

Einfluß von Flugaschezusatz auf die
Dauerhaftigkeit von Beton aus Hochofen-
zement mit hohem Hüttensandgehalt

T 1898

T 1898

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

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

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



FORSCHUNGS- UND
MATERIALPRÜFUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG - OTTO-GRAF-INSTITUT -
ABTEILUNG I - BAUSTOFFE

FMPA

Stuttgart, 30. Juli 1987

FORSCHUNGSBERICHT

EINFLUSS VON FLUGASCHEZUSATZ AUF DIE DAUERHAFTIGKEIT
VON BETON AUS HOCHOFENZEMENT MIT HOHEM HÜTTENSANDGEHALT

Prof. Dr.-Ing. W. Manns

Dipl.-Ing. B. Neubert

Prof. Dr.-Ing. R. Zimbelmann

Inhalt

	Seite
1. Ziel der Untersuchung	1
2. Versuchsprogramm, Versuchsparameter	1
3. Herstellung und Kennwerte der Betone	2
4. Druckfestigkeitsprüfungen	3
5. Frost-Tauwechsel-Prüfungen	4
6. Karbonatisierungsverlauf	6
7. Wasserdampfdiffusion	7
8. Verschleißprüfung	8
9. Porositätsmessungen	9
10. Zusammenfassung	11
Literatur	
Tabellen	
Bilder	

1. Ziel der Untersuchung

Im Zusammenhang mit der Zugabe von Steinkohlenflugasche zu Zementen wurde die Eignung der Kombination von Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt und Flugasche untersucht. Hauptaugenmerk war dabei, Erkenntnisse über die Dauerhaftigkeit von Betonen zu gewinnen, bei denen bestimmte Anteile dieses Hochofenzementes durch entsprechende Mengen Flugasche ersetzt wurden.

Bei der Untersuchung, die durch das Institut für Bautechnik, Berlin, gefördert wurde, handelt es sich um eine Pilotstudie mit nur einer Hochofenzement- und einer Flugaschesorte. Von der Einbeziehung weiterer Zemente und Flugaschen wurde aus Zeit- und Kostengründen Abstand genommen; dies müßte ggfs. einer gesonderten, umfangreicheren Arbeit vorbehalten bleiben. Die Ergebnisse und Aussagen dieser Studie gelten demzufolge strenggenommen nur für die zugrundegelegte Kombination dieser Ausgangsstoffe; für andere Kombinationen dürften die Aussagen nur in der Tendenz gültig sein.

2. Versuchsprogramm, Versuchsparameter

Das Versuchsprogramm umfaßt drei Ausgangsbetone verschiedener Festigkeitsklassen ohne Flugascheanteil im Zement, die mit Betonen verglichen werden, bei denen jeweils ein Zementanteil in zwei Mengenabstufungen durch Flugasche ersetzt wurde. Bei allen Betonen wurden darüberhinaus durch unterschiedliche Lagerungsbedingungen nach der Betonherstellung zwei Nachbehandlungsvarianten vorgegeben.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der vorgesehenen variierten Betonzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen. Gewählt wurden Ausgangsbetone etwa der Festigkeitsklassen B 25, B 35 und B 45 mit angestrebten Wasser-Zement-Werten von 0,65, 0,55 bzw. 0,40 und 300 kg, 330 kg bzw. 360 kg Zement je m³ verdichteten Betons (Bezeichnungen A, B, C, jeweils mit dem Index 0). Diese Betone

wurden durch Zugabe von 30 bzw. 60 kg Flugasche je m^3 als Ersatz für die gleiche Menge an Hochofenzement variiert (Bezeichnung A, B, C, jeweils mit den Indizes 30 bzw. 60). Von den untersuchten Betonen entspricht die Zusammensetzung B 60 bezüglich des Mindestzement- und -flugaschegehaltes in etwa der heute geltenden Flugascheregelung [1].

Die beiden nach der Herstellung der Betone gewählten Lagerungsarten unterscheiden sich durch die Dauer der Feuchtlagerung. Lagerungsart I entspricht mit einem Tag in der Schalung und 6 Tagen Verbleib im Feuchtlagererraum der DIN 1048 Teil 1. Alternativ dazu wurde bei der Lagerungsart II die Verweildauer im Feuchtlagererraum auf nur einen Tag verkürzt.

Als Zement wurde Hochofenzement HOZ 35 L-NW/HS nach DIN 1164 gewählt. Dieser Zement hatte einen Hüttensandgehalt von rd. 75 M.-%, eine spezifische Oberfläche nach Blaine von $3275 \text{ cm}^2/\text{g}$ und wies eine Normdruckfestigkeit nach 28 Tagen von 42 N/mm^2 auf. Zur Zugabe wurde auf eine Schmelzkammerflugasche mit Prüfzeichen des Institutes für Bautechnik, Berlin, zurückgegriffen. Diese Flugasche wies eine spezifische Oberfläche nach Blaine von $3780 \text{ cm}^2/\text{g}$ auf, besaß eine Reindichte von $2,41 \text{ kg/dm}^3$ und einen Glühverlust von 1,1 M.-%. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Kennwerte von Zement und Flugasche enthält Tabelle 2.

3. Herstellung und Kennwerte der Betone

Die Betone wurden mit Rheinkies der Kornzusammensetzung 0/32 mm, getrennt in 4 Korngruppen 0/2 mm, 2/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm hergestellt. Die Sieblinie des Zuschlags lag etwa in der Mitte zwischen den Regelsieblinien A und B. Angaben über die Zusammensetzung und die Frischbetoneigenschaften enthält Tabelle 3. Dort sind die Betone unabhängig von den späteren Lagerungsarten I und II entsprechend der gemeinsamen Herstellung zusammengefaßt.

Aus den jeweiligen Mischungen wurden alle für die vorgesehenen Untersuchungen erforderlichen Probekörper hergestellt. Angaben darüber enthalten die folgenden Abschnitte.

4. Druckfestigkeitsprüfungen

Die Druckfestigkeiten der Betone und die Festbetonrohndichten wurden an Würfeln mit der Kantenlänge 15 cm gemäß DIN 1048 Teil 1 ermittelt. Neben den 28-Tage-Werten wurden die Festigkeiten auch nach 7 und 56 Tagen bestimmt, um die Festigkeitsentwicklung mitzuerfassen.

Die Ergebnisse der Prüfungen, jeweils als Mittel aus drei Einzelwerten sind in Tabelle 4 zusammengestellt. In Bild 1 ist die Festigkeitsentwicklung der Betone, getrennt für die beiden Lagerungsarten I und II (6 Tage bzw. 1 Tag Feuchtlagerung) aufgetragen. Das als Histogramm vorliegende Bild 2 ermöglicht darüberhinaus am Beispiel der auf den Beton A 0 I bezogenen 28-Tage-Festigkeitsentwicklung einen prozentualen Vergleich der einzelnen Betone untereinander; im Alter von 7 und 28 Tagen sind die Verhältnisse nahezu gleich.

Die Versuche lassen folgendes erkennen:

- Bei allen Betonen liegt eine gleichmäßige Festigkeitsentwicklung vor. Im Beobachtungszeitraum sind mit zunehmender Betonqualität, absolut gesehen, größere Festigkeitszunahmen zu verzeichnen.
- Im Gegensatz zu den Betonen der Lagerungsart I deutet sich bei den Betonen der Lagerungsart II über den Zeitraum von 28 Tagen hinaus bei den Mischungen mit Flugasche ein geringerer Festigkeitszuwachs an als bei den Ausgangsbetonen. Die unterschiedlichen Flugaschemengen wirken sich nicht signifikant aus.
- Je Betongruppe (Festigkeitsklasse) sind die 28-Tage-Druckfestigkeiten der Flugaschebetone stets niedriger als diejenigen der Ausgangsbetone. Die Unterschiede nehmen mit steigender Beton-

festigkeit zu (88 % bei der Gruppe C, 94 % bei der Gruppe A); die Höhe des Flugascheanteils wirkt sich nicht aus. Dies steht im Einklang mit einer Festigkeitsabschätzung mit Hilfe der Walz-Diagramme unter Zugrundelegung des tatsächlichen Wasser-Zement-Wertes ohne Einrechnung der Flugasche. Daraus ist ableitbar, daß der Beitrag der Flugasche zur Festigkeitsbildung umso geringer wird, je höherwertiger der Beton ist.

- Die verkürzte Feuchtlagerung nach der Herstellung führt zu Druckfestigkeiten, die um etwa 10 bis 15 % niedriger sind als diejenigen bei üblicher Feuchtlagerung.

5. Frost-Tauwechsel-Prüfungen

Der Frost-Widerstand der Betone wurde in Anlehnung an das von Bonzel und Siebel beschriebene Eintauchverfahren [2] geprüft. Dazu wurden je Betonmischung 2 Würfel mit der Kantenlänge von 10 cm in einen Metallbehälter mit luftfrei gekochtem Leitungswasser eingetaucht und Frost-Tau-Wechseln unterzogen. Die Würfel wurden aus Platten der Abmessungen 20 cm x 20 cm x 12 cm so herausgesägt, daß jeweils 3 Würfelflächen von einer geschalten und 3 von einer gesägten Fläche gebildet wurden.

Die Versuche begannen im Probenalter von 56 Tagen. Nach jeweils 10 Frost-Tau-Wechseln wurde das Trockengewicht der Absprengungen, letztlich als Maß für die Beurteilung des Frostwiderstandes, ermittelt. Insgesamt wurden 50 Zyklen durchgeführt.

Die ermittelten Absprengungen in M.-% sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die letzte Spalte dieser Tabelle enthält die Absprengungen zwischen 10 und 50 Zyklen. Die Bilder 3a bis h zeigen typische Oberflächenerscheinungen nach 50 Frost-Tauwechseln. In Bild 4 sind für die einzelnen Betone die Zunahmen der Absprengungen, getrennt für beide Lagerungsvarianten, aufgezeigt; Bild 5 zeigt die Abwitterungen nach 50 Zyklen, bezogen auf den Beton A O I, als Histogramm. Bei den Bildern 4 und 5 ist anzumerken, daß für die Darstellung nur die Abwitterungen ab dem 10. Frost-Tau-Wechsel berück-

sichtigt sind. Damit wird den Erfahrungen Rechnung getragen, wonach insbesondere bei langsam erhärtendem Beton der Abwitterungsanteil bis zum 10. Frost-Tau-Wechsel vornehmlich von mechanischen Einflüssen bei der Probenherstellung geprägt sein kann und somit eindeutige Interpretationen der Versuchsergebnisse erschwert werden könnten.

Aus den Versuchen läßt sich unter Berücksichtigung unvermeidlicher Streuungen folgendes ableiten:

- Mit zunehmendem Wasser-Zement-Wert des Betons erhöht sich der Masseverlust. Die Zunahme ist bei den Probekörpern mit der verkürzten Feuchtlagerung ausgeprägter als bei der Lagerung nach DIN 1048.
- Nach 50 Frost-Tau-Wechseln ergeben sich bei den Proben mit Lagerungsart II etwa die 2- bis 3fachen Abwitterungsraten gegenüber den Proben mit Lagerungsart I.
- Die Flugaschebetone weisen gegenüber den Betonen ohne Flugasche bei A die 1,4- bis 1,6fachen, bei B 60 II die rd. 2fachen und bei C 60 I und II die rd. 6- bis 10fachen Abwitterungen auf; die übrigen Flugaschebetone verhalten sich nahezu wie die Ausgangsbetone.

Anders aufgedrückt: Signifikant größere Absprengungen gegenüber den Ausgangsbetonen treten bei A 30 und A 60 bei beiden Lagerungsvarianten, bei B 60 II und bei C 60, ebenfalls bei beiden Lagerungsarten, auf.

- Bei Lagerungsart II lassen die Betone B und C erkennen, daß die Flugasche von 60 kg/m^3 zu deutlich höheren Absprengungen als bei den Ausgangsbetonen und den Betonen mit 30 kg/m^3 Flugaschezugabe führt.
- Aus den Verläufen der Abwitterungen kann im Sinne von [2] nur von den Betonen B I, C I, C O II und C 30 II ein ausreichender Frostwiderstand erwartet werden (die Abwitterungsrate wird nach

100 Frost-Tau-Wechseln auf unter 5 % geschätzt). Die in den Versuchen bis 50 Frost-Tau-Wechseln gemessenen Abwitterungen von 0,5 bis rd. 2,0 M.-% lassen sich in etwa mit denjenigen Raten vergleichen, die sich bei gleichartigen Versuchen an Portlandzement-, Portland-Kalksteinzement- und Hochofenzement-Betonen mit Wasser-Zement-Werten von 0,60 im Otto-Graf-Institut eingestellt haben.

6. Karbonatisierungsverlauf

Zur Ermittlung der Karbonatisierungstiefen der Betone wurden Prismen der Abmessungen 10 cm x 10 cm x 53 cm bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte sowohl unter Normalbedingungen als auch in einer auf 3 Vol.-% CO₂ angereicherten Atmosphäre ausgelagert. Die Bestimmung der Karbonatisierung erfolgte mit Hilfe von Phenolphthalein an frisch abgespaltenen Prismenscheiben. Die Auslagerung in Normalatmosphäre wurde über den Zeitraum von rd. 200 Tagen verfolgt, die in erhöhter CO₂-Atmosphäre 49 Tage lang betrieben.

Die in bestimmten Zeitabständen vorgenommenen Messungen sind für die Normallagerung in Tabelle 6 und für die Lagerung in erhöhtem CO₂ in Tabelle 7 zusammengestellt. Die angegebenen Karbonatisierungstiefen stellen jeweils das Mittel aus 8 Maximaltiefen dar.

Die Karbonatisierungsverläufe sind in den Bildern 6 bis 8 für Normallagerung und in 9 bis 11 für die Lagerung in erhöhter CO₂-Atmosphäre dargestellt. Daraus ist eindeutig ersichtlich, daß die Karbonatisierungstiefen mit zunehmender Betongüte abnehmen und die verkürzte Feuchtlagerung im Mittel zu einer 1,5- bis 2fach höheren Karbonatisierungstiefe führt. Bei den Versuchen in 3 Vol.-%iger CO₂-Atmosphäre deutet sich insbesondere bei den Betonen B und C (Bilder 10 und 11), aber auch bei den Betonen A zumindest am Ende des Versuchsprogrammes ab, daß mit zunehmendem Flugascheanteil etwas höhere Karbonatisierungstiefen zu erwarten sind. Diese Tendenz ist auch teilweise bei den im Normalklima gelagerten Betonen erkennbar, wobei hier sicherlich die geringeren Karbonatisierungstiefen im Beobachtungszeitraum die Aussagen erschweren. Die höheren

Karbonatisierungstiefen bei den Flugaschebetonen stehen im Einklang mit den Ergebnissen in [3].

Sieht man von unvermeidlichen Streuungen der Messungen insbesondere zu Versuchsbeginn ab, so lassen sich die Karbonatisierungsverläufe in grober Näherung mathematisch durch ein \sqrt{t} -Gesetz, beispielsweise in der folgendem Form, beschreiben:

$$K = D\sqrt{t},$$

mit K = Karbonatisierungstiefe in mm,

t = Zeit, hier in Tagen,

$D = \frac{K}{\sqrt{t}}$ = Karbonatisierungskoeffizient $\frac{\text{mm}}{\sqrt{\text{Tage}}}$.

Für die unter Normalklima gelagerten Betone können damit, gültig für den Beobachtungszeitraum, die in Bild 12 aufgetragenen Karbonatisierungskoeffizienten angegeben werden. Die zuvor getroffenen Aussagen spiegeln sich in dieser Abbildung wieder.

7. Wasserdampfdiffusion

Die Wasserdampfdiffusion wurde in einem ersten Schritt an Betonen der Gruppe A und B mit Hilfe des Trockenbereichsverfahrens nach DIN 52 615 Teil 1 ermittelt. Dazu wurden Betonscheiben mit einem Durchmesser von rd. 10 cm und einer Dicke von rd. 6 cm im Alter von 56 Tagen dampfdicht in ein becherförmiges Prüfgefäß aus Glas eingebaut, in dem sich als Sorbens Kieselgel befand. Die Lagerung der Proben erfolgte in der Klimakammer bei 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte, die relative Luftfeuchte über dem Sorbens kann im Mittel mit 2 % in Ansatz gebracht werden. Als Meßgrößen dienten die Gewichtsveränderungen der Proben in Laufe der Prüfzeit, hervorgerufen durch Wasserdampfdiffusion von außen in das Innere des Prüfglases aufgrund der unterschiedlichen Wasserdampfdrucke. Mit Hilfe der Meßwerte wurden diffusionsäquivalente Luftschichtdicken s_d bzw. Diffusionswiderstandszahlen μ ermittelt. Entsprechende Rechenangaben sind in DIN 52 615 enthalten.

Die Gewichtsänderungen der Proben im Laufe der Prüfzeit sind in den Bildern 13 bis 15 unter Verwendung eines logarithmischen Zeitmaßstabes dargestellt. In allen Fällen zeigt sich zumindest tendenziell der gleiche Verlauf. Zunächst stellt sich eine Gewichtsabnahme ein, die sich ab einer Auslagerungszeit von rd. 100 bis 300 Tagen in eine Gewichtszunahme umkehrt. Die Gewichtsabnahme ist durch die anfänglich einsetzende Feuchtigkeitsabgabe nach außen infolge Austrocknung des Betons sowie möglicherweise auch durch die Abgabe des sich bei der Karbonatisierung abspaltenden Wassers nach außen erklärbar. Erst wenn die Feuchtigkeitsabgabe nach außen abklingt bzw. zum Stillstand kommt, kann die sich aufgrund des vorliegenden Dampfdruckgefälles einstellende Wasserdampfdiffusion als Gewichtszunahme bemerkbar werden.

Aus den Bildern 13 bis 15 ist abzuleiten, daß der Umkehrpunkt von der Gewichtsabnahme in eine Gewichtszunahme um so früher auftritt, je höher der Flugascheanteil ist, je kürzer die Nachbehandlung ist und je höher der Wasser-Zement-Wert des Betons ist.

Die aus den Meßwerten errechneten Kennwerte für die Wasserdampfdurchlässigkeit, die diffusionsäquivalenten Luftschichtdicken s_d und die Diffusionswiderstandszahlen μ , sind in Bild 16 aufgetragen. Dabei zeigt sich eindeutig, daß die Kennwerte mit steigendem Flugascheanteil etwas abnehmen. Bei verkürzter Feuchtlagerung nach der Herstellung ergeben sich gegenüber normalgelagerten Proben deutlich geringere Werte. Ein Anstieg von s_d und μ ist - soweit der Versuchsumfang diese Wertung zuläßt - bei Zunahme der Betonfestigkeit zu verzeichnen.

8. Verschleißprüfung

Die Betone der Gruppen B und C wurden der Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme gemäß DIN 52 108 unterzogen. Dazu wurden je Beton drei Platten mit quadratischer Grundfläche hergestellt und im Alter zwischen etwa 4 und 8 Monaten normgerecht geprüft. Vor der Prüfung wurden alle Proben bei rd. 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Als Schleifverschleiß wurde der Volumenverlust ΔV in $\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$ ermittelt. Die Werte sind in Tabelle 8 aufgeführt. Bild 17 veranschaulicht die Unterschiede in Form eines Balkendiagrammes.

Es zeigt sich, daß der Volumenverlust bei den Betonen II mit der verkürzten Feuchtlagerung gegenüber den länger feuchtgelagerten Betonen I etwas höher ist. Erkennbar ist weiterhin die Tendenz, wonach der Volumenverlust mit steigendem Flugascheanteil abnimmt; allerdings ist bei B 60 II und C 60 II wieder ein geringer Anstieg von ΔV zu verzeichnen. Generell ist festzustellen, daß die Unterschiede der Volumenverluste zwischen den geprüften Betonen verhältnismäßig gering sind und auch die Absolutwerte zwischen $8,6$ und $11,6 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ als üblich einzustufen sind. Zum Vergleich sei hier der zulässige Volumenverlust bis zu $15 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ bei Gehwegplatten aus Beton nach DIN 485 aufgeführt.

9. Porositätsmessungen

An allen Betonen wurden Porositätsmessungen mit Hilfe des Quecksilberdruckporosimeters durchgeführt. Dazu wurden von im Normal-klima gelagerten Betonprismen im Alter von 56 Tagen aus Kantenbereichen die für die Messungen notwendigen, relativ geringen Probenmengen abgetrennt, diese bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und bis zum Prüftermin wenige Tage später über Blaugel gelagert. Aufgrund der geringen Probenmengen wurden je Probe jeweils mehrere Messungen vorgenommen und die Ergebnisse zu einem Mittelwert zusammengefaßt.

Mit dem Meßverfahren wurden Poren ab einem Radius von $3,75 \mu\text{m}$ erfaßt. Dies sind im wesentlichen Kapillar- sowie Luft- bzw. Verdichtungsporen; Gelporen bleiben aufgrund ihres geringen Porenradius' außer Betracht. Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß es sich bei dem Probenmaterial nicht ausschließlich um Zementstein, sondern um Beton, also um Zementstein plus Zuschlag handelt; damit ist naturgemäß in gewissem Umfang mit Inhomogenitäten und demzufolge auch mit Streuungen zu rechnen.

Tabelle 9 enthält die gemittelten Gesamtporengehalte sowie die um den Luftporengehalt bereinigten Werte in Vol.-%. Demnach ist die Gesamtporosität bei den Betonen der Gruppe A mit Werten von über 14 % am höchsten. Die niedrigsten Werte wurden bei den Betonen der Gruppe C mit 9 % ermittelt. Die Betone der Gruppe B liegen mit rd. 11 bis 13 % dazwischen. Signifikante Unterschiede der Gesamtporosität innerhalb der Gruppen sind weder für den Flugascheanteil noch für die Lagerungsart erkennbar.

Betrachtet man demgegenüber den Porengehalt in Abhängigkeit vom Porenradius bzw. die Porenverteilung in % der Gesamtporosität, wiederum in Abhängigkeit vom Porenradius, so verhalten sich zwar alle Betongruppen je Lagerungsart in etwa gleich, zwischen den beiden Lagerungsarten I und II sind jedoch deutliche Unterschiede festzustellen. Beispielhaft soll dies für den Zusammenhang zwischen Porengehalt und Porenradius an den Betonen der Gruppe B ($w/(z+f) = 0,51$) in Bild 18 und für den Zusammenhang zwischen Porenverteilung in % der Gesamtporosität und Porenradius an den Betonen der Gruppe A ($w/(z+f) = 0,62$) in Bild 19 gezeigt werden. Die übrigen Betone verhalten sich ähnlich.

Beide Bilder lassen erkennen, daß bei der Lagerungsart I der Anteil an kleineren Poren überwiegt, während bei Lagerungsart II deutlich mehr Poren mit größerem Radius vorliegen. Dies steht im Einklang mit der Literatur [4], wonach durch eine nicht ausreichend lange Nachbehandlung weniger das Porenvolumen als die Porenverteilung beeinflusst werden; es entsteht ein größerer Anteil größerer Poren.

In Bild 19 am Beispiel des Betons A deutet sich an - und das gilt auch für die anderen Betone unter Berücksichtigung der zuvor erwähnten Inhomogenitäten -, daß mit steigendem Flugascheanteil im Beton der Anteil an Poren mit größerem Porenradius leicht zunimmt.

10. Zusammenfassung

In einer Pilotstudie wurden vergleichende mechanisch-technologische Untersuchungen an Betonen aus Hochofenzement HOZ 35 L-NW/HS mit rd. 75 M.-% Hüttensand und Betonen, bei denen ein Teil des Hochofenzementes durch die gleiche Menge an Flugasche aus einer Schmelzkammerfeuerung ersetzt wurde, durchgeführt. Das Ziel war, zu klären, ob diese Kombination von Zement und Flugasche im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit von Beton einsetzbar ist und welcher Nachbehandlung derartige Betone bedürfen.

Mit diesen Ausgangsstoffen wurden durch Variation des Wasser-Zement-Wertes und der Zementmenge drei Ausgangsbetone entsprechend etwa den Festigkeitsklassen B 25, B 35 und B 45 sowie je Klasse zwei Flugaschbetone mit 30 bzw. 60 kg Flugasche je m³ Beton als Ersatz für die gleiche Menge an Hochofenzement hergestellt. Als Nachbehandlung der betonierten Prüfkörper wurde die Lagerung nach DIN 1048 Teil 1 und alternativ eine auf nur einen Tag verkürzte Feuchtlagerung nach der Herstellung gewählt.

Es wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Ermittlung der Druckfestigkeiten nach 7, 28 und 56 Tagen,
- Frost-Tau-Wechsel-Versuche, 50 Prüfzyklen,
- Karbonatisierungsverhalten in Normalklima und in einer Atmosphäre, angereichert auf 3 Vol.-% CO₂,
- Wasserdampfdiffusion,
- Verschleißverhalten und
- Porositätsmessungen.

Angaben über die Durchführung der Versuche und Einzelergebnisse enthalten die jeweiligen Abschnitte des Berichtes. Zusammenfassend läßt sich folgendes aussagen:

- Die Normendruckfestigkeiten der Flugaschebetone sind unabhängig von Flugascheanteil bis zu 12 % niedriger als diejenigen der Ausgangsbetone. Die größeren Unterschiede sind bei den höherfesten Betonen zu verzeichnen.

Die verkürzte Feuchtlagerung nach der Herstellung führt gegenüber normalgelagerten Proben zu 10 bis 15 % niedrigeren Druckfestigkeiten.

- Frost-Tauwechsel-Versuche haben gezeigt, daß bei der Lagerungsart I nur von den Betonen B (~ B 35) und C (~ B 45) und bei der Lagerungsart II nur von den Betonen C ohne und mit 30 kg/m^3 Flugasche ein ausreichender Frostwiderstand erwartet werden kann.
- Beim Karbonatisierungsverhalten scheint, abgesehen von den mit zunehmender Betonfestigkeit abnehmenden Karbonatisierungstiefen, mit höherem Flugaschegehalt ein geringfügiger Anstieg der Karbonatisierungstiefen vorzuliegen.

Die verkürzte Feuchtlagerung führt im Beobachtungszeitraum gegenüber der Normallagerung zu einer 1,5- bis 2fachen Karbonatisierungstiefe.

- Die Wasserdampfdurchlässigkeit wird mit zunehmender Betonfestigkeit geringer. Sie nimmt mit zunehmendem Flugascheanteil etwas zu und steigt gegenüber den normgelagerten Proben bei den Proben mit verkürzter Nachbehandlung deutlich an.
- Die Verschleißprüfung an den Betonen B und C zeigt eine geringe Abnahme des Volumenverlustes mit steigender Betongüte sowie eine geringe Zunahme bei Lagerungsart II gegenüber Lagerungsart I. Der Flugaschegehalt ist ohne signifikanten Einfluß auf den Volumenverlust; die Flugaschebetone tendieren gegenüber den Ausgangsbetonen zu etwas geringerem Abrieb.
- Die Gesamtporosität nimmt mit steigender Betonfestigkeit ab; die Flugaschezugabe hat keine signifikanten Auswirkungen. Bei Lage-

rungsart II ist die Gesamtporosität zwar nur geringfügig höher als bei Lagerungsart I, es zeigt sich jedoch deutlich ein Anteil an größeren Poren.

Aus den vorliegenden Untersuchungen läßt sich der Schluß ziehen, daß die Kombination von Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt und Flugasche als Bindemittel für einen dauerhaften Beton grundsätzlich geeignet ist. Es zeigt sich aber auch eindeutig, daß Betone mit diesem Bindemittel auf eine nicht ausreichende Nachbehandlung umso empfindlicher reagieren, je höher das Verhältnis zwischen Wasser und Zement + Flugasche ist. Für Außenbauteile, bei denen u.a. in der Regel eine Frostbeanspruchung angenommen werden kann, sollte daher in Abweichung von der derzeit geltenden Flugascheregelung [1] das Verhältnis $w/(z+0,3f) \leq 0,50$ betragen und stets eine ausreichend lange Nachbehandlung vorgesehen werden. In diesem Fall scheint auch für Hochofenzement mit hohem Hüttensandgehalt eine Verringerung des Mindestzementgehaltes von 300 kg/m^3 auf 270 kg/m^3 möglich, wenn der Flugaschegehalt mindestens das Doppelte der Zementverringermenge beträgt.

Die Aussagen gelten streng genommen nur für die untersuchte Kombination von HOZ 35 L-NW/HS und Flugasche aus Schmelzkammerfeuerung. Für andere Kombinationen ergeben sich möglicherweise in der Tendenz ähnliche Ergebnisse. Dies wäre jedoch genauer zu überprüfen.

Literatur:

- [1] Verwendung von Steinkohlenflugaschen im Betonbau.
Mitteilungen des Institutes für Bautechnik, Berlin,
Heft 5, 1984.

- [2] Bonzel, J. und Siebel, E.: Neuere Untersuchungen über
den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton.
Betontechnische Berichte 1977, S 55 ff., Betonverlag
Düsseldorf.

- [3] Schubert, P.: Ergänzungsversuche zum Karbonatisierungs-
verhalten flugaschehaltiger Mörtel.
Bericht des Inst. f. Bauforschung, TH Aachen, vom 4.8.1986.

- [4] Nischer, P.: Die Güte des Betongefüges,
Betonwerk und Fertigteil-Technik, Heft 6, 1986.

B E I L A G E N

Tabellen,
Bilder

Tabelle 1. Untersuchte Betone, Zusammensetzung, Lagerung

Beton- bezeichnung	Festig- keits- klasse	angestreb- ter Wert $\frac{w}{z + f}$ 1)	Lagerungs- art 2)	Zementgehalt z in kg je m ³ Beton	Flugaschegehalt f		
A 0 I A 30 I A 60 I	B 25	0,65	I	300	-		
				270	30		
				240	60		
A 0 II A 30 II A 60 II					II	300	-
						270	30
						240	60
B 0 I B 30 I B 60 I	B 35	0,55	I	330	-		
				300	30		
				270	60		
B 0 II B 30 II B 60 II					II	330	-
						300	30
						270	60
C 0 I C 30 I C 60 I	B 45	0,40	I	360	-		
				330	30		
				300	60		
C 0 II C 30 II C 60 II					II	360	-
						330	30
						300	60

1) z Zementgehalt, f Flugaschegehalt
 2) I Lagerung nach DIN 1048 Teil 1,
 II 1 Tag in der Form, 1 Tag feucht, anschließend Klimaraum 20/65

Tabelle 2. Angaben zum Zement und zur Flugasche

Zement DIN 1164 HOZ 35 L - NW/HS		
Hüttensandgehalt	75 M.-%	
Druckfestigkeit in N/mm ²	N ₇	N ₂₈
	26	42
Reindichte	3,00 kg/dm ³	
spez. Oberfläche	3275 cm ² /g	

Flugasche aus Schmelzkammerfeuerung ¹⁾	
Reindichte	2,41 kg/dm ³
spez. Oberfläche	3780 cm ² /g
Glühverlust	1,1 M.-%
Salzsäure- und Sodaauflösung nach EN 196 Teil 2, Abschnitt 9	lösl. Bestandteile 34,6 M.-%
Salzsäure- und Kalilaugeaufschl. n. EN 196 Teil 2, Abschnitt 10	lösl. Bestandteile 84,9 M.-%
1) Prüfbescheid IfBt PA VII-21/110	

Tabelle 3. Betonzusammensetzung, Frischbetonkennwerte

Beton- bezeichnung	Zusammensetzung				$\frac{w}{z}$	$\frac{w}{z+f}$	Frischbeton- temperatur °C	Ausbreit- maß a cm	Verdich- tungsmaß v	Luftgehalt Vol.-%	Frischbet.- rohddichte kg/dm ³
	Zement z kg/m ³	Flugasche f kg/m ³	Zuschlag kg/m ³	Wasser l /m ³							
A 0 I,II	300	-	1838	186	0,62		18,0	52	1,02	0,6	2,29
A 30 I,II	270	30	1865	186	0,69	0,62	21,5	51	1,02	0,5	2,33
A 60 I,II	240	60	1865	186	0,78		18,0	52	1,02	0,7	2,28
B 0 I,II	330	-	1879	168	0,51		18,0	42	1,25	0,9	2,29
B 30 I,II	300	30	1879	168	0,56	0,51	18,0	45	1,05	0,8	2,31
B 60 I,II	270	60	1879	168	0,62		18,5	40	1,08	1,0	2,34
C 0 I,II	360	-	1896	144	0,40		21,0	31	1,43	1,6	2,38
C 30 I,II	330	30	1896	144	0,44	0,40	20,0	30	1,38	1,7	2,38
C 60 I,II	300	60	1896	144	0,48		21,0	(28)	1,37	0,5	2,38

Tabelle 4. Rohdichten und Druckfestigkeiten der Betone

Beton- bezeichnung	Rohdichte (lufttrocken) kg/dm ³			Druckfestigkeit N/mm ²		
	Probenalter			Probenalter		
	7 Tage	28 Tage	56 Tage	7 Tage	28 Tage	56 Tage
A O I	2,37	2,34	2,34	22	31	34
A 30 I	2,38	2,32	2,31	20	29	33
A 60 I	2,38	2,37	2,34	18	29	33
A O II	2,34	2,31	2,30	20	27	29
A 30 II	2,33	2,39	2,29	19	24	26
A 60 II	2,33	2,33	2,30	20	26	26
B O I	2,37	2,36	2,36	29	39	44
B 30 I	2,38	2,35	2,35	26	36	42
B 60 I	2,39	2,37	2,37	26	37	41
B O II	2,33	2,34	2,35	29	35	38
B 30 II	2,34	2,34	2,33	26	33	34
B 60 II	2,35	2,34	2,34	25	33	34
C O I	2,39	2,37	2,36	39	51	57
C 30 I	2,38	2,37	2,35	34	46	52
C 60 I	2,36	2,35	2,34	31	44	48
C O II	2,36	2,37	2,36	39	47	52
C 30 II	2,34	2,35	2,35	35	42	44
C 60 II	2,33	2,35	2,34	33	42	45

Tabelle 5. Frost-Tauwechsel-Beanspruchung; Absprengungen an den Probekörpern

Beton- bezeichnung	Summe der Absprengungen in M.-% nach Anzahl von Wechseln					Summe M.-% 50 - 10
	10	20	30	40	50	
A O I	1,7	2,5	4,8	6,1	6,5	4,8
A 30 I	7,7	9,8	13,0	15,0	15,4	7,7
A 60 I	0,5	2,8	4,0	6,7	7,3	6,8
A O II	7,6	10,5	12,6	15,7	17,0	9,4
A 30 II	5,3	8,1	13,0	16,4	20,3	15,0
A 60 II	2,0	6,0	8,1	13,3	15,1	13,1
B O I	0,4	1,0	1,5	1,8	2,2	1,8
B 30 I	1,3	1,5	1,8	2,0	2,0	0,7
B 60 I	0,3	0,5	1,3	2,2	2,4	2,1
B O II	0,7	1,3	1,9	3,7	4,2	3,5
B 30 II	3,4	4,2	4,9	5,4	6,2	2,8
B 60 II	4,4	5,9	8,3	10,2	11,1	6,7
C O I	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1
C 30 I	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1
C 60 I	0,3	0,4	0,4	1,6	1,8	1,5
C O II	0,6	0,8	0,8	0,9	1,1	0,5
C 30 II	0,9	1,2	1,4	1,5	1,5	0,6
C 60 II	0,5	0,6	1,1	3,4	3,7	3,2

Tabelle 6. Karbonatisierungstiefen der Betone bei Lagerung
in Normalklima (20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte),
Mittel aus 8 Einzelwerten

Beton- bezeichnung	Karbonatisierungstiefe in mm ¹⁾ bei Probenalter in Tagen						
	21	35	49	70	100	160	200
A O I	1	1	2	4	4	4	4
A 30 I	1	1	2	4	4	4	4
A 60 I	2	2	3	4	4	4	5
A O II	1	3	4	5	5	6	6
A 30 II	3	3	4	5	5	7	7
A 60 II	4	4	4	5	6	7	8
B O I	1	1	1	2	3	3	4
B 30 I	1	1	2	2	3	3	(4)
B 60 I	1	1	2	2	3	3	(4)
B O II	2	2	3	4	5	6	7
B 30 II	2	2	3	3	4	4	(5)
B 60 II	2	3	3	4	4	5	(6)
C O I	0	1	1	1	1	2	2
C 30 I	0	0	1	1	1	2	3
C 60 I	1	1	1	1	2	3	3
C O II	1	1	1	2	2	3	4
C 30 II	1	1	2	3	3	4	4
C 60 II	1	2	2	2	3	4	(5)
1) Werte in () inter- bzw. extrapoliert							

Tabelle 7. Karbonatisierungstiefen der Betone bei Lagerung in angereicherter CO₂-Atmosphäre (3 Vol.-% CO₂, 20 °C, 65 % rel. Luftfeuchte); Mittel aus 8 Einzelwerten

Beton- bezeichnung	Karbonatisierungstiefe in 3,0 Vol.-% CO ₂ in mm nach Tagen		
	21	35	49
A O I	9	10	11
A 30 I	1	8	11
A 60 I	6	11	13
A O II	24	25	26
A 30 II	11	22	25
A 60 II	19	23	28 ¹⁾
B O I	3	6	8
B 30 I	6	10	11
B 60 I	6	9	9
B O II	11	15	17
B 30 II	12	16	19
B 60 II	12	17	20
C O I	2	3	3
C 30 I	3	3	5
C 60 I	3	4	4
C O II	6	8	9
C 30 II	9	9	10
C 60 II	9	9	11
1) nach 42 Tagen			

Tabelle 8. Ergebnisse der Verschleißprüfung nach
DIN 52 108; Volumenverlust ΔV (Mittelwert aus 3 Proben)

Betonbezeichnung	Volumenverlust, Mittelwert $\Delta v \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$
B O I	11,05
B 30 I	10,85
B 60 I	9,72
B O II	11,55
B 30 II	10,67
B 60 II	11,08
C O I	9,37
C 30 I	8,78
C 60 I	8,58
C O II	10,83
C 30 II	9,68
C 60 II	10,20

Tabelle 9. Gesamtporengehalte der Betone; Ergebnisse der Messungen mit dem Quecksilberdruckporosimeter (Mittelwerte) und Meßwerte unter Abzug des LP-Gehaltes

Beton- bezeichnung	Gesamtporosität	
	Messung (Mittelwert) Vol.-%	Messung unter Abzug des LP-Gehaltes 1) Vol.-%
A O I	14,8	14,1
A 30 I	14,8	14,3
A 60 I	15,0	14,3
A O II	15,3	14,7
A 30 II	14,6	14,1
A 60 II	13,5	12,8
B O I	12,1	11,2
B 30 I	14,0	13,2
B 60 I	12,3	11,3
B O II	13,8	12,9
B 30 II	12,2	11,4
B 60 II	13,1	12,1
C O I	12,7	11,1
C 30 I	11,5	9,8
C 60 I	14,1	13,6
C O II	11,9	10,3
C 30 II	10,7	9,0
C 60 II	12,2	11,7
1) siehe Tabelle 3		

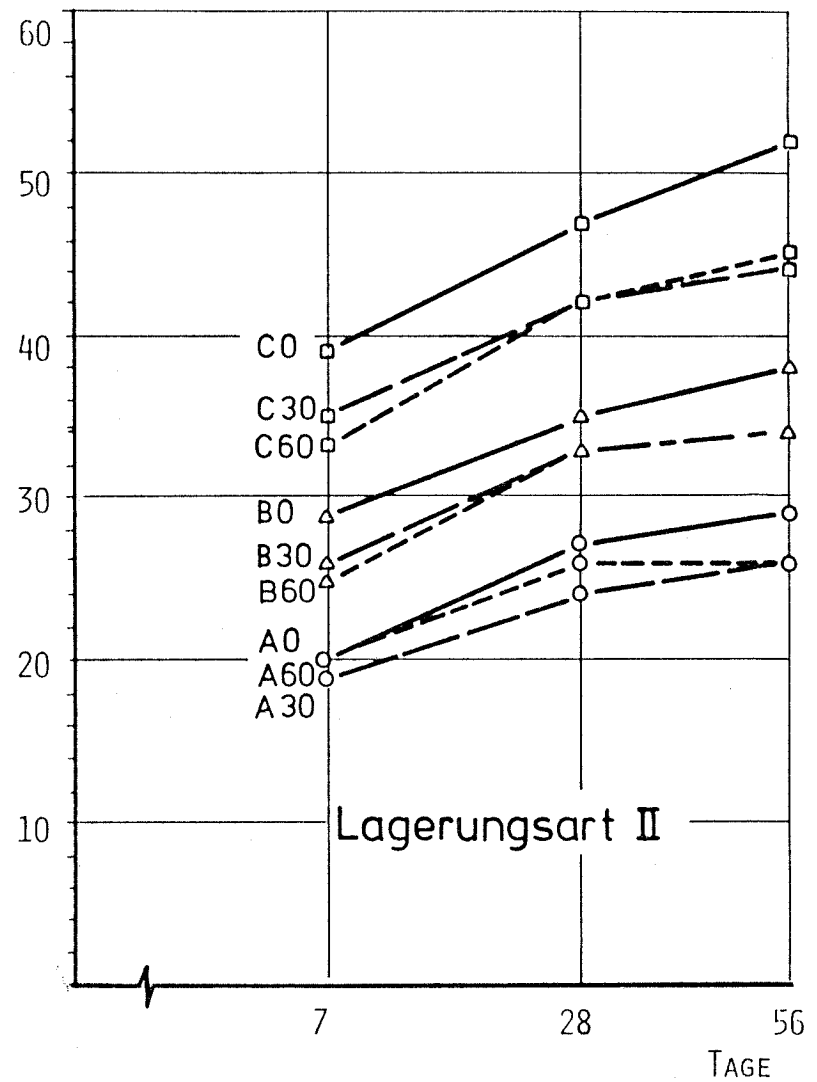
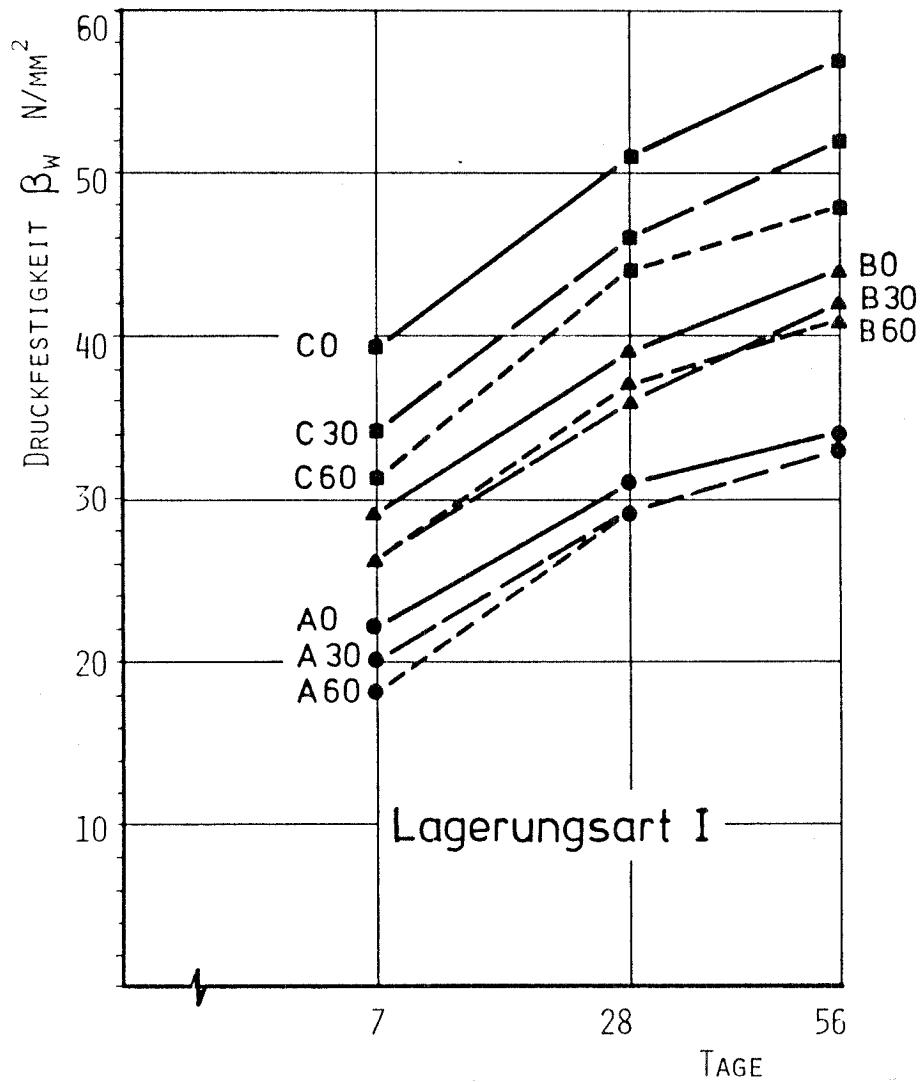


Bild 1. Festigkeitsentwicklung der Betone für die Lagerungsarten I und II (6Tage bzw. 1Tag Feuchtlagerung)

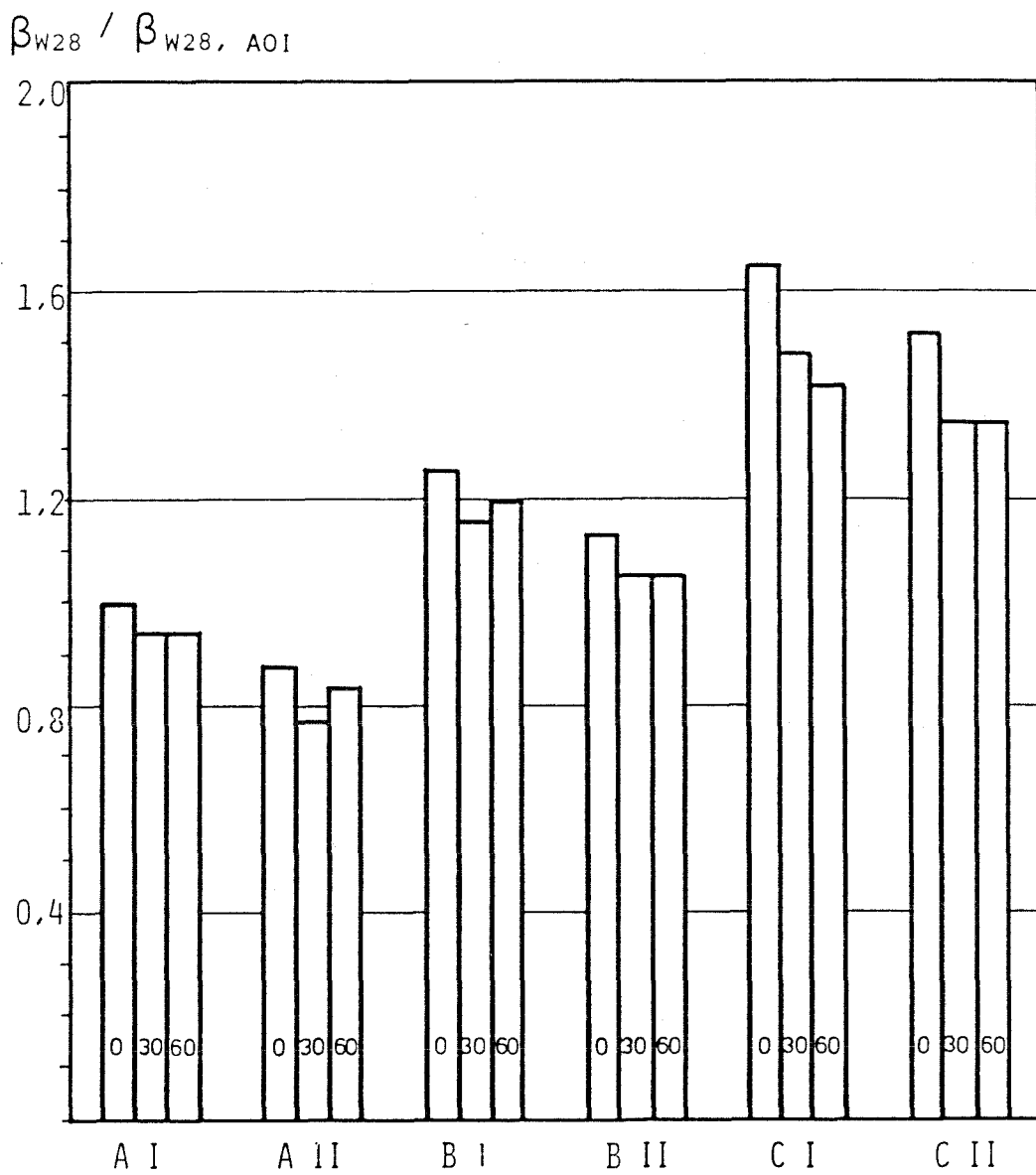


Bild 2. Druckfestigkeiten der Betone im Alter von 28 Tagen, bezogen auf die Druckfestigkeit des Betons A 0 I ($\beta_{W28} = 31 \text{ N/mm}^2$)

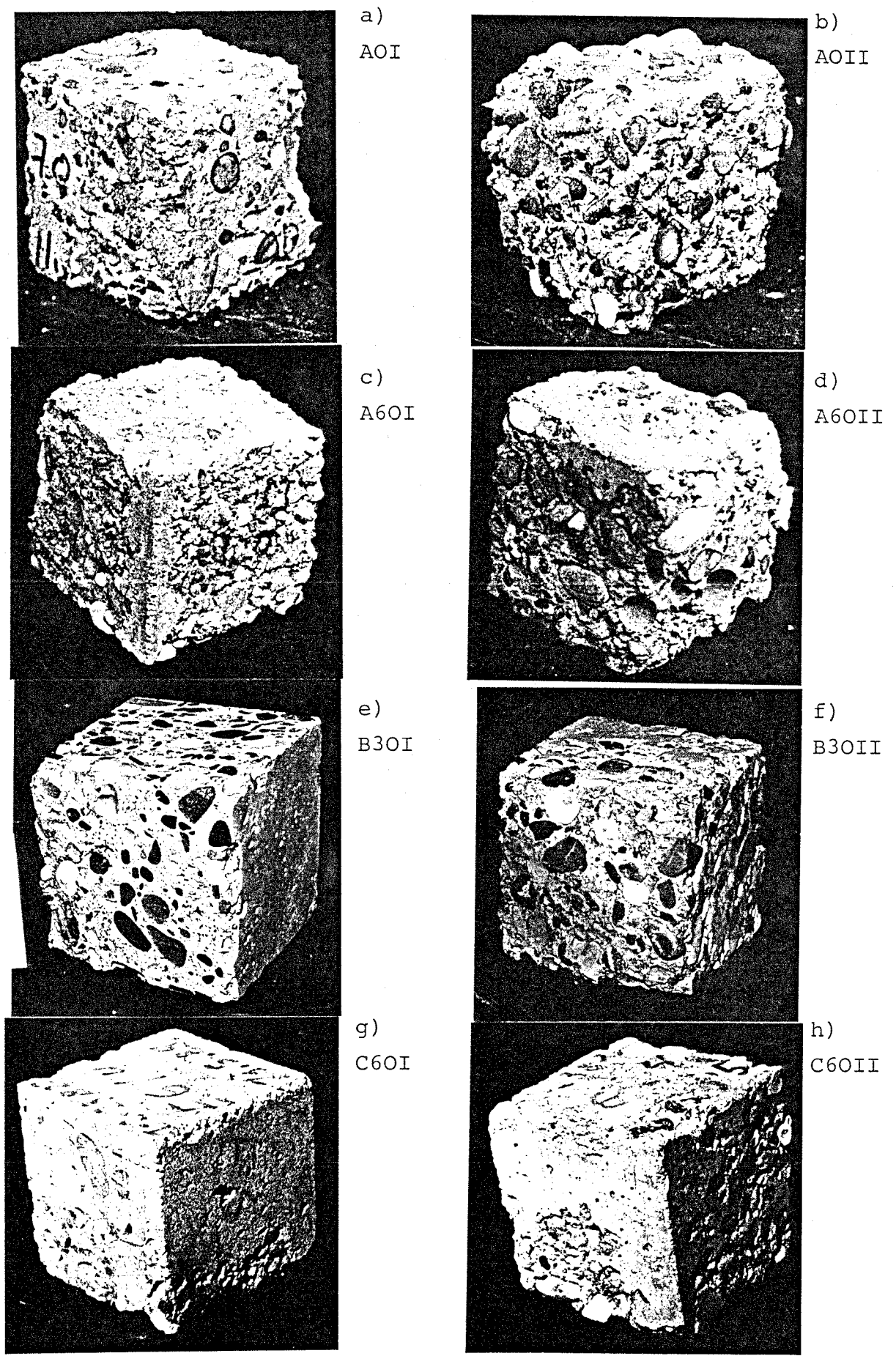
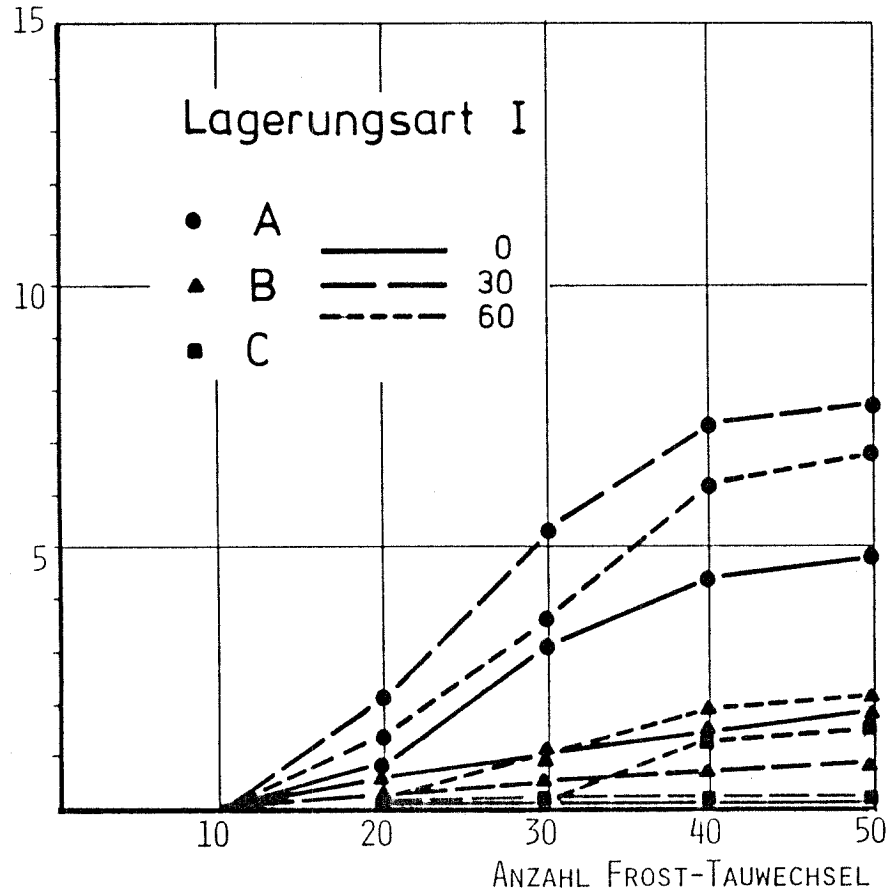


Bild 3 a) bis h). Beispiele für Prüfkörper nach 50 Frost-Tauwechselln

ABSPRENGUNGEN M.-%



ABSPRENGUNGEN M.-%

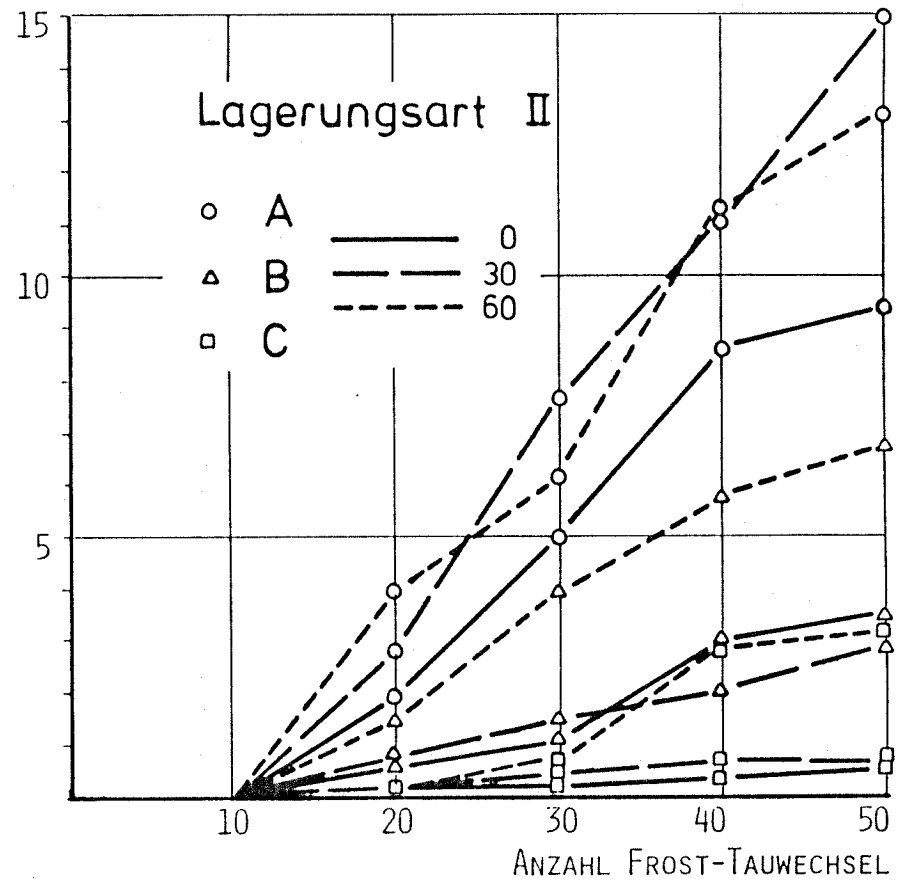


Bild 4. Masseverlust in % im Frost-Tauwechsel-Versuch zwischen 10 und 50 Frost-Tauwechselln

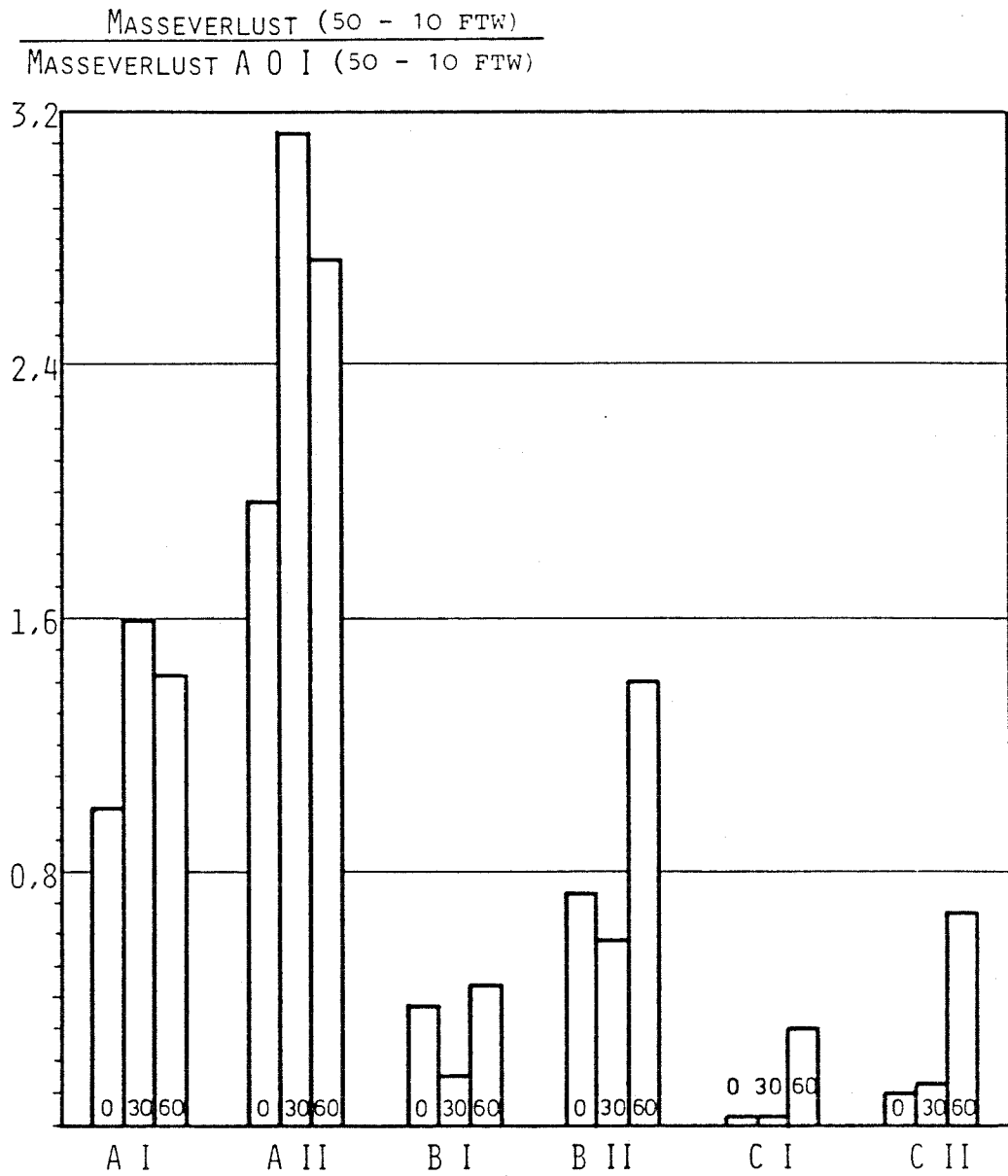


Bild 5. Masseverluste der Betone zwischen 10 und 50 Frost-Tauwechselln, bezogen auf den Masseverlust des Betons A O I (4,8 M.-%)

KARBONATISIERUNGSTIEFEN IN MM

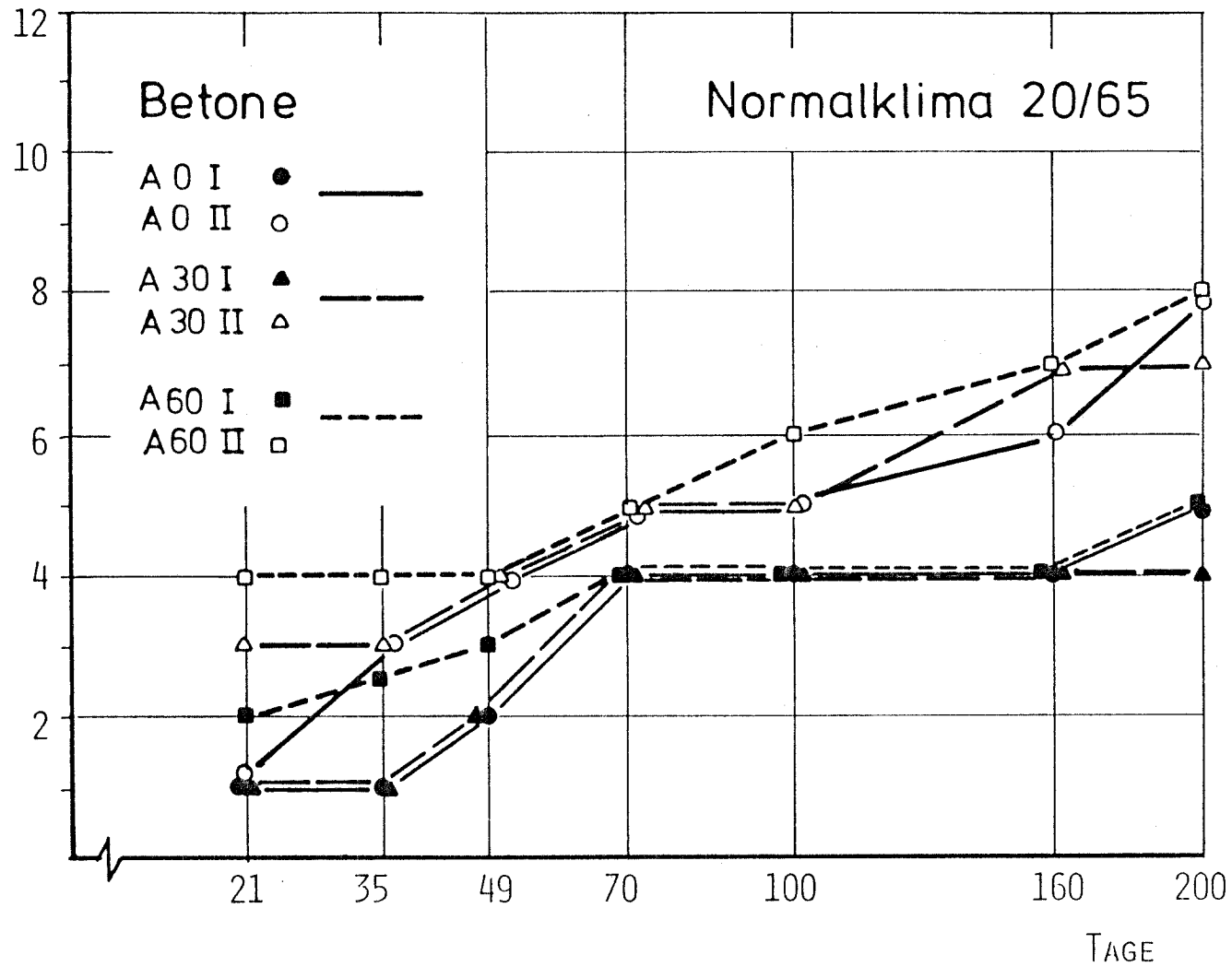


Bild 6. Karbonatisierungstiefen der Betone A bei Lagerung im Normalklima

KARBONATISIERUNGSTIEFEN IN MM

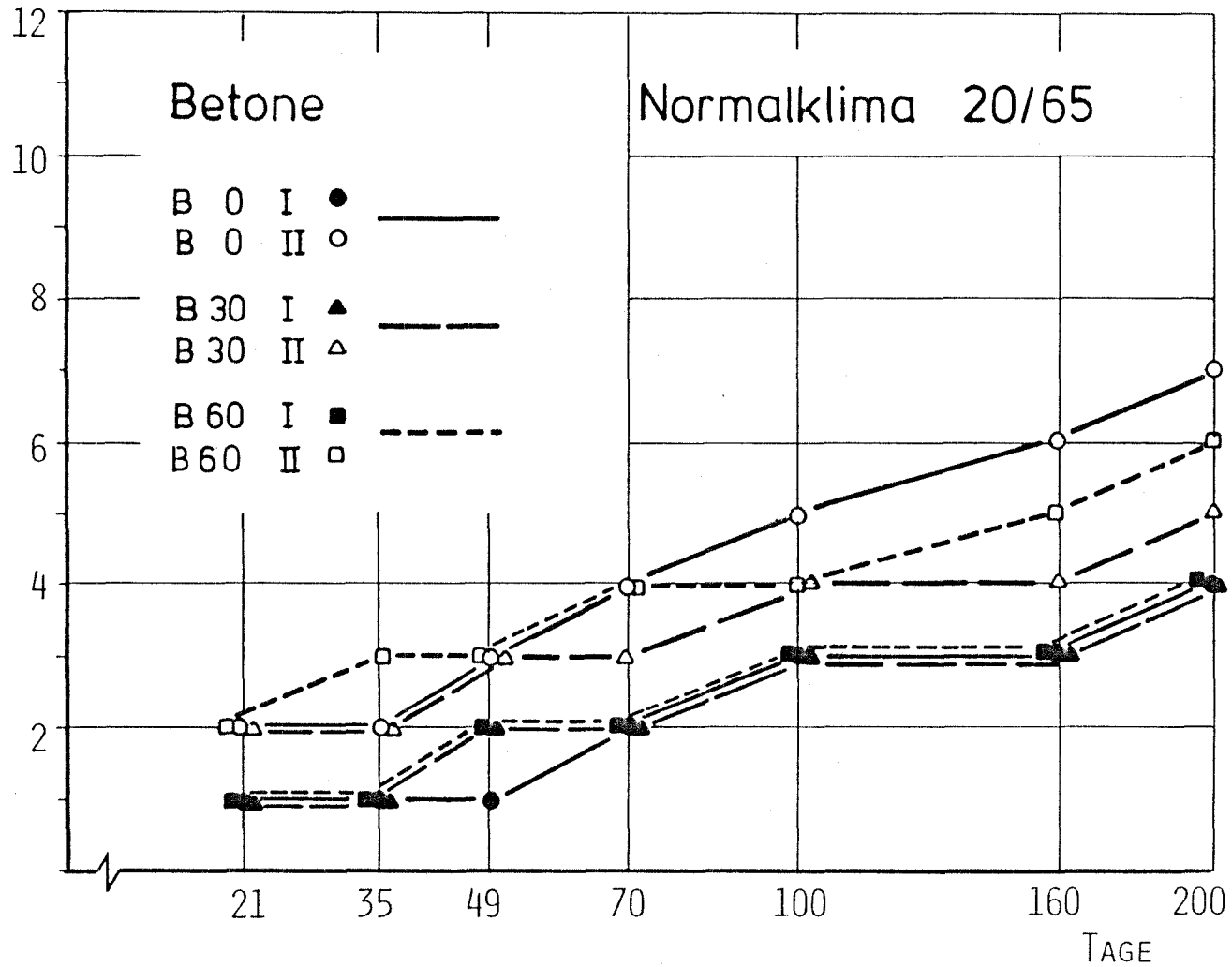


Bild 7. Karbonatisierungstiefen der Betone B bei Lagerung im Normalklima

KARBONATISIERUNGSTIEFEN IN MM

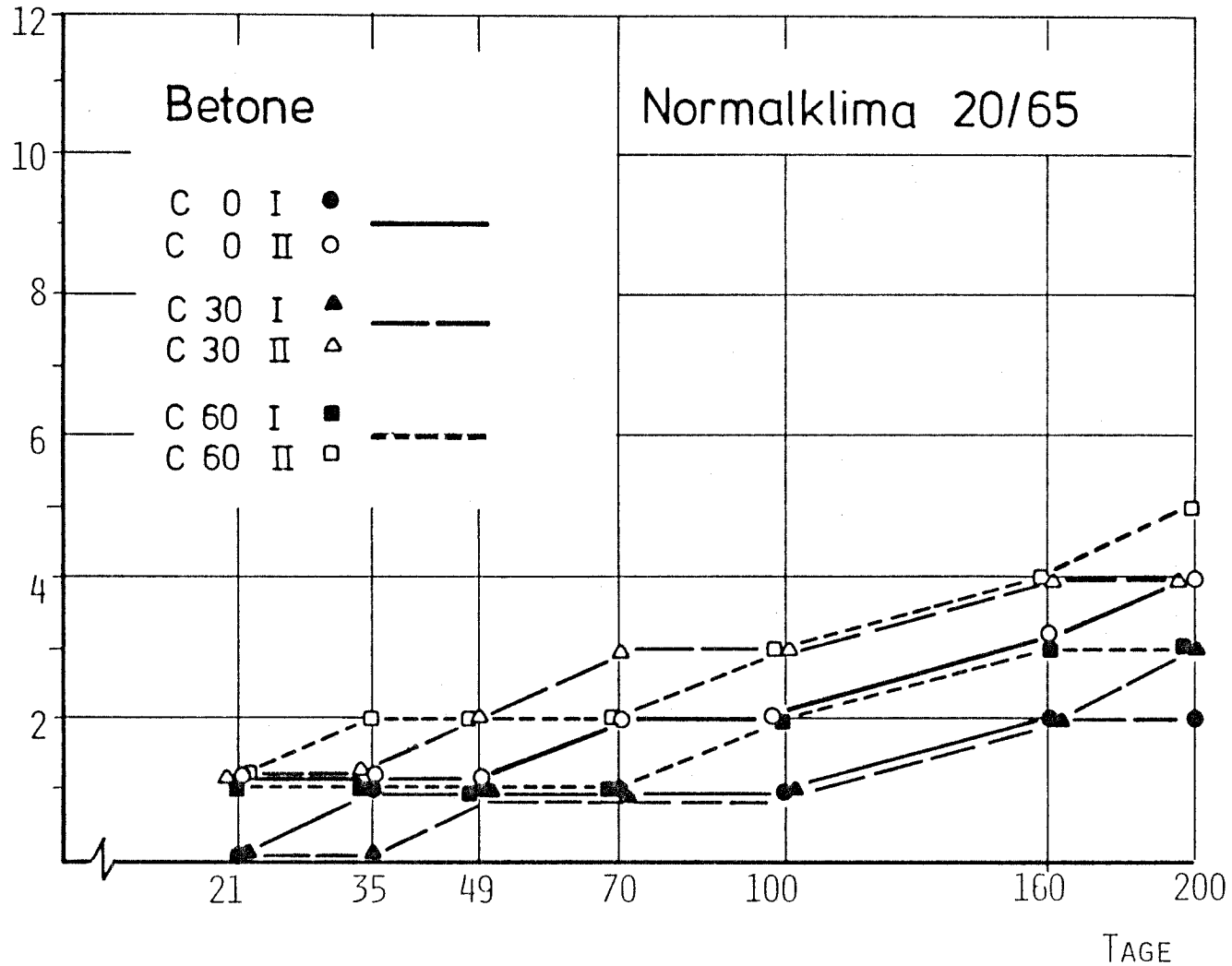


Bild 8. Karbonatisierungstiefen der Betone C bei Lagerung im Normalklima

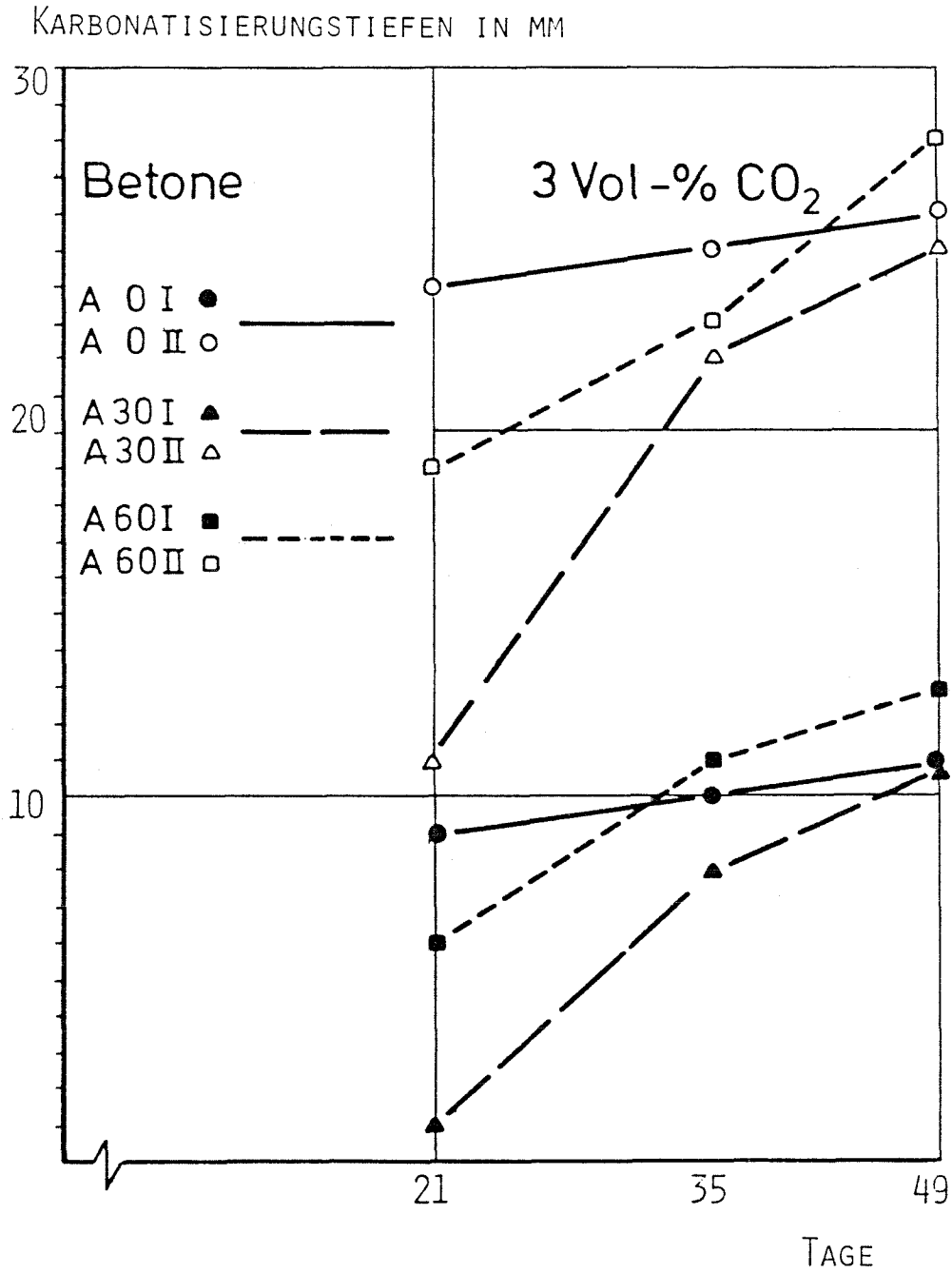


Bild 9. Karbonatisierungstiefen der Betone A bei Lagerung in 3 Vol.-%iger CO₂-Atmosphäre

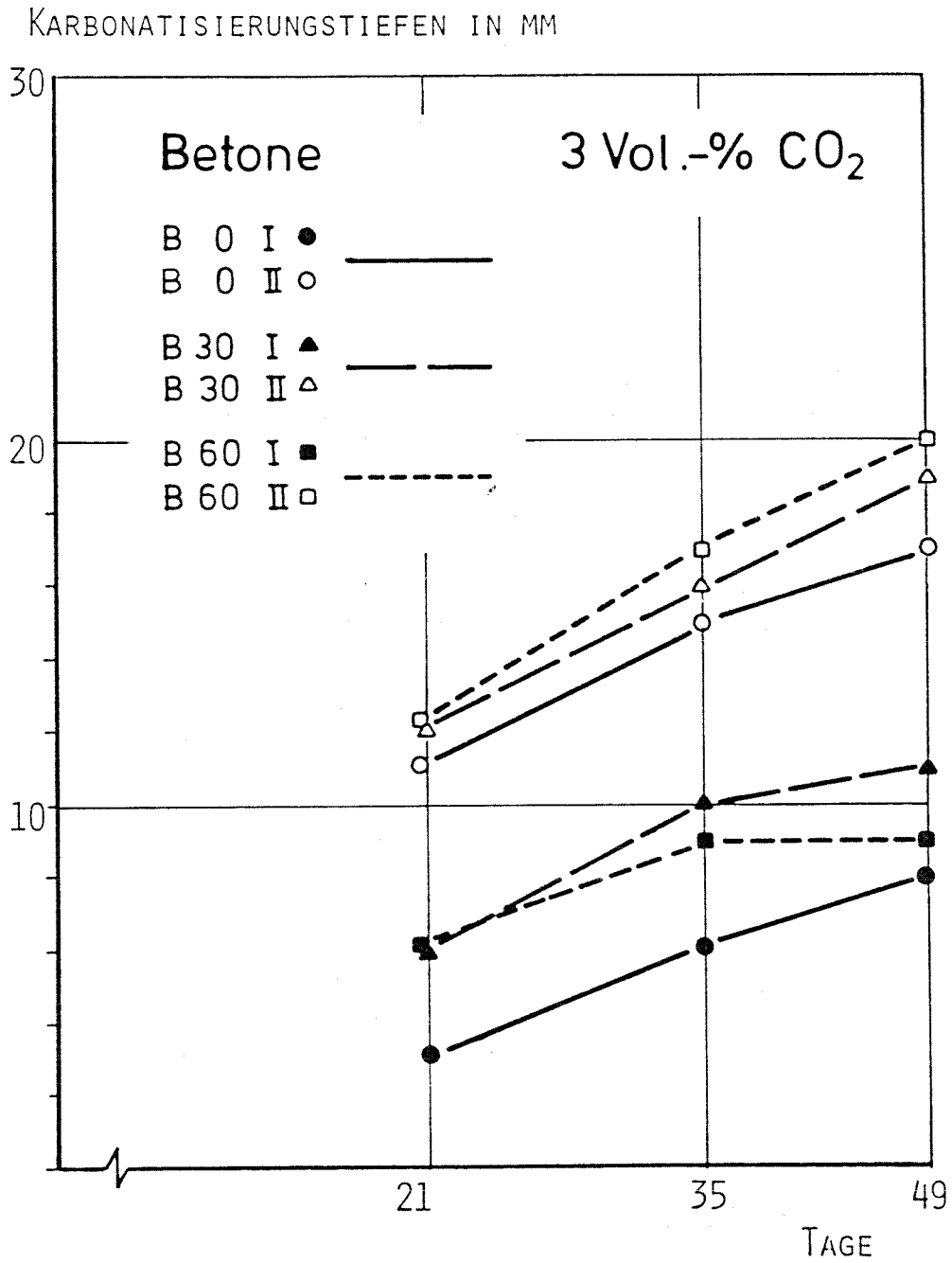


Bild 10. Karbonatisierungstiefen der Betone B bei Lagerung in 3 Vol.-%iger CO₂-Atmosphäre

KARBONATISIERUNGSTIEFEN IN MM

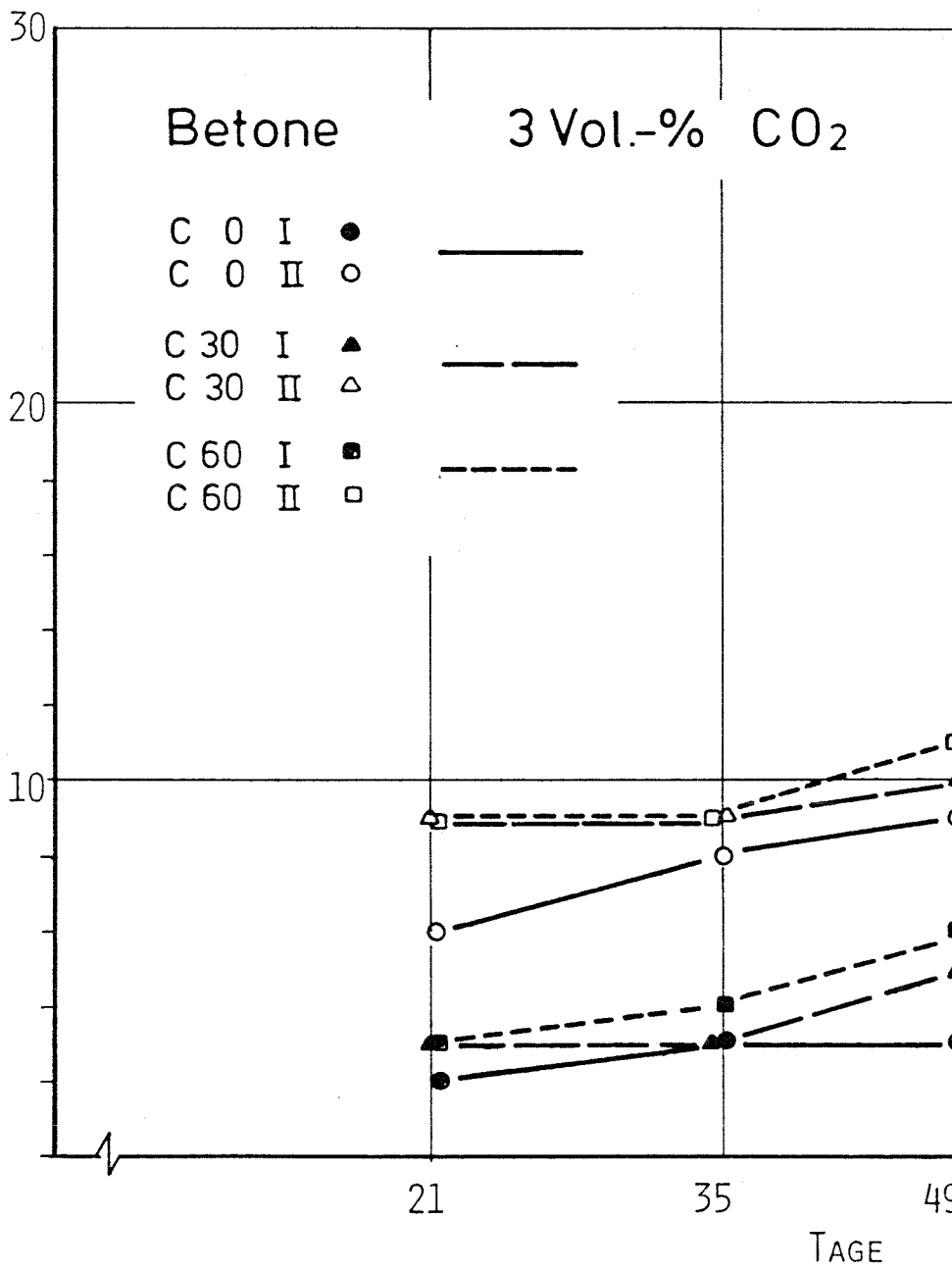


Bild 11. Karbonatisierungstiefen der Betone C bei Lagerung in 3 Vol.-%iger CO₂-Atmosphäre

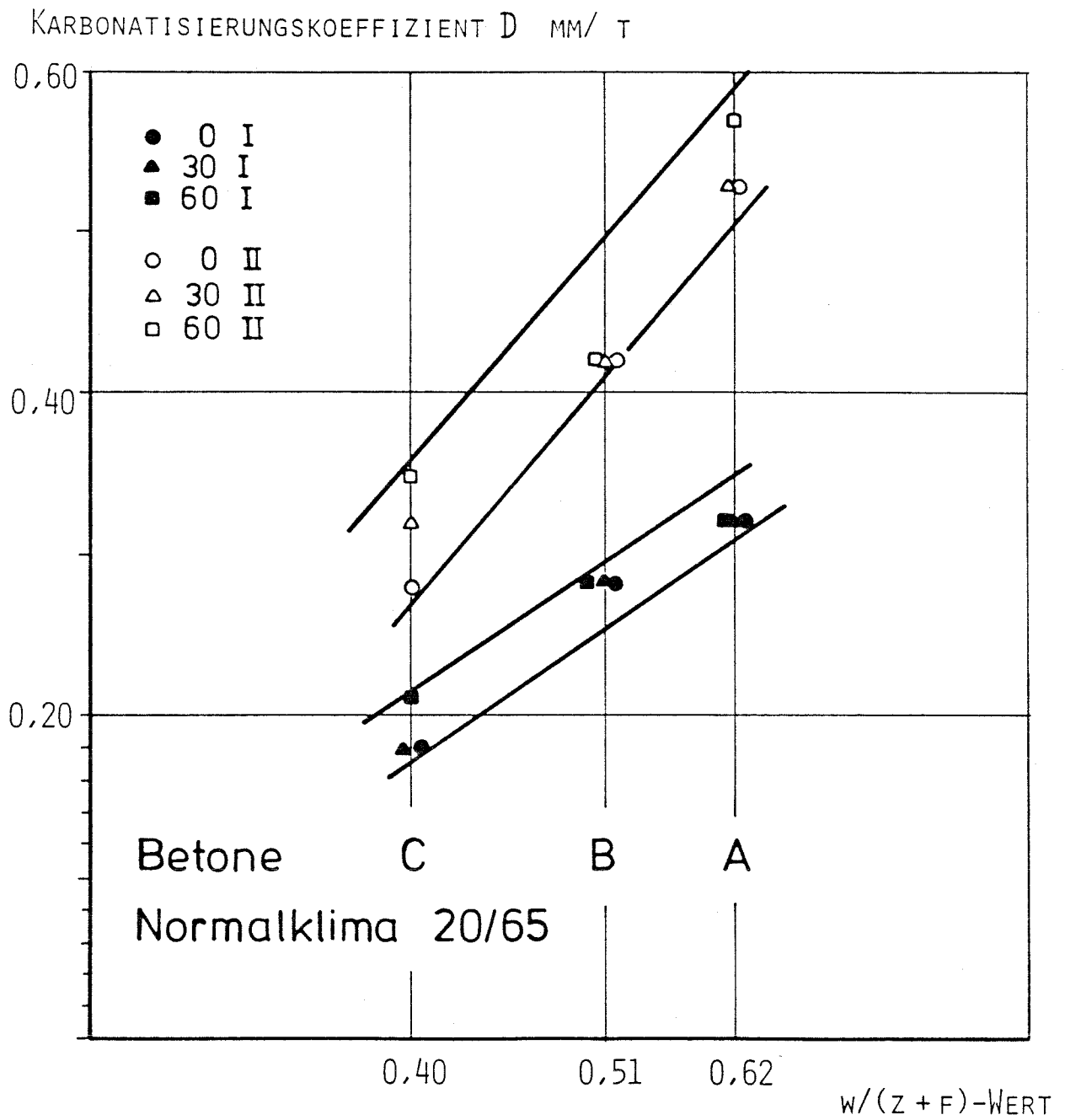


Bild 12. Karbonatisierungskoeffizient D für die Betone im Normalklima (20 °C, 65 % rel. Feuchte)

GEWICHTSÄNDERUNG IN G

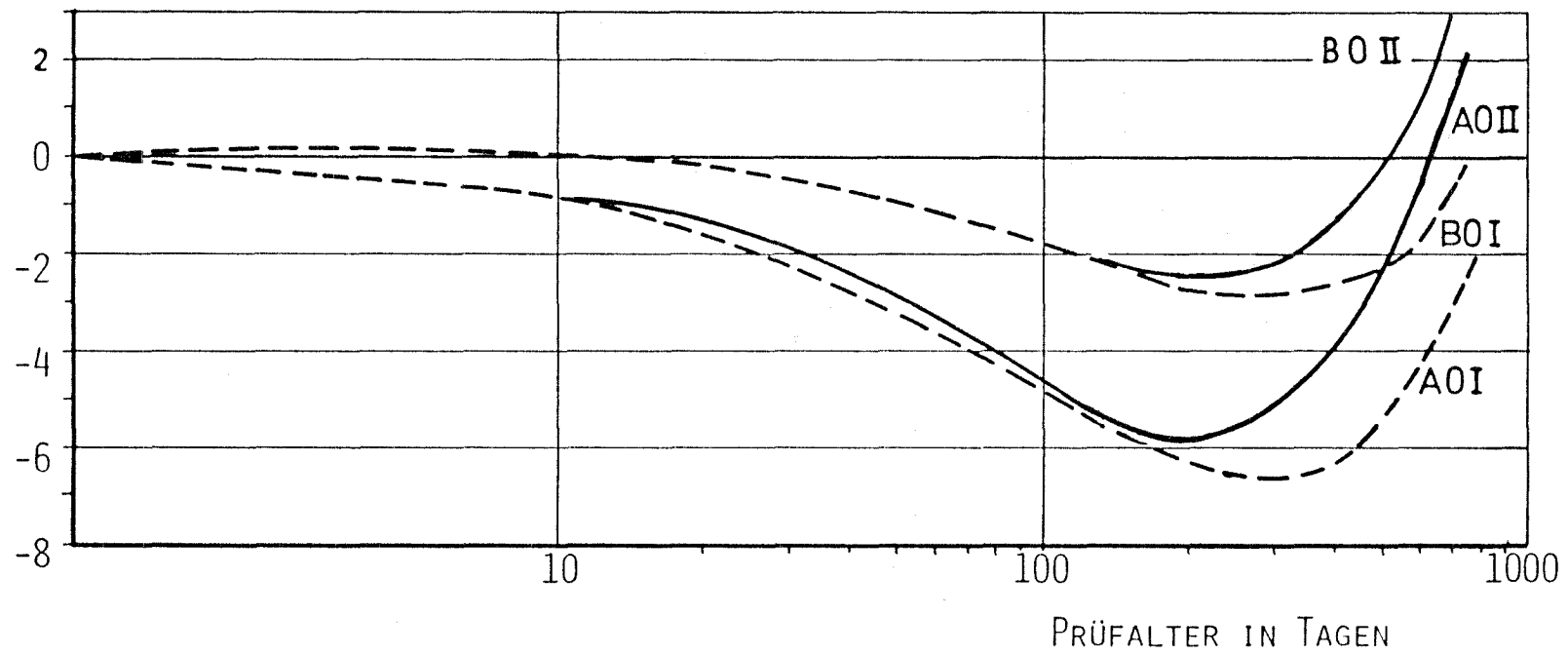


Bild 13. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52 615 Teil 1, Trockenbereichverfahren. Gewichtsänderung der Betone A O und B O in g in Abhängigkeit von der Prüfzeit

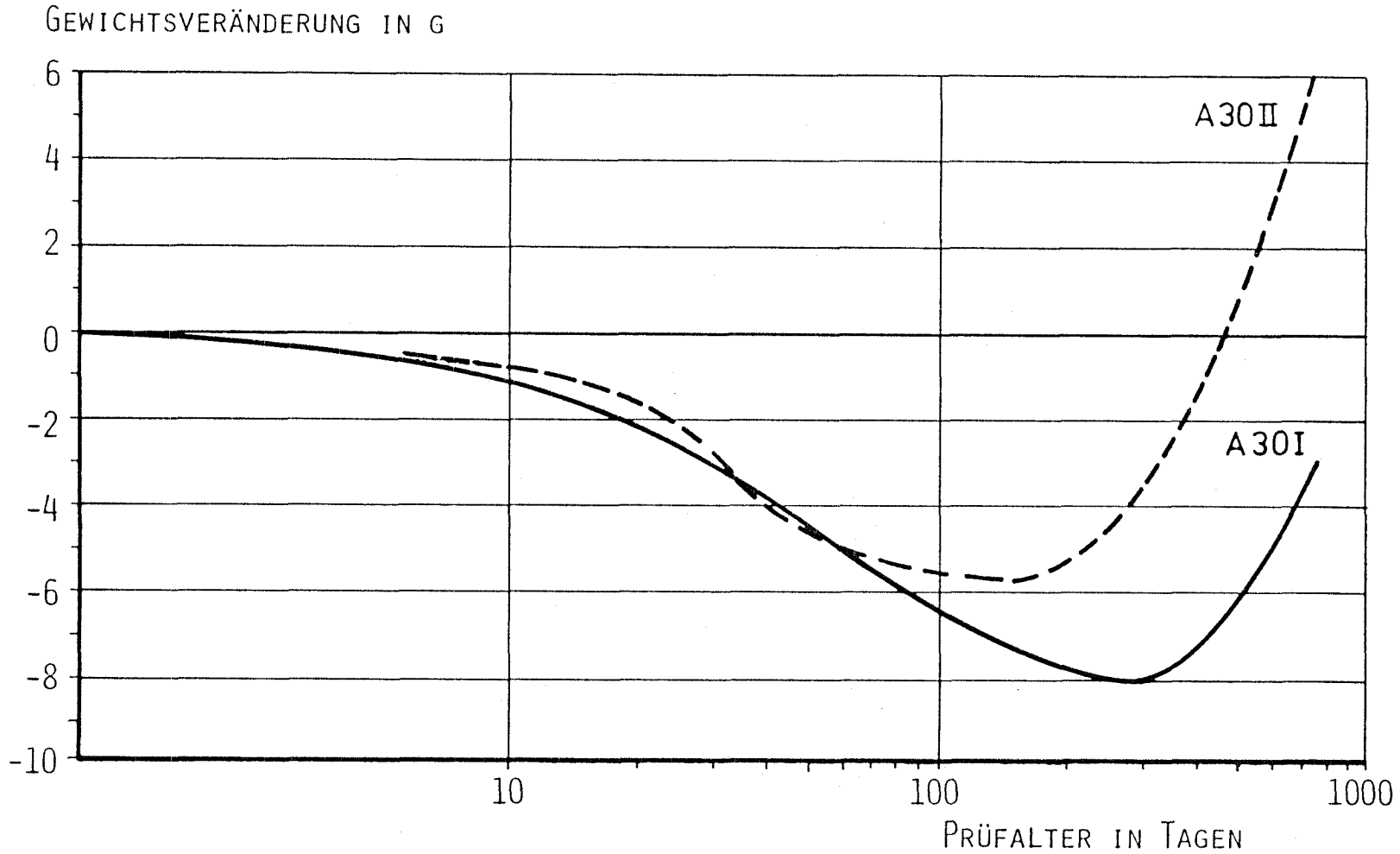


Bild 14. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52 615 Teil 1, Trockenbereichverfahren. Gewichtsänderung der Betone A 30 I und A 30 II in Abhängigkeit von der Prüfzeit

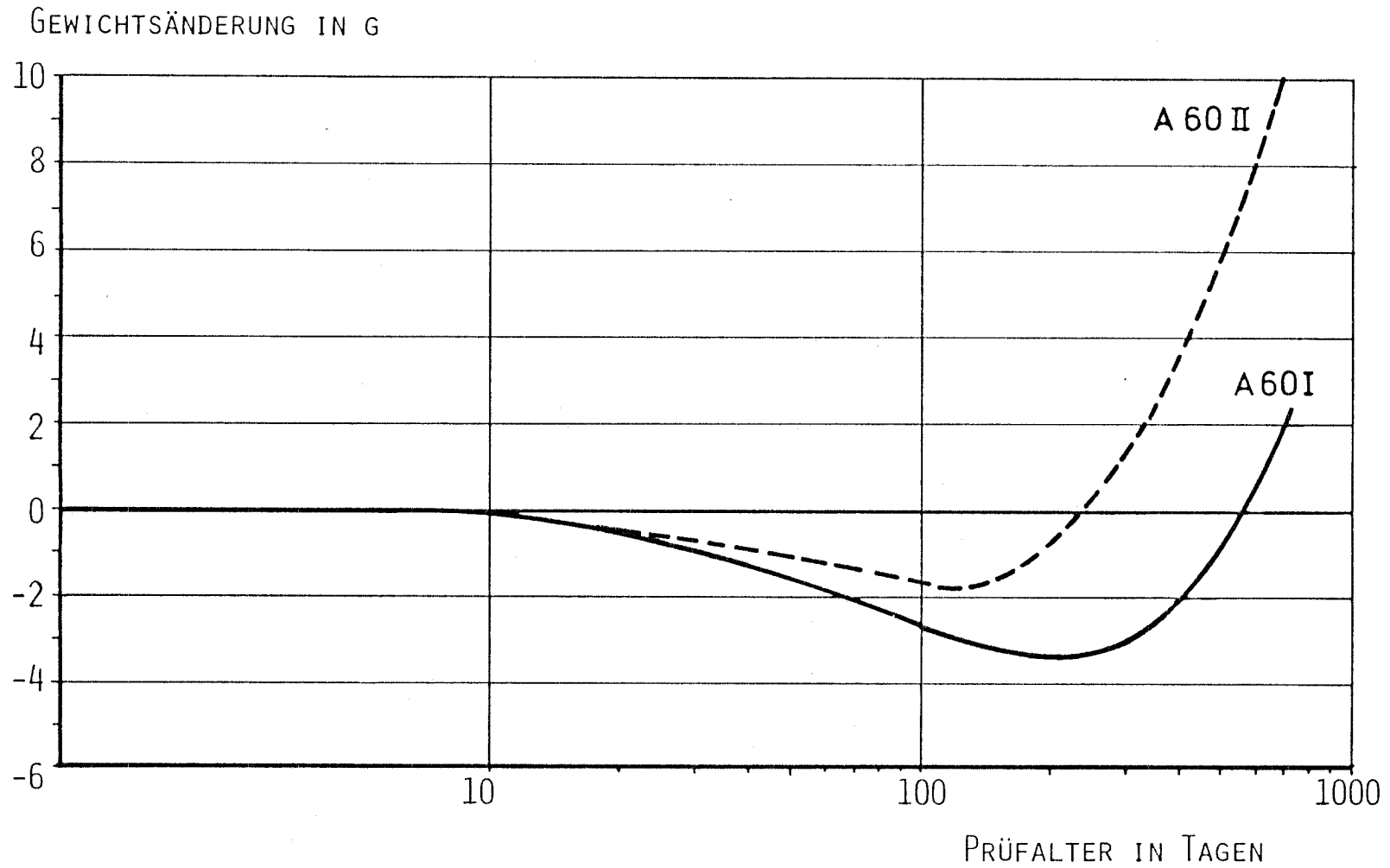
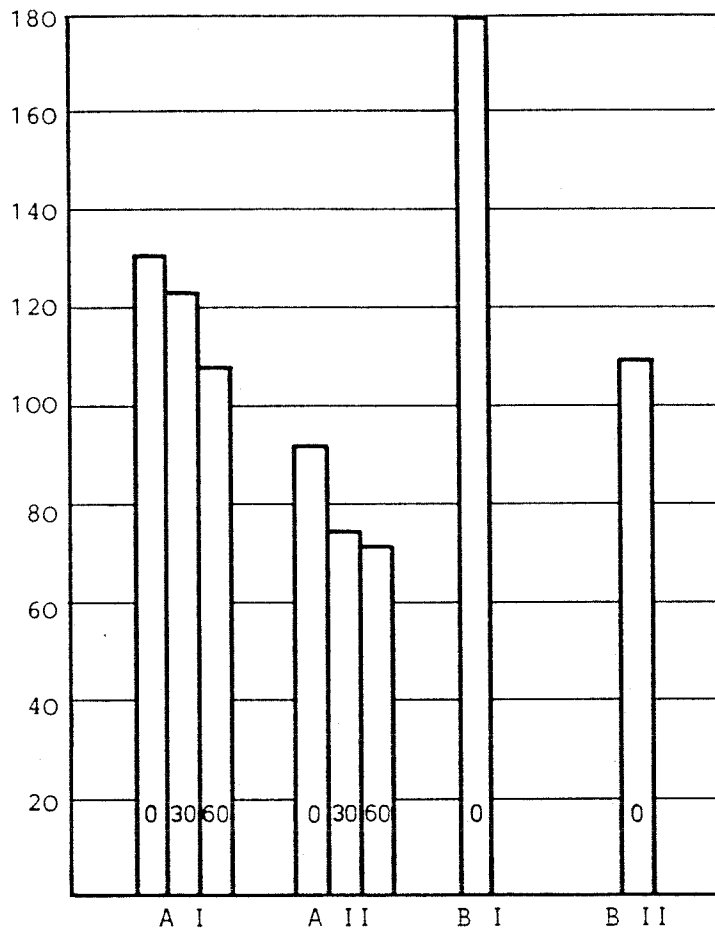


Bild 15. Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52 615 Teil 1, Trockenbereichverfahren. Gewichtsänderung der Betone A 60 I und A 60 II in Abhängigkeit von der Prüfzeit

DIFFUSIONSÄQUIVALENTE LUFTSCHICHTDICKE S_d (M)



DIFFUSIONSWIDERSTANDSZAHL $\mu \times 10^2$

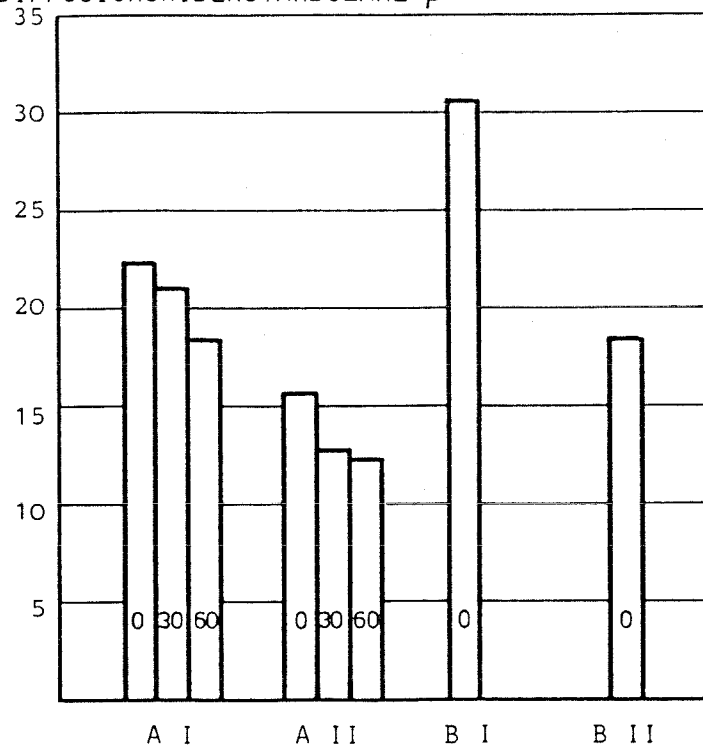
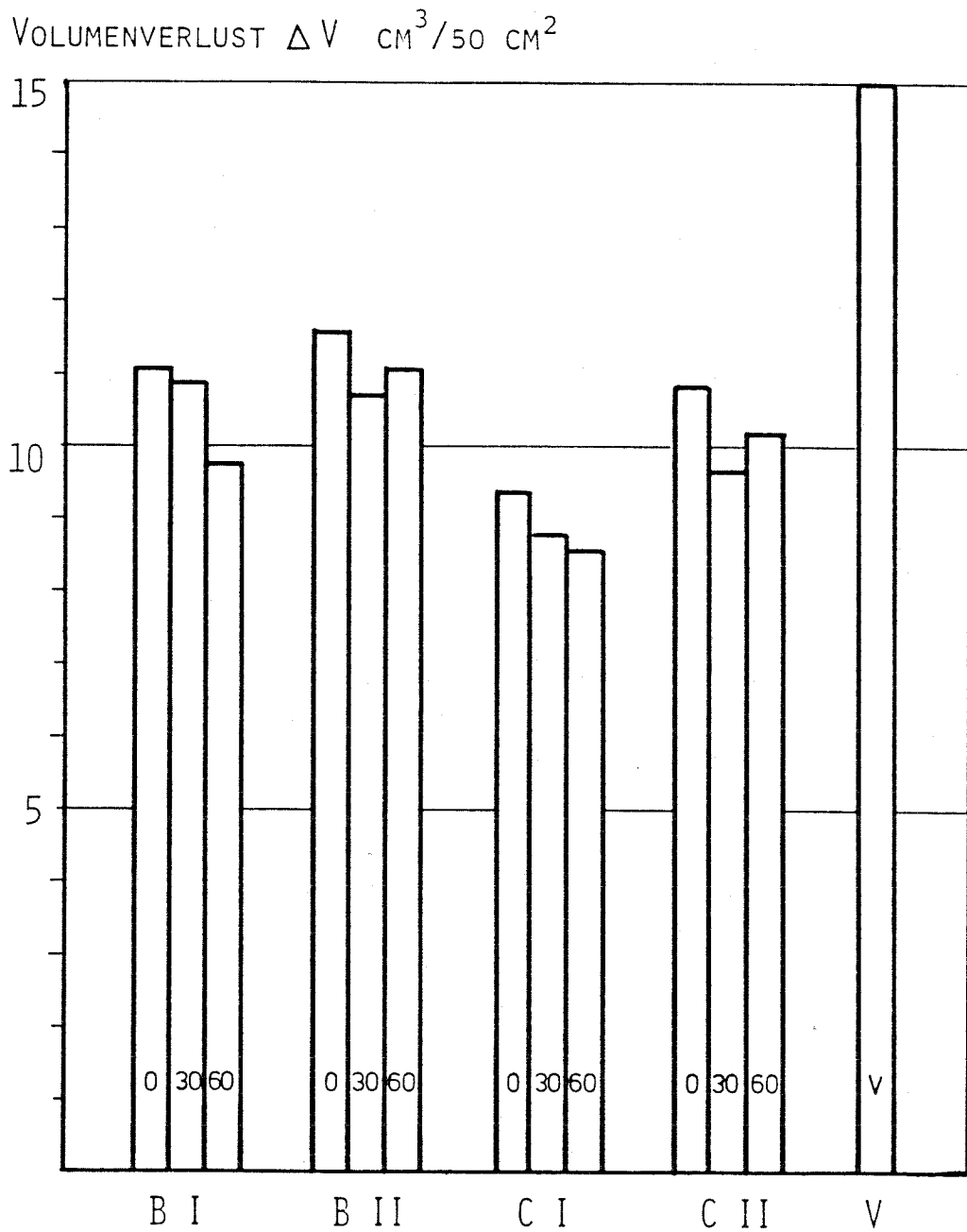


Bild 16. Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN 52 615, Blatt 1, Trockenbereichverfahren



V zum Vergleich zur V nach DIN 485, Gehwegplatten aus Beton

Bild 17. Volumenverluste ΔV bei der Verschleißprüfung nach DIN 52 108

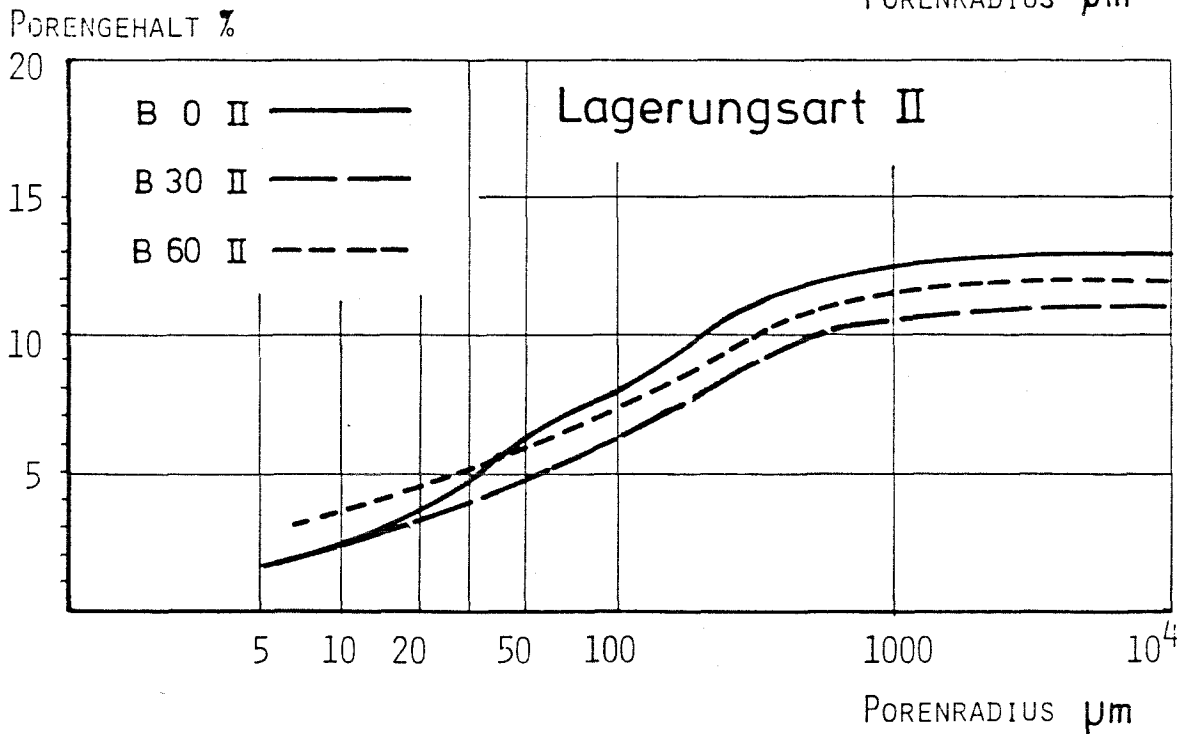
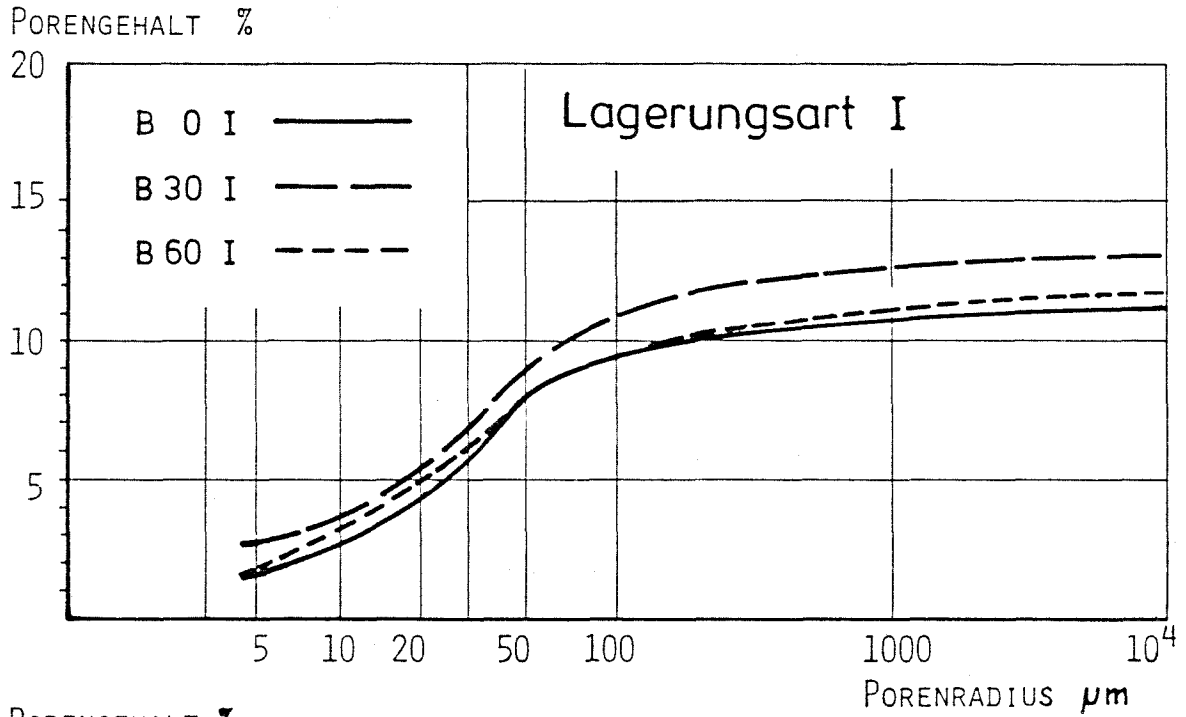


Bild 18. Porengehalt in %, beispielhaft für die Betongruppe B
($w/(z \cdot f) = 0,51$) für die Lagerungsarten I und II

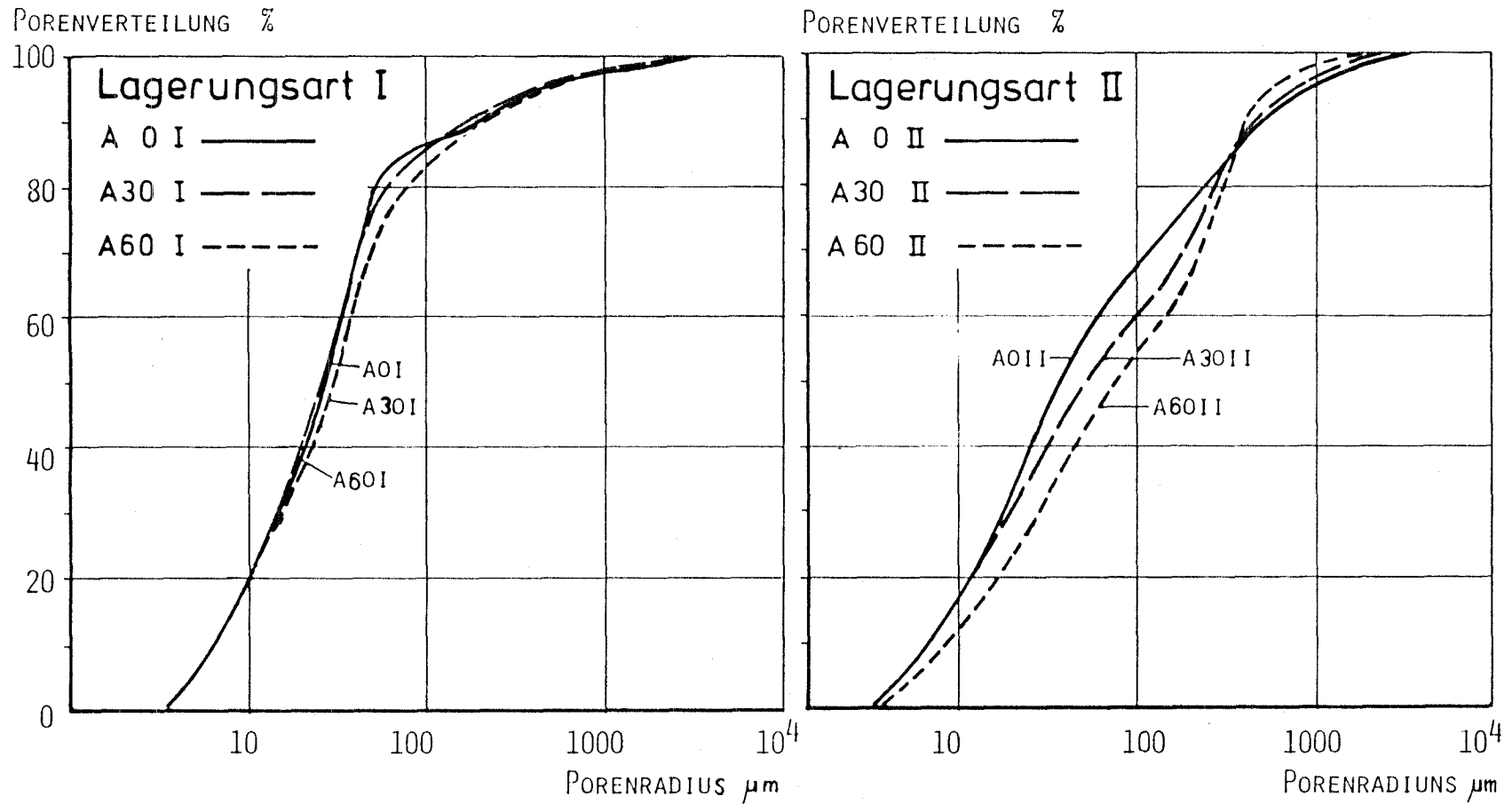


Bild 19. Verteilung der Poren in %, bezogen auf den Gesamtporengehalt, beispielhaft für die Betongruppe A ($w/(z + f) = 0,62$) für die Lagerungsarten I und II