

**Streuung der Ergebnisse von Frost-
und Frost-Tausalz-Prüfverfahren
(Literaturlauswertung)**

T 2994

T 2994

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2002, ISBN 3-8167-6497-5

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 info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT

TUM · Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung
Baumbachstraße 7 · D-81245 München

**Institut für
Baustoffe und
Konstruktion
MPA BAU**

Deutsches Institut für Bautechnik
Postfach 62 02 29

10792 Berlin

Lehrstuhl für Baustoffkunde
und Werkstoffprüfung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

Baumbachstraße 7
D-81245 München
Telefon: 089 / 289-27061
Telefax: 089 / 289-27064

Lehrstuhl@bsi.bv.tum.de
München, den 25.02.02

FORSCHUNGSBERICHT

Nr.: F 2013/99

Thema: **Streuung der Ergebnisse von Frost-
und Frost-Tausalz-Prüfverfahren
(Literaturauswertung)**

Auftraggeber: **Deutsches Institut für Bautechnik**

Projektleitung: **Dipl.-Ing. K.-H. Wiegrink**

Sachbearbeiter: **Dipl.-Ing. Chr. Brandes**

KURZFASSUNG

In dieser Arbeit wurden Frost- und Frost-Tausalz-Versuche, die im Rahmen der Zulassung neuer Zemente und Zementzusatzstoffe durchgeführt worden sind, hinsichtlich deren Streuung ausgewertet.

Es zeigte sich, dass bei den Versuchen zur Bestimmung des Frostwiderstandes Abweichungen innerhalb gleicher Betonrezepturen um bis zu 1000 % vorliegen. Ebenso war eine eindeutige Tendenz des Schädigungsgrades zwischen Institut 1 und 3 erkennbar. Worauf dies zurückzuführen ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch bei der Auswertung der Frost-Tausalz-Versuche. Auch hier war eine deutlich höhere Schädigung bei allen untersuchten Zementen von Institut 1 im Vergleich zu Institut 3 zu beobachten.

In einem vorliegenden Ringversuch [15], geleitet durch den Verein der Deutschen Zementindustrie, lagen dagegen die bei den Zulassungsprüfungen hauptsächlich involvierten Institute 1 und 3 im Mittelfeld und lieferten ähnliche Messergebnisse. Im Rahmen eines weiteren Ringversuches [17] wurde der Einfluss von Schwankungen im Versuchsablauf innerhalb der nach den jeweiligen Prüfvorschriften zugelassenen Grenzen untersucht. Hierbei ergaben sich z.B. durch Temperaturschwankungen Abweichungen von bis zu 30 %.

Daher sind die vorhandenen Abweichungen der Prüfergebnisse, wie sie bei der Untersuchung der Zulassungsversuche bei den vom DIBT vorgeschriebenen Verfahren (Würfelverfahren, Verfahren nach ÖNORM B 3303) nachgewiesen wurden, nicht alleine auf derartige Schwankungen zurückzuführen.

Untersuchungen von Setzer et. al. [10, 11] mit dem CF- bzw. CDF-Verfahrens haben gezeigt, dass es durch einen genau definierten und auf den Schädigungsmechanismus abgestimmten Versuchsablauf möglich ist, den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit geringer Streuung zu bestimmen. Durch gezielte Untersuchungen im Rahmen weiterer Ringversuche sollen eventuelle Unstimmigkeiten und Fehlerquellen des Versuchsablaufes oder Einflüsse der Materialstreuung untersucht und so die etablierten Verfahren zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes verbessert werden.

SUMMARY

In this research the variance of data of freeze-thaw-tests with and without deicing chemicals, carried out within the tests concerning the authorisation of new cements and cement additives, was analysed.

It turned out that there are deviations in the results of the experiments concerning the resistance of frost within equal concrete mixtures up to 1000%. There is an obvious tendency of the damage rate between institute 1 and institute 3 as well. The reason therefore could not clearly be analysed. Analysing the data of the freeze-thaw-tests with de-icing salt led to similar results. Here was also a higher damage of all analysed concrete tested in institute 1 comparing to the test-results in institute 3.

In an available round robin test [15] by the “Verein der deutschen Zementindustrie” these two institutes (1 and 3) led to similar results which were in the middle of all other involved institutes. In an additional round robin test [17] the influence of fluctuations in the experiments were investigated within the permitted limits. Deviations from up to 30% were caused by the variations of temperature.

Therefor the existing variances in the test results which were found within the examinations concerning the obtained licensure tests of the DIBT could not only be led back to deviations of that kind.

Studies by Setzer et. Al [10,11] showed on the basis of the CIF or rather the CDF-methods that it is possible to determine the freeze and freeze-thaw-resistance of different concrete mixtures with low variances with an exactly defined test procedure.

With other exactly defined test procedures in further round robin tests the variances should be examined for the reasons for the variances as well as the influence of the deviation of the test material. So the established freeze-thaw-tests with and without de-icing chemicals should be improved.

VERSION ABRÉGÉE

Dans cet oeuvre des essais de gel ainsi que des essais de gel et de sel de déverglaçage, qui ont été faits lors de l'agrégation de nouveaux ciments et d'adjuvants de ciment, ont été exploités en ce qui concerne leur répannage.

Lors des essais afin de déterminer la résistivité de gel il s'est avéré qu'il y a des divergences pouvant atteindre 1000 % dans les mêmes formules de mélange du béton. En outre on a assisté à une tendance du degré de détérioration entre institut 1 et 3. L'origine de ce fait n'a pas pu être clairement définie. L'exploitation des essais de gel et de sel de déverglaçage ont fourni des résultats semblables. Ainsi on pouvait constater dans toutes les qualités de ciment testées une détérioration nettement plus élevée chez l'institut 1 que chez l'institut 3.

Dans un essai coopératif en l'occurrence [15], mené par la fédération de l'industrie allemande du ciment, par contre, les instituts principaux, à savoir l'institut 1 et l'institut 3 figuraient au panneau du milieu et ont fourni des résultats expérimentaux semblables lors des examens d'agrégation.

Dans le cadre d'un essai coopératif ultérieur [17], on a examiné l'influence de variations au cours de l'essai, tout en respectant les limites imposées par les instructions d'essai dans chaque cas. Il en résultaient par exemple dû à des variations de température des divergences maximales pouvant atteindre 30 %.

C'est la raison pour laquelle les divergences visibles des résultats, comme elles se produisent lors de l'examen des essais d'agrégation dans le procédé prescrit par le DIBT (procédé de cubes, procédé selon la norme ÖNORM B3303), ne sont pas seulement dûes à des variations pareilles.

Les essais de Setzer et. al. [10, 11] en appliquant la méthode CF plus précisément la méthode de CDF ont révélé qu'un processus clairement défini dans ces étapes et tenant compte du mécanisme de détérioration permet de définir la résistivité de gel ainsi que la résistivité de sel de déverglaçage de qualités de béton différentes ayant un répannage faible.

Des examens plus ciblés dans le cadre d'essais coopératifs ultérieurs devraient examiner d'éventuelles divergences, des sources d'erreurs dans le déroulement du processus ainsi que des influences du répannage du matériau, et améliorer ainsi les méthodes établies de définition de la résistivité de gel et de sel de déverglaçage.

1	EINLEITUNG.....	7
2	GRUNDLAGEN DER STATISTIK.....	9
2.1	Streuungen.....	9
2.2	Mittelwert.....	9
2.3	Varianz und Standardabweichung.....	10
2.4	Variationskoeffizient.....	10
2.5	Bedeutung für die Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes.....	11
3	VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES FROST- UND FROST-TAUSALZ-WIDERSTANDES.....	13
3.1	Allgemeines.....	13
3.2	Würfelverfahren (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand).....	13
3.3	ÖNORM B 3303 (Frostwiderstand).....	14
3.4	ÖNORM B 3303 (Frost-Tausalz-Widerstand).....	15
3.5	Slab-Test (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand).....	16
3.6	CIF- bzw. CDF-Verfahren (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes).....	17
3.7	Zusammenfassung Frost- und Frost-Tausalzversuche.....	18
4	EINFLÜSSE AUF DIE STREUUNG VON FROST- UND FROST-TAUSALZ-PRÜFUNGEN.....	21
4.1	Allgemeines.....	21
4.2	Einfluss aus Änderung der Minimaltemperatur.....	21
4.2.1	Allgemeines.....	21
4.2.2	Ergebnisse Plattenversuch (ÖNORM B 3303).....	22
4.2.3	Ergebnisse SLAB-Test.....	22
4.2.4	Ergebnisse CDF-Verfahren.....	24
4.2.5	Zusammenfassung Einfluss Minimaltemperatur.....	25
4.3	Einfluss aus der Zusammensetzung des Prüfmediums.....	25

5	ZULASSUNGSVERSUCHE.....	29
5.1	Zulassungsbestimmungen.....	29
5.1.1	Zulassung von anorganischen Bindemitteln.....	29
5.1.2	Zulassung von Flugaschezementen und Portlandkalksteinzement.....	30
5.2	Auswertung der Zulassungsversuche	31
5.2.1	Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren	31
5.2.2	Frost-Tausalz-Widerstand (Verfahren nach ÖNORM B 3303)	43
6	RINGVERSUCHE	56
6.1	Allgemeines	56
6.2	Ringversuch Hannover	56
6.2.1	Allgemeines	56
6.2.2	Ergebnisse Frost-Tauversuche.....	58
6.3	VDZ-Ringversuch I (1992)	60
6.3.1	Allgemeines	60
6.3.2	Ergebnisse Frost-Versuche	61
6.3.3	Ergebnisse Frost-Tausalz-Versuche	63
6.3.4	Zusammenfassung	65
6.4	VDZ-Ringversuch II (1998).....	67
6.4.1	Allgemeines	67
6.4.2	Ergebnisse Frost-Versuche	69
6.4.3	Ergebnisse Frost-Tausalz-Versuche	77
6.4.4	Zusammenfassung	83
7	ZUSAMMENFASSUNG	86

1 EINLEITUNG

Um den Widerstand eines Baustoffes hinsichtlich der Dauerhaftigkeit auf die entsprechende Einwirkung abstimmen zu können, findet in den aktuellen Normen das deskriptive Bemessungskonzept weite Verbreitung. Hierbei wird durch die Festlegung verschiedener Parameter (z.B. Beton, w/z-Wert, Zementgehalt, etc.) der Widerstand des Baustoffes der jeweiligen Einwirkung angepasst. Neuerdings wird aber auch bei der Dauerhaftigkeit vermehrt der Weg des Performance-Konzeptes gegangen, das auch bei Angriffen auf die Dauerhaftigkeit (z.B. Carbonatisierung, Frost, etc.) den Nachweis einer genügend hohen Sicherheit gegenüber dem Versagen fordert, wie es z.B. bei statischen Einwirkungen üblich ist. Bei der Anwendung dieses Konzeptes wird einerseits eine größere Kenntnis der Mechanismen bei Dauerhaftigkeitsproblemen gefordert, andererseits entfällt die starre Betrachtung von teilweise willkürlichen Grenzwerten und eine direkte Reaktion auf die verschiedenen Schadensmechanismen wird möglich.

Eines der häufigsten Probleme bei der Dauerhaftigkeit von Beton ist der Frost- bzw. der Frost-Tausalzangriff. In der Vergangenheit ist durch die Verringerung des w/z-Wertes und der damit verbundenen Minimierung des Kapillarporenraumes sowie durch die Einführung von Mikroluftporen als Expansionsraum die Beständigkeit gegenüber Frost- und Frost-Tausalzangriff stark erhöht worden.

In Deutschland und den europäischen Nachbarländern sind unterschiedliche Prüfverfahren zur direkten Beurteilung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton und Beton-erzeugnissen etabliert. Zu den meist verwendeten Prüfverfahren gehören das VDZ-Würfelverfahren [2], das CIF- bzw. CDF-Verfahren [8], das Boras-Verfahren [7] und die Verfahren nach ÖNORM [5]. Bei all diesen Verfahren werden die Betone unterschiedlich stark befrosten und die entstehenden Schädigungen auf verschiedene Weise gemessen und bewertet.

V.a. bei der Erprobung von Betonzusammensetzungen oder neuer Betonausgangsstoffe (z.B. im Zuge von Zulassungsprüfungen) ist eine genaue Beurteilung der zu erwartenden Dauerhaftigkeit wichtig. Unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren muss der Beton praxisrelevant als beständig oder evtl. als nicht beständig gegen Frost- bzw. Frost-Tausalzangriff eingeordnet werden können. Die unterschiedlichen Prüfverfahren sowie die auch aus den Streuungen heraus resultierenden Bewertungsunterschiede erschweren eine eindeutige Beurteilung und führen teilweise sogar zu widersprüchlichen Ergebnissen.

In dieser Arbeit sollen deshalb die wichtigsten Verfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. des Frost-Tausalz-Widerstandes untersucht und vorhandene Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Streuung und eindeutige Einordnung miteinander verglichen werden.

Als Grundlage sollten der Ringversuch des VDZ von 1992, die Zulassungsversuche, veranlasst durch das DIBT sowie die im Rahmen des RILEM TC 117 durchgeführten Ringversuche ausgewertet werden. Darüber hinaus wurden der Ringversuch des VDZ von 1998, sowie Versuche, die von J. Plähn im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen an vier Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton durchgeführt wurden, in diese Arbeit mit einbezogen.

2 GRUNDLAGEN DER STATISTIK

2.1 Streuungen

Für eine objektive Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes müssen die einzelnen Streuungen getrennt betrachtet werden.

Unter der Wiederholstreuung wird die Abweichung der Versuchsergebnisse unter möglichst konstanten Randbedingungen (gleiches Material, gleicher Laborant und Prüfmaschine, kurzer zeitlicher Abstand) verstanden. Bei der Wiederholstreuung wird somit in der Regel die geringste Abweichung erreicht. In der Wiederholstreuung sind aber immer noch die Streuungen innerhalb der jeweiligen Ausgangsmaterialien und die der Prüfung selbst enthalten. Eine getrennte Berechnung dieser Streuungen ist nicht möglich. Nur unter der Annahme, dass die Materialstreuung sehr gering ist, kann auf die Prüfstreuung zurückgeschlossen werden.

Unter der Streuung der Labore wird die Streuung der Ergebnisse mit gleichem Ausgangsmaterial, aber unterschiedlichen Bearbeitern und Prüfgeräten verstanden.

Als Vergleichsstreuung wird die Abweichung der Versuchsergebnisse mit unterschiedlichen Randbedingungen (Probekörper, Laboranten, Geräte etc.) bezeichnet. Die Vergleichsstreuung beinhaltet die Wiederholstreuung und die Streuung zwischen den Laboren und ist somit in der Regel die größte Streuung.

2.2 Mittelwert

Als Mittelwert ist das arithmetische Mittel aller Stichprobenwerte definiert [1].

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Gleichung 1

mit: \bar{x} : Mittelwert
n: Stichprobenumfang
 x_i : Stichprobenwert i

2.3 Varianz und Standardabweichung

Als ein Maß der Abweichung innerhalb einer Stichprobe gilt die Varianz s^2 . Die Varianz ist die mittlere quadratische Abweichung vom Mittelwert \bar{x} .

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Gleichung 2}$$

mit: s^2 Varianz
 \bar{x} : Mittelwert
n: Stichprobenumfang
 x_i : Stichprobenwert i

Die Wiederholvarianz wird mit s_r^2 , die Varianz zwischen den Laboren mit s_L^2 bezeichnet. Die Vergleichsvarianz s_R^2 errechnet sich nach [19] aus den beiden oben genannten Varianzen wie folgt:

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad \text{Gleichung 3}$$

mit: s_R^2 Vergleichsvarianz
 s_L^2 Varianz zwischen den Labors
 s_r^2 Wiederholvarianz

2.4 Variationskoeffizient

Etwas anschaulicher als Maß für die Abweichung ist die Standardabweichung s , die als die positive Quadratwurzel aus der Varianz definiert ist. Die Standardabweichung ist im Gegensatz zur Varianz einheitreu zu den Einzelwerten der Datenreihe.

Zur Herstellung der Vergleichbarkeit bezieht man die Standardabweichung, die noch ein absolutes Streuungsmaß ist, auf das arithmetische Mittel und erhält damit als relatives Streuungsmaß den Variationskoeffizienten v :

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \quad \text{Gleichung 4}$$

mit: v : Variationskoeffizient
 s : Standardabweichung
 \bar{x} : Mittelwert

Bei der Auswertung der Daten der Zulassungsversuche wird wegen fehlender Eingangsdaten die Darstellung der Streuung auf eine Darstellung der Variationskoeffizienten beschränkt.

Diese berechnen sich, soweit nichts anderes angegeben ist, aus der jeweiligen Grundgesamtheit der Eingangsdaten. So liegen der Berechnung der Variationskoeffizienten aller durchgeführten Frostversuche alle Abwitterungen zugrunde, bei der Berechnung der Streuung zwischen den beteiligten Laboren wird der Variationskoeffizient aus dem Mittel der Abwitterungen der verschiedenen Labore berechnet. Eine Aufteilung der Streuungen im Sinne der DIN ISO 5725 [19] (z.B. Gleichung 3) ist nur durch einen darauf ausgelegten Prüfplan, wie er normalerweise im Rahmen von Ringversuchen aufgestellt wird, möglich.

2.5 Bedeutung für die Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes

Im Unterschied zu Prüfverfahren, wie der Bestimmung der Druckfestigkeit o.ä., wird der Beton bei der Frost- und Frost-Tausalz-Prüfung meist in „beständig“ oder „nicht beständig“ eingeteilt. Für die Güte von Prüfverfahren dieser Art ist die zuverlässige Bestimmung der Prüfgröße v.a. in der Nähe des Zulassungskriteriums entscheidend, hier sollte die Streuung (Versuchs- und Vergleichsstreuung) möglichst klein sein.

Um auf die Streuung in der Nähe des Zulassungskriteriums rückschließen zu können, kann bei der Durchführung von Ringversuchen nach DIN ISO 5725 [19] der Variationskoeffizient einer Potenzfunktion (vgl. Gleichung 5) angenähert und an der Stelle $x = \text{Grenzwert}$ berechnet werden.

$$v(x) = a \cdot x^b \quad \text{Gleichung 5}$$

mit: v: Variationskoeffizient
a: Variable
x: zu untersuchende Prüfgröße (hier: Abwitterung)
b: Variable

Plähn [14] leitet, ausgehend von dem Verhältnis zweier Prüfergebnisse x_a und x_b mit den Variationskoeffizienten v_a und v_b , den Zusammenhang zwischen der Streuung des Prüfverfahrens und der Wahrscheinlichkeit der richtigen Unterscheidung zweier unterschiedlicher Proben her. Er geht bei seiner Berechnung von der Annahme aus, dass jeweils die Variationskoeffizienten und der Prüfumfang der beiden zu vergleichenden Prüfungen ähnlich sind. Allgemein lässt sich bei der Forderung einer bestimmten Wahrscheinlichkeit für die richtige Unterscheidung zweier Proben (z.B. 95 %) das minimale Verhältnis der Mittelwerte der beiden Prüfungen wie folgt berechnen:

$$\frac{\bar{x}_a}{\bar{x}_b} > \frac{1 + t_b \cdot \frac{v_b}{\sqrt{n_b}}}{1 - t_a \cdot \frac{v_a}{\sqrt{n_a}}}$$

Gleichung 6

- mit: \bar{x}_i : Mittelwert der Prüfsreihe i
 n_i : Stichprobenumfang der Prüfsreihe i
 v_i : Variationskoeffizient der Prüfsreihe i
 t_i : Konstante der t-Verteilung der Prüfsreihe i (in Abh. der Vertrauenswahrscheinlichkeit und des Stichprobenumfanges n_i) z.B. Kreyszig [1]

Unter der Annahme $v_a = v_b$ und einem Prüfumfang von 5 Messwerten je Prüfung erhält man für die verschiedenen Vertrauenswahrscheinlichkeiten die in Abbildung 1 dargestellte Abhängigkeit.

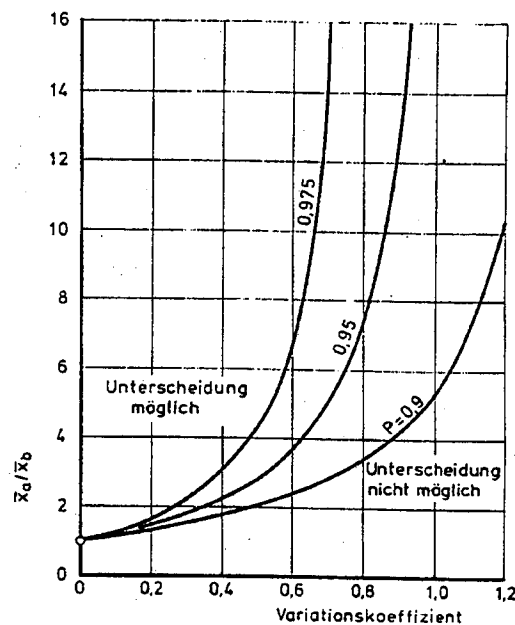


Abbildung 1: Für signifikant unterscheidbare Prüfsreihen erforderliches Verhältnis \bar{x}_a/\bar{x}_b der Stichprobenmittel in Abhängigkeit der Variationskoeffizienten bei einem Stichprobenumfang von $n = 5$ nach [14]

So müssen sich bei einem Variationskoeffizienten von beispielsweise 40 % für eine eindeutige Unterscheidung zweier Prüfsreihen (Signifikanzniveau: 95 %) die Mittel der Prüfwerte mindestens um den Faktor 2,1 unterscheiden. Aus Abbildung 1 wird außerdem deutlich, dass dieser Zusammenhang überproportional steigt, sobald die Streuung der Einzelversuche zunimmt.

3 VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES FROST- UND FROST-TAUSALZ-WIDERSTANDES

3.1 Allgemeines

Grundsätzlich muss zwischen einer indirekten und einer direkten Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes unterschieden werden. Bei den indirekten Verfahren wird durch Eigenschaften des Betons (z.B. Mikroluftporengehalt, Abstandsfaktor oder Betonzusammensetzung) auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand geschlossen. Bei den direkten Verfahren wird der Verlust der Eigenschaften des Betons während der Befrostung gemessen. Üblicherweise gelten hierfür die abgewitterte trockene Masse als Kriterium für die äußere Schädigung bzw. die Veränderung des (dynamischen) E-Moduls als ein Kriterium für die innere Schädigung.

Im Folgenden sollen kurz die in dieser Arbeit betrachteten Verfahren und die für die Fragestellung der Streuung relevanten Eigenschaften der verschiedenen Versuchsdurchführungen beschrieben werden. Genauere Beschreibungen der einzelnen Verfahren sind in den jeweiligen Normen und Vorschriften zu finden [4, 6, 8, 9].

Bei den meisten Verfahren lässt sich durch eine geringe Modifikation der Durchführung und des Versuchsaufbaus sowohl der Frost-, als auch der Frost-Tausalz-Widerstand von Beton bestimmen. In diesen Fällen wird deshalb bei der Beschreibung der Verfahren auf eine Unterteilung in Verfahren zur Bestimmung des Frost- und des Frost-Tausalz-Widerstandes verzichtet.

3.2 Würfelverfahren (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand)

Bei der Frostprüfung nach den Empfehlungen von Bunke [2] werden zwei Betonwürfel (Kantenlänge = 100 mm) nach DIN 1048 hergestellt. Nach einer eintägigen Lagerung in der Schalung bei 20 °C/ 98 % r.F. werden die Würfel ausgeschalt und verbleiben bis zum Alter von 7 Tagen in der Wasserlagerung (20 °C), anschließend werden sie für 20 Tage im Klima 20 °C/ 65 % r.F. gelagert.

Im Alter von 27 Tagen wird die Masse bestimmt und die Rohdichte berechnet. Danach werden zwei Würfel in einen mit der Prüfflüssigkeit (i.d.R. Wasser oder Tausalzlösung) gefüllten Edelstahlbehälter gestellt, 24 h vorgesättigt und nochmals gewogen. Der Probenbehälter mit den beiden Würfeln wird in einer Frostkammer in Luft bis -15 °C

abgekühlt und in 20 °C warmem Wasser aufgetaut. Als Referenzpunkt für die Einhaltung der Temperatur dient die Würfelmitte, der Temperaturverlauf ist in Abbildung 2 dargestellt.

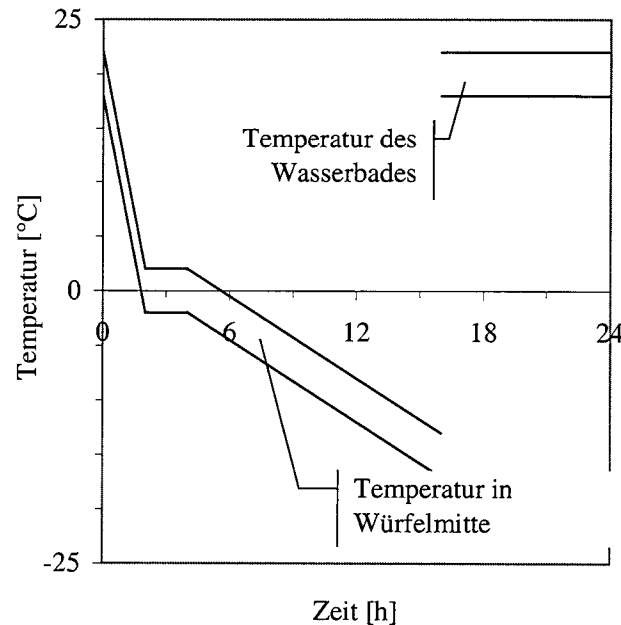


Abbildung 2: Temperaturbereich während eines FTW (Würfelverfahren)

Nach 10, 25, 50, 75 und 100 Wechseln wird das Wasser in den Behältern getauscht und die Abwitterungen nach Abbürsten von der geschädigten Betonoberfläche bestimmt. Als Kriterium gelten die Abwitterungen bzw. eine augenscheinliche Begutachtung der Oberfläche.

Nach Siebel [3] sind für einen frostbeständigen Beton Abwitterungen von 5 M.-% nach 50 FTW und 10 M.-% nach 100 FTW erlaubt (Prüfmedium: Leitungswasser). Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes sind Abwitterungen von maximal 3 M.-% nach 50 FTW und 5 M.-% nach 100 FTW zugelassen (Prüfmedium 3 %-ige NaCl-Lösung).

3.3 ÖNORM B 3303 (Frostwiderstand)

Bei der Frostprüfung nach ÖNORM B 3303 werden Prismen (120 x 120 x 360 mm³ oder 150 x 150 x 600 mm³) hergestellt und 56 Tage unter Wasser gelagert. Ab diesem Alter werden die Probekörper, sofern nichts anderes vorgeschrieben ist, 50 mal einem Frosttauwechsel unterzogen.

Die Probekörper werden in Luft abgekühlt und unter Wasser aufgetaut. Tabelle 1 enthält die nach ÖNORM B 3303 geforderten Temperaturen, gemessen in Prismenmitte, während eines Frost-Tau-Zyklus. Der gesamte Zyklus dauert 24 h.

Tabelle 1: nach ÖNORM B 3303 [4] geforderter Temperaturverlauf während eines Frost-Tau-Zyklus in Probenmitte

Zyklus	Zeit	Höchsttemperatur	Minimaltemperatur
[-]	[h]	[°C]	[°C]
1	2	3	4
Frost	5	- 10	k. A.
	8 .. 16	- 18	- 22
Tau	19	+ 22	+ 18
	19 .. 24	+ 22	+ 15

Die Beurteilung des Frostwiderstandes erfolgt aufgrund der Änderung des statischen oder des dynamischen E-Moduls. Dazu wird an jedem Probekörper vor Beginn der Frostprüfung und dann in regelmäßigen Abständen der statische oder der dynamische E-Modul ermittelt.

Der untersuchte Beton gilt nach ÖNORM B 4200 Teil 10 [5] als beständig gegenüber Frost, wenn der Abfall des statischen E-Moduls nicht mehr als 25 %, bzw. der des dynamischen E-Moduls nicht mehr als 15 % beträgt.

3.4 ÖNORM B 3303 (Frost-Tausalz-Widerstand)

Bei der Frost-Tausalz-Prüfung nach ÖNORM B 3303 [4] wird an der abgezogenen Oberseite von Betonplatten (20 x 20 x 5 cm³) der Frostwiderstand ermittelt. Die Probekörper werden 14 Tage unter Wasser und 14 Tage an Raumluft gelagert.

Acht Stunden vor der Prüfung wird auf den Rand der Probekörper eine 15 mm hohe Randeinfassung geklebt und auf die Oberfläche ca. 4 – 5 mm das Prüfmedium (i.d.R. 3 %-ige NaCl-Lösung) aufgebracht.

Die Probekörper werden an Luft abgekühlt und aufgetaut, als Referenzpunkt dient die Betonoberfläche. Tabelle 2 enthält die nach ÖNORM B 3303 geforderten Temperaturen, gemessen in der Probekörperoberfläche, während eines Frost-Tau-Zyklus. Der gesamte Zyklus dauert 24 h.

Tabelle 2: nach ÖNORM B 3303 [4] geforderter Temperaturverlauf während eines Frost-Tau-Zyklus auf der Probekörperoberfläche

Zyklus	Zeit	Höchsttemperatur	Minimaltemperatur
[-]	[h]	[°C]	[°C]
1	2	3	4
Frost	4 .. 7	- 18	- 22
Tau	21	k. A.	+ 15

Die Temperatur der Betonoberfläche muss 4 bis 7 Stunden nach Beginn der Frostlagerung - 18 °C erreichen oder unterschreiten, die Temperatur der Luftkühlung muss ab diesem Zeitpunkt zwischen - 20 °C und - 22 °C liegen. Der Frostzyklus dauert 16 Stunden. 2 bis 5 Stunden nach Beginn der Taulagerung muss die Betonoberfläche mindestens 15 °C aufweisen. Der gesamte Frost-Tau-Zyklus dauert 24 h.

Die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes erfolgt über die Bestimmung der von der geschädigten Betonoberfläche abgebürsteten Abwitterung und über eine augenscheinliche Begutachtung. Nach ÖNORM B 4200 Teil 10 [5] ist der untersuchte Beton frost-tausalz-beständig, wenn vom 25. bis zum 50. FTW die Abwitterungen maximal 10 g/m² je fünf FTW betragen und an der Prüffläche nach Augenschein keine Abwitterungen über einem Millimeter Tiefe auftreten.

3.5 Slab-Test (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand)

Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem SLAB-Test [6] werden Würfel (150 x 150 x 150 mm³) hergestellt und 1 Tag in Schalung, 6 Tage unter Wasser, 21 Tage im Klima 20/65) gelagert. Im Alter von 21 Tagen werden aus dem Würfel senkrecht zwei Platten (150 x 150 x 50 mm³) gesägt.

Im Alter von 26 Tagen werden die Probekörper seitlich und an der Unterseite (gesägte Fläche ist als Prüffläche nach oben gerichtet) abgedichtet und mit Styropor isoliert. Die Seitenabdichtung soll so ausgeführt sein, dass durch einen Überstand von ca. 20 mm ab dem 28. Tag eine 3 mm hohe Leitungswasserschicht zur Vorsättigung aufgebracht werden kann. Im Alter von 31 Tagen wird das Leitungswasser durch die Prüfliquidität ersetzt (Leitungswasser bzw. 3 %-tige NaCl-Lösung) und die Probekörper werden in eine luftgekühlte Gefriertruhe gestellt. In Abbildung 3 ist der Temperaturverlauf eines FTW dargestellt. Als Referenzpunkt für den Temperaturverlauf dient das Prüfmedium.

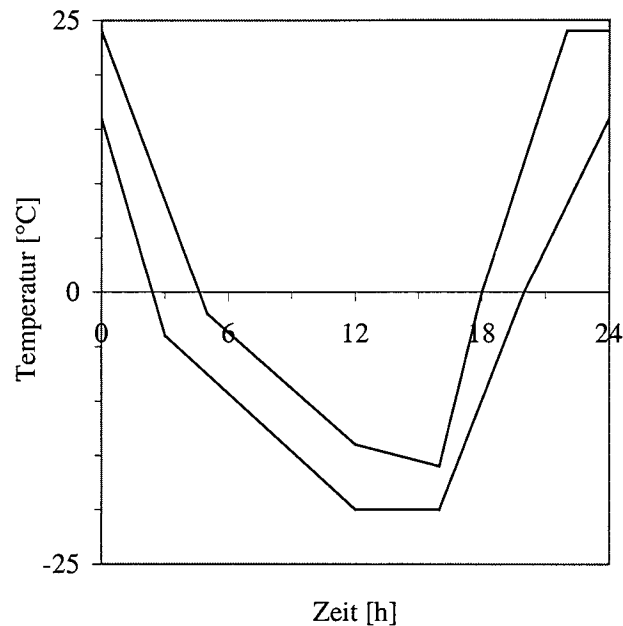


Abbildung 3: Temperaturbereich eines FTW nach dem SLAB-Verfahren

Die Beurteilung des Frost-(Tausalz)-Widerstandes erfolgt durch die Bestimmung der abgewitterten Masse und einer augenscheinlichen Begutachtung. Als beständig gegenüber einem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff gilt der untersuchte Beton, wenn die abgewitterte Masse nach 56 Frosttauwechseln weniger als 1000 g/m^2 beträgt [7].

3.6 CIF- bzw. CDF-Verfahren (Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes)

Beim CIF- (capillary suction, internal damage and freeze thaw test) bzw. CDF-Test (capillary suction of deicing chemicals and freeze-thaw test) werden nach Setzer et al. [8] fünf Probekörper ($h \sim 70 \text{ mm}$) mit einer Gesamtprüffläche von mindestens 800 cm^2 empfohlen. Die Probekörper werden nach einem Tag ausgeschalt und 6 Tage unter Wasser (20 °C) und danach bis zum 28. Tag im Klima $20 \text{ °C}/65 \text{ \% r.F.}$ gelagert [9]. 7 bis 2 Tage vor Beendigung der Trockenlagerung werden die Probekörper seitlich abgedichtet (Aluminiumfolie mit Butylklebung oder lösungsmittelfreies Epoxydharz). Nach der Trockenlagerung werden die Probekörper mit der Oberseite als Prüffläche nach unten auf Abstandshalter in Edelstahlbehälter gelegt. Anschließend wird in die Behälter bis 5 mm über der Unterseite der Prüfkörper Prüflösung eingefüllt. Das kapillare Saugen dauert 7 Tage. Danach werden die Behälter mit den Probekörpern und der Prüflüssigkeit in eine Frosttruhe gestellt. Als Referenzpunkt für den Temperaturverlauf dient die Kühlflüssigkeit, in der die Behälter mit

den Probekörpern stehen. Der Temperaturzyklus ist in Abbildung 4 dargestellt, ein Zyklus dauert 12 Stunden.

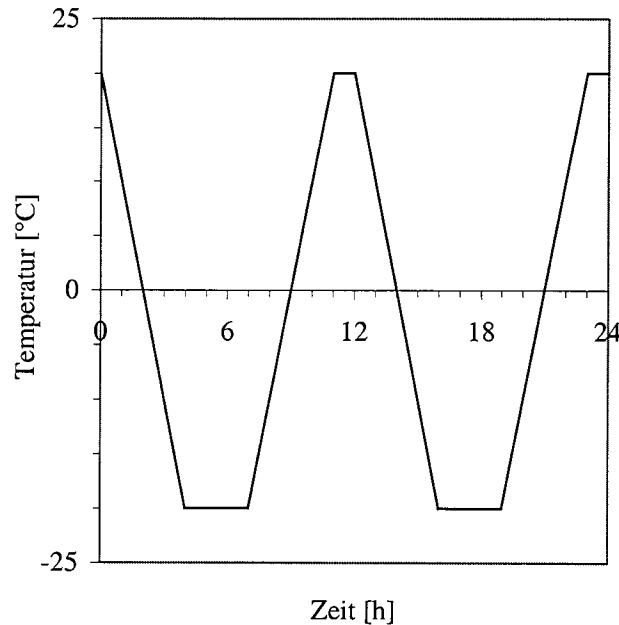


Abbildung 4: Temperaturverlauf (zulässige Abweichung: $\pm 0,5$ K) eines FTW nach dem CIF- bzw. CDF-Verfahren

Die Beurteilung der Frostbeständigkeit (CIF-Test) erfolgt über die Bestimmung der inneren Schädigung (dynamischer E-Modul), bei der Frost-Tausalz-Beständigkeit (CDF-Test) wird die abgewitterte Masse bestimmt. Das Ablösen von noch an der Betonoberfläche anhaftender Abwitterung erfolgt hierbei durch ein Ultraschallbad. Der CIF-Test wurde aus dem CF-Test entwickelt, bei dem – analog zum CDF-Test – die abgewitterte Masse bestimmt wurde.

Als frostbeständig wird ein Beton eingestuft, wenn er nach 56 FTW eine Abwitterung von unter 2000 g/m^2 (CF-Test) bzw. einen maximalen Abfall des dynamischen E-Moduls von 40 % (CIF-Test) aufweist. Der Beton gilt als frost-tausalz-beständig, wenn die Abwitterungen nach dem CDF-Verfahren nach 28 FTW kleiner als 1500 g/m^2 sind.

3.7 Zusammenfassung Frost- und Frost-Tausalzversuche

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Eigenschaften der Prüfverfahren zur Bestimmung des Frostwiderstandes dargestellt, in Tabelle 4 sind die wichtigsten Eigenschaften der Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenfassung der behandelten Prüfverfahren zur Bestimmung des Frostwiderstandes

1	Würfelverfahren	ÖNORM B 3303	SLAB-Test	CF-Test	CIF-Test
1	2	3	4	5	6
Probekörper	100 x 100 x 100 mm ³	Prismen	150 x 150 x 50 mm ³	Prüffläche > 800 cm ² , h ~ 5 cm	Prüffläche > 800 cm ² , h ~ 5 cm
Herstellung/ Lagerung	1 d in Schalung; 6 d unter Wasser, 20 d Klima 20/65	1 d Schalung; 55 d unter Wasser	1 d Schalung, 6 d Wasser, 21 d 20/65	1 d Schalung, 6 d Wasser, 21 d 20/65	1 d Schalung, 6 d Wasser, 21 d 20/65
Vorbehandlung	-	-	Schneiden, Aufkleben einer Randeinfassung	Abdichten der Seitenflächen	Abdichten der Seitenflächen
Prüffläche	alle Seiten	alle Seiten	geschnittene Innenfläche	an Teflon geschalte Innenseite	an Teflon geschalte Innenseite
Prüfflüssigkeit	Leitungswasser	Leitungswasser	Leitungswasser	entsalztes Wasser	entsalztes Wasser
Vorlagerung	24 h in Prüfflüssigkeit	-	3 d mit Leitungswasser	7 d in Prüfflüssigkeit	7 d in Prüfflüssigkeit
Alter bei Prüfbeginn [d]	28	56	31	35	35
Dauer FT-Zyklus [h]	24	24	24	12	12
Minimaltemperatur [°C]	-15 ± 2	< -18*	-18 ± 2	- 20 ± 0,5	- 20 ± 0,5
Anzahl FT-Zyklen [-]	100	50	56	56	56
Beurteilung FT-Widerstand	Abwitterung [M.-%] bzw. augenscheinliche Begutachtung	Abfall des dyn. oder statischen E-Moduls	Abwitterung [g/m ²] bzw. augenscheinliche Begutachtung	Abwitterung [g/m ²]	Abfall des dyn. E-Moduls
Kriterium	Abw. < 5 M.-% (50 FTW) Abw. < 10 M.-% (100 FTW)	$\Delta E_{\text{dyn.}} < 15 \%$ (50 FTW) $\Delta E_{\text{stat.}} < 25 \%$ (50 FTW)	Abw. < 1000 g/m ² (56 FTW)	Abw. < 2000 g/m ² (56 FTW)	$\Delta E_{\text{dyn.}} < 40 \%$ (56 FTW)

* Ab dem Erreichen der Minimaltemperatur muss die Lufttemperatur zwischen -20 °C und -22 °C betragen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der behandelten Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes

	Würfelverfahren	ÖNORM B 3303	SLAB-Test	CDF-Test
1	2	3	4	5
Probekörper	100 x 100 x 100 mm ³	200 x 200 x 50 mm ³	150 x 150 x 50 mm ³	Prüffläche > 800 cm ² , h ~ 5 cm
Herstellung/ Lagerung	1 d in Schalung; 6 d unter Wasser, 20 d Klima 20/65	1 d in Schalung, 13 d unter Wasser, 14 d Raumluft	1 d Schalung, 6 d Wasser, 21 d 20/65	1 d Schalung, 6 d Wasser, 21 d 20/65
Vorbehandlung	-	Aufkleben einer Randeinfassung	Schneiden, Aufkleben einer Randeinfassung	Abdichten der Seitenflächen
Prüffläche	alle Seiten	abgezogene Oberfläche	geschnittene Innenfläche	an Teflon geschalte Innenfläche
Prüfflüssigkeit	3 %-tige NaCl-Lösung	3 %-tige NaCl-Lösung	3 %-tige NaCl-Lösung	3 %-tige NaCl-Lösung
Vorlagerung	24 h in Prüfflüssigkeit	ca. 8 h mit Prüfflüssigkeit	3 d mit Leitungswasser	7 d in Prüfflüssigkeit
Alter bei Prüfbeginn [d]	28	28	31	35
Dauer FT-Zyklus [h]	24	24	24	12
Minimaltemperatur [°C]	-15 ± 2	< -18*	-18 ± 2	- 20 ± 0,5
Anzahl FT-Zyklen [-]	100	50	56	56/ 28
Beurteilung FTS-Widerstand	abgewitterte Masse [M.-%] bzw. augenscheinliche Begutachtung	abgewitterte Masse [g/m ²] bzw. augenscheinliche Begutachtung	Abwitterung [g/m ²]; augenscheinliche Begutachtung	Abwitterung [g/m ²]
Kriterium	Abw. < 3 M.-% (50 FTW) Abw. < 5 M.-% (100 FTW)	vgl. Abschnitt 3.4 (Abw. < 10 g/m ² alle 5 FTW)	Abw. < 1000 g/m ² (56 FTW)	Abw. < 1500 g/m ² (28 FTW)

* Ab dem Erreichen der Minimaltemperatur muss die Lufttemperatur zwischen -20 °C und -22 °C betragen.

4 EINFLÜSSE AUF DIE STREUUNG VON FROST- UND FROST-TAUSALZ-PRÜFUNGEN

4.1 Allgemeines

Unterschiedliche Randbedingungen wie Minimaltemperatur oder Prüfmedium kennzeichnen die einzelnen Versuche zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes. Im Folgenden soll auf die Einflüsse bei Änderungen dieser Randbedingungen eingegangen werden, bei denen in den einzelnen Prüfvorschriften und Normungen Abweichungen vom Sollwert zugelassen sind. Es soll untersucht werden, welchen Einfluss Schwankungen im erlaubten Bereich auf die Ergebnisse der Frost- und Frost-Tausalz-Prüfungen haben können.

4.2 Einfluss aus Änderung der Minimaltemperatur

4.2.1 Allgemeines

Erwartungsgemäß ist die Höhe der Abwitterung während eines Frost-Tau-Zyklus abhängig von der Minimaltemperatur. Vorgeschrieben für die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes sind nach den entsprechenden Prüfvorschriften [2, 4, 6, 8, 9] Minimaltemperaturen zwischen -15 °C (Würfelverfahren) und -20 °C (z.B. CDF-Verfahren). Die erlaubten Abweichungen von der Solltemperatur betragen hierbei zwischen $\pm 2\text{ K}$ (SLAB-Test, Würfelverfahren) und $\pm 0,5\text{ K}$ (CDF-Test).

Erfahrungsgemäß ist eine gleichmäßige Einstellung der Temperatur während des Versuches v.a. bei den über die Luft kühlenden Verfahren schwierig. So kann eine variable Belegung der Truhe die Luftströmung und damit die Temperaturverteilung ändern und dadurch die Prüfergebnisse beeinflussen.

Um den Einfluss dieser Abweichungen bei der Prüfung der inneren Schädigung abschätzen zu können, wurden Prüfungen im Rahmen des Ringversuches des Deutschen Vereins der Zementindustrie [17] an sechs verschiedenen Mischungen mit dem SLAB-Test (1.2, 2.2, 3.2, 1.5, 2.5, 3.5 vgl. Tabelle A 1) und drei verschiedenen Mischungen mit dem CDF-Verfahren (3.4, 4.1, 4.4 vgl. Tabelle A 1) durchgeführt. Die Temperaturen wurden beim SLAB-Test zwischen -15 °C und -24 °C , beim CDF-Test zwischen -15 °C und -20 °C variiert. In den Untersuchungen wurde die Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit unabhängig von der Minimaltemperatur konstant auf 10 K/h belassen. Dadurch änderte sich bei einer

gleichbleibenden Zyklusdauer von 12 h die Dauer der 20 °C Periode. Beide Prüfverfahren wurden jeweils an einem Institut durchgeführt, die verwendeten Betonmischungen wurden an einem Ort hergestellt. Hieraus ergibt sich, dass die betrachteten Ergebnisse nicht der Vergleichsstreuung und nur einer minimierten Materialstreuung (identische Ausgangsmaterialien etc.) unterliegen.

4.2.2 Ergebnisse Plattenversuch (ÖNORM B 3303)

Siebel [16, 17] führte Versuche in Anlehnung an das Verfahren nach ÖNORM B 3303 durch, bei denen die Minimaltemperatur zwischen -15 °C und -20 °C variiert wurde.

Bei Betonen mit geringem Frost-Widerstand fiel der statische E-Modul bei den Versuchen mit einer Minimaltemperatur von -20°C stärker ab als bei einer Minimaltemperatur von -15 °C. Dagegen zeigte sich bei der Bestimmung des dynamischen E-Moduls bei Betonen mit hohem Frost-Widerstand eine von der Temperatur unabhängige Ultraschallgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang war unabhängig von der Messmethodik der Ultraschalllaufzeit (Ankopplung über Metallplättchen, Ankopplung über Wasser).

4.2.3 Ergebnisse SLAB-Test

In Tabelle A 2 bzw. Abbildung 5 sind beispielhaft die Abwitterungen eines Betons mit geringen und eines Betons mit hohen Abwitterungen, durchgeführt mit dem SLAB-Test (Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes), in Abhängigkeit der Minimaltemperatur dargestellt.

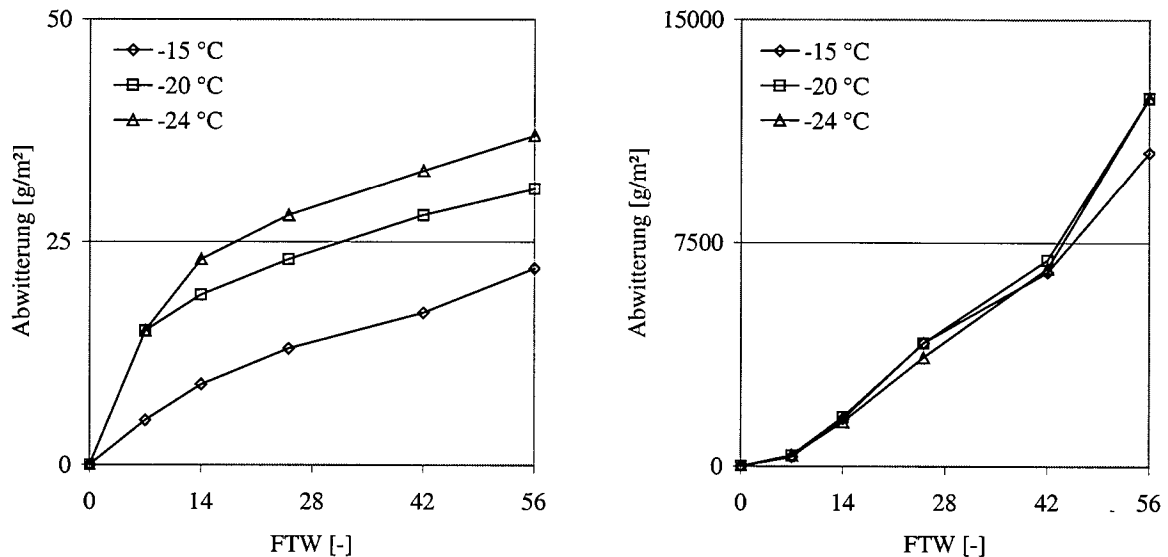


Abbildung 5: Abwitterung mit dem SLAB-Verfahren der Mischung 1.2 (CEM I 42,5 R; $w/z = 0,45$; LP) mit geringen (links) und der Mischung 2.2 (CEM I 42,5 R; $w/z = 0,45$; kein LP) mit hohen Abwitterungen (rechts) in Abhängigkeit der Minimaltemperatur nach [17]

Bei geringen Abwitterungen ergibt sich eine Abhängigkeit der abgewitterten Menge zur Minimaltemperatur. Bei einer Verringerung der Temperatur von $-15\text{ }^\circ\text{C}$ auf $-24\text{ }^\circ\text{C}$ werden während der FTW nahezu doppelt so hohe Abwitterungsmengen gemessen. Auffällig ist hierbei der relativ parallele Verlauf der Abwitterung nach 14 FTW (vgl. Abbildung 5), d.h. die deutlich höhere Abwitterung bei geringerer Minimaltemperatur wird durch die höhere Anfangsabwitterung erzielt. Ein Grund hierfür konnte aus den vorliegenden Untersuchungen nicht gefunden werden. Insgesamt ergeben sich Schwankungen in der Abwitterung pro Kelvin Änderung der Minimaltemperatur von rund 8 % (bezogen auf die Norm-Minimaltemperatur von $-20\text{ }^\circ\text{C}$).

Unerwartet verhält sich hingegen die Abwitterung bei den Betonen mit einem geringen Frost-Tausalz-Widerstand. Hier bewirkt die gleiche Erniedrigung der Minimaltemperatur keine einheitliche Veränderung des Abwitterungsverhaltens.

Ergebnisse in der Nähe des Prüfkriteriums (1000 g/m^2) lagen hier leider nicht vor.

4.2.4 Ergebnisse CDF-Verfahren

Bei den Abwitterungen des CDF-Verfahrens (Frost-Tausalz-Versuch) ist sowohl bei normalen als auch bei großen Abwitterungsraten eine klare Abhängigkeit zur Minimaltemperatur zu erkennen. In Tabelle A 3 und Abbildung 6 sind wiederum zwei der untersuchten Betone dargestellt.

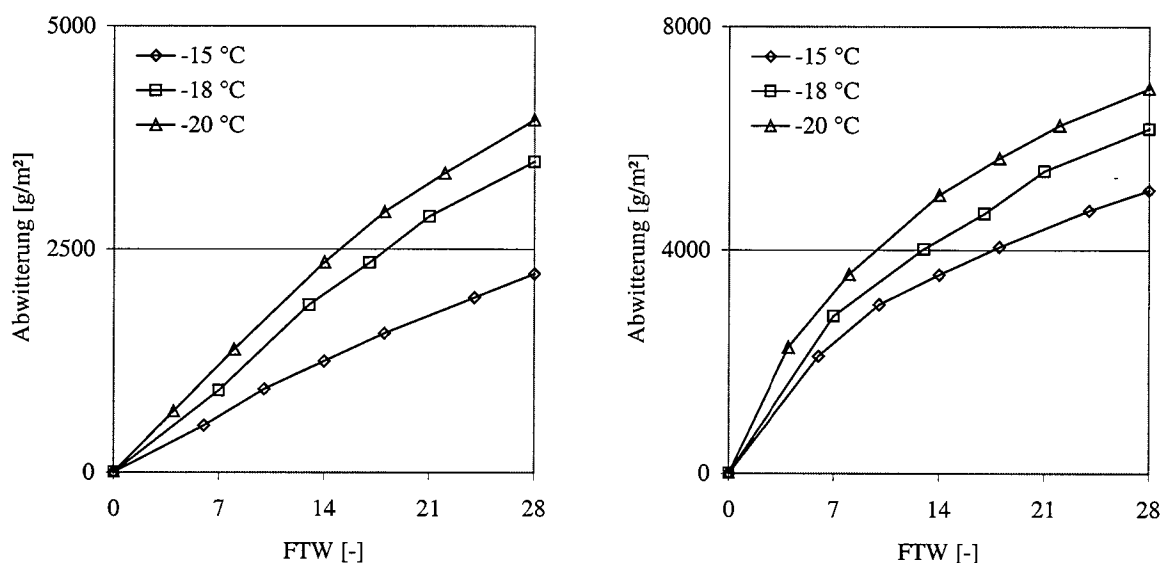


Abbildung 6: Abwitterung mit dem CDF-Verfahren der Mischung 4.1 (CEM I 42,5 R; $w/z = 0,55$; kein LP) mit mittleren (links) und der Mischung 4.4 (CEM III A 32,5; $w/z = 0,55$; kein LP) mit hohen Abwitterungen (rechts) in Abhängigkeit der Minimaltemperatur nach [17]

Bezogen auf die vorgeschriebene Minimaltemperatur von -20 °C bewirkt eine Erhöhung dieser Temperatur bei Beton 4.1 (CEM I 42,5 R; $w/z = 0,55$; kein LP) eine geringere Abwitterung von ca. 9 % pro Kelvin, bei Beton 4.4 (CEM III A 32,5; $w/z = 0,55$; kein LP) von ca. 5 % pro Kelvin. Hartmann bestätigte dies in ähnlichen Untersuchungen [10]. Er stellte allerdings fest, dass die Schädigung des Betons beim CDF-Verfahren in einem Temperaturbereich zwischen -18 °C und -20 °C stärker als bei den darüber liegenden Temperaturen bis -15 °C beeinflusst wird. Diese Aussage konnte bei den vorliegenden Untersuchungen von Siebel [17] nicht gefunden werden. V.a. auch wegen der möglichen Streuungen ist eine derartige Aussage anhand dreier Abwitterungsverläufe als schwierig zu bewerten. Bei Hartmann ergab sich eine durchschnittliche Änderung der abgewitterten Menge von 10 % je Kelvin Änderung der Minimaltemperatur.

4.2.5 Zusammenfassung Einfluss Minimaltemperatur

Bei der Bestimmung der inneren Schädigung zeigte sich, dass der Abfall des statischen E-Moduls bei Betonen im Allgemeinen abhängig von der Minimaltemperatur ist.

Bei der Bestimmung der Abwitterungen mittels des CDF- bzw. SLAB-Verfahrens wirkt sich eine Erniedrigung der Minimaltemperatur während der Frostphase in der Regel erhöhend auf die Abwitterung aus. Auffällig war hier v.a. eine nicht zu erklärende erhöhte Anfangs-abwitterung bis zum 14. FTW. Eine Begutachtung der Ergebnisse ohne diese Anfangs-abwitterung, wie es z.B. in ÖNORM B 3303 [4] vorgesehen ist, würde bei diesem Verlauf der Abwitterung die Abhängigkeit zur Minimaltemperatur deutlich verringern.

Bei der Frostprüfung nach dem SLAB-Verfahren wurden bei geringen Abwitterungen von bis zu 40 g/m² bei Änderungen der Minimaltemperatur Abweichungen der Abwitterung von bis 8 %/K festgestellt. Ähnliche Ergebnisse sind auch bei der Prüfung nach ÖNORM B 3303 zu erwarten, bei der ebenfalls Probekörpertemperaturen von minimal -18 °C bis -22 °C möglich sind. Untersuchungen hierzu in der Nähe des Abwitterungskriteriums waren leider nicht vorhanden.

Die Frostprüfung nach dem CDF-Verfahren ist in diesem Fall durch die kleineren erlaubten Schwankungen der Minimaltemperatur mit geringeren Streuungen behaftet. Hier sind bei einer maximalen Abweichung von $\pm 0,5$ K Schwankungen in der Abwitterung von maximal 9 % zu erwarten.

4.3 Einfluss aus der Zusammensetzung des Prüfmediums

Die Zusammensetzung des Leitungswassers und der Gehalt an gelösten Salzen, ausgedrückt in der Wasserhärte, unterscheiden sich regional sehr stark. So weist Leitungswasser, das oberflächennah gewonnen wird (z.B. Rheingebiet) eine sehr geringe Härte auf, Wasser, das aus tieferen Schichten gewonnen wird und auf seinem Weg durch kalkhaltiges oder anderes leicht lösliches Gestein geflossen ist, weist eine hohe Härte auf.

Bei der Bestimmung des Frostwiderstandes wurde dieser Einfluss lange nicht beachtet. Da bei den meisten Prüfverfahren zur Bestimmung des Frostwiderstandes [2, 4, 6, 8, 9] eine genaue Beschreibung des Prüfmediums nicht vorhanden ist, sondern „Leitungswasser“ vorgeschrieben ist, wurde im Rahmen eines Ringversuches des Vereins der Deutschen Zementindustrie [17] der Einfluss der Zusammensetzung des Prüfmediums untersucht. Eine Übersicht über die Zusammensetzung der untersuchten Prüfmedien ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Zusammensetzung der Prüfmedien nach [17]

Bezeichnung	Deutsche Härte	Gehalt an CaO	Gehalt an SO ₄ ²⁻	Gehalt an Cl ⁻
	° dH	mg/l	mg/l	mg/l
1	2	3	4	5
demineralisiert	0	-	-	-
Leitungswasser (Durchschnitt)	7,5	41,5	49,7	40,3
Leitungsw. geringer Härte	10	100	-	-
Leitungsw. hoher Härte	24	240	-	-
Leitungsw. hoher Härte + Sulfat	24	240	100	-
Leitungsw. hoher Härte + Chlorid	24	240	-	50

Es wurden insgesamt sechs verschiedene Wasserzusammensetzungen untersucht. Die Zusammensetzungen lagen innerhalb der Grenzwerte der deutschen Trinkwasserverordnung. Die Bestimmung des Frostwiderstandes wurde mit Hilfe des CF-Verfahrens an neun verschiedenen Betonmischungen durchgeführt (vgl. Tabelle A 1). Als Kriterium wurde die aufsummierte Abwitterung nach 56 FTW herangezogen. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Frostprüfungen exemplarisch aufgeführt (vgl. auch Tabelle A 4).

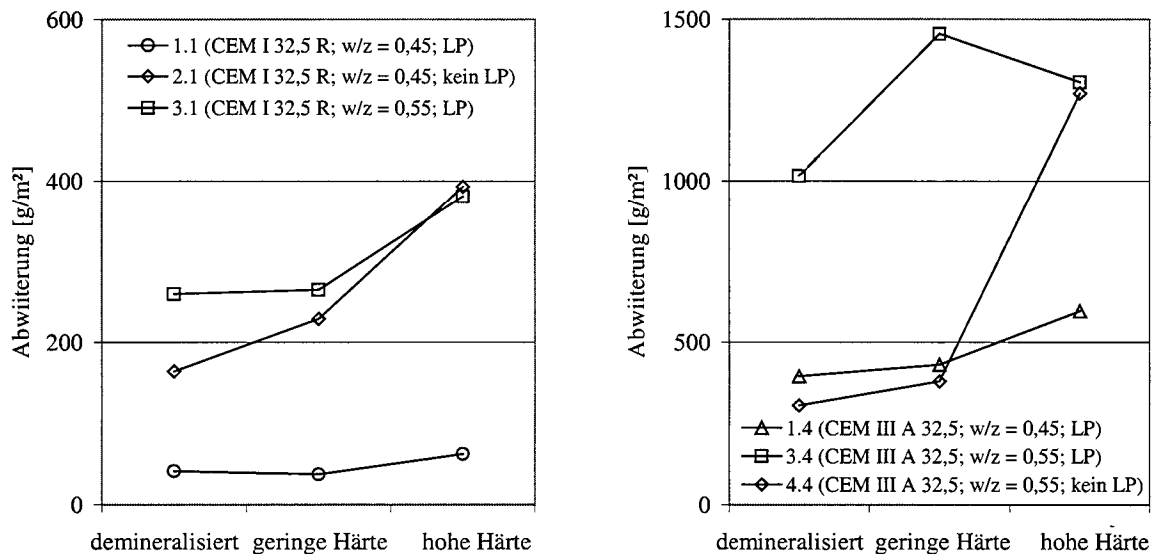


Abbildung 7: Abwitterung nach 56 FTW in Abhängigkeit der Wasserhärte (CF-Verfahren) nach [17]

Schon bei der Verwendung von Leitungswasser geringer Härte wurden signifikante Abweichungen der abgewitterten Menge von durchschnittlich 20 %, in Einzelfällen bis über 40 % in Bezug auf die Abwitterungen mit demineralisiertem Wasser erreicht. Wurde statt dessen Leitungswasser hoher Härte verwendet, wurden Abweichungen bis zu 400 % festgestellt. Es ist keine Tendenz in Abhängigkeit der Betoneigenschaften (w/z-Wert, LP-Gehalt etc.) zu der Größe des Einflusses erkennbar.

Ähnliche Ergebnisse sind auch bei der Bestimmung des Frostwiderstandes über die Abwitterung nach den anderen Methoden zu erwarten. Neuere Untersuchungen von Auberg [11] bestätigen den Einfluss der Wasserhärte auf die Abwitterung, eine Abhängigkeit auf die innere Schädigung (dynamischen E-Modul) oder die Wasseraufnahme während des CIF-Testes wurde nicht gefunden.

Der Einfluss der Leitungswasserzusammensetzung ist daher keineswegs vernachlässigbar. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines einheitlichen Prüfmediums vorzuziehen. Diese Forderung wird bisher aber nur vom CF-, bzw. CIF-Verfahren erfüllt, bei dem demineralisiertes Wasser vorgeschrieben ist.

Ein Einfluss der Wasserhärte auf die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton ist wegen der Salzzugabe nicht zu erwarten, da diese Einflüsse durch das Salz überdrückt werden.

Da innerhalb eines Institutes von konstanten Leitungswasserverhältnissen ausgegangen werden kann, wird die Wiederholstreuung der Frost-Tau-Versuche durch die Verwendung von Leitungswasser als Prüfmedium nicht beeinflusst. Beim Vergleich von Ergebnissen verschiedener Institute spiegelt sich allerdings der Einfluss der Zusammensetzung des Leitungswassers in der Streuung zwischen den Labors und in der Vergleichsstreuung wieder.

5 ZULASSUNGSVERSUCHE

5.1 Zulassungsbestimmungen

5.1.1 Zulassung von anorganischen Bindemitteln

Im Rahmen von Zulassungen neuer Betonzusatzstoffe wird vom Deutschen Institut für Bautechnik u.a. der Nachweis der Frostbeständigkeit gefordert [12].

Bei der Zulassung anorganischer Betonzusatzstoffe werden bei der Frostprüfung die in Tabelle 6 aufgeführten Betonzusammensetzungen untersucht:

Tabelle 6: Betonzusammensetzung für die Bestimmung des Frostwiderstandes bei Zulassungsversuchen anorganischer Betonzusatzstoffe [12]

Beton	Zementgehalt	Zusatzstoffgehalt	Wassergehalt	w/b-Wert
[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]
1	2	3	4	5
„Nullbeton“	300	-	180	0,60
Beton bei der Zulassung von Flugaschen	270	60	176	0,60 ¹⁾

¹⁾ Anrechenbarkeitsfaktor der Flugasche: $k = 0,40$

Die Frostbeständigkeit ist hierbei nach dem VDZ-Würfelverfahren nachzuweisen (vgl. Abschnitt 3.2). Die Prüfungen werden an einem Vergleichsbeton mit bewährter Zusammensetzung („Nullbeton“) und einem Versuchsbeton mit dem neuen Betonzusatzstoff durchgeführt. Hierbei darf der Betonzusatzstoff die Eigenschaften des Betons nicht wesentlich verschlechtern.

5.1.2 Zulassung von Flugaschezementen und Portlandkalksteinzement

Im Rahmen der Zulassung von Flugasche- und Portlandkalksteinzementen muss sowohl der Frost- als auch der Frost-Tausalz-Widerstand nachgewiesen werden [13]. Hierbei werden folgende Betonzusammensetzungen untersucht (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Betonzusammensetzung zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes nach [13]

Mischungs.-Nr.	Zementgehalt	w/z-Wert	LP-Gehalt
[-]	[kg/m ³]	[-]	[Vol.-%]
1	2	3	4
1	300	0,60	kein LP-Mittel
2	320 .. 350	0,50	kein LP-Mittel
3	320 .. 350	0,50	ca. 4,5

Bei der Zulassungsprüfung muss der Frostwiderstand an Mischung 1 (vgl. Tabelle 7) mit einem zugelassenen Portlandzement und dem zuzulassenden Zement nach dem Würfelverfahren [2] bestimmt werden.

Die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes erfolgt in Anlehnung an die ÖNORM B 3303 (vgl. Abschnitt 3.4) im Alter von 56 Tagen an plattenförmigen Probekörper (200 x 200 x 80 mm³) jeweils an den Mischungen 2 und 3 (vgl. Tabelle 7). Insgesamt sind 70 FTW vorgeschrieben.

Als Kriterium für den Frost- und den Frost-Tausalz-Widerstand gilt der direkte Vergleich der Abwitterungen der Mischung mit einem genormten Portlandzement gleichen Klinkers und dem neuen Zement. Hierbei dürfen die Abwitterungen des zuzulassenden Zementes nicht wesentlich höher sein als bei der Mischung mit dem Vergleichszement.

Ein Problem der Auswertung der Zulassungsversuche ist die nicht zufällige Verteilung der Zemente auf die verschiedenen Prüfinstitute. So werden Zemente eines Zementwerkes bzw. eines Zementherstellers in der Regel immer bei dem selben Prüfinstitut geprüft. Einflüsse aus der Zusammensetzung des Zementes wie Einflüsse des Klinkers oder von Zumahlstoffen wie Hüttensand können damit systematisch die gemessenen Werte und die daraus ermittelten Streuungen zwischen den Labors beeinflussen.

5.2 Auswertung der Zulassungsversuche

5.2.1 Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren

5.2.1.1 Allgemeines

Dank der zahlreichen Zulassungsversuche steht eine Vielzahl an Daten von Frostversuchen nach dem Würfelverfahren zur Verfügung. Da die einzelnen Versuche zu verschiedenen Zeitpunkten in unterschiedlichen Laboren mit unterschiedlichen Ausgangsmaterialien durchgeführt wurden, muss man insgesamt mit sehr hohen Abweichungen zwischen den Versuchen rechnen. In den Streuungen sind daher Streuungen zwischen den Laboren, die Versuchsstreuung und die Materialstreuung enthalten.

Im Folgenden sollen Mischungen mit ähnlichen Zusammensetzungen (w/z-Wert, LP-Gehalt, etc.) verglichen werden. Versuche, bei denen mit Fehlern in der Versuchsausführung zu rechnen war, wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

5.2.1.2 PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP-Beton

In der ersten Auswertung werden insgesamt 24 Betone mit Portlandzement der Festigkeitsklasse 35 F, einem w/z-Wert von 0,60 und ohne Zugabe eines Luftporenmittels verglichen. Hierbei handelt es sich um Vergleichsbetone, die verwendeten Zemente entsprechen der Norm.

In Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Abwitterungen dieser 24 Betone, der Variationskoeffizient in Abhängigkeit der FTW, die Standardabweichung und der Variationskoeffizient in Abhängigkeit der mittleren Abwitterung dargestellt.

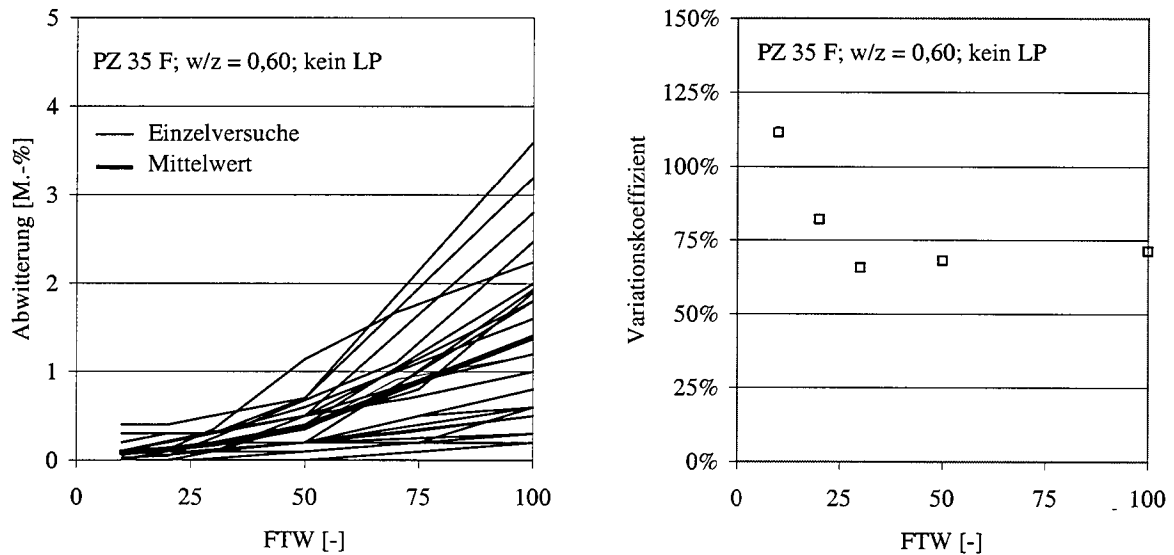


Abbildung 8: Abwitterungen Würfeltest (links) und Variationskoeffizient in Abh. der FTW (rechts), PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP

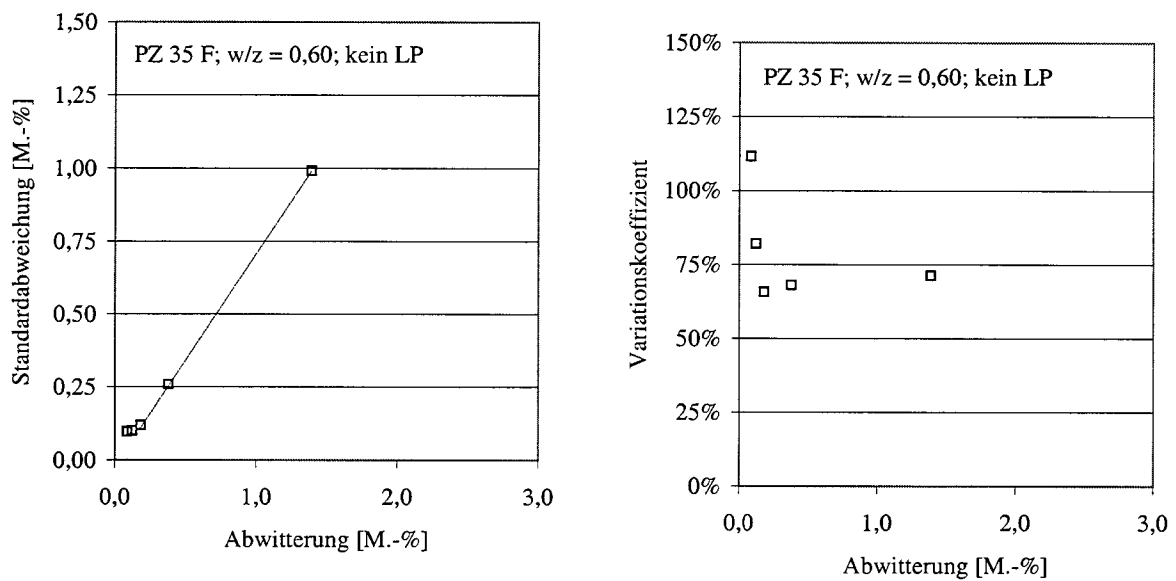


Abbildung 9: Standardabweichung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Abwitterung beim Würfelverfahren in Abh. der mittleren Abwitterung; PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP

Bei der Betrachtung der abgewitterten Masse in Abhängigkeit der FTW ist eine Abweichung einzelner Mischungen vom Mittelwert von bis zu 260 % zu erkennen (vgl. Abbildung 8).

Berechnet man als Maß für die Abweichung den Variationskoeffizienten (vgl. Abschnitt 2.4) und trägt diesen über die Anzahl der FTW auf (vgl. Abbildung 8), wird eine Verringerung der Abweichung in den ersten 25 FTW deutlich, minimal wird ein Variationskoeffizient von 75 % nach 100 FTW erreicht. Die Verringerung des Variationskoeffizienten mit zunehmender mittlerer Abwitterung ist damit zu erklären, dass sich bei kleinen Abwitterungsmengen systematische Messfehler (Messgenauigkeit der Waage etc.) prozentual stärker auswirken als bei großen Abwitterungsmengen. Vergleicht man die Standardabweichung in Abhängigkeit der abgewitterten Masse, so erkennt man eine anfangs niedrige Standardabweichung, die ab einer Abwitterungsrate von 0,5 M.-% einen linearen Verlauf annimmt. Wird schließlich der Variationskoeffizient in Abhängigkeit der mittleren Abwitterung aufgetragen, liegt dieser bei geringen Abwitterungen bei fast 120 %, ab einer Abwitterung von 0,15 M.-% nähert sich der Variationskoeffizient den oben genannten 75 % an.

Der Variationskoeffizient stellt die Ableitung der Kurve der Standardabweichung in Abhängigkeit der abgewitterten Masse (vgl. Abbildung 9) dar. Der lineare Zusammenhang zwischen der Abwitterung und der Standardabweichung ergibt somit den konstanten Verlauf des Variationskoeffizienten. Aus diesen Überlegungen ist darüber hinaus ersichtlich, dass eine geringere Steigung des Graphen in Abbildung 9 eine geringere Standardabweichung und damit eine geringere Streuung bedeutet.

Aus den voran beschriebenen Versuchsdaten sollen nun jeweils die Daten des gleichen Institutes verglichen werden. Es werden nur Institute in Betracht gezogen, bei denen mindestens 3 Versuchsreihen zur Verfügung standen. 21 der 24 betrachteten Betonmischungen (PZ 35 F; $w/z = 0,60$; kein LP) wurden von drei verschiedenen Instituten (I1 bis I3) auf deren Frostwiderstand untersucht.

Betrachtet man zunächst jeweils die mittleren Abwitterungen der drei Institute (vgl. Abbildung 10), werden Abweichungen zwischen den Instituten von nahezu 100 % sichtbar (Institut 1 – Institut 3). Dies wird auch beim Variationskoeffizienten zwischen den Instituten deutlich, der nach 100 Frost-Tau-Wechseln 37 % beträgt.

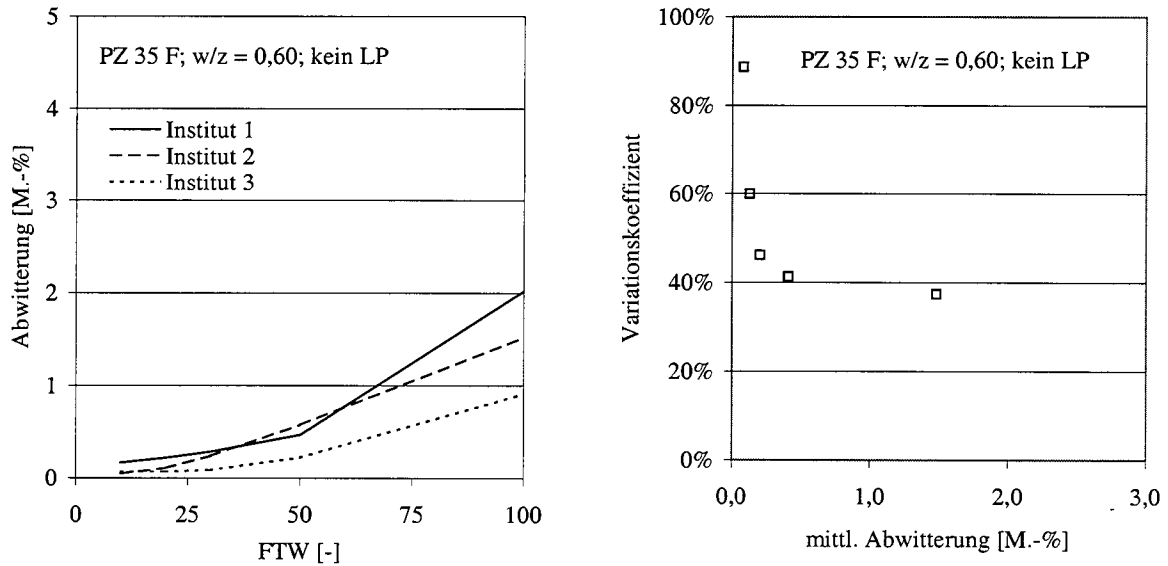


Abbildung 10: Mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der 3 Institute
(Würfelversuch; PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

Demzufolge ergibt sich eine Streuung zwischen den Laboren von 37 % bei einer mittleren Abwitterung von 1,48 M.-%. In dieser Streuung ist zusätzlich zu der Streuung zwischen den Laboren (unterschiedlicher Bearbeiter und Prüfgeräte) aufgrund der unterschiedlichen Proben auch die Materialstreuung durch die Verwendung unterschiedlicher Ausgangsmaterialien enthalten. Diese wird im Folgenden als konstant angenommen.

In Abbildung 11 bis Abbildung 13 sind die Verläufe der Abwitterungen und der dazugehörige Variationskoeffizient der einzelnen Zulassungsversuche, aufgeteilt auf die verschiedenen Institute, dargestellt.

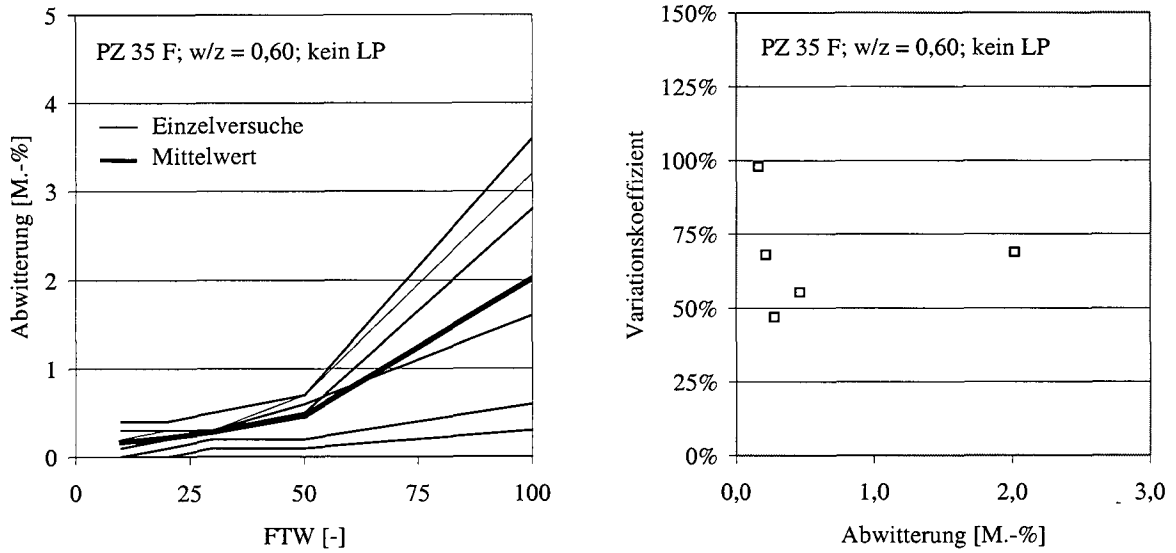


Abbildung 11: Mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) Institut 1
(Würfelversuch; PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

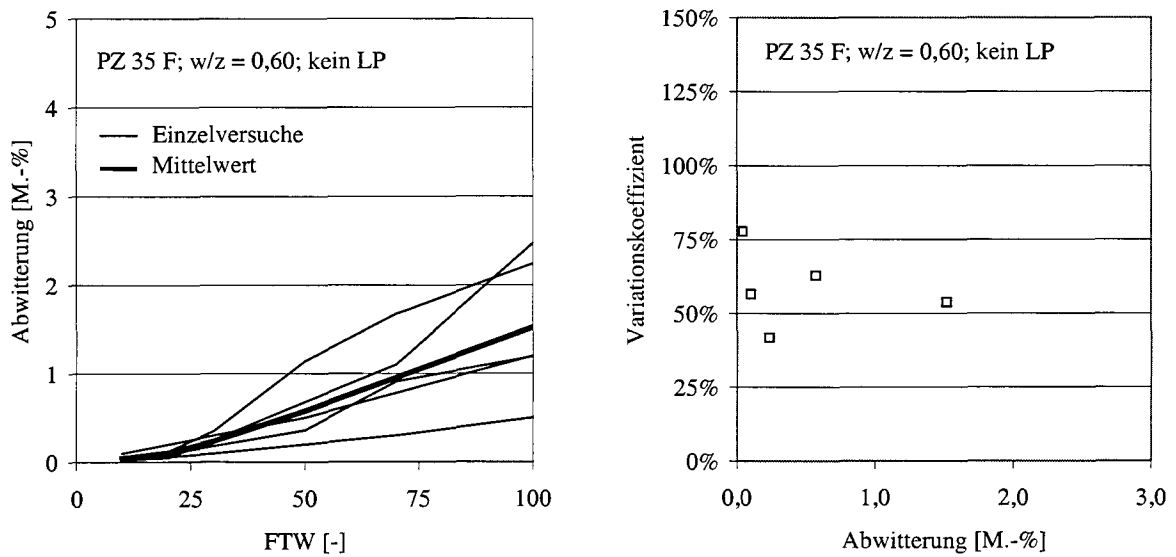


Abbildung 12: Mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) Institut 2
(Würfelversuch; PZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

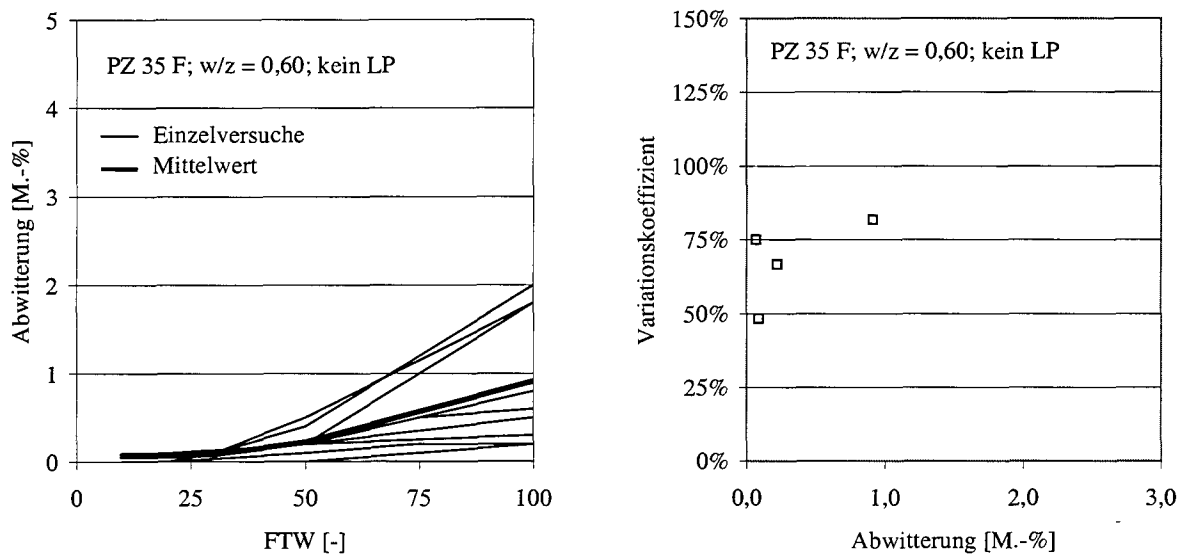


Abbildung 13: Mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) Institut 3
(Würfelversuch; PZ 35 F; $w/z = 0,60$; kein LP)

Zwischen den Instituten ist keine systematische Abweichung in den gemessenen Abwitterungen zu erkennen. So werden in allen Instituten Probekörper mit geringen Abwitterungen von unter 1 M.-% geprüft, die maximal gemessenen Abwitterungen liegen bei Institut 1 bei 3 M.-%, bei den beiden anderen Instituten bei ca. 2 M.-%. Die Variationskoeffizienten betragen zwischen 54 % (Institut 2) und 82 % (Institut 3). Institut 1 weist einen Variationskoeffizienten von 69 % bei der maximalen Abwitterung nach 100 FTW auf.

5.2.1.3 FAHZ 35 F, $w/z = 0,60$, keine Luftporen

Aus den Zulassungsversuchen für Flugaschehüttensandzemente lagen insgesamt 12 Betonmischungen mit einem identischem w/z -Wert von 0,60 ohne Verwendung eines Luftporenmittels vor. An den Versuchen waren zwei Institute beteiligt. Institut 1 führte vier, Institut 3 führte insgesamt acht Versuche durch.

Die mittlere Abwitterung der Probekörper ist mit 2,1 M.-% nach 100 FTW etwas höher als bei den Versuchen mit reinem Portlandzement.

Bei der Auswertung wurde eine systematische Abweichung der Abwitterungen vom Mittelwert um den Faktor 10 festgestellt. So wiesen Probekörper bei Institut 1 nach 100 FTW

eine durchschnittliche Abwitterung von 5,4 M.-% auf, während die Probekörper bei Institut 3 durchschnittlich nur 0,5 M.-% verloren. Der Variationskoeffizient der Versuche innerhalb Institut 1 betrug 5 %, bei Institut 3 wurden 53 % ermittelt. Die Abweichung der Variationskoeffizienten und der daraus resultierende bessere Bewertung des Instituts 1 ist durch die hohen Abwitterungen begründet. Beide Institute weisen in etwa vergleichbare Standardabweichungen auf (vgl. auch Kapitel 2.3). Insgesamt deuten die Ergebnisse auf eine systematische Abweichung zwischen Institut 1 und Institut 3 hin.

Nach den vorhandenen Protokollen und Untersuchungsberichten sind die Differenzen nicht durch eine unterschiedliche Versuchsdurchführung begründet. Es ist aber denkbar, dass dennoch durch das Vorliegen verschiedener Prüfgeräte (unterschiedliche Kühlleistung der Truhe, unterschiedliche Luftdurchwirbelung etc.) systematische Abweichungen zwischen den Instituten erreicht werden.

Ein weiterer Grund für eine derartige systematische Abweichung dieser beiden Institute kann in der Verwendung von Zementen unterschiedlicher Hersteller liegen. So sind die in Institut 3 untersuchten Zemente zwar aus verschiedenen Werken, allerdings vom gleichen Zementhersteller. Daher kann zwar von unterschiedlichen Zementklinkern ausgegangen werden, es ist aber möglich, dass durch die Zugabe einer reaktiveren Flugasche oder eines reaktiveren Hüttensandes niedrigere Abwitterungen zustande kommen. Dieser Einfluss der Zumahlstoffe wirkt sich durch die Konzentration einzelner Zementhersteller direkt auf die Abwitterungen der Institute aus.

Bei den Zulassungsversuchen von Institut 1 wurden dagegen Zemente unterschiedlicher Hersteller und damit wohl auch unterschiedliche Zumahlstoffe verwendet.

Beim Vergleich der 28-Tage-Druckfestigkeit ist allerdings kein signifikanter Einfluss der Zumahlstoffe zu erkennen. Die Betone wiesen bei Institut 1 eine durchschnittliche Festigkeit von 38 N/mm² auf, bei Institut 3 wurde eine Druckfestigkeit von durchschnittlich 42 N/mm² erreicht.

5.2.1.4 PKZ 35 F, w/z = 0,60, keine Luftporen

Im Folgenden sollen die Abwitterungen von Betonen mit Portlandkalksteinzement (w/z-Wert = 0,60; keine Mikroluftporen) verglichen werden.

Aus den ursprünglichen Daten wurden 3 Versuchsreihen nicht verwendet, da sie nach nur 50 Frost-Tau-Wechseln vollständig zerstört waren (Abwitterung > 10 M.-%) und der Versuch

damit beendet wurde. Eine Erklärung hierfür konnte aus den vorliegenden Protokollen nicht gefunden werden. Insgesamt gehen in die Auswertung 20 Mischungen von vier Prüfinstituten ein.

Die Auswertung der Zulassungsversuche mit Portlandkalksteinzement ist erschwert durch den hohen Einfluss des Kalksteinmehls auf den Frostwiderstand. So ist bekannt, dass Beton mit Kalksteinmehl mit höherem Kohlenstoffgehalt höhere Abwitterungen erreicht. Über die Zusammensetzung der Zemente und des Kalksteinmehls liegen allerdings keinerlei Informationen vor.

In Abbildung 14 sind die Abwitterungen der Einzelversuche, der Mittelwert der Abwitterungen sowie der Variationskoeffizient in Abhängigkeit der mittleren Abwitterung dargestellt.

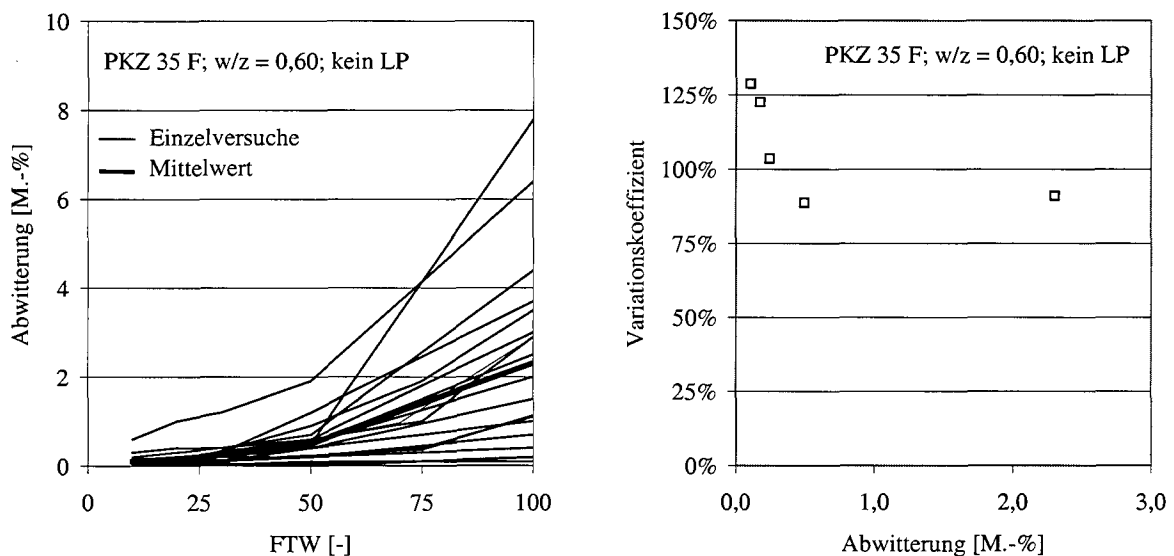


Abbildung 14: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem Würfelverfahren;
(PKZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

Schon bei den Abwitterungen der Einzelversuche ist eine große Streuung zu erkennen. So werden teilweise Abwitterungen von über 200 % über dem Mittelwert erreicht. Insgesamt wird ein Variationskoeffizient von 91 % bei der maximalen mittleren Abwitterung nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt.

Im Folgenden soll dennoch die Abhängigkeit der Ergebnisse von den einzelnen Prüfanstalten untersucht werden. Dazu sind die gemittelten Versuchsergebnisse der verschiedenen Institute in Abbildung 15 aufgeführt. Berücksichtigt wurden wiederum nur Institute mit mehr als drei Versuchsreihen.

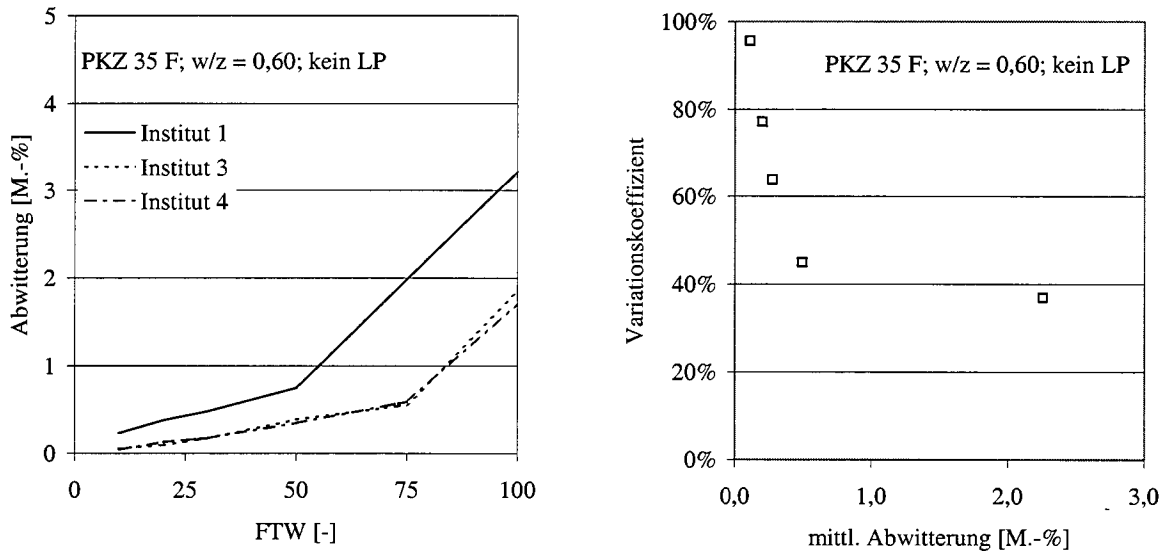


Abbildung 15: Mittlere Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) der drei Institute;
(Würfelverfahren; PKZ 35 F; $w/z = 0,60$; kein LP)

Die Abwitterungen von Institut 1 sind durchwegs fast doppelt so hoch wie die der anderen zwei Institute, bei denen die Abwitterung fast identische Verläufe aufweist.

Die Einzelergebnisse, die in den Labors durchgeführt worden sind, und die dazugehörigen Variationskoeffizienten sind in Abbildung 16 bis Abbildung 17 dargestellt.

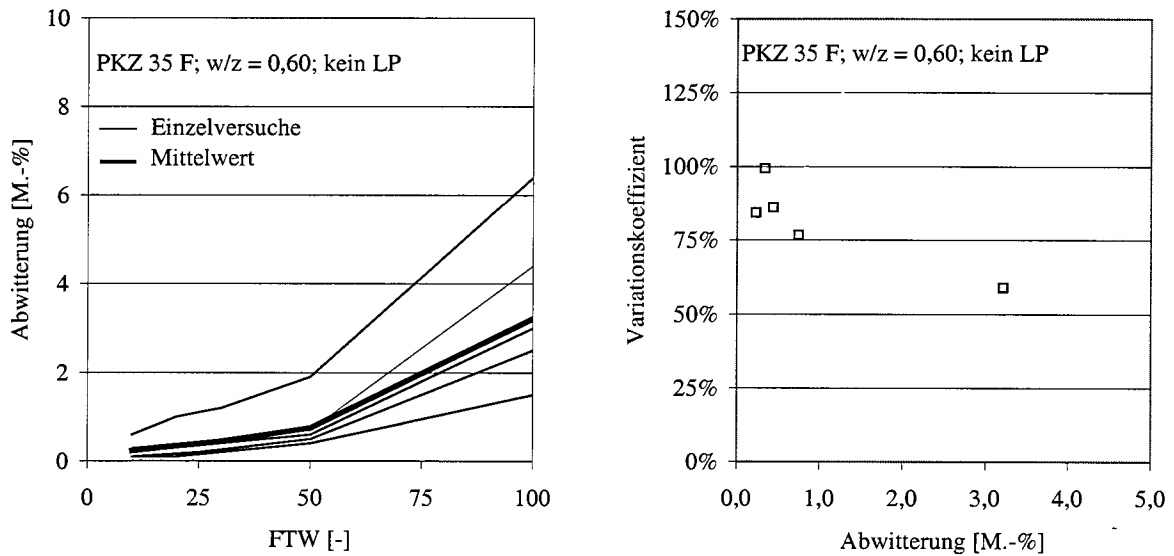


Abbildung 16: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 1 (Würfelverfahren; PKZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

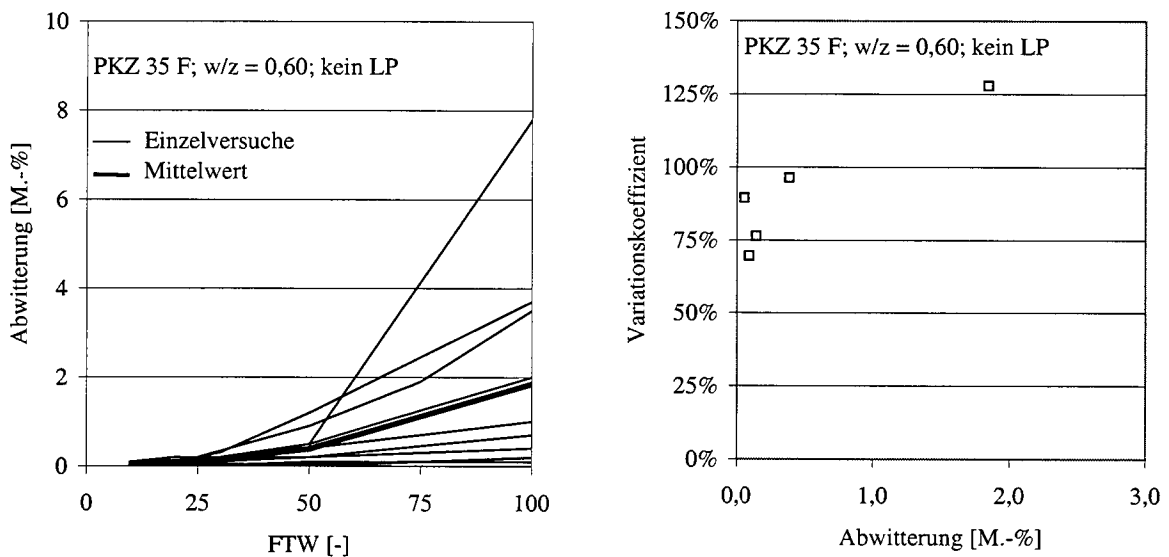


Abbildung 17: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 3; (Würfelverfahren; PKZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

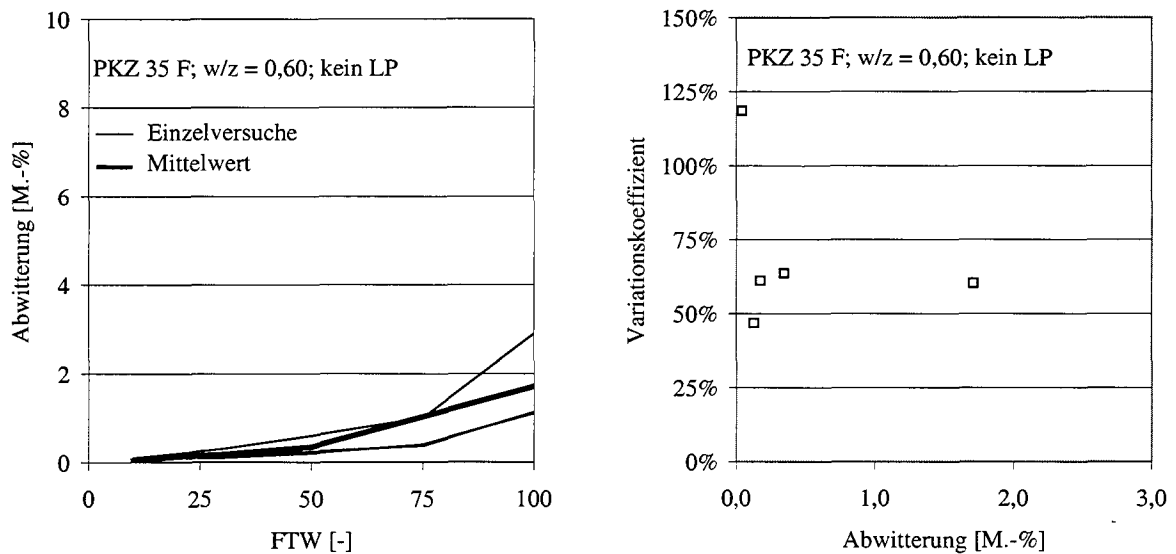


Abbildung 18: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 4 (Würfelverfahren; PKZ 35 F; w/z = 0,60; kein LP)

Die Streuungen sind bei Institut 4 mit einer Standardabweichung von 60 % nach 100 FTW am niedrigsten. Bei Institut 1 wird zum gleichen Zeitpunkt bei deutlich höheren Abwitterungen ein Variationskoeffizient von 59 % erreicht, Institut 3 weist mit 128 % den signifikant größten Variationskoeffizienten auf. Lässt man bei der Auswertung den Versuch mit einer Abwitterung von 7,8 M.-% nach 100 FTW unberücksichtigt, wird ein immer noch sehr großer Variationskoeffizient von 109 % erreicht.

5.2.1.5 Zusammenfassung Würfelverfahren

Im Rahmen der Zulassungsprüfungen für neue Zemente müssen die Zemente hinsichtlich des Frostwiderstandes untersucht werden. Eine Zuordnung der ausgewerteten Betonmischungen auf die beteiligten Institute enthält Tabelle 8.

Tabelle 8: Zuordnung der ausgewerteten Betonmischungen aus den Zulassungsversuchen

Institut	Anzahl der untersuchten Betonmischungen für...		
	PZ 35 F	FAHZ 35 F	PKZ 35 F
[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
Institut 1	6	4	6
Institut 2	5	-	-
Institut 3	10	8	11
Institut 4	-	-	4
Institute 5 - 8	4	-	3

In Tabelle 9 sind die mittleren Abwitterungen und der dazugehörige Variationskoeffizient innerhalb des jeweiligen Institutes und in ihrer Gesamtheit nach 100 FTW dargestellt.

Tabelle 9: Mittlere Abwitterung und Variationskoeffizient nach 100 FTW

Institut	PZ 35 F		FAHZ 35 F		PKZ 35 F	
	Abw.	v	Abw.	v	Abw.	v
[-]	[M.-%]	[%]	[M.-%]	[%]	[M.-%]	[%]
1	2	3	4	5	6	7
Institut 1	2,02	69	5,35	5	3,22	59
Institut 2	1,52	54	-	-	-	-
Institut 3	0,91	82	0,53	53	1,84	128
Institut 4	-	-	-	-	1,71	60
Alle Versuche	1,39	71	2,13	112	2,31	91

Auffällig ist die große Abweichung der Ergebnisse zwischen den Instituten. Hierbei liegt anscheinend zwischen Institut 1 und Institut 3 eine systematische Abweichung vor. Bei allen untersuchten Zementzulassungsversuchen wurden bei Institut 1 deutlich höhere Abwitterungen als bei Institut 3 gemessen.

Liegen die Abwitterungen der einzelnen Institute in einer ähnlichen Größenordnung (z.B. Zulassungsversuche PKZ), so ist die Gesamtstreuung nicht viel größer als die Streuung innerhalb der Labors. Dagegen wirken sich sehr unterschiedliche Ergebnisse zwischen den Labors, wie es bei den Zulassungsversuchen des FAHZ der Fall ist, deutlich negativ auf den Variationskoeffizienten aller Versuche aus.

Ein Grund für die deutlichen Unterschiede der gemessenen Abwitterungen kann darin begründet sein, dass Zementwerke bzw. -hersteller neue Zemente normalerweise im gleichen Institut prüfen lassen. Dadurch wirken sich eventuelle Einflüsse des Zementes oder der Zusatzstoffe (Reaktionsfähigkeit der Flugasche; Ausbildung der Porenstruktur etc.) auf die Abwitterungen, die innerhalb dieses Institutes gemessen werden, systematisch aus. Deshalb kann die Materialstreuung zwischen den Instituten nicht als vernachlässigbar angenommen werden. Eine getrennte Ermittlung der Prüfstreuung zwischen den Labors, bzw. der Angabe der „Prüfschärfe“ eines Institutes ist aus diesen Gründen nicht eindeutig.

Eine derartige Bestimmung dieser Kenngrößen ist nur durch die Durchführung eines Ringversuches sinnvoll, bei dem gezielt einzelne Parameter wie Materialstreuung etc. konstant gering gehalten werden und somit alle benötigten Eingangsgrößen gezielt ermittelt werden können.

5.2.2 Frost-Tausalz-Widerstand (Verfahren nach ÖNORM B 3303)

5.2.2.1 Allgemeines

Bei der Zulassung neuer Zemente oder Zusatzstoffe muss der Frost-Tausalz-Widerstand des Betons mit den zuzulassenden Stoffen an Beton mit bzw. ohne Mikroluftporen bestimmt werden (vgl. Kap. 5.1).

Im Folgenden sollen analog der Auswertung der Frostversuche die Abwitterungen von Mischungen mit ähnlichen Zusammensetzungen, d.h. mit gleicher Rezeptur, aber unterschiedlichen Ausgangsstoffen, verglichen werden.

5.2.2.2 PZ 35 F; w/z = 0,50; LP

In Abbildung 19 sind die Abwitterungen und der Variationskoeffizient der ausgewerteten Portlandzement-Versuche mit den LP-Betonen aufgeführt.

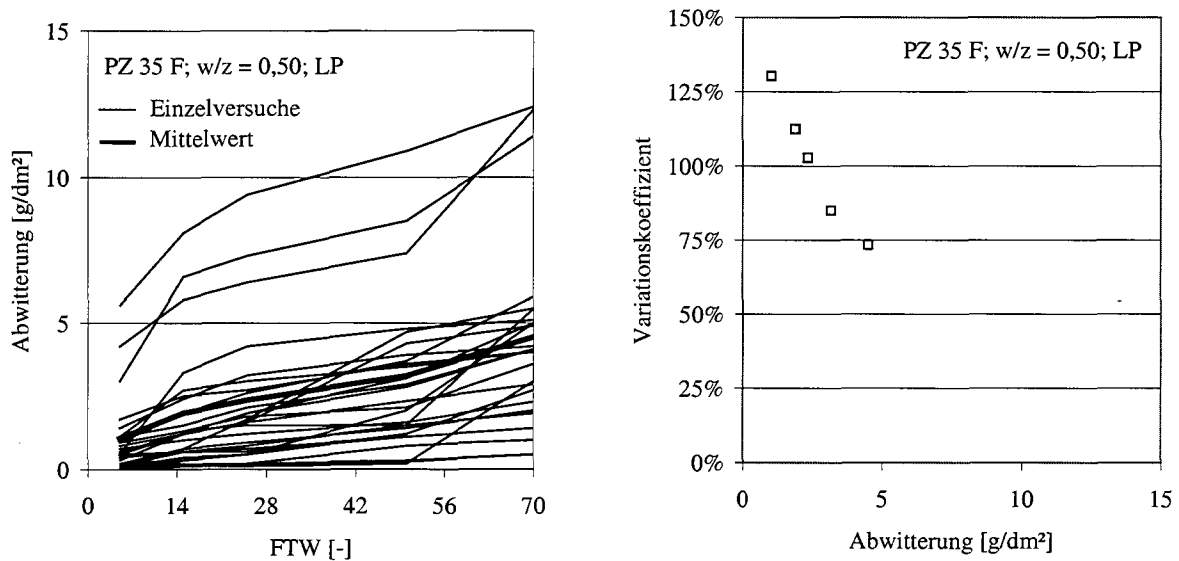


Abbildung 19: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem ÖNORM-Verfahren; (PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

Drei der Versuche zeigten erhöhte Abwitterungen von über 10 g/dm². Diese Betone weisen v.a. bis zum 14. FTW eine erhöhte Anfangsabwitterung auf, der Verlauf der Abwitterung ab diesem Zeitpunkt verläuft dagegen parallel zu den übrigen Betonen. Ein Grund hierfür könnte in einer für den Frost-Tausalz-Widerstand ungünstigeren Nachbehandlung liegen. Allerdings ergibt sich auch ohne Berücksichtigung dieser drei Zulassungsversuche eine Spannweite der Abwitterungen nach 70 FTW zwischen 0,5 und 5,9 g/dm², bei einer mittleren Abwitterung von 4,5 g/dm². Der Variationskoeffizient ist mit 75 % nach 70 FTW entsprechend hoch.

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse der oben aufgeführten Versuche nach den einzelnen Instituten aufgeschlüsselt. Institut 1 führte hierbei zehn, Institut 3 vierzehn und Institut 4 drei Zulassungsversuche durch.

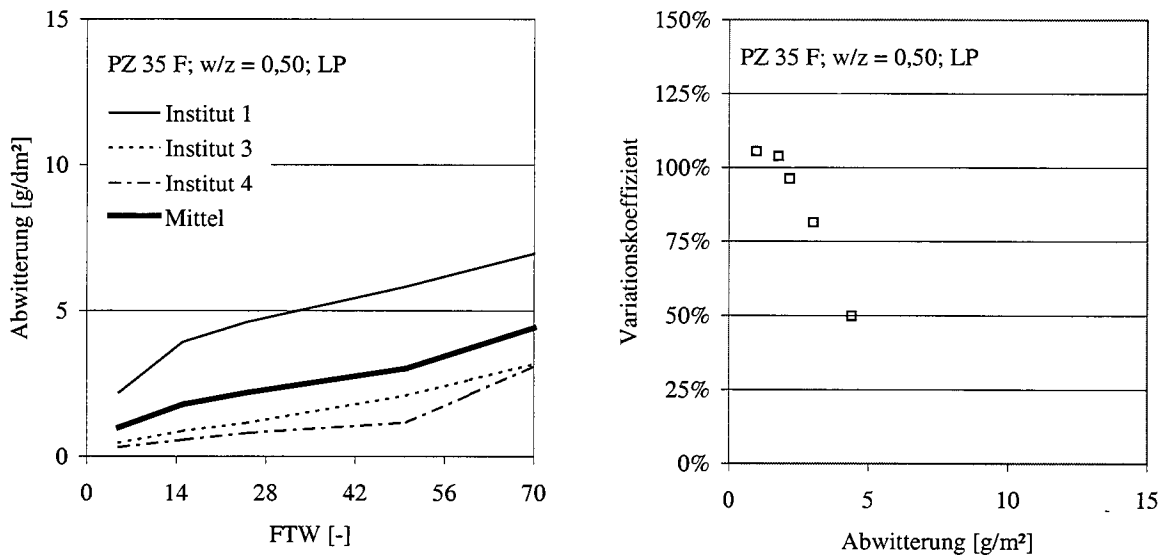


Abbildung 20: Mittlere Abwitterungen (links) und Variationskoeffizienten (rechts) der drei Institute nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F; $w/z = 0,50$; LP)

Während in Institut 3 und 4 relativ ähnliche Abwitterungsverläufe gemessen wurden, wurden bei Institut 1 deutlich höhere Abwitterungen über den gesamten Zeitraum der Prüfung festgestellt. Aus den vorliegenden Prüfprotokollen und Untersuchungsberichten war dieser Unterschied der Messungen nicht zu erklären. Auch war keine eindeutige Zuordnung der Ergebnisse zu einzelnen Zementwerken und damit zu den unterschiedlichen Zementklinkern zu erkennen.

Durch die ähnlichen Abwitterungen nach 70 FTW in Institut 3 und 4 wird zwischen den Instituten 1, 3 und 4 ein Variationskoeffizient von 50 % erreicht.

In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Abwitterungsverläufe und die dazugehörigen Variationskoeffizienten der Institute 1 und 3 dargestellt.

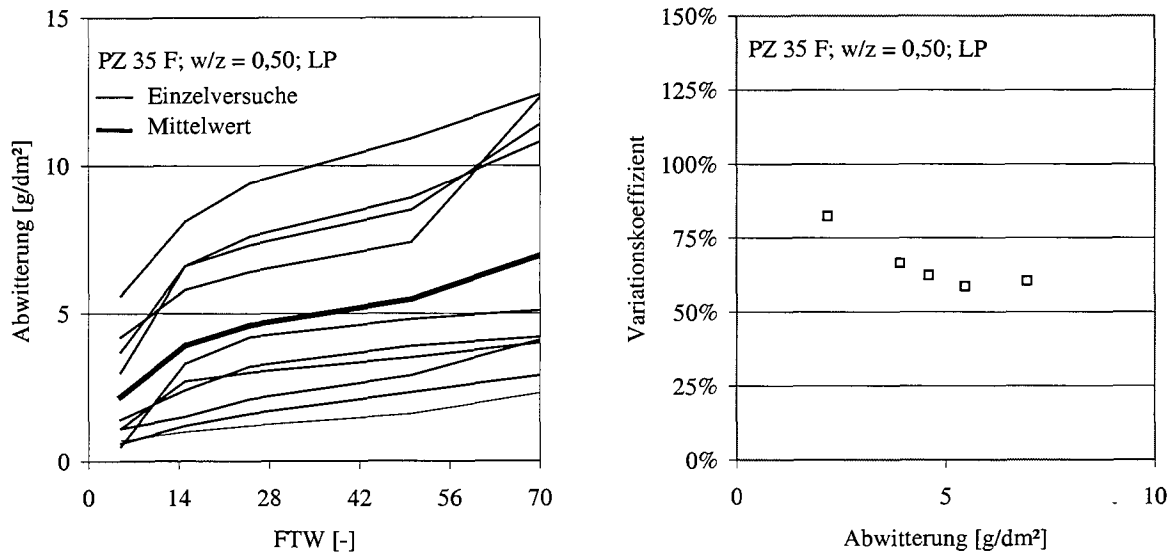


Abbildung 21: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 1 nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

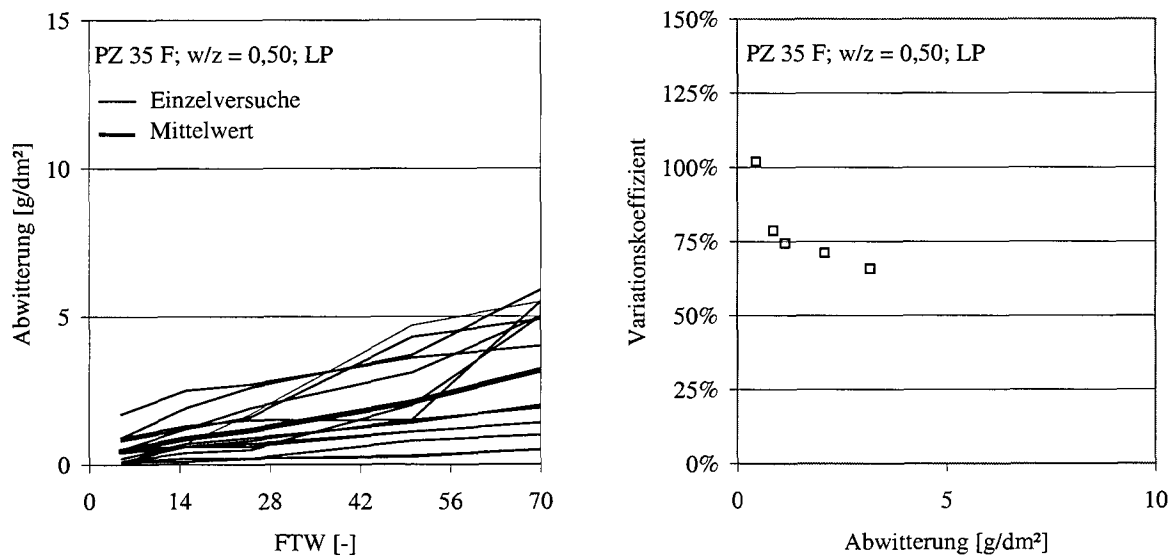


Abbildung 22: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 3 nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

In Institut 1 wurden tendenziell größere Abwitterungen als in Institut 3 gemessen. In Institut 1 waren die höchsten Abwitterungen mit nahezu 13 g/dm² nach 70 FTW 5 mal größer als die minimal gemessenen Abwitterungen mit 2,3 g/dm².

Bei Institut 3 waren die Abwitterungen geringer, die Schwankungsbreite lag zwischen 0,5 und 5,1 g/dm². Institut 1 erreichte nach 70 FTW einen Variationskoeffizienten von 60 %, während bei Institut 3 nach der gleichen Zeit ein Variationskoeffizient von 66 % berechnet wurde.

5.2.2.3 FAHZ 35 F; w/z = 0,50; LP-Beton

In Abbildung 23 sind die Abwitterungen aller in den Zulassungsversuchen durchgeführten Frost-Tausalz-Versuche der LP-Betone mit FAHZ 35 F als Bindemittel aufgeführt. Es lagen insgesamt 6 Versuche aus zwei Prüfinstituten vor.

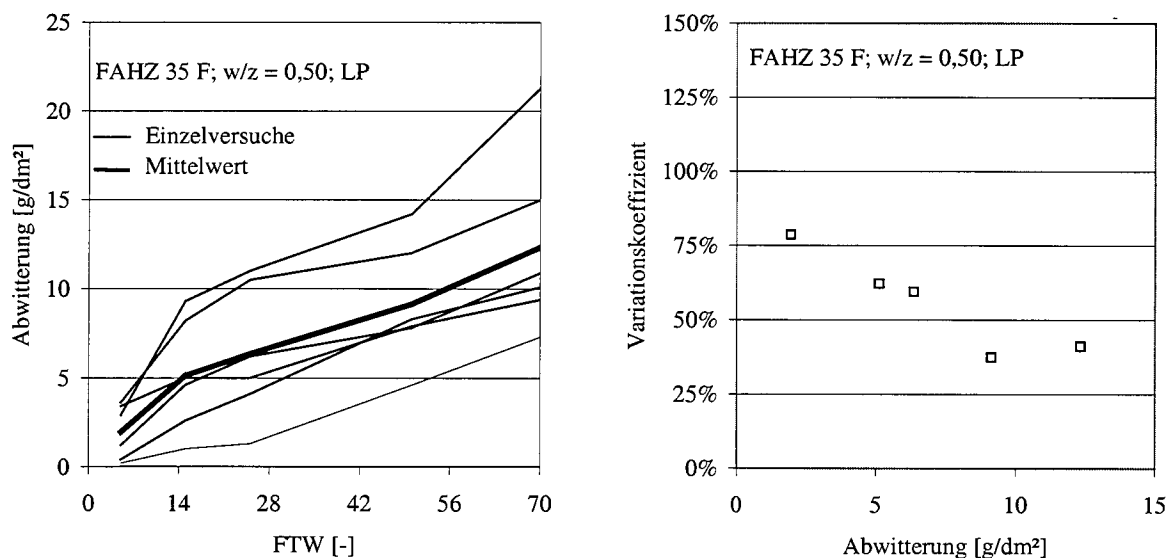


Abbildung 23: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem ÖNORM-Verfahren; (FAHZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

Die hier vorliegenden Betone wiesen mit im Mittel 12,3 g/dm² nach 70 FTW deutlich höhere Abwitterungen als die Betone mit Portlandzement auf. Die einzelnen Versuche differierten mit einer 300 %-tigen Spanne zwischen minimal und maximal ermittelten Abwitterungen weniger als bei den Versuchen mit den Portlandzementen. Dies wird auch im Variationskoeffizienten deutlich, der erwartungsgemäß aufgrund der höheren absoluten Abwitterung mit ca. 40 % im Vergleich zu den oben aufgeführten Zulassungsversuchen geringer ausfiel.

In Abbildung 24 sind die ermittelten Abwitterungen der beteiligten Institute und der Gesamtmittelwert sowie die dazugehörigen Variationskoeffizienten dargestellt.

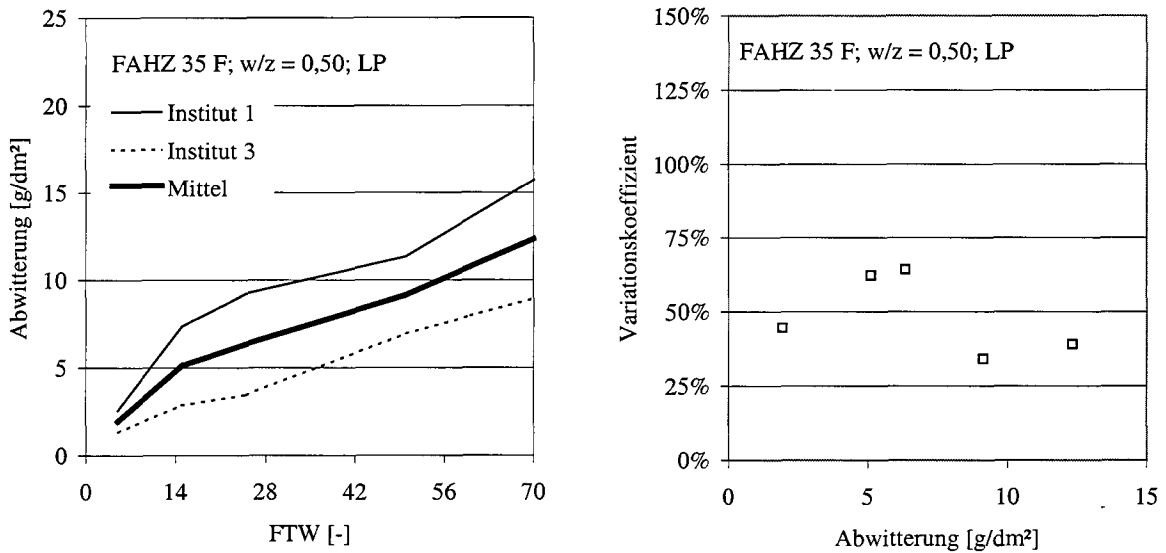


Abbildung 24: Mittlere Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) der zwei Institute nach dem ÖNORM-Verfahren (FAHZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Abwitterungen und der dazugehörige Variationskoeffizient, berechnet aus den durchgeführten Versuchen der einzelnen Prüfanstalten, aufgeführt. Jedes Institut führte hierbei drei Versuche durch.

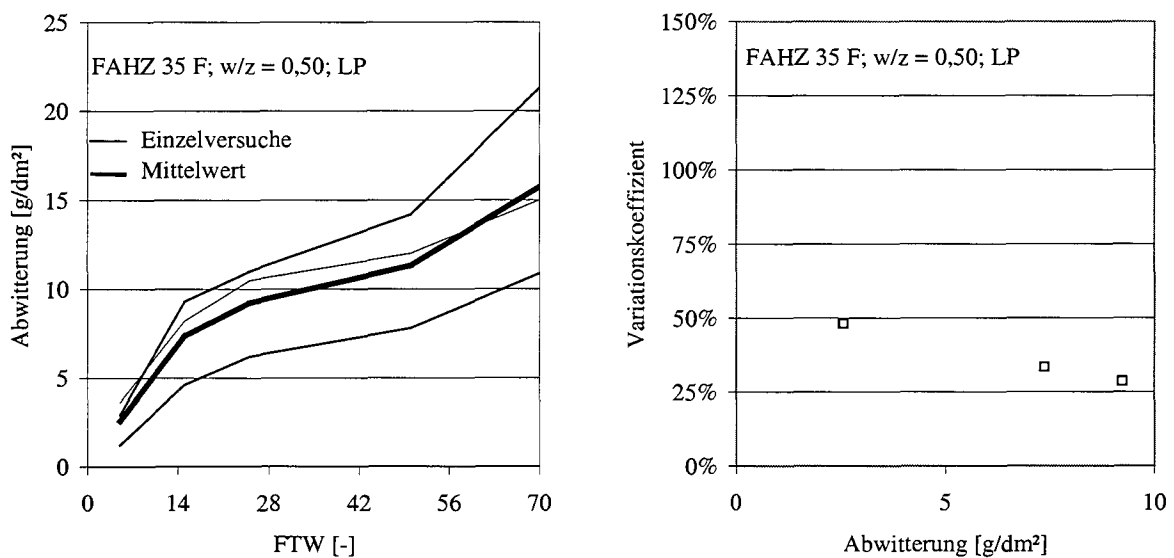


Abbildung 25: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 1 nach dem ÖNORM-Verfahren (FAHZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

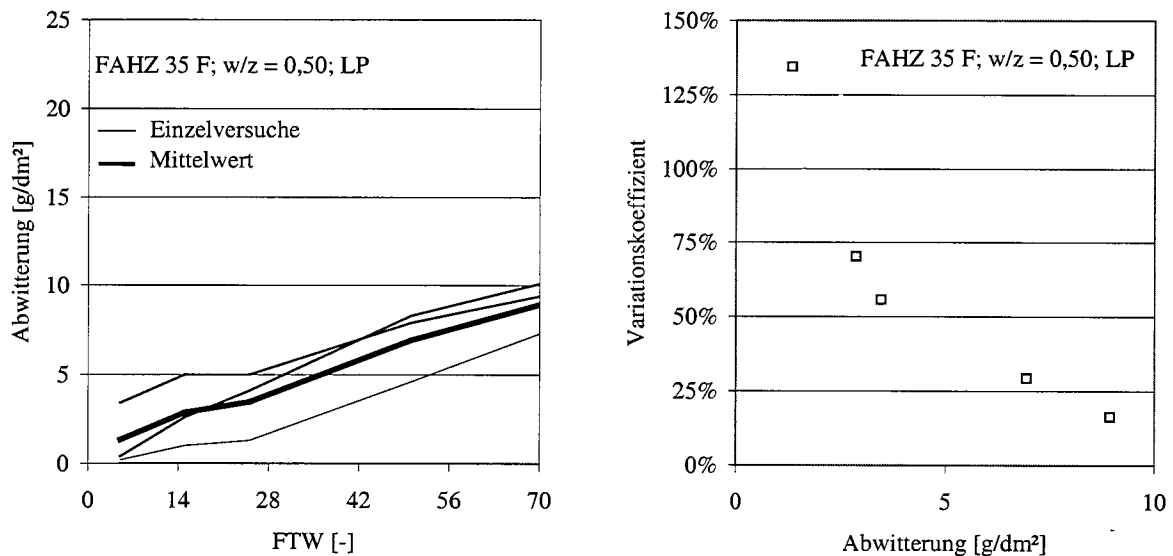


Abbildung 26: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 3 nach dem ÖNORM-Verfahren (FAHZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

Wie die Mittelwerte liegen auch die Einzelwerte der Versuche von Institut 1 deutlich über den Werten von Institut 3.

Institut 1 prüfte zu verschiedenen Zeitpunkten zweimal Zement des selben Werkes, allerdings stammten diese beiden Zemente aus unterschiedlichen Chargen. Bei Institut 3 waren alle Zulassungsversuche des FAHZ von einem Zementhersteller, jedoch aus jeweils unterschiedlichen Werken. Durch diese nicht zufällige Verteilung der Zemente auf die Prüfinstitute ist eine Bewertung der Institute hinsichtlich ihrer Schärfe in der Durchführung nicht eindeutig.

5.2.2.4 PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP-Beton

In Abbildung 27 bis Abbildung 31 sind, analog der vorangegangenen Auswertungen, die Abwitterungen der Einzelversuche, die Mittelwerte der Versuche der einzelnen Institute und die Einzelversuche aufgeschlüsselt nach den Instituten und die jeweils dazugehörigen Variationskoeffizienten der Versuche mit Portlandkalksteinzement dargestellt.

Es lagen insgesamt 23 Versuchsreihen vor, von denen zwei wegen eines nicht nachvollziehbaren vorzeitigen Abbruches nicht in der Auswertung berücksichtigt wurden. Die

restlichen 21 Versuche wurden von drei unterschiedlichen Prüfanstalten (Institut 1, Institut 3, Institut 4) durchgeführt.

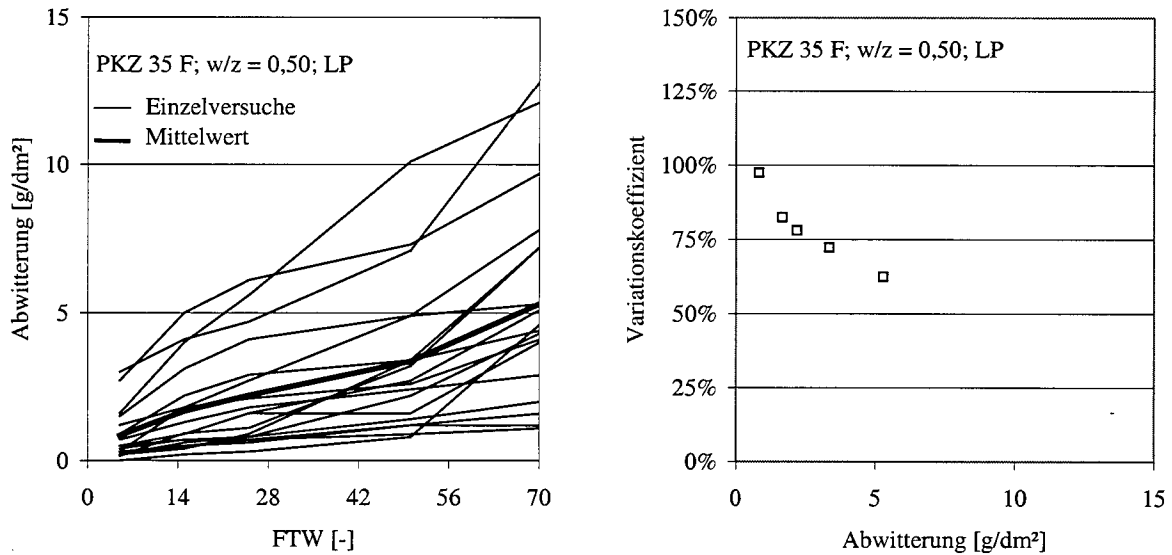


Abbildung 27: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem ÖNORM-Verfahren; (PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

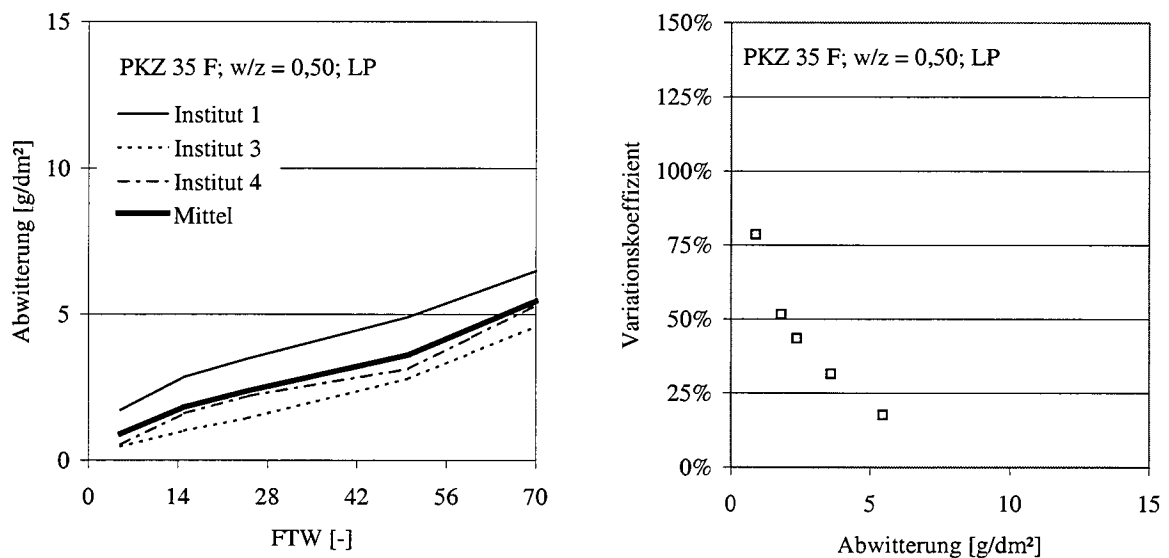


Abbildung 28: Mittlere Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) der drei Institute nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

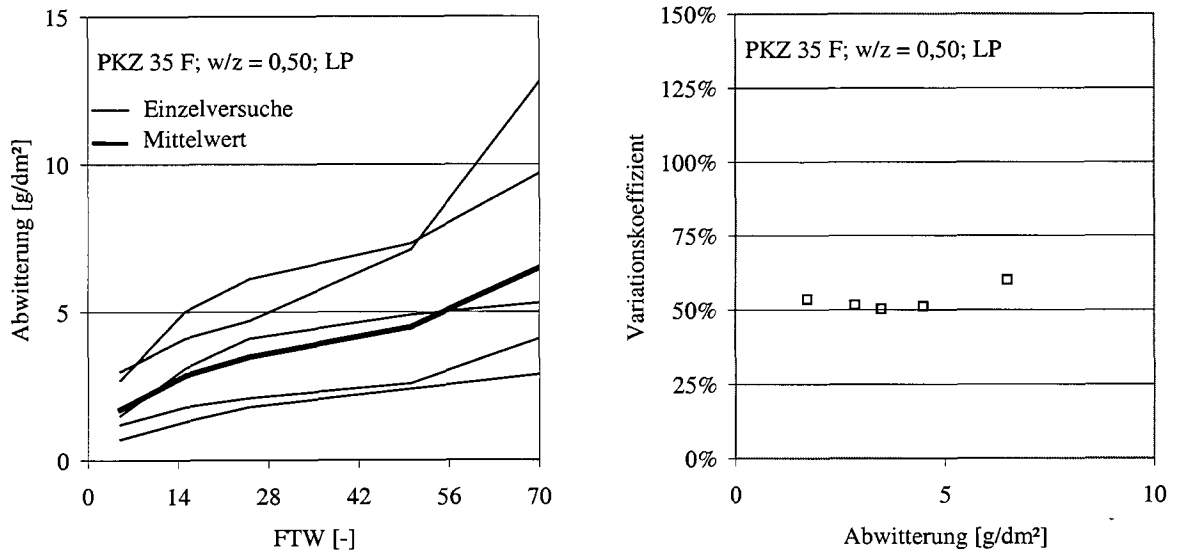


Abbildung 29: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 1 nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

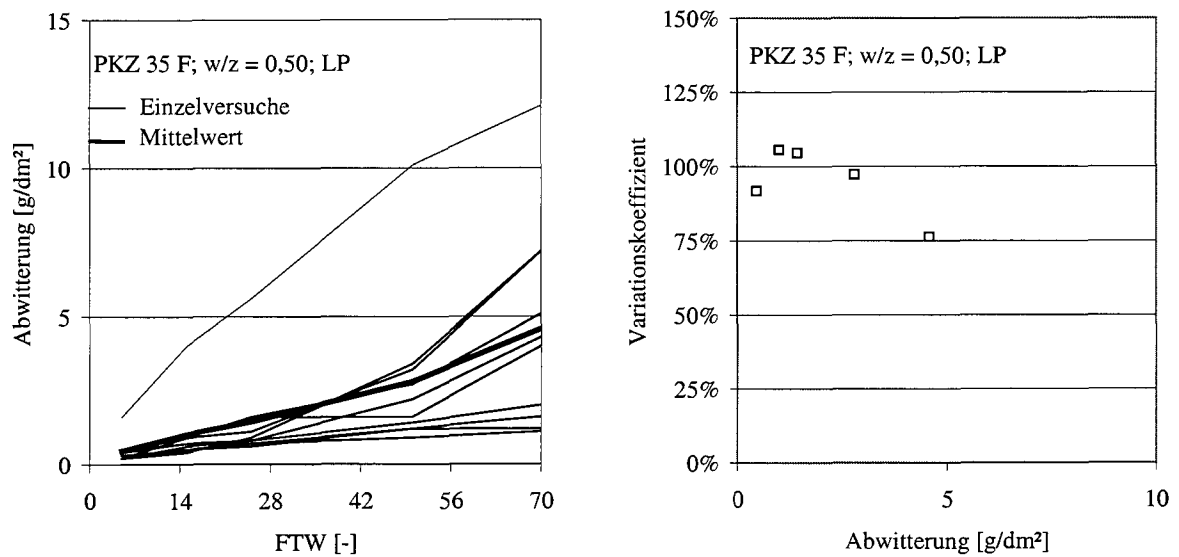


Abbildung 30: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 3 nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

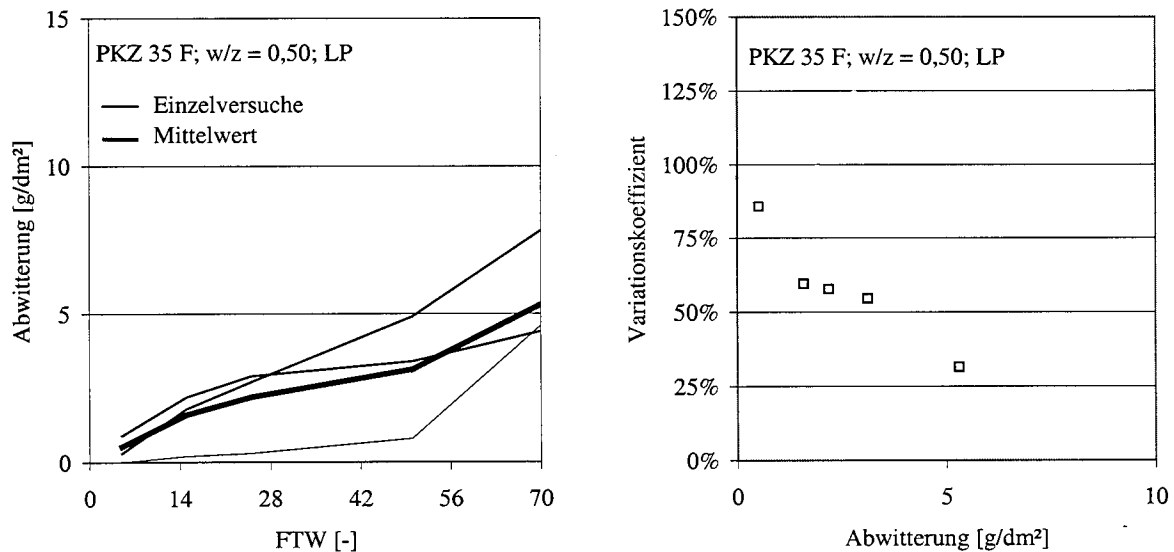


Abbildung 31: Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) von Institut 4 nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

Die Abwitterungen lagen mit durchschnittlich 5,3 g/dm² leicht über der mittleren Abwitterung der Portlandzemente, aber deutlich unter der der Flugaschehüttensandzemente. Die Abwitterungen schwankten von 1,1 bis 12,8 g/dm² nach 70 FTW. Der Variationskoeffizient nahm mit steigender Abwitterung ab, nach 70 FTW wird damit ein Variationskoeffizient von 62 % berechnet. Die mittleren Abwitterungen der drei beteiligten Institute liegen in ähnlichen Größenordnungen.

Die Variationskoeffizienten innerhalb der Institute liegen zwischen 31 % (Institut 4) und 76 % (Institut 3). Die Ergebnisse einer Prüfreihe von Institut 3 waren signifikant größer als die übrigen Prüfreihe. Ein Grund hierfür konnte nicht gefunden werden.

Auch eine Erklärung für die höheren Abwitterungen bei Institut 1 war aus den vorliegenden Protokollen und Untersuchungsberichten nicht ersichtlich. Es war keine Abhängigkeit der Ergebnisse von einem Zementwerk bzw. -hersteller gegeben.

5.2.2.5 Betone ohne künstlich eingebrachte Mikroluftporen

Im folgenden Diagramm ist die Abwitterung der Vergleichsmischungen PZ 35 F, $w/z = 0,50$, ohne Verwendung eines LP-Bildners dargestellt.

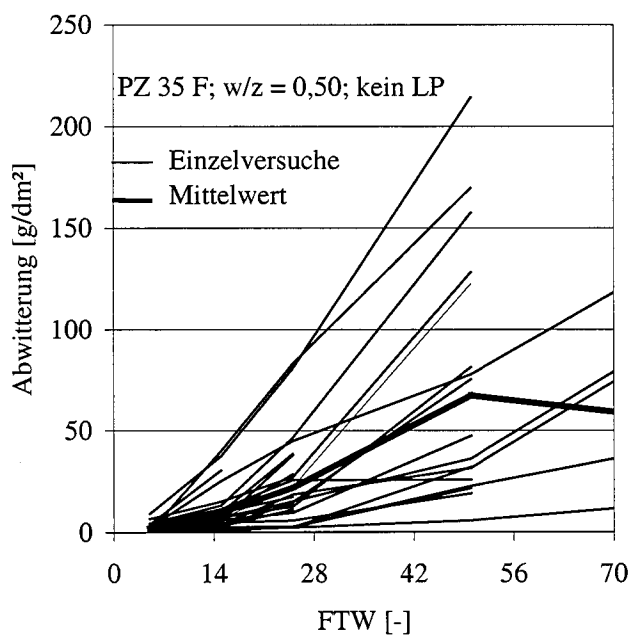


Abbildung 32: Abwitterung nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F; $w/z = 0,50$; kein LP)

Zu erkennen ist, dass die Abwitterungen im Vergleich zu den Betonen mit LP-Mittel deutlich größer sind. Bei den meisten Prüfungen wurde vor den eigentlich geforderten 70 FTW der Versuch abgebrochen.

Ebenso verhält es sich auch bei Betonen mit den Zementen der anderen Zulassungsversuche (FAHZ, PKZ), hier lagen die Abwitterungen teilweise noch höher. Da angenommen werden kann, dass bei derart hohen Abwitterungen eine korrekte und störungsfreie Versuchsdurchführung durch ein Ablösen der seitlichen Abdichtung, Undichtigkeiten der Oberfläche etc. nicht mehr gewährleistet ist und eine Auswertung des Mittelwertes und der Streuung durch die über die FTW nicht konstante Versuchsanzahl problematisch ist (vgl. Abbildung 32), werden Betone ohne Luftporenbildner nicht weiter in die Auswertung der Frost-Tausalz-Versuche mit einbezogen.

5.2.2.6 Zusammenfassung Frost-Tausalz-Widerstand (ÖNORM B 3303)

Die Zuordnung der im Rahmen der Zulassung neuer Zemente und Zusatzstoffe durchgeführten Versuche ist in Tabelle 10 aufgeführt. Hierbei wurden wegen der hohen Abwitterungen und der damit verbundenen Versuchsabbrüche der Betone ohne Mikroluftporen nur die Ergebnisse der Frost-Tausalz-Versuche der LP-Betone berücksichtigt. In Tabelle 11 sind die mittleren Abwitterungen und der dazugehörige Variationskoeffizient innerhalb des jeweiligen Instituts nach 70 FTW dargestellt.

Tabelle 10: Zuordnung der ausgewerteten Betonmischungen aus den Zulassungsversuchen

Institut	Anzahl der untersuchten Betonmischungen für...		
	PZ 35 F	FAHZ 35 F	PKZ 35 F
[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4
Institut 1	10	3	5
Institut 2	1	-	-
Institut 3	14	3	12
Institut 4	3	-	4
sonstige Institute	-	-	-

Tabelle 11: Mittlere Abwitterung und Variationskoeffizient nach 70 FTW

Institut	PZ 35 F		FAHZ 35 F		PKZ 35 F	
	Abw.	v	Abw.	v	Abw.	v
	[g/dm ²]	[%]	[g/dm ²]	[%]	[g/dm ²]	[%]
1	2	3	4	5	6	7
Institut 1	7,0	60	15,7	33	6,5	60
Institut 2	-	-	-	-	-	-
Institut 3	3,2	66	8,9	16	4,6	76
Institut 4	3,1	15	-	-	5,3	31
Gesamt	4,5	73	12,3	41	5,3	62

Erwartungsgemäß wies – analog zu den Ergebnissen des Frostwiderstandes (vgl. Abschnitt 5.2.1) – der Beton mit Portlandzement die geringsten Abwitterungen auf. Die Abwitterungen des Betons mit Portlandkalksteinzement lagen in ähnlichen Bereichen oder nur geringfügig darüber, während bei dem Beton mit Flugaschehüttenzement der deutlich geringste Frost-Tausalz-Widerstand festgestellt wurde.

Weiterhin war zu erkennen, dass die Streuungen innerhalb der Versuchsergebnisse mit steigender mittlerer Abwitterung sinken. Dies gilt sowohl für den Variationskoeffizienten über alle Versuche, als auch für den Variationskoeffizienten über die Versuche innerhalb eines Institutes.

Beim Vergleich der mittleren Abwitterungen eines Institutes lieferten Institut 3 und 4 ähnliche Werte, während in Institut 1 durchweg deutlich höhere Abwitterungen bestimmt wurden. Während durch die Konzentration einzelner Zementhersteller auf bestimmte Institute durch gleiche Zusatzstoffe (Flugasche, Hüttensand) systematische Abweichungen der Institute zueinander entstehen können, ist dies bei Portlandzement nicht und bei Portlandkalksteinzement nur geringfügig zu erwarten. Bei den Versuchen mit Portlandkalksteinzement lagen die Abwitterungen von Institut 1 über 40 %, bei den Versuchen mit Portlandzement sogar fast 120 % über den Abwitterungen von Institut 3. Dies könnte auf eine systematische Abweichung im Versuchsablauf dieser beiden Versuchsanstalten hinweisen.

Ebenfalls auffällig war eine unterschiedlich hohe Anfangsabwitterung sowohl innerhalb, als auch zwischen den Instituten, die zu den großen Unterschieden der Abwitterungen bis zum Versuchsende führen. Die Abwitterungen verlaufen dagegen nach 14 FTW meist parallel (vgl. z.B. Abbildung 23). Ein Grund hierfür kann in einer hohen Streuung der Oberflächenqualität (unterschiedliche Konsistenz des Frischbetons, verschiedene Ausbildung der Porenstruktur im oberflächennahen Bereich durch unterschiedliche Nachbehandlungsqualität etc.) der geprüften Betonprismen liegen.

In Abschnitt 4 wurde gezeigt, dass durch die in der Prüfvorschrift erlaubten Abweichungen der Minimaltemperatur Unterschiede in der Abwitterung von bis zu 8 % je Kelvin entstehen können. Bei der Durchführung nach ÖNORM B 3303 sind Unterschiede der Minimaltemperatur von bis zu 4 K zugelassen. Dies entspricht in etwa einer erwarteten Streuung von 30 %. Nicht untersucht wurden andere Auswirkungen wie Schwankungen der Abkühlgeschwindigkeit etc., die aber nicht zu kritischen Temperaturspannungen und damit nicht zu erhöhten Abwitterungen führen sollten, sofern sie im Rahmen der Prüfvorschrift liegen.

Dennoch sind die Abweichungen der Abwitterungen von bis zu 120 % wohl nicht nur durch Schwankungen der Prüfung innerhalb der erlaubten Grenzen zu erklären. Hier soll im Rahmen von bereits in der Vergangenheit durchgeführten Ringversuchen nach der Ursache gesucht werden.

6 RINGVERSUCHE

6.1 Allgemeines

Im Gegensatz zu Versuchen im Rahmen der Zulassung neuer Zemente und Zusatzstoffe können in Ringversuchen gezielt einzelne Einflüsse auf Prüfverfahren und die dadurch verursachten Streuungen und Unsicherheiten der ermittelten Ergebnisse untersucht werden. Z.B. lässt sich so die Streuung des Ausgangsmaterials und der Proben minimieren, bzw. konstant halten, wodurch die entstehenden Abweichungen direkt der Prüfmethodik zugeordnet werden können.

In der Vergangenheit sind eine Reihe von Ringversuchen zur Untersuchung der Abweichungen von Frost- und Frost-Tausalz-Prüfungen durchgeführt worden. Im Folgenden sollen die wichtigsten Ergebnisse der Ringversuche, die sich mit den in Abschnitt 3 behandelten Prüfverfahren befassen, zusammengefasst und bewertet werden.

6.2 Ringversuch Hannover

6.2.1 Allgemeines

In einem Ringversuch, durchgeführt durch das Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover [14], wurden Frost-Tausalz-Abwitterungen nach dem ÖNORM- und dem Würfelverfahren (vgl. Abschnitt 3) von fünf Prüfanstalten ermittelt und ausgewertet. Eine Zuordnung der Versuchsergebnisse zu den jeweiligen Prüfinstituten war nicht möglich. Die vier untersuchten Rezepturen (vgl. Tabelle 12) sind in Anlehnung an gebräuchliche Straßenbetonmischungen entworfen worden.

Tabelle 12: Im Ringversuch untersuchte Betonmischungen [14]

	Beton 1	Beton 2	Beton 3	Beton 4*
1	2	3	4	5
Zementart	PZ 45 F			
Zement [kg/m ³]	340	340	360	360
w/z-Wert [-]	0,45			
Zusatzmittel	LP	-	LP	LP
LP-Gehalt [Vol.-%]	3,7	1,6	4,1	4,5

* Verwendung von nicht frostbeständigem Zuschlag nach ZTV-Beton, jedoch zulässig nach DIN 1045

Die einzelnen Betone wurden zentral hergestellt und nach den jeweiligen Normen gelagert. In Tabelle 13 sind die dazugehörigen Festbetoneigenschaften aufgeführt.

Tabelle 13: Festbetoneigenschaften der untersuchten Mischungen [14]

	Beton 1	Beton 2	Beton 3	Beton 4
1	2	3	4	5
Druckfestigkeit β_{w28} [N/mm ²]	46	52	44	37
max. Wassereindringtiefe [mm]	11	16	11	12
LP-Gehalt [Vol.-%]	3,7	1,6	4,6	4,4
Abstandsfaktor [mm]	0,17	0,55	0,11	0,14

In Anlehnung an die zum Zeitpunkt gültigen Normen (DIN 1045, ZTV-Beton, ZTV-K 80) und Erfahrungen war folgende Reihung der Betone hinsichtlich deren Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes zu erwarten.

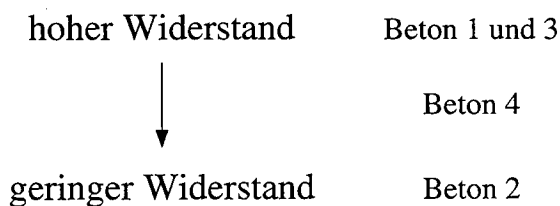


Abbildung 33: erwarteter Frost-Tausalz-Widerstand der Betone 1 bis 4

Beton 1 und 3 können aufgrund ihres niedrigen w/z-Wertes und der Zugabe des LP-Bildners mit einem hohen Widerstand eingestuft werden. Der Zuschlag von Beton 4 erfüllt hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes nicht die Anforderungen der ZTV-Beton und der ZTV-K 80, jedoch noch die diesbezüglichen Anforderungen der DIN 1045. Bei der Mischung 4 wird deshalb ein mittlerer Frost-Tausalz-Widerstand erwartet. Der geringste Widerstand wird aufgrund der fehlenden Luftporen von Mischung 2 erwartet.

6.2.2 Ergebnisse Frost-Tauversuche

In Abbildung 34 sind die Verläufe der Abwitterung nach dem ÖNORM- und dem Würfelverfahren dargestellt.

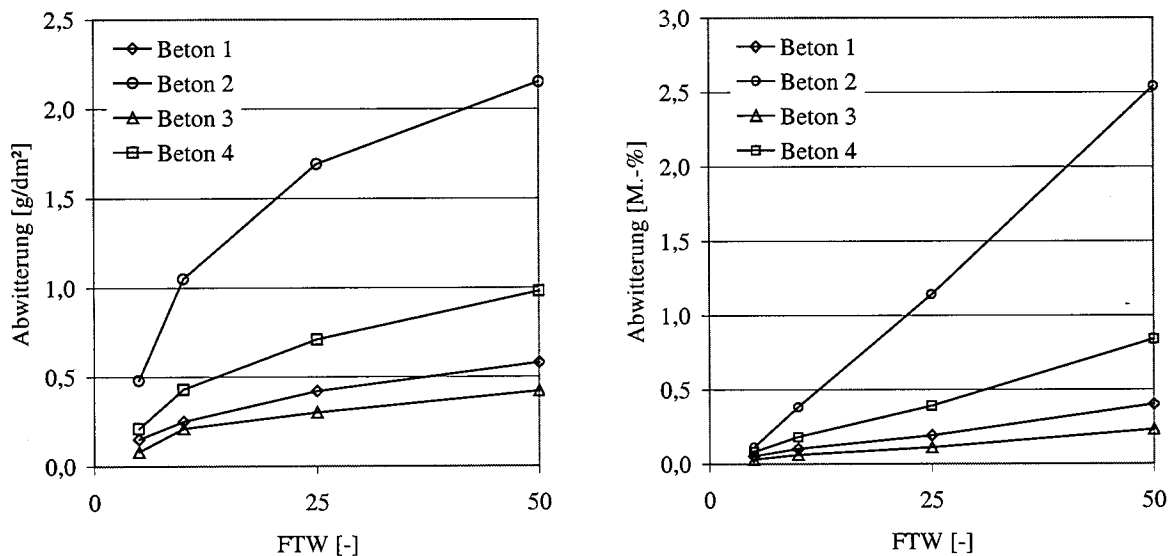


Abbildung 34: Abwitterung nach dem ÖNORM-(links) und dem Würfelverfahren (rechts) nach [14]

Während die Abwitterungen nach dem ÖNORM-Verfahren einen degressiven Verlauf aufwiesen, verliefen die Abwitterung nach dem Würfelverfahren konstant mit zunehmenden FTW.

Die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes beider Verfahren ergab nach 25 und 50 FTW im Mittel die in 6.2.1 erwartete Reihung der Betone. Bei der Auswertung der Versuche wurde nach [14] beim Würfelverfahren in 19 von 20 Fällen (volumetrische und gravimetrische Betrachtung) die erwartete Reihung ermittelt, beim Verfahren nach ÖNORM dagegen nur in 7 von 10.

Unter der Annahme, dass durch die gleichzeitige Herstellung aller Probekörper die Materialstreuung konstant und vernachlässigbar klein ist, beinhaltet die Streuung den Einfluss der fünf verschiedenen Labore und die Prüfstreuung. In Abbildung 35 sind für beide untersuchten Verfahren die Variationskoeffizienten in Abhängigkeit der Abwitterung für die vier verschiedenen Betone aufgetragen.

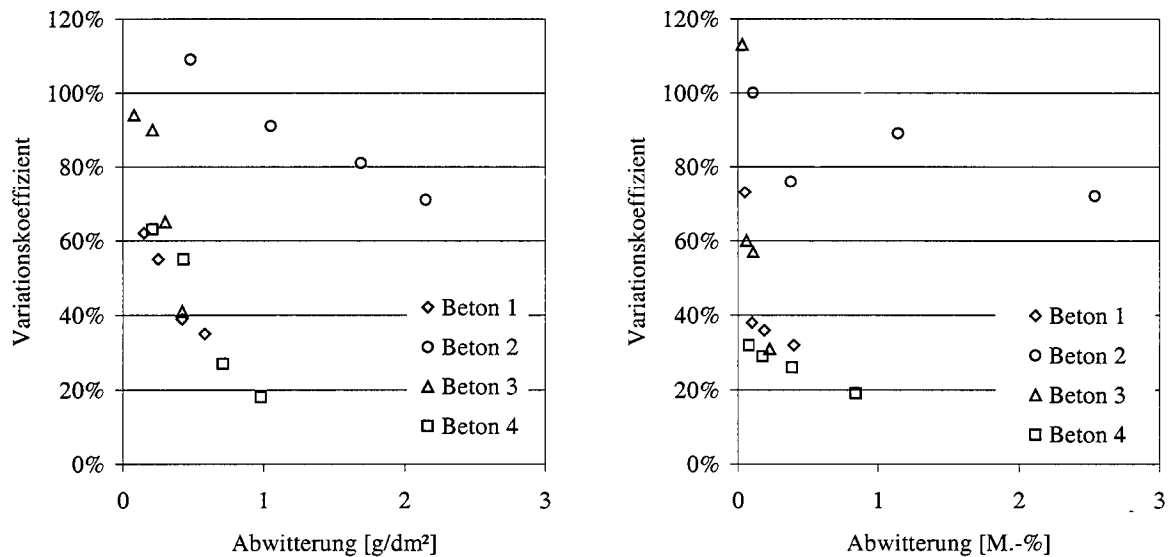


Abbildung 35: Variationskoeffizient beim ÖNORM- (links) und Würfelverfahren (rechts)

In der Regel ist eine Abnahme der Streuung innerhalb eines Betons mit Zunahme der Abwitterung erkennbar. Nicht nachvollziehbar waren die trotz hoher Abwitterung relativ großen Streuungen von Beton 2.

Dadurch ergibt sich für Beton mit geringen Abwitterungen (Beton 1 und 3) beim VDZ-Verfahren ein Variationskoeffizient von ca. 32 %, beim Verfahren nach ÖNORM liegt dieser bei ca. 37 %. Für Beton 2 mit Abwitterungen von 2,5 M.-% nach 50 FTW liegt der Variationskoeffizient für beide untersuchte Verfahren bei etwa 70 %.

6.3 VDZ-Ringversuch I (1992)

6.3.1 Allgemeines

Im Rahmen Ringversuches [15], durchgeführt durch den Verein der Deutschen Zementindustrie, wurden Frost- und Frost-Tausalz-Versuche veranlasst, um die Abweichung der Ergebnisse des Würfelverfahrens [2] abschätzen zu können.

An dem Ringversuch nahmen insgesamt 15 Institute und Prüfanstalten teil, unter denen sich auch die bei den Zulassungsversuchen beteiligten und in Kapitel 5 aufgeführten Institute 1 und 3 befanden. Die im Ringversuch verwendete Nummerierung der Institute wurde abgeändert, so dass die in den vorherigen Kapiteln verwendete Bezeichnung der Institute beibehalten werden konnte. In Tabelle A 18 ist die Zuordnung der im Ringversuch und der hier verwendeten Nummerierung dargestellt.

In diesem Ringversuch wurde sowohl eine Korrelation der Versuche zur Bestimmung des Frost- (13 Institute), als auch des Frost-Tausalz-Widerstandes (14 Institute) durchgeführt. Bei beiden Versuchen wurden jeweils zwei verschiedene Betonmischungen untersucht. Die Zusammensetzungen sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14: Zusammensetzung der Betonmischungen

		Frost		Frost-Tausalz	
		Beton 1	Beton 2	Beton 3	Beton 4
1	2	3	4	5	6
Zuschlag	[-]	Rheinkiessand (AB 16)			
Zement	[-]	PZ 35 F			
Zementgehalt	[kg/m ³]	300	270	320	320
w/z	[-]	0,55	0,70	0,50	0,50
Zusatzmittel	[-]	-	-	LP	-

Die Probekörper wurden zentral in einem Institut hergestellt und frühestens nach zwei Wochen an die teilnehmenden Institute ausgeliefert. Wegen der großen Probekörperanzahl wurden je Betonsorte zwei Mischungen hergestellt. Bei den Mischungen mit gleicher Rezeptur kann durch die ähnlichen Frischbetoneigenschaften und die fast identischen Druckfestigkeiten nach 28 Tagen von konstant hergestellten Probekörpern ausgegangen werden (vgl. Tabelle A19).

6.3.2 Ergebnisse Frost-Versuche

Die Verläufe der Abwitterungen, der Mittelwert und der Variationskoeffizient von Beton 1 und 2 sind in Tabelle A 20 und Tabelle A 21 aufgeführt und in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Bei der Auswertung wurden die Ergebnisse von Institut 5 nicht berücksichtigt, da hier der Frostwiderstand erst in einem Betonalter von 72 Tagen bestimmt worden war.

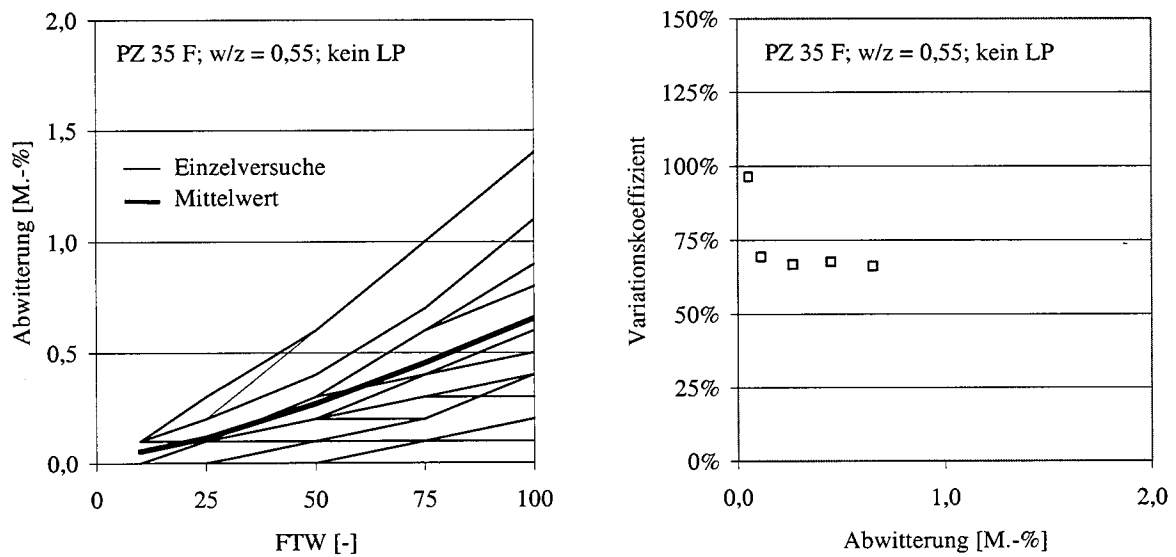


Abbildung 36: Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem Würfelverfahren von Beton 1 (PZ 35 F; w/z = 0,55; kein LP)

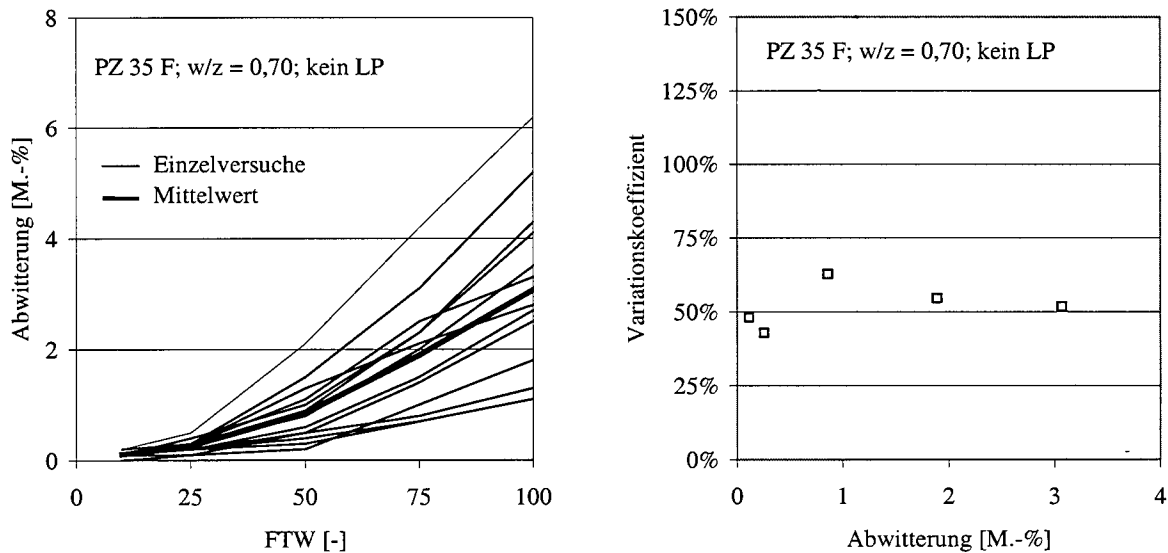


Abbildung 37: Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem Würfelverfahren von Beton 2 (PZ 35 F; w/z = 0,70; kein LP)

Beton 1 wies hierbei eine durchschnittliche Abwitterung von 0,27 M.-% nach 50 FTW und 0,65 M.-% nach 100 FTW auf, die Einzelwerte der teilnehmenden Institute lagen mit 0,1 bis 1,4 M.-% nach 100 FTW um bis zu 115 % über dem Mittelwert. Der Variationskoeffizient wird anfangs mit steigender Abwitterung kleiner, nimmt aber ab einer durchschnittlichen Abwitterung von 0,12 M.-% einen mit weiterer Abwitterung fast konstanten Wert von 67 % an.

Beton 2 wies wegen des deutlich höheren w/z-Wertes auch deutlich höhere Abwitterung als Beton 1 auf. Hier wurden Abwitterungen von bis zu 4,2 M.-% nach 50 FTW, bzw. 6,2 M.-% nach 100 FTW, im Mittel 3,1 M.-% gemessen. Die Überschreitung des Mittelwertes betragen demnach fast 100 %. Bei den Messungen des Betons 2 wurde ein relativ konstanter Variationskoeffizienten von ca. 50 % ermittelt.

6.3.3 Ergebnisse Frost-Tausalz-Versuche

In den folgenden Abbildungen sind die einzelnen Abwitterungen der Institute, die mittlere gemessene Abwitterung und der Variationskoeffizient für die Frost-Tausalz-Versuche an den Betonen 3 und 4 dargestellt. Die Einzeldaten sind in Tabelle A 22 und Tabelle A 23 aufgeführt.

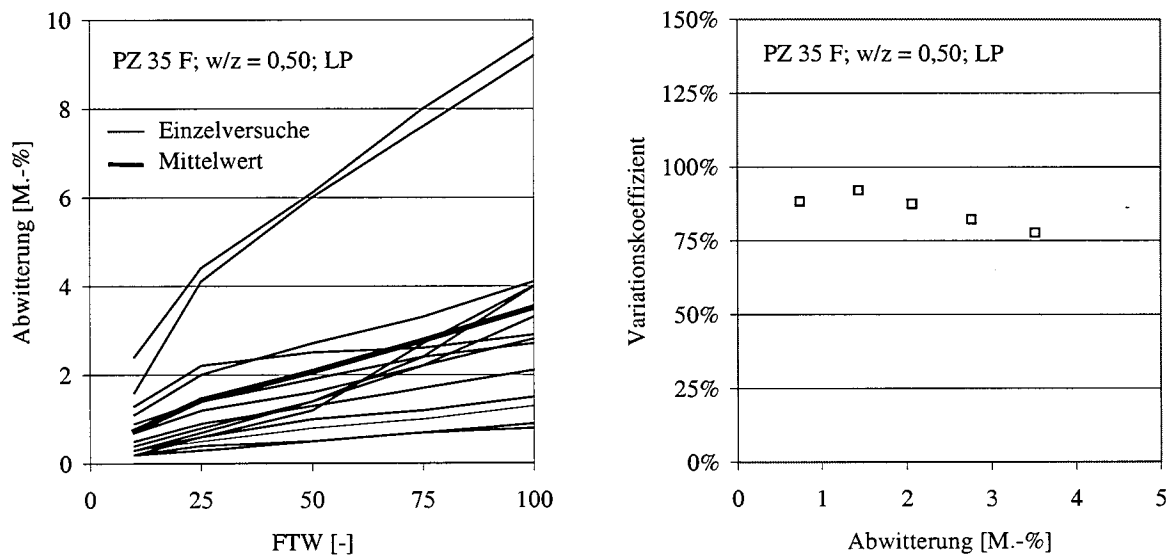


Abbildung 38: Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem Würfelverfahren von Beton 3 (PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

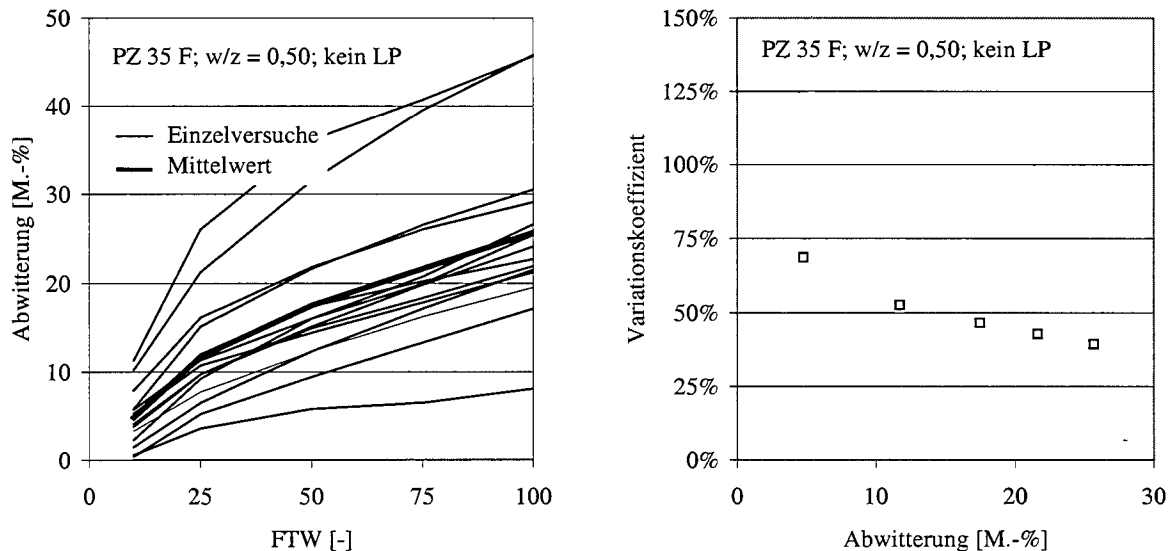


Abbildung 39: Abwitterungen (links) und Variationskoeffizient (rechts) nach dem Würfelverfahren von Beton 4 (PZ 35 F; w/z = 0,50; kein LP)

Bei der Frost-Tausalz-Prüfung wies Beton 3 Abwitterungen zwischen 0,8 und 9,6 M.-% (Institut 2 und 18) nach 100 FTW auf. Ein Grund für die hohen Abwitterungen bei Institut 2 war nicht ersichtlich. Bei Institut 18 lag im Vergleich zu den anderen Instituten eine deutlich höhere Austrocknung der Probekörper während der Trocknungsphase vor, die auch zu einer deutlich höheren Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens führte. Dadurch gelangt mehr Tausalz in den Beton, das während der Frost-Phasen zu größeren Schädigungen führen kann.

Insgesamt wurde allerdings selbst mit den erhöhten Abwitterungen von Institut 2 und 18 ein leicht abnehmender Variationskoeffizient bestimmt, nach 100 FTW wurde ein Wert von 78 % erreicht. Ohne die Berücksichtigung der Werte aus Institut 18 wegen der erhöhten Austrocknung nimmt der Variationskoeffizient einen Wert von 48 % nach 100 FTW an.

Beton 4 wies bei der Frost-Tausalz-Prüfung wegen der im Vergleich zu Beton 3 fehlenden Luftporen deutlich höhere Abwitterungen auf. So wurden hier nach 100 FTW mittlere Abwitterungen von 26 M.-% und maximale Abwitterungen von bis zu 46 M.-% gemessen, dies entspricht in etwa einer Halbierung des Probekörpervolumens.

6.3.4 Zusammenfassung

In einem Ringversuch wurde der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand nach dem Würfelverfahren [2] an jeweils zwei Mischungen in 13 bzw. 14 Instituten untersucht. In Abbildung 40 ist die Spannweite der ermittelten Abwitterungen aufgeführt. Hierbei wurde die über alle Institute ermittelte durchschnittliche Abwitterung des jeweiligen Betons zu 100 % gesetzt.

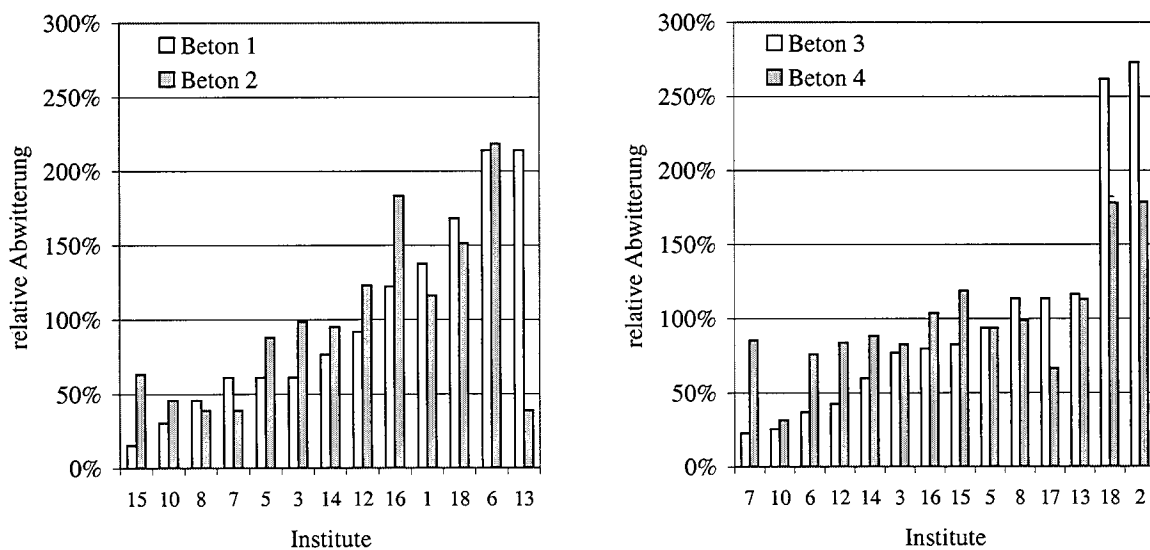


Abbildung 40: relative Abwitterungen der Frost- (links) und Frost-Tausalz-Versuche (rechts). alle bestimmt nach dem Würfelverfahren

Deutlich wird hier die große Streuung zwischen den Instituten. Gleichzeitig kann man erkennen, dass bis auf wenige Ausnahmen die relative Abwitterung beider untersuchten Betone und damit die Prüfschärfe abhängig vom Institut ist.

Nimmt man auf Grundlage der Frisch- und Festbetondaten (vgl. Tabelle A 19) an, dass die Materialstreuung der ausgelieferten Proben konstant und vernachlässigbar ist, so muss die vorhandene Streuung in der Prüfung begründet sein. Als Gründe hierfür wurden in dem vorliegenden Prüfbericht die Unsicherheiten des Temperatur-Zeitverlaufes im Probekörper genannt (z.B. erreichte Minimaltemperatur, vgl. Kap. 4.2).

Außerdem können unterschiedliche Abwitterungen durch die unterschiedlich starke mechanische Beanspruchung bei der Abbürstung der Frostabsprengungen hervorgerufen werden. Diese Unsicherheit sollte sich allerdings nur bei geringen Abwitterungen bemerkbar machen. Des Weiteren ist eine Erhöhung der Abwitterung durch eine Verstärkung dieser

Beanspruchung einseitig, d.h. es werden anfangs noch fest anhaftende Abwitterungen abgebürstet, die sonst bei den darauffolgenden FTW ohnehin abfallen würden.

Als ein weiterer Grund wird die Änderung der Chloridkonzentration während des Frost-Tausalz-Versuches in der Lösung angegeben. Da der Erneuerungszyklus des Taumittels vorgeschrieben ist und eine eventuelle Chloridkonzentrationsänderung bei den Instituten ähnlich sein sollte, sind hierdurch die beobachteten Abweichungen wohl nicht zu begründen.

Ein Grund der Streuung der Abwitterungen bei den Frost-Versuchen zwischen einzelnen Instituten im Vergleich zu den Frost-Tausalz-Versuchen kann in der Verwendung von Leitungswasser unterschiedlicher Härte begründet sein. Dieser Effekt ist bei der Bestimmung des Frostwiderstandes deutlich höher und wird beim Frost-Tausalz-Versuch durch die Zugabe von NaCl überdrückt. Eine Auswertung in dieser Richtung war durch die fehlende Angabe der Wasserhärte oder der geografischen Lage der Prüfinstitute nicht möglich.

Die gemessenen Abwitterungen der bei den Zulassungsversuchen beteiligten Institute 1 und 3 liegen meist im Mittelfeld aller untersuchten Institute (vgl. Abbildung 40).

Sowohl bei der Bestimmung des Frost-, als auch bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes lagen die von Institut 3 gemessenen Abwitterungen geringfügig unter der gemittelten Abwitterung aller Institute. Ebenso lag die von Institut 1 ermittelte Abwitterung bei der Bestimmung des Frostwiderstandes geringfügig über dem Mittelwert. Institut 1 nahm nicht am Teil des Ringversuches zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes teil. Die prozentual hohen Abweichungen dieser beiden Institute bei Beton 1 sind primär auf die durchschnittlich sehr geringen Abwitterungen und dem damit höheren Fehler zurückzuführen.

6.4 VDZ-Ringversuch II (1998)

6.4.1 Allgemeines

In einem Europäischen Ringversuch wurden unter der Leitung des Forschungsinstitutes der Zementindustrie Untersuchungen zu Prüfungen des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes durchgeführt [16, 17].

Zur Bestimmung der Abwitterung wurden der SLAB-Test, das Würfelverfahren und das CDF- bzw. CF-Verfahren untersucht (vgl. auch Abschnitt 3). Zur Betrachtung der inneren Schädigung wurden das CIF- und das SLAB-Verfahren untersucht.

Eine Auflistung aller in diesem Ringversuch durchgeführten Mischungen enthält Tabellè A 1. In Tabelle 15 sind die in diesem Teil untersuchten Betonmischungen dargestellt. Jede Betonmischung wurde jeweils an einem Institut hergestellt und den anderen Prüfinstituten zur Verfügung gestellt.

Tabelle 15: Im Ringversuch untersuchte Mischungen (nach [17])

Nr.	Zementart	Zementgehalt	w/z-Wert	LP-Gehalt
[-]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[Vol.-%]
1	2	3	4	5
2.2	CEM I 42,5 R	410	0,45	1,8
3.2	CEM I 42,5 R	330	0,55	3,5*
4.1a	CEM I 32,5 R	300	0,60	1,9
4.31	CEM II A-S 42,5 R	310	0,55	1,6

* Zugabe eines LP-Mittels

An den Mischungen 2.2 und 3.2 wurden die Frost-Tausalz-Versuche (Abwitterung), an den Mischungen 4.1a und 4.31 wurden die Frostversuche (Abwitterung und Messung der inneren Schädigung) durchgeführt.

Nach DIN 1045-2 (Entwurf 03.99) [18] wird ein Beton ohne Luftporen als frostsicher eingestuft, wenn der w/z-Wert maximal 0,50 und der Zementgehalt mindestens 320 kg/m³ beträgt. Beton 4.1a und 4.31 erfüllen somit diese Anforderungen nicht. Es ist daher mit Schädigungen um bzw. über den jeweiligen Grenzwerten der Prüfmethode zu rechnen. Insgesamt sollte Mischung 4.1a aufgrund des deutlich höheren w/z-Wertes schlechter als Mischung 4.31 abschneiden.

Als frost-tausalz-beständig wird ein Beton nach DIN 1045-2 eingestuft, wenn dieser als Luftporenbeton höchstens einen w/z-Wert von 0,50 und einen Mindestzementgehalt von 320 kg/m³ aufweist. Bei erdfeuchtem Beton ohne Mikroluftporen darf der w/z-Wert höchstens 0,40 betragen, der Mindestzementgehalt liegt dann bei 360 kg/m³. Die Betone 2.2 und 3.2 sind demnach als nicht frost-tausalz-beständig einzustufen, bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes ist daher ebenfalls mit Schädigungen um den Grenzwert, bzw. darüber zu rechnen.

Für die Einschätzung der Streuung ist neben den absoluten Werten wie dem Variationskoeffizienten etc. auch die Mächtigkeit der für diese Kennwerte verwendeten Daten von Bedeutung. In Tabelle 16 sind die Anzahl der teilnehmenden Institute und die untersuchten Probekörper dargestellt.

Tabelle 16: Anzahl der Institute und untersuchten Probekörper

Verfahren	Prüfmedium	Anzahl der Institute	PK-Anzahl bei jeder Prüfung
1	2	3	4
SLAB-Test	Wasser	11	5
	NaCl-Lösung	8	5
Würfelverfahren	Wasser	7	8
	NaCl-Lösung	7	8
CDF-Verfahren	NaCl-Lösung	9	5
CF-Verfahren	Wasser	10	5
CIF-Verfahren	Wasser	10	5
Plattenverfahren	Wasser	5 ¹⁾	4
		4 ²⁾	4

1) Ermittlung der inneren Schädigung durch Bestimmung der longitudinalen Gleichschwingung

2) Ermittlung der inneren Schädigung durch Bestimmung der Resonanzfrequenz

Die ermittelten Ergebnisse wurden auf Ausreißer untersucht und ausgewertet. Hierbei wurden die Verfahren nach Mandel (h- und k-Statistik) [19], Cochran und Grubb [19] angewandt. Durch den auf die Empfehlungen der dazugehörigen Norm [19] ausgelegten Prüfungsumfang konnten die einzelnen Streuungen (Wiederholstreuung, Streuung zwischen den Labors, Vergleichsstreuung) nach der Vorschrift getrennt berechnet und quantifiziert werden. Eine derartige Aufschlüsselung war in den vorangegangenen Ringversuchen weder beabsichtigt, noch durch die vorhandenen Daten rückwirkend durchführbar. Gleiches gilt auch für die vorhandenen Daten aus den Zulassungsversuchen.

Die Ausführung der Ergebnisse beschränkt sich im Folgenden wegen der ausführlichen Ausarbeitung im Ringversuch [17] auf die Angabe der durchschnittlichen Abwitterungen und die Darstellung der Variationskoeffizienten. Aufgeführt wird neben der Vergleichsstreuung auch die Wiederholstreuung.

6.4.2 Ergebnisse Frost-Versuche

6.4.2.1 SLAB-Verfahren

Bei der Bestimmung des Frostwiderstandes nach dem SLAB-Verfahren wurde abweichend von der Vorschrift [6] demineralisiertes Wasser gefordert.

An diesem Teil des Ringversuches nahmen 11 Institute teil, je Prüferie wurden 5 Probekörper gefrostet. In den nachfolgenden Diagrammen ist die mittlere Abwitterung sowie die Vergleichs- und Wiederholstandardabweichung der beiden untersuchten Mischungen dargestellt. Nicht berücksichtigt wurden hierbei als Ausreißer deklarierte Messwerte (vgl. Kap. 6.4.1).

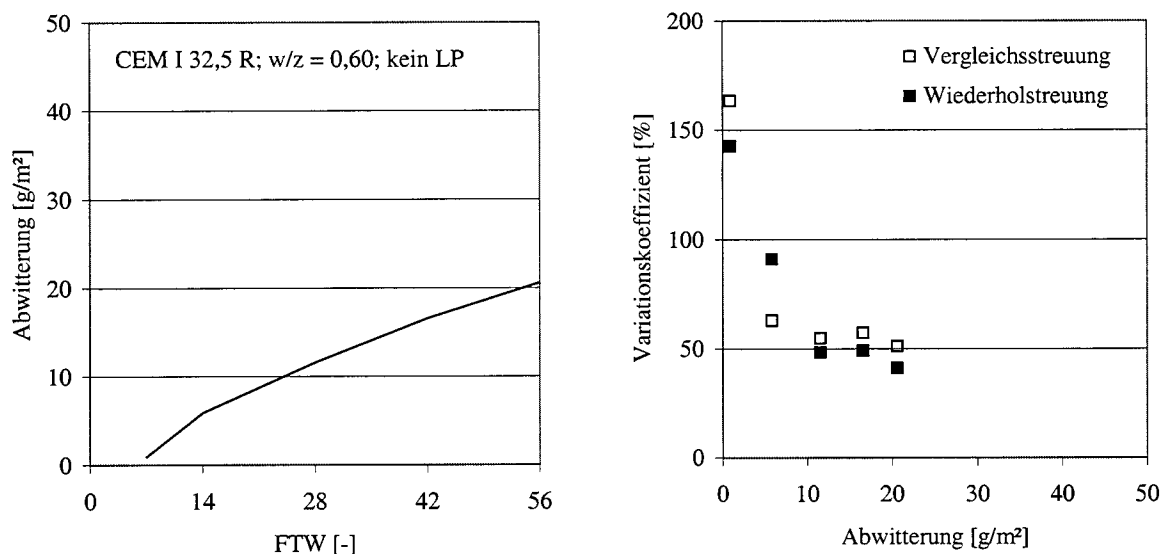


Abbildung 41: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.1a (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) nach dem SLAB-Verfahren

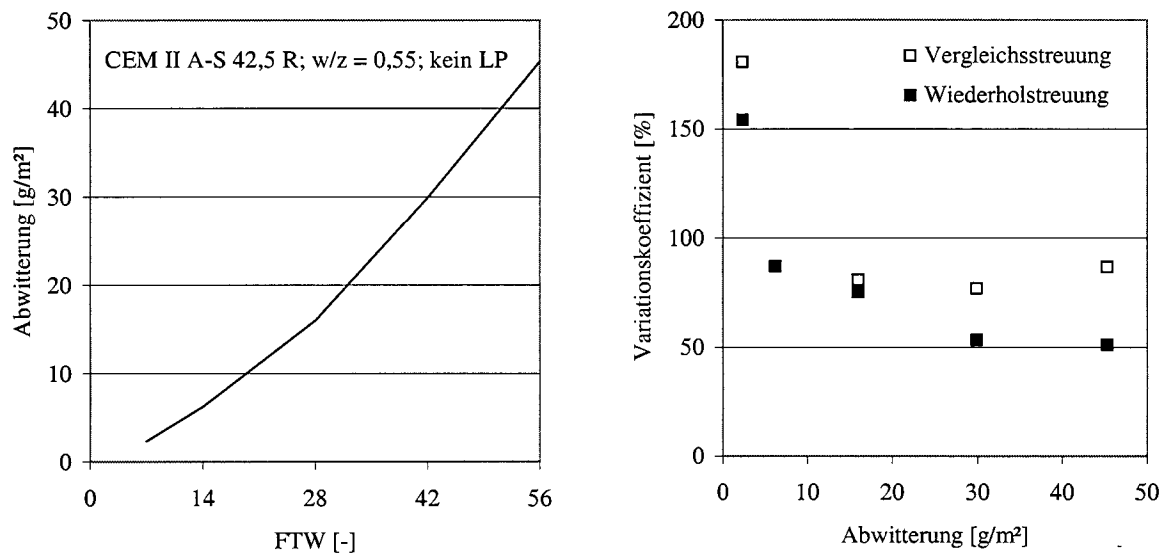


Abbildung 42: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.31 (CEM II A-S 42,5 R; $w/z = 0,55$; kein LP) nach dem SLAB-Verfahren

Beton 4.1a wies trotz des höheren w/z -Wertes geringere Abwitterungen als Mischung 4.31 auf, was vermutlich durch die Verwendung des Portlandzementes (Beton 4.1a) statt des Portlandhüttensandzementes (Beton 4.31) als Bindemittel verursacht wurde. Insgesamt lagen die Abwitterungen aber deutlich unter der Grenze eines frostsicheren Betons (1000 g/m^2 nach 56 FTW).

Die Streuungen nehmen fast ausschließlich mit steigender Abwitterung ab, nach 56 FTW wird bei Mischung 4.1a ein durchschnittlicher Variationskoeffizient von etwas über 50 % erreicht, Mischung 4.31 weist bei der Wiederholungsstreuung einen Variationskoeffizienten von 50 %, bei der Vergleichsstreuung einen Variationskoeffizienten von 87 % auf.

6.4.2.2 Würfelverfahren

Bei der Bestimmung des Frostwiderstandes nach dem Würfelverfahren nahmen insgesamt 7 Institute teil, bei jeder Prüfserie wurden 4 Paar Würfel untersucht. In Abbildung 43 und Abbildung 44 werden die mittlere Abwitterung und die dazugehörigen Streuungen der Versuche der untersuchten Betone dargestellt.

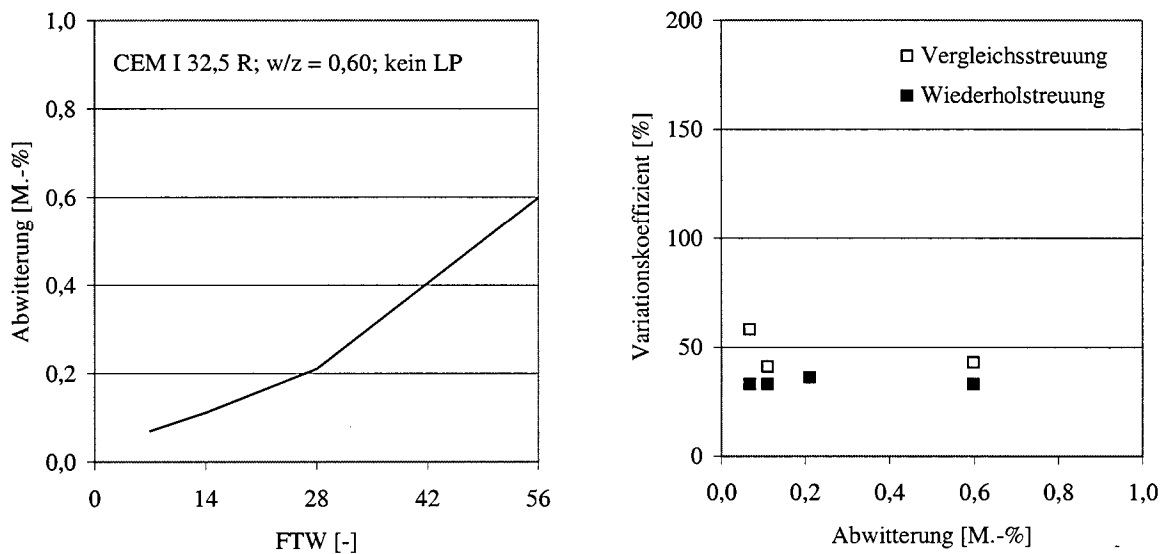


Abbildung 43: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.1a (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) nach dem Würfelverfahren

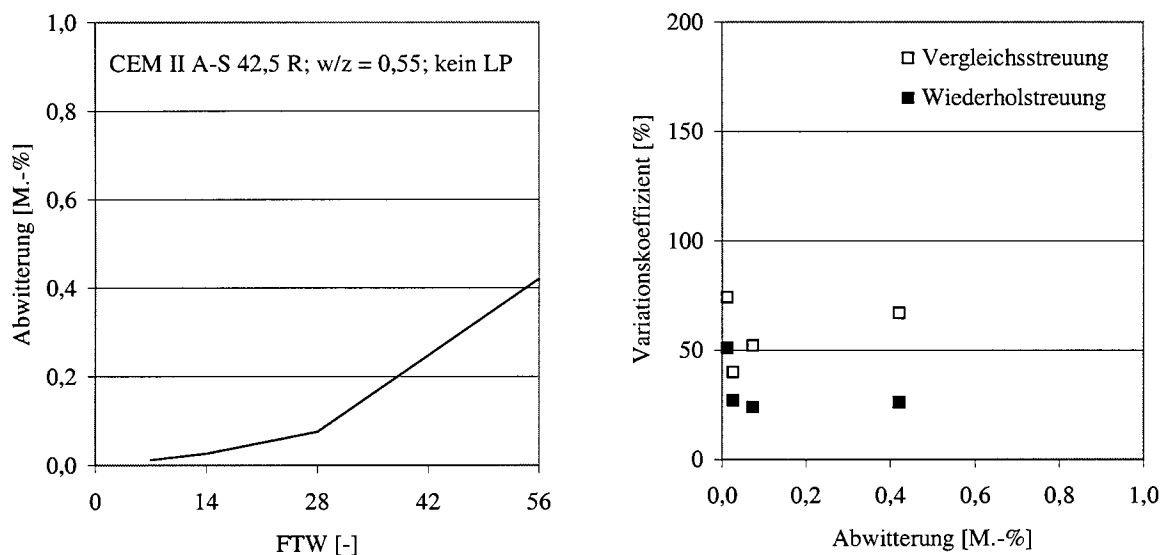


Abbildung 44: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.31 (CEM II A-S 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP) nach dem Würfelverfahren

Entgegen den Ergebnissen der Prüfung des Frostwiderstandes nach dem SLAB-Verfahren wies Beton 4.31 geringere Abwitterungen als Beton 4.1a auf. So wurden bei Beton 4.1a nach 56 FTW Abwitterungen von etwa 0,6 M.-% erreicht, Beton 4.31 wies nach der gleichen Zeit Abwitterungen von etwas über 0,4 M.-% auf. Dennoch lagen auch hier die Abwitterungen

beider Betone im Mittel deutlich unter der Grenze eines frostsicheren Betons (5 M.-% nach 50 FTW).

Bei Beton 4.1a lassen sich Variationskoeffizienten von 43 % (Vergleichsstreuung) und 33 % (Wiederholstreuung) bestimmen, bei Beton 4.31 werden dagegen deutlich unterschiedliche Werte von 67 % (Vergleichsstreuung) und 26 % (Wiederholstreuung) erreicht.

6.4.2.3 CF-Verfahren

An der Bestimmung des Frostwiderstandes nach dem CF-Verfahren beteiligten sich insgesamt 10 Institute. Je Versuchsreihe wurden 5 Probekörper hergestellt. In Abbildung 45 und Abbildung 46 sind die mittlere Abwitterung und die dazugehörigen Streuungen der Versuche der untersuchten Betone dargestellt.

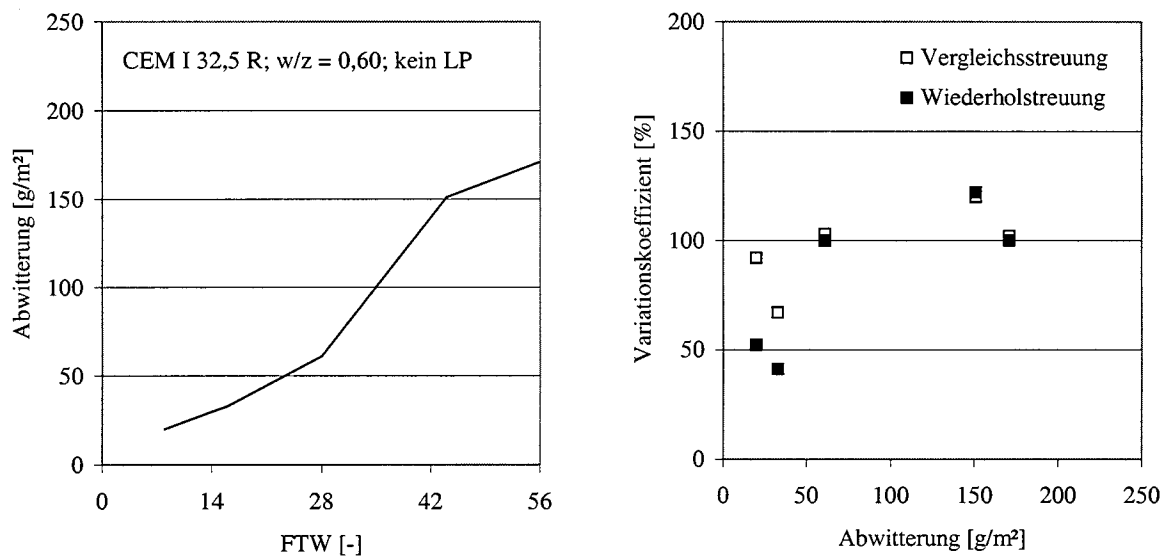


Abbildung 45: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.1a (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) nach dem CF-Verfahren

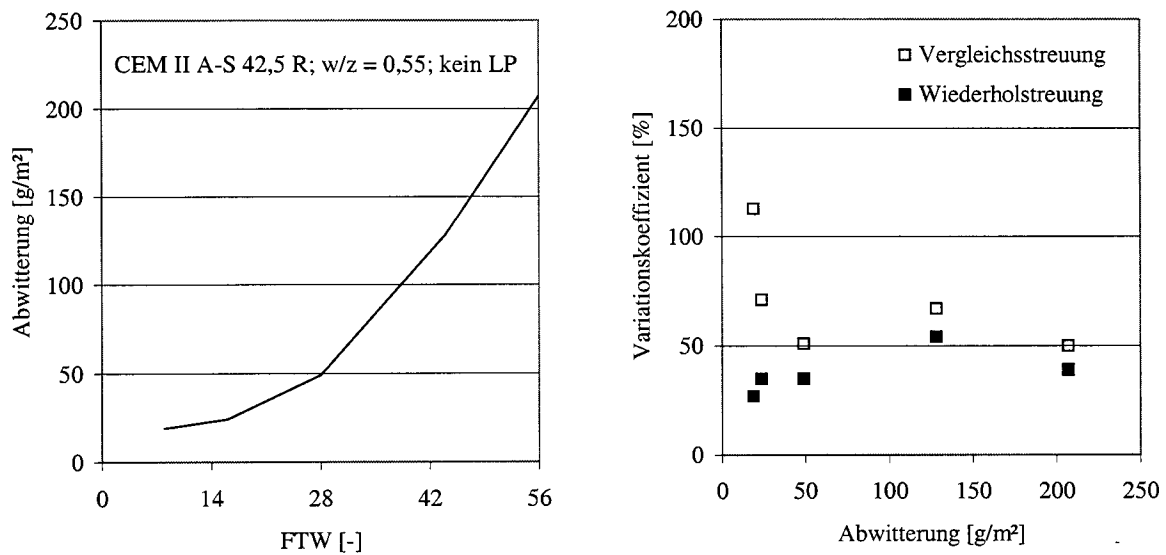


Abbildung 46: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.31 (CEM II A-S 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP) nach dem CF-Verfahren

Bei der Prüfung des Frostwiderstandes nach dem CF-Verfahren wiesen beide untersuchten Betone Abwitterungen von ungefähr 200 g/m² nach 56 FTW (28 Tagen) auf. Beide Betone erfüllen damit das Kriterium für einen frost-beständigen Beton (2000 g/m² nach 56 FTW).

Die Variationskoeffizienten der beiden Betone differierten dagegen stark. Für Beton 4.1a lässt sich ein Variationskoeffizienten von 100 % berechnen (Wiederhol- und Vergleichsstreuung), der Verlauf der Variationskoeffizienten in Abhängigkeit der Abwitterung zeigt nur bei Wiederholstreuung der Mischung 4.1a den erwarteten abnehmenden Verlauf mit steigender Abwitterung. Bei allen anderen Vergleichen wurde ein mit steigenden Abwitterungen zunehmender Variationskoeffizient festgestellt.

6.4.2.4 CIF-Verfahren

Beim CIF-Verfahren wird im Gegensatz zu den oben aufgeführten Versuchen zur Bestimmung des Frostwiderstandes die Änderung der inneren Schädigung durch die Veränderung des dynamischen E-Moduls bestimmt.

An diesem Teil des Ringversuches nahmen die gleichen Prüfinstitute wie bei den Untersuchungen zum CF-Verfahren teil, je Serie wurden 5 Probekörper hergestellt und geprüft. In Abbildung 47 und Abbildung 48 sind die mittlere Abwitterung und die dazugehörigen Streuungen der Versuche der untersuchten Betone dargestellt.

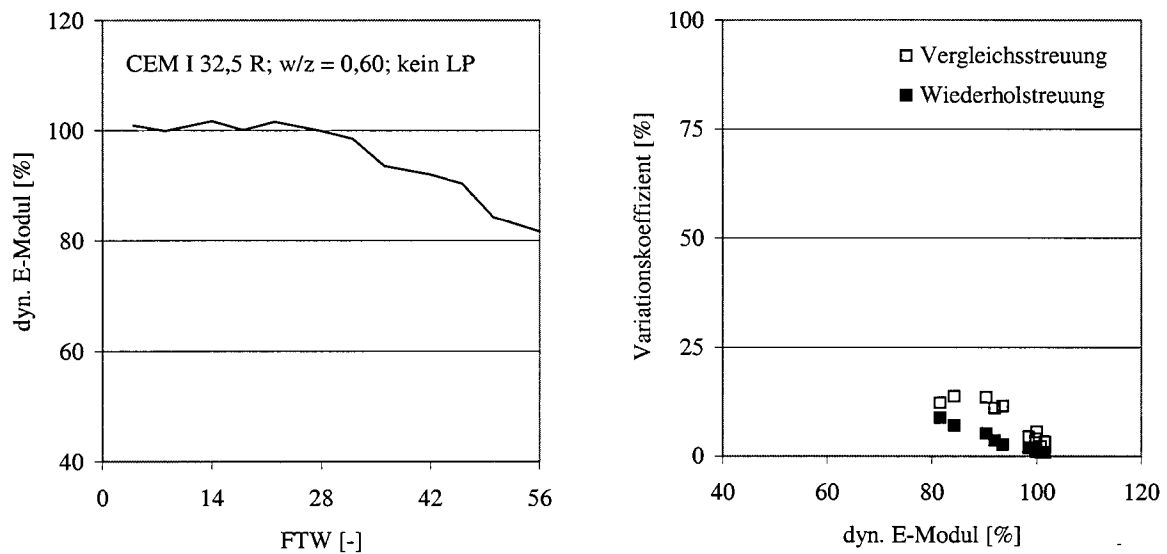


Abbildung 47: mittlerer dyn.. E-Modul (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.1a (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) nach dem CIF-Verfahren

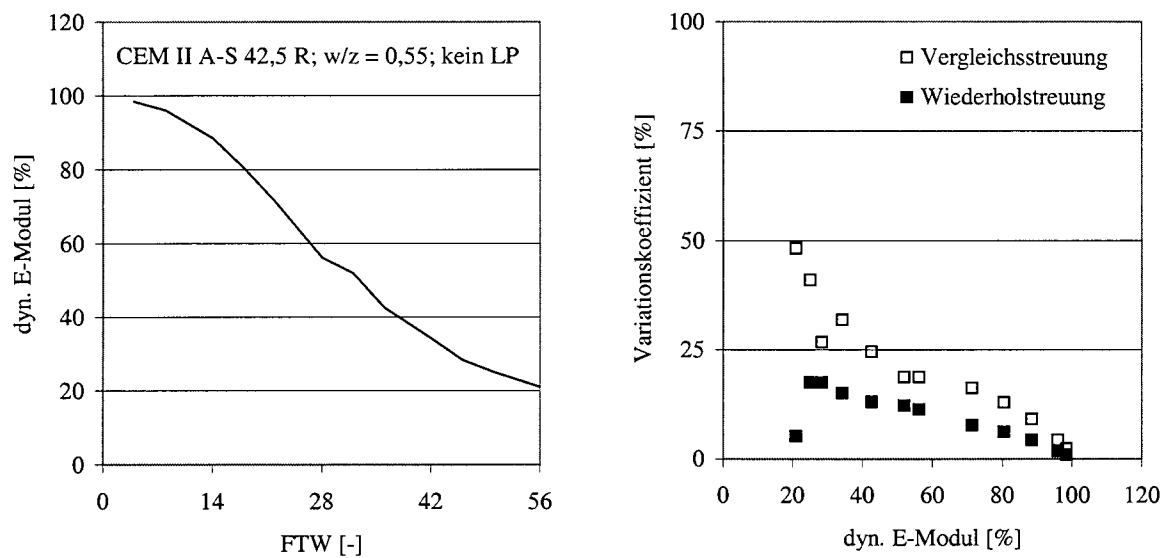


Abbildung 48: mittlere dyn. E-Modul (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.31 (CEM II A-S 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP) nach dem CIF-Verfahren

Beton 4.1a zeigt den typischen Verlauf der Schädigung bei der Bestimmung des Frostwiderstandes nach dem CIF-Verfahren. Erst ab einer gewissen Wasseraufnahme und einer kritischen Wassersättigung werden die Probekörper geschädigt. Dieser Schädigungsprozess setzt sich ab diesem Zeitpunkt linear fort. Der Abfall des dynamischen E-Moduls betrug nach 56 FTW 20 %, dieser Beton wird demnach noch als frostbeständig

eingestuft (Grenzwert: $\Delta E_{\text{dyn.}} < 40 \%$). Dagegen fiel der dynamische E-Modul während der Bestimmung des Frostwiderstandes von Mischung 4.31 von Anfang an ab. Nach 56 FTW betrug der Abfall fast 80 %. Dieser Beton wird damit deutlich nicht als frostbeständig eingestuft.

Durch den Bezug der Schädigung auf den E-Modul zu Beginn der Prüfung ergibt sich im Vergleich zu den anderen Darstellungen ein gänzlich unterschiedlicher Verlauf der Variationskoeffizienten. So wird die Standardabweichung zu Beginn des Versuches auf einen relativ großen Wert von 100 % bezogen, nach Einsetzen der Schädigung wird somit der Nenner bei der Bestimmung des Variationskoeffizienten kleiner, der Variationskoeffizient bei konstanter Standardabweichung größer.

6.4.2.5 Plattenverfahren nach ÖNORM

An diesem Teil des Ringversuches zur Bestimmung des Frostwiderstandes mit Hilfe des Plattenverfahrens nahmen insgesamt 5 Institute teil. Je Versuchsserie wurden 4 Probekörper untersucht. Die Zunahme der Ultraschalllaufzeit sowie die dazugehörigen Variationskoeffizienten der untersuchten Mischung 4.1a und 4.31 sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

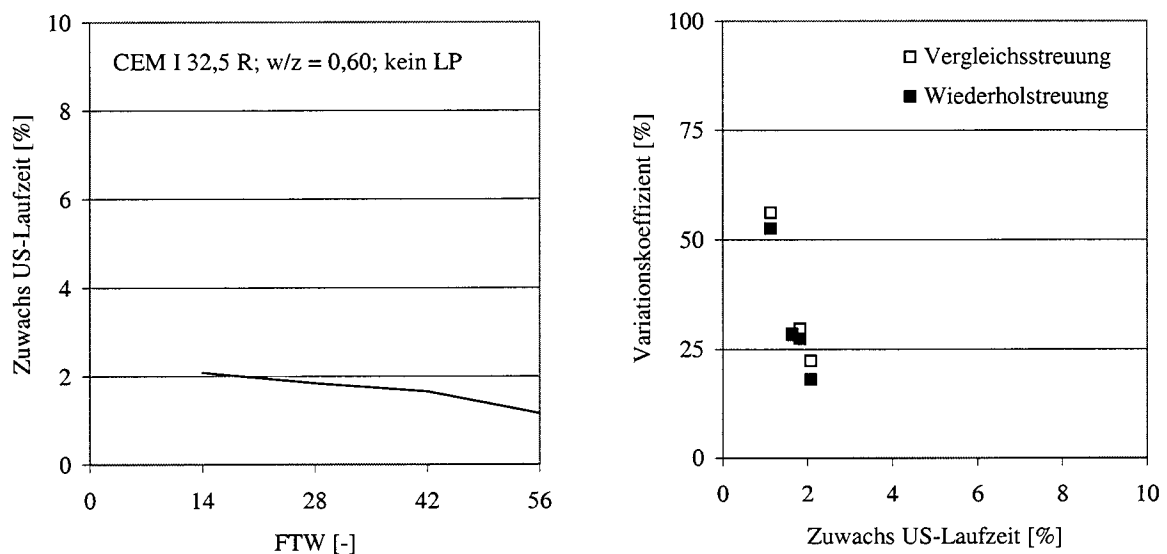


Abbildung 49: bezogene US-Laufzeit (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.1a (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) nach dem Plattenverfahren

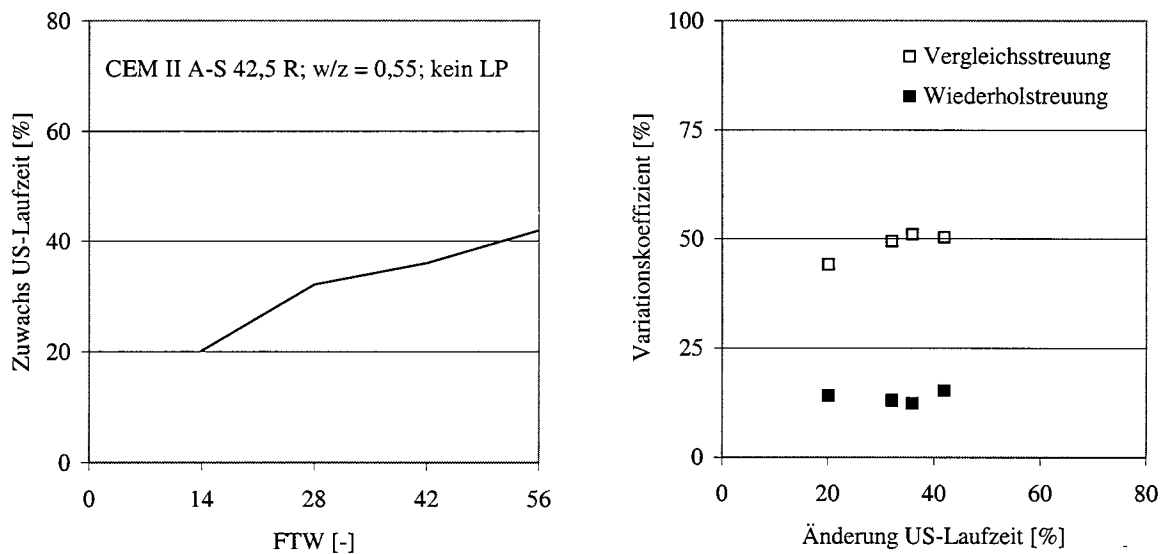


Abbildung 50: bezogene US-Laufzeit (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 4.31 (CEM II A-S 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP) nach dem Plattenverfahren

Vergleichbar mit den gemessenen Schädigungen bei der Durchführung des CIF-Tests wies Mischung 4.1a eine nur geringe Änderung der Ultra-Schalllaufzeit auf. So wurde nach 56 FTW eine Zunahme der Laufzeit von unter 2 % gemessen. Dagegen wies Beton 4.31 eine deutlich höhere Zunahme von über 40 % nach der selben Belastungsdauer auf. Zugelassen für einen frostsicheren Beton ist nach [17] ein 15-prozentiger Abfall des dynamischen E-Moduls. Beton 4.1a wird demnach als frostsicher, Beton 4.31 wird als nicht frostsicher eingestuft.

Bei Mischung 4.1 sind die Variationskoeffizienten der Wiederhol- und Vergleichsstreuung aufgrund der geringen Änderung der Schalllaufzeit nicht sehr aussagekräftig, nach 56 FTW wird ein Variationskoeffizient für Wiederholmessungen von 52,5 % und ein Variationskoeffizient für die Vergleichsstreuung von 56 % erreicht. Bei Mischung 4.31 stellte sich über die Schädigung ein relativ konstanter Variationskoeffizient ein. Für Wiederholmessungen wird hier ein Wert von 15 % erreicht, bei Vergleichsmischungen dagegen ein Wert von 50 %.

6.4.3 Ergebnisse Frost-Tausalz-Versuche

6.4.3.1 SLAB-Verfahren

Bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem SLAB-Verfahren nahmen bei diesem Ringversuch 8 Institute teil, je Prüfserie wurden 5 Probekörper hergestellt. Die Abwitterungen und die dazugehörigen Variationskoeffizienten sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

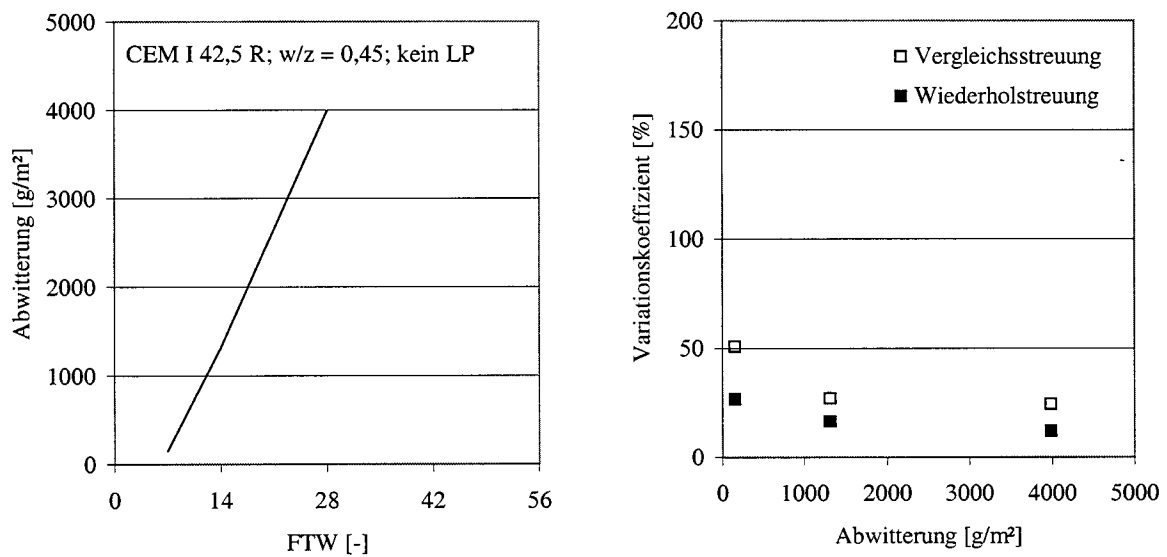


Abbildung 51: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 2.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,45; kein LP) nach dem SLAB-Verfahren

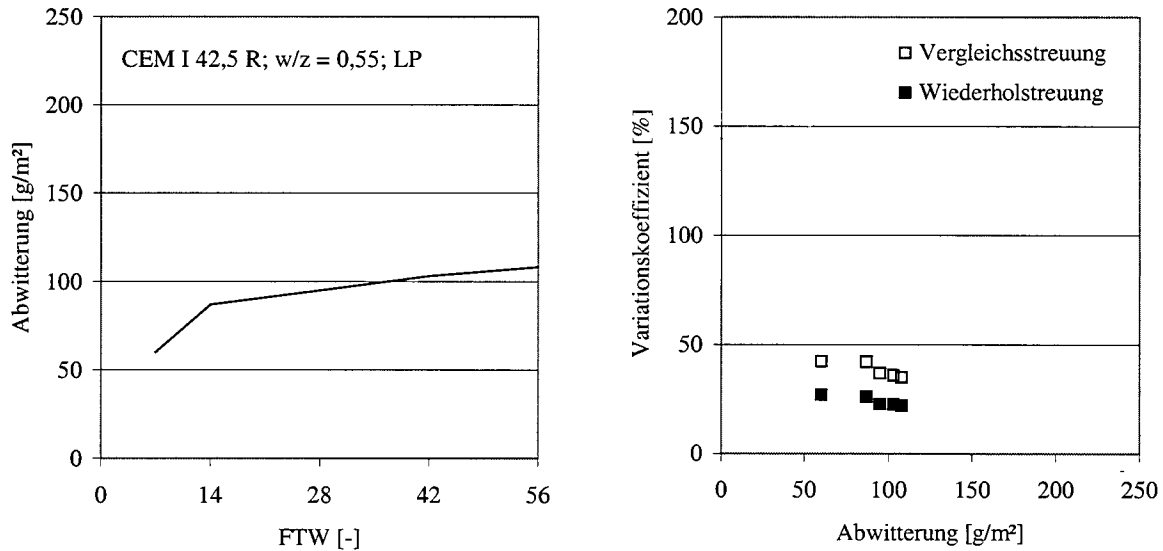


Abbildung 52: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 3.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,55; LP) nach dem SLAB-Verfahren

Beton 2.2 wies aufgrund der fehlenden Luftporen erwartungsgemäß sehr hohe Abwitterungen auf. Der Versuch wurde nur bis zum 28. FTW ausgewertet, da es bei derart hohen Abwitterungen zu Abplatzungen der seitlichen Abdichtung sowie zu Rissen und damit zu einem Verlust der Prüflüssigkeit an der Oberfläche kommen kann. Beton 3.2 wies dagegen mit 100 g/m^2 deutlich geringere Abwitterungen auf. Beton 2.2 erwies sich bei der Prüfung nach den geltenden Richtlinien (Grenzwert = 1000 g/m^2 , vgl. Kap. 3) als nicht frost-tausalz-beständig, Beton 3.2 wurde dagegen als beständig gegenüber einem Frost-Tausalz-Angriff eingestuft.

Bei den Variationskoeffizienten war in allen Fällen eine Abnahme der Verläufe mit zunehmenden Abwitterungen erkennbar. So wurde bei Mischung 2.2 bei den maximal gemessenen Abwitterungen von 4000 g/m^2 (28 FTW) ein Variationskoeffizient von 24 % bei der Vergleichsstreuung und 12 % bei der Wiederholstreuung ermittelt. Bei Mischung 3.2 wurde nach 56 FTW ein Variationskoeffizient für Wiederholmessungen von 35 % und für Vergleichsmessungen von 22 % berechnet. Der höhere Variationskoeffizient bei Mischung 3.2 wird vermutlich teilweise hervorgerufen durch die geringeren Abwitterungen und die dadurch größere Auswirkung systematischer Messfehler.

6.4.3.2 Würfelverfahren

Bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem VDZ-Würfelverfahren nahmen an diesem Ringversuch 7 Institute teil. Je Prüferserie wurden 4 Paar Probekörper (100 x 100 x 100 mm³) geprüft.

In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die mittleren Abwitterungen und die dazugehörigen Variationskoeffizienten dargestellt.

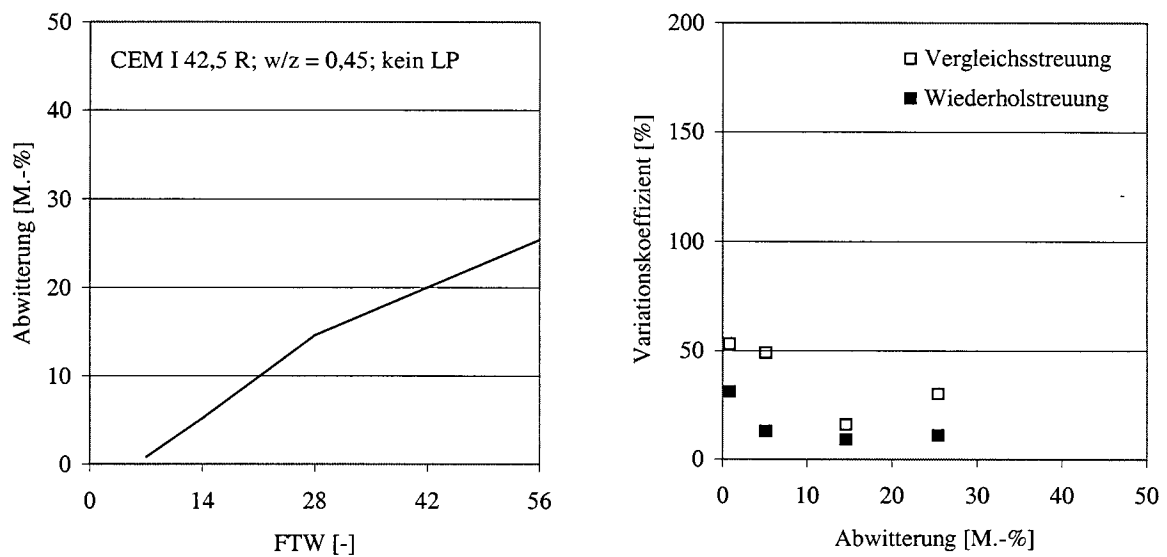


Abbildung 53: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 2.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,45; kein LP) nach dem Würfelverfahren

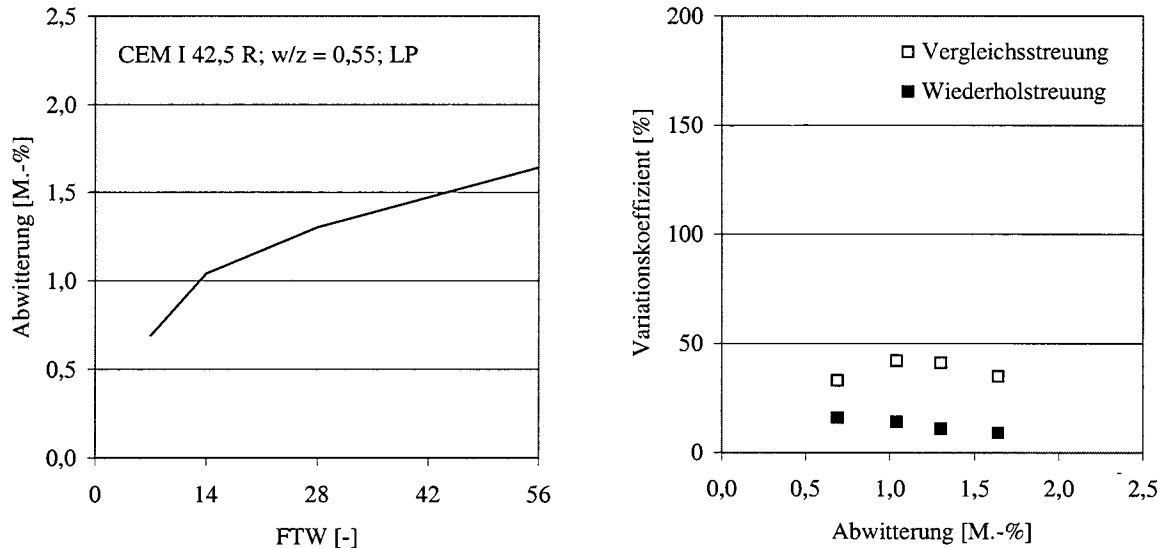


Abbildung 54: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 3.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,55; LP) nach dem Würfelverfahren

Wiederum weist Beton 2.2 mit einer durchschnittlichen Abwitterung von 25 M.-% Abwitterung nach 56 FTW einen geringen Frost-Tausalz-Widerstand auf, bei Mischung 3.2 wurde nach der gleichen Zeit eine mittlere Abwitterung von 1,6 M.-% bestimmt.

Die Variationskoeffizienten liegen trotz der deutlich unterschiedlichen Abwitterungen bei beiden Betonen in einem ähnlichen Rahmen. So wird nach 56 FTW bei Beton 2.2 ein Variationskoeffizient der Vergleichsstreuung von 30 % und bei der Wiederholstreuung von 11 % erreicht, Beton 3.2 weist nach der gleichen Zeit einen Variationskoeffizienten von 35 % bzw. 9 % auf.

6.4.3.3 CDF-Verfahren

An dem Teil des Ringversuches zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem CDF-Verfahren beteiligten sich 9 Institute, je Serie wurden 5 Probekörper untersucht.

In den nachfolgenden Abbildungen sind die mittlere Abwitterung und die dazugehörigen Variationskoeffizienten aufgeführt.

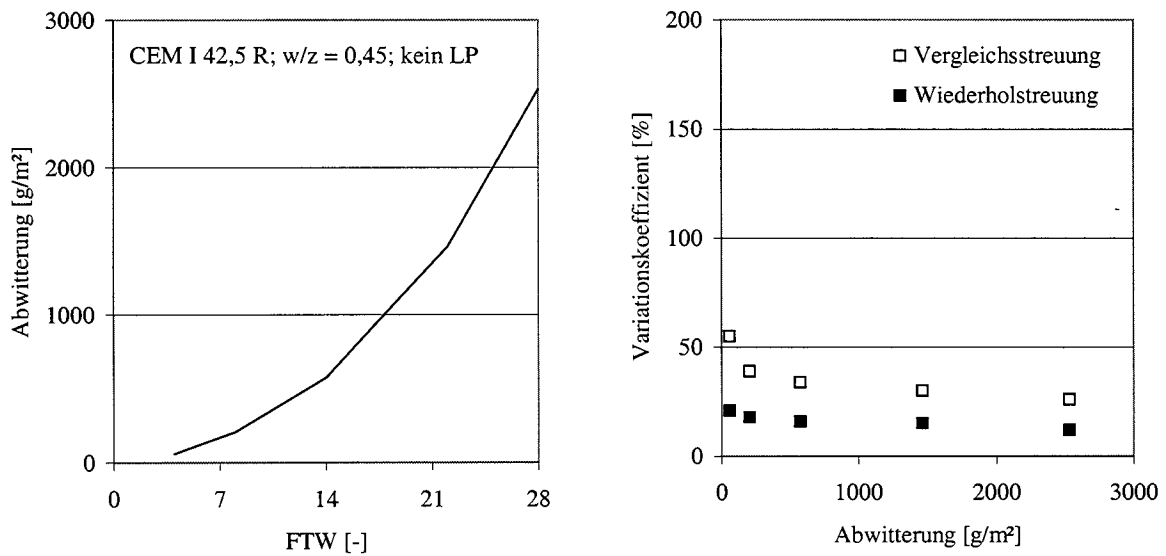


Abbildung 55: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 2.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,45; kein LP) nach dem CDF-Verfahren

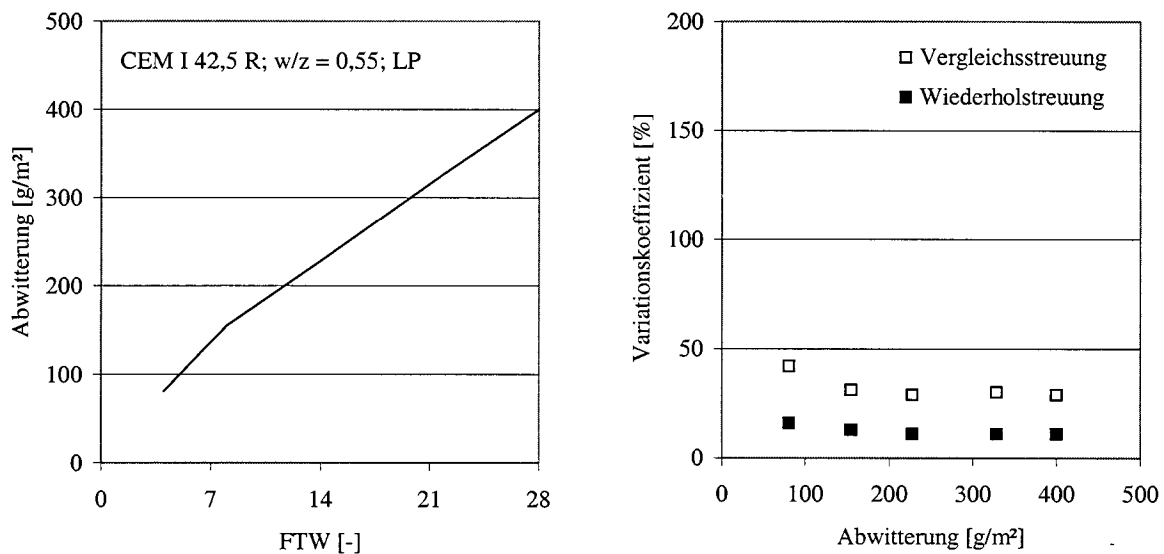


Abbildung 56: mittlere Abwitterung (links) und Variationskoeffizient (rechts) der Mischung 3.2 (CEM I 42,5 R; w/z = 0,55; LP) nach dem CDF-Verfahren

Beton 2.2 wies, analog zu den vorangegangenen Ergebnissen, deutlich höhere Abwitterungen als Beton 3.2 auf. So wurden bei Beton 2.2 Abwitterungen von 2500 g/m² nach 28 FTW gemessen, Beton 3.2 wies dagegen deutlich geringere Abwitterungen von 400 g/m² auf. Nach [8] sind für einen frost-tausalz-beständigen Beton nach 28 FTW Abwitterungen bis zu 1500 g/m² zugelassen, Beton 2.2 ist demnach nicht als frost-tausalz-beständig, Beton 3.2 ist als frost-tausalz-beständig einzustufen.

Die aus den Abwitterungen der untersuchten Mischungen berechneten Variationskoeffizienten weisen eine mit zunehmender Abwitterung abnehmende Tendenz auf. So werden nach 28 FTW bei beiden Mischungen sehr geringe Variationskoeffizienten von ca. 26 % (Vergleichsstreuung) und 12 % (Wiederholstreuung) erreicht.

6.4.4 Zusammenfassung

In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Schädigungen (Abwitterung, Innere Schädigung) auf den jeweiligen zulässigen Grenzwert normiert angegeben. In Abbildung 57 und Abbildung 58 sind die untersuchten Mischungen 4.1a und 4.31 (Widerstand gegen Frost) dargestellt.

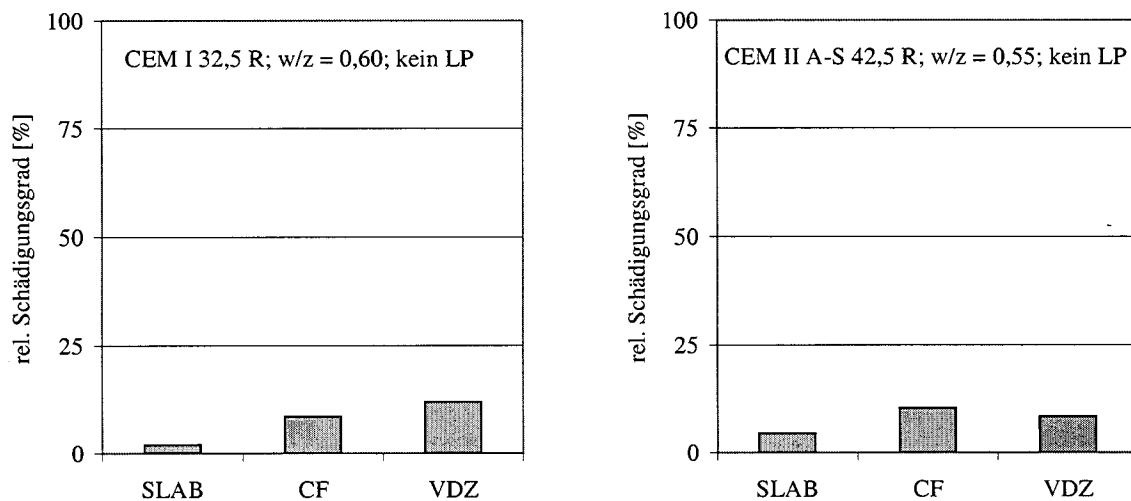


Abbildung 57: relativer Schädigungsgrad (Abwitterung) von Beton 4.1a (links; CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) und Beton 4.31 (rechts; CEM II A-L 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP)

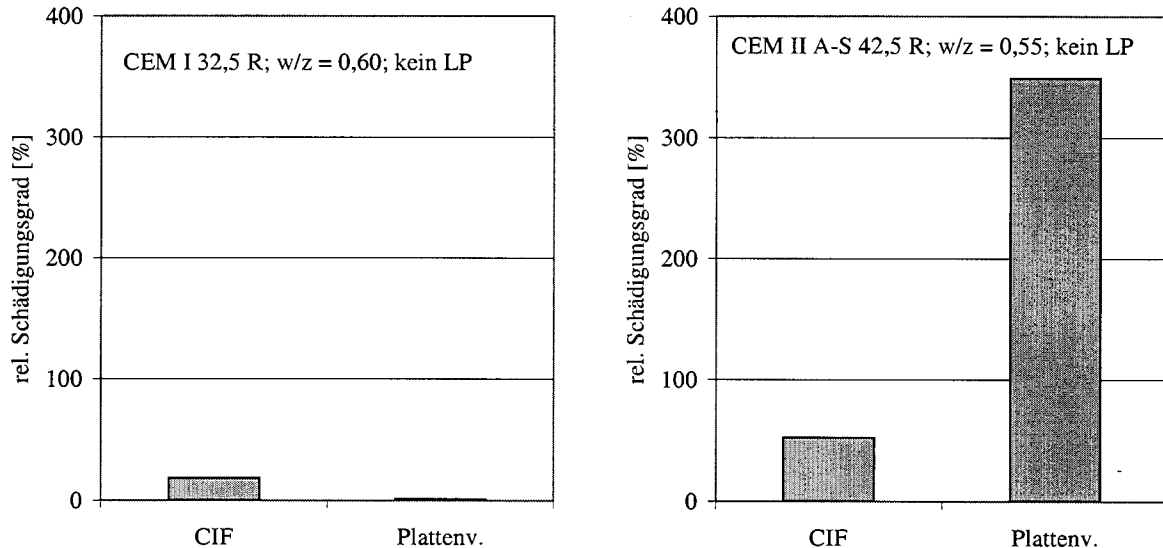


Abbildung 58: relativer Schädigungsgrad (innere Schädigung) von Beton 4.1a (links; CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) und Beton 4.31 (rechts; CEM II A-L 42,5 R; w/z = 0,55; kein LP)

Während bei den Verfahren zur direkten Bestimmung des Frostwiderstandes die Abwitterung der Betone 4.1a und 4.31 deutlich unter den jeweiligen Grenzwerten lagen, wies Beton 4.31 beim Plattenverfahren eine deutliche innere Schädigung auf. Nach diesem Verfahren wird der Beton signifikant als nicht beständig gegenüber einem Frostangriff eingestuft. Ein Grund für diese unterschiedliche Einstufung durch das Plattenverfahren konnte nicht gefunden werden.

In Abbildung 59 sind die im Ringversuch untersuchten Mischungen 2.2 und 3.2 (Frost-Tausalz-Widerstand) dargestellt. Bei Beton 2.2 wurde das SLAB-Verfahren nach der Hälfte der benötigten FTW aufgrund einer zu starken Schädigung der Probekörper abgebrochen, die dargestellte Schädigung bezieht sich demnach nur auf 28 FTW, es ist mit einer deutlich höheren Abwitterung nach 56 FTW zu rechnen.

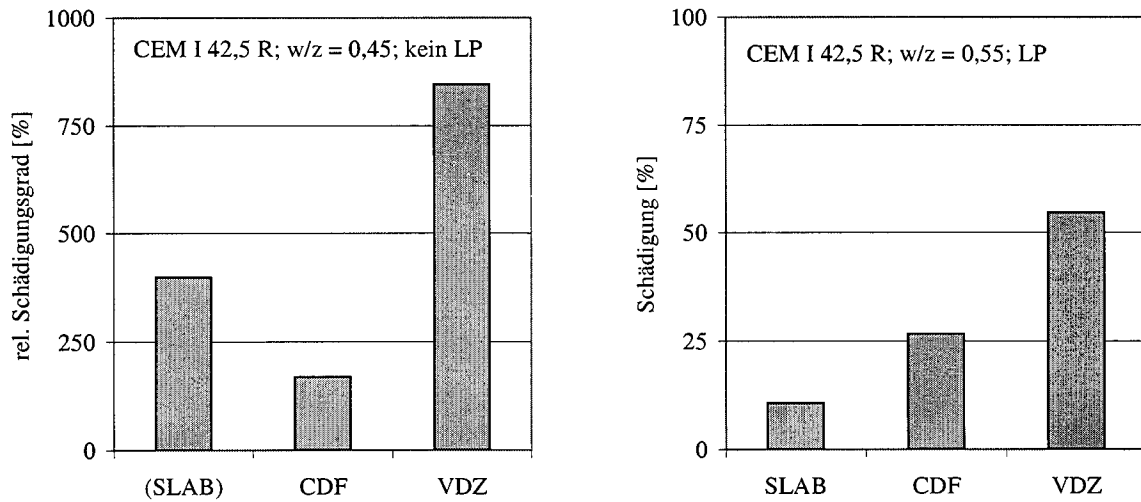


Abbildung 59: relativer Schädigungsgrad (Abwitterung) von Beton 2.2 (links; CEM I 42,5 R; w/z = 0,45; kein LP) und Beton 3.2 (rechts; CEM I 42,5 R; w/z = 0,55; LP)

Im Gegensatz zur Bestimmung des Frostwiderstandes liefern alle Versuche zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widertandes eine einheitliche Einordnung. So wird Beton 2.2 in allen Fällen als nicht beständig gegenüber einem Frost-Tausalz-Angriff eingestuft, Beton 3.2 wird dagegen als beständig eingeordnet.

Siebel berechnete aus den Versuchsergebnissen der Mischung 2.2 (Frost-Tausalz) nach Gleichung 5 folgende Variationskoeffizienten an den Grenzwerten der jeweiligen Verfahren:

Tabelle 17: ermittelte Präzisionsdaten für die untersuchten Frost-Tausalz-Verfahren nach [17]

Prüfverfahren	Grenzwert	Vergleichspräzision	Wiederholpräzision
[-]	[-]	[%]	[%]
1	2	3	4
SLAB-Test	1000 g/m ²	31	17
Würfeltest	3 M.-%	38	18
CDF-Verfahren	1500 g/m ²	29	14

Es zeigte sich, dass die Genauigkeit des CDF-Verfahrens in diesem Ringversuch geringfügig besser als die anderen beiden Methoden war. Insgesamt wurde im Vergleich zu anderen Ringversuchen eine deutlich bessere Präzision nachgewiesen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurden Frost- und Frost-Tausalz-Versuche, die im Rahmen der Zulassung neuer Zemente und Zementzusatzstoffe durchgeführt worden sind, hinsichtlich der Streuung der Prüfergebnisse ausgewertet. Vom Deutschen Institut für Bautechnik ist für die Zulassungsversuche bei der Bestimmung des Frostwiderstandes das Würfelverfahren und bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes das Verfahren nach ÖNORM B 3303 an definierten Betonzusammensetzungen vorgeschrieben. Eine getrennte Berechnung der Wiederhol-, Prüf- und Vergleichsstreuung, wie sie im Rahmen von Ringversuchen üblich ist, war aufgrund der fehlenden Eingangsdaten aus den Zulassungsversuchen nicht möglich.

Es zeigte sich, dass bei den Versuchen zur Bestimmung des Frostwiderstandes Abweichungen innerhalb gleicher Betonrezepturen um bis zu 1000 % vorliegen. Ebenso war eine eindeutige Tendenz des Schädigungsgrades während der Prüfung zwischen einigen Instituten erkennbar. Worauf dies zurückzuführen ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Durch eine Konzentration von Zementwerken und -herstellern auf einzelne Prüfinstitute ist keine zufällige Verteilung des Ausgangsmaterials bei den Zulassungsversuchen gegeben. Unterschiede der Schädigungen können daher nicht eindeutig auf eine härtere Prüfung einzelner Institute zurückgeführt werden. Da allerdings auch bei Portlandzement, bei dem der Frostwiderstand durch den Klinker und damit nur durch das Zementwerk direkt, aber nicht durch den Zementhersteller beeinflusst wird, eine klare Tendenz der Abwitterung in Abhängigkeit der untersuchten Prüfinstitute 1 und 3 gegeben war, scheint zumindest ein Teil dieser Unterschiede in der unterschiedlichen Prüfhärte der Institute begründet.

Ähnliche Ergebnisse ergaben sich auch bei der Auswertung der Frost-Tausalz-Versuche. Auch hier war eine deutlich höhere Schädigung bei allen untersuchten Zementen von Institut 1 im Vergleich zu Institut 3 zu beobachten.

Im Rahmen eines vorliegenden Ringversuches [17] wurde der Einfluss von Schwankungen im Versuchsablauf innerhalb der nach den jeweiligen Prüfvorschriften zugelassenen Grenzen untersucht. Hierbei ergaben sich z.B. durch Temperaturschwankungen maximale Abweichungen von bis zu 30 %. Daher sind die vorhandenen Abweichungen der Prüfergebnisse, wie sie hier bei der Untersuchung der Zulassungsversuche bei den vom DIBT vorgeschriebenen Verfahren (Würfelverfahren, Verfahren nach ÖNORM B 3303) vorkommen, nicht alleine auf derartige Schwankungen zurückzuführen.

Bei der Auswertung eines vorliegenden Ringversuches [15], geleitet durch den Verein der Deutschen Zementindustrie (VDZ) aus dem Jahr 1992, wurden ähnlich hohe Unterschiede des

Schadigungsgrades zwischen den Instituten bei der Prüfung nach dem Würfelverfahren festgestellt. Mögliche vereinzelte Fehlerquellen in einigen Instituten (z.B. zu starke Austrocknung der Probekörper während der Trocknungsphase) konnten hierbei aufgedeckt werden, dennoch ist die Streuung zwischen den Instituten sowohl beim Frost-, als auch beim Frost-Tausalz-Versuch sehr hoch und ermöglicht keine präzise Aussage über den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes des Betons. In diesem Ringversuch lagen aber gerade die bei den Zulassungsprüfungen hauptsächlich involvierten Institute im Mittelfeld und lieferten ähnliche Messergebnisse. Eine Erklärung der hohen Abweichungen der Ergebnisse der Zulassungsprüfungen ist also nicht direkt einer erhöhten Prüfhärte dieser Institute zuzuordnen.

In einem nachfolgenden europäischen Ringversuch aus dem Jahr 1998, ebenfalls veranlasst durch den Verein der Deutschen Zementindustrie, wurden dagegen für die untersuchten Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes (CDF-Verfahren, Würfelverfahren, SLAB-Test) teilweise weitaus geringere Streuungen ermittelt. Hier scheint es möglich zu sein, durch eine korrekte Versuchsdurchführung aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

In der Regel wurden bei der Auswertung der Zulassungsversuche Streuungen (Variationskoeffizienten) in einer ähnlichen Größenordnung wie bei den Ringversuchen ermittelt. Es ist daher davon auszugehen, dass diese Abweichungen direkt der Versuchsdurchführung und der Prüfmethodik zuzuordnen sind.

Es wird daher vorgeschlagen, durch gezielte Untersuchungen im Rahmen weiterer Ringversuche eventuelle Unstimmigkeiten und Fehlerquellen des Versuchsablaufes oder Einflüsse der Materialstreuung aufzudecken und so die etablierten Verfahren zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes weiter zu verbessern. Untersuchungen von Setzer et. al. [10, 11] anhand des CF- bzw. CDF-Verfahrens haben gezeigt, dass es durch einen genau definierten und auf den Schädigungsmechanismus abgestimmten Versuchsablauf möglich ist, den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand unterschiedlicher Betone mit minimierter Streuung zu bestimmen.

Außerdem kann z.B. im Rahmen von Zulassungsversuchen, bei denen nachgewiesen werden muss, dass der zuzulassende Stoff die Eigenschaften des Betons nicht wesentlich verschlechtert (Zulassung anorganischer Zusatzstoffe), auf das in Ringversuchen nachgewiesenermaßen präzisere (und schnellere) CIF- bzw. CDF-Prüfverfahren umgestiegen werden. Eine Bewertung der Zemente hinsichtlich der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit im Rahmen der Zulassungsversuche sollte aber weiterhin nicht nur anhand von Grenzwerten, sondern v.a. vergleichend mit genormten Zementen erfolgen.

LITERATURVERZEICHNIS

- 1 Kreyszig E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen; Vandenhoeck & Ruprecht; Göttingen; 1974
- 2 Bunke N.: Prüfungen von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1045; DAfStb Heft 422; Beuth Verlag GmbH; Berlin 1991
- 3 Siebel E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Beurteilung mittels Würfelverfahren; pp. 496 – 501; Beton 42 (1992)
- 4 ÖNORM B 3303: Betonprüfung; Österreichisches Normungsinstitut: 1983
- 5 ÖNORM B 4200 Teil 10: Beton – Herstellung und Überwachung; Österreichisches Normungsinstitut
- 6 Draft recommendations for test methods for the freeze-thaw resistance of concrete – Slab test and cube test; Materials and Structures; pp. 366 – 371; 1995
- 7 SS 137244 03.95 Concrete Testing; Scaling at freezing; Swedish Standard; Stockholm; 1995
- 8 Setzer M.-J., G. Fagerlund, D.-J. Janssen: CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – test with sodium chlorid solution (CDF); Materials and Structure vol. 29; 1996
- 9 prEN-ISO 2736/2: Testing hardened concrete-test specimens. Part 2: Making and curing of test specimens
- 10 Hartmann V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton; Dissertation an der Universität Essen; 1992
- 11 Auberg R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test; Dissertation an der Universität Essen; 1998
- 12 Richtlinie für die Erteilung von Zulassungen für anorganische Betonzusatzstoffe (Zusatzrichtlinie); Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik 24; 1993
- 13 Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Flugaschezementen (FAZ) und Flugasche-Hüttenzement (FAHZ); Deutsches Institut für Bautechnik; 1990

- 14 Plähn J., Golz W: Vergleichsuntersuchungen an vier Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Straße und Autobahn (Heft 1/84)
- 15 Siebel E: Ringversuch zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton (Prüfbericht Nr. B 1429); Düsseldorf 1992
- 16 Siebel E., Breit W.: Ergebnisse eines Europäischen Ringversuches; Sonderdruck aus Betonwerk und Fertigteiltechnik 11; 1999
- 17 Siebel E., Breit W.: Final Report Be-TB-1489-4/1998, Standard Methods for Testing the Resitance of Concrete to Freezing and Thawing; Düsseldorf; 1998
- 18 DIN 1045 Teil 2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton; Beuth Verlag; Berlin; Juli 1999
- 19 DIN ISO 5725: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) vom Messverfahren und Messergebnissen, Deutsche Norm Nov. 1997

A Tabellen

Tabelle A 1; Ringversuch VDZ II: Versuchsmatrix und Bezeichnung der Mischungen nach [17]

Bindemittel			w/z-Wert [-]					
			0,35	0,45	0,45	0,55	0,55	0,70
			LP-Gehalt [Vol.-%]					
			-	5,0	-	4,0	-	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CEM I	32,5 R		0.1	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1
	42,5 R		0.2	1.2	2.2	3.2	4.2	5.2
CEM II A-S	32,5 R		0.30	1.30	2.30	3.30	4.30	5.30
	42,5 R		0.31	1.31	2.31	3.31	4.31	5.31
	52,5 R		0.32	1.32	2.32	3.32	4.32	5.32
CEM III A	32,5		0.4	1.4	2.4	3.4	4.4	5.4
CEM II B-S	42,5		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5
CEM I	42,5 R	SF	0.6	1.6	2.6	3.6	4.6	5.6
		FA	0.7	1.7	2.7	3.7	4.7	5.7

 Tabelle A 2: Abwitterungen [g/m^2] in Abhängigkeit der Minimaltemperatur nach dem SLAB-Verfahren nach [17]

FTW	Mischung					
	1.2			2.2		
	Minimaltemperatur					
	°C					
[-]	-15	-20	-24	-15	-20	-24
1	2	3	4	5	6	7
7	5	15	15	315	364	360
14	9	19	23	1584	1642	1479
25	13	23	28	4124	4117	3634
42	17	28	33	6495	6910	6624
56	22	31	37	10543	12382	12386

Tabelle A 3: gemessene Abwitterungen [g/m²] in Abhängigkeit der Minimaltemperatur nach dem CDF-Verfahren

FTW	Mischung					
	4.1 CEM I 32,5 R; w/z = 0,55; kein LP			4.4 CEM III A 32,5; w/z = 0,55; kein LP		
	Minimaltemperatur					
	° C					
[-]	-15	-18	-20	-15	-18	-20
1	2	3	4	5	6	7
7	527 ¹	918	1376	2098 ¹	2812	3555
14	1244	1873 ³	2353 ²	3547	4009 ³	4978 ²
28	2219	3477	3947	5062	6172	6890

¹ Abwitterung wurde nach 6 FTW bestimmt

² Abwitterung wurde nach 8 FTW bestimmt

³ Abwitterung wurde nach 13 FTW bestimmt

Tabelle A 4: Abwitterungen [g/m²] nach dem CF-Verfahren in Abhängigkeit der Wasserhärte des Prüfmediums nach [17]

Beton	Zusammensetzung	Abwitterung nach 56 FTW		
		demineralisiert	geringe Härte	hohe Härte
1	2	3	4	5
1.1	CEM I 32,5 R; w/z = 0,45; LP	41	37	62
2.1	CEM I 32,5 R; w/z = 0,45; kein LP	164	229	393
3.1	CEM I 32,5 R; w/z = 0,55; LP	260	265	381
1.4	CEM III A 32,5; w/z = 0,45; LP	395	431	596
3.4	CEM III A 32,5; w/z = 0,55; LP	1016	1454	1305
4.4	CEM III A 32,5; w/z = 0,45; kein LP	305	379	1271

Tabelle A 5: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Versuch nach dem Würfelverfahren
 (PZ 35 F, w/z = 0,60; kein LP)

Nr.	Institut	β_{D28}	w_{24h}	Anzahl Frost-Tau-Wechsel				
				10	20	30	50	100
[-]	[-]	[N/mm ²]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	37		0,2	0,3	0,3	0,7	3,2
2	1	38		0,4	0,4	0,5	0,7	3,6
3	1	38		0,3	0,3	0,3	0,5	2,8
4	1	42		0,1	0,2	0,3	0,6	1,6
5	1	37		0	0,1	0,2	0,2	0,6
6	1	36	0,7	0	0	0,1	0,1	0,3
7	2	38	1,3	0,02	0,1	0,2	0,4	1,2
8	2	40		0,1	0,1	0,4	1,1	2,2
9	2	36		0	0,1	0,3	0,7	2,5
10	2	36	1,2	0	0,1	0,1	0,2	0,5
11	2	45,8		0,1	0,2	0,3	0,5	1,2
12	3	47		0,1	0,1	0,1	0,2	0,8
13	3	41		0,1	0,1	0,1	0,5	1,8
14	3	37		0,1	0,1	0,1	0,2	1,8
15	3	40		0,1	0,1	0,1	0,2	0,3
16	3	44		0	0	0,1	0,2	0,5
17	3	50		0,1	0,1	0,1	0,4	2,0
18	3	38		0,1	0,1	0,1	0,2	0,6
19	3	44		0	0	0	0	0,2
20	3	44		0	0	0	0,1	0,2
21	4	37,9		0,1	0,1	0,2	0,4	1,9
22	4	42		0	0,1	0,1	0,2	0,6
23	sonstig	38		0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
24	sonstig	38	0,7	0,06	0,1	0,2	0,4	1,9
Mittelwert		40	1,0	0,09	0,1	0,2	0,4	1,4
s		-	0,3	0,1	0,1	0,1	0,3	1,0
v		-	34 %	112 %	82 %	66 %	68 %	71 %

Tabelle A 6: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Versuch nach dem Würfelverfahren
 (FAHZ 35 F, w/z = 0,60; kein LP)

Nr.	Institut	β_{D28}	w_{24h}	Anzahl Frost-Tau-Wechsel				
				10	20	30	50	100
[-]	[-]	[N/mm ²]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	35	1	0	0,1	0,3	1,9	5,6
2	1	41		0,1	0,2	1,1	1,7	5,1
3	1	35	1	0	0,1	0,3	1,9	5,6
4	1	41	1,6	0,1	0,2	1,1	1,7	5,1
5	3	49		0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
6	3	49	1,8	0	0,1	0,1	0,3	1,0
7	3	46	1,4	0	0,1	0,1	0,2	0,4
8	3	39	1,9	0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
9	3	39	1,8	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
10	3	39	1,9	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
11	3	40	1,8	0	0,1	0,1	0,3	1,0
12	3	40	1,4	0	0,1	0,1	0,2	0,4
Mittelwert		41	1,6	0	0,1	0,3	0,7	2,1
s		-	0,3	0	0,0	0,4	0,8	2,4
v		-	21 %	104 %	39 %	127 %	107 %	112 %

Tabelle A 7: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Versuch nach dem Würfelverfahren
(PKZ 35 F, w/z = 0,60; kein LP)

Nr.	Institut	β_{D28}	w_{24h}	Anzahl Frost-Tau-Wechsel				
				10	20	30	50	100
[-]	[-]	[N/mm ²]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	34		0,3	0,4	0,4	0,7	4,4
2	1	33		0,2	0,3	0,4	0,6	3,0
3	1	33		0,6	1,0	1,2	1,9	6,4
4	1	37		0,1	0,1	0,2	0,4	1,5
5	1	33		0,1	0,1	0,3	0,5	2,5
6	3	42		0	0,1	0,1	0,2	0,7
7	3	43		0,1	0,2	0,2	0,2	0,7
8	3	37		0,1	0,1	0,1	0,4	1,0
9	3	42		0,1	0,1	0,2	0,5	7,8
10	3	33		0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
11	3	41		0	0,1	0,3	1,2	3,7
12	3	49		0,1	0,1	0,2	0,5	2,0
13	3	36		0,1	0,2	0,3	0,9	3,5
14	3	41		0	0	0	0,0	0,1
15	3	41		0	0	0	0,1	0,2
16	3	41	1,2	0	0	0	0,1	0,2
17	4	36	0,9	0,1	0,2	0,3	0,6	2,9
18	4	38		0	0,1	0,1	0,2	1,1
19	4	38	1,6	0	0,1	0,1	0,2	1,1
20	sonstige	36		0,1	0,2	0,3	0,6	2,9
Mittelwert		38,2	1,2	0,1	0,2	0,3	0,5	2,3
s		-	0,3	0,1	0,2	0,3	0,4	2,1
v		-	-	129 %	123 %	104 %	89 %	91 %

Tabelle A 8: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F, w/z = 0,50; LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	46	0,7	1,0	1,2	1,6	2,3
2	1	45	4,2	5,8	6,4	7,4	12
3	1	42	1,1	1,5	2,1	2,9	4,1
4	1	35	1,4	2,4	3,2	3,9	4,2
5	1	43	1,1	2,7	3,0	3,5	4,0
6	1	40	5,6	8,1	9,4	11	12
7	1	34	0,6	1,2	1,6	2,3	2,9
8	1	38	3,7	6,6	7,6	8,9	11
9	1	33	3,0	6,6	7,3	8,5	11
10	1	39	0,5	3,3	4,2	4,8	5,1
11	2	39	0,3	1,2	1,9	2,8	4,1
12	3	33	0,1	0,7	1,7	4,7	5,5
13	3	43	0,9	1,3	1,5	1,5	5,5
14	3	36	0,5	0,6	0,7	1,1	1,4
15	3	40	0,1	0,1	0,2	0,8	1,0
16	3	43	0,4	0,6	0,6	1,1	1,4
17	3	44	0,5	1,2	1,6	4,3	4,9
18	3	40	0,1	0,4	0,5	2,0	5,0
19	3	43	0,9	1,9	2,6	3,7	5,9
20	3	44	0,8	1,2	1,9	3,1	5,0
21	3	35	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5
22	3	41	0,1	0,6	0,8	1,5	1,9
23	3	35	0,2	0,7	0,9	1,4	2,0
24	3		0,1	0,2	0,2	0,3	0,5
25	3	41	1,7	2,5	2,7	3,6	4,0
26	4	39	0	0,1	0,1	0,2	3,0
27	4	42	0,9	1,3	1,8	2,1	3,6
28	4	41	0	0,3	0,5	1,2	2,7
29	sonst		0,9	1,3	1,8	2,1	3,6
Mittelwert		41	1,0	1,9	2,4	3,2	4,5
s		-	1,4	2,2	2,4	2,7	3,3
v		-	130 %	112 %	103 %	85 %	73 %

Tabelle A 9: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (PZ 35 F, w/z = 0,50; kein LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	61	1,4	6,9	22	123(A)	
2	1	50	3,1	7,4	15	75(A)	
3	1	52	2,5	7,4	13	81(A)	
4	1	52	9,1	38	81	214(A)	
5	1	47	4,4	13	47	158(A)	
6	1	47	0,3	40	83	170(A)	
7	1	54	1,1	5,6	38(A)		
8	1	52	2,1	9,9	39(A)		
9	1	56	2,2	6,2	9,7	47(A)	
10	1	48	6,6	15	27	128(A)	
11	2	51	2,4	25	45	78	118
12	3	57	3,6	12	26	26(A)	
13	3	49	0,3	1,4	2,4	5,8	12
14	3	61	0,1	0,6	2,8	22(A)	
15	3	50	0,1	1,2	2,6	22(A)	
16	3	48	2,1	5,0	5,8	19(A)	
17	3	60	3,7	10	17(A)		
18	3	58	0,5	3,0	11(A)		
19	3	54	0,2	1,9	2,5	32(A)	
20	3	55	1,3	7,7	29(A)		
21	3	39	0,3	6,4	20	68(A)	
22	3	54	1,0	11	23(A)		
23	3	53	0,8	3,5	14(A)		
24	3		0,3	1,9	2,5	32(A)	
25	3	53	3,9	31(A)			
26	4	47	0,2	3,8	19	32	74
27	4	57	1,8	2,5	2,9	23	36
28	4	44	0,5	7,1	15	36	79
29	sonst		1,8	2,5	2,9	23	36
Mittelwert		52	2,0	9,9	22	67	59
s		-	2,1	10	21	58	39
v		-	105 %	106 %	97 %	87 %	65 %

Tabelle A 10: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (FAHZ 35 F, w/z = 0,50; LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	34	3,6	8,2	11	12	15
2	1	32	2,9	9,3	11	14	21
3	1	38	1,2	4,6	6,2	7,8	11
4	3	43	0,2	1,0	1,3	4,6	7,3
5	3	42	0,4	2,6	4,1	8,3	10
6	3	41	3,4	5,0	5,0	7,9	9,4
Mittelwert		38	2,0	5,1	6,4	9,1	12
s		-	1,5	3,2	3,8	3,4	5,1
v		-	79 %	62 %	59 %	37 %	41 %

Tabelle A 11: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (FAHZ 35 F, w/z = 0,50; kein LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	49	13	37	68	172(A)	
2	1	45	4,2	27	67	156(A)	
3	1	51	2,8	36	67	124(A)	
4	3	57	5,5	17	51(A)		
5	3	48	1,6	23	57(A)		
6	3	53	12	58	58(A)		
Mittelwert		51	6,4	33	61	150	
s		-	4,7	15	6,9	24	
v		-	73 %	44 %	11 %	16 %	

A: Abbruch des Versuches

Tabelle A 12: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F, w/z = 0,50; LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	44	1,2	1,8	2,1	2,6	4,1
2	1	39	3,0	4,1	4,7	7,1	13
3	1	42	2,7	5,0	6,1	7,3	9,7
4	1	37	1,5	3,1	4,1	4,9	5,3
5	1	36	0,7	1,3	1,8	2,4	2,9
6	1		1,2	1,8	2,1	2,6	4,1
7	3	40	1,6	4,0	5,6	10	12
8	3	46	0,5	0,9	1,6	1,6	4,0
9	3	45	0,4	0,7	0,8	1,4	2,0
10	3	38	0,3	0,5	0,7	1,2	1,2
11	3	41	0,2	0,5	0,6	1,2	1,6
12	3	46	0,5	0,7	0,7	0,9	1,1
13	3	37	0,2	0,6	0,8	2,2	4,3
14	3	40	0,5	0,9	1,6	2,7	5,1
15	3	46	0,2	0,4	0,9	3,4	7,2
16	3		0,2	0,9	1,1	3,2	7,2
17	4	40	0	0,2	0,3	0,8	4,6
18	4	38	0,9	2,2	2,9	3,4	4,4
19	4	35	0,3	1,8	2,7	4,9	7,8
20	4		0,9	2,2	2,9	3,4	4,4
Mittelwert		40	0,9	1,7	2,2	3,4	5,3
s		-	0,8	1,4	1,7	2,4	3,3
v		-	97 %	82 %	78 %	72 %	62 %

Tabelle A 13: Zulassungsversuche: Abwitterungen Frost-Tausalz-Versuch nach dem ÖNORM-Verfahren (PKZ 35 F, w/z = 0,50; kein LP-Beton)

Nr.	Institut	β_{D56}	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel				
			5	15	25	50	70
[-]	[-]	[N/mm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	55	2,4	13	53	159(A)	
2	1	51	5,7	14	29	108(A)	
3	1	51	5,5	12	20	93(A)	
4	1	50	1,6	17	68(A)		
5	1	47	1,3	12	44(A)		
6	1	50	5,2	22	56(A)		
7	1		2,4	13	53	159(A)	
8	3	52	5,3	13	22(A)		
9	3	59	1,5	7,2	11	11	29
10	3	50	1,6	6,9	13	30(A)	
11	3	52	1,2	6,9	20(A)		
12	3	49	0,5	1,2	2,2	5,7	7,5
13	3	53	4,9	26	85(A)		
14	3	50	0,4	1,6	2,3	16	19
15	3	51	6,1	16	32(A)		
16	3	58	1,8	4,7	51(A)		
17	3	51	1,9	7,9	30(A)		
18	3		8,8	17	28(A)		
19	3		1,9	7,9	30(A)		
20	4	50	1,8	13	30	38	107
21	4	50	2,9	33	82	105(A)	
22	4	42	15,6	22	22	36	39
23	sonst		2,9	33	82	105(A)	
Mittelwert		51	3,6	14	38	72	40
s		-	3,4	8,7	25	56	39
v		-	94 %	62 %	66 %	78 %	98 %

A: Abbruch des Versuches

Tabelle A 14; mittlere Abwitterungen nach [14] (ÖNORM-Verfahren)

Nr.	Rezeptur	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel			
		5	10	25	50
[-]	[-]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]	[g/dm ²]
1	2	3	4	5	6
1	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	0,15	0,25	0,42	0,58
2	PZ 45 F, w/z = 0,45; kein LP	0,48	1,05	1,69	2,15
3	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	0,08	0,21	0,3	0,42
4	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP (Zuschlag nach ZTV-Beton nicht frostsicher)	0,21	0,43	0,71	0,98

Tabelle A 15; berechneter Variationskoeffizient nach [14] (ÖNORM-Verfahren)

Nr.	Rezeptur	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel			
		5	10	25	50
[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6
1	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	62	55	39	35
2	PZ 45 F, w/z = 0,45; kein LP	109	91	81	71
3	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	94	90	65	41
4	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP (Zuschlag nach ZTV-Beton nicht frostsicher)	63	55	27	18
Mittel		83	73	53	41

Tabelle A 16; mittlere Abwitterungen nach [14] (Würfel-Verfahren)

Nr.	Rezeptur	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel			
		5	10	25	50
[-]	[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2	3	4	5	6
1	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	0,05	0,1	0,19	0,4
2	PZ 45 F, w/z = 0,45; kein LP	0,11	0,38	1,14	2,54
3	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	0,03	0,06	0,11	0,23
4	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP (Zuschlag nach ZTV-Beton nicht frostsicher)	0,08	0,18	0,39	0,84

Tabelle A 17; berechneter Variationskoeffizient nach [14] (Würfel-Verfahren)

Nr.	Rezeptur	Anzahl der Frost-Tau-Wechsel			
		5	10	25	50
[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
1	2	3	4	5	6
1	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	73	38	36	32
2	PZ 45 F, w/z = 0,45; kein LP	100	76	89	72
3	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP	113	60	57	31
4	PZ 45 F, w/z = 0,45; LP (Zuschlag nach ZTV-Beton nicht frostsicher)	32	29	26	19
Mittel		80	51	52	39

Tabelle A 18; Zuordnung von der in diesem Bericht verwendeten Nummerierung zu der Nummerierung des Prüfberichtes B 1429 des VDZ [15]

Bericht	Zuordnung der im Bericht verwendeten Nummerierung																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1																		
F 2013	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
B 1429	4	5	8	-	7	1	2	3	6	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Tabelle A 19; Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Mischungen nach [15]

Mischung	Rohdichte	LP-Gehalt	a_{10}	β_{D28}	
[-]	[-]	[kg/dm ³]	[Vol.-%]	[cm]	[N/mm ²]
1	2	3	4	5	6
Beton 1 (PZ 35 F; w/z = 0,55; kein LP)	Mischung 1	2,36	2,2	41	51
	Mischung 2	2,37	2,3	39	52
Beton 2 (PZ 35 F; w/z = 0,70; kein LP)	Mischung 1	2,31	2,5	47	32
	Mischung 2	2,31	2,5	45	30
Beton 3 (PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)	Mischung 1	2,27	6,3	35	36
	Mischung 2	2,27	6,4	35	35
Beton 4 (PZ 35 F; w/z = 0,50; kein LP)	Mischung 1	2,39	1,8	38	56
	Mischung 2	2,38	1,9	40	55

Tabelle A 20: gemessene Abwitterung der Institute, Mittelwert, Standardabweichung nach [15]
(Beton 1: PZ 35 F; w/z = 0,55; kein LP)

Institut	Abwitterung				
	[M.-%]				
	10 FTW	25 FTW	50 FTW	75 FTW	100 FTW
1	2	3	4	5	6
1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,9
3	0	0,1	0,2	0,2	0,4
5	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
6	0,1	0,2	0,6	1,0	1,4
7	0	0,1	0,1	0,2	0,4
8	0	0,1	0,2	0,3	0,3
10	0	0	0,1	0,1	0,2
12	0,1	0,1	0,2	0,4	0,6
13	0,1	0,3	0,6	1,0	1,4
14	0,1	0,1	0,3	0,4	0,5
15	0	0	0	0,1	0,1
16	0	0,1	0,3	0,6	0,8
18	0,1	0,2	0,4	0,7	1,1
Mittelwert	0,1	0,1	0,3	0,5	0,7
s	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4
v	96 %	69 %	67 %	68 %	66 %

Tabelle A 21: gemessene Abwitterung der Institute, Mittelwert, Standardabweichung nach [15]
 (Beton 2: PZ 35 F; w/z = 0,70; kein LP)

Institut	Abwitterung				
	[M.-%]				
	10 FTW	25 FTW	50 FTW	75 FTW	100 FTW
1	2	3	4	5	6
1	0,1	0,3	1,1	2,5	3,3
3	0,1	0,3	1,3	2,1	2,8
5	0,1	0,1	0,5	1,4	2,5
6	0,2	0,5	2,1	4,2	6,2
7	0,1	0,2	0,3	0,7	1,1
8	0,1	0,2	0,4	0,7	1,1
10	0,1	0,2	0,5	0,8	1,3
12	0,2	0,3	0,8	2,0	3,5
13	0,2	0,3	0,9	2,3	1,1
14	0,1	0,2	0,6	1,5	2,7
15	0,0	0,1	0,2	1,0	1,8
16	0,1	0,3	1,5	3,1	5,2
18	0,1	0,4	1,0	2,3	4,3
Mittelwert	0,1	0,3	0,9	1,9	3,1
s	0,1	0,1	0,5	1,0	1,6
v	48 %	43 %	63 %	55 %	52 %

Tabelle A 22: gemessene Abwitterung der Institute, Mittelwert, Standardabweichung nach [15]
 (Beton 3: PZ 35 F; w/z = 0,50; LP)

Institut	Abwitterung				
	[M.-%]				
	10 FTW	25 FTW	50 FTW	75 FTW	100 FTW
1	2	3	4	5	6
3	0,9	1,4	1,9	2,4	2,7
5	0,4	0,8	1,4	2,2	3,3
6	0,3	0,5	0,8	1,0	1,3
7	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8
8	0,2	0,6	1,2	2,7	4,0
10	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9
12	0,3	0,6	1,0	1,2	1,5
13	1,1	2,0	2,7	3,3	4,1
14	0,5	0,9	1,3	1,7	2,1
15	1,3	2,2	2,5	2,6	2,9
16	0,7	1,2	1,6	2,2	2,8
17	0,3	0,7	1,4	2,4	4,0
Mittelwert	0,5	1,0	1,4	1,9	2,5
s	0,4	0,6	0,7	0,9	1,2
v	71 %	64 %	50 %	44 %	48 %

Tabelle A 23: gemessene Abwitterung der Institute, Mittelwert, Standardabweichung nach [15]
(Beton 4: PZ 35 F; w/z = 0,50; kein LP)

Institut	Abwitterung				
	[M.-%]				
	10 FTW	25 FTW	50 FTW	75 FTW	100 FTW
1	2	3	4	5	6
2	10	21	32	40	46
3	5,3	11	14	18	21
5	4,1	9,7	15	20	24
6	3,3	7,7	12	16	20
7	3,8	9,7	15	18	22
8	2,3	9,2	16	20	25
10	0,6	3,6	5,8	6,5	8,0
12	1,5	6,5	12	17	22
13	7,9	16	22	26	29
14	5,0	12	17	20	23
15	5,8	15	22	27	31
16	5,7	11	16	21	27
17	0,4	5,2	9,4	13	17
18	11,0	26	36	41	46
Mittelwert	4,8	12	18	22	26
s	3,3	6,2	8,1	9,2	10
v	69 %	53 %	47 %	43 %	39 %