

Ergänzungsversuche zum  
Karbonatisierungsverhalten  
flugaschehaltiger Mörtel

**T 1883**

T 1883

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

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

Telefon:  
Vermittlung (02 41) 80-51 00  
Durchwahl (02 41) 80-51 07

Datum 06.02.1987  
SB/WA-F 158

ERGÄNZUNGSVERSUCHE ZUM KARBONATISIERUNGSVERHALTEN

FLUGASCHEHALTIGER MÖRTEL

F 158

ABSCHLUSSBERICHT

-----

SACHBEARBEITER: DR.-ING. P. SCHUBERT

AUFTRAGGEBER: INSTITUT FÜR BAUTECHNIK, REICHPIETSCHUFER 72-76,  
1000 BERLIN 30  
GESCH.-Z.: IV/1-5-287-82

INHALTSVERZEICHNIS

SEITE

1	FORSCHUNGSZIEL.....	1
2	VERSUCHSPROGRAMM.....	1
3	VERSUCHSDURCHFÜHRUNG.....	2
4	ERFASSEN UND AUSWERTEN DER VERSUCHSERGEBNISSE.....	3
5	VERSUCHS- UND AUSWERTEERGEBNISSE.....	4
5.1	Druckfestigkeit.....	4
5.2	Karbonatisierung.....	5
6	LITERATUR.....	9
	ZUSAMMENFASSUNG.....	10
	KURZFASSUNG.....	13
	TABELLEN.....	A1-A18
	BILDER.....	B1-B17

## 1 FORSCHUNGSZIEL

Die bislang vorliegenden Ergebnisse von Karbonatisierungsversuchen an flugaschehaltigen Feinbetonen und Betonen ließen im Vergleich zu Feinbetonen und Betonen ohne Flugasche kein wesentlich anderes Karbonatisierungsverhalten erkennen /1/. Diese Untersuchungs- und Auswertergebnisse bedürfen jedoch noch der Ergänzung und Absicherung. Ziel der Forschungsarbeit ist es deshalb, durch zusätzliche Karbonatisierungsversuche an Feinbetonen das Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Betone ausreichend abgesichert darstellen und bewerten zu können.

Parallel zu den Untersuchungen an Feinbetonen wurden im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Hochschule Hannover (Prof. Dr.-Ing. Wierig) Betonversuche mit den gleichen Ausgangsstoffen (Zemente und Flugaschen) durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 2 Jahre. Der Abschlußbericht liegt seit April 1985 vor.

## 2 VERSUCHSPROGRAMM

Eine Übersicht über das Versuchsprogramm gibt die Tabelle 1, die auch die Bezeichnung der Versuchsserien - für die Zuordnung der Versuchsergebnisse - und die verwendeten Zemente und Flugaschen enthält.

Die Untersuchungen wurden vom Institut für Bautechnik, Berlin, finanziell gefördert.

### 3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Alle Feinbetone wurden mit dem Mischungsverhältnis 1 MT Zement bzw. Zement und Flugasche : 3 MT Zuschlag in Anlehnung an DIN 1164, Ausgabe 1978, hergestellt und verdichtet. Die Herstellung erfolgte im Zeitraum Januar bis Mai 1982. Die Prüfkörper lagerten nach dem Entschalen im Alter von 2 d bis zum Alter von 7 bzw. 28 d in Wasser von +20 °C (Vorlagerung) und danach im Normalklima 20/65-1 DIN 50 014 (Hauptlagerung). Im folgenden werden die beiden Vorlagerungen einfachheitshalber mit 7 d und 28 d Wasserlagerung bezeichnet. Die Druckfestigkeit wurde nach DIN 1164 Teil 7 an jeweils 3 Prismenhälften und zwar im Alter von 2, 7, 28, 35, 365 und 1095 d bestimmt. Im Alter von 2, 28 und 365 d wurde zusätzlich die Biegezugfestigkeit an jeweils 3 Prismen geprüft. Die Karbonatisierungstiefe wurde nach der Richtlinie für die Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 (Prüfzeichenrichtlinie), Fassung September 1979, Abschnitt 5.3.6.4, ermittelt. Die Prüfungen erfolgten in der Regel 7, 28, 56, 70, 120, 180, 270, 365, 450, 540, 730, 840 und 1095 d nach Beginn der Hauptlagerung, z. T. auch noch zu einem späteren Termin. Bei einigen Versuchsserien waren die Prüfkörper vor oder bei Erreichen der 3jährigen Versuchsdauer durchkarbonatisiert. Im Bericht wurde jeweils nur der letzte Meßwert für  $d_K$  unter 20 mm angegeben. Zusätzlich zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe 24 h nach dem Ansprühen mit Phenolphthalein - nach Prüfzeichenrichtlinie - wurde die Karbonatisierungstiefe 1 h nach dem Ansprühen ermittelt.

Von den verwendeten 3 Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen (s. Tabelle 1) wurden wesentliche Eigenschaftskennwerte nach der Prüfzeichenrichtlinie bestimmt. Sie sind in der Tabelle 2 aufgeführt.

Die Prüfung der verwendeten Zemente nach DIN 1164 erfolgte vereinbarungsgemäß im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der TU Hannover. Die Prüfergebnisse enthält die Tabelle 3.

#### 4 ERFASSEN UND AUSWERTEN DER VERSUCHSERGEBNISSE

Die Versuchsergebnisse wurden auf EDV-Datenträger (Plattenspeicher) registriert und mittels dafür erstellter Rechenprogramme ausgewertet. Je Versuchsserie wurden die Druckfestigkeitswerte und die Karbonatisierungstiefen in Abhängigkeit vom Prüfalter in tabellarischer Form zusammengestellt. Mittels einer linearen Regression wurde der Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Karbonatisierungsdauer  $t_K$

$$d_K = d_0 + v_K \cdot \sqrt{t_K} \quad (1)$$

mit  $v_K$ : Karbonatisierungsgeschwindigkeit

für  $d_K$ -Werte größer Null rechnerisch ermittelt und grafisch mit den Versuchswerten dargestellt.

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wurde jeweils für die einzelnen Prüftermine bzw. Hauptlagerungsdauern (ab 70 d) errechnet, so daß auch die Veränderung von  $v_K$  mit zunehmender Hauptlagerungsdauer angegeben werden kann. Dazu wurden Verhältniswerte der  $v_K$ -Werte bezogen auf  $v_K$  nach 70, 180 und 365 d Lagerungsdauer errechnet.

Mit Hilfe einer zweiten linearen Regressionsrechnung wurde der Zusammenhang zwischen Karbonatisierungsgeschwindigkeit und 28 d-Druckfestigkeit

$$v_K = a + b \cdot 1/\sqrt{\beta_{D28}} \quad (2)$$

rechnerisch bestimmt und grafisch mit den Versuchswerten dargestellt.

## 5 VERSUCHS- UND AUSWERTERGEBNISSE

Verwendete Kurzzeichen sind auf Seite A1 zusammengestellt.

### 5.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeitswerte bis einschließlich 1095 d Prüfal-ter enthalten die Tabellen 4.1 und 4.2. In den Tabellen sind auch die Ausbreitmaße der Feinbetone und die Biegezugfestigkeitswerte für die Prüfalalter 2, 28 und 365 d angegeben.

In der Tabelle 4.3 sind relative Druckfestigkeitswerte  $rel \beta_D$  der Feinbetone ohne und mit der Flugasche F1 für Alter von 1 und 3 Jahren bezogen auf die jeweilige 28 d-Druckfestigkeit zusammengestellt. Der Übersichtlichkeit wegen und weil die Unterschiede zwischen den 3 Flugaschen klein sind, wurde nur eine Flugasche berücksichtigt. Die Relativwerte zeigen, daß der Festigkeitszuwachs (nach 28 d) erwartungsgemäß für die längere Wasservorlagerung erheblich größer ist. Bei Austausch von 20 M.-% PZ 35 F und HOZ 35 L (Z1, Z2) gegen Flugasche war  $rel \beta_D$  in allen Fällen größer, z. T. bis um rd. 0,30, als bei den vergleichbaren Feinbetonen ohne Flugasche. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die 28 d-Druckfestigkeit der flugaschehaltigen Feinbetone kleiner als die der Feinbetone ohne Flugasche ist. Bei den Feinbetonen mit HOZ 35 L-NW/HS und Flugasche ergab sich meist ein kleinerer  $rel \beta_D$ -Wert als bei denen ohne Flugasche. Möglicherweise war der  $Ca(OH)_2$ -Gehalt zu niedrig für eine entsprechende puzzolanische Reaktion der Flugasche. Der Festigkeitszuwachs bei

den Feinbetonen mit PZ 35 F und HOZ 35 L kann zumindest für das Alter von 3 Jahren teilweise durch Karbonatisierung verursacht worden sein (s. dazu in /2/ und Vergleich mit den  $d_K$ -Werten in den Tabellen 5.1 und 5.2).

## 5.2 Karbonatisierung

In den Tabellen 5.1 und 5.2 ist die Karbonatisierungstiefe  $d_K$  nach 1, 1,5, 2, 2,5 und 3 Jahren Hauptlagerung, ermittelt jeweils 24 h nach dem Brechen und Ansprühen, angegeben.

Die  $d_K$ -Werte, bestimmt jeweils 1 h nach dem Brechen und Ansprühen, enthalten die Tabellen 5.3 und 5.4.

Die Tabellen 6.1 bis 6.4 enthalten die Parameter  $d_0$  und  $v_K$  der Gleichung 1 mit Bestimmtheitsmaß und Anzahl der Versuchswerte für eine Karbonatisierungsdauer von in der Regel 1095 d.

Wie die im allgemeinen hohen Bestimmtheitsmaße, aber auch die grafischen Darstellungen - (s. beispielhaft Bilder 1 bis 6) - zeigen, läßt sich der Zusammenhang zwischen  $d_K$  und  $\sqrt{t_K}$  meist in guter Näherung für die gesamte betrachtete Versuchsdauer durch den linearen Ansatz nach Gleichung 1 entsprechend dem 1. Fick'schen Gesetz beschreiben.

Größere Abweichungen im anfänglichen Lagerungszeitraum, die erhebliche Unterschiede in der Karbonatisierungsgeschwindigkeit zur Folge haben (siehe später) sind im wesentlichen auf hydrationsbedingte Änderungen des Diffusionskoeffizienten der Feinbetone zurückzuführen.

Die insgesamt zutreffende Beschreibung durch Gleichung 1 wurde auch durch eine zusätzliche Auswertung der Versuchsergebnisse mit dem Ansatz

$$d_K = c \cdot t^n \quad (3)$$

bestätigt. Für  $n$  ergaben sich bis auf 3 Ausnahmen Werte zwischen 0,40 und 0,60, meist nahe bei 0,50.

Der Vergleich der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten  $v_{K, 1 h}$  und  $v_{K, 24 h}$  aus den Karbonatisierungstiefen bestimmt 1 h und 24 h nach Aufsprühen von Phenolphthalein, ergab praktisch keinen Einfluß der "Liegezeit" bis zum Messen von  $d_K$  (maximaler Unterschied:  $0,01 \text{ mm} \cdot d^{-0,5}$ ). Die entsprechenden Regressionsgleichungen lauten:

$$7 \text{ d Wasservorlagerung: } v_{K, 1 h} = 0,014 + 0,981 \cdot v_{K, 24 h} \quad (4a)$$

$$28 \text{ d Wasservorlagerung: } v_{K, 1 h} = 0,004 + 0,977 \cdot v_{K, 24 h} \quad (4b).$$

Das Bestimmtheitsmaß betrug in beiden Fällen 99,5 %.

Dagegen unterschieden sich die Karbonatisierungstiefen  $d_{K, 1 h}$  und  $d_{K, 24 h}$  eindeutig, wenn auch im allgemeinen vergleichsweise wenig. Meistens war  $d_{K, 24 h}$  größer als  $d_{K, 1 h}$ , in einigen wenigen Fällen gleichgroß (Vergleich Tabelle 5.1 mit 5.3 und Tabelle 5.2 mit 5.4). Beispielhaft durchgeführte Regressionsrechnungen für  $d_K$  nach 1jähriger Lagerungsdauer ergaben die folgenden Gleichungen:

$$7 \text{ d Wasservorlagerung: } d_{K, 1 h} = -0,288 + 1,010 \cdot v_{K, 24 h} \quad (5a)$$

$$28 \text{ d Wasservorlagerung: } d_{K, 1 h} = -0,724 + 1,098 \cdot v_{K, 24 h} \quad (5b).$$

Die Bestimmtheitsmaße betragen 99,7 und 98,2 %.

Danach ist  $d_{K, 24 h}$  bei der 7tägigen Wasservorlagerung im Mittel um 0,2 mm größer als  $d_{K, 1 h}$ . Für die 28tägige Wasservorlagerung ist  $d_{K, 24 h}$  bei kleinen  $d_K$ -Werten (etwa 2

bis 3 mm) um bis zu 0,5 mm größer als  $d_K$ , 1 h, bei größeren  $d_K$ -Werten ist der Unterschied entsprechend Gleichung 5b kleiner.

Die höheren  $d_K$ -Werte nach der 24stündigen Liegezeit werden in /3/ (Abschnitt 4.2) mit dem Verdunsten des Wasserfilms an den Porenwänden und dem dadurch absinkenden pH-Wert des Systems Porenwasser und Indikator erklärt.

In den Bildern 7 bis 12 ist der Zusammenhang zwischen Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  und der 28 d-Druckfestigkeit  $1/\sqrt{\beta_{D28}}$  für die Prüfserien mit 7 und 28tägiger Wasservorlagerung dargestellt. In diese Bilder wurde die Ausgleichsgerade aus /1/ eingezeichnet, die allerdings mit Bezug auf die 35 d-Druckfestigkeit für 28 d in Wasser und 7 d im Normalklima 20/65 vorgelagerte Feinbetone und Betone ermittelt wurde.

Aus den Bildern 7 bis 12 läßt sich im allgemeinen kein im Vergleich zu den Feinbetonen ohne Flugasche ungünstigeres Karbonatisierungsverhalten der flugaschehaltigen Feinbetone erkennen, wenn auf gleiche 28 d-Druckfestigkeit bezogen wird.

Im Vergleich zu den Feinbetonen mit PZ 35 F und HOZ 35 L ohne und mit Flugasche waren die  $v_K$ -Werte für die Feinbetone mit Flugasche und HOZ 35 L-NW/HS, aber auch für die Feinbetone mit HOZ 35 L-NW/HS ohne Flugasche, jedoch meist deutlich höher (siehe z. B. Bild 12).

Mit den Versuchsergebnissen wurden je Vorlagerungsdauer und Zement Regressionsgeraden nach Gleichung 2 errechnet. Die Gleichungsparameter, das Bestimmtheitsmaß und der durch die Versuchswerte belegte Bereich sind in der Tabelle 7 angegeben. Die Geraden beinhalten jeweils die Feinbetone ohne und mit Flugasche für beide  $w/(z+f)$ -Werte. Sie sind in Bild 13

dargestellt. Deutlich zeigt sich der zu erwartende Einfluß der Wasservorlagerungsdauer: Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ist bei gleicher 28 d-Druckfestigkeit kleiner, wenn länger wasservorgelagert wurde. Die zuvor bereits angesprochenen Unterschiede zwischen verschiedenen Zementen bestehen vor allem zwischen HOZ 35 L-NW/HS und den beiden anderen Zementen HOZ 35 L und PZ 35 F. Die Feinbetone mit HOZ 35 L und PZ 35 F unterscheiden sich vergleichsweise wenig. Bei gleicher 28 d-Druckfestigkeit ergeben sich die kleinsten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten für die Feinbetone aus PZ 35 F.

Die eingezeichnete Ausgleichsgerade aus /1/ stimmt recht gut mit den Versuchsergebnissen dieser Forschungsarbeit überein, wenn berücksichtigt wird, daß sie sich auf die 35 d-Druckfestigkeit von 28 d wasservorgelagerten Feinbetonen und Betonen bezieht. Bei Bezug auf die 28 d-Druckfestigkeit würde sich die Gerade nach rechts, und zwar um etwa  $0,01 \frac{1}{\sqrt{B_{D28}}}$ , verschieben.

Ein nennenswerter Einfluß der 3 verschiedenen Flugaschen auf das Karbonatisierungsverhalten der jeweiligen Feinbetone ist nicht erkennbar.

Die Bilder 14 bis 17 zeigen beispielhaft die Veränderung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit der Lagerungsdauer. Danach verändert sich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit - auch in Übereinstimmung mit den hier nicht dargestellten Versuchsergebnissen - bis zu einer Lagerungsdauer von etwa  $\frac{1}{2}$  bis 1 Jahr meist deutlich, je nach Betonzusammensetzung und Vorlagerungsdauer auch unterschiedlich stark, danach jedoch nur wenig. Bei Karbonatisierungsversuchen sollte deshalb auf eine ausreichend lange Lagerungsdauer - mindestens 180 d - geachtet werden.

## 6 LITERATUR

- /1/ Schubert, P. ; vom Berg, W.: Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 : Eigenschaften von Flugaschen und von flugaschehaltigen Mörteln und Betonen. In: Betonwerk+Fertigteil-Technik (1979), Nr. 10, S. 692-696
  
- /2/ Manns, W. ; Schatz, O.: Über die Beeinflussung der Festigkeit von Zementmörteln durch Karbonatisierung. In: Betonzeitung-Zeitung (1967), Nr. 4, S. 148-156
  
- /3/ Schießl, P.: Zur Frage der zulässigen Rißbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons. Berlin; Wiesbaden : Ernst & Sohn. In: Deutscher Ausschuß für Stahlbeton (1976), Nr. 255

## ZUSAMMENFASSUNG

Die bislang vorliegenden Ergebnisse von Karbonatisierungsversuchen an flugaschehaltigen Feinbetonen und Betonen ließen im Vergleich zu Feinbetonen und Betonen ohne Flugasche kein wesentlich anderes Karbonatisierungsverhalten erkennen /1/. Diese Untersuchungs- und Auswerteergebnisse bedürfen jedoch noch der Ergänzung und Absicherung. Ziel der Forschungsarbeit war es deshalb, durch zusätzliche Karbonatisierungsversuche an Feinbetonen das Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Betone ausreichend abgesichert darstellen und bewerten zu können.

Parallel zu den Untersuchungen an Feinbetonen wurden im Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Technischen Hochschule Hannover (Prof. Dr.-Ing. Wierig) Betonversuche mit den gleichen Ausgangsstoffen (Zemente und Flugaschen) durchgeführt. Die Versuchsdauer betrug 2 Jahre. Der Abschlußbericht liegt seit April 1985 vor.

Die Versuche wurden an Feinbetonen mit PZ 35 F, HOZ 35 L und HOZ 35 L-NW/HS, 3 verschiedenen Steinkohlenflugaschen (im wesentlichen unterschiedliche Feinheit), einem Flugascheanteil bezogen auf den Zement von 0, 0,25, z. T. auch 0,125, und Wasserzement+Flugasche-Werten von 0,50 und 0,60 durchgeführt. Die Feinbetonprüfkörper ohne und mit Flugasche (Austausch gegen Zement) wurden 2 d in der Form, bis zum Alter von 7 und 28 d in Wasser und danach 3 Jahre im Klima 20/65 (20 °C, 65 % relative Luftfeuchtigkeit) gelagert. Geprüft wurden die Druckfestigkeit  $\beta_D$  im Alter von 2, 7, 28, 35 d, 1 a, 3 a, die Biegezugfestigkeit  $\beta_{BZ}$  im Alter von 2, 28 und 365 d sowie die Karbonatisierungstiefe  $d_K$  nach verschiedener Lagerungsdauer  $t$ , sowohl 1 h als auch 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein.

Mit den ermittelten  $d_K$ -Werten wurde je Versuchsserie die Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  aus

$$d_K = k_0 + v_K \sqrt{t} \quad (1)$$

errechnet. Die  $v_K$ -Werte wurden in Beziehung zur 28 d-Druckfestigkeit dargestellt und in Form von Regressionsgeraden

$$v_K = a + b/\sqrt{\beta_{D28}} \quad (2)$$

ausgewertet.

Wesentliche Untersuchungsergebnisse sind:

- a) Der Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Zeit  $t$  ließ sich meist in guter Näherung für die gesamte betrachtete Versuchsdauer mit der Gleichung 1 entsprechend dem 1. Fick'schen Gesetz beschreiben.

Allerdings veränderte sich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bis zu einer Lagerungsdauer von  $1/2$  bis 1 Jahr meist deutlich, danach nur wenig. Dies ist im wesentlichen auf die Änderung des Diffusionskoeffizienten der Feinbetone infolge Hydratisierung zurückzuführen.

- b) Bei der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe 1 h und 24 h nach dem Aufsprühen mit Phenolphthalein ergaben sich erwartungsgemäß nach 24 h (s. dazu in /3/, Abschn. 4.2) meist größere  $d_K$ -Werte. Der Unterschied zwischen  $d_K$  nach 1 h und 24 h war im allgemeinen kleiner als 0,5 mm.
- c) Bezogen auf die gleiche 28 d-Druckfestigkeit (Gleichung 2) ist ein nennenswerter und eindeutiger Unterschied im Karbonatisierungsverhalten zwischen ansonsten gleich zusammengesetzten Feinbetonen ohne und mit Flugasche im allgemeinen nicht festzustellen. Dies entspricht den Untersuchungsergebnissen in /1/. Besonders für die Feinbe-

tone mit dem vergleichsweise sehr kalkarmen Zement HOZ 35 L-NW/HS und Flugasche (s. Bild 9), aber auch für diejenigen ohne Flugasche (s. Bild 12) ergaben sich bei gleichgroßer 28 d-Druckfestigkeit allerdings deutlich höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten.

- d) Ein Einfluß durch die 3 verschiedenen Flugaschen auf das Karbonatisierungsverhalten war nicht erkennbar.
- e) Eine weitergehende Auswertung der Versuchsergebnisse unter Einbeziehung anderer Untersuchungen ist beabsichtigt.

### KURZFASSUNG

Zur Absicherung und Ergänzung früherer Untersuchungsergebnisse zum Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Mörtel und Betone wurden Versuche an Feinbetonen mit PZ 35 F, HOZ 35 L und HOZ 35 L-NW/HS, 3 verschiedenen Steinkohlenflugaschen, einem Flugascheanteil bezogen auf den Zement von 0, 0,25, z. T. auch 0,125, und Wasserzement+Flugasche-Werten von 0,50 und 0,60 durchgeführt. Die Feinbetone ohne und mit Flugasche (Austausch gegen Zement) wurden bis zum Alter von 7 und 28 d in Wasser und danach 3 Jahre im Klima 20/65 (20 °C, 65 % relative Luftfeuchtigkeit) gelagert. Geprüft wurden Druck-, Biegezugfestigkeit  $\beta_D$ ,  $\beta_{BZ}$  und Karbonisierungstiefe  $d_K$  nach verschiedener Lagerungsdauer  $t$ . Mit den ermittelten  $d_K$ -Werten wurde je Versuchsserie die Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  aus  $d_K = k_0 + v_K \cdot \sqrt{t}$  (1) errechnet. Die  $v_K$ -Werte wurden in Beziehung zur 28 d-Druckfestigkeit dargestellt und in Form von Regressionsgeraden  $v_K = a + b/\sqrt{\beta_{D28}}$  (2) ausgewertet.

Wesentliche Untersuchungsergebnisse sind:

- a) Bezogen auf die gleiche 28 d-Druckfestigkeit (Gleichung 2) ist ein nennenswerter und eindeutiger Unterschied im Karbonatisierungsverhalten zwischen Feinbetonen ohne und mit Flugasche im allgemeinen nicht festzustellen. Dies entspricht den Ergebnissen der früheren Untersuchungen.
- b) Besonders für Feinbetone mit dem vergleichsweise sehr kalkarmen Zement HOZ 35 L-NW/HS und Flugasche, aber auch für diejenigen ohne Flugasche ergaben sich bei gleichgroßer 28 d-Druckfestigkeit allerdings deutlich höhere Karbonatisierungsgeschwindigkeiten.
- c) Ein Einfluß durch die 3 verschiedenen Flugaschen auf das Karbonatisierungsverhalten war nicht erkennbar.
- d) Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit veränderte sich bis zu einer Lagerungsdauer von  $1/2$  bis 1 Jahr meist deutlich, danach nur wenig.

Weitergehende Untersuchungen und Auswertungen sind vorgesehen.

## SUMMARY

To confirm and supplement earlier test results on carbonation behaviour of mortars and concretes containing fly ash, concretes with fine aggregates ( $\leq 8$  mm) were made with Portland cement 35 F, blast furnace slag cement 35 L and 35 L-NW/HS (low heat of hydration/high sulfate resistance), 3 types of fly ash from bituminous coal (different fineness), fly ash to cement ratios of 0, 0.25, and in some cases also of 0.125 and water to cement plus fly ash ratios of 0.50 and 0.60. The mortars with and without fly ash were stored in water for 7 and 28 d and thereafter for 3 years in an atmosphere of 20 °C and 65 % relative humidity. The compressive ( $f_c$ ) and flexural strength ( $f_f$ ) as well as the carbonation depth ( $d_C$ ) were determined after various storage periods  $t$ . The carbonation rate  $v_C$  for each test series was calculated with the  $d_C$ -values from the relationship

$$d_C = k_0 + v_C \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

The  $v_C$ -values were related to the 28 d-compressive strength and analysed with the regression equation

$$v_C = a + b/\sqrt{f_{c28}} \quad (2)$$

- a) The main test results are as follows: When related to the same strength (equation 2) there was generally no substantial difference in the carbonation behaviour of mortars with and without fly ash. This corresponds to earlier test results.
- b) The cement with comparatively very low lime content HOZ 35 L-NW/HS plus fly ash but also without fly ash lead, however, to clearly higher rate of carbonation when related to the same 28 d-compressive strength.
- c) No influence of the 3 different fly ashes on the carbonation behaviour was observed.
- d) There was a continuous and clear change in the rate of carbonation until a storage period of  $1/2$  to 1 year. Thereafter the change was small.

More elaborate investigation and analysis are planned.

RESUME

En vue de compléter et d'assurer les résultats d'essais sur le comportement de carbonatation de ciments et bétons contenant des cendres volantes, des essais ont été faits avec des bétons fins avec PZ 35 F, HOZ 35 L et HOZ 35 L-NW/HS, 3 différentes cendres de houille, une teneur en cendres volantes relative au ciment de 0, 0.25 et en parties 0.125, et des rapports eau-ciment + cendres volantes de 0.50 et 0.60. Les bétons fins, avec ou sans cendres volantes (échange contre le ciment), ont été plongés 7 et 28 jours dans l'eau pour être ensuite conservés 3 ans sous un climat de 20/65 (20 °C, 65 % d'humidité relative). On a déterminé la résistance à la compression et à la flexion ( $\beta_D$  et  $\beta_{BZ}$ ) et la profondeur de carbonatation ( $d_K$ ) à des âges différents.

La vitesse de carbonatation  $v_K$  pour les différents essais a pu être déterminée à l'aide de la relation  $d_K = k_0 + v_K \cdot \sqrt{t}$  (1). Les valeurs des vitesses ont été mises en relation avec la résistance à la compression à l'âge de 28 jours ( $\beta_{D,28}$ ). La représentation se fait par les droites de régression  $v_K = a + b/\sqrt{\beta_{D,28}}$  (2).

Les résultats essentiels des essais sont:

- a) Pour la même résistance à la compression de 28 jours, il n'y a pas de différences essentielles dans le comportement de carbonatation entre bétons fins avec ou sans cendres volantes. Ceci correspond parfaitement aux résultats d'essais antérieurs.
- b) Des ciments relativement très pauvres en chaux, ici HOZ 35 L-NW/HS, ont mené, avec cendres, à une nette augmentation des vitesses de carbonatation, ceci pour la même résistance de 28 jours.
- c) Une influence des 3 différentes cendres volantes sur le comportement de carbonatation n'a pas pu être observée.
- d) La vitesse de carbonatation changeait de façon très nette jusqu'à l'âge de 1/2 à 1 an, après restait plus ou moins constante.

Des essais et élaborations supplémentaires sont prévus.

VERWENDETE KURZZEICHEN

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
a	mm	Ausbreitmaß
Best	%	Bestimmtheitsmaß
$d_K$	mm	Karbonatisierungstiefe
f/z	-	Masse Steinkohlenflugasche/ Masse Zement
F	-	Flugasche
n	-	Anzahl Versuchswerte
rel $\beta_D$	-	relative Druckfestigkeit
t, $t_K$	d, a	Alter, Lagerungsdauer
$v_K$	mm · d <sup>-0,5</sup>	Karbonatisierungsgeschwin- digkeit
VL	-	Vorlagerung
w/(z+f)	-	Wasser/(Zement+Steinkohlen- flugasche)
Z	-	Zement
$\beta_{BZ}$	N/mm <sup>2</sup>	Biegezugfestigkeit
$\beta_D$	N/mm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit

Tabelle 1: Versuchsprogramm "Ergänzungsversuche zum Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Feinbetone" mit Bezeichnung der Versuchsserien (Nr. 1 bis 60)

Vorlagerung	Hauptlagerung	$\frac{w}{z+f}$	Sieblinie	Zement <sup>1)</sup>	Null- versuch	Flugasche <sup>2)</sup>			
						F1	F2	F3	
						f / z			
					0	0,125	0,25	0,25	0,25
7 d (2 d in der Form, 5 d in Wasser)	Normalklima 20/65	0,50	A8/B8	Z1	31	32	33	34	35
				Z2	36	37	38	39	40
				Z3	41	42	43	44	45
		0,60	C8 <sup>3)</sup>	Z1	46	47	48	49	50
				Z2	51	52	53	54	55
				Z3	56	57	58	59	60
28 d (2 d in der Form, 26 d in Wasser)	Normalklima 20/65	0,50	A8/B8	Z1	1	2	3	4	5
				Z2	6	7	8	9	10
				Z3	11	12	13	14	15
		0,60	C8 <sup>3)</sup>	Z1	16	17	18	19	20
				Z2	21	22	23	24	25
				Z3	26	27	28	29	30

1) Z1: PZ 35 F, Z2: HOZ 35 L, Z3: HOZ 35 L -NW/HS

2) F1: SAFAMENT F III, F2: SAFAMENT W II, F3: MORIS FÜLLER

3) Anstelle Sieblinie A8/B8, da sonst zu große Entmischung

Tabelle 2: Steinkohlenflugaschen; chemische Zusammensetzung und granulometrische Eigenschaften

Prüfgröße	Einheit	Flugasche		
		F1 (B1423)	F2 (B1425)	F3 (B1393)
Chemische Zusammensetzung <sup>1)</sup>				
SiO <sub>2</sub>	M.-%	48,1	52,3	55,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		27,2	28,3	26,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		10,4	7,76	6,67
CaO		2,88	1,65	3,06
K <sub>2</sub> O		5,60	5,85	4,75
Na <sub>2</sub> O		0,85	0,62	0,68
TiO <sub>2</sub>		1,23	1,32	1,18
MgO		1,82	1,08	1,03
SO <sub>3</sub> <sup>2)</sup>		0,27	0,07	0,03
PbO		0,65	0,41	0,07
ZnO		0,42	0,24	0,12
GV <sup>3)</sup>		1,35	1,94	2,91
SO <sub>3</sub>		0,65	0,44	0,17
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,33	0,21	0,13
granulometrische Eigenschaften				
Kornanteile				
< 0,02 mm	M.-%	59	89	56
< 0,04 mm	M.-%	78	96	73
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	2378	2485	2180
spezifische Oberfläche	cm <sup>2</sup> /g	3156	5008	2783

1) aus dem Prüfbericht GA 1449 des Instituts für Gesteinshüttenkunde der RWTH Aachen

2) bestimmt in Boratschmelze als Ergänzung zu 100 M.-%

3) bestimmt an der bei 110 °C getrockneten Probe

Tabelle 3: Normzemente<sup>1)</sup>; chemische und mineralogische Zusammensetzung; granulometrische Eigenschaften, Erstarren, Festigkeiten nach DIN 1164

Prüfgröße	Einheit	Zement			
		Z1 (PZ 35 F)	Z2 (HOZ 35 L)	Z3 (HOZ 35 L-NW/HS)	
chemische und mineralogische Zusammensetzung					
Glühverlust		0,64	1,06	0,84	
unlösli. Rückstand		0,15	0,22	0,23	
SiO <sub>2</sub>		20,71	28,86	29,66	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,17	6,24	7,96	
TiO <sub>2</sub>		0,35	1,46	1,67	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M.-%	2,75	2,36	1,49	
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,24	0,56	1,05	
CaO		63,10	50,35	48,21	
MgO		4,16	4,95	5,18	
SO <sub>3</sub>		2,85	3,21	3,24	
K <sub>2</sub> O		1,13	1,13	0,92	
Na <sub>2</sub> O		0,39	0,66	0,39	
C <sub>3</sub> S		58,78	-	-	
C <sub>2</sub> S	M.-%	14,57	-	-	
C <sub>3</sub> A		6,35	-	-	
C <sub>4</sub> AF		8,27	-	-	
Hüttensandgehalt	M.-%	-	54	66	
granulometrische Eigenschaften					
Rückstand > 0,2 mm	M.-%	0,12	0,01	0,02	
spez. Oberfläche	cm <sup>2</sup> /g	2880	3550	4150	
Erstarren					
Beginn	h/min	2/22	2/53	4/02	
Ende	h/min	3/00	3/35	4/54	
Festigkeiten					
Biegezugfestigkeit	2 d 7 d 28 d	N/mm <sup>2</sup>	4,7 - 8,2	- 5,1 8,3	- 5,7 8,7
Druckfestigkeit	2 d 7 d 28 d	N/mm <sup>2</sup>	23,1 - 47,8	- 25,6 49,5	- 26,7 53,3

1) Prüfergebnisse des Instituts für Baustoffkunde und Materialprüfung der TU Hannover

Tabelle 4.1: Ausbreitmaß a, Biegezug- und Druckfestigkeit  $\beta_{BZ}$ ,  $\beta_D$   
Vorlagerung: 7 d Wasser

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				a mm	$\beta_{BZ}$			$\beta_D$					
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z		Prüfalter			Prüfalter					
						2 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	2 d N/mm <sup>2</sup>	7 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	35 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	1095 d N/mm <sup>2</sup>
31	1	0		0	190	4,1	6,8	9,0	20,7	35,4	51,2	53,6	59,9	62,3
32	1	1		0,125	196	3,8	6,2	8,9	17,9	30,3	45,6	47,7	57,5	60,1
33	1	1	0,50	0,25	208	3,8	6,2	8,6	15,7	26,9	42,1	43,3	52,9	59,7
34	1	2		0,25	205	3,8	6,9	9,1	16,3	27,5	44,1	45,5	57,5	62,1
35	1	3		0,25	196	3,7	6,2	8,8	16,1	26,1	41,1	42,7	51,3	59,8
36	2	0		0	175	3,5	7,1	8,5	14,4	25,5	43,3	46,3	54,8	60,3
37	2	1		0,125	189	2,6	5,7	8,2	11,0	20,6	37,1	38,4	49,3	55,7
38	2	1	0,50	0,25	195	2,2	6,3	7,4	9,5	17,5	34,3	35,8	45,1	52,9
39	2	2		0,25	194	2,4	6,6	8,2	9,8	17,7	35,0	37,3	47,5	53,3
40	2	3		0,25	188	2,5	5,6	8,2	9,6	17,9	33,7	35,5	43,6	52,3
41	3	0		0	165	2,8	6,7	8,0	11,5	26,3	44,7	44,9	53,3	55,1
42	3	1		0,125	174	2,2	6,7	6,5	7,7	20,9	39,7	40,3	43,1	44,6
43	3	1	0,50	0,25	180	1,7	5,8	6,2	6,5	18,1	34,7	35,7	39,5	37,9
44	3	2		0,25	175	1,8	6,2	6,2	6,5	18,4	33,5	36,3	37,5	36,1
45	3	3		0,25	173	1,8	6,0	6,7	6,6	17,5	33,5	34,5	38,3	37,8
46	1	0		0	217	3,9	7,0	9,4	15,7	26,2	41,4	44,3	50,5	55,7
47	1	1		0,125	223	3,3	6,6	10,1	13,2	21,8	36,1	37,3	46,5	53,5
48	1	1	0,60	0,25	229	3,0	7,0	9,5	11,4	19,2	32,5	33,1	43,2	50,8
49	1	2		0,25	230	3,4	7,1	9,4	12,2	20,2	35,5	36,8	46,3	54,4
50	1	3		0,25	224	3,1	7,2	9,5	11,6	19,8	32,5	34,5	43,1	50,7

1) Z: Zement, F: Flugasche, siehe Tabelle 1

Tabelle 4.1, Fortsetzung:

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				a  mm	$\beta_{BZ}$			$\beta_D$					
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z		Prüfalter			Prüfalter					
						2 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	2 d N/mm <sup>2</sup>	7 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	35 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	1095 d N/mm <sup>2</sup>
51	2	0		0	214	2,6	6,2	8,5	9,2	17,8	34,5	35,9	41,6	49,7
52	2	1		0,125	220	2,2	5,8	8,2	7,9	15,3	30,5	30,9	38,1	44,9
53	2	1	0,60	0,25	226	2,0	5,8	8,4	6,8	13,4	26,9	27,0	35,2	39,1
54	2	2		0,25	226	2,0	5,7	9,0	6,9	13,7	27,6	28,3	36,9	40,9
55	2	3		0,25	218	2,1	5,6	8,4	7,1	14,1	27,0	27,4	36,1	39,3
56	3	0		0	196	2,3	5,7	7,8	7,0	19,5	36,2	36,7	40,0	41,1
57	3	1		0,125	202	1,8	5,2	7,2	5,5	16,2	31,6	32,4	33,9	32,9
58	3	1	0,60	0,25	208	1,6	4,8	6,4	4,6	13,8	28,3	29,0	28,3	27,3
59	3	2		0,25	202	1,7	4,6	6,2	4,7	14,3	28,2	28,3	27,4	24,7
60	3	3		0,25	203	1,5	5,1	6,6	4,8	13,8	27,6	28,1	27,6	26,6

1) Z: Zement, F: Flugasche, siehe Tabelle 1

Tabelle 4.2: Ausbreitmaß a, Biegezug- und Druckfestigkeit  $\beta_{BZ}$ ,  $\beta_D$   
Vorlagerung: 28 d Wasser

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				a mm	$\beta_{BZ}$			$\beta_D$					
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z		Prüfalter			Prüfalter					
						2 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	2 d N/mm <sup>2</sup>	7 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	35 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	1095 d N/mm <sup>2</sup>
1	1	0		0	189	4.8	7.2	9,5	20.8	35.7	48.3	56.4	68.1	65,5
2	1	1		0,125	198	4.0	7.0	8,3	18.0	29.7	41.6	49.4	62.5	65,1
3	1	1	0,50	0,25	207	3.6	5.9	7,7	15.7	26.5	36.4	44.7	57.5	60,9
4	1	2		0,25	204	3.9	6.6	8,7	16.8	27.5	39.7	47.7	65.6	67,5
5	1	3		0,25	198	3.7	6.1	8,3	16.0	26.1	36.5	45.1	58.0	60,7
6	2	0		0	176	3.4	7.1	8,8	13.8	25.7	43.8	53.5	65.7	66,8
7	2	1		0,125	191	2.9	6.9	7,7	12.0	21.5	39.8	48.7	59.9	64,8
8	2	1	0,50	0,25	197	2.4	6.2	7,2	10.0	18.1	36.0	44.1	57.1	60,2
9	2	2		0,25	198	2.6	6.4	7,3	10.1	18.9	36.8	48.0	60.3	65,0
10	2	3		0,25	191	2.3	6.4	8,1	10.0	18.2	36.2	44.5	57.2	60,7
11	3	0		0	168	2.7	8.2	7,7	10.1	26.7	45.9	52.7	62.1	62,7
12	3	1		0,125	176	2.2	7.4	7,2	7.8	22.3	41.8	48.1	57.0	56,7
13	3	1	0,50	0,25	182	1.9	7.1	6,3	6.4	19.5	37.9	44.1	51.9	49,6
14	3	2		0,25	176	2.1	7.4	6,9	6.5	19.7	39.5	45.7	53.9	50,7
15	3	3		0,25	174	1.9	6.6	6,4	6.4	18.3	37.7	44.1	51.7	49,9
16	1	0		0	220	3.8	7.4	8,8	15.7	26.5	37.1	44.7	55,1	57,5
17	1	1		0,125	226	3.2	6.6	9,9	13.2	22.8	31.4	40.2	53,4	56,4
18	1	1	0,60	0,25	232	2.9	6.3	9,1	11.6	19.6	27.5	36.5	49,9	52,9
19	1	2		0,25	234	3.4	6.7	9,5	12.5	21.0	30.7	39.1	53,0	59,1
20	1	3		0,25	226	3.0	6.1	9,2	11.6	19.9	29.5	36.7	48,9	54,5

1) Z: Zement, F: Flugasche, siehe Tabelle 1

Tabelle 4.2, Fortsetzung:

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				a mm	$\beta_{BZ}$			$\beta_D$					
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z		Prüfalter			Prüfalter					
						2 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	2 d N/mm <sup>2</sup>	7 d N/mm <sup>2</sup>	28 d N/mm <sup>2</sup>	35 d N/mm <sup>2</sup>	365 d N/mm <sup>2</sup>	1095 d N/mm <sup>2</sup>
21	2	0	0,60	0	214	2.6	7.8	10,0	9.0	17.0	36.4	42.9	51,1	55,3
22	2	1		0,125	221	2.3	6.7	9,1	7.8	14.8	33.9	39.4	48,9	52,5
23	2	1		0,25	226	2.0	6.8	8,7	6.8	12.4	30.7	36.9	46,1	49,5
24	2	2		0,25	226	1.9	6.8	8,1	6.6	12.6	32.7	38.9	49,3	51,9
25	2	3		0,25	216	1.9	6.5	8,8	6.6	12.8	30.2	36.2	45,8	47,8
26	3	0	0,60	0	198	2.3	8.0	8,2	6.9	18.5	38.5	44.2	52,1	51,8
27	3	1		0,125	204	2.0	7.9	7,1	5.4	16.2	35.5	40.3	47,9	44,2
28	3	1		0,25	200	1.7	6.8	6,7	4.5	14.1	32.2	36.9	42,1	38,3
29	3	2		0,25	201	1.8	6.7	6,4	4.6	14.4	32.7	38.3	43,1	36,7
30	3	3		0,25	202	1.9	7.1	7,4	4.8	14.1	31.8	36.9	43,7	39,5

1) Z: Zement, F: Flugasche, siehe Tabelle 1

Tabelle 4.3: Änderung der Druckfestigkeit nach 1 und 3 a bezogen auf die 28 d-Druckfestigkeit; Feinbetone ohne und mit der Flugasche F1

Vorlage- rung	z <sup>1)</sup>	rel $\beta_{D1a} = \beta_{D1a}/\beta_{D28}$				rel $\beta_{D3a} = \beta_{D3a}/\beta_{D28}$			
		w/(z+f) = 0,50		w/(z+f) = 0,60		w/(z+f) = 0,50		w/(z+f) = 0,60	
		f/z = 0	f/z = 0,25	f/z = 0	f/z = 0,25	f/z = 0	f/z = 0,25	f/z = 0	f/z = 0,25
d	1	1,17	1,26	1,22	1,33	1,22	1,42	1,34	1,56
	2	1,27	1,32	1,21	1,31	1,39	1,54	1,44	1,45
	3	1,19	1,14	1,10	1,00	1,23	1,09	1,13	0,96
28	1	1,41	1,58	1,49	1,81	1,36	1,67	1,55	1,92
	2	1,50	1,58	1,40	1,50	1,53	1,67	1,52	1,61
	3	1,35	1,37	1,35	1,31	1,37	1,31	1,34	1,19

1) s. Tabelle 1

Tabelle 5.1: Karbonatisierungstiefe  $d_K$

Vorlagerung: 7 d Wasser

Prüfung: 24 h nach dem Brechen und Aufsprühen  
von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_K$ in mm nach einer Lagerungs- dauer von				
	z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z	1 a	1,5 a	2 a	2,5 a	3 a
31	1	0	0,50	0	3,8	4,4	5,2	5,5	6,4
32	1	1		0,125	5,2	5,9	6,9	7,2	7,9
33	1	1		0,25	6,3	7,0	8,2	8,5	9,6
34	1	2		0,25	5,8	6,6	7,5	7,8	8,6
35	1	3		0,25	6,4	7,0	8,0	8,3	8,5
36	2	0	0,50	0	6,3	7,3	8,0	8,5	9,0
37	2	1		0,125	7,5	8,8	9,6	10,0	11,7
38	2	1		0,25	8,3	9,2	11,1	12,2	14,0
39	2	2		0,25	8,0	9,3	10,8	11,8	13,5
40	2	3		0,25	8,4	10,0	11,3	11,7	14,2
41	3	0	0,50	0	6,9	8,0	8,9	9,4	11,0
42	3	1		0,125	8,3	9,6	10,9	11,6	13,4
43	3	1		0,25	9,2	11,3	12,8	13,7	16,3
44	3	2		0,25	9,6	11,3	12,6	14,2	16,4
45	3	3		0,25	9,6	11,0	12,5	13,5	16,7
46	1	0	0,60	0	5,1	5,9	7,6	7,9	8,9
47	1	1		0,125	6,1	7,4	9,4	9,7	10,9
48	1	1		0,25	7,2	8,5	11,2	11,7	12,7
49	1	2		0,25	6,7	8,1	9,9	10,7	11,9
50	1	3		0,25	7,1	8,0	10,6	11,5	12,6
51	2	0	0,60	0	7,3	8,9	10,5	11,3	12,5
52	2	1		0,125	8,7	10,5	12,7	13,9	15,6
53	2	1		0,25	9,8	12,3	15,1	16,2	-2)
54	2	2		0,25	9,7	12,3	14,6	16,0	-2)
55	2	3		0,25	9,8	11,7	14,5	16,0	-2)
56	3	0	0,60	0	7,9	9,9	11,5	12,5	14,1
57	3	1		0,125	9,3	11,8	14,1	15,6	17,8
58	3	1		0,25	11,1	13,8	16,7	17,2	-2)
59	3	2		0,25	11,4	14,4	18,0	19,7	-2)
60	3	3		0,25	11,6	13,7	17,1	18,9	-2)

1) s. Tabelle 1

2) Die Prüfkörper waren durchkarbonatisiert.

Tabelle 5.2 : Karbonatisierungstiefe  $d_K$

Vorlagerung: 28 d Wasser  
 Prüfung: 24 h nach dem Brechen und Aufsprühen  
 von Phenolphthalein  
 max  $t_K$ : 3 a

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_K$ in mm nach einer Lagerungs- dauer von				
	z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z	1 a	1,5 a	2 a	2,5 a	3 a
1	1	0	0,50	0	2,6	3,1	3,7	4,2	4,3
2	1	1		0,125	3,4	3,9	4,9	5,4	5,3
3	1	1		0,25	4,0	4,7	5,9	6,5	6,8
4	1	2		0,25	3,7	4,3	5,5	6,0	6,6
5	1	3		0,25	4,1	4,9	5,9	6,5	7,0
6	2	0	0,50	0	3,0	3,5	4,0	4,6	5,4
7	2	1		0,125	3,6	4,2	5,4	5,8	6,8
8	2	1		0,25	4,3	5,3	6,6	7,2	8,1
9	2	2		0,25	4,2	5,0	6,4	7,1	8,0
10	2	3		0,25	4,3	5,0	6,5	7,2	8,2
11	3	0	0,50	0	4,0	5,4	6,8	6,9	8,2
12	3	1		0,125	5,0	6,2	8,0	8,6	9,9
13	3	1		0,25	5,8	7,3	8,8	9,9	11,2
14	3	2		0,25	5,8	7,1	9,2	9,8	11,4
15	3	3		0,25	6,0	7,0	8,9	9,6	11,3
16	1	0	0,60	0	3,8	4,9	5,6	5,9	6,6
17	1	1		0,125	4,6	6,0	6,7	7,1	8,1
18	1	1		0,25	5,3	6,8	7,7	8,4	9,8
19	1	2		0,25	5,2	6,7	7,3	8,1	9,3
20	1	3		0,25	5,6	7,1	7,7	8,9	9,7
21	2	0	0,60	0	3,8	4,6	5,5	6,1	6,9
22	2	1		0,125	4,7	5,6	6,8	7,6	8,3
23	2	1		0,25	5,4	6,5	6,6	9,0	9,9
24	2	2		0,25	5,3	6,6	7,9	9,1	10,3
25	2	3		0,25	5,4	6,4	7,7	9,1	9,9
26	3	0	0,60	0	5,2	6,3	7,6	8,4	9,8
27	3	1		0,125	6,0	7,5	8,8	10,0	11,7
28	3	1		0,25	6,7	8,3	10,1	11,4	13,5
29	3	2		0,25	6,9	8,7	10,5	11,6	14,0
30	3	3		0,25	6,9	8,4	10,2	11,4	13,5

1) s. Tabelle 1

**Tabelle 5.3: Karbonatisierungstiefe  $d_K$**

Vorlagerung: 7 d Wasser

Prüfung: 1 h nach dem Brechen und Aufsprühen  
von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_K$ in mm nach einer Lagerungs- dauer von				
	z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z	1 a	1,5 a	2 a	2,5 a	3 a
31	1	0	0,50	0	3,6	4,3	5,1	5,3	6,2
32	1	1		0,125	5,0	5,9	6,7	7,0	7,7
33	1	1		0,25	6,1	7,0	7,9	8,2	9,5
34	1	2		0,25	5,7	6,6	7,2	7,5	8,4
35	1	3		0,25	6,1	6,9	7,6	8,0	9,3
36	2	0	0,50	0	6,1	7,0	7,8	8,3	8,9
37	2	1		0,125	7,3	8,6	9,4	9,8	11,5
38	2	1		0,25	8,3	9,6	11,0	12,1	13,9
39	2	2		0,25	7,8	9,0	10,7	11,6	13,3
40	2	3		0,25	8,4	9,8	11,1	11,5	14,1
41	3	0	0,50	0	6,7	7,8	8,6	9,2	10,8
42	3	1		0,125	8,1	9,3	10,7	11,5	13,2
43	3	1		0,25	8,9	10,9	12,7	13,5	16,2
44	3	2		0,25	9,4	11,0	12,5	14,0	16,3
45	3	3		0,25	9,5	10,4	12,2	13,4	16,5
46	1	0	0,60	0	4,7	5,7	7,3	7,7	8,7
47	1	1		0,125	5,9	7,2	9,1	9,5	10,7
48	1	1		0,25	6,7	8,3	11,0	11,5	12,5
49	1	2		0,25	6,4	7,9	9,6	10,5	11,8
50	1	3		0,25	6,8	7,9	10,2	11,2	12,4
51	2	0	0,60	0	7,1	8,6	10,3	11,3	12,4
52	2	1		0,125	8,6	10,5	12,5	13,7	15,4
53	2	1		0,25	9,7	12,0	14,7	16,0	-2)
54	2	2		0,25	9,6	11,7	14,5	15,9	-2)
55	2	3		0,25	9,7	11,6	14,3	15,8	-2)
56	3	0	0,60	0	7,6	9,7	11,4	12,3	13,9
57	3	1		0,125	9,1	11,7	14,0	15,5	17,6
58	3	1		0,25	10,8	13,6	16,5	17,2	-2)
59	3	2		0,25	11,1	14,3	17,8	19,7	-2)
60	3	3		0,25	11,4	13,5	17,1	18,9	-2)

1) s. Tabelle 1

2) Die Prüfkörper waren durchkarbonatisiert.

**Tabelle 5.4:** Karbonatisierungstiefe  $d_K$

Vorlagerung: 28 d Wasser

Prüfung: 1 h nach dem Brechen und Aufsprühen  
von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüf- serie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_K$ in mm nach einer Lagerungs- dauer von				
	z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z	1 a	1,5 a	2 a	2,5 a	3 a
1	1	0	0,50	0	2,1	2,7	3,6	3,9	4,1
2	1	1		0,125	2,9	3,6	4,3	5,1	5,2
3	1	1		0,25	3,6	4,6	5,5	6,3	6,7
4	1	2		0,25	3,3	4,1	5,1	5,8	6,5
5	1	3		0,25	3,8	4,6	5,6	6,4	6,9
6	2	0	0,50	0	2,1	3,0	3,8	4,4	5,2
7	2	1		0,125	3,1	4,1	5,1	5,7	6,6
8	2	1		0,25	4,1	5,2	6,3	7,0	7,9
9	2	2		0,25	4,0	4,9	6,1	7,0	7,8
10	2	3		0,25	4,0	5,0	6,2	7,1	8,0
11	3	0	0,50	0	3,8	5,2	6,4	6,8	8,0
12	3	1		0,125	4,7	6,1	7,8	8,4	9,7
13	3	1		0,25	5,6	7,1	8,6	9,8	10,9
14	3	2		0,25	5,4	7,1	9,0	9,7	11,2
15	3	3		0,25	5,6	6,8	9,6	9,4	11,0
16	1	0	0,60	0	3,5	4,5	5,4	5,7	6,4
17	1	1		0,125	4,5	5,6	6,6	7,0	8,0
18	1	1		0,25	5,3	6,4	7,6	8,2	9,6
19	1	2		0,25	5,0	6,3	7,2	7,9	9,1
20	1	3		0,25	5,4	6,7	7,5	8,7	9,5
21	2	0	0,60	0	3,7	4,5	5,3	6,0	6,7
22	2	1		0,125	4,5	5,6	6,6	7,4	8,0
23	2	1		0,25	5,5	6,5	8,0	8,9	9,7
24	2	2		0,25	5,3	6,5	7,7	9,0	10,1
25	2	3		0,25	5,4	6,4	7,5	8,9	9,7
26	3	0	0,60	0	5,0	6,3	7,4	8,2	9,5
27	3	1		0,125	5,8	7,3	8,6	9,8	11,5
28	3	1		0,25	6,7	8,2	9,9	11,2	13,3
29	3	2		0,25	6,7	8,6	10,3	11,4	13,7
30	3	3		0,25	6,7	8,4	10,1	11,1	13,3

1) s. Tabelle 1

Tabelle 6.1: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  und andere Kennwerte<sup>2)</sup>

Vorlagerung: 7 d Wasser

Prüfung: 1 h nach dem Brechen und Aufsprühen von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüfserie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_o$ mm	$v_K$ mm·d <sup>-0,5</sup>	Best %	n
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z				
31	1	0		0	-0,358	0,201	98,4	12
32	1	1		0,125	0,001	0,246	98,8	12
33	1	1	0,50	0,25	0,579	0,273	99,4	12
34	1	2		0,25	0,675	0,245	98,5	12
35	1	3		0,25	0,551	0,268	98,9	12
36	2	0		0	0,561	0,270	98,1	12
37	2	1		0,125	0,444	0,340	98,8	13
38	2	1	0,50	0,25	0,370	0,406	99,6	13
39	2	2		0,25	0,536	0,381	99,0	13
40	2	3		0,25	0,637	0,396	98,9	13
41	3	0		0	0,267	0,320	99,2	13
42	3	1		0,125	0,244	0,393	99,6	13
43	3	1	0,50	0,25	0,099	0,471	99,7	13
44	3	2		0,25	0,122	0,479	99,6	13
45	3	3		0,25	0,237	0,468	98,9	13
46	1	0		0	0,332	0,248	98,3	12
47	1	1		0,125	0,511	0,303	99,0	12
48	1	1	0,60	0,25	0,664	0,355	97,6	12
49	1	2		0,25	0,713	0,325	98,6	12
50	1	3		0,25	0,979	0,333	97,6	12
51	2	0		0	0,382	0,362	99,3	14
52	2	1		0,125	0,315 <sup>3)</sup>	0,447 <sup>3)</sup>	99,5	14
53	2	1	0,60	0,25	0,321 <sup>3)</sup>	0,527 <sup>3)</sup>	98,8	13
54	2	2		0,25	0,382 <sup>3)</sup>	0,515 <sup>3)</sup>	98,7	13
55	2	3		0,25	0,644 <sup>3)</sup>	0,502 <sup>3)</sup>	98,9	13
56	3	0		0	0,203	0,411	99,5	14
57	3	1		0,125	-0,155 <sup>3)</sup>	0,525 <sup>3)</sup>	99,3	14
58	3	1	0,60	0,25	-0,165 <sup>4)</sup>	0,598 <sup>4)</sup>	99,7	13
59	3	2		0,25	-0,416 <sup>4)</sup>	0,651 <sup>4)</sup>	98,6	12
60	3	3		0,25	0,090 <sup>4)</sup>	0,615 <sup>4)</sup>	99,0	12

1) s. Tabelle 1

2)  $d_o$ : siehe Gleichung 1

Best: Bestimmtheitsmaß

n: Anzahl der Versuchswerte für  $d_K > 0$

3) Versuchswerte bis 970 d, da bei 3 a durchkarbonatisiert.

4) Versuchswerte bis 840 d, da bei 3 a durchkarbonatisiert.

Tabelle 6.2: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  und andere Kennwerte<sup>2)</sup>

Vorlagerung: 7 d Wasser

Prüfung: 24 h nach dem Brechen und Aufsprühen von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüfserie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_o$ mm	$v_K$ mm·d <sup>-0,5</sup>	Best %	n
	z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z				
31	1	0		0	0,334	0,180	98,9	14
32	1	1		0,125	0,529	0,232	99,1	14
33	1	1	0,50	0,25	0,836	0,269	99,4	14
34	1	2		0,25	0,939	0,238	98,8	14
35	1	3		0,25	1,009	0,250	97,7	14
36	2	0		0	0,782	0,264	97,7	14
37	2	1		0,125	0,926	0,327	99,2	14
38	2	1	0,50	0,25	0,892	0,386	99,5	14
39	2	2		0,25	1,122	0,360	99,3	14
40	2	3		0,25	1,056	0,385	99,2	14
41	3	0		0	0,623	0,314	99,4	15
42	3	1		0,125	0,416	0,395	99,6	15
43	3	1	0,50	0,25	0,268	0,476	99,7	14
44	3	2		0,25	0,296	0,483	99,6	14
45	3	3		0,25	0,327	0,480	99,2	14
46	1	0		0	0,764	0,241	98,9	14
47	1	1		0,125	0,958	0,295	98,9	14
48	1	1	0,60	0,25	0,949	0,354	98,8	14
49	1	2		0,25	1,026	0,322	99,1	14
50	1	3		0,25	1,134	0,339	98,3	14
51	2	0		0	0,915	0,351	99,5	14
52	2	1		0,125	0,789	0,437 <sup>3)</sup>	99,6	15
53	2	1	0,60	0,25	0,658 <sup>3)</sup>	0,524 <sup>3)</sup>	98,8	13
54	2	2		0,25	0,653 <sup>3)</sup>	0,515 <sup>3)</sup>	98,9	13
55	2	3		0,25	0,939 <sup>3)</sup>	0,499 <sup>3)</sup>	98,8	13
56	3	0		0	0,447	0,415	99,6	16
57	3	1		0,125	0,302 <sup>4)</sup>	0,515 <sup>4)</sup>	99,2	14
58	3	1	0,60	0,25	0,426 <sup>4)</sup>	0,579 <sup>4)</sup>	99,6	12
59	3	2		0,25	-0,019 <sup>4)</sup>	0,642 <sup>4)</sup>	98,7	12
60	3	3		0,25	0,329 <sup>4)</sup>	0,610 <sup>4)</sup>	99,0	12

1) s. Tabelle 1

2)  $d_o$ : siehe Gleichung 1

Best: Bestimmtheitsmaß

n: Anzahl der Versuchswerte für  $d_K > 0$

3) Versuchswerte bis 970 d, da bei 3 a durchkarbonatisiert.

4) Versuchswerte bis 840 d, da bei 3 a durchkarbonatisiert.

Tabelle 6.3: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  und andere Kennwerte<sup>2)</sup>

Vorlagerung: 28 d Wasser

Prüfung: 1 h nach dem Brechen und Aufsprühen von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüfserie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_o$ mm	$v_K$ mm·d <sup>-0,5</sup>	Best %	n
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z				
1	1	0	0,50	0	-0,152	0,130	96,8	11
2	1	1		0,125	-0,084	0,163	98,5	12
3	1	1		0,25	-0,251	0,212	99,1	12
4	1	2		0,25	-0,048	0,190	98,2	12
5	1	3		0,25	-0,068	0,210	99,2	12
6	2	0	0,50	0	-0,633	0,166	96,9	11
7	2	1		0,125	-0,639	0,211	98,8	12
8	2	1		0,25	-0,309	0,243	99,2	12
9	2	2		0,25	-0,233	0,235	98,2	12
10	2	3		0,25	-0,327	0,243	98,5	12
11	3	0	0,50	0	-0,760	0,259	99,2	12
12	3	1		0,125	-0,819	0,310	98,9	12
13	3	1		0,25	-0,686	0,345	98,9	12
14	3	2		0,25	-0,896	0,356	98,9	12
15	3	3		0,25	-0,510	0,335	98,6	12
16	1	0	0,60	0	-0,203	0,203	98,9	12
17	1	1		0,125	-0,045	0,244	99,3	12
18	1	1		0,25	0,016	0,283	99,2	12
19	1	2		0,25	0,015	0,271	99,4	12
20	1	3		0,25	0,038	0,287	99,2	12
21	2	0	0,60	0	-0,085	0,204	99,2	12
22	2	1		0,125	0,006	0,245	99,1	12
23	2	1		0,25	0,101	0,290	99,1	12
24	2	2		0,25	-0,132	0,300	99,1	12
25	2	3		0,25	0,259	0,280	98,9	12
26	3	0	0,60	0	-0,711	0,303	99,5	13
27	3	1		0,125	-0,728	0,355	99,3	13
28	3	1		0,25	-0,759	0,404	99,3	13
29	3	2		0,25	-1,064	0,425	99,3	13
30	3	3		0,25	-0,778	0,407	99,5	13

1) s. Tabelle 1

2)  $d_o$ : siehe Gleichung 1

Best: Bestimmtheitsmaß

n: Anzahl der Versuchswerte für  $d_K > 0$

**Tabelle 6.4:** Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  und andere Kennwerte<sup>2)</sup>

Vorlagerung: 28 d Wasser

Prüfung: 24 h nach dem Brechen und Aufsprühen von Phenolphthalein

max  $t_K$ : 3 a

Prüfserie	Kennung <sup>1)</sup>				$d_o$ mm	$v_K$ mm·d <sup>-0,5</sup>	Best %	n
	Z	F	$\frac{w}{z+f}$	f/z				
1	1	0		0	0,098	0,130	98,7	13
2	1	1		0,125	0,101	0,170	98,9	14
3	1	1	0,50	0,25	0,122	0,204	99,2	14
4	1	2		0,25	0,064	0,198	99,4	14
5	1	3		0,25	0,115	0,212	99,7	14
6	2	0		0	-0,277	0,166	99,7	14
7	2	1		0,125	-0,261	0,210	99,2	14
8	2	1	0,50	0,25	-0,202	0,247	99,6	14
9	2	2		0,25	-0,069	0,236	99,1	14
10	2	3		0,25	-0,078	0,240	99,0	14
11	3	0		0	-0,651	0,266	98,9	13
12	3	1		0,125	-0,727	0,315	99,3	14
13	3	1	0,50	0,25	-0,691	0,357	99,4	14
14	3	2		0,25	-0,727	0,357	99,4	14
15	3	3		0,25	-0,449	0,343	99,3	14
16	1	0		0	0,177	0,196	99,6	14
17	1	1		0,125	0,344	0,235	99,5	14
18	1	1	0,60	0,25	0,325	0,279	99,3	14
19	1	2		0,25	0,246	0,268	99,5	14
20	1	3		0,25	0,286	0,285	99,5	14
21	2	0		0	-0,081	0,210	99,4	14
22	2	1		0,125	0,032	0,250	99,2	14
23	2	1	0,60	0,25	0,039	0,289	97,8	14
24	2	2		0,25	-0,149	0,308	99,2	14
25	2	3		0,25	0,129	0,294	98,7	14
26	3	0		0	-0,570	0,305	99,6	14
27	3	1		0,125	-0,629	0,360	99,5	14
28	3	1	0,60	0,25	-0,699	0,411	99,2	14
29	3	2		0,25	-0,861	0,427	99,3	14
30	3	3		0,25	-0,537	0,408	99,2	14

1) s. Tabelle 1

2)  $d_o$ : siehe Gleichung 1

Best: Bestimmtheitsmaß

n: Anzahl der Versuchswerte für  $d_K > 0$

Tabelle 7: Parameter der Gleichung  $v_K = a + b/\sqrt{\beta_{D28}}$

Wasservor- lagerung	Zement <sup>1)</sup>	a	b	Best	Bereich der Ver- suchswerte	
					min $\beta_{D28}$	max $\beta_{D28}$
d		mm · d <sup>-0,5</sup>	d <sup>-0,5</sup> · N <sup>-0,5</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
7	Z1	-0,42	+4,40	95,7	33	51
	Z2	-0,66	+6,10	97,4	27	43
	Z3	-0,84	+7,63	96,1	28	44
	Z1, Z2	-0,70	+6,24	96,7	27	51
28	Z1	-0,32	+3,21	94,4	27	48
	Z2	-0,44	+4,09	86,1	30	44
	Z3	-0,44	+4,82	93,1	32	46
	Z1, Z2	-0,35	+3,44	81,2	27	48

1) jeweils für Zement und die Flugaschen F1, F2, F3 sowie die w/(z+f)-Werte 0,50 und 0,60

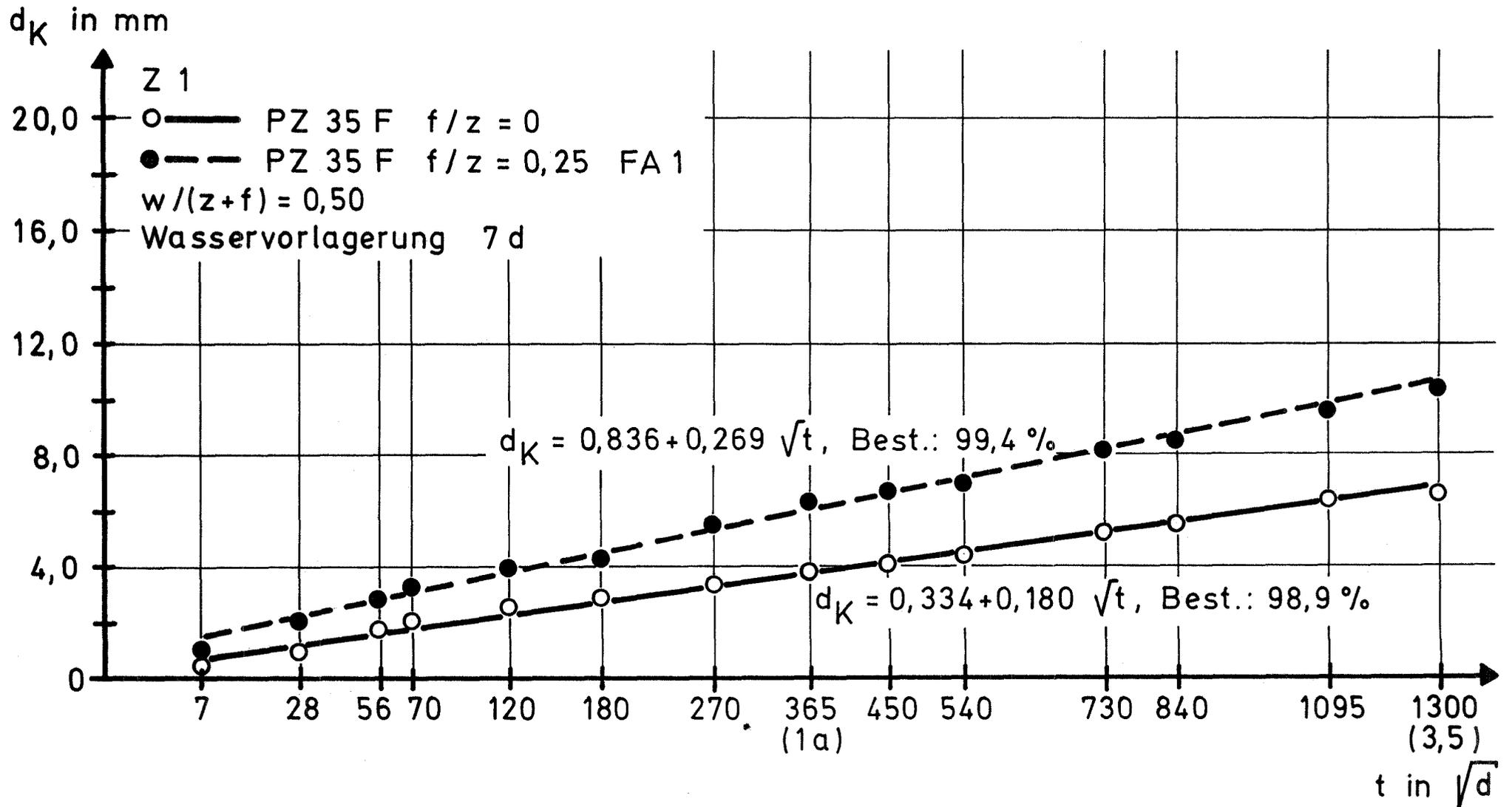


Bild 1: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

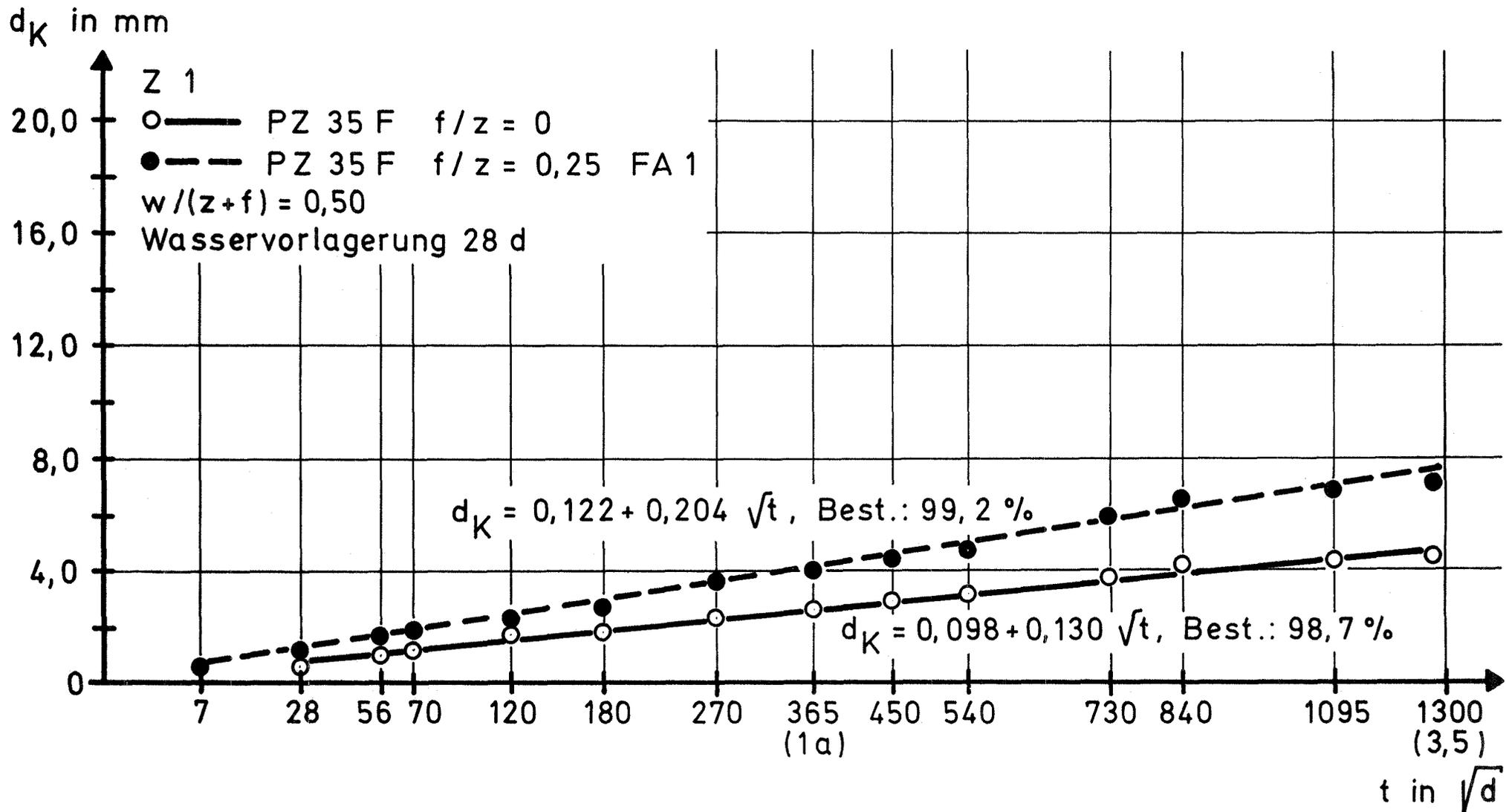


Bild 2: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

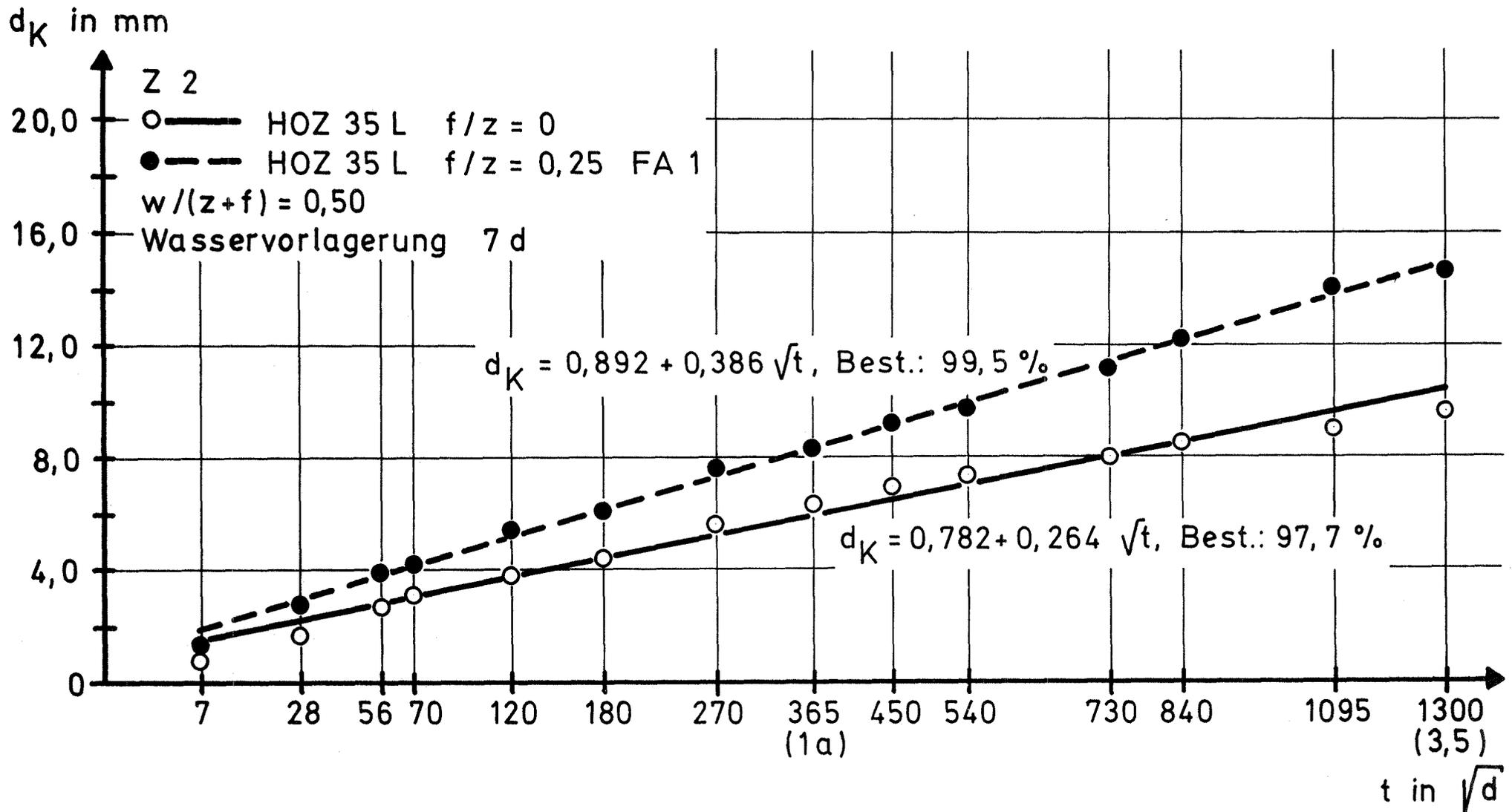


Bild 3: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

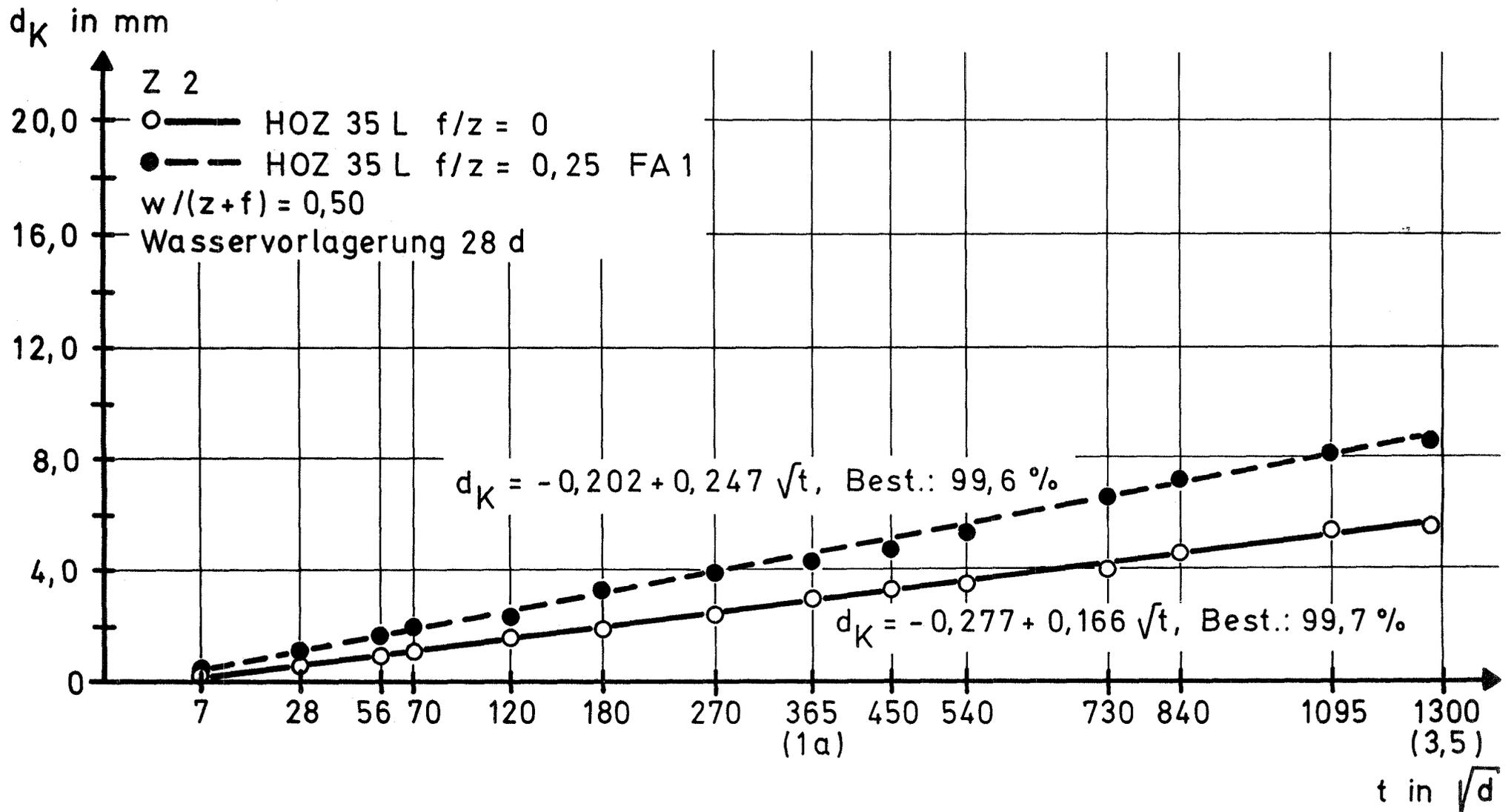


Bild 4: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

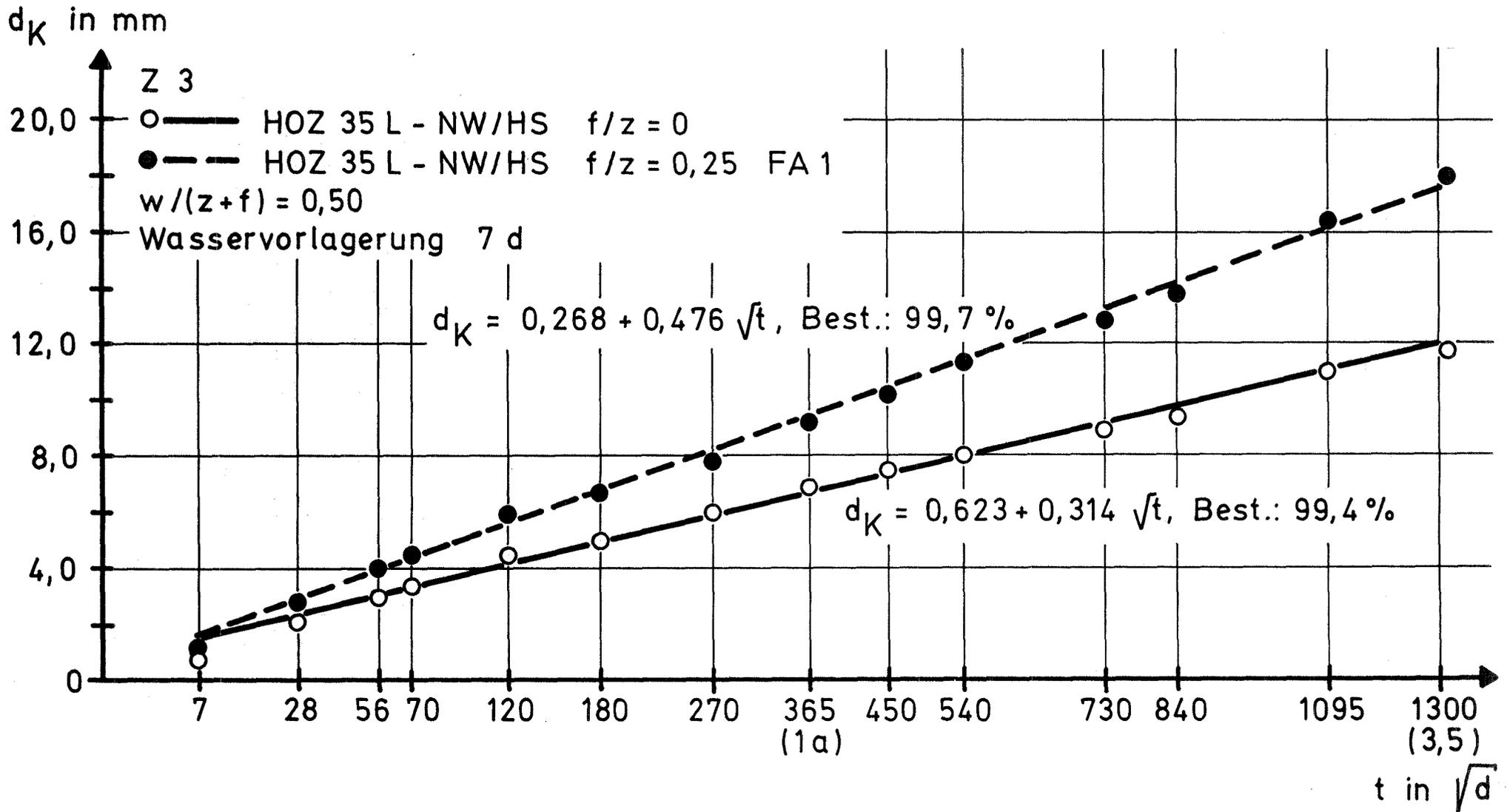


Bild 5: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

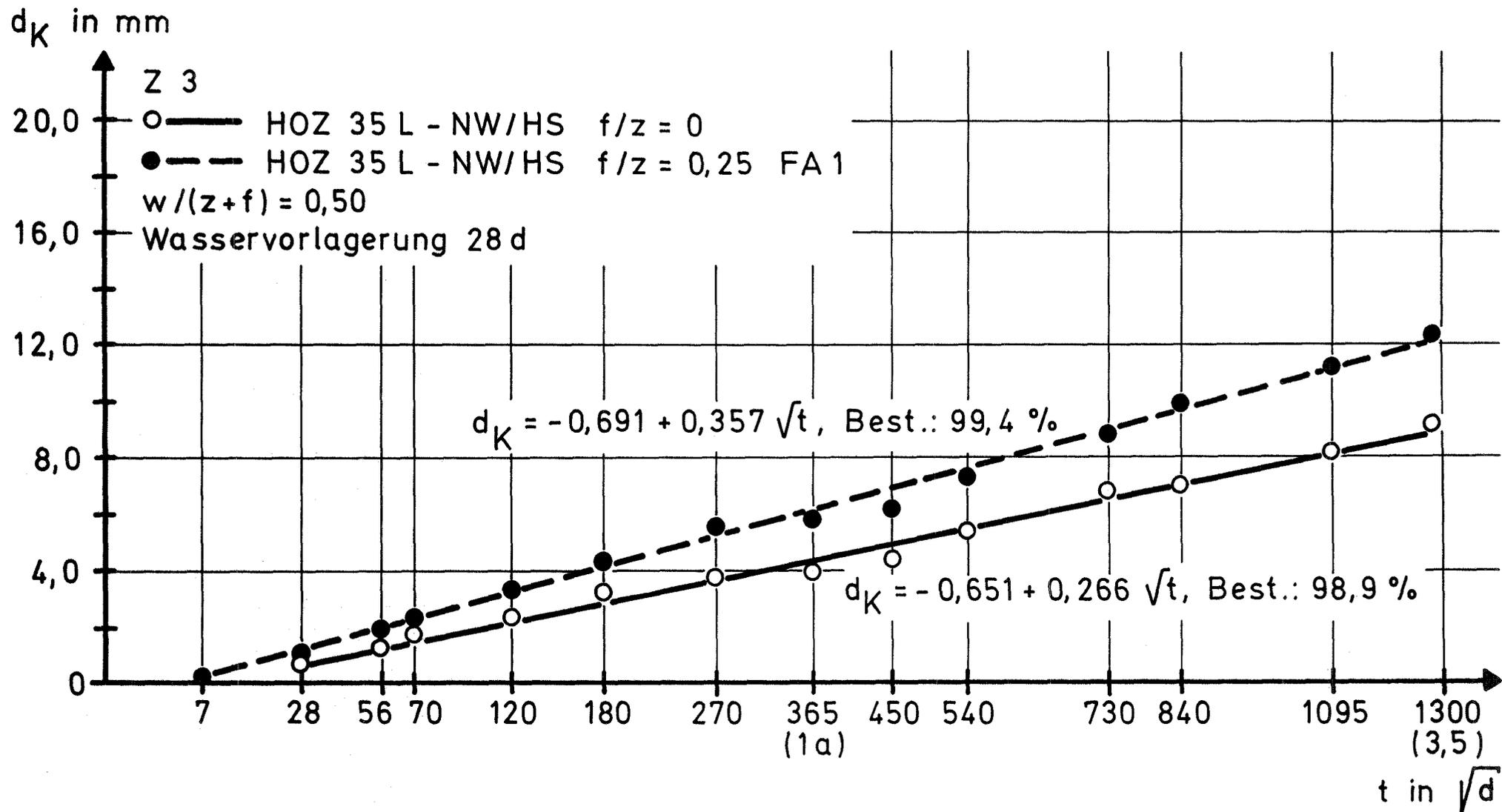


Bild 6: Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe  $d_K$  und der Lagerungsdauer  $t$ , Prüfung 24 h nach dem Aufsprühen von Phenolphthalein

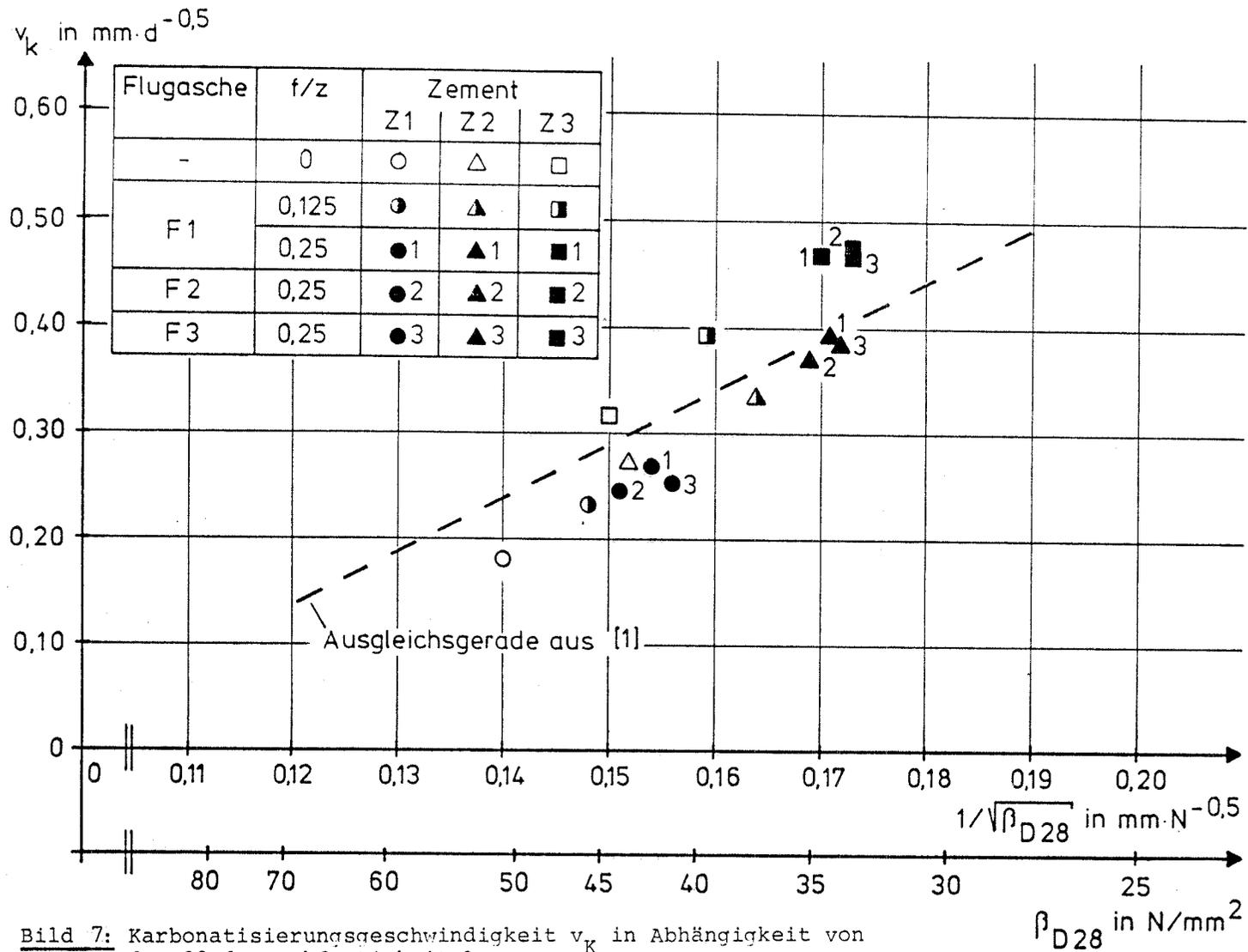


Bild 7: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$

Wasservorlagerung: 7 d,  $w/(z+f) = 0,50$

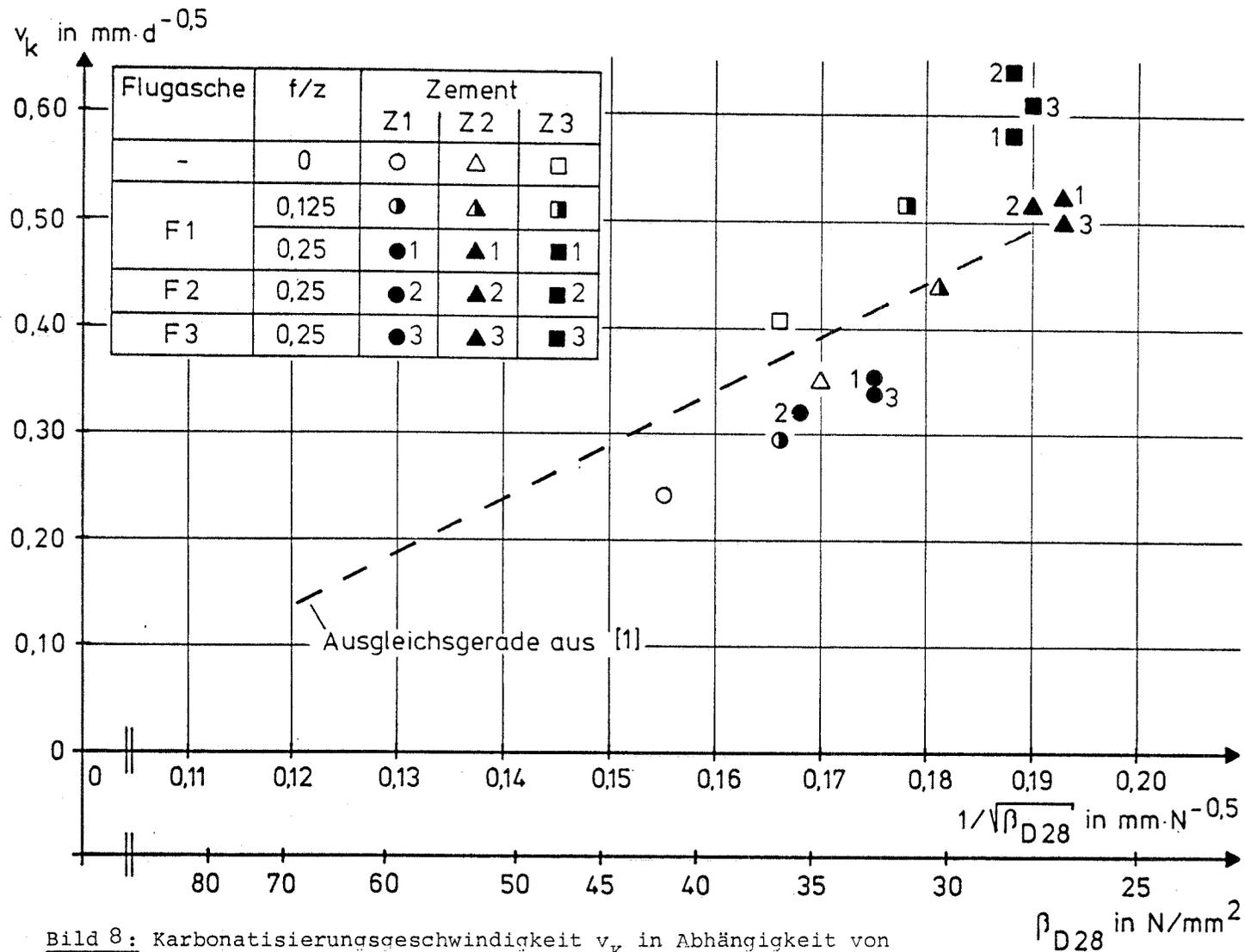
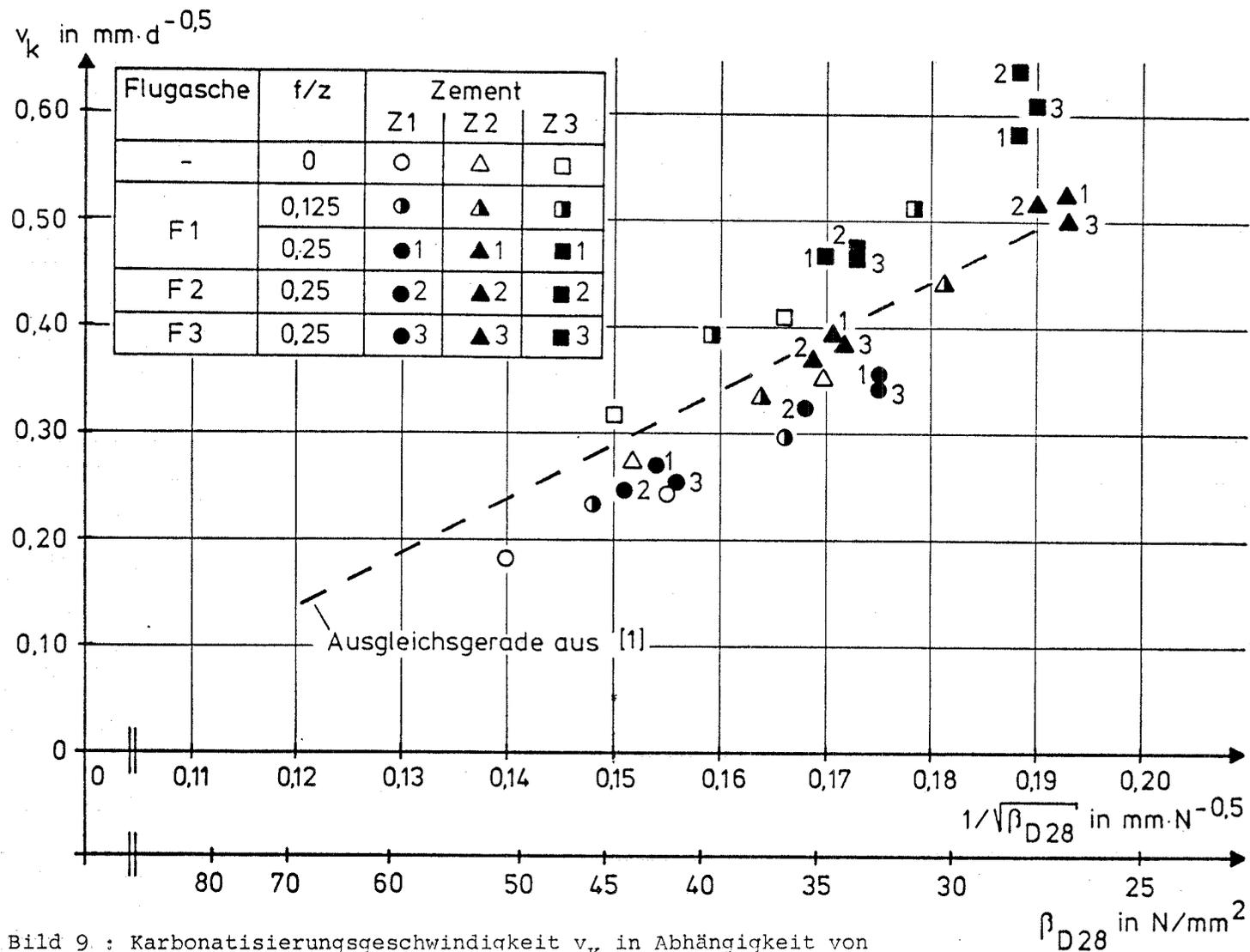
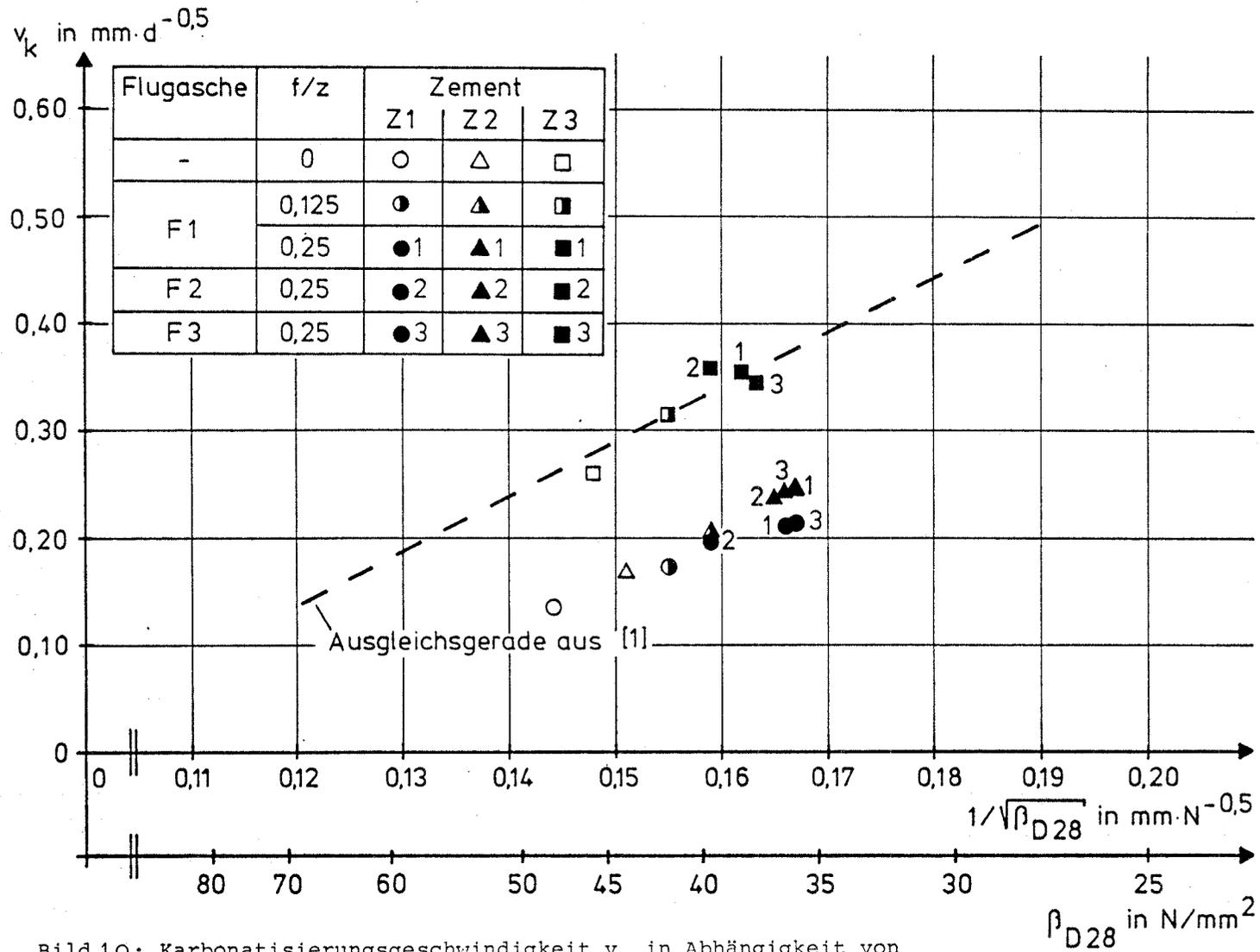


Bild 8: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$   
 Wasservorlagerung: 7 d,  $w/(z+f) = 0,60$



**Bild 9 :** Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_k$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$

Wasservorlagerung: 7 d,  $w/(z+f) = 0,50$  und  $0,60$



**Bild 10:** Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_k$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$   
 Wasservorlagerung: 28 d,  $w/(z+f) = 0,50$

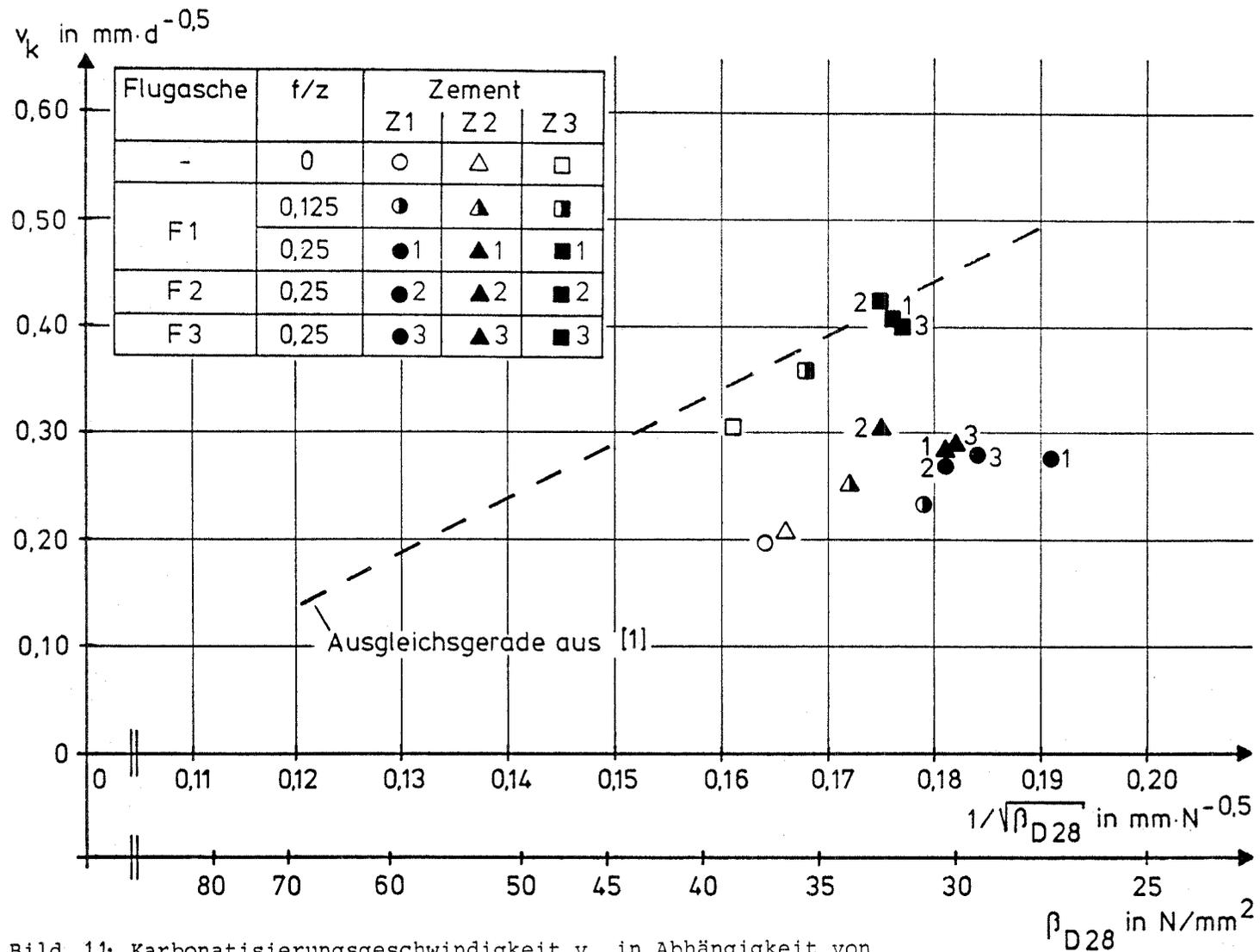


Bild 11: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$

Wasservorlagerung: 28 d,  $w/(z+f) = 0,60$

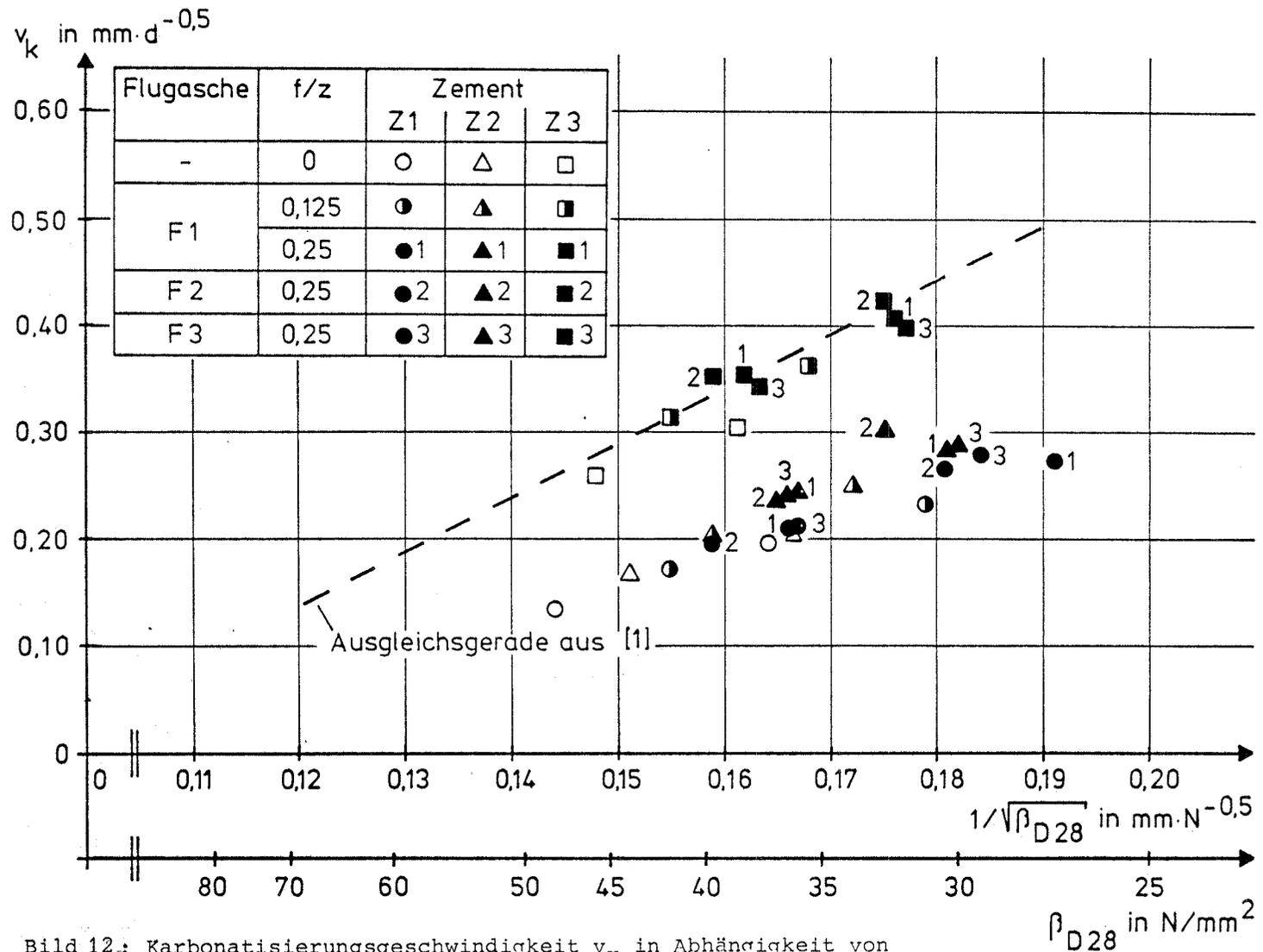
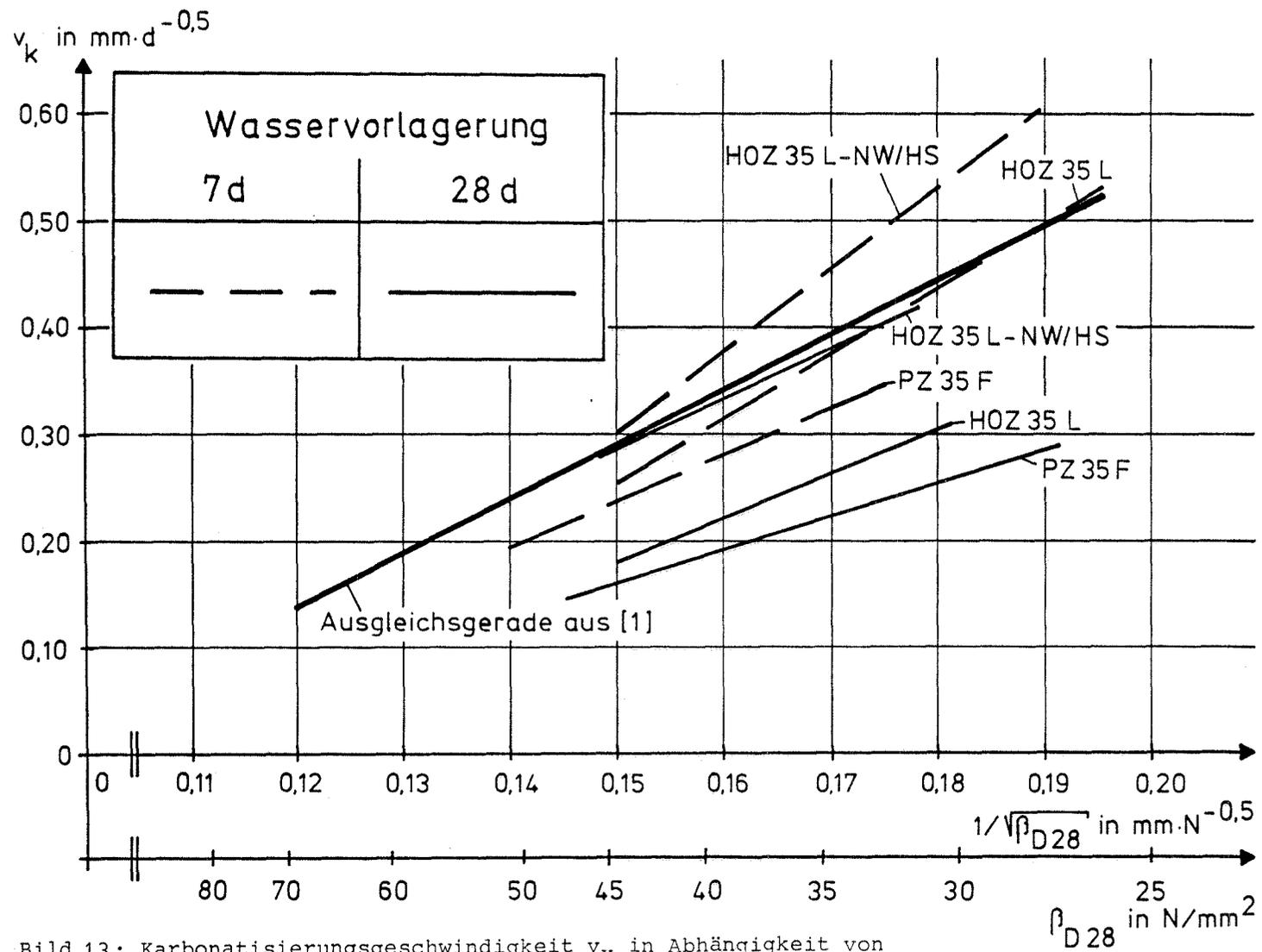


Bild 12: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_k$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$

Wasservorlagerung: 28 d,  $w/(z+f) = 0,50$  und  $0,60$



**Bild 13:** Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_k$  in Abhängigkeit von der 28 d-Druckfestigkeit  $\beta_{D28}$

Regressionsgeraden der Mörtel ohne und mit Flugasche  
(s. auch Tabelle 7)

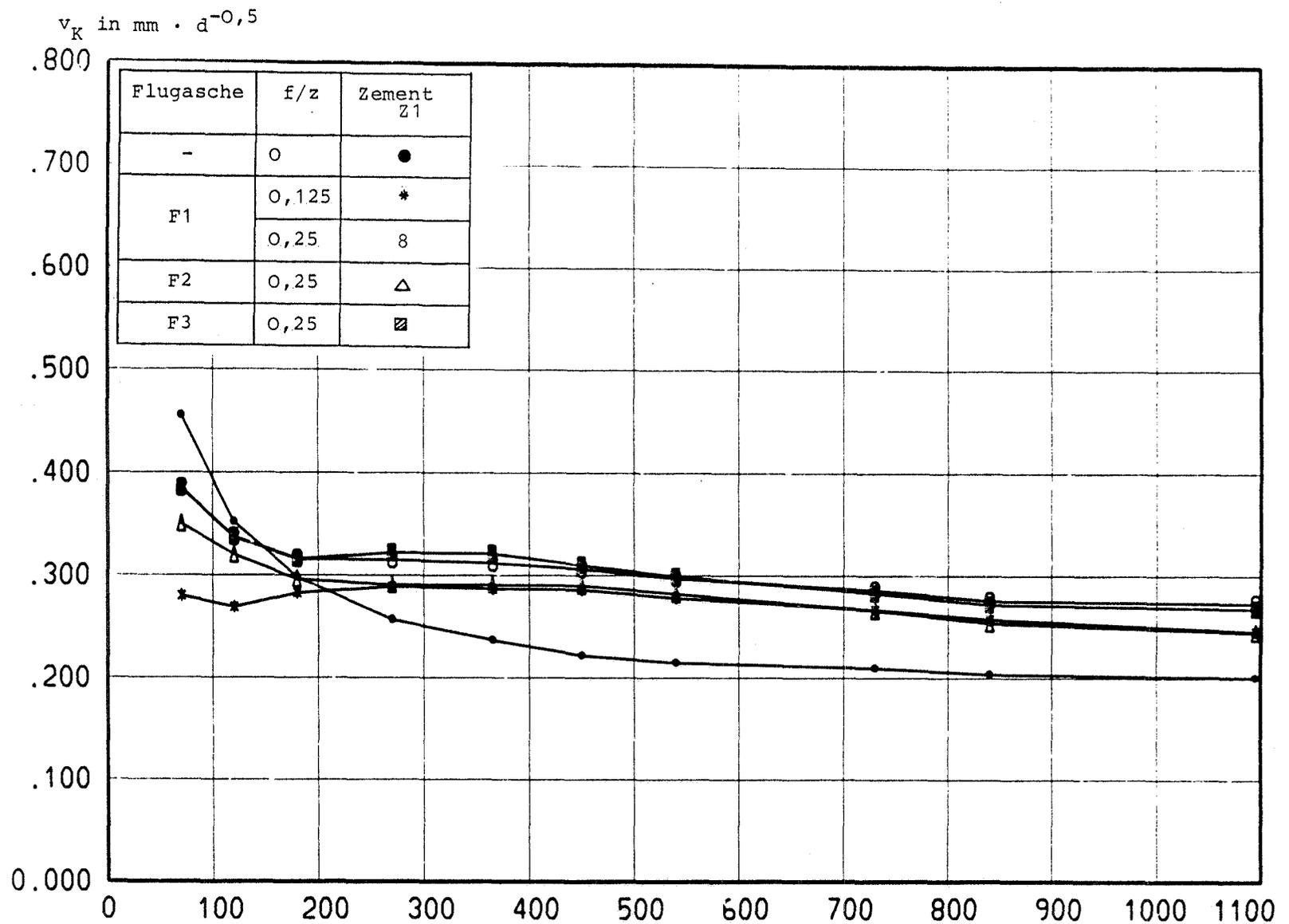


Bild 14: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$ , Wasservorlagerung: 7 d,  $w/(z+f) = 0,50$

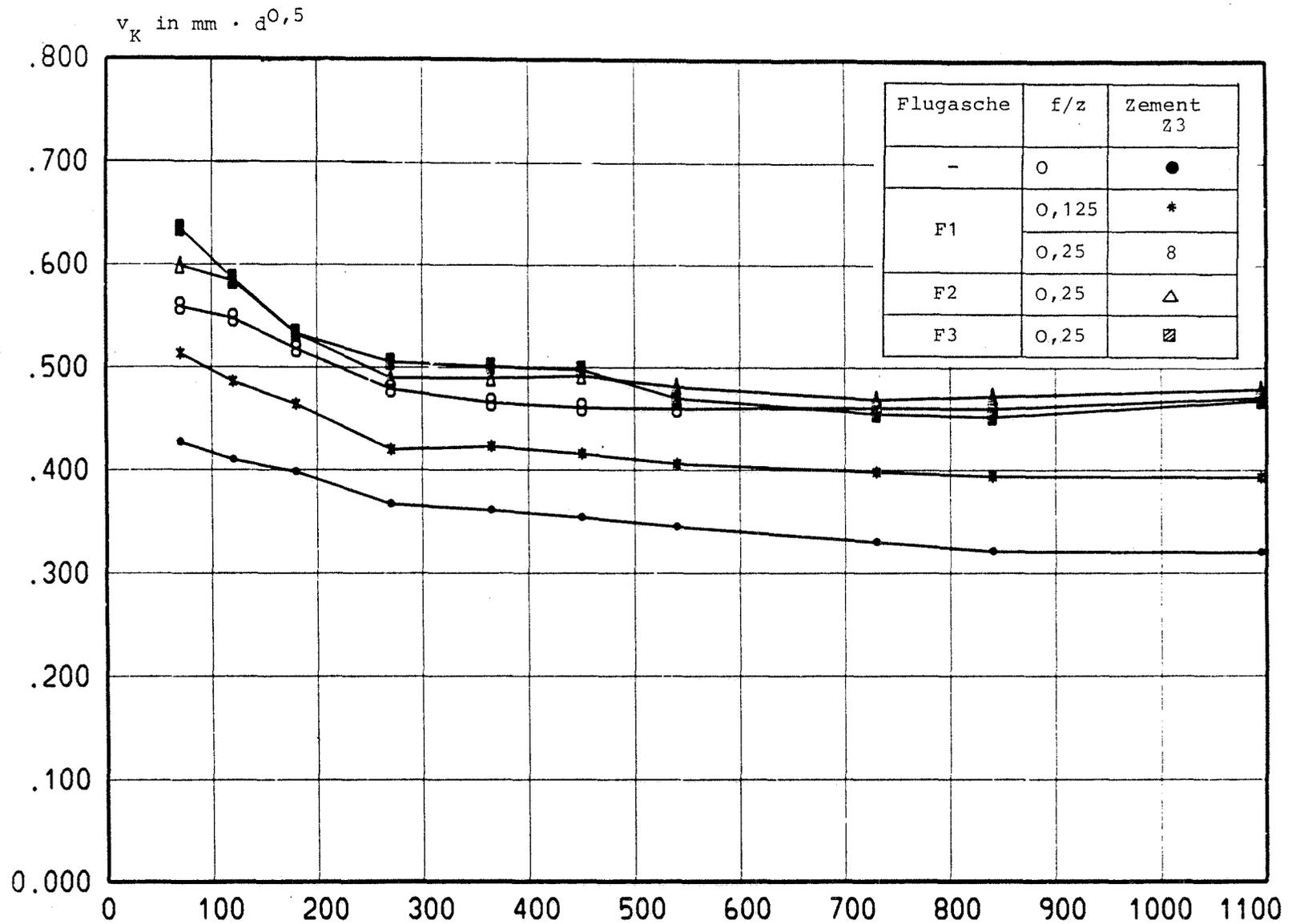


Bild 15: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$ , Wasservorlagerung: 7 d,  $w/(z+f) = 0,50$

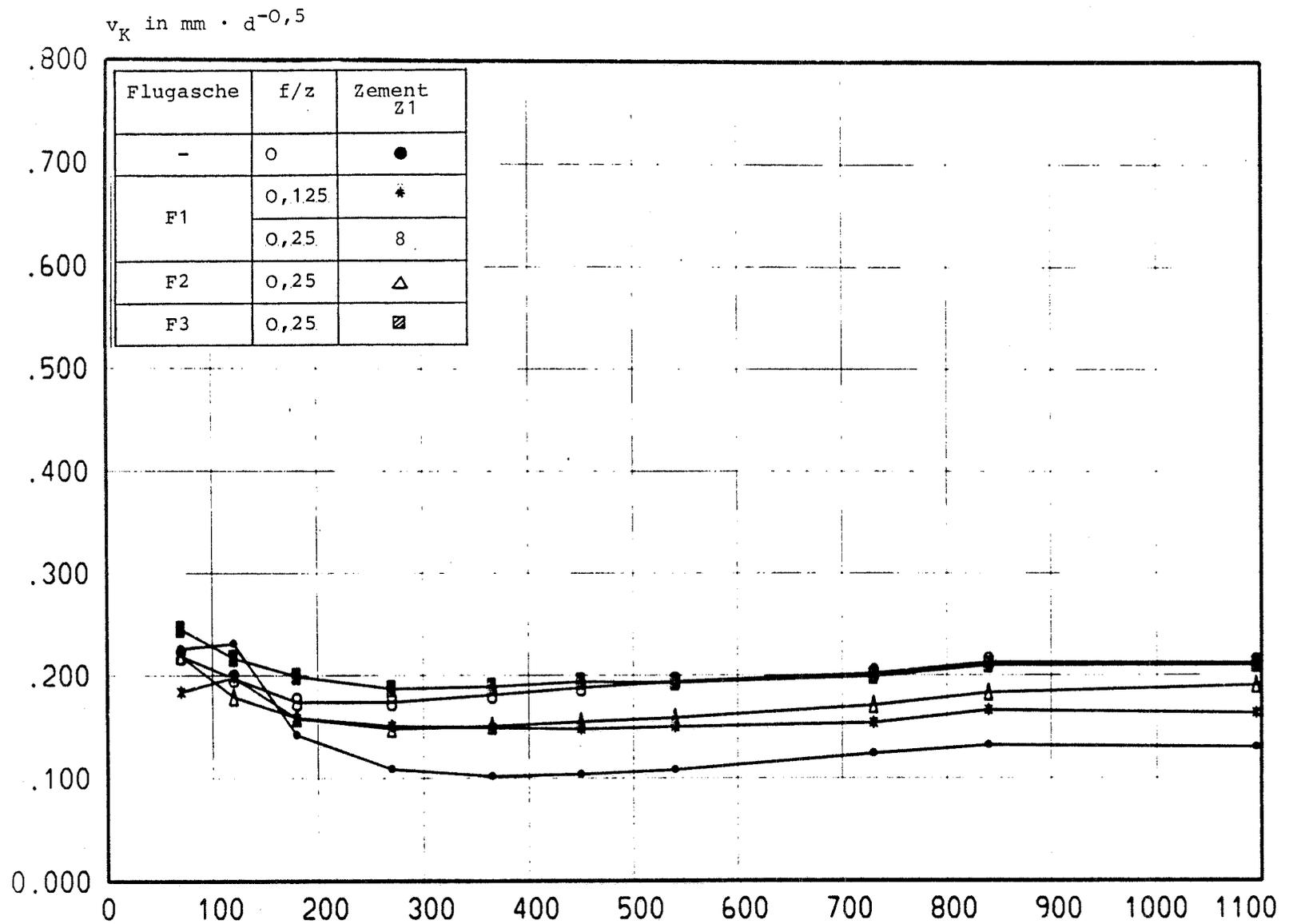


Bild 16: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer  $t$ , Wasservorlagerung: 28 d,  $w/(z+f) = 0,50$

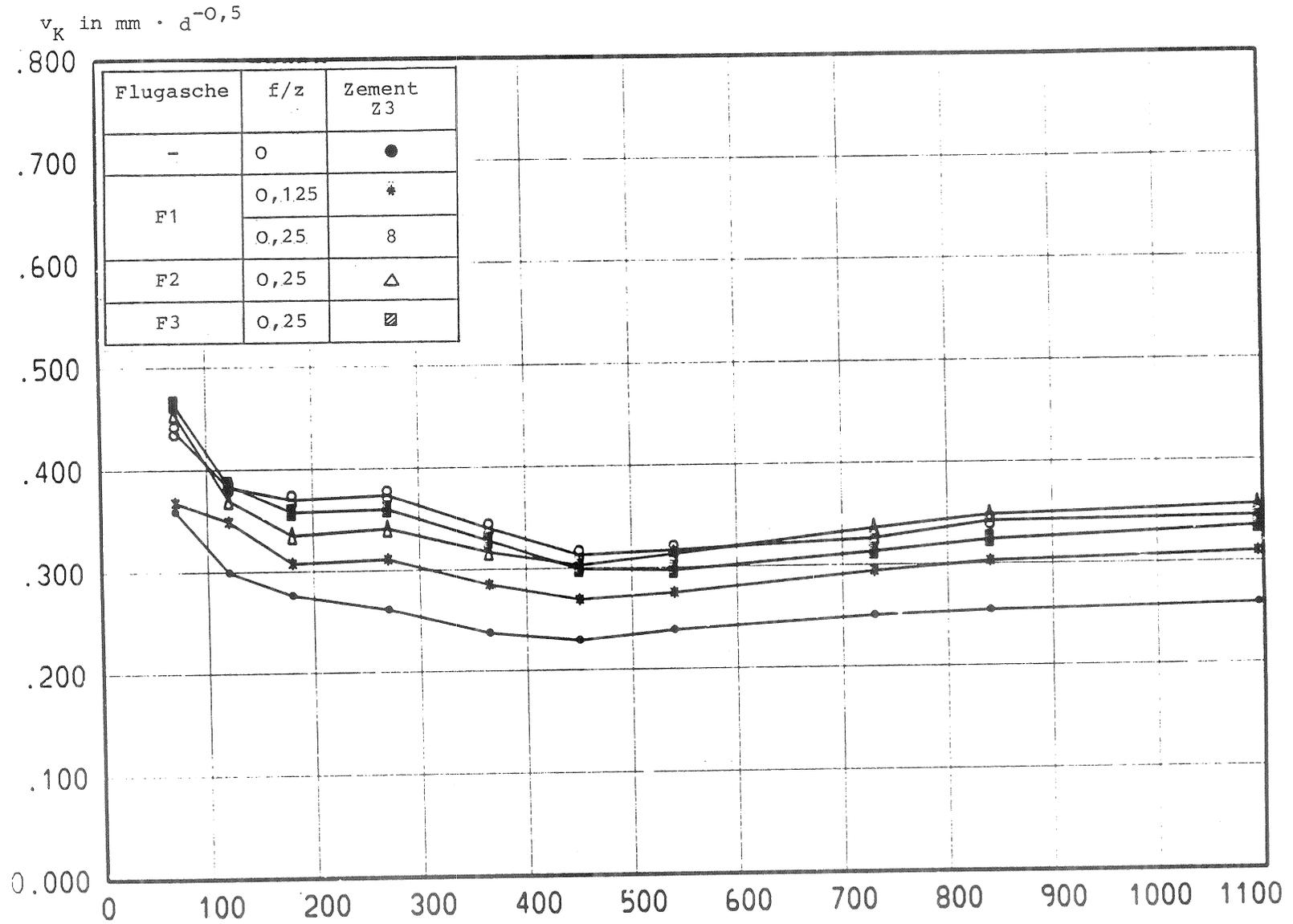


Bild 17: Karbonatisierungsgeschwindigkeit  $v_K$  in Abhängigkeit von der Lager-  
 t in d  
 rungsdauer  $t$ , Wasservorlagerung: 28 d,  $w/(z+f) = 0,50$