: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren bei Austausch von Zement gegen die gleiche Menge Flugasche (Flugaschen gemittelt).

Mischungen 03, 09

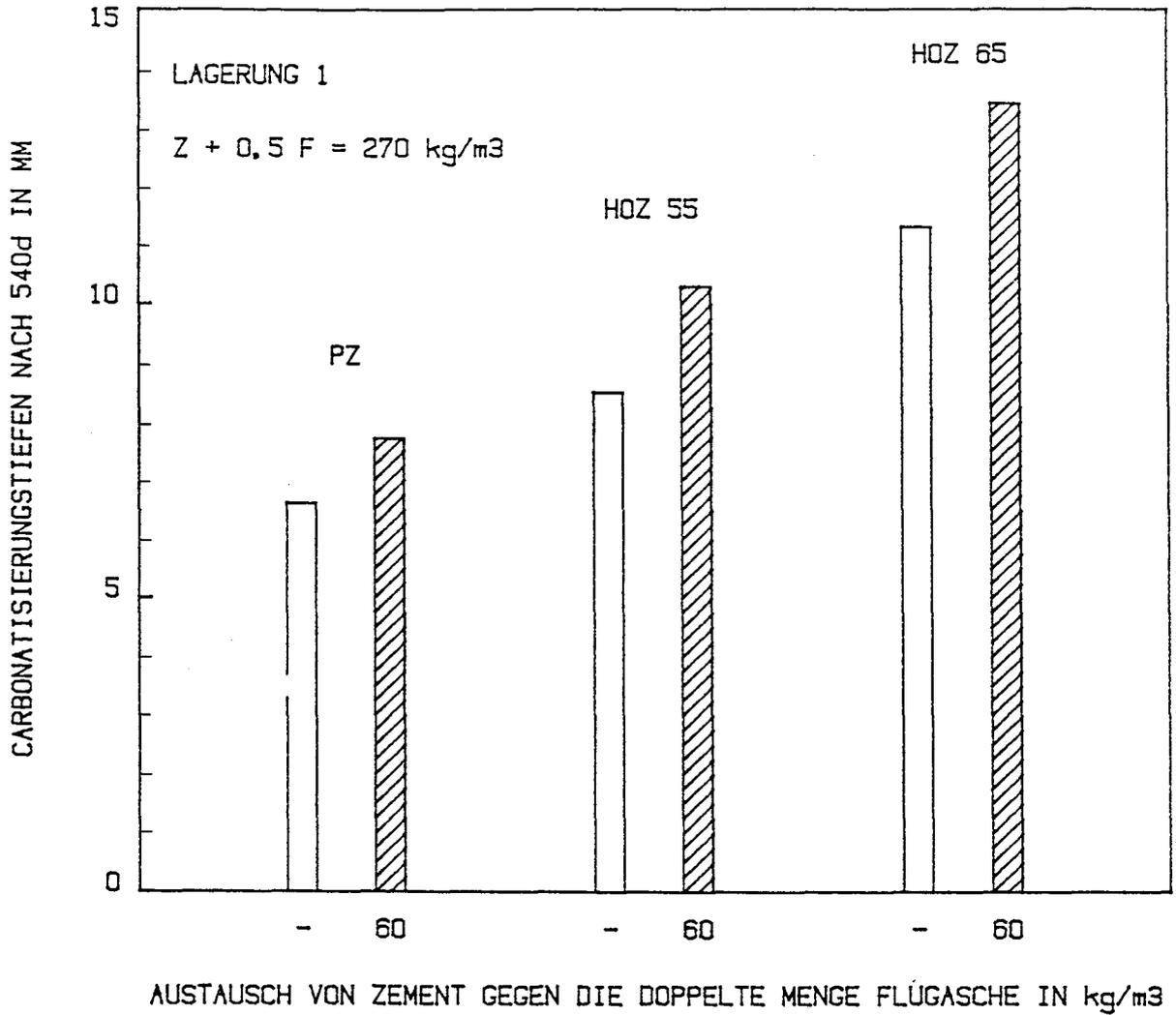


Bild 3: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren bei Ersatz von Zement durch die doppelte Menge Flugasche (Flugaschen gemittelt).

Mischungen 03, 07

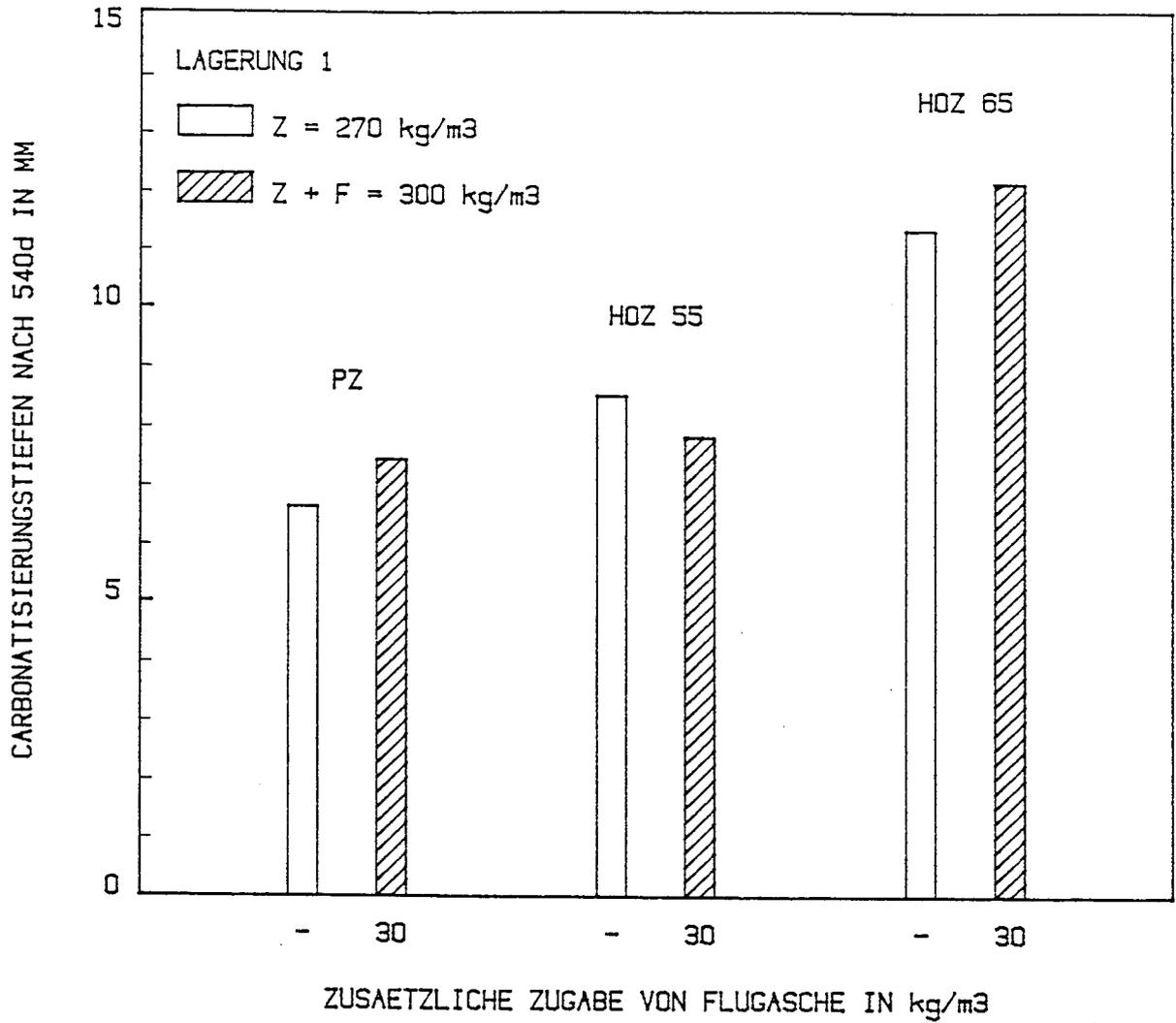


Bild 4: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren bei zusätzlicher Zugabe von Flugasche und unverändertem Zementgehalt (Flugaschen gemittelt)
Mischungen 03, 05

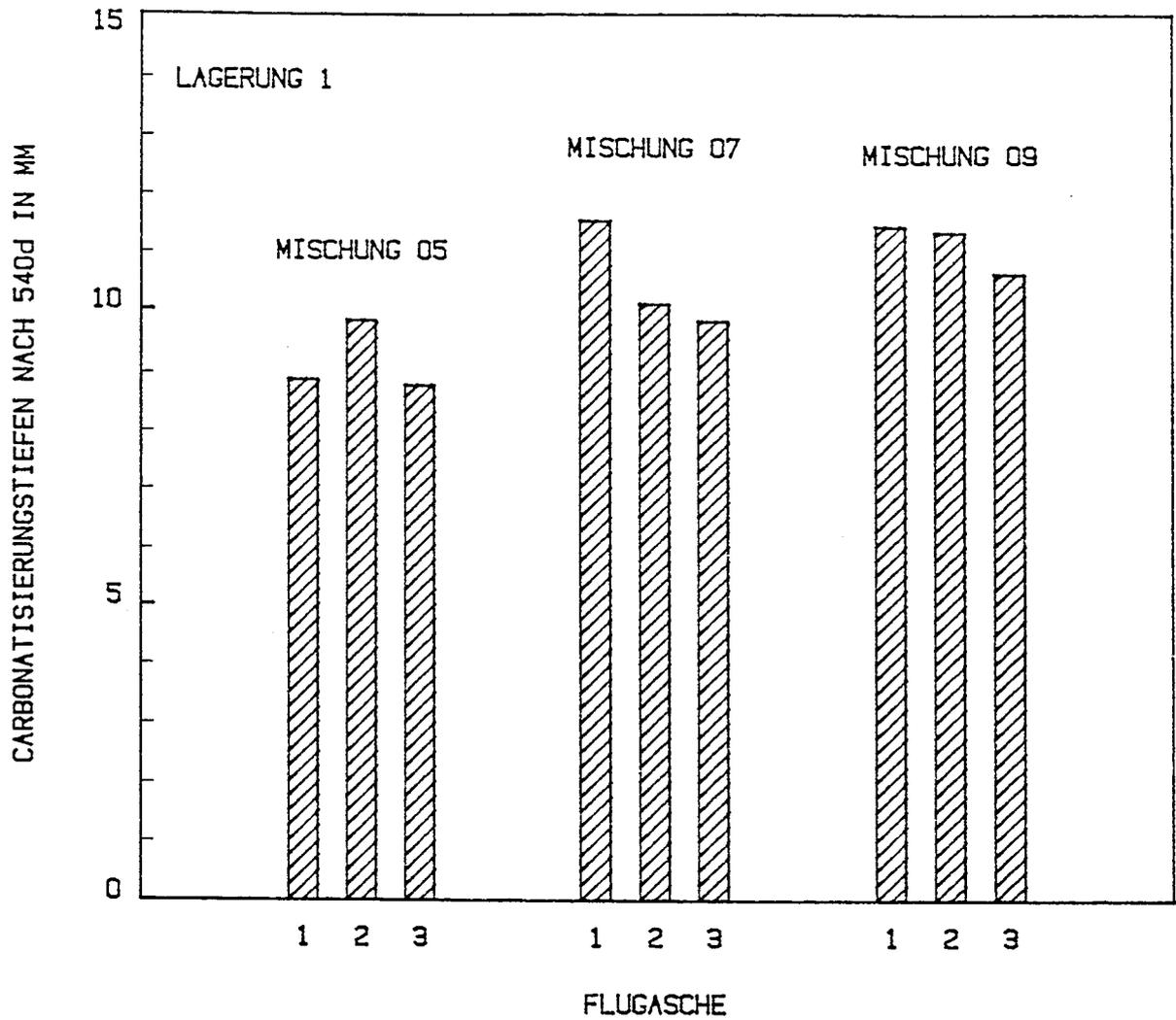


Bild 5: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 1,5 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Zemente gemittelt)

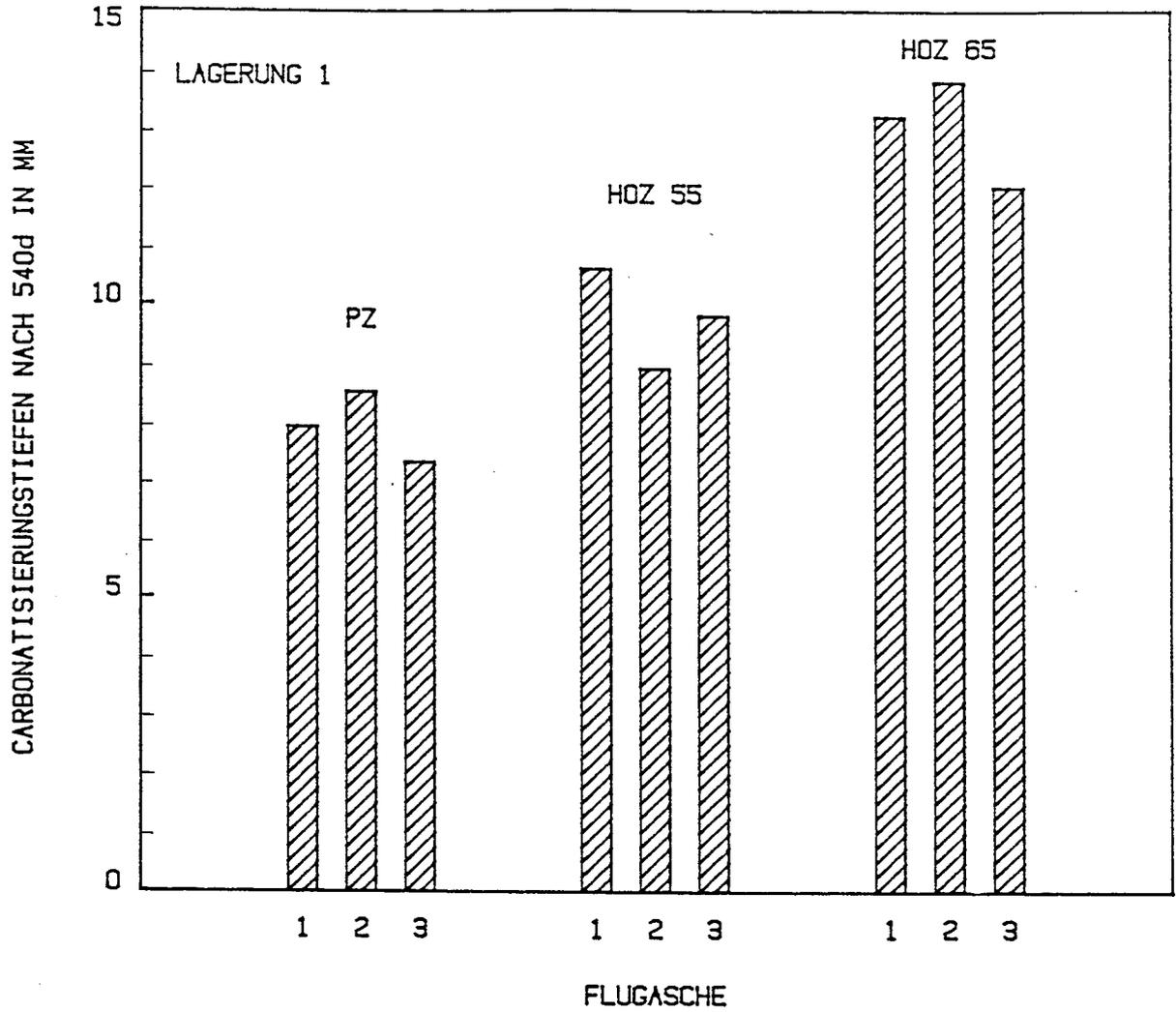


Bild 6: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 1,5 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Mittelwerte der Mischungen 05, 07, 09)

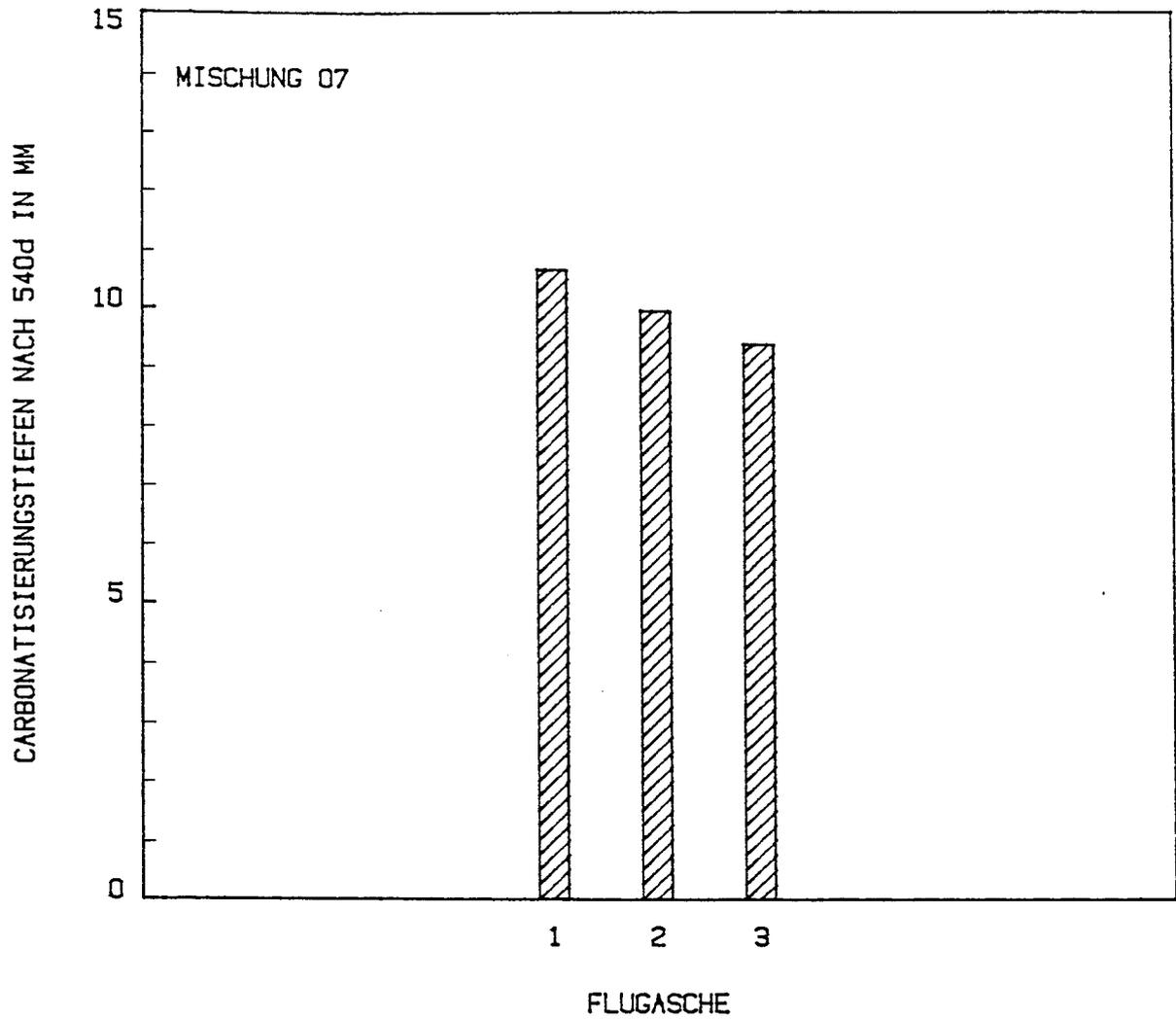


Bild 7: Carbonatisierungstiefen der Flugaschebetone im Betonalter von 1,5 Jahren. Einfluß der Flugaschen (Mittelwerte der Zemente 1, 2, 3, Lagerungen 1, 2, 3)

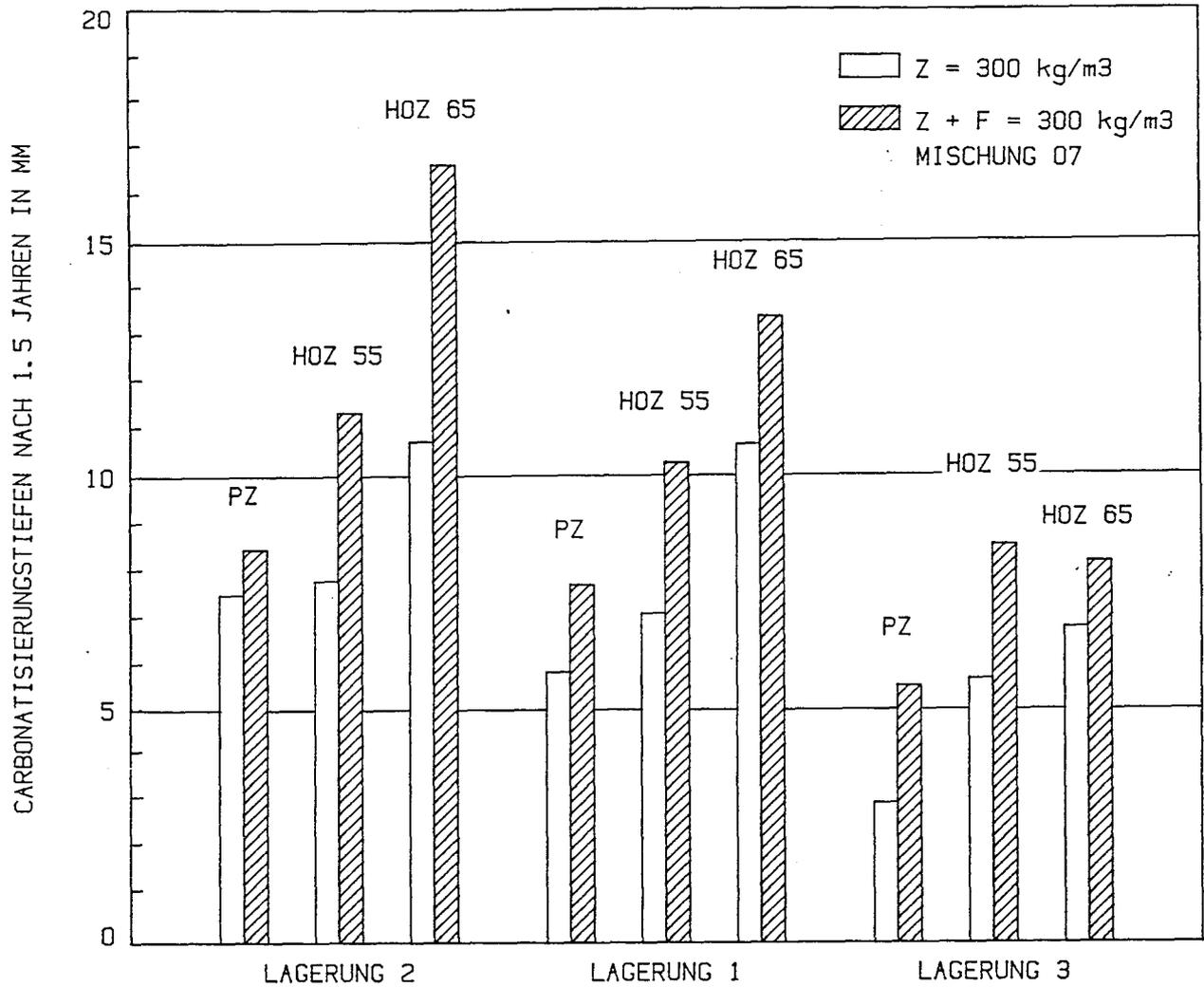


Bild 8: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren. Einfluß von Nachbehandlungs- und Expositionsbedingungen (Flugaschen gemittelt)

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

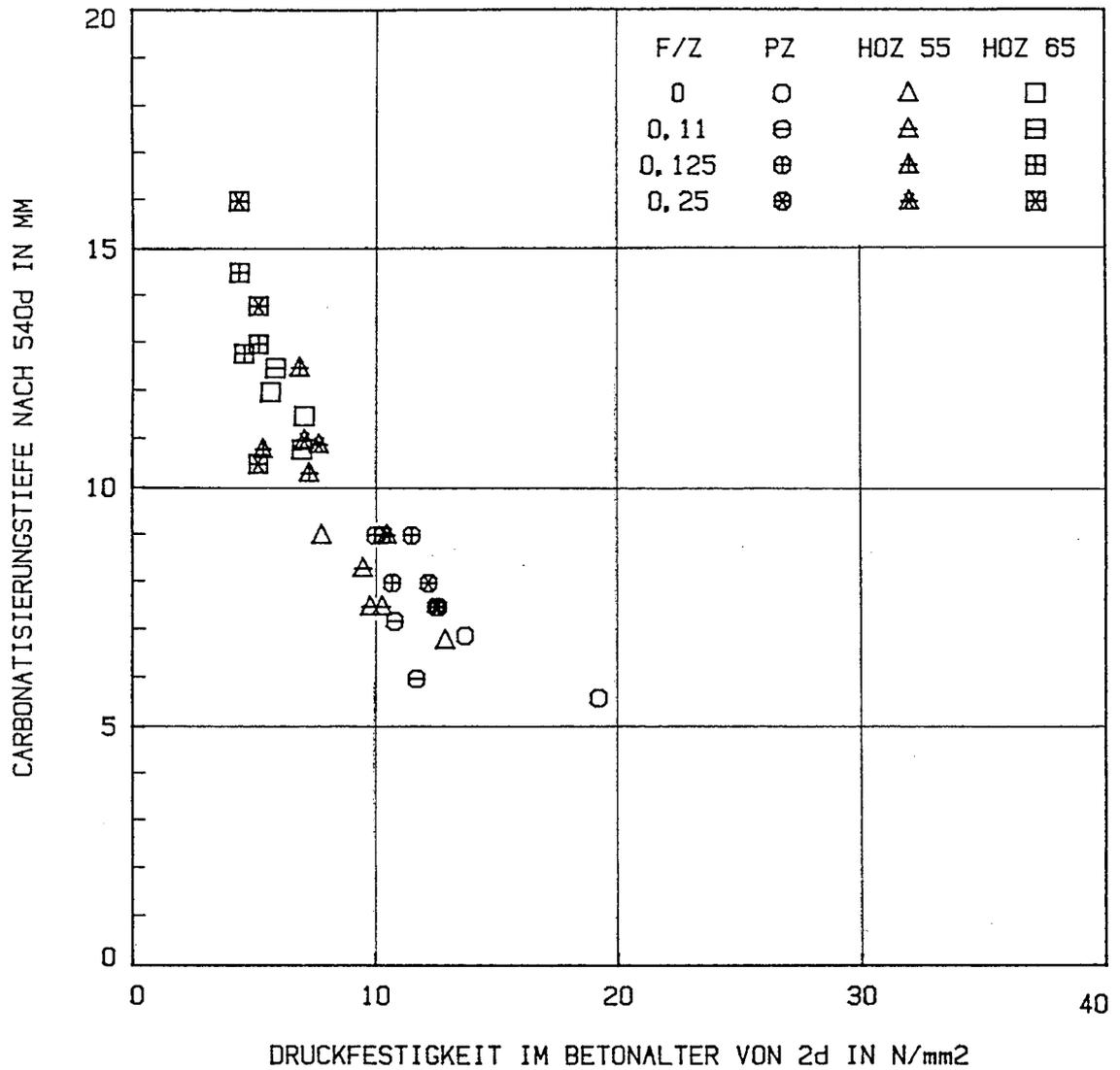


Bild 9: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 1

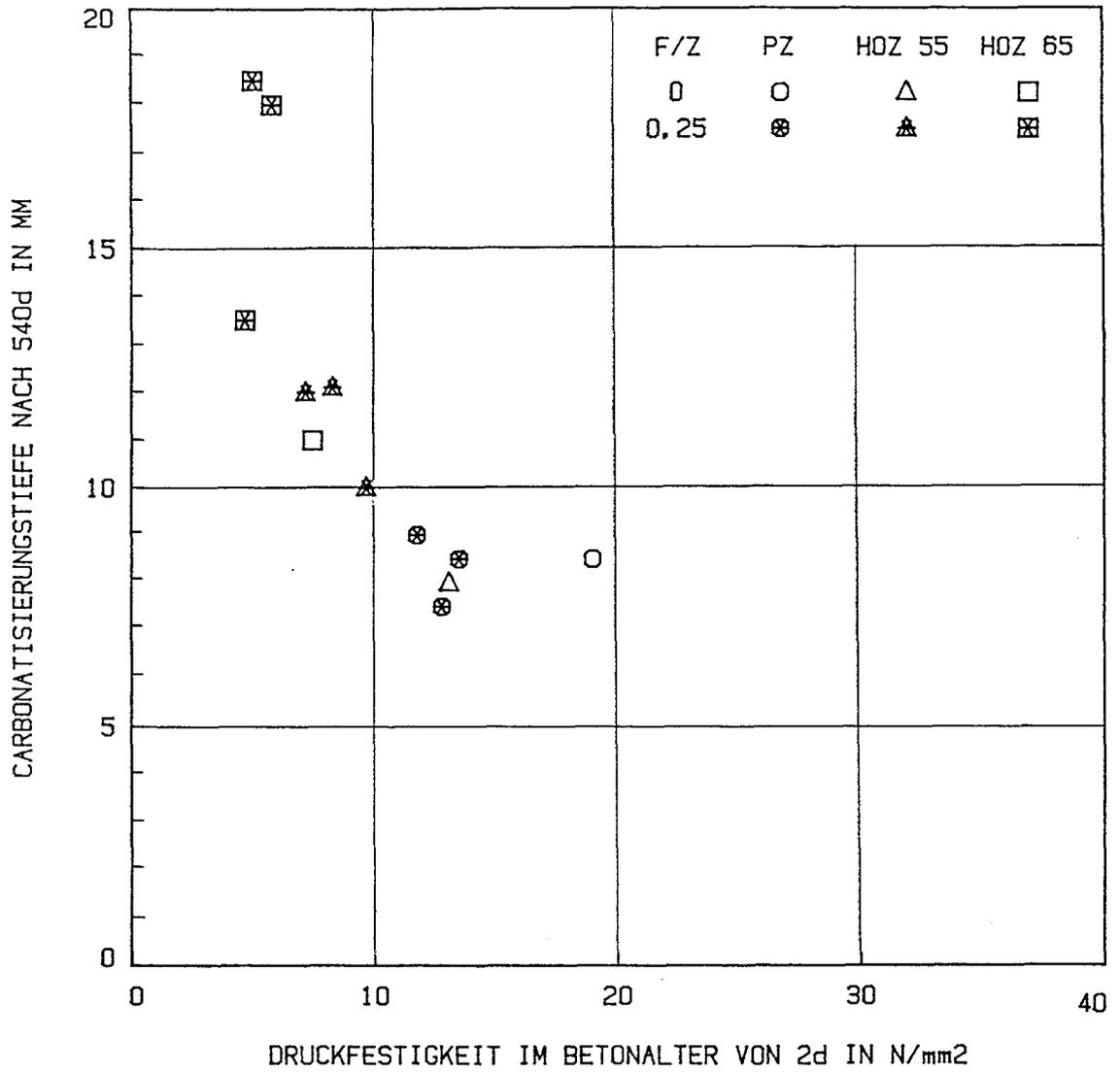


Bild 10: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 2

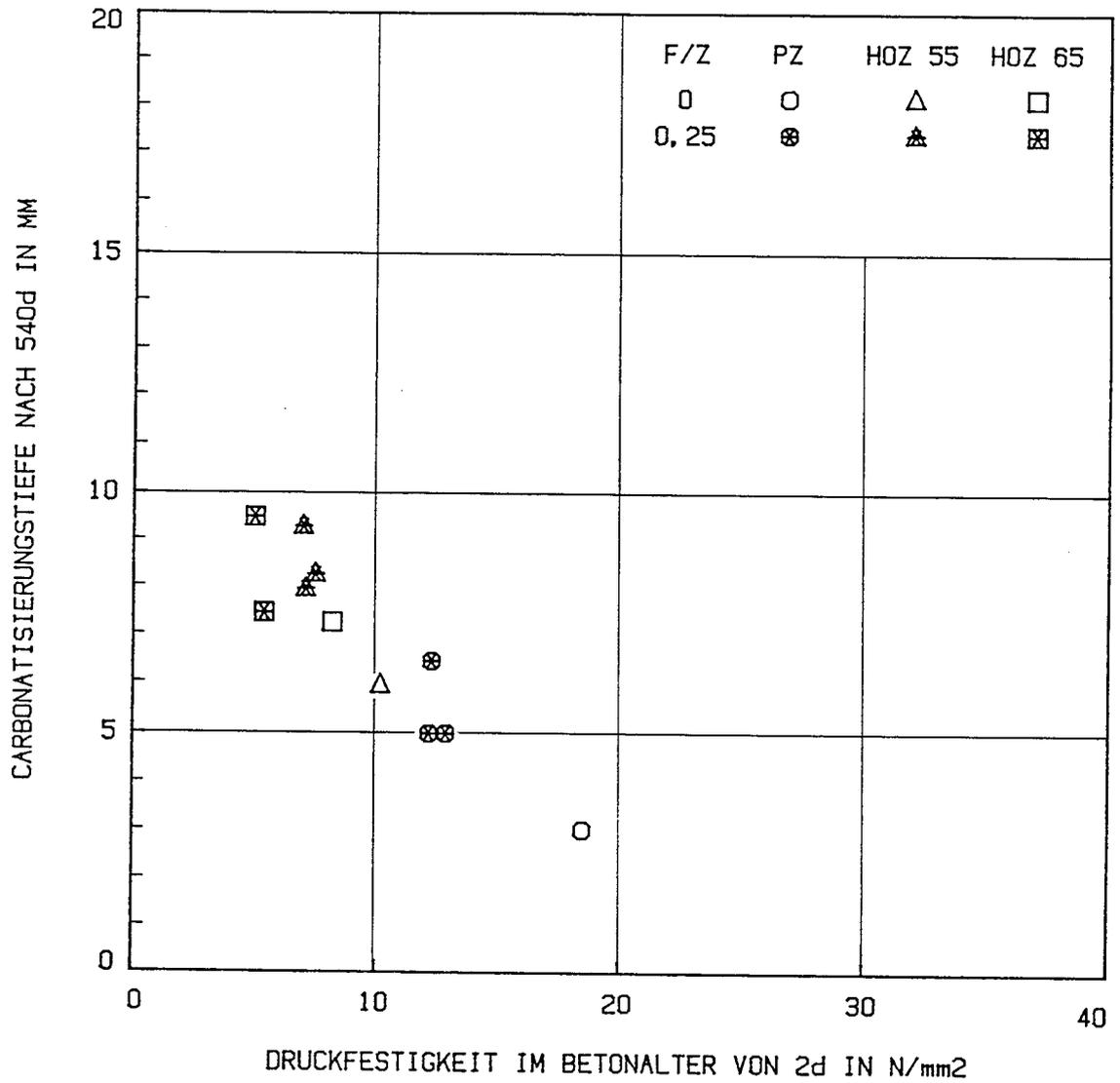


Bild 11: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 2 Tagen. Lagerung 3

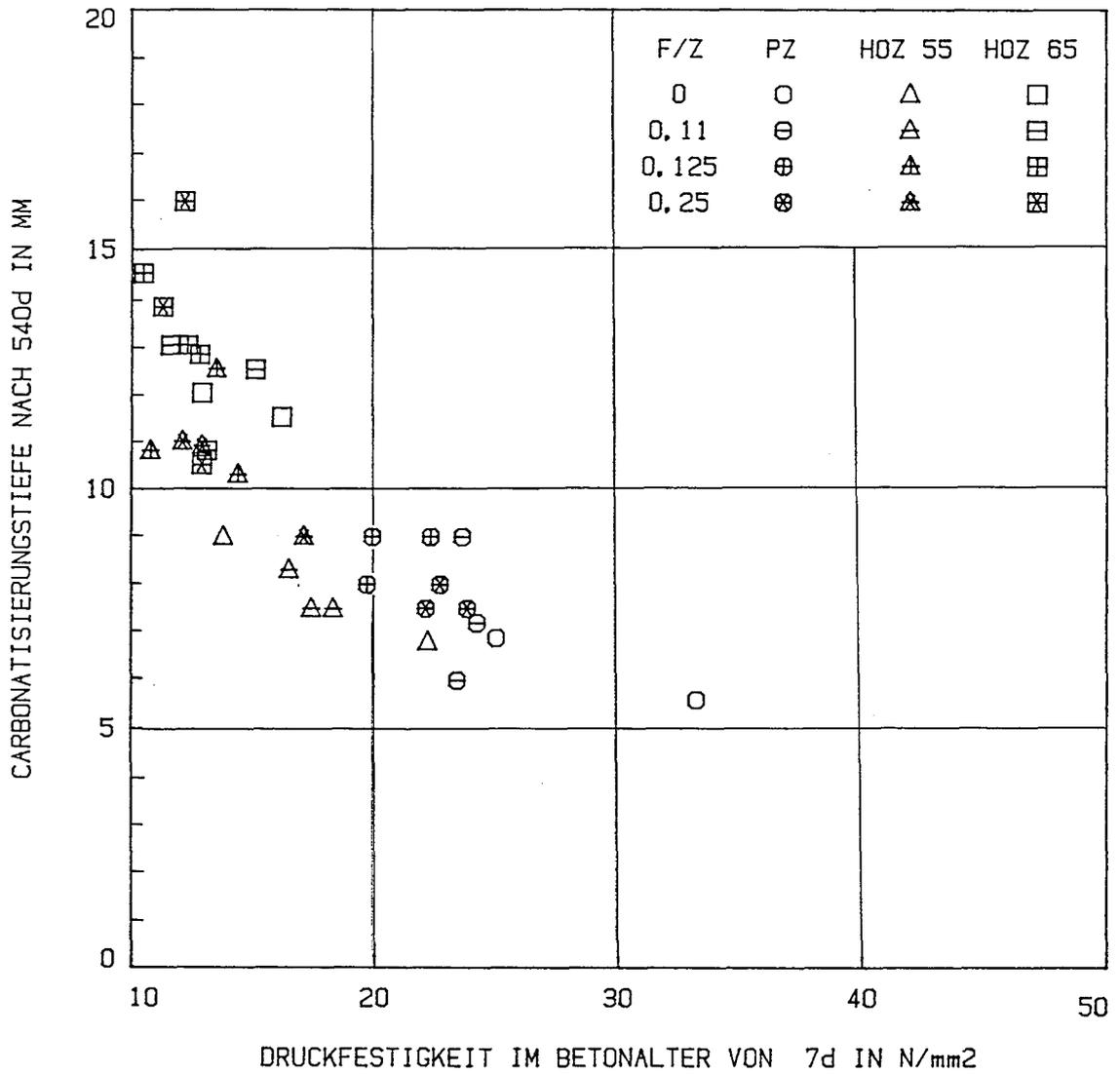


Bild 12: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 1

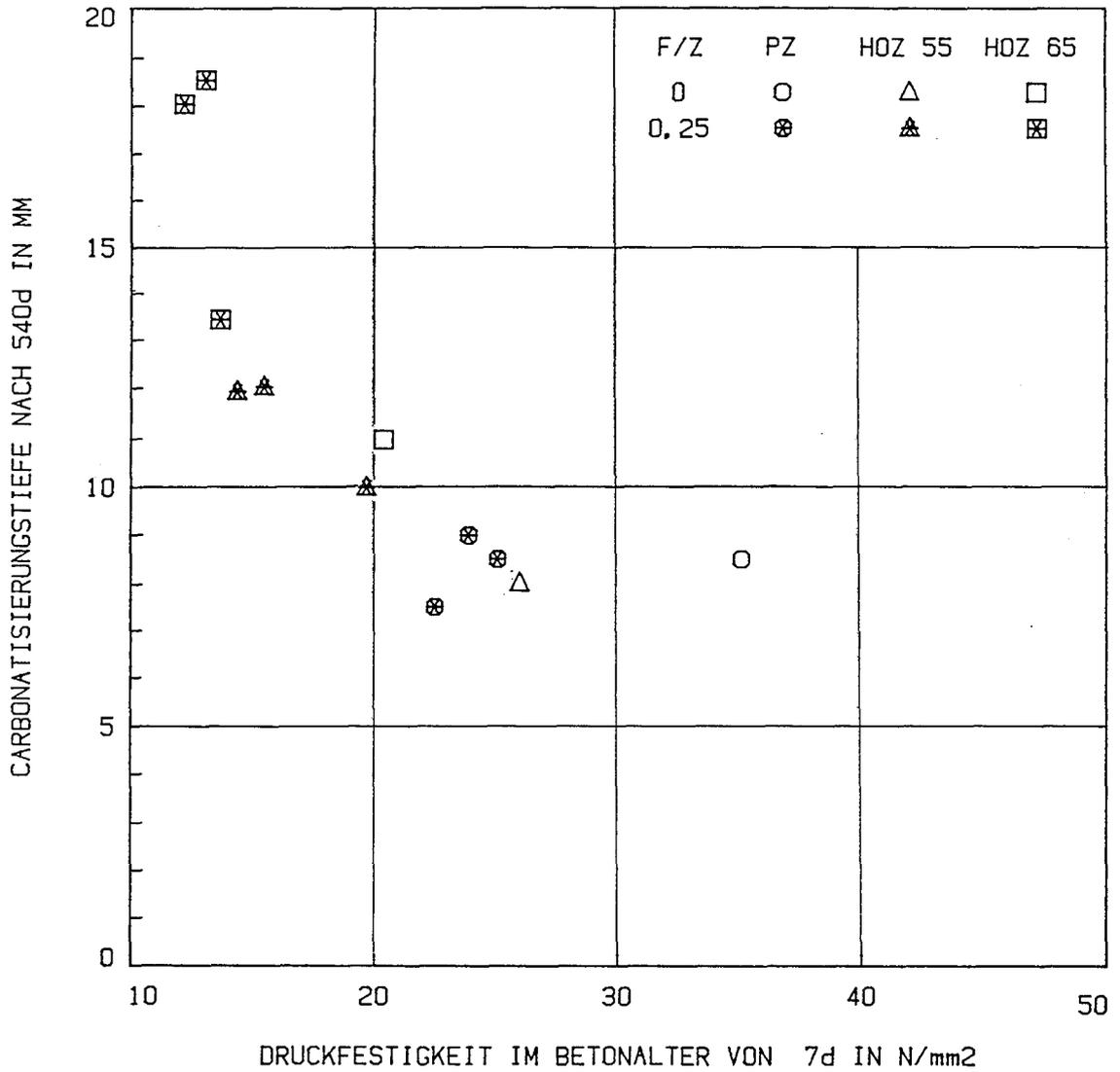


Bild 13: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 2

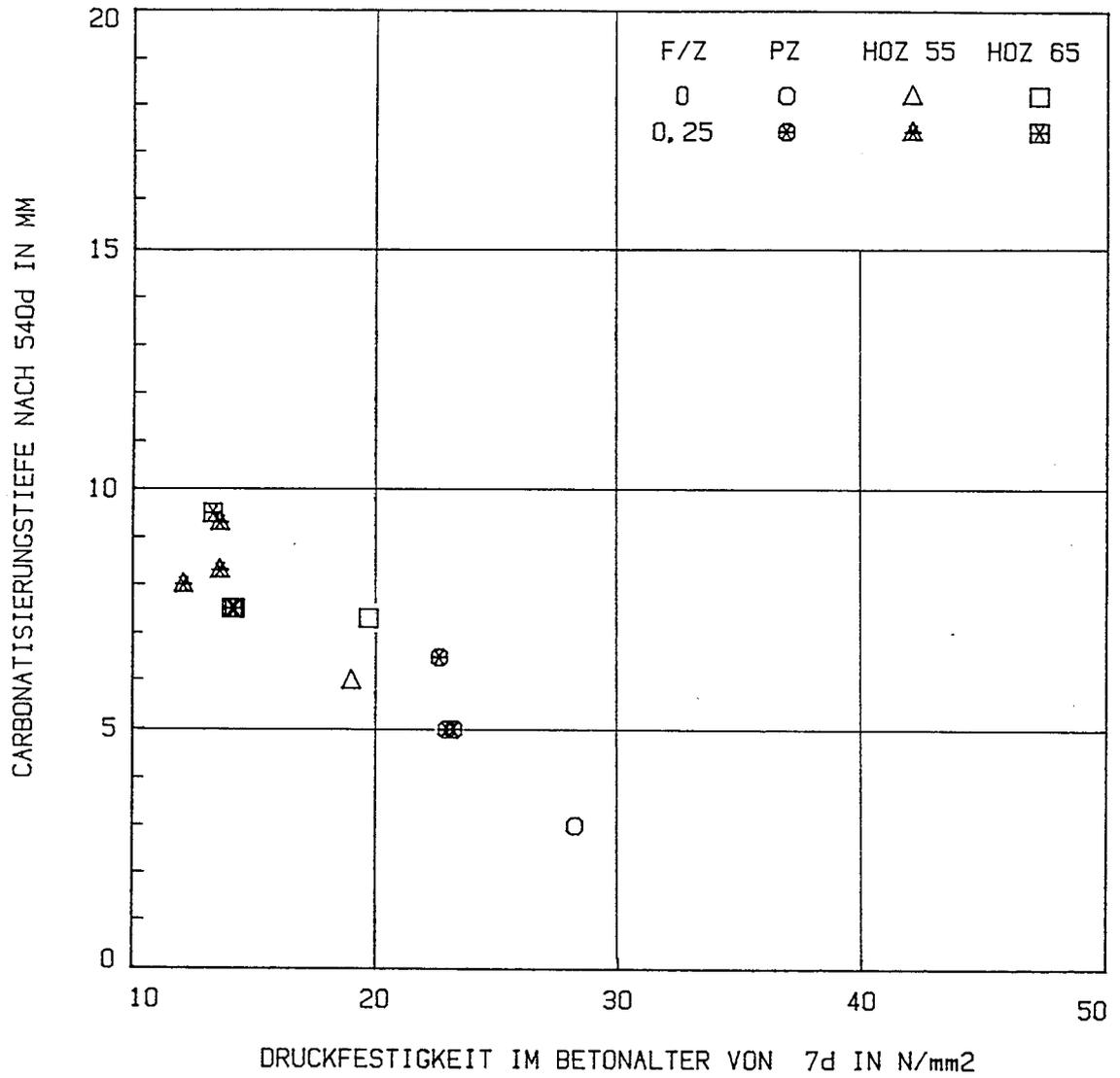


Bild 14: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen. Lagerung 3

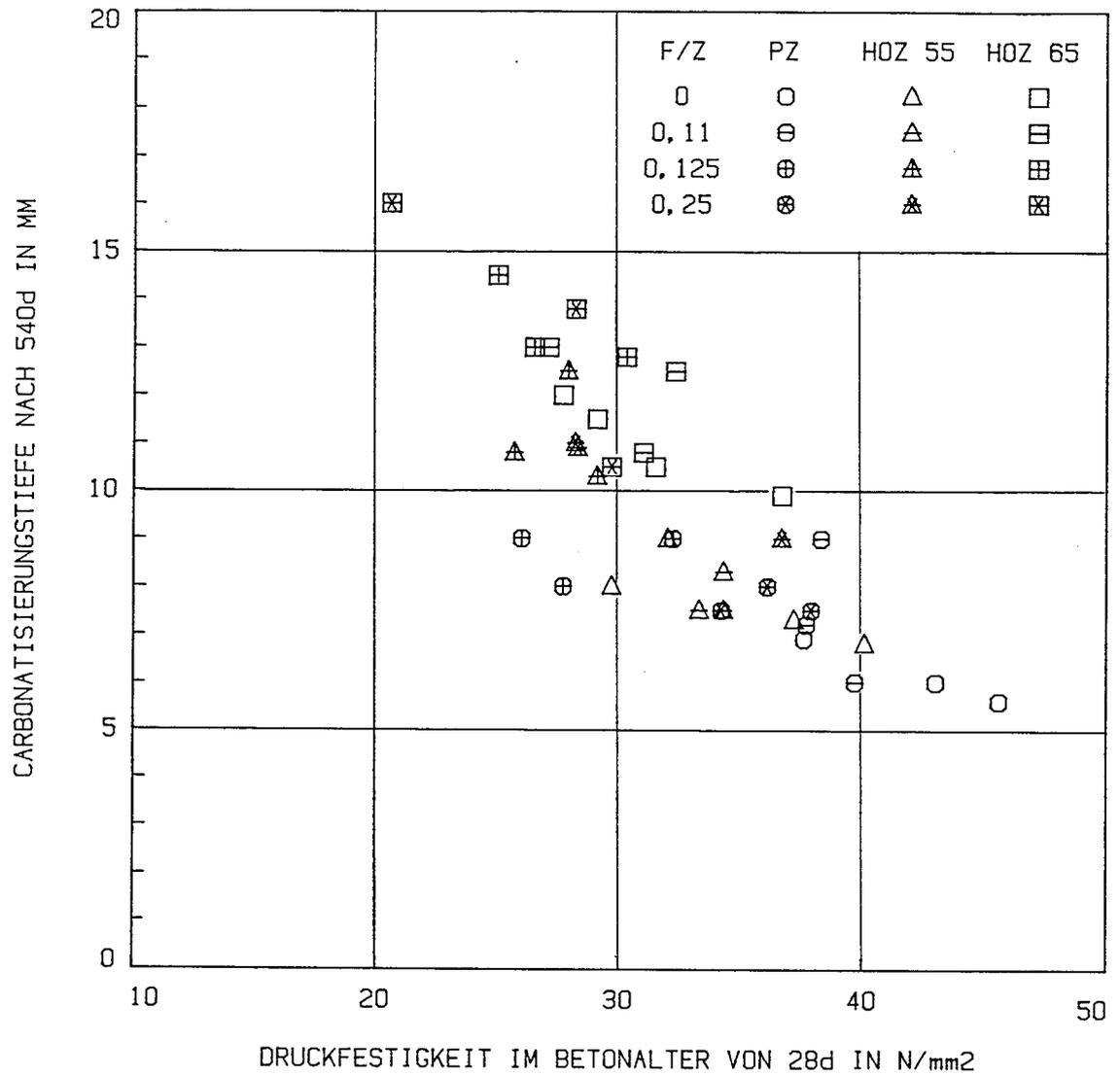


Bild 15: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 1

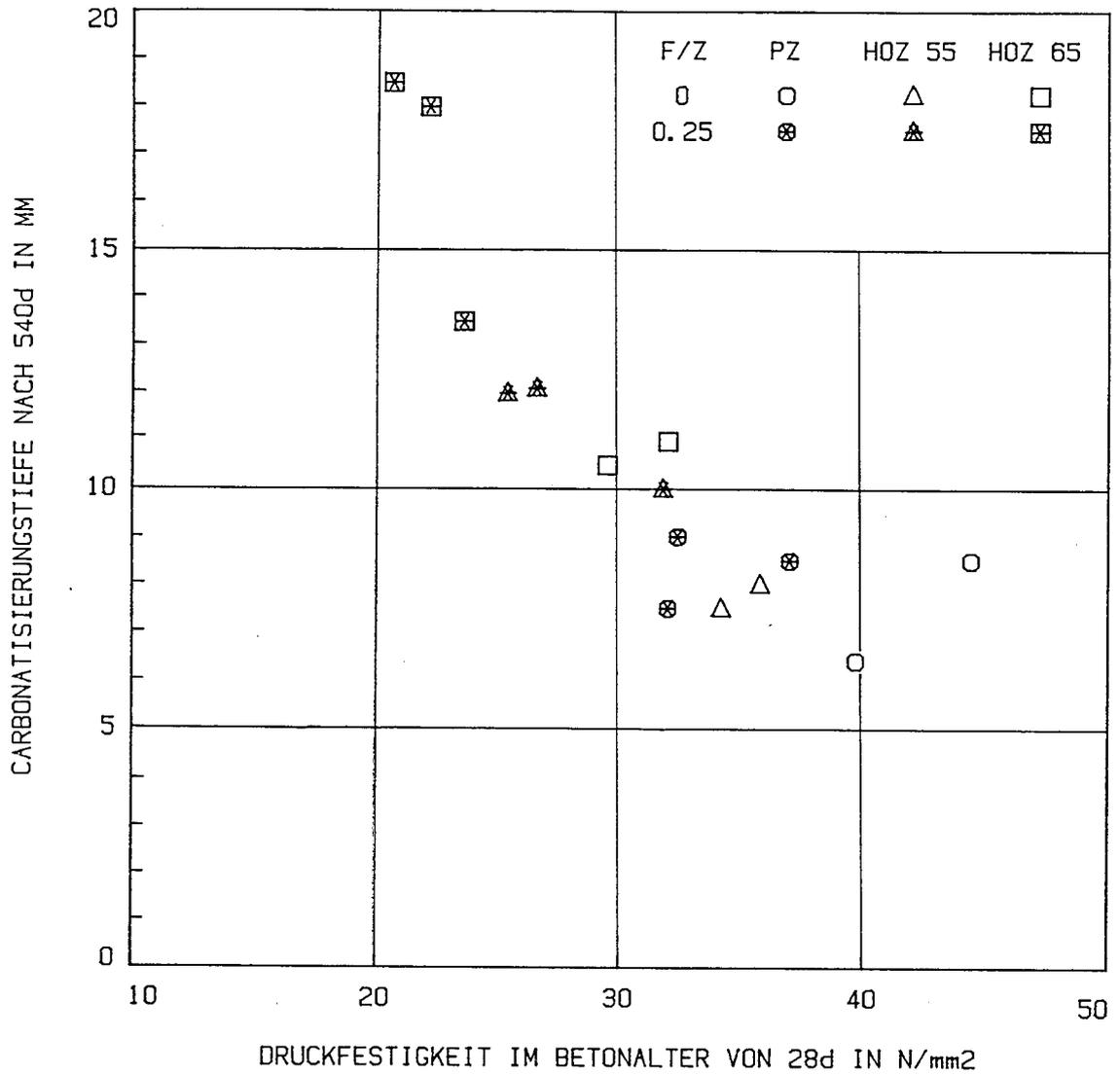


Bild 16: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 2

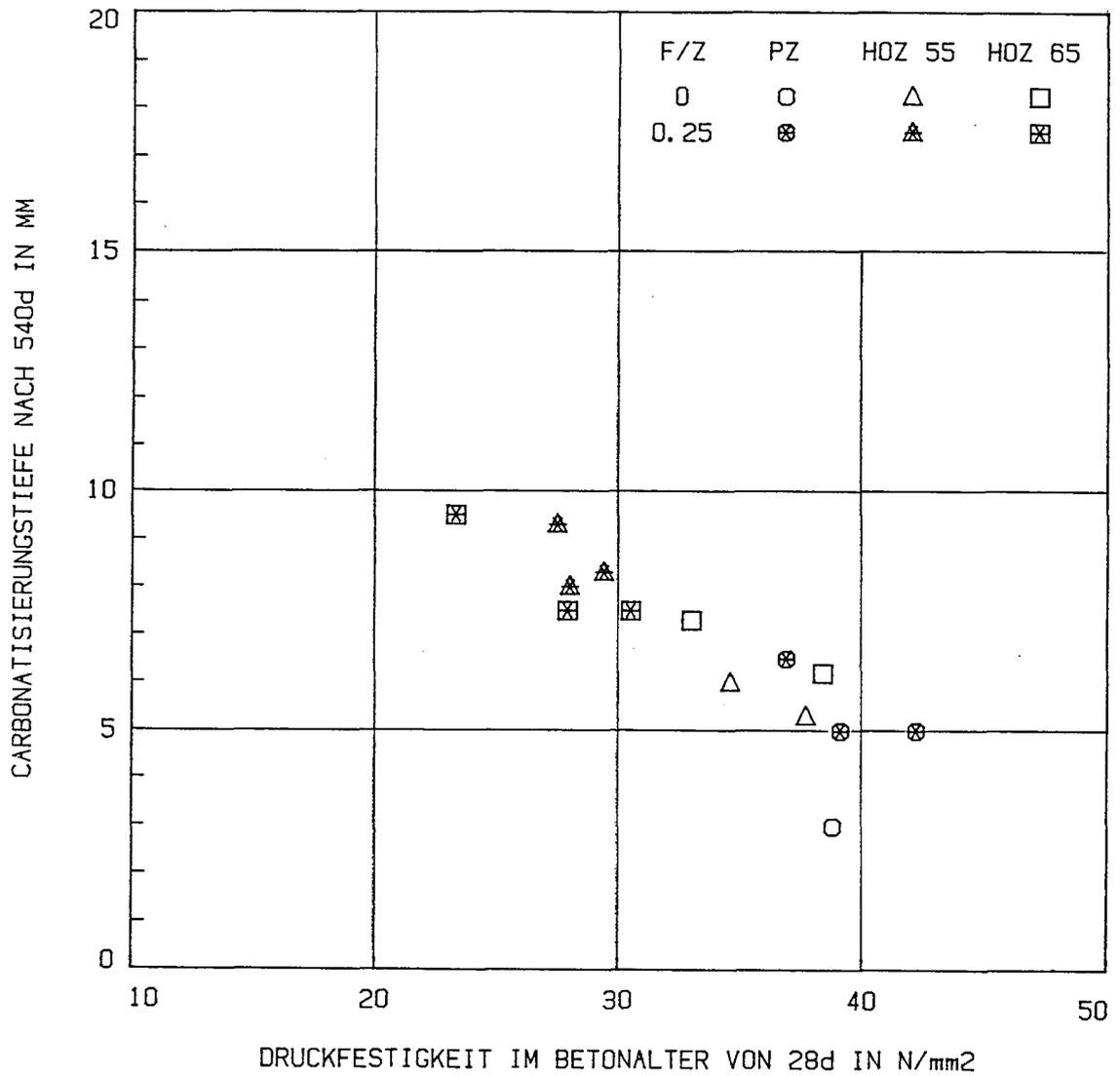


Bild 17: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen. Lagerung 3

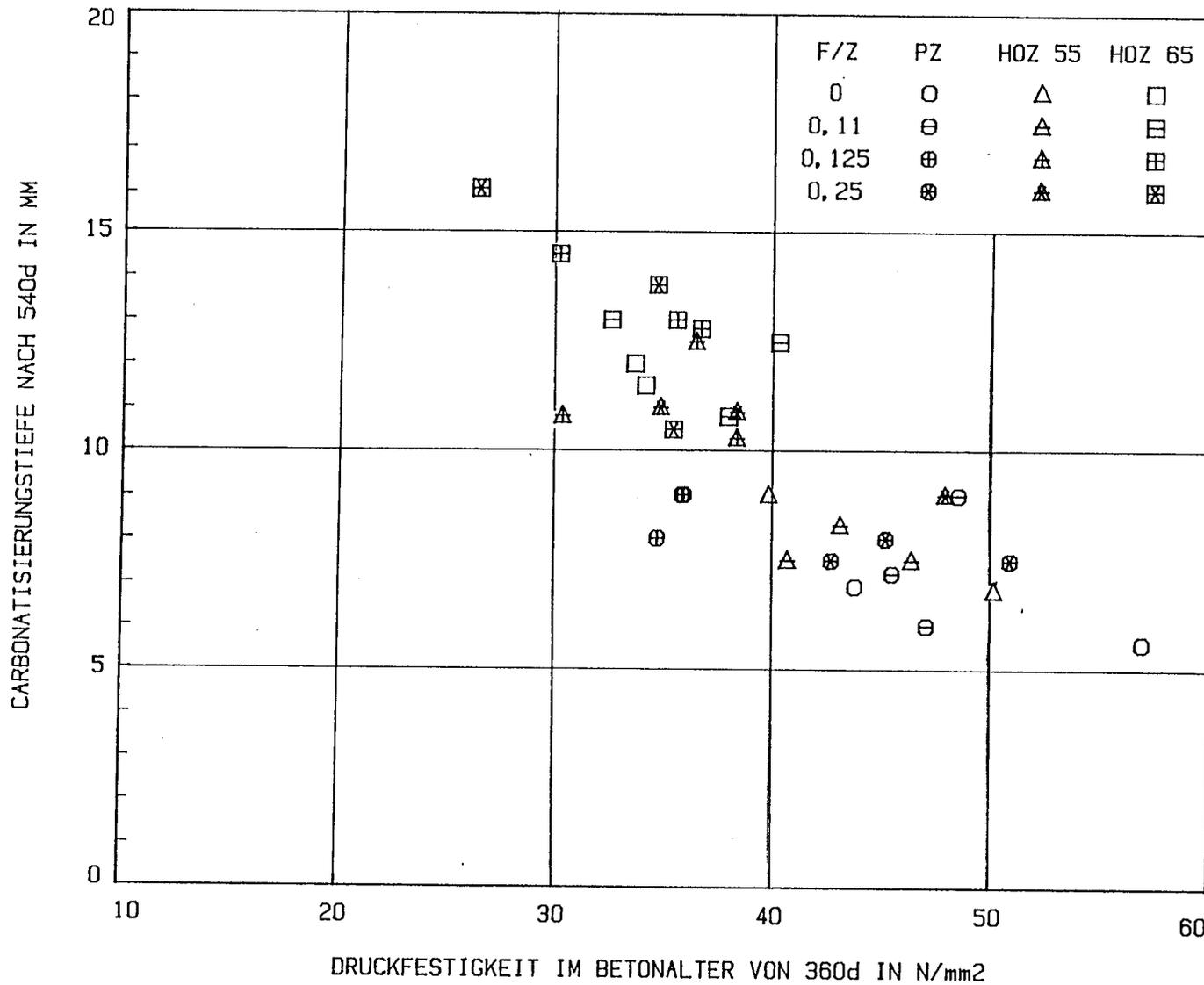


Bild 18: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 1

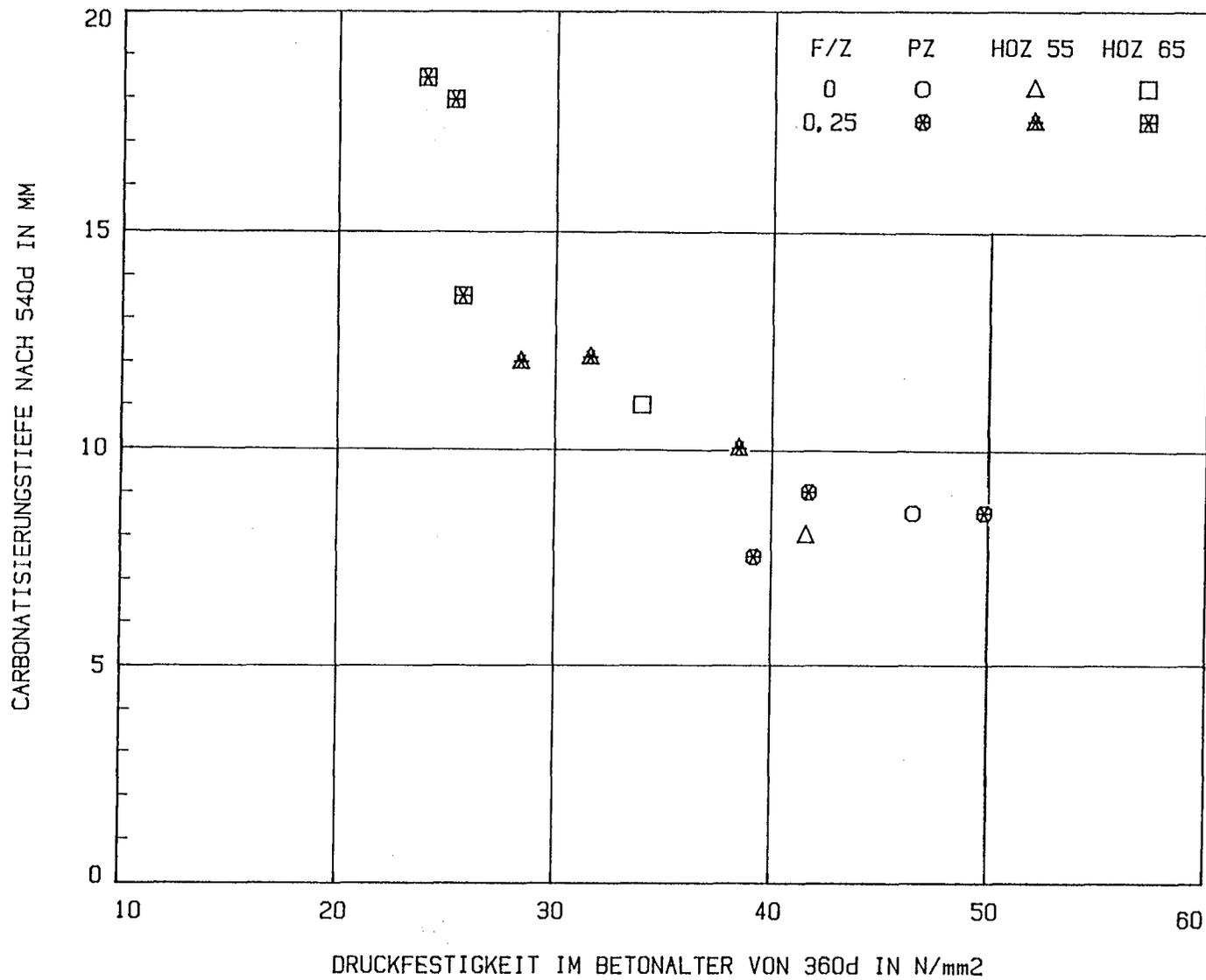


Bild 19: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 2

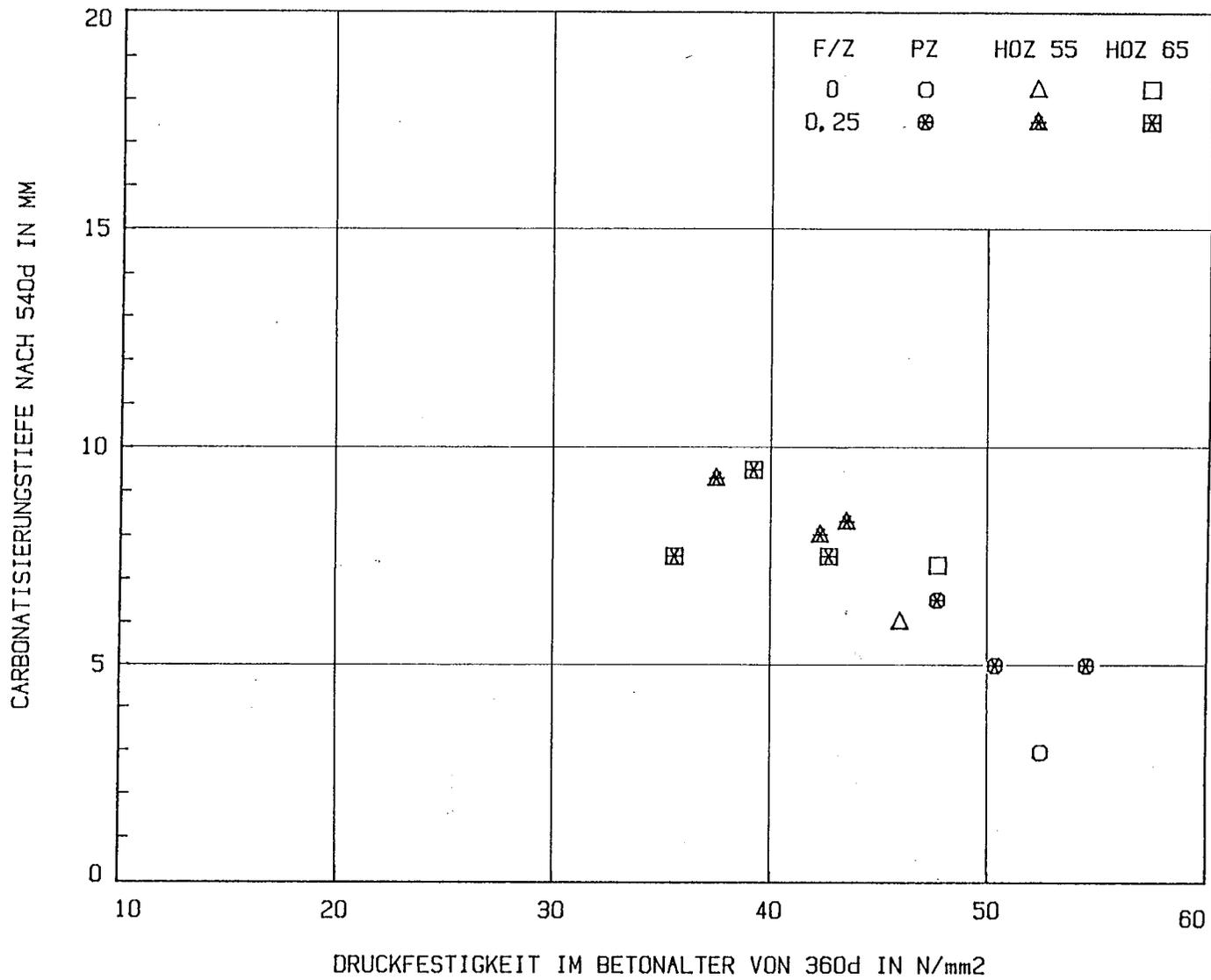


Bild 20: Carbonatisierungstiefen im Betonalter von 1,5 Jahren in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 1 Jahr. Lagerung 3

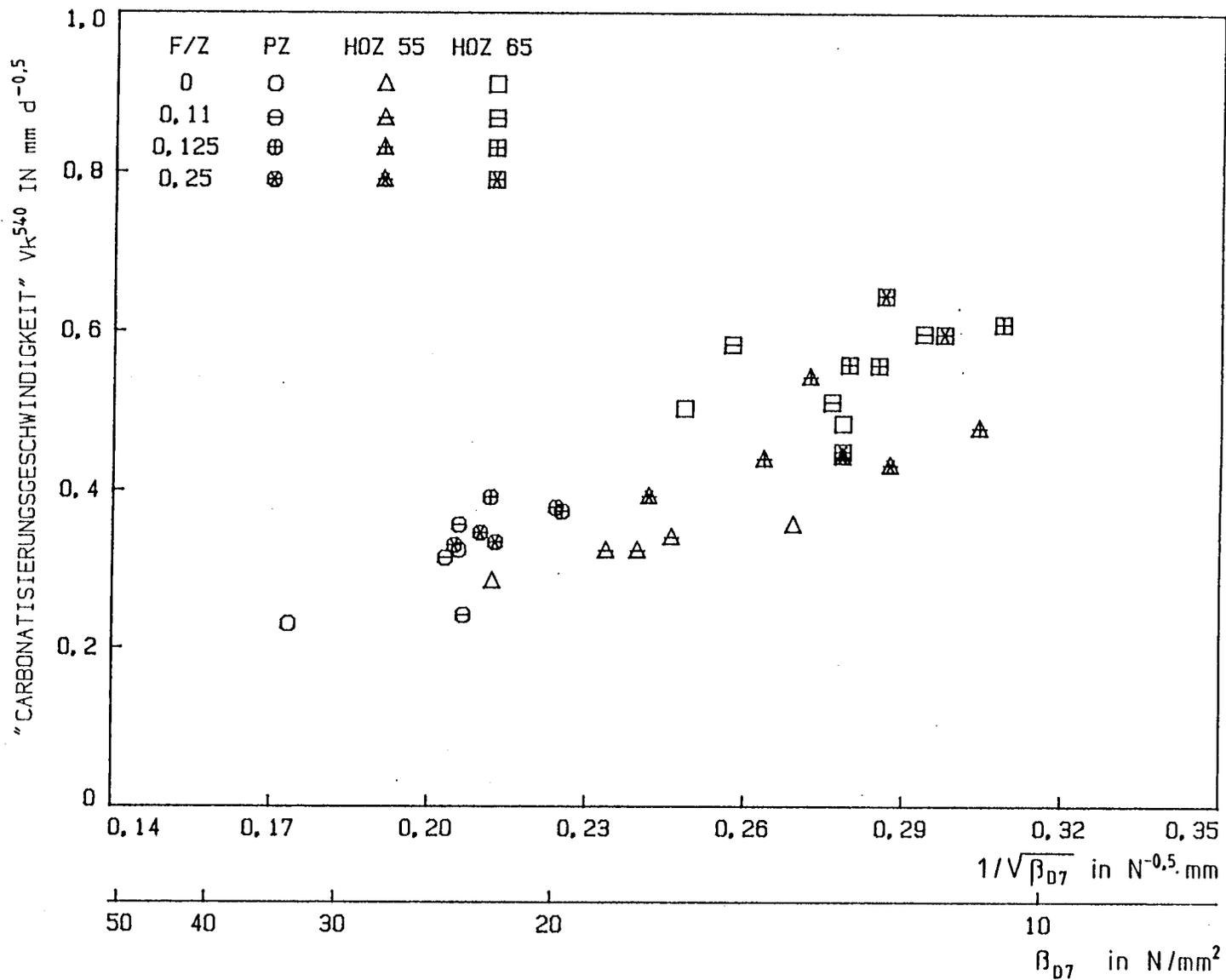


Bild 21: "Carbonatisierungsgeschwindigkeit" v_K in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 7 Tagen (v_K berechnet einschließlich der Meßergebnisse nach 1,5 Jahren) Lagerung 1

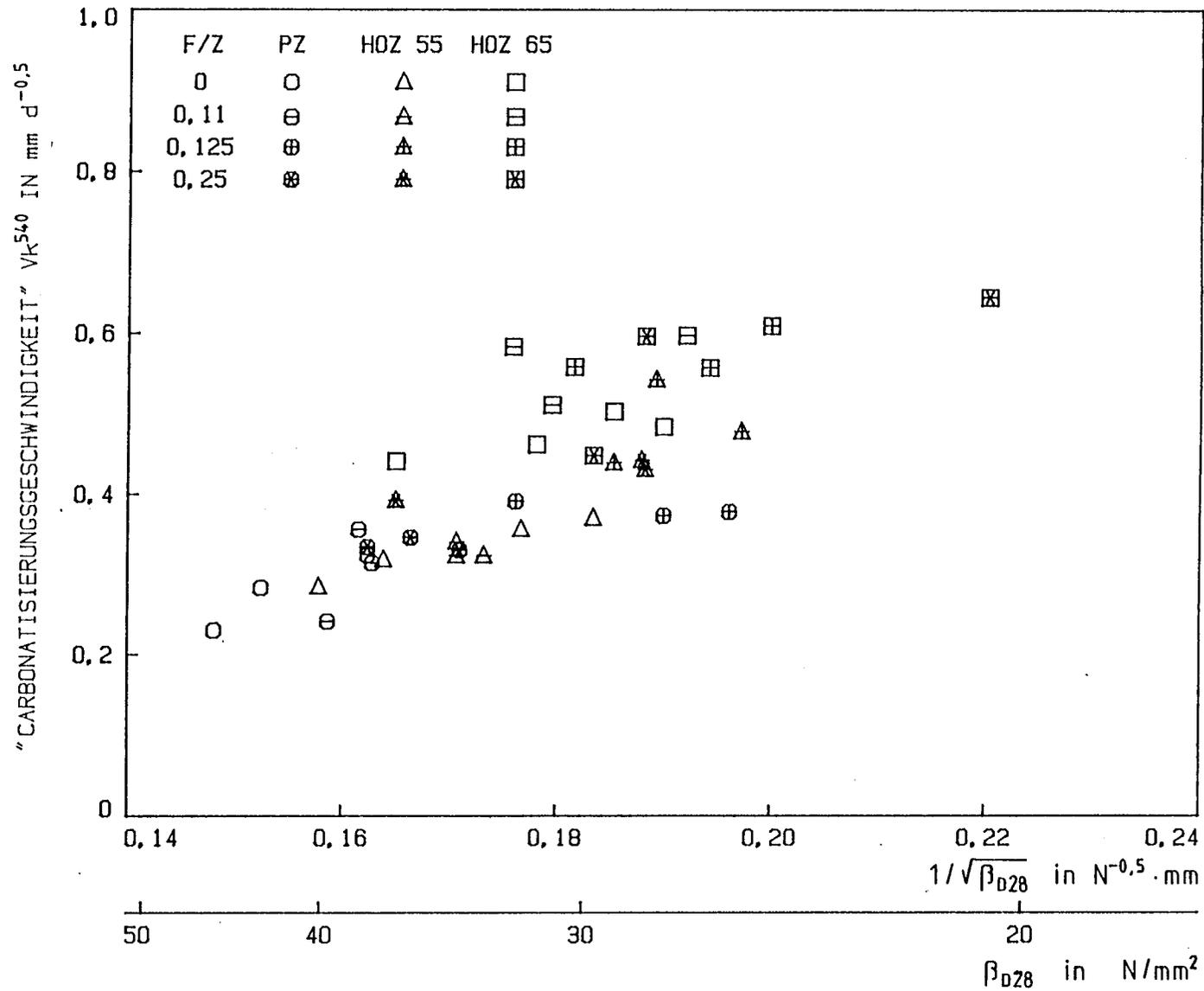


Bild 22: "Carbonatisierungsgeschwindigkeit" v_K in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit im Betonalter von 28 Tagen (v_K berechnet einschließlich der Meßergebnisse nach 1,5 Jahren) Lagerung 1

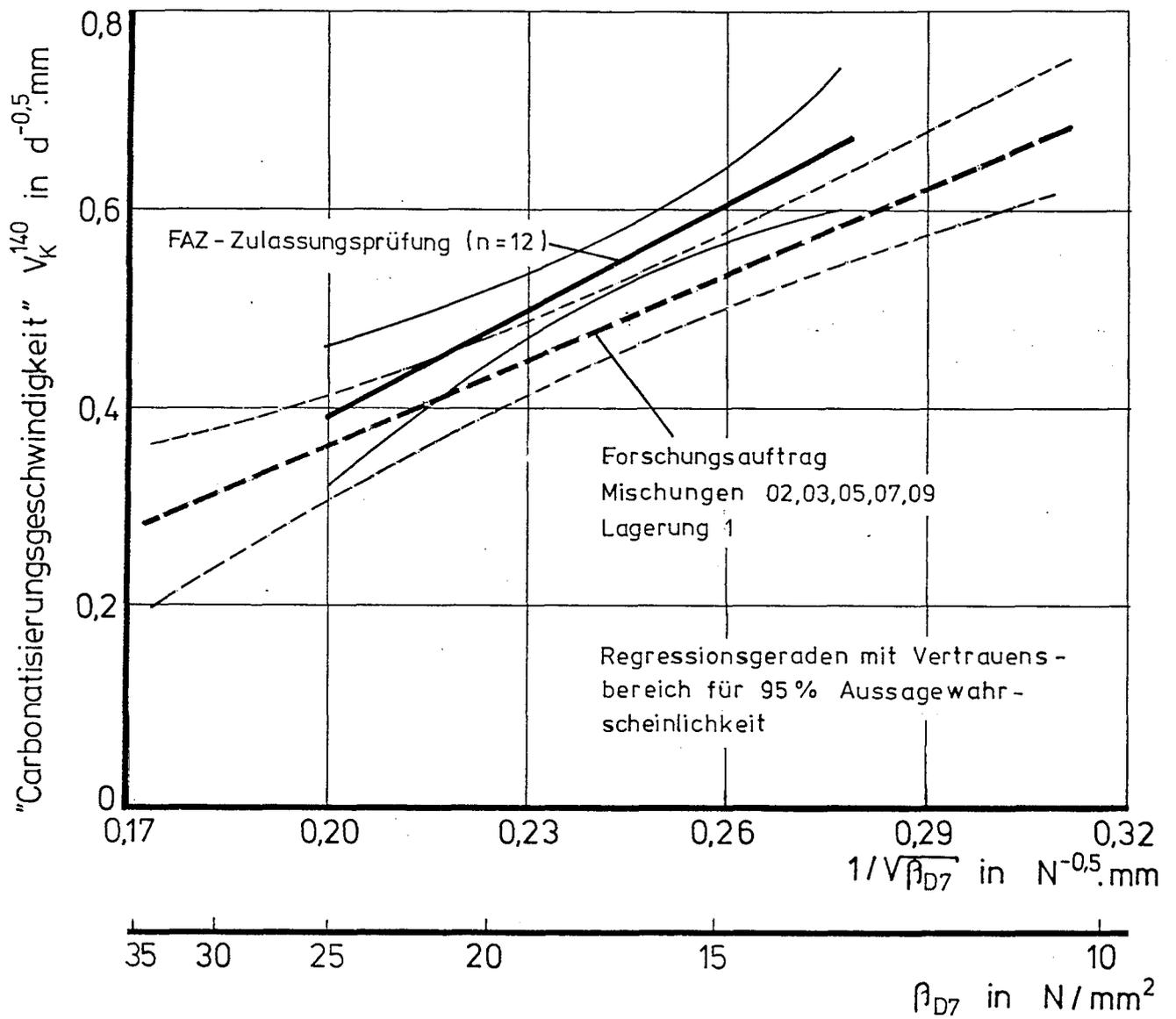


Bild 23: Mittlere "Carbonatisierungsgeschwindigkeiten" v_K^{140} in Abhängigkeit von der Hilfsgröße $1/\sqrt{\beta_{D7}}$

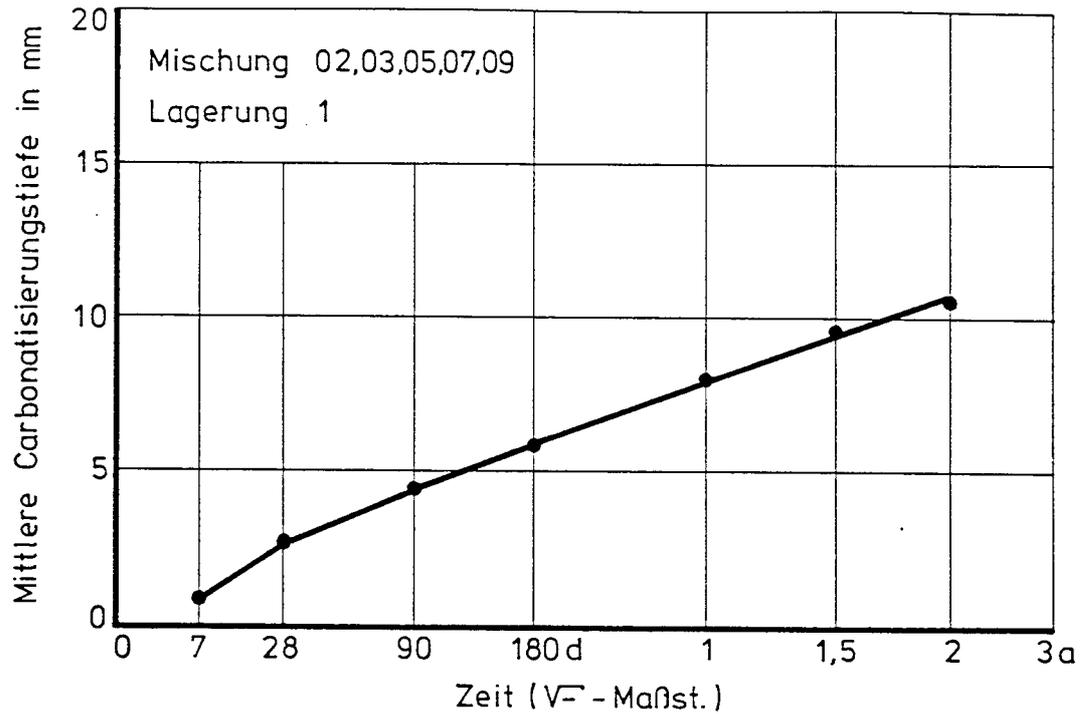


Bild 24: Mittlere Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1

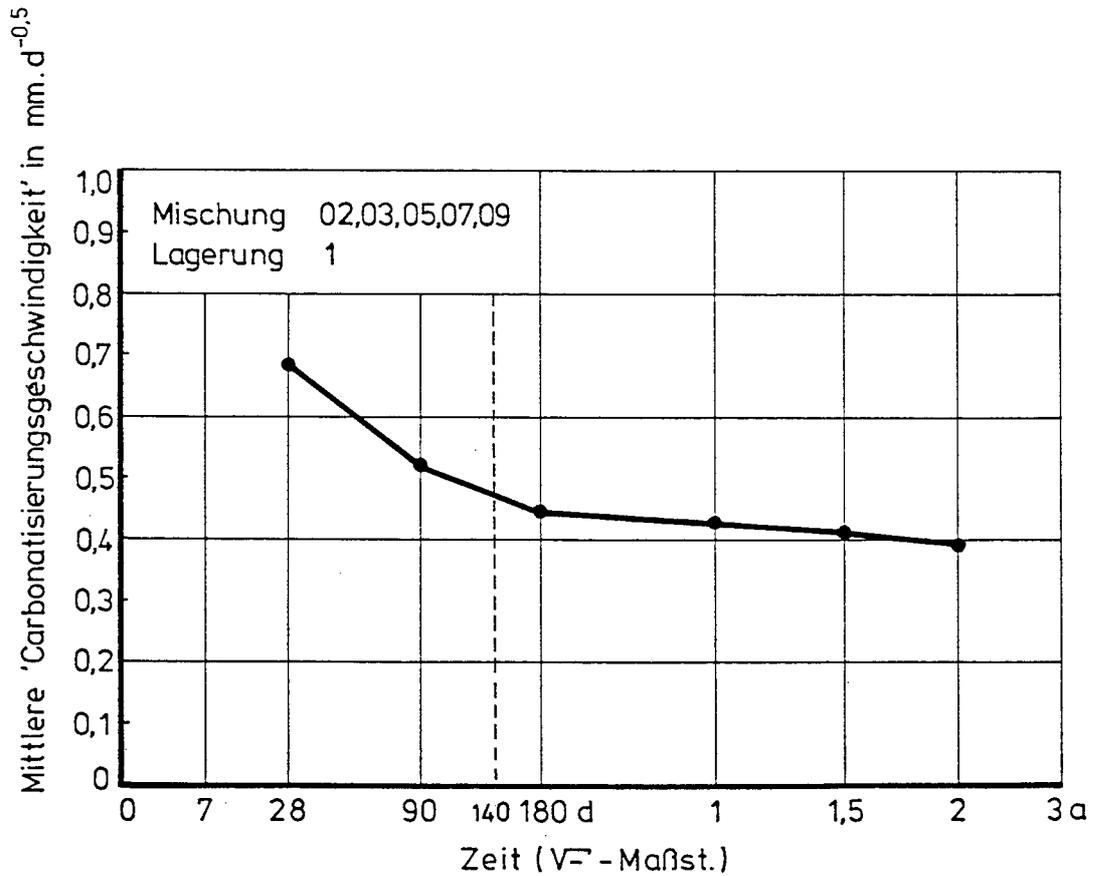


Bild 25: Mittlere "Carbonatisierungsgeschwindigkeiten" in Abhängigkeit von der Carbonatisierungsdauer. Lagerung 1