

## **Forschungsbericht**

12-8900005/AiF-13928N/HB  
vom 07.12.2006

### **Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis**

**AiF-Vorhaben - Nr.: 13928 N**

Forschungsstelle: Universität Stuttgart  
Otto-Graf-Institut (FMPA)  
Pfaffenwaldring 4  
70569 Stuttgart

Projektleiter: Dipl.-Ing. Andreas Huß

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt

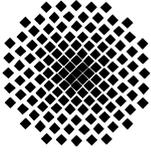
Förderer / Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)  
Scharnhorststraße 34-37  
10115 Berlin

Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF)  
„Otto von Guericke“ e.V.  
Hauptgeschäftsstelle  
Bayenthalgürtel 23  
50968 Köln

Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV)  
Kurfürstenstraße 129  
10785 Berlin

Laufzeit: 01.10.2003 bis 30.09.2006

Aktenzeichen: Antrags - Nr.: N05349/02  
DBV - Nr.: 247



Materialprüfungsanstalt · Universität Stuttgart · Otto-Graf-Institut  
Postfach 801140 · D-70511 Stuttgart

Telefon +49 (0)711-685-62255 / 62248  
Telefax +49 (0)711-685-66828  
E-mail fmpa.abt1@po.uni-stuttgart.de  
Abteilung Mineralische Baustoffe  
Dienstgebäude Pfaffenwaldring 4 c  
D-70569 Stuttgart

07.12.2006

## **Forschungsbericht**

12-8900005/AiF-13928N/HB

### **Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis AiF-Forschungsprojekt Nr.: 13928 N (DBV-Nr.: 247)**

#### **1. Vorbemerkungen, Auftrag**

Die Untersuchungen wurden vom Deutschen Beton- und Bautechnik Verein E.V. (DBV) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) mit den Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Der Beratergruppe gehören folgende Herren an:

- Dipl.-Ing. R. Pillar / Dipl.-Ing. J. Prause  
(Schäfer-Bauten GmbH, Wilhelmstraße 80, 49477 Ibbenbüren)
- Dr.-Ing. J.-P. Wagner  
(Bilfinger Berger AG (ZLB), Carl-Reiß-Platz 1-5, 68165 Mannheim)
- Dipl.-Ing. L. Meyer (Gast)  
(Deutscher Beton- u. Bautechnik Verein E.V., Postfach 110512, 10835 Berlin)
- Dr.-Ing. E. Siebel (Gast)  
(Forschungsinstitut der Zementindustrie, Postfach 301063, 40410 Düsseldorf)
- Lothar Heck  
(W. Franz GmbH Bauunternehmen, Kinzigheimer Weg 4, 63450 Hanau).

Dem Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V., der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. und den Herren der Beratergruppe sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Inhalt des AiF-Forschungsprojekts Nr.: 13928 N (DBV-Nr.: 247) „Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis“ [1] war die vergleichende Untersuchung des Frostwiderstandes von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzungen unter Laborbedingungen und nach Auslagerung am Otto-Graf-Institut in Stuttgart. Die Zusammensetzungen der untersuchten Betone lagen dabei im Grenzbereich der Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] für die Expositionsklassen XF1 und XF3 sowie außerhalb der Vorgaben (u. a. höherer w/z-Wert, geringerer Zementgehalt). Die Beanspruchung der untersuchten Betone bestand aus reinem Frostangriff ohne Taumittel. Für die Frostbeanspruchung im Labor wurde das CIF-Prüfverfahren nach [4], das u. a. als alternatives Prüfverfahren (CF-Prüfverfahren) in der Vornorm DIN CEN/TS 12390-9 [5] angegeben ist, mit demineralisiertem Wasser angewendet. Da für die Beurteilung des Frostwiderstandes von XF1-Betonen derzeit kein genormtes Prüfverfahren zur Verfügung steht, wurde das CIF-Prüfverfahren auch bei der Prüfung der XF1-Betone angewendet. Für die Auslagerung unter praxisorientierten Bedingungen wurden als Prüfkörper Würfel mit rd. 15 cm Kantenlänge hergestellt. Dabei wurde eine der Seitenflächen ohne Verwendung von Trennmittel gegen eine 5 mm Dicke Teflonscheibe betoniert. Diese Seitenfläche wurde als Prüffläche, die der Witterung ausgesetzt war, verwendet. Während der Auslagerung wurden die Prüfflächen der XF3 Betone horizontal unter freiem Himmel positioniert. Die Prüfflächen der XF1 Betone wurden vertikal in Richtung Westen ausgerichtet. Die Auslagerung fand auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes statt. Die ausgelagerten Prüfkörper wurden nach jeder Frost-Periode visuell auf Veränderungen durch Frosteinwirkung untersucht. Zudem wurden über einbetonierte Sensoren in ausgewählten Probekörpern Informationen über den Temperaturverlauf und die Feuchtigkeit (ausgedrückt über den elektrolytischen Widerstand im Beton) erfasst.

Der vorliegende Bericht enthält die Auswertung der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Prüfungen bzw. Untersuchungen und einen Vergleich der Laborergebnisse mit den Feststellungen an den Auslagerungsproben.

**„Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.“**

## **2. Allgemeine Angaben zu den untersuchten Betonen**

Die Prüfungen wurden an den in Tabelle 1, Beilage 1 aufgeführten Betonen durchgeführt. Der Zuschlag nach DIN EN 12620 [6] bestand in allen Mischungen aus Flusssand sowie Kies der Frostkategorie F<sub>1</sub> bzw. gebrochenem Muschelkalk im Übergangsbereich der Frostkategorie F<sub>2</sub>/F<sub>4</sub>

nach DIN EN 12620 [6]. Die Zusammensetzungen wurden dabei so gewählt, dass der Zementgehalt der Zemente nach DIN EN 197-1 [7] und der Wassermenge zum einen an den zulässigen Grenzen nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3], zum anderen außerhalb dieser Grenzen lagen. Mit Ausnahme von Luftporenbildner bei den LP-Betonen wurden keine Zusatzmittel oder Zusatzstoffe verwendet. Die grenzwertigen Betonzusammensetzungen wurden als „worst case nach Norm“ gewählt. Die außerhalb der Norm liegenden Zusammensetzungen wurden im Hinblick auf eine möglichst starke Schädigung der Auslagerungsproben innerhalb weniger Frostperioden gewählt und stehen daher nicht direkt im Zusammenhang mit der Praxis.

### **3. Ausgangsstoffe, Zusammensetzung und Kennwerte der untersuchten Betone**

Für die Herstellung der Betone wurden folgende Ausgangsstoffe verwendet:

**Zemente** nach DIN EN 197-1 [7] der Firma Schwenk Werk Mergelstetten:

- Portlandzement CEM I 32,5 R und
- Hochofenzement CEM III/A 32,5 N.

Die am Otto-Graf-Institut an den verwendeten Zementen bestimmten Kennwerte sind in Tabelle 2, Beilage 2, zusammengefasst.

**Gesteinskörnungen** nach DIN EN 12620 [6]:

- Flusssand und Kies aus den Beständen des Otto-Graf-Institutes sowie
- Muschelkalksplitt der Korngröße 2/8 und 8/16 der Firma Otto Schäfer GmbH & Co. Schotterwerke Wilhelmsglück

Die am Otto-Graf-Institut bestimmten Ergebnisse der Frostprüfungen mit destilliertem Wasser nach DIN EN 1367-1 [12] sind in Tabelle 3, Beilage 3, zusammengefasst.

**Luftporenbildner** aus Institutsbeständen:

- MISCHÖL LP 70 (LP) der Firma Woermann.

Die Mischungsberechnung für die Zusammensetzung der untersuchten Betone wurde mit der bekannten Stoffraumrechnung durchgeführt. In den Tabellen 4 bis 6, Beilagen 4 bis 6 sind die Zusammensetzungen für die Betone angegeben.

Im Rahmen der Vorbereitungen für die Herstellung der Betone wurden die lufttrockenen Gesteinskörnungen für die einzelnen Betonmischungen abgewogen und bis zur Herstellung der Betone abgedeckt in Fässern gelagert. Die beschafften Zemente (Sackware) wurden zusätzlich in Folie

verpackt und bis zur Herstellung der einzelnen Betonmischungen an einem Ort mit geringer Luftfeuchtigkeit gelagert.

Aufgrund des zeitlichen Ablaufs und der Kapazität der für die Laborprüfung zur Verfügung stehenden Frosttruhe wurden die Mischungen für die Prüfkörper der Auslagerungsversuche und die Prüfkörper der Laborprüfungen nicht gleichzeitig hergestellt. Die Herstellung der Auslagerungsproben erfolgte im Herbst 2002; die Prüfkörper für die Laborprüfungen wurden im Laufe des Jahres 2003 hergestellt.

Zur Mischung der Ausgangsstoffe wurde ein Zwangsmischer vom Typ Zyklus ZZ 75 verwendet. Die Mischungsgröße betrug bei allen hergestellten Rezepturen rd. 55 dm<sup>3</sup>. Der Mischungsvorgang entsprach bei allen Mischungen folgendem Ablauf:

1. Einfüllen der Zuschläge (grobe Zuschläge zuerst, feine zuletzt),
2. Zugabe von 50 % des Anmachwassers,
3. 15 s mischen, dann 2 min ruhen lassen,
4. Zugabe des Zementes und 15 s mischen,
5. Zugabe des restlichen Anmachwassers (ggf. mit Zugabe des Luftporenbildners) innerhalb von 15 s in den laufenden Mischer und weitere 2 min mischen.

An den so hergestellten Mischungen wurden folgende Frischbetonkennwerte bestimmt:

- Ausbreitmaß  $a_{10}$  bzw. Verdichtungsmaß  $v_{10}$
- Rohdichte und Luftgehalt im Lufttopf und
- Temperatur.

Parallel zu den Frischbetonprüfungen wurden die Prüfkörper für die Auslagerungsversuche bzw. die Laborprüfungen hergestellt. Die Prüfkörperherstellung erfolgte in allen Fällen unter Verwendung eines Aufsatzrahmens über der Form. Die Verdichtungszeit auf dem Rütteltisch betrug in Abhängigkeit von der Konsistenz zwischen 10 und 40 s. Es wurde möglichst die rechnerische Sollrohndichte angestrebt.

Für die Auslagerungsversuche wurden von jeder Betonsorte folgende Prüfkörper betoniert:

- 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm für die Prüfung der Druckfestigkeit und
- 6 Würfel mit 15 cm Kantenlänge, wobei eine Seitenfläche (Prüffläche) gegen eine Teflonplatte betoniert wurde.

Für die Laborversuche wurden von jeder Betonsorte folgende Prüfkörper betoniert:

- 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm für die Prüfung der Druckfestigkeit und
- 5 Würfel mit 15 cm Kantenlänge, wobei zwei gegenüberliegende Seitenflächen (Prüfflächen) gegen Teflonplatten betoniert wurden.

Unmittelbar nach dem Einbringen des Betons in die Formen wurden die Proben gekennzeichnet und anschließend in den Nasslagerraum (Klima 20 °C / > 95 % rel. LF.) gestellt.

Die Proben wurden bis zur Auslagerung im Freien bzw. bis zur Prüfung im Labor wie folgt gelagert:

Auslagerungsproben für die Auslagerung:

- 1 Tag in der Form im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF.,
- weitere 2 Tage im Klima 20 °C / >95 % rel. LF.
- 1 bis 3 Tage im Klima 20 °C / 65 % rel. LF.
- im Alter von 5 bis 7 Tagen wurden die Würfel an 5 Seiten mit Epoxydharz versiegelt (die an Teflon geschaltete Prüffläche wurde nicht versiegelt) und
- ab dem 6. bis 8. Tag auf dem Dach des Institutes im Freien ausgelagert.
- Im Alter von 28 Tagen wurde an den Prüfkörpern die Ultraschalllaufzeit im Wasserbad gemäß dem CIF-Prüfverfahren gemäß [4] bestimmt.

Prüfkörper für die Druckfestigkeitsprüfung der Auslagerungsproben:

- 1 Tag in der Form im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF.,
- weitere 2 Tage im Klima 20 °C / >95 % rel. LF. dann
- 1 bis 3 Tage im Klima 20 °C / 65 % rel. LF.

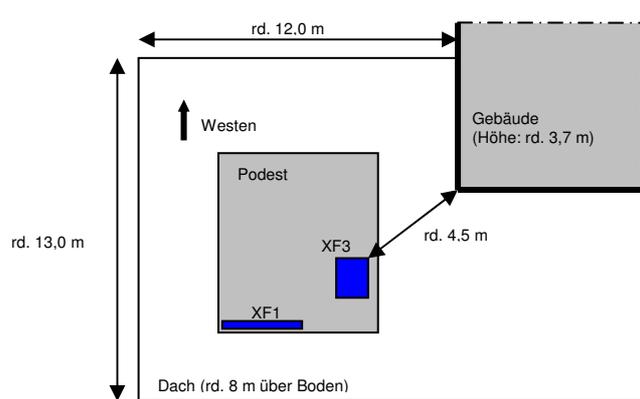
Prüfkörper für die Laborprüfungen:

- 1 Tag in der Form im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF.,
- weitere 6 Tage im Klima 20 °C / >95 % rel. LF. dann
- 21 Tage im Klima 20 °C / 65 % rel. LF.

Eine Zusammenstellung der begleitenden Frisch- und Festbetonbetonkennwerte der untersuchten Mischungen bzw. der daraus hergestellten Prüfkörper ist in den Tabellen 7 und 8, Beilagen 7 und 8 enthalten.

#### 4. Angaben zur Auslagerung der Betonproben

Die Auslagerung der Betonproben erfolgte auf dem Dach der Abteilung Mineralische Baustoffe des Otto-Graf-Institutes in Stuttgart-Vaihingen. Zur Lagerung der Proben stand hierzu eine Plattform aus Holz zur Verfügung, die in einem Abstand von rd. 40 cm zum Dach des Gebäudes montiert war. Die Plattform sowie die Position der ausgelagerten Proben der Expositionsklasse XF1 und XF3 sind in der folgend dargestellten Skizze eingezeichnet.



Skizze der Auslagerungsstelle auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes

Die mit Ausnahme der Prüffläche mit Epoxydharz versiegelten Prüfkörper wurden auf einer 15 cm dicken Unterlage aus expandiertem Polystyrol (XPS) der Wärmeleitgruppe 0,035 W/(m·K) aneinandergereiht und ebenfalls mit 15 cm dickem XPS mit Ausnahme der Prüfflächen eingepackt. Die folgenden Bilder zeigen die Anordnung der eingepackten Probekörper im Überblick sowie die Anordnungen der XF1- und XF3-Proben als Einzelbilder.

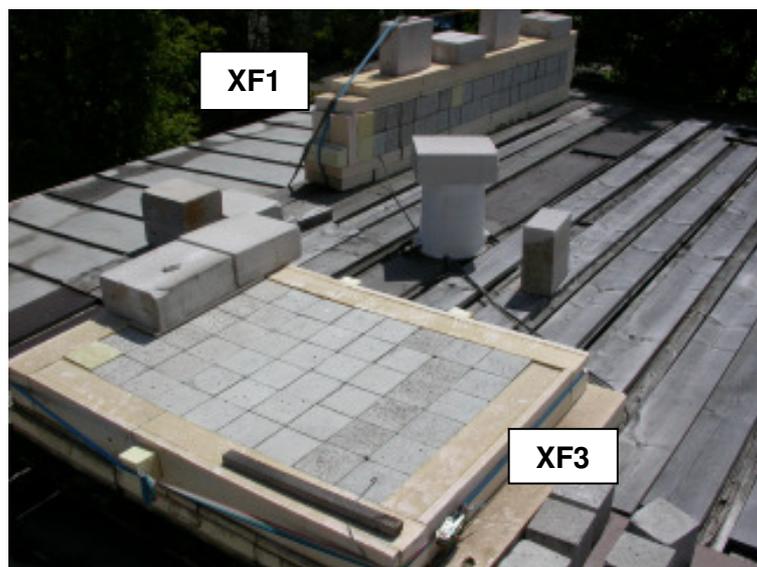


Foto der Auslagerungsproben auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes

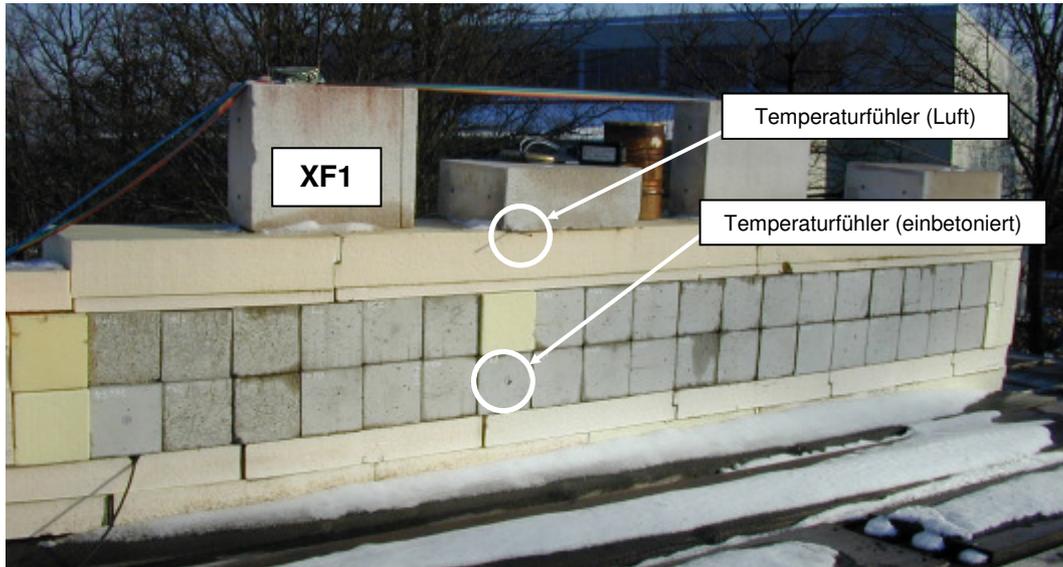


Foto der Auslagerungsproben der Mischungen XF1 auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes

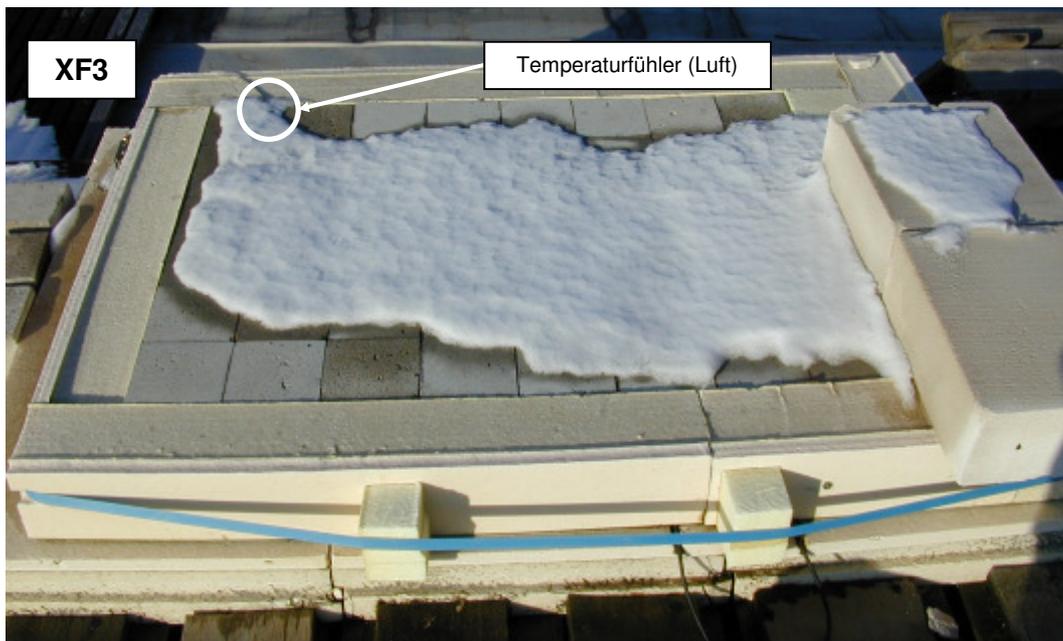


Foto der Auslagerungsproben der Mischungen XF3 auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes

## **5. Angewendete Prüf- und Untersuchungsverfahren zur Erfassung und Beschreibung des Frostwiderstandes**

### **5.1. Frostprüfung nach dem CIF-Prüfverfahren**

Für die Frost-Prüfungen an den Laborproben wurde das CIF-Prüfverfahren gemäß der Prüfvorschrift nach [4] angewendet. Die Probenlagerung, -abmessung und -vorbereitung entsprach dabei den Angaben in der Prüfvorschrift. Die Proben wurden an den Seitenflächen mit einem Epoxidharz gemäß der Prüfvorschrift versiegelt. Zur Prüfung wurde die CDF / CIF Prüfanlage der Schleibinger Geräte GmbH mit dem Regelprogramm für die CIF-Prüfung eingesetzt.

### **5.2. Messung des dynamischen E-Moduls der Auslagerungsproben**

Der dynamische E-Modul der Auslagerungsproben wurde in Anlehnung an das CIF-Prüfverfahren gemäß [4] an den Würfeln mit rd. 15 cm Kantenlänge bestimmt. Hierzu wurden folgende Geräte der Schleibinger Geräte GmbH eingesetzt (Angaben der Fa. Schleibinger):

- Ultraschall-Reinigungsgerät SONOREX SUPER RK 514 (Innenmaße 320x300x150 mm, HF-Dauerspitzenleistung 2x450 W/Periode) zur Reinigung der Prüfflächen vor der Messung der Ultraschall-Laufzeit.
- Messbad für 150 mm Würfel zur Durchschallung der Betonproben mit dem Pundit Ultraschall-Messgerät aus 20 mm Plexiglas.
- Ultraschall-Messgerät Pundit+ zur Messung der Laufzeit, E-Modulbestimmung mit 150 kHz Prüfköpfen

Nach der Reinigung der der Witterung ausgesetzten Prüffläche im Ultraschall-Reinigungsgerät (Reinigungsdauer rd. 3 min), wurden die Prüfkörper auf einer zum Messbad gehörenden Stahlplatte in das mit demineralisiertem Wasser gefüllte Messbad (Füllhöhe bis rd. 10 mm oberhalb der Ultraschallprüfköpfe) gestellt und die Ultraschall-Laufzeit mit dem Ultraschall-Messgerät Pundit+ gemessen. Durch entsprechende Markierungen an den Prüfkörpern bzw. durch Abstandshalter im Messbad wurde sichergestellt, dass die im Winkel von 90 ° zueinander liegenden Durchschallungsachsen der Prüfkörper während der Messungen immer an den gleichen Positionen lagen. Im Rahmen der Messung des dynamischen E-Moduls wurde auch das Gewicht der Prüfkörper erfasst. Dazu wurden die Prüfkörper nach der Messung der Ultraschall-Laufzeit mit einem Handtuch abgetrocknet und gewogen.

### 5.3. Temperaturmessung - Klimadaten

Zur Messung der Temperatur im Beton der Prüfkörper wurden Sensoren mit Pt1000 Platin-Widerständen entwickelt, die direkt in die Prüfkörper einbetoniert wurden. Als Vergussmaterial wurde ein Epoxidharz verwendet, welches eine wesentlich geringere Wärmeleitfähigkeit als der umgebende Beton aufwies. Zudem wurde durch eine Verdrahtung der Widerstände mit sehr geringen Leitungsquerschnitten und durch eine entsprechende Kabelführung zur Rückseite der Prüfkörper eine Wärmeleitung durch die Anschlussleitungen minimiert. Durch einen direkten Kontakt der an den Widerständen angelöteten Kupferplättchen zum Beton wurde eine Messung der Temperatur im entsprechenden Abstand zur Probenoberfläche sichergestellt. Der Abstand der Widerstände in den Temperatursensoren zur Probenoberfläche betrug 0; 0,5; 1,5 und 3,5 cm. Zusätzlich wurde ein Pt1000 Widerstand zur Erfassung der Lufttemperatur angeschlossen. Der Sensor für die Lufttemperatur wurde bei den Auslagerungsproben, deren Prüfflächen horizontal ausgerichtet waren (XF3-Betone) auf die Betonproben gelegt, bei den Proben, deren Prüfflächen vertikal ausgerichtet waren (XF1-Betone) vor den Betonproben fixiert. Die Aufzeichnung der Temperaturwerte erfolgte über einen batteriebetriebenen Datenlogger mit einem nichtflüchtigen Speicher, der über eine RS232 Schnittstelle am PC ausgelesen werden konnte. Im unten dargestellten Foto ist einer der verwendeten Datenlogger mit Temperatursensor dargestellt.

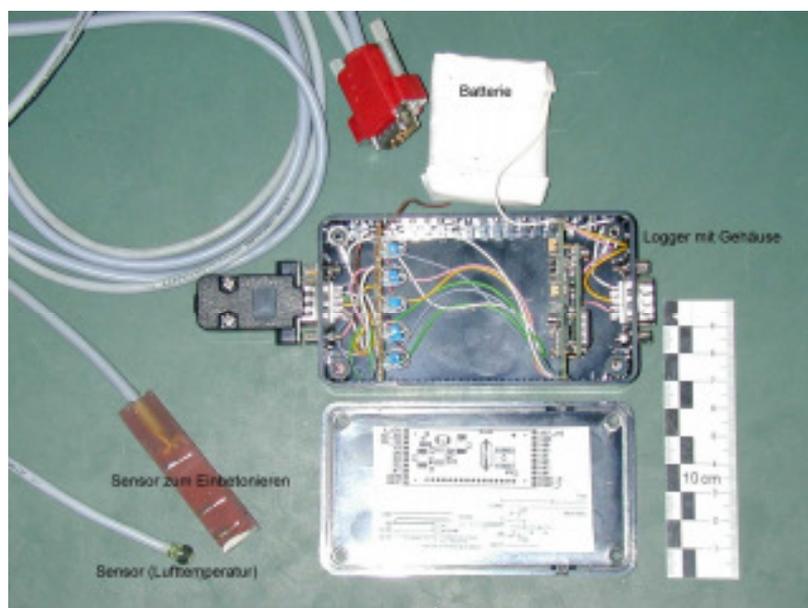


Foto der Temperaturmesskette mit Sensor und Datenlogger

Weitere Temperaturdaten wurden von der Wetterstation an der Universität Hohenheim aufgezeichnet und zur Verfügung gestellt. Von der Wetterstation liegen folgende Angaben zur Lage und zu den im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes verwendeten Messungen vor:

Lage:	Geographische Breite: 48° 43' N
	Geographische Länge: 09° 13' E
	Höhe: 407 m
Messungen (stündlich):	Luft-Temperatur (Minimum) in 2 m Höhe in °C
	Temperatur (Minimum) 5 cm über Boden in °C
	Bodentemperaturen 2 cm unter unbewachsenem Boden in °C.

Laut Aussage der zuständigen Dipl. Meteorologin sind die Klimadaten der Wetterstation Hohenheim aufgrund der örtlichen Nähe und der vergleichbaren Höhenlage auch für die Lage des Otto-Graf-Institut repräsentativ.

#### 5.4. Messung des elektrolytischen Widerstandes im Beton

Die Messung des elektrolytischen Widerstandes erfolgte mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden (vgl. u. a. [16]). Die Sensoren wurden direkt in die Betonproben einbetoniert. Im unten dargestellten Foto ist eine Laborprobe, die nach der CIF-Prüfung gespalten wurde, mit Multi-Ring-Elektrode dargestellt.



Foto einer einbetonierten Multi-Ring-Elektrode nach dem Spalten des Prüfkörpers

Die im Bericht angegebenen Messtiefe zur Oberfläche der Betonproben ergibt sich aus dem mittleren Abstand zwischen den Stahlringen zum flachen Ende der Elektrode gemäß dem folgenden Bild.



Messtiefe (Abstand zur Oberfläche) in mm: 27 22 17 12 7 0

Foto einer verwendeten Multi-Ring-Elektrode

Bei den im vorliegenden Bericht angegebenen elektrolytischen Widerständen wurde nach Gleichung 1 eine Temperaturkompensation mit der von den in den Multi-Ring-Elektroden eingebauten Temperatursensoren gemessenen Temperaturen berücksichtigt:

$$R_{T_0} = \frac{R_{\text{Mess}}}{e^{b \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:

$R_{T_0}$	[ $\Omega$ ]	Elektrolytwiderstand bezogen auf Referenztemperatur $T_0$
$R_{\text{Mess}}$	[ $\Omega$ ]	gemessener Elektrolytwiderstand
$b$	[K]	Konstante, hier $b = 2872$ K
$T$	[K]	Temperatur zum Zeitpunkt der Messung
$T_0$	[K]	Referenztemperatur, hier $20^\circ\text{C}$ (293 K)

Da die Messung des elektrolytischen Widerstandes im gefrorenen Zustand der Prüfkörper bzw. des darin enthaltenen Wassers keine sinnvollen Ergebnisse liefert, werden im Rahmen dieses Berichtes keine Werte berichtet, bei denen die in den Multi-Ring-Elektroden gemessene Temperatur unter  $3^\circ\text{C}$  bei den Laborproben bzw. unter  $1^\circ\text{C}$  bei den Auslagerungsproben lag.

**5.5. Visuelle Beurteilung der äußeren Schädigung von Betonproben**

Zur visuellen Beurteilung der äußeren Schädigung von Betonproben, die durch Frosteinwirkung hervorgerufen wird, wurde ein Schema in Anlehnung an DIN EN ISO 4628-1 [13], -4 [14] und DAfStb-Heft 274 [15] erarbeitet. Zur Beschreibung des Schädigungsgrades wurden fünf Abstufungen von 0 ... keine Schädigung bis 5 ... sehr starke Schädigung festgelegt. Bei der Art der Schädigung wird zwischen folgenden Schadensbildern unterschieden:

- lokale Schäden: Abplatzungen von Zementstein und Feinmörtel (F ... flaking), pop-outs durch geschädigte Zuschläge (PO ... pop-outs) und Risse (C ... cracks)
- i. d. R. flächige Schäden: Abwitterung (W ... weathering) mit Angabe der geschädigten Fläche mit einem Schädigungsgrad  $\geq 1$  (d.h.  $\geq W-1$ ).

Da die Bewertungsschemas zur Beurteilung der Auslagerungsproben (Würfel mit 15 cm Kantenlänge) erarbeitet wurden, ist zu berücksichtigen, dass den Bewertungen bei ausgeführten Bauwerken in Abhängigkeit von deren vorgesehenen Nutzung und Funktion eine andere Bedeutung zukommen kann. Dies gilt insbesondere bei der Bewertung der Abwitterung („sehr gering“, „gering“, ...). Zudem sei darauf hingewiesen, dass anhand der visuellen Beurteilung nur die Betonoberfläche erfasst wird und daher keine Rückschlüsse auf „innere“ Eigenschaften wie z. B. die Festigkeit eines Betons gezogen werden können.

Im Folgenden sind die für die visuelle Erfassung und die Beurteilung der Frostschädigung angewendeten Bewertungsschemas tabellarisch aufgeführt.

Bewertung der lokalen **Abplatzungen (F)** von Beton bzw. von Zementstein und Feinmörtel bezogen auf eine Fläche von 15 cm x 15 cm.

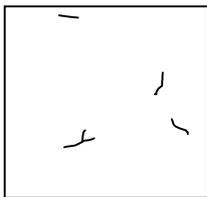
Kennwert	Abplatzungen (F)	Beschreibung
F-0	keine	keine Abplatzung / 2,25 dm <sup>2</sup>
F-1	einzelne	$\leq 3$ kleine <sup>1)</sup> Abplatzungen oder 1 große <sup>2)</sup> Abplatzung / 2,25 dm <sup>2</sup>
F-2	wenige	$\leq 6$ kleine <sup>1)</sup> oder 3 <sup>2)</sup> große Abplatzungen / 2,25 dm <sup>2</sup>
F-3	mäßig viele	$\leq 9$ kleine <sup>1)</sup> oder 6 <sup>2)</sup> große Abplatzungen / 2,25 dm <sup>2</sup>
F-4	viele	$\leq 12$ kleine <sup>1)</sup> oder 9 <sup>2)</sup> große Abplatzungen / 2,25 dm <sup>2</sup>
F-5	sehr viele	$> 12$ kleine <sup>1)</sup> oder 9 <sup>2)</sup> große Abplatzungen / 2,25 dm <sup>2</sup>
<sup>1)</sup> klein: Durchmesser der Schädigung $\leq 5$ mm <sup>2)</sup> groß: Durchmesser der Schädigung $> 5$ mm		

Bewertung der lokalen **pop-outs (PO)** durch geschädigte Zuschlagkörner bezogen auf eine Fläche von 15 cm x 15 cm.

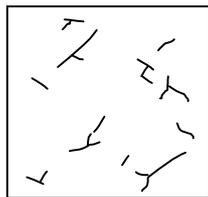
Kennwert	pop-outs (PO)	Beschreibung
PO-0	keine	kein pop-out / 2,25 dm <sup>2</sup>
PO-1	einzelne	≤ 3 kleine <sup>1)</sup> pop-outs oder 1 großer <sup>2)</sup> pop-out / 2,25 dm <sup>2</sup>
PO-2	wenige	≤ 6 kleine <sup>1)</sup> oder 3 <sup>2)</sup> große pop-outs / 2,25 dm <sup>2</sup>
PO-3	mäßig viele	≤ 9 kleine <sup>1)</sup> oder 6 <sup>2)</sup> große pop-outs / 2,25 dm <sup>2</sup>
PO-4	viele	≤ 12 kleine <sup>1)</sup> oder 9 <sup>2)</sup> große pop-outs / 2,25 dm <sup>2</sup>
PO-5	sehr viele	> 12 kleine <sup>1)</sup> oder 9 <sup>2)</sup> große pop-outs / 2,25 dm <sup>2</sup>
<sup>1)</sup> klein: Durchmesser der Schädigung ≤ 5 mm <sup>2)</sup> groß: Durchmesser der Schädigung > 5 mm		

Bewertung der **Risse (C)**, die mit dem bloßen, auf Normalsichtigkeit korrigierten Auge bei guter Beleuchtung und rd. 20 cm Abstand erkennbar sind.

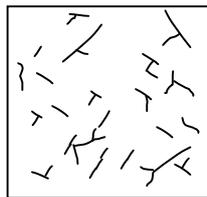
Kennwert	Risse	Beschreibung	vgl.
C-0	keine	keine erkennbaren Risse	-
C-1	einzelne	einige sich gerade abzeichnenden Risse	Skizze 1
C-2	wenige	Risse von geringer, aber deutlich erkennbarer Menge	Skizze 2
C-3	mäßig viele	Risse in mittlerer Menge	Skizze 3
C-4	viele	Risse in großer Menge	Skizze 4
C-5	sehr viele	Risse in sehr großer Menge	Skizze 5



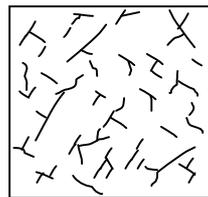
Skizze 1



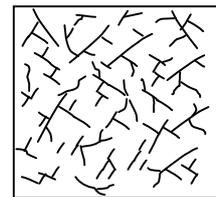
Skizze 2



Skizze 3



Skizze 4



Skizze 5

Bewertung der **Abwitterung (W)**. Als Hilfsmittel zur Abschätzung der Korngröße der sichtbaren Gesteinskörnung wurde eine Risslupe mit 10-facher Vergrößerung und Maßeinteilung verwendet.

Kennwert	Abwitterung	Beschreibung
W-0	keine	Keine signifikante Abwitterung. Es kann Zementhaut und zum Teil wenig Feinmörtel bis 0,2 mm Tiefe abgetragen sein. Feine Gesteinskörnung der Korngröße 1 mm kann gerade sichtbar sein.
W-1	sehr gering	Feinmörtel bis 0,5 mm Tiefe abgetragen. Feine Gesteinskörnung der Korngröße 2 mm ist deutlich sichtbar ( $\geq 10$ Körner/2,25 dm <sup>2</sup> ).
W-2	gering	Feinmörtel bis 1 mm Tiefe abgetragen. Feine Gesteinskörnung der Korngröße 4 mm ist deutlich sichtbar ( $\geq 10$ Körner/2,25 dm <sup>2</sup> ).
W-3	mittel	Mörtel bis 2 mm Tiefe abgetragen. Grobe Gesteinskörnung der Korngröße 8 mm ist deutlich sichtbar <b>und</b> Mörtel zum Teil auch zwischen den Gesteinskörnern abgetragen.
W-4	stark	Mörtel bis 4 mm Tiefe abgetragen. Grobe Gesteinskörnung der Korngröße 8 mm bis zu einem Drittel des Korndurchmessers freiliegend <b>und</b> Mörtel zwischen den Gesteinskörnern großteils abgetragen.
W-5	sehr stark	Mörtel > 4 mm Tiefe abgetragen. Mörtel zwischen den Gesteinskörnern vollständig abgetragen. Grobe Gesteinskörner > 4 mm sind abgewittert.

Da die Abwitterungen an den Würfeln mit einer bewitterten Fläche von 15 cm x 15 cm zu Beginn der Schädigung lokal auftraten, wurden auch noch Bereiche ohne signifikante Abwitterung, das heißt Kennwert W-0 festgestellt. Daher wurde zur Beschreibung der Abwitterung auch der abgewitterte Flächenanteil  $\geq$  W-1 in Prozent, auf 10 % aufgerundet, angegeben.

Aus den genannten Kriterien lässt sich ein Bewertungs-Schlüssel wie folgt angeben:

Abplatzung (F) / pop-out (PO) / Risse (C) / Abwitterung (W) – geschädigter Flächenanteil ( $\geq$  W-1)  
(Beispiel: F-1 / PO-1 / C-0 / W-2-20).

Zur vereinfachten Beschreibung der Schädigung der Betonoberflächen wurde der Schädigungsgrad der Abwitterung (0 bis 5) mit dem geschädigten Flächenanteil mit einem Kennwert  $\geq$  W-1 multipliziert und als Abwitterungsgrad bezeichnet (Abwitterungsgrad = Schädigungsgrad x geschädigter Flächenanteil). Um die Abschätzung der Flächenanteile möglichst objektiv durchzuführen, wurden die Prüfflächen mit einer Digitalkamera fotografiert und mit Hilfe der Bildanalyse-Software „DIAna Image Analysis Version 3“ der Firma BASys Bildanalyzesysteme analysiert. Hierzu wurden die farbigen Digitalfotos mit 24 Bit Farbtiefe zunächst in Bilder mit 8 Bit Graustufen umgewandelt. Dann wurde mit der Histogramm Funktion der Bildanalyse-Software der prozentuale Anteil der Pixel mit einem Helligkeitswert, der auf den Fotos im Bereich der Flächen mit Abwitterungsgrad < W-1 vorlag, bestimmt. Der Flächenanteil mit einem Schädigungsgrad der Abwitterung  $\geq$  W-1 wurde daraus als Differenz zu 100 % berechnet und auf 10 % gerundet. Zur Abschätzung

der Anteile der geschädigten Flächen wurden nur die für die Prüfflächen repräsentativen Bereiche über eine Masken Funktion markiert und ausgewertet.

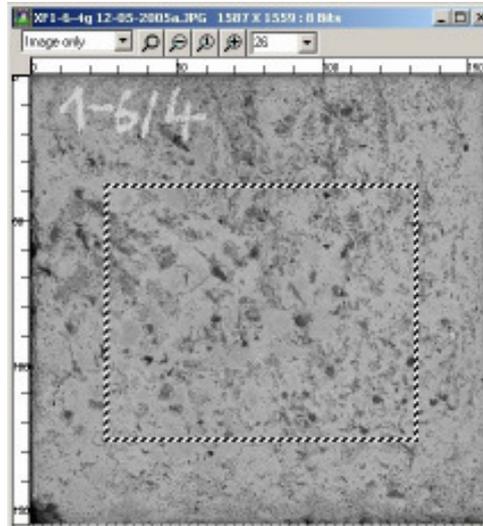
Im Folgenden wird anhand eines Beispiels das Vorgehen zur visuellen Bestimmung des Abwitterungsgrades erläutert:

1. Bewertung der Abwitterung (W) an der Prüffläche der nachstehend abgebildeten Auslagerungsprobe XF1-6/4 mit Hilfe einer Risslupe. Dabei wurde festgestellt, dass der Mörtel bis rd. 2 mm Tiefe abgetragen wurde. Zudem war grobe Gesteinskörnung der Korngröße 8 mm deutlich sichtbar und es war Mörtel zum Teil auch zwischen den Gesteinskörnern abgetragen. Aufgrund dieser Feststellungen wurde die Prüffläche bezüglich der Abwitterung dem Schädigungsgrad 3 bzw. dem Kennwert der Abwitterung W-3 (mittel) zugeordnet.



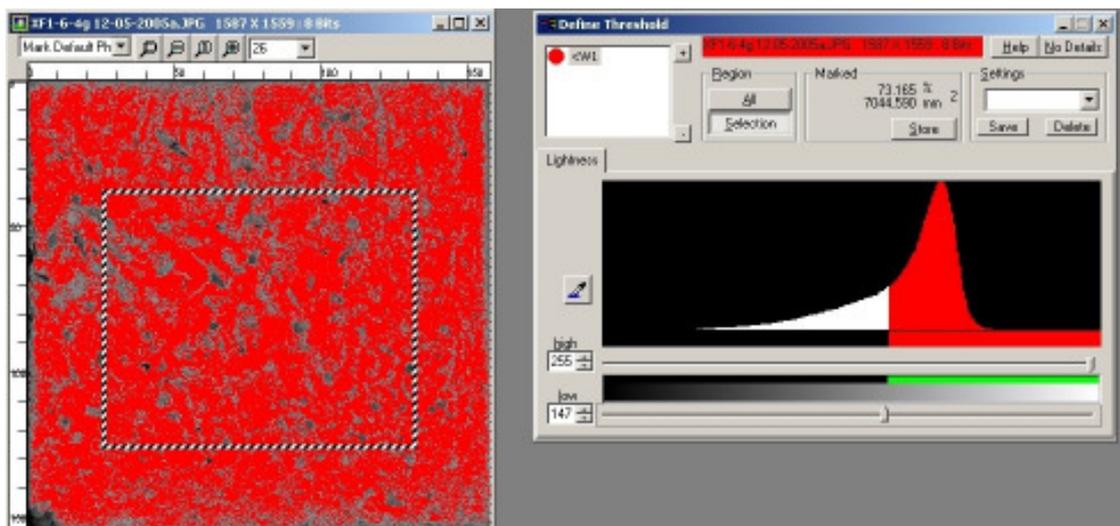
Foto der Prüffläche der Auslagerungsprobe XF1-6/4

2. Das Digitalfoto der Prüffläche wurde mit dem Bildanalyse-Software in Graustufen umgewandelt und ein repräsentativer Auswahlbereich für die Beurteilung der abgewitterten Fläche wie in dem folgend abgebildeten Screenshot festgelegt:



Screenshot der Prüffläche der Auslagerungsprobe XF1-6/4

3. Anschließend wurde der Bereich mit einem Schädigungsgrad der Abwitterung  $W < 1$  mit Hilfe der Histogramm Funktion anhand des Grautons der nicht abgewitterten Zementstein-Oberfläche abgeschätzt. Der unten dargestellte Screenshot zeigt das Histogramm für den Bereich mit  $W < 1$  mit einem Anteil von 73 %. Daraus ergibt sich für den mit  $W \geq 1$  abgewitterten Bereich ein prozentualer Flächenanteil von 30 % (gerundet auf volle 10 %).



Screenshot von der Fotoauswertung der Prüffläche der Auslagerungsprobe XF1-6/4

4. Der mit Hilfe dieser grafischen Auswertung abgeschätzte Abwitterungsgrad der Probe XF1-6/4 ergibt einen Wert von  $3 \times 0,3 = 0,9$ .

Die im Rahmen des vorliegenden Berichts angegebenen Abwitterungsgrade geben sofern nicht anders angegeben den Mittelwert aller Würfel einer ausgelagerten bzw. im Labor geprüften Betonsorte wieder.

Zur Beurteilung des Frostwiderstandes und zur Erfassung der Randbedingungen (Temperatur und Feuchtigkeitsschwankungen) wurden die beschriebenen Prüf- und Untersuchungsverfahren wie folgt angewendet:

**Laborproben:**

- CIF-Prüfung gemäß der Prüfvorschrift [4] mit demineralisiertem Wasser (relativer dynamischer E-Modul und Abwitterungsmenge)
- Temperaturmessung an Referenzproben der Betonmischungen XF1-3 und XF3-2 in 0; 0,5; 1,5 und 3,5 cm Abstand zur Probenoberfläche
- Messung der Feuchtigkeitsschwankungen an einer Referenzprobe der Betonmischung XF3-2 mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden (Messung von elektrolytischen Widerständen)
- Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades der Probenoberflächen nach 56 FTW (Abwitterungsgrad)

**Auslagerungsproben:**

- Temperaturmessung an Referenzproben der Betonmischungen XF1-3 und XF3-2 in 0; 0,5; 1,5 und 3,5 cm Abstand zur Probenoberfläche
- Messung der Feuchtigkeitsschwankungen an Referenzproben der Betonmischungen XF1-3, XF3-2 und XF3-5 mit Hilfe von Multi-Ring-Elektroden (Messung von elektrolytischen Widerständen)
- Messung der Ultraschall-Laufzeit (dynamischer E-Modul) nach jeder Frostperiode in Anlehnung an das CIF-Prüfverfahren gemäß [4]
- Visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades der Probenoberflächen (Abplatzungen, pop-outs, Risse und Abwitterung bzw. Abwitterungsgrad)

## **6. Ergebnisse der Frostprüfungen und Untersuchungen**

Im Folgenden sind die Ergebnisse der am Otto-Graf-Institut an den auf dem Dach des Institutes ausgelagerten Proben und an den Laborproben durchgeführten Frostprüfungen und Untersuchungen zusammengefasst. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die Prüfergebnisse möglichst so dargestellt, dass die XF1- und XF3-Betone entsprechend ihrer Betondruckfestigkeit absteigend sortiert sind. Zudem wurden die Betone, die hinsichtlich ihrer Zusammensetzung (Wasser-Zement-Wert, Zementgehalt und Frostwiderstand der Gesteinskörnungen) die Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] erfüllten (Betone innerhalb der Norm) bzw. nicht erfüllten (Betone außerhalb der Norm) nebeneinander dargestellt.

### **6.1. Ergebnisse der Laborproben**

Die Ergebnisse der an den Laborproben durchgeführten Prüfungen und Untersuchungen sind in den Beilagen 9 bis 24 angegeben. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse.

#### **6.1.1. Ergebnisse der CIF-Prüfung (Laborproben)**

Die Prüfergebnisse der CIF-Prüfung nach [4] (relativer dynamischer E-Modul und Abwitterungsmenge nach 7, 14, 28 und 56 Frost-Tau-Wechseln) sind in den Bildern 1 und 2, Beilage 9, angegeben.

#### **6.1.2. Ergebnisse der Temperaturmessungen (Laborproben)**

Die während der CIF-Prüfung mit den einbetonierten Temperatursensoren an den Referenzproben der Mischungen XF1-3 und XF3-2 gemessenen Temperaturverläufe sind in den Bildern 3 bis 6, Beilagen 10 und 11, dargestellt. Der Temperaturfühler für die Lufttemperatur wurde während der Messung auf die Rückseite der Betonproben gelegt. Da während der Messung der Referenzproben der Datenlogger ausgefallen ist, liegt für die Mischung XF1-3 nur ein Ausschnitt vom 23. bis 42. Frost-Tau-Wechsel und für die Mischung XF3-2 nur ein Ausschnitt bis zum 39. Wechsel vor. Aufgrund der immer gleich von der Frostruhe gesteuerten Temperaturwechsel ist das Fehlen der Messdaten für die Auswertung der Versuche unbedeutend.

#### **6.1.3. Ergebnisse der Messung des elektrolytischen Widerstandes (Laborproben)**

Die während der CIF-Prüfung mit den einbetonierten Multi-Ring-Elektroden an den Referenzproben der Mischungen XF1-3 und XF3-2 gemessenen elektrolytischen Widerstände (Temperatur kompensiert) sind in den Bildern 7 bis 10, Beilagen 12 und 13, dargestellt.

#### **6.1.4. Ergebnisse der visuellen äußeren Schädigung (Laborproben)**

Da das Beurteilungsschema für die visuelle Schädigung erst nach Abschluss der CIF-Prüfungen erarbeitet wurde, liegen nur Ergebnisse für die Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechseln vor. Die Abwitterung, der geschädigte Flächenanteil mit einer Abwitterung  $> W-1$  sowie der berechnete Abwitterungsgrad wurde wie unter Punkt 5.5. beschrieben ermittelt. Die Ergebnisse für die Mischungen XF1 sind in Tabelle 9, Beilage 14, zusammengefasst. Die als Beispiel angegebenen Fotos der entsprechenden Prüfflächen sind in den Bildern 11 bis 19, Beilagen 15 bis 18, abgebildet. Im Falle der Mischung XF1-4 wurden nach 28 Frost-Tau-Wechsel so starke Schädigungen festgestellt, dass die Rückseiten der Prüfkörper Risse im mm-Bereich aufwiesen. Eine Fortsetzung der Prüfung an den zerstörten Proben war nicht möglich.

Die Ergebnisse für die Mischungen XF3 ohne LP-Bildner sind in Tabelle 10, Beilage 19, die der XF3LP Mischungen mit LP-Bildner in Tabelle 11 Beilage 23, zusammengefasst. Die als Beispiel angegebenen Fotos der entsprechenden Prüfflächen sind in den Bildern 20 bis 29, Beilagen 20 bis 24, abgebildet. Auch hier wurde im Falle der Mischung XF3-6 die Rückseite der Probe abgebildet, da diese nach der Prüfung deutlich sichtbare Risse aufwies.

#### **6.2. Ergebnisse der Auslagerungsproben**

Die Ergebnisse der an den Auslagerungsproben durchgeführten Prüfungen und Untersuchungen sind in den Beilagen 25 bis 54 angegeben. Im Einzelnen handelt es sich dabei um die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse.

##### **6.2.1. Ergebnisse der Temperaturmessungen (Auslagerungsproben)**

Die während der Auslagerung mit den einbetonierten Temperatursensoren an den Referenzproben der Mischungen XF1-3 und XF3-2 gemessenen Temperaturverläufe sind in den Bildern 30 bis 38, Beilagen 25 bis 29, exemplarisch für die Messung in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Betonoberfläche jeweils für die Zeiträume Oktober bis Mai der Jahre 2002 bis 2006 dargestellt. Ausschnitte der Temperaturmessungen in den verschiedenen Tiefen (0; 0,5; 1,5; 3,5 cm unter der Betonoberfläche) und in der Luft sind in den Bildern 39 und 40, Beilagen 29 und 30, dargestellt. Da Der Temperatursensor in der Referenzproben der Mischung und XF3-2 Mitte 2005 irreparabel ausgefallen ist, wurden zur Abschätzung der Frost-Tau-Wechsel der Frostperiode 2005/2006 Temperaturdaten der Wetterstation Hohenheim verwendet. Angaben zur Wetterstation Hohenheim und zu den Messpositionen finden sich unter Punkt 5.3. des vorliegenden Berichtes.

Als Abschätzung der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel der ausgelagerten Probekörpern der Mischung XF3 mit den horizontal orientierten Prüfflächen wurde der Mittelwert aus den zur Verfü-

gung stehenden Daten der Temperatur in einer Höhe von 5 cm über dem Boden (vgl. Bild 43, Beilage 31) und der Bodentemperatur 2 cm unter unbewachsenem Boden (vg. Bild 42, Beilage 31) berechnet. Der Berechnete Temperaturverlauf ist in Bild 43, Beilage 31, für den Zeitraum Oktober 2005 bis Mai 2006 dargestellt.

Die anhand der gemessenen Temperaturdaten bzw. der anhand der Temperaturdaten der Wetterstation Hohenheim berechnete Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und die Minimaltemperaturen der Auslagerungsproben der Mischungen XF1-3 und XF3-2 sind in den Tabellen 12 und 13, Beilage 32, zusammengefasst. Dabei wurden Frost-Wechsel, bei Temperaturen, die während der Abkühlphase mehrere Nulldurchgänge innerhalb kurzer Zeit Schwankungen um den Gefrierpunkt aufwiesen erst dann als Frost-Wechsel gewertet, wenn danach der Gefrierpunkt für mindestens 1 Stunde unterschritten blieb.

#### **6.2.2. Ergebnisse der Messung des elektrolytischen Widerstandes (Auslagerungsproben)**

Die während der Auslagerung mit den einbetonierten Multi-Ring-Elektroden an den Referenzproben der Mischungen XF1-3 und XF3-2 gemessenen elektrolytischen Widerstände (Temperatur kompensiert) sind in den Bildern 44 bis 51, Beilagen 33 bis 36, für die Zeiträume Oktober bis Mai der Jahre 2002 bis 2006 dargestellt.

#### **6.2.3. Ergebnisse der Messung des dynamischen E-Moduls (Auslagerungsproben)**

Die dynamischen E-Moduln, die nach den Frostperioden im Zeitraum 2002 bis 2006 an den Auslagerungsproben gemessen wurden, wurden zu den Ausgangsmessungen, die im Alter von 28 Tagen an den entsprechenden Proben bestimmt wurden, ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse der relativen dynamischen E-Moduln ist in Bild 52, Beilage 37, dargestellt. Die im Rahmen der Messung des dynamischen E-Moduls bestimmte Masse der Proben ist in Tabelle 14, Beilage 37, als relative Masse in Prozent bezogen auf die Masse der Prüfkörper, die nach der Frostperiode 2002/2003 bestimmt wurde, angegeben.

#### **6.2.4. Ergebnisse der visuellen äußeren Schädigung (Auslagerungsproben)**

Die Ergebnisse der visuellen äußeren Schädigung der Auslagerungsproben ist in den Tabellen 15 bis 22, Beilagen 38 bis 44, getrennt nach Abplatzungen (F), pop-outs (PO), Risse (C) und Abwitterung (W) für den Untersuchungszeitraum 2002 bis 2006 bzw. die Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006 zusammengefasst.

In den Tabellen 23 bis 25, Beilagen 45 bis 47, ist der berechnete Abwitterungsgrad der Auslagerungsproben für den Untersuchungszeitraum zusammengefasst. Die als Beispiel angegebenen Fotoserien der entsprechenden Prüfflächen sind in den Bildern 53 bis 66, Beilagen 48 bis 54, als

Serie für die Prüffläche am Beginn der Auslagerung und nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006 nebeneinander abgebildet.

## **7. Diskussion der Ergebnisse der Frostprüfungen und Untersuchungen**

Im Folgenden werden die Ergebnisse der an den ausgelagerten Proben und an den Laborproben durchgeführten Frostprüfungen und Untersuchungen diskutiert.

### **7.1. Temperatur in den Betonproben**

Bei den folgenden Betrachtungen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Wärmeleitfähigkeit von allen untersuchten Betonen aufgrund ähnlicher Rohdichten annähernd gleich ist. Damit stehen die in den Referenzprobekörpern der Mischungen XF1-3 bzw. XF 3-2 gemessenen Temperaturverläufe stellvertretend für alle untersuchten Betonproben der Mischungen XF1 bzw. XF3.

Beim Vergleich der Werte der Laborprüfung und der Auslagerung wurden im Wesentlichen Unterschiede bezüglich der Tiefsttemperatur und bezüglich der Dauer im eingefrorenen Zustand (Temperatur  $< 0\text{ °C}$ ) festgestellt. Die bei der CIF-Prüfung gemessene Tiefsttemperatur lag entsprechend dem an der Frosttruhe eingestellten Temperaturverlauf bei rd.  $-20\text{ °C}$  und die Dauer im eingefrorenen Zustand betrug rd. 6 Stunden je Frost-Tau-Wechsel (vgl. Bilder 4 und 6, Beilagen 10 und 11). Die in den Referenzproben der Auslagerungsproben in einem Abstand von 0,5 cm unter der Betonoberfläche gemessene Tiefsttemperatur (vgl. Tabellen 12 und 13, Beilage 32) betrug als Extremwert  $-13,8\text{ °C}$  bei den XF1-Mischungen und  $-13,2\text{ °C}$  bei den XF3-Mischungen. Die Dauer im eingefrorenen Zustand betrug zwischen wenigen Stunden und mehreren Tagen. Sowohl bei den Messungen an den Laborproben als auch bei den Auslagerungsproben konnte der Wärmefluss bzw. die daraus resultierende Phasenverschiebung der Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen der Proben festgestellt werden. Aufgrund der relativ langen Zeitabständen bei der Datenaufzeichnung der Auslagerungsproben (1 Messung alle 30 Minuten) sowie einer Genauigkeit der Messkette von  $\pm 0,5\text{ °C}$  kann an dieser Stelle allerdings keine Aussage zu den Unterschieden der Wärmeströme bei den Laborprüfungen und den unter Praxisbedingungen ausgelagerten Proben getroffen werden. Anhand der an den Auslagerungsproben gemessenen Temperaturverläufen ist in erster Linie die Anzahl der in den Tabellen 12 und 13, Beilage 32, angegebenen Frost-Tau-Wechsel (insbesondere in der oberflächennahen Schicht mit einem Abstand von 0,5 cm unter der Betonoberfläche) von Interesse. Insgesamt konnten während dem Betrachtungszeitraum mit 4 Frostperioden bei den Auslagerungsproben der Mischung XF1 175 Frost-Tau-Wechsel in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Betonoberfläche festgestellt werden, wobei bei 74 Frost-Tau-Wechseln die Tiefsttemperatur bei unter  $-5\text{ °C}$  lag. Bei den Auslagerungsproben der Mischung XF3, die zeitweise schneebedeckt waren, wurden mit den aus den Daten der Wetterstation Ho-

henheim abgeschätzten Wechseln insgesamt rd. 260 Frost-Tau-Wechsel in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Betonoberfläche festgestellt, wobei bei rd. 100 Frost-Tau-Wechseln die Tiefsttemperatur bei unter -5 °C lag. Diese Zahlen bestätigen die im Forschungsantrag prognostizierten Frost-Tau-Beanspruchungen am Standort Stuttgart (vgl. Tabelle 26, Beilage 55) sowie den zur Auslagerung der Proben geeigneten Platz auf dem Dach des Otto-Graf-Institutes.

## **7.2. Elektrolytischer Widerstand (Multi-Ring-Elektrode)**

Die Messung des elektrolytischen Widerstandes mit der beschriebenen Multi-Ring-Elektrode ergab bei den Laborprüfungen tendenziell eine Abnahme des Widerstandes, was auf eine Zunahme der Feuchtigkeit im Beton hinweist. Bei den Auslagerungsproben wurde tendenziell eine Zunahme des elektrolytischen Widerstandes, also ein Austrocknen des Betons festgestellt. Da die Tiefenauflösung der verwendeten Multi-Ring-Elektrode bei einem Abstand der Edelstahlringe von 2,5 mm bzw. die mittlere Tiefe des ersten Messabschnitts rd. 7 mm betrug, konnten anhand der Messwerte keine Rückschlüsse auf die Wassersättigung der Betonrandzone gezogen werden.

## **7.3. Laborproben: Vergleich der Ergebnisse der CIF-Prüfung mit der visuellen Beurteilung (Abwitterungsgrad)**

Um die Eignung der visuellen Beurteilung des Schädigungsgrades von Betonoberflächen durch reinen Frostangriff einzustufen zu können, wurde der an den Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung erfasste Abwitterungsgrad der Abwitterungsmenge in Bild 67, Beilage 55, bzw. dem relativen dynamischen E-Modul in Bild 68, Beilage 56, gegenübergestellt. Dabei wurde eine gute Korrelation zwischen der bei der CIF-Prüfung gemessenen Abwitterungsmenge und dem visuell bzw. fotoanalytisch erfassten Abwitterungsgrad festgestellt. Die über den relativen dynamischen E-Modul ausgedrückte innere Schädigung korreliert erwartungsgemäß bei der Beanspruchung mit reinem Frost ohne Taumittel-Einwirkung nicht eindeutig mit dem an der Oberfläche festgestellten Abwitterungsgrad.

## **7.4. Vergleich der Ergebnisse des relativen dynamischen E-Moduls der Laborproben (CIF-Prüfung) mit den Auslagerungsproben**

Eine Gegenüberstellung der relativen dynamischen E-Moduln der Auslagerungsproben nach 4 Frostperioden mit den Ergebnissen der CIF-Prüfung nach 14, 28 und 56 Frost-Tau-Wechseln wie in Bild 69, Beilage 56, dargestellt, ergab nach dem vorliegenden Untersuchungszeitraum der Auslagerungsproben noch keine aussagekräftige Übereinstimmung.

### **7.5. Vergleich der visuellen Beurteilung der Auslagerungsproben mit der Abwitterungsmenge der Laborproben (CIF-Prüfung)**

In den Bildern 70 und 71, Beilagen 57 und 58, sind die nach 3 bzw. 4 Frostperioden bestimmten Abwitterungsgrade der Auslagerungsproben den an den Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechseln gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4] bestimmten Abwitterungsgraden und Abwitterungsmengen gegenübergestellt. Anhand dieser Ergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die untersuchten Auslagerungs- und Laborproben der Betone für die Expositionsklassen XF1 und XF3 mit einer Zusammensetzung im Grenzbereich der Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] unter Verwendung von Zuschlägen mit einem Frost-Tau-Widerstand der Kategorie  $F_1$  nach DIN EN 12620 [6] weisen bezüglich der Abwitterung der Oberfläche eine gute Übereinstimmung auf.
- Die untersuchten Auslagerungs- und Laborproben der Betone für die Expositionsklassen XF1 und XF3 mit einer Zusammensetzung außerhalb der Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] wiesen bei den Betonen, die mit dem Hochofenzement CEM III/A 32,5 N hergestellt wurden, ebenfalls eine gute Übereinstimmung bezüglich der Abwitterung der Oberfläche auf.
- Die untersuchten Auslagerungsproben der Betone für die Expositionsklassen XF1 und XF3 mit einer Zusammensetzung außerhalb der Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] wiesen bei den Betonen, die mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R hergestellt wurden, nach der vorliegenden Auslagerungsdauer keine klare Übereinstimmung mit den Laborergebnissen auf.
- Die Betone der Mischung XF1-3, XF1-4, XF3-5 und XF3-6, die mit einem Muschelkalksplitt der Frostkategorie  $F_2/F_4$  hergestellt wurden, wiesen im Laborversuch deutlich höhere Abwitterungen auf, als bei der Auslagerung festgestellt werden konnte. Zudem wurde bei diesen Betonzusammensetzungen bei der CIF-Prüfung eine starke innere Schädigung festgestellt. Anhand der Betrachtung des visuellen Schädigungsgrades hinsichtlich der pop-outs (PO) oder der Risse (C) wie in den Bildern 72 und 73, Beilagen 59 und 60, nach einer Auslagerungsdauer von 3 und 4 Frostperioden dargestellt, lässt sich kein Hinweis auf eine innere Schädigung der Auslagerungsproben ableiten. Auch die Betrachtung der relativen dynamischen E-Moduln der Auslagerungsproben wie in Bild 52, Beilage 37, dargestellt gibt keinen Hinweis auf eine innere Schädigung der Proben. Da bereits zu Beginn der Frostbeanspruchung in den Auslagerungsproben mit der Multi-Ring-Elektrode deutlich höhere elektrolytische Widerstände als in den Laborproben gemessen wurden und diese Werte im Laufe der Auslagerung weiter anstiegen bzw. bei den Laborproben abnahmen, lag in den Auslagerungsproben eine geringere Wassersättigung als in den Laborproben bei der CIF-Prüfung vor. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass aufgrund der niedrigeren Sättigungsgrade bei der gewählten Lagerung der Auslage-

rungsproben mit Muschelkalksplitt der Frostkategorie  $F_2/F_4$  auch bei einer längeren Auslagerungsdauer keine innere Schädigung durch Frost, wie bei den Laborprüfungen abgebildet, eintreten wird.

- Die beiden untersuchten Betone mit Luftporenbildner für die Expositionsklasse XF3 unterschieden sich bezüglich der Abwitterung der Oberfläche deutlich voneinander. Diese Unterschiede wurden sowohl bei den Laborproben als auch bei den Auslagerungsproben festgestellt. Die Prüfergebnisse der Abwitterung bzw. des Abwitterungsgrades wiesen eine sehr gute Übereinstimmung der Laborergebnisse mit den an den Auslagerungsproben festgestellten Werten auf.

## 8. Zusammenfassung

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde anhand von Auslagerungsversuchen und Laborprüfungen die Übertragbarkeit von Laborprüfungen mit dem CIF-Prüfverfahren gemäß der Prüfvorschrift [4], welches u. a. auch in die Vornorm DIN CEN/TS 12390-9 [5] als Alternativ-Prüfverfahren aufgenommen wurde, untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die untersuchten Betone, bei denen Zuschlag des Frost-Tau-Widerstandes der Kategorie  $F_1$  verwendet wurde, und deren Zusammensetzungen hinsichtlich Zementgehalt und Wasserzementwert im Grenzbereich sowie außerhalb der Vorgaben nach DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2 [3] für Betone der Expositions-klassen XF1 und XF3 lagen, eine gute Übereinstimmung bezüglich der Abwitterung der Prüfflächen ergaben. Der im Rahmen dieses Forschungsprojektes zur Beurteilung der Abwitterung eingeführte Abwitterungsgrad erwies sich dabei als geeignete visuelle und fotoanalytische Untersuchungsmethode zur Erfassung des Schädigungsgrades von Betonoberflächen.

Bei der Untersuchung der Betone, die mit Zuschlag hergestellt wurden, der hinsichtlich des Frost-Tau-Widerstandes im Übergangsbereich der Kategorien  $F_2/F_4$  lag, konnte kein klarer Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der CIF-Prüfung und den Auslagerungsversuchen aufgezeigt werden. Da es sich bei Schäden, die bei den Laborprüfungen an diesen Betonen festgestellt wurden im Wesentlichen um eine innere Schädigung handelte, die an den untersuchten Auslagerungsproben festgestellten Schäden sich aber im Wesentlichen an der Oberfläche abzeichneten, sollte dies bei der Wahl des Frost-Prüfverfahrens berücksichtigt werden.

Projektleiter

Leiter der Forschungsstelle

(Dipl.-Ing. Andreas Huß)

(Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt)

**Literatur:**

- [1] AiF-Forschungsprojekt Nr.: 13928 N (DBV-Nr.: 247) „Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis“
- [2] DIN EN 206-1- Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000 -, Ausgabe 2001-07
- [3] DIN 1045-2 - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 -, Ausgabe 2001-07
- [4] CIF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton (CIF). RILEM Recommendation TC117-FDC: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B. Materials and Structures Vol. 37 (2004) 743-753
- [5] DIN CEN/TS 12390-9 - Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2006DIN EN 12390-9 Frostwiderstand von Beton -, Vornorm Ausgabe August 2006
- [6] DIN EN 12620 - Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002 -, Ausgabe:2003-04
- [7] DIN EN 197-1 - Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung EN 197-1:2000 + A1:2004 -, Ausgabe 2004-08
- [8] DIN EN 196-2 - Prüfverfahren für Zement - Teil 2: Chemische Analyse von Zement; Deutsche Fassung EN 196-2:1995 -, Ausgabe Mai 1995
- [9] DIN EN 196-21 - Prüfverfahren für Zement - Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid und Alkalianteils von Zement; Deutsche Fassung EN 196-21:1990 -, Ausgabe März 1990
- [10] DIN EN 196-3 - Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit; Deutsche Fassung EN 196-3:1995 -, Ausgabe Mai 1995-05
- [11] DIN EN 196-1 - Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:1995 -, Ausgabe Mai 1995-05
- [12] DIN EN 1367-1 - Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel; Deutsche Fassung EN 1367-1:1999 -, Ausgabe 2000-01
- [13] DIN EN ISO 4628-1 - Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen - Teil 1: Allgemeine Einführung und Bewertungssystem (ISO 4628-1:2003); Deutsche Fassung EN ISO 4628-1:2003 -, Ausgabe:2004-01
- [14] DIN EN ISO 4628-4 - Beschichtungsstoffe - Beurteilung von Beschichtungsschäden - Bewertung der Menge und der Größe von Schäden und der Intensität von gleichmäßigen Veränderungen im Aussehen - Teil 4: Bewertung des Rissgrades (ISO 4628-4:2003); Deutsche Fassung EN ISO 4628-4:2003 -, Ausgabe:2004-01
- [15] K. Walz und E. Hartmann: Witterungsbeständigkeit von Beton, 2. Bericht, Untersuchungen an rd. 30 Jahre im Freien ausgelagerten Betonplatten. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 274; Hrsg.: DAfStb, Berlin 1977
- [16] DAfStb-560; 2003: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 560, Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse (Sachstandbericht), Berlin, Beuth-Verlag, 2003.

Tabelle 1: Zusammensetzungen der Betone für die Herstellung der Auslagerungsproben und der Proben für die Laborprüfungen. Kursiv aufgeführte Betone bzw. Angaben der Beton-  
zusammensetzung liegen außerhalb der Vorgaben der DIN EN 206-1 [2]/DIN 1045-2  
[3] für Betone der Expositionsklassen XF1 bzw. XF3.

Bezeichnung der Betone	Betonzusammensetzung			
	Zement	z [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z-Wert	Gesteinskörnung
<b>Betone für Expositionsklasse XF1</b>				
<b>XF1-1</b>	CEM I 32,5 R	280	0,60	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<i>XF1-2</i>	CEM I 32,5 R	<i>250</i>	<i>0,80</i>	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<b>XF1-3</b>	CEM I 32,5 R	280	0,60	Zuschlag 2 <sup>2)</sup>
<i>XF1-4</i>	CEM I 32,5 R	<i>250</i>	<i>0,80</i>	Zuschlag 2 <sup>2)</sup>
<b>XF1-5</b>	CEM III/A 32,5 N	280	0,60	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<i>XF1-6</i>	CEM III/A 32,5 N	<i>250</i>	<i>0,80</i>	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<b>Betone für Expositionsklasse XF3</b>				
<b>XF3-1</b>	CEM I 32,5 R	320	0,50	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<i>XF3-2</i>	CEM I 32,5 R	<i>290</i>	<i>0,65</i>	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<b>XF3-5</b> <sup>3)</sup>	CEM I 32,5 R	320	0,50	Zuschlag 2 <sup>2)3)</sup>
<i>XF3-6</i>	CEM I 32,5 R	<i>290</i>	<i>0,65</i>	Zuschlag 2 <sup>2)</sup>
<b>XF3-7</b>	CEM III/A 32,5 N	320	0,50	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<i>XF3-8</i>	CEM III/A 32,5 N	<i>290</i>	<i>0,65</i>	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<b>LP-Betone für Expositionsklasse XF3</b>				
<b>XF3LP-1</b>	CEM I 32,5 R	300	0,55	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<b>XF3LP-2</b>	CEM III/A 32,5 N	300	0,55	Zuschlag 1 <sup>1)</sup>
<sup>1)</sup> Zuschlag 1: Gesteinskörnung: Flusssand/Kies 0/16; Sieblinienbereich ③ (AB 16); Frostkategorie des Kieses: F <sub>1</sub> <sup>2)</sup> Zuschlag 2: Gesteinskörnung: Flusssand/Muschelkalk 0/16; Sieblinienbereich ③ (AB 16); Frostkategorie des Muschelkalks: F <sub>2</sub> /F <sub>4</sub> <sup>3)</sup> Die Zusammensetzung liegt hinsichtlich des Frostwiderstandes F <sub>4</sub> des Zuschlages 8/16 knapp außerhalb der Norm.				

Tabelle 2: Ergebnisse der Zementprüfungen an den verwendeten Zementen CEM I 32,5 R und CEM III/A 32,5 N, geprüft nach DIN EN 196-2 [8], DIN EN 196-21 [9], DIN EN 196-3 [10], DIN EN 196-1 [11].

Prüfgröße		CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
SiO <sub>2</sub>	M.-%	18,7	26,0
TiO <sub>2</sub>	M.-%	0,2	0,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M.-%	5,3	7,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	M.-%	2,2	1,2
CaO	M.-%	62,1	53,7
MgO	M.-%	2,1	4,3
SO <sub>3</sub>	M.-%	2,6	2,5
K <sub>2</sub> O	M.-%	1,09	0,84
Na <sub>2</sub> O	M.-%	0,08	0,19
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	M.-%	0,72	0,75
HCl-unl. Rückstand	M.-%	0,7	1,1
Glühverlust	M.-%	4,3	1,4
Chlorid	M.-%	0,02	0,03
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	3,11	3,03
Wasseranspruch	M.-%	24,5	26,0
Blaine-Wert	cm <sup>2</sup> /g	3350	3300
Erstarrung in min	Beginn	265	225
	Ende	345	310
Raumbeständigkeit (Nadelabstand)	mm	1,0	0,5
Druckfestigkeit in MPa	2 d	15,7 (15,4; 15,6; 15,6; 15,9; 15,9; 15,5)	7,8 (7,7; 7,8; 7,9; 7,9; 7,9; 6,4 <sup>1)</sup> )
	7 d	35,5 (35,4; 35,2; 35,8; 35,9; 35,5; 35,4)	23,1 (23,8; 24,1; 22,7; 22,0; 23,4; 22,5)
	28 d	44,6 (45,3; 44,0; 44,4; 44,8; 44,4; 45,0)	40,8 (42,2; 40,7; 40,4; 42,1; 38,3; 41,0)

<sup>1)</sup> Dieser Einzelwert wurde gemäß DIN EN 196-1 [11] verworfen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Frostprüfungen der verwendeten Gesteinskörnungen, geprüft nach DIN EN 1367-1 [12] mit destilliertem Wasser.

Gesteinskörnung	Abwitterungsmenge in M.-%	Frostkategorie
Kies 4/8 mm <sup>1)</sup>	0,4	F <sub>1</sub>
Kies 8/16 mm	0,1	F <sub>1</sub>
gebrochener Muschelkalk 4/8 mm <sup>1)</sup>	2,0	F <sub>2</sub>
gebrochener Muschelkalk 8/16 mm	2,5	F <sub>4</sub>

<sup>1)</sup> Probe durch Absieben der Körnung < 4 mm aus der Lieferkörnung 2/8 mm gewonnen.

Tabelle 4: Mischungszusammensetzungen gemäß der Stoffraumberechnung für die untersuchten XF1-Betone.

Bezeichnung der Betone		XF1-1	XF1-2	XF1-3	XF1-4	XF1-5	XF1-6
Gewählter Wasserzementwert, w/z	-	0,60	0,80	0,60	0,80	0,60	0,80
Zement	Sorte	CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 N	
	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	280,0	250,0	280,0	250,0	280,0	250,0
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	3,10	3,10	3,10	3,10	3,00	3,00
Wasser	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	168,0	200,0	168,0	200,0	168,0	200,0
Annahme Luftgehalt	Vol.-%	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
Gesteinskörnungen							
0/0,6 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	286,7	279,8	286,7	279,8	285,5	278,8
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
0,6/1,2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	123,8	120,8	123,8	120,8	123,2	120,3
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
1,2/2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	160,0	156,2	160,0	156,2	159,3	155,6
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
2/4 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	199,9	195,1	-	-	199,1	194,4
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62	-	-	2,62	2,62
2/8 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	519,6 <sup>1)</sup>	507,2 <sup>1)</sup>	734,5 <sup>2)</sup>	717,0 <sup>2)</sup>	517,4 <sup>1)</sup>	505,3 <sup>1)</sup>
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,66 <sup>2)</sup>	2,66 <sup>2)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>
8/16 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	602,3 <sup>1)</sup>	587,9 <sup>1)</sup>	620,9 <sup>2)</sup>	606,1 <sup>2)</sup>	599,8 <sup>1)</sup>	585,7 <sup>1)</sup>
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,67 <sup>2)</sup>	2,67 <sup>2)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>
Siebdurchgänge des Zuschlaggemisches							
<= 0,125 mm	M.-%	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8
<= 0,25 mm	M.-%	5,4	5,4	5,7	5,7	5,4	5,4
<= 0,5 mm	M.-%	13,5	13,5	13,8	13,8	13,5	13,5
<= 1 mm	M.-%	21,0	21,0	21,4	21,4	21,0	21,0
<= 2 mm	M.-%	31,4	31,4	31,2	31,2	31,4	31,4
<= 4 mm	M.-%	45,7	45,7	43,3	43,3	45,7	45,7
<= 8 mm	M.-%	67,3	67,3	68,6	68,6	67,3	67,3
<= 16 mm	M.-%	97,8	97,8	97,5	97,5	97,8	97,8
<= 31,5 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Körnungsziffer k	-	4,18	4,18	4,19	4,19	4,18	4,18
Mehlkorngehalt der Mischung	kg/m <sup>3</sup>	295,6	265,2	297,5	267,0	295,5	265,2
Sollwert der Frischbetonrohdichte	kg/dm <sup>3</sup>	2,34	2,30	2,37	2,33	2,33	2,29
<sup>1)</sup> Kies							
<sup>2)</sup> gebrochener Muschelkalk							

Tabelle 5: Mischungszusammensetzungen gemäß der Stoffraumberechnung für die untersuchten XF3-Betone ohne Luftporenbildner.

Bezeichnung der Betone		XF3-1	XF3-2	XF3-5	XF3-6	XF3-7	XF3-8
Gewählter Wasserzementwert, w/z	-	0,50	0,65	0,50	0,65	0,50	0,65
Zement	Sorte	CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 N	
	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	320,0	290,0	320,0	290,0	320,0	290,0
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	3,10	3,10	3,10	3,10	3,00	3,00
Wasser	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	160,0	188,5	160,0	188,5	160,0	188,5
Annahme Luftgehalt	Vol.-%	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0
Gesteinskörnungen							
0/0,6 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	284,7	279,3	284,7	277,3	283,4	278,1
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63	2,63
0,6/1,2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	122,9	120,6	122,9	119,7	122,3	120,0
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62
1,2/2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	158,9	155,9	158,9	154,8	158,1	155,2
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59	2,59
2/4 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	198,6	194,8	-	-	197,6	193,9
(Flusssand)	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62	-	-	2,62	2,62
2/8 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	516,1 <sup>1)</sup>	506,2 <sup>1)</sup>	729,6 <sup>2)</sup>	710,5 <sup>2)</sup>	513,6 <sup>1)</sup>	504,0 <sup>1)</sup>
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,66 <sup>2)</sup>	2,66 <sup>2)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>	2,60 <sup>1)</sup>
8/16 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	598,2 <sup>1)</sup>	586,8 <sup>1)</sup>	616,7 <sup>2)</sup>	600,6 <sup>2)</sup>	595,4 <sup>1)</sup>	584,2 <sup>1)</sup>
	Kornrohdichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,67 <sup>2)</sup>	2,67 <sup>2)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>	2,59 <sup>1)</sup>
Siebdurchgänge des Zuschlaggemisches							
<= 0,125 mm	M.-%	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8
<= 0,25 mm	M.-%	5,4	5,4	5,7	5,7	5,4	5,4
<= 0,5 mm	M.-%	13,5	13,5	13,8	13,8	13,5	13,5
<= 1 mm	M.-%	21,0	21,0	21,4	21,4	21,0	21,0
<= 2 mm	M.-%	31,4	31,4	31,2	31,2	31,4	31,4
<= 4 mm	M.-%	45,7	45,7	43,3	43,3	45,7	45,7
<= 8 mm	M.-%	67,3	67,3	68,6	68,6	67,3	67,3
<= 16 mm	M.-%	97,8	97,8	97,5	97,5	97,8	97,8
<= 31,5 mm	M.-%	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Körnungsziffer k	-	4,18	4,18	4,19	4,19	4,18	4,18
Mehlkorngehalt der Mischung	kg/m <sup>3</sup>	335,5	305,2	337,3	306,9	335,4	305,1
Sollwert der Frischbetonrohdichte	kg/dm <sup>3</sup>	2,36	2,32	2,39	2,34	2,35	2,31
<sup>1)</sup> Kies <sup>2)</sup> gebrochener Muschelkalk							

Tabelle 6: Mischungszusammensetzungen gemäß der Stoffraumberechnung für die untersuchten XF3-Betone mit Luftporenbildner.

Bezeichnung der Betone		XF3LP-1	XF3LP-2
Gewählter Wasserzementwert, w/z	-	0,55	0,55
Zement	Sorte	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 N
	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	300,0	300,0
	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	3,10	3,00
Wasser	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	165,0	165,0
Zusatzmittel	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	0,36 <sup>1)</sup>	0,40 <sup>1)</sup>
(Mischöl LP70)	Dichte kg/dm <sup>3</sup>	1,00	1,00
Annahme Luftgehalt	Vol.-%	5,0	5,0
<b>Gesteinskörnungen</b>			
0/0,6 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	271,5	270,2
(Flusssand)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,63	2,63
0,6/1,2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	117,2	116,7
(Flusssand)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62
1,2/2 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	151,5	150,8
(Flusssand)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59	2,59
2/4 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	189,3	188,4
(Flusssand)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,62	2,62
2/8 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	492,1	489,8
(Kies)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,60	2,60
8/16 mm	Einwaage kg/m <sup>3</sup>	570,4	567,7
(Kies)	Kornrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	2,59	2,59
<b>Siebdurchgänge des Zuschlaggemisches</b>			
<= 0,125 mm	M.-%	0,8	0,8
<= 0,25 mm	M.-%	5,4	5,4
<= 0,5 mm	M.-%	13,5	13,5
<= 1 mm	M.-%	21,0	21,0
<= 2 mm	M.-%	31,4	31,4
<= 4 mm	M.-%	45,7	45,7
<= 8 mm	M.-%	67,3	67,3
<= 16 mm	M.-%	97,8	97,8
<= 31,5 mm	M.-%	100,0	100,0
Körnungsziffer k	-	4,18	4,18
Mehlkorngehalt der Mischung	kg/m <sup>3</sup>	314,8	314,7
Sollwert der Frischbetonrohddichte	kg/dm <sup>3</sup>	2,26	2,25
<sup>1)</sup> Menge anhand von Vorversuchen bestimmt.			

Tabelle 7: Frischbetonrohddichte, LP-Gehalt, Ausbreitmaß, Frischbetontemperatur, Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen der Betone für die Auslagerungsproben und Laborproben.

Bezeichnung der Betone	Auslagerungsproben						Laborproben					
	Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	LP-Gehalt Vol.-%	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> cm	Frischbetontemperatur °C	Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup> <sup>3)</sup>	Druckfestigkeit β <sub>D28</sub> N/mm <sup>2</sup> <sup>3)</sup>	Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	LP-Gehalt Vol.-%	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> cm	Frischbetontemperatur °C	Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup> <sup>4)</sup>	Druckfestigkeit β <sub>D28</sub> N/mm <sup>2</sup> <sup>4)</sup>
<b>Betone für Auslagerung gemäß Expositionsklasse XF1</b>												
<b>XF1-1</b>	2,38	1,5	40	20,0	2,35	35,5	2,38	1,3	38	19,7	2,30	39,2
<b>XF1-2</b>	2,34	1,1	53	19,2	2,33	19,1	2,33	1,0	54	20,2	2,27	21,8
<b>XF1-3</b>	2,40	1,6	39	20,1	2,40	35,0	2,42	1,7	36	17,9	2,35	40,2
<b>XF1-4</b>	2,37	0,7	40	20,4	2,38	22,5	2,37	0,7	36	19,9	2,29	25,8
<b>XF1-5</b>	2,36	1,1	37	19,0	2,36	22,6	2,37	1,3	40	18,9	2,31	33,4
<b>XF1-6</b>	2,33	0,5	58	18,7	2,29	11,7	2,33	0,7	57	18,0	2,25	15,2
<sup>3)</sup> Lagerung wie die Prüfkörper zur Auslagerung: 1 Tag in der Form, 2 Tage im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF., dann 25 Tage am Auslagerungsort im Freien <sup>4)</sup> Lagerung gemäß CIF-Prüfvorschrift: 1 Tag in der Form, 6 Tage im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF., dann 21 Tage im Klima 20 °C / 65 % rel. LF.												

Tabelle 8: Frischbetonrohddichte, LP-Gehalt, Ausbreitmaß, Frischbetontemperatur, Festbetonrohddichte und Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen der Betone für die Auslagerungsproben und Laborproben.

Bezeichnung der Betone	Auslagerungsproben						Laborproben					
	Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	LP-Gehalt Vol.-%	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> cm	Frischbetontemperatur °C	Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup> <sup>3)</sup>	Druckfestigkeit β <sub>D28</sub> N/mm <sup>2</sup> <sup>3)</sup>	Frischbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup>	LP-Gehalt Vol.-%	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> cm	Frischbetontemperatur °C	Festbetonrohddichte kg/dm <sup>3</sup> <sup>4)</sup>	Druckfestigkeit β <sub>D28</sub> N/mm <sup>2</sup> <sup>4)</sup>
<b>Betone für Auslagerung gemäß Expositionsklasse XF3</b>												
<b>XF3-1</b>	2,39	1,5	36	19,2	2,38	43,6	2,38	1,2	(38) zerfallen	19,3	2,32	42,0
<b>XF3-2</b>	2,34	1,2	44	18,9	2,35	32,3	2,38	1,0	45	18,4	2,31	29,5
<b>XF3-5</b> <sup>5)</sup>	2,40	2,5	v=1,44	21,1	2,40	45,1	2,45	2,6	v=1,40	18,9	2,37	45,5
<b>XF3-6</b>	2,39	0,9	37	20,3	2,39	31,6	2,40	1,4	(34) zerfallen	19,3	2,31	29,1
<b>XF3-7</b>	2,38	1,5	37	20,0	2,35	31,0	2,39	1,5	(38) zerfallen	19,1	2,31	40,7
<b>XF3-8</b>	2,34	0,8	49	18,3	2,32	16,6	2,34	1,0	46	19,7	2,27	27,8
<b>LP-Betone für Auslagerung gemäß Expositionsklasse XF3</b>												
<b>XF3LP-1</b>	2,27	5,6	45	19,5	2,23	28,9	2,27	5,0	39	18,2	2,24	33,5
<b>XF3LP-2</b>	2,26	5,2	46	18,9	2,22	18,9	2,27	5,0	45	17,8	2,20	24,2
<sup>3)</sup> Lagerung wie die Prüfkörper zur Auslagerung: 1 Tag in der Form, 2 Tage im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF., dann 25 Tage am Auslagerungsort im Freien <sup>4)</sup> Lagerung gemäß CIF-Prüfvorschrift: 1 Tag in der Form, 6 Tage im Klima 20 °C / > 95 % rel. LF., dann 21 Tage im Klima 20 °C / 65 % rel. LF.												

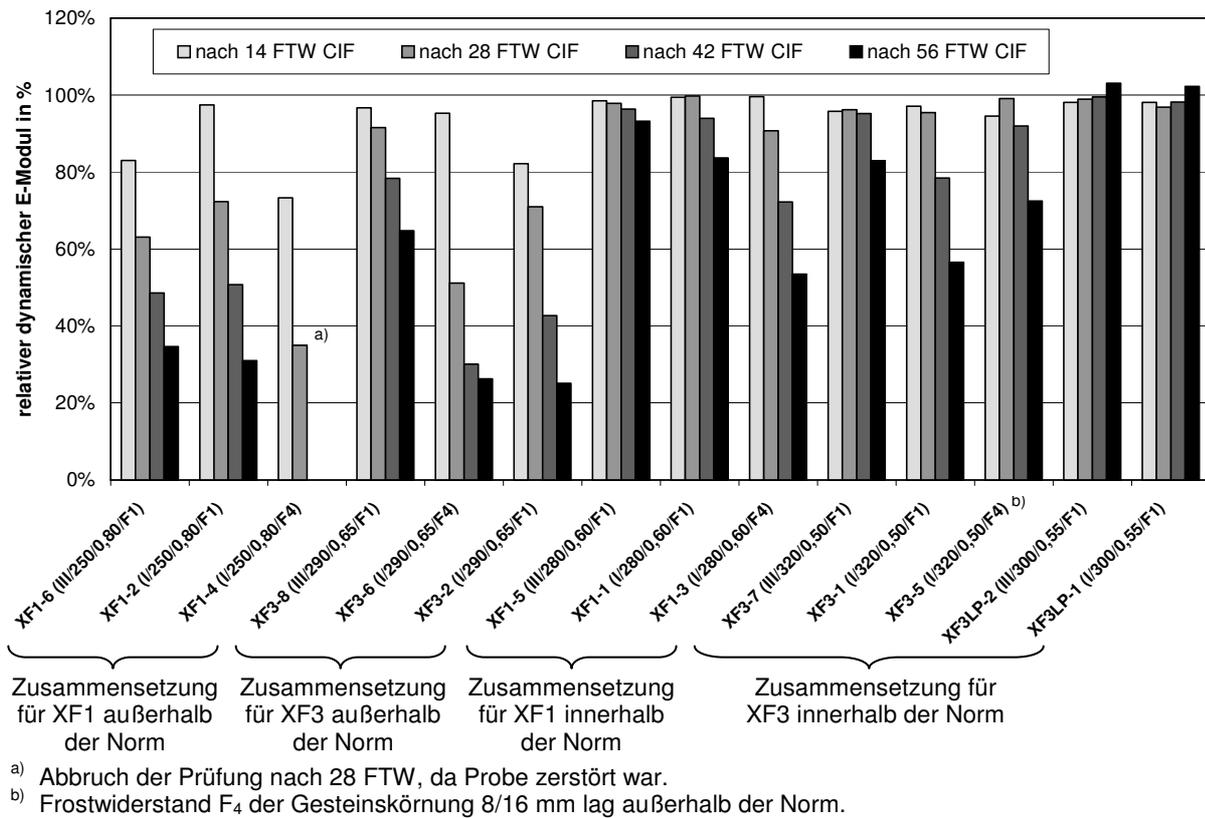


Bild 1: Zusammenstellung des relativen dynamischen E-Moduls bei der CIF-Prüfung der Laborproben mit demineralisiertem Wasser nach 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln.

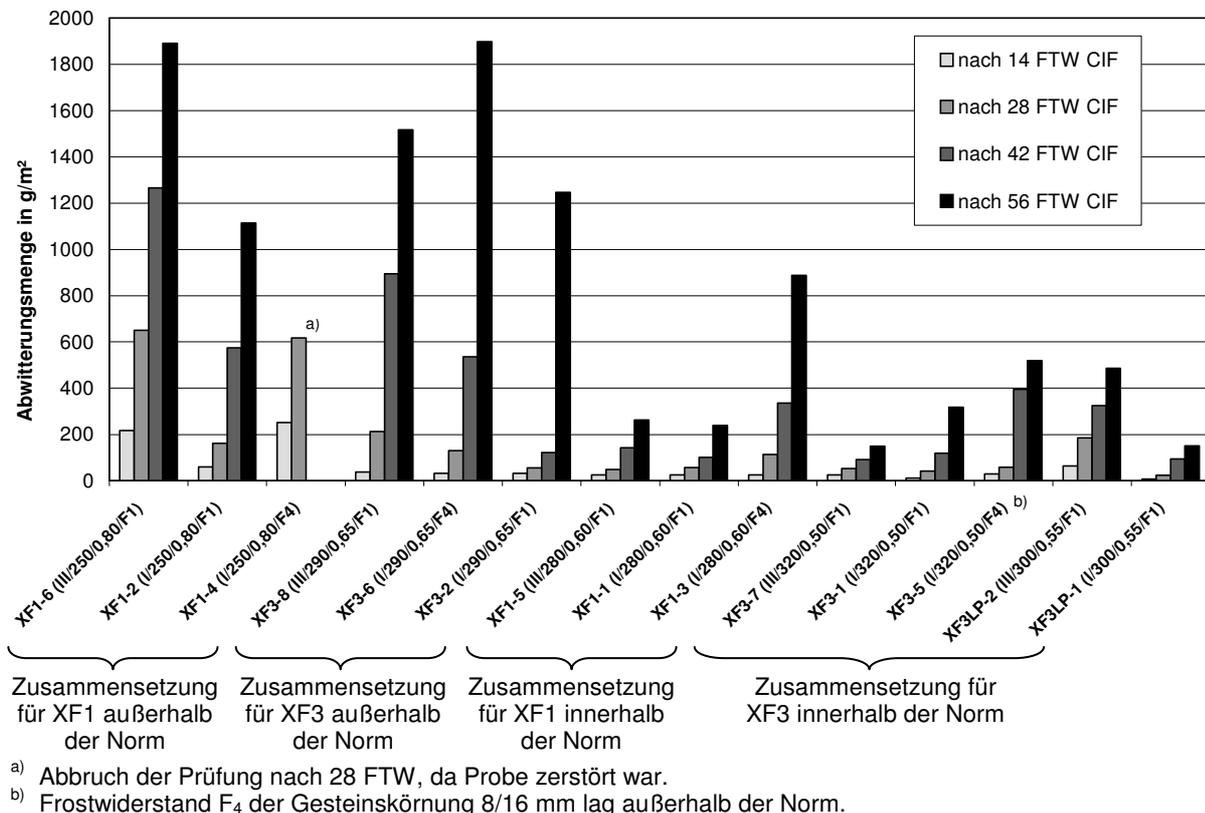


Bild 2: Zusammenstellung der Abwitterungsmenge bei der CIF-Prüfung der Laborproben mit demineralisiertem Wasser nach 14, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln.

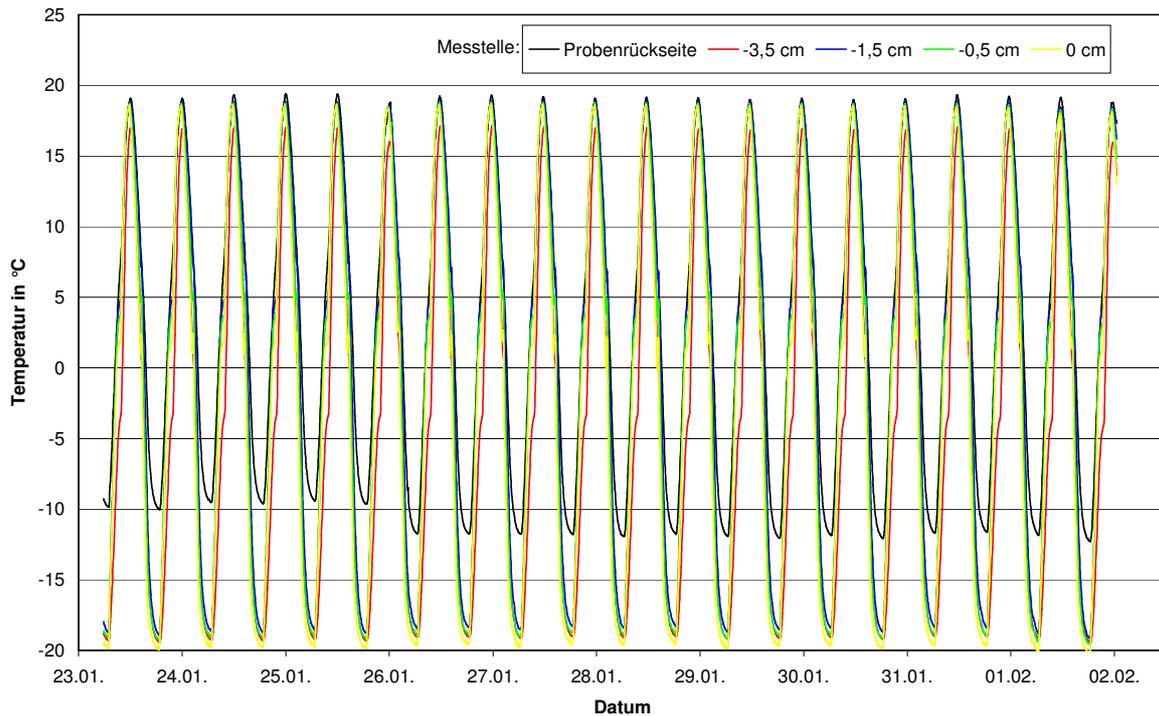


Bild 3: Temperaturverlauf (Ausschnitt) während der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

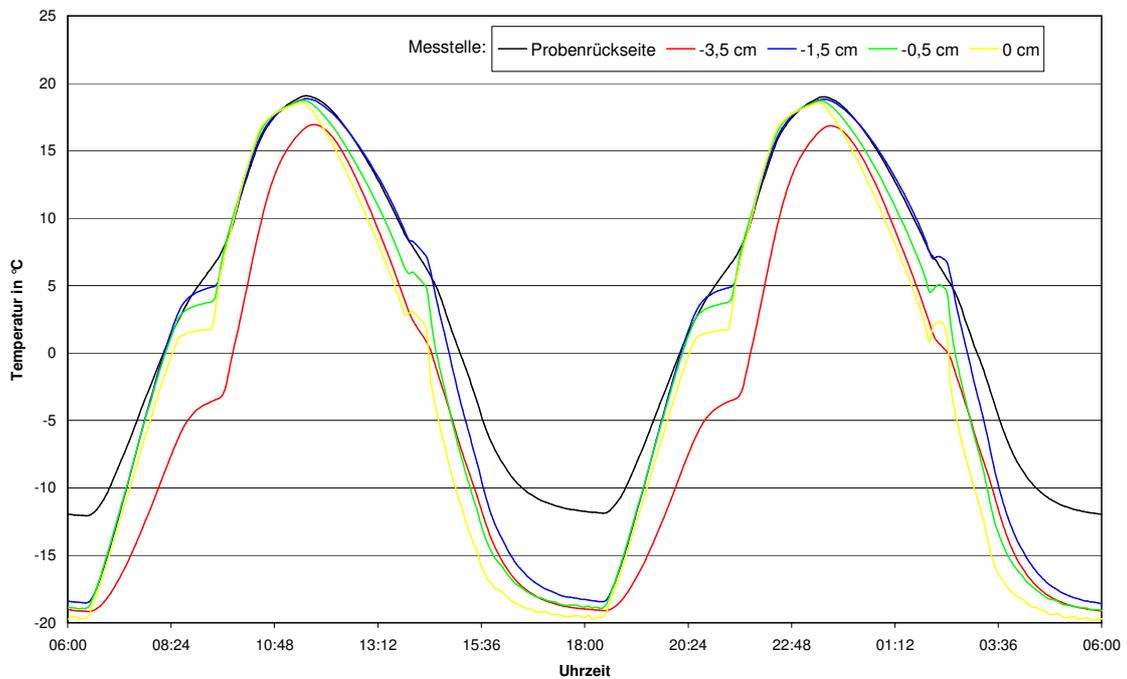


Bild 4: Temperaturverlauf von 2 Frost-Tau-Wechseln während der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

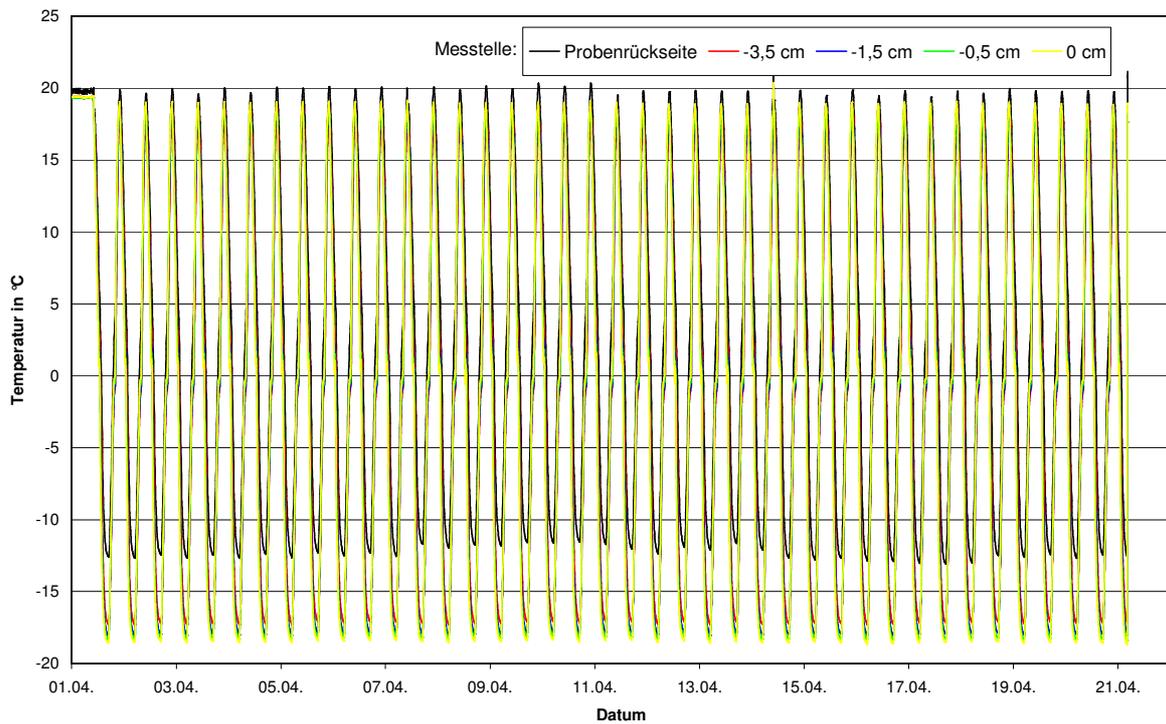


Bild 5: Temperaturverlauf (Ausschnitt) während der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF3-2.

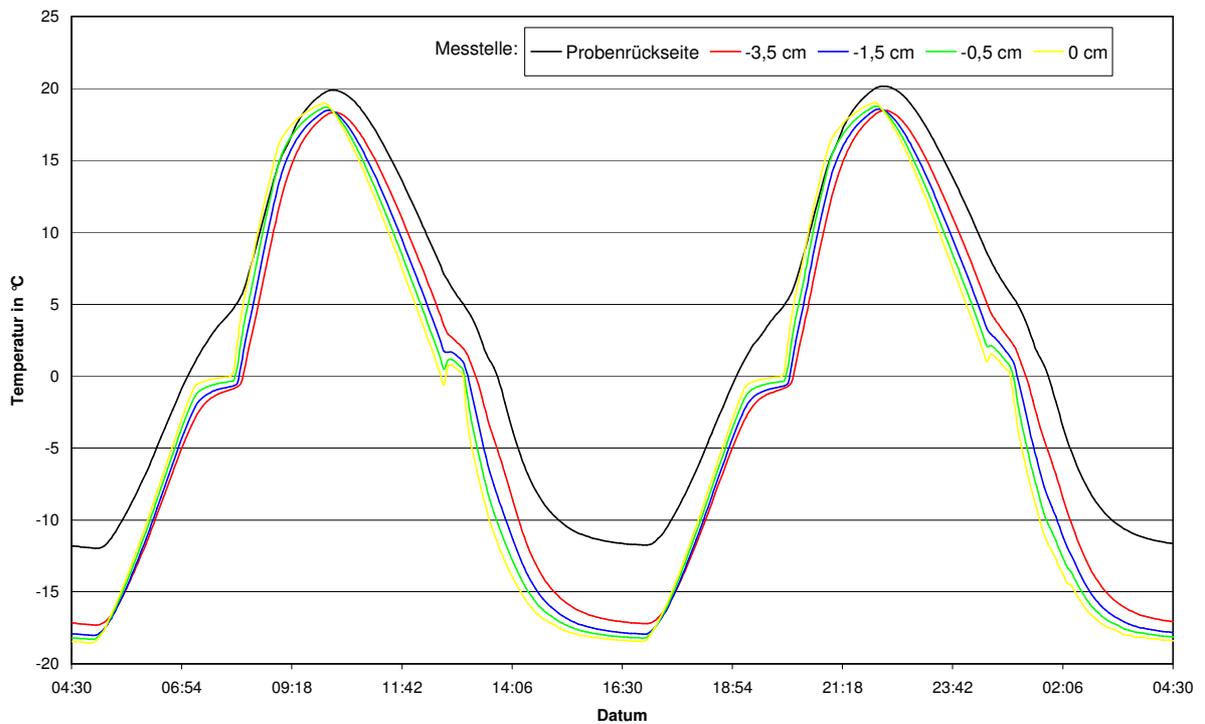


Bild 6: Temperaturverlauf von 2 Frost-Tau-Wechseln während der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

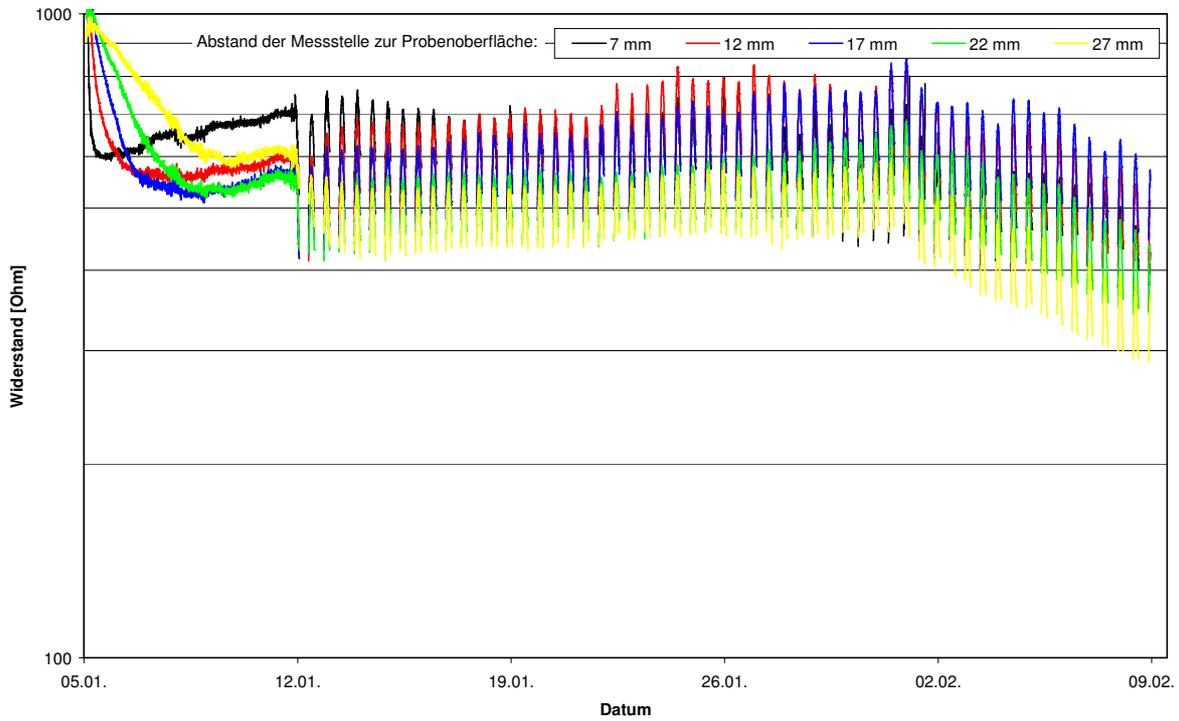


Bild 7: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der CIF-Prüfung (Beginn Frost-Tau-Wechsel: 12.01.), gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

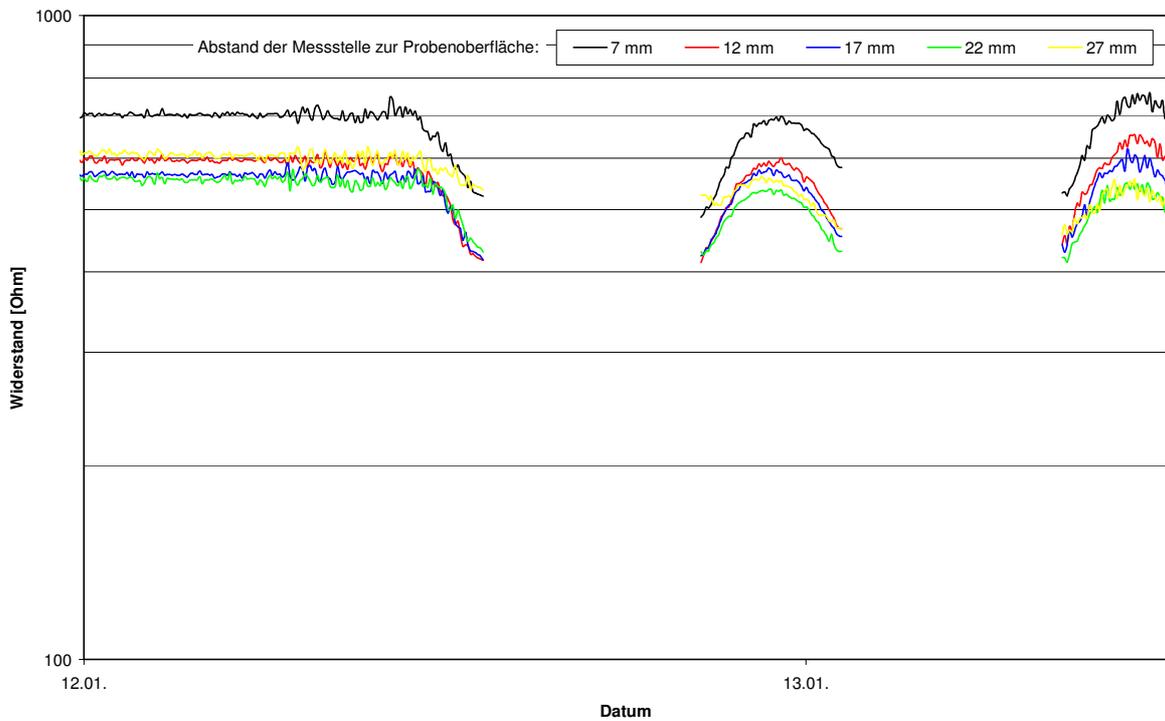


Bild 8: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der ersten beiden Frost-Tau-Wechsel der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

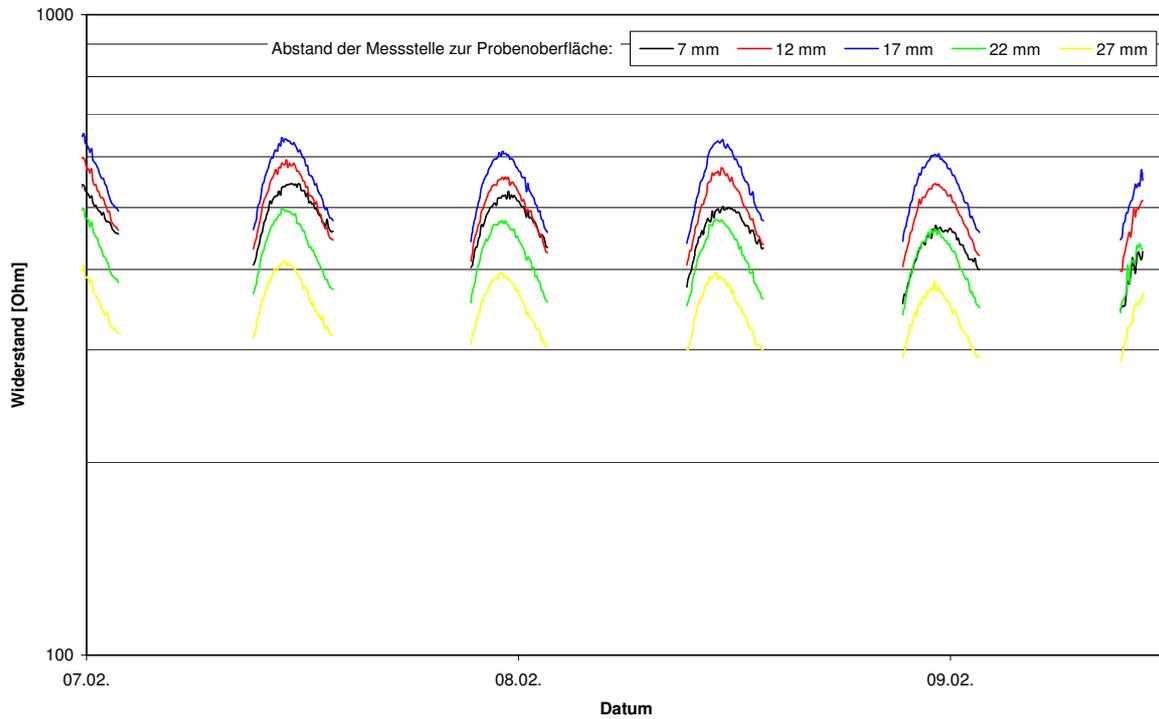


Bild 9: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während dem 52. und 56. Frost-Tau-Wechsel der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF1-3.

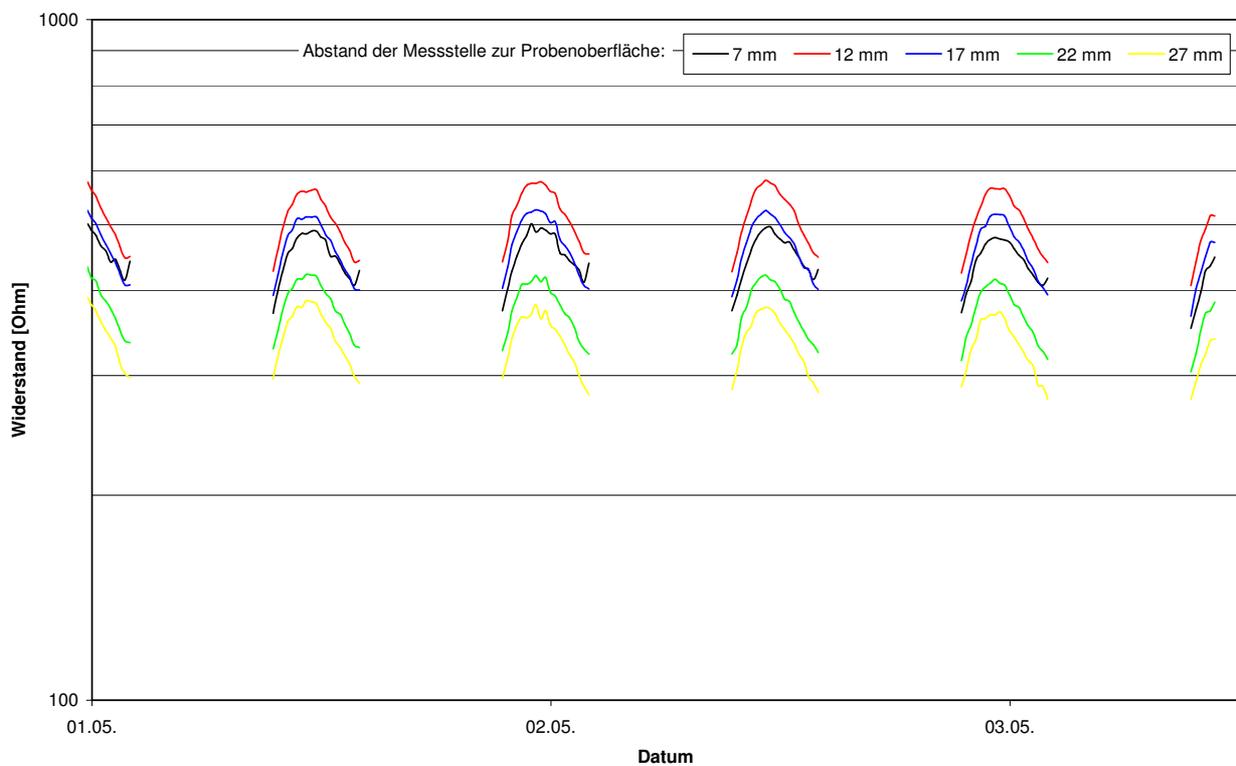


Bild 10: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während dem 52. und 56. Frost-Tau-Wechsel der CIF-Prüfung, gemessen in einer Laborprobe der Mischung XF3-2.

Tabelle 9: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abwitterung) der angegebenen XF1-Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung gemäß [4].

Mischung / Probe Nr.	Abwitterung (W)	Flächenanteil mit W>1 in %	Abwitterungsrad	Bildbeispiel der Prüffläche siehe
XF1-1/1	2	50	1,0	
XF1-1/2	2	20	0,4	
XF1-1/3	2	30	0,6	
XF1-1/4	2	30	0,6	Bild 11, Beilage 15
XF1-1/5	2	20	0,4	
Mittelwert	2,0	30	0,6	
XF1-2/1	3	90	2,7	Bild 12, Beilage 15
XF1-2/2	3	50	1,5	
XF1-2/3	3	60	1,8	
XF1-2/4	3	90	2,7	
XF1-2/5	3	90	2,7	
XF1-2	3,0	76	2,3	
XF1-3/1	3	80	2,4	
XF1-3/2	3	80	2,4	
XF1-3/3	2	50	1,0	
XF1-3/4	2	50	1,0	
XF1-3/5	2	50	1,0	Bild 13, Beilage 16
XF1-3	2,4	62	1,6	
XF1-4/1 <sup>1)</sup>	4 <sup>1)</sup>	30 <sup>1)</sup>	1,2 <sup>1)</sup>	
XF1-4/2 <sup>1)</sup>	4 <sup>1)</sup>	20 <sup>1)</sup>	0,8 <sup>1)</sup>	Bild 14 und 15, Beilage 16
XF1-4/3 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup>	10 <sup>1)</sup>	0,3 <sup>1)</sup>	
XF1-4/4 <sup>1)</sup>	3 <sup>1)</sup>	20 <sup>1)</sup>	0,6 <sup>1)</sup>	
XF1-4/5 <sup>1)</sup>	5 <sup>1)</sup>	100 <sup>1)</sup>	5,0 <sup>1)</sup>	Bild 16 und 17, Beilage 17
XF1-4 <sup>1)</sup>	3,8 <sup>1)</sup>	36 <sup>1)</sup>	1,6 <sup>1)</sup>	
XF1-5/1	3	40	1,2	
XF1-5/2	2	20	0,4	
XF1-5/3	2	40	0,8	Bild 18, Beilage 17
XF1-5/4	2	30	0,6	
XF1-5/5	2	40	0,8	
XF1-5	2,2	34	0,8	
XF1-6/1	5	100	5,0	Bild 19, Beilage 18
XF1-6/2	5	100	5,0	
XF1-6/3	5	100	5,0	
XF1-6/4	5	100	5,0	
XF1-6/5	5	100	5,0	
XF1-6	5,0	100	5,0	

<sup>1)</sup> Nach 28 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung, da die Proben zerstört waren.



Bild 11: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-1/4 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,6).



Bild 12: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-4/1 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 2,7).

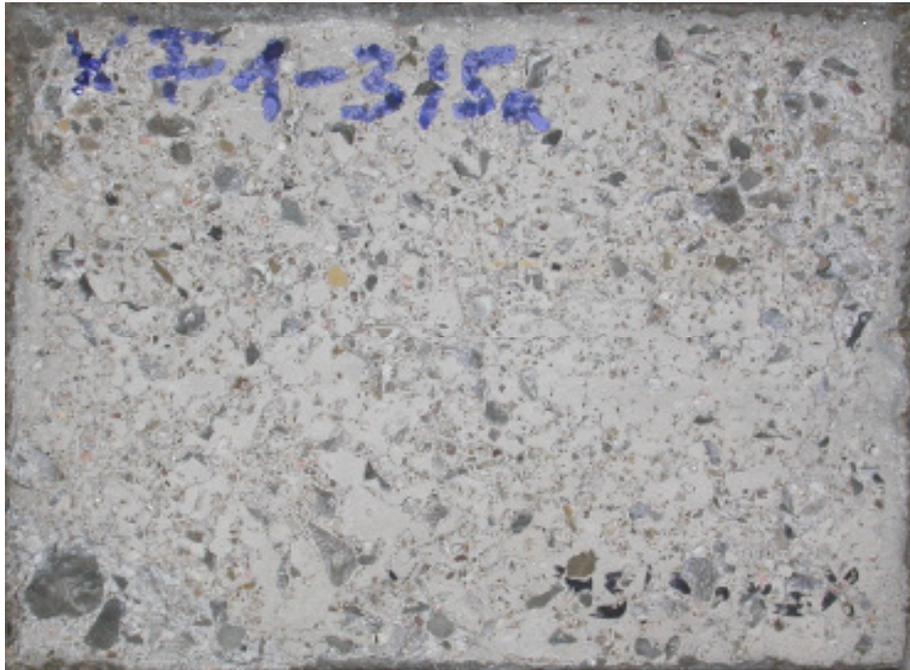


Bild 13: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-3/5 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 1,0).

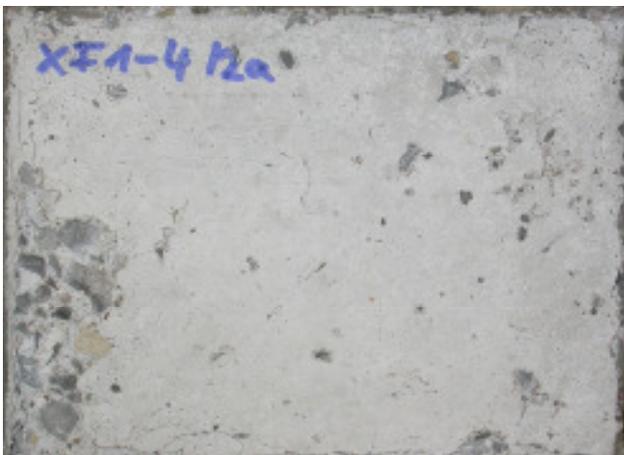


Bild 14: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-4/2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,8).

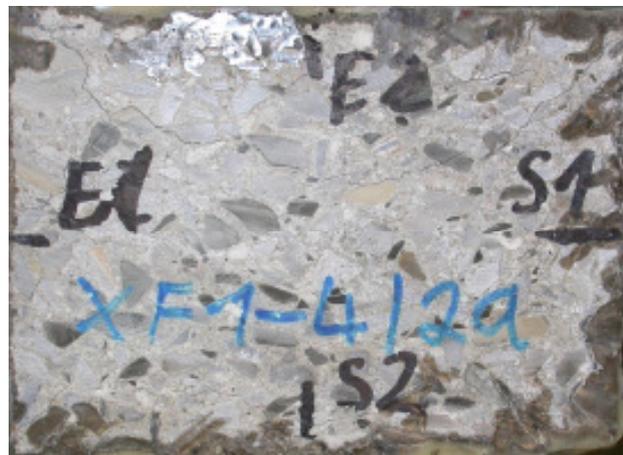


Bild 15: Foto der Rückseite der Laborprobe XF1-4/2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung.



Bild 16: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-4/5 nach 28 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 5,0).



Bild 17: Foto der Rückseite der Laborprobe XF1-4/5 nach 28 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung.

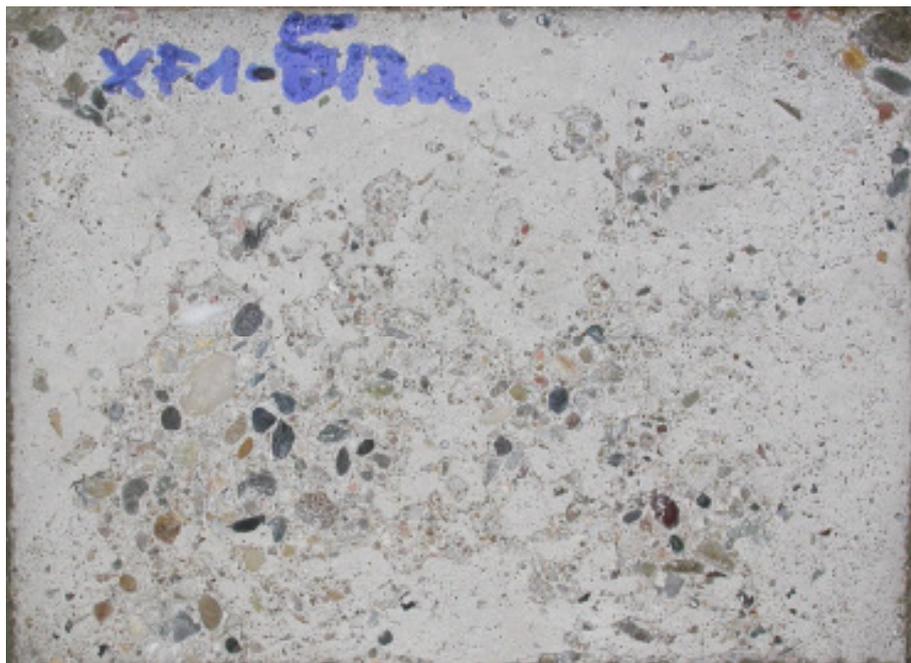


Bild 18: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-5/3 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,8).



Bild 19: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF1-6/1 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 5,0).

Tabelle 10: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abwitterung) der angegebenen XF3-Laborproben ohne LP-Bildner nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung gemäß [4].

Mischung / Probe Nr.	Abwitterung (W)	Flächenanteil mit $W > 1$ in %	Abwitterungsrad	Bildbeispiel der Prüffläche siehe
XF3-1/1	2	80	1,6	
XF3-1/2	2	60	1,2	Bild 20, Beilage 20
XF3-1/3	2	50	1,0	
XF3-1/4	2	50	1,0	
XF3-1/5	2	30	0,6	
<b>XF3-1</b>	<b>2,0</b>	<b>54</b>	<b>1,1</b>	
XF3-2/1	5	100	5,0	
XF3-2/2	3	90	2,7	Bild 21, Beilage 20
XF3-2/3	3	80	2,4	
XF3-2/4	3	60	1,8	
XF3-2/5	3	90	2,7	
<b>XF3-2</b>	<b>3,4</b>	<b>84</b>	<b>2,9</b>	
XF3-5/1	2	30	0,6	Bild 22, Beilage 21
XF3-5/2	2	30	0,6	
XF3-5/3	2	30	0,6	
XF3-5/4	2	30	0,6	
XF3-5/5	2	30	0,6	
<b>XF3-5</b>	<b>2,0</b>	<b>30</b>	<b>0,6</b>	
XF3-6/1	4	90	3,6	Bild 23, Beilage 21
XF3-6/2	4	80	3,2	
XF3-6/3	4	80	3,2	
XF3-6/4	5	90	4,5	
XF3-6/5	5	90	4,5	Bild 24 und 25, Beilage 22
<b>XF3-6</b>	<b>4,4</b>	<b>86</b>	<b>3,8</b>	
XF3-7/1	2	30	0,6	Bild 26, Beilage 22
XF3-7/2	2	30	0,6	
XF3-7/3	2	30	0,6	
XF3-7/4	2	30	0,6	
XF3-7/5	2	40	0,8	
<b>XF3-7</b>	<b>2,0</b>	<b>32</b>	<b>0,6</b>	
XF3-8/1	3	70	2,1	
XF3-8/2	3	90	2,7	Bild 27, Beilage 23
XF3-8/3	3	90	2,7	
XF3-8/4	3	90	2,7	
XF3-8/5	3	100	3,0	
<b>XF3-8</b>	<b>3,0</b>	<b>88</b>	<b>2,6</b>	



Bild 20: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-1/2 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 1,2).

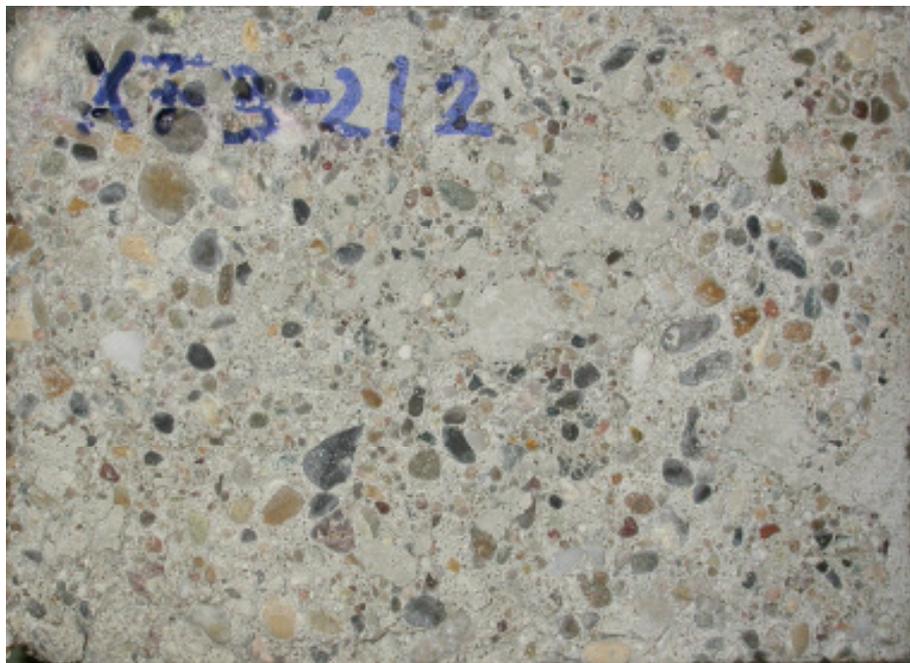


Bild 21: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-2/2 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 2,7).

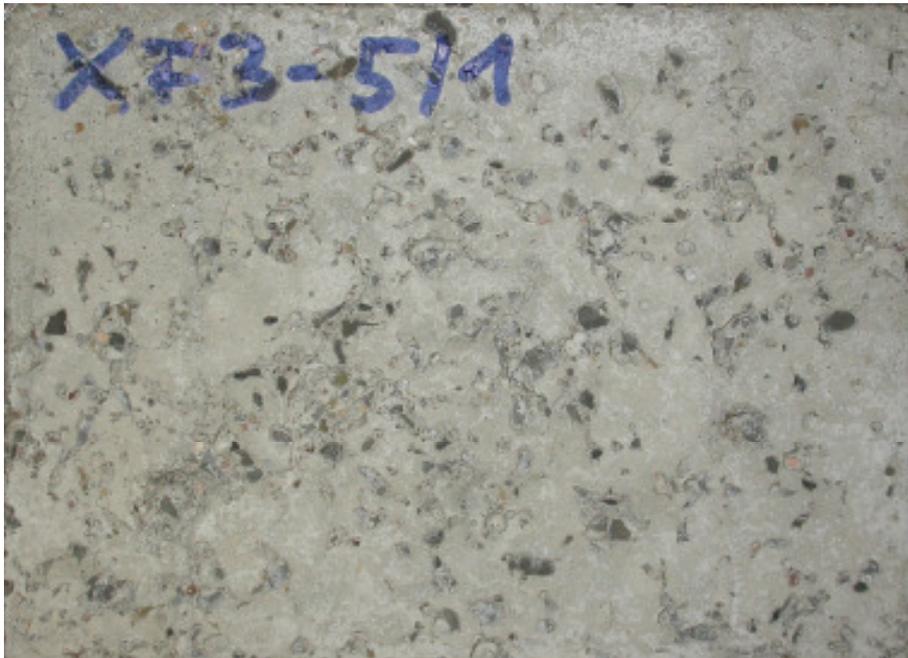


Bild 22: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-5/1 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,6).



Bild 23: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-6/1 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 3,6).

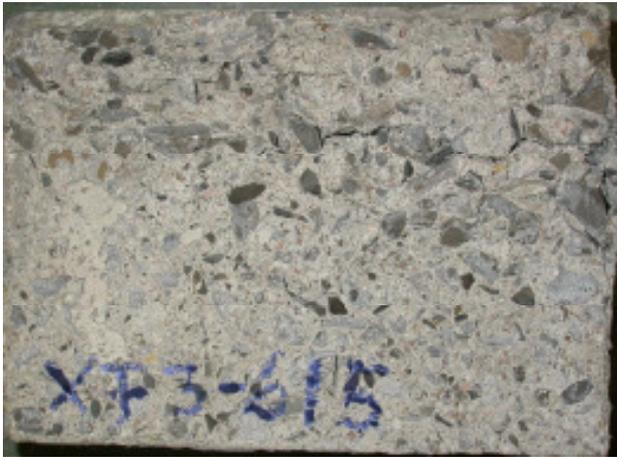


Bild 24: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-6/5 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 4,5).

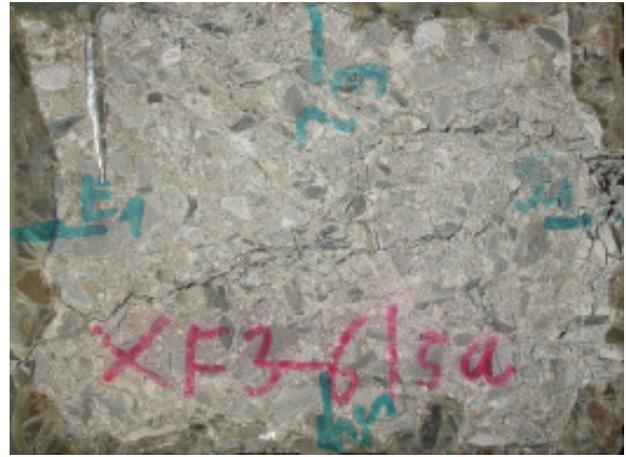


Bild 25: Foto der Rückseite der Laborprobe XF3-6/5 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung.

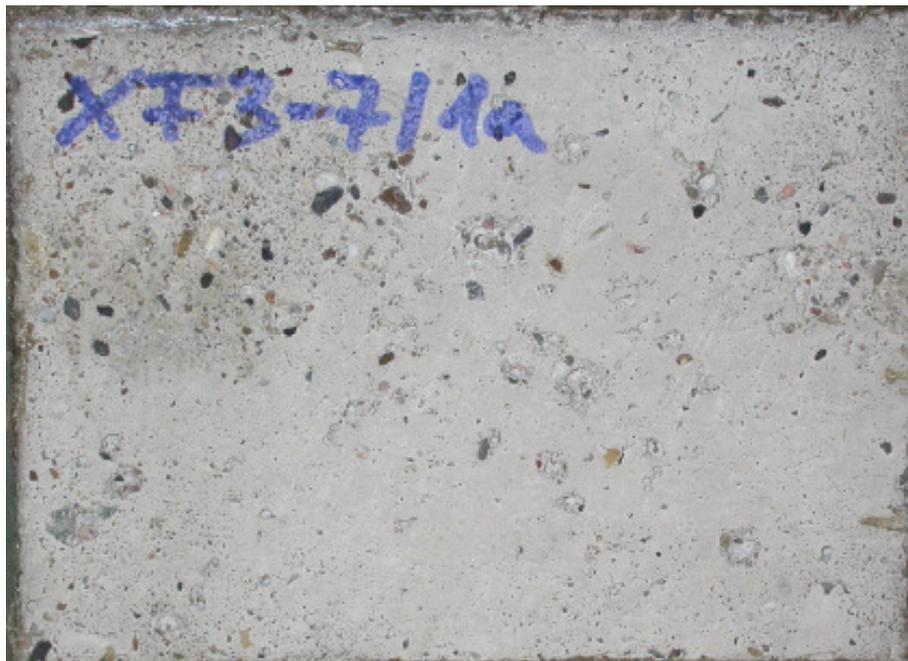


Bild 26: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-7/1 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,6).



Bild 27: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3-8/2 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 2,7).

Tabelle 11: Ergebnisse der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abwitterung) der angegebenen XF3-Laborproben mit LP-Bildner nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung gemäß [4].

Mischung / Probe Nr.	Abwitterung (W)	Flächenanteil mit $W > 1$ in %	Abwitterungsgrad	Bildbeispiel der Prüffläche siehe
XF3LP-1/1	2	10	0,2	
XF3LP-1/2	2	10	0,2	
XF3LP-1/3	2	40	0,8	
XF3LP-1/4	2	20	0,4	
XF3LP-1/5	2	30	0,6	Bild 28, Beilage 24
XF3LP-1	2,0	22	0,4	
XF3LP-2/1	3	100	3,0	
XF3LP-2/2	2	70	1,4	
XF3LP-2/3	2	90	1,8	Bild 29, Beilage 24
XF3LP-2/4	2	70	1,4	
XF3LP-2/5	2	80	1,6	
XF3LP-2	2,2	82	1,8	



Bild 28: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3LP-1/5 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 0,6).



Bild 29: Foto der Prüffläche der Laborprobe XF3LP-2/3 nach 56 Frost-Tau-Wechseln der CIF-Prüfung (Abwitterungsgrad: 1,8).

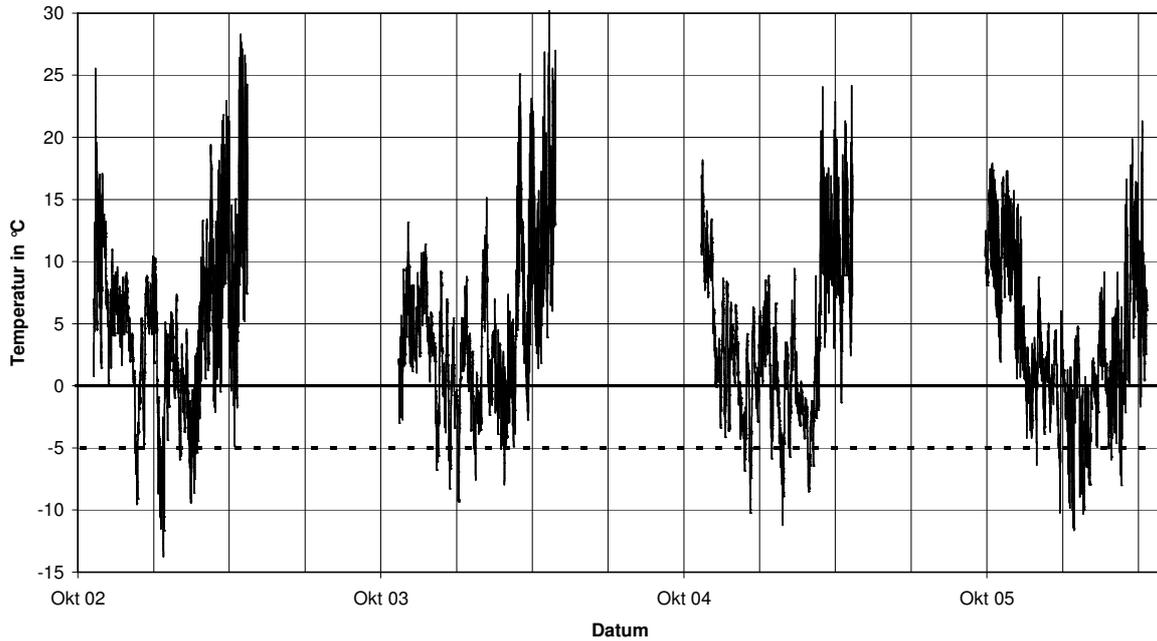


Bild 30: Temperaturverlauf während der Frostperioden 2002 bis 2006, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF1-3 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

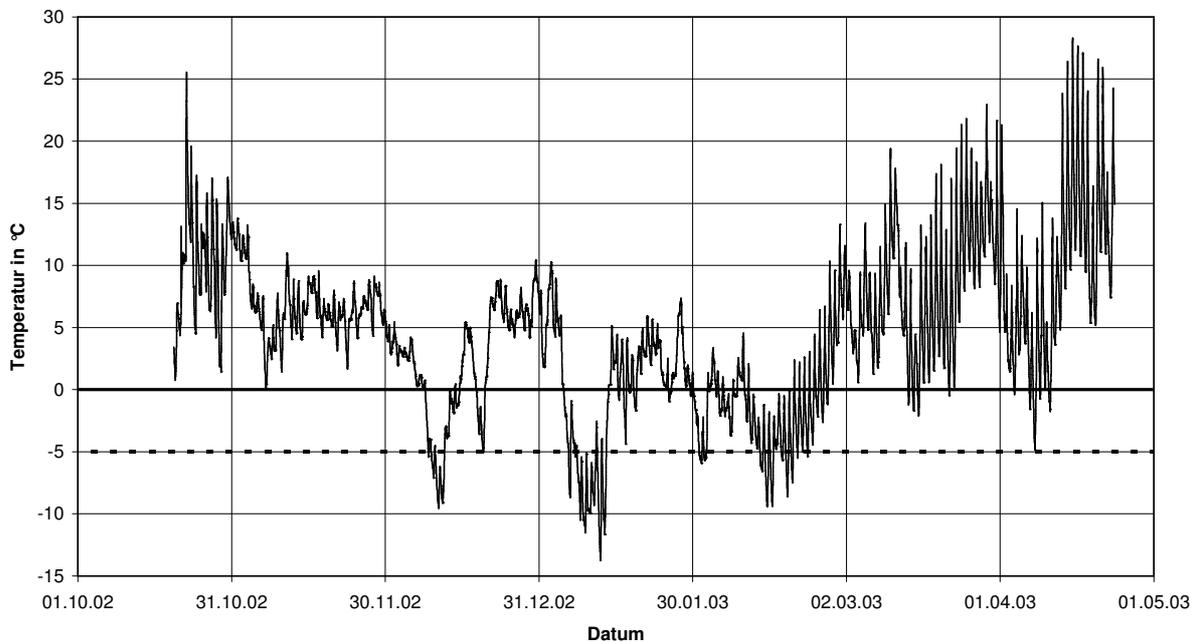


Bild 31: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2002/2003, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF1-3 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

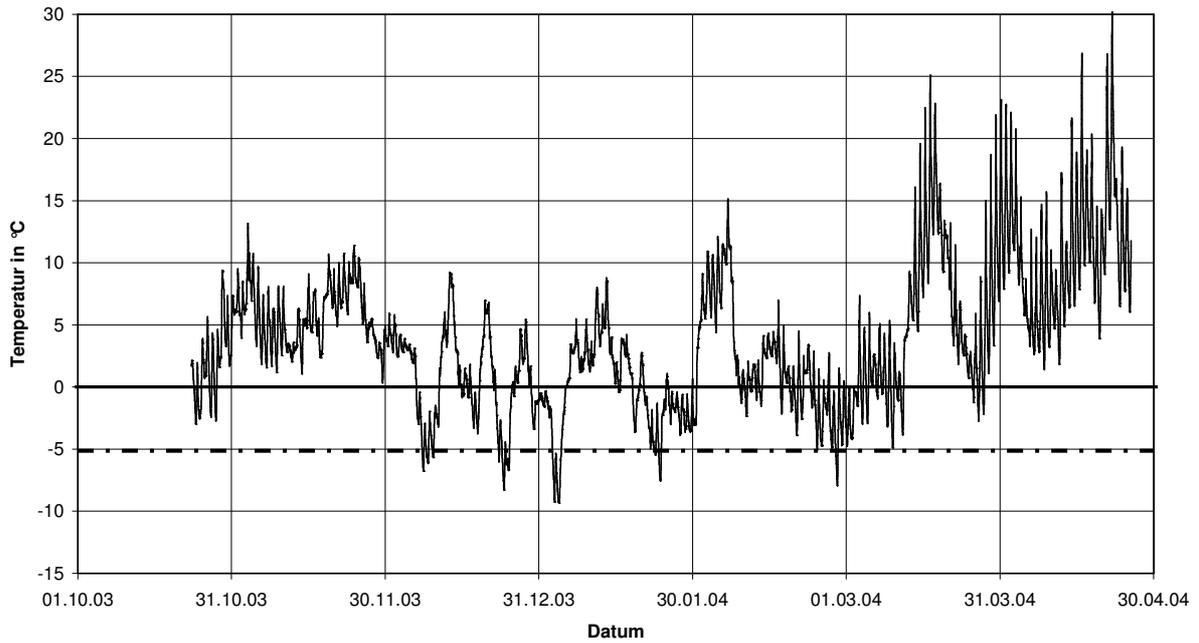


Bild 32: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2003/2004, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF1-3 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

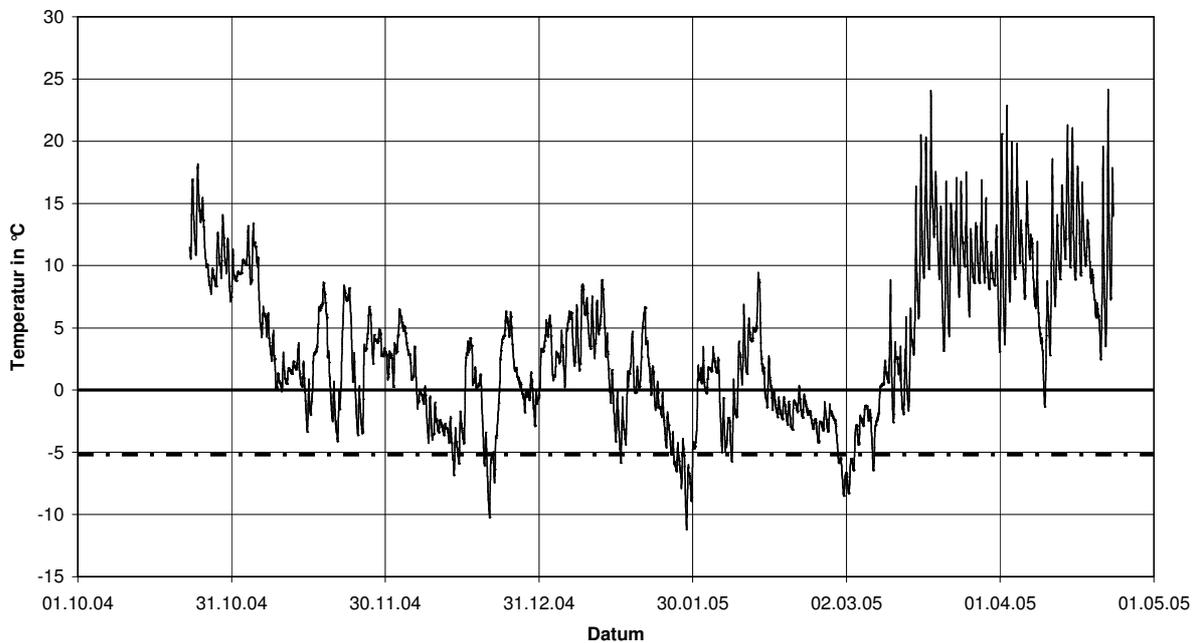


Bild 33: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2004/2005, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF1-3 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

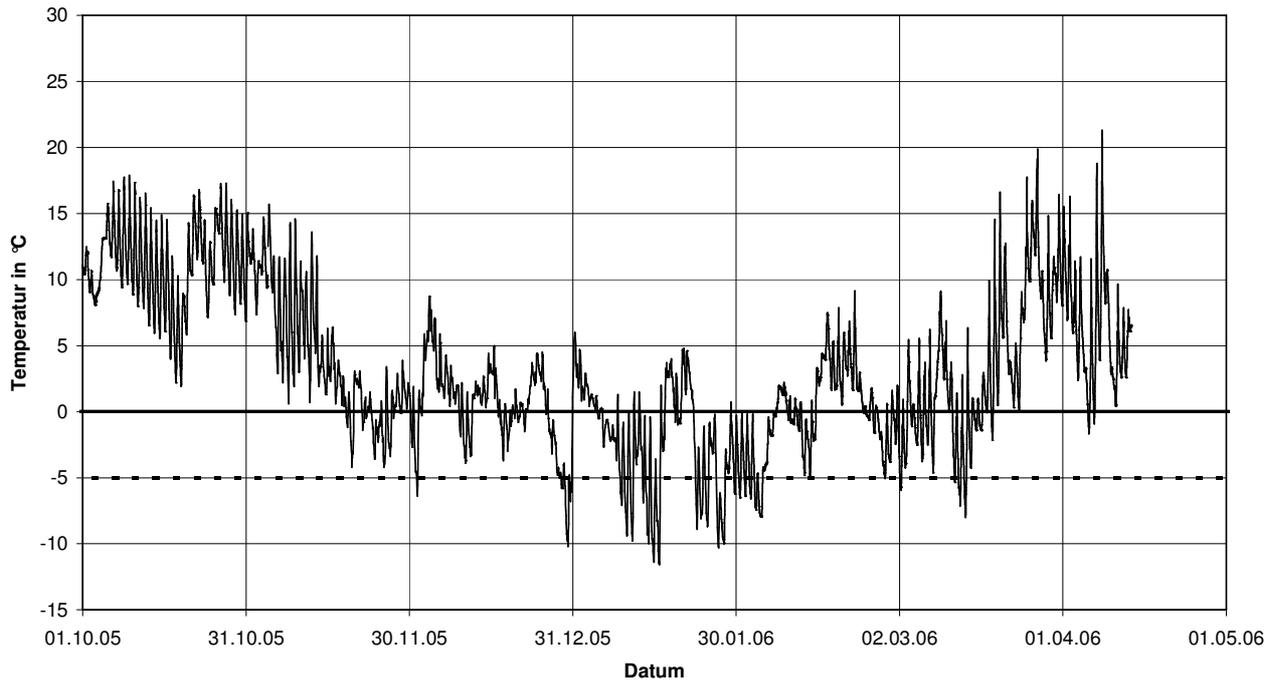


Bild 34: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2005/2006, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF1-3 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

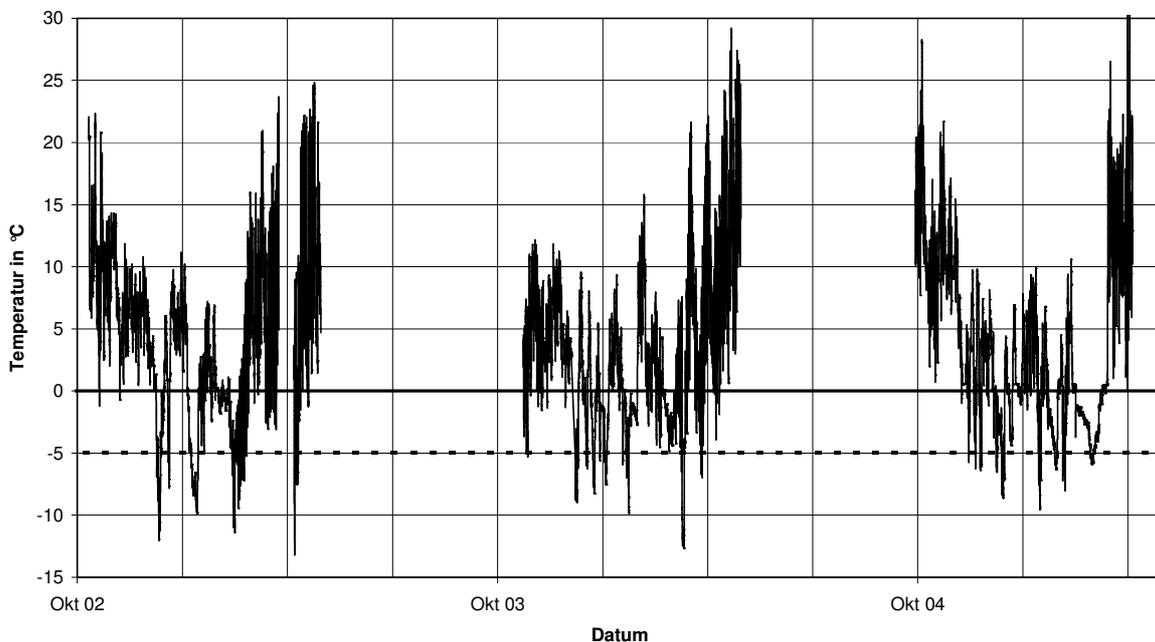


Bild 35: Temperaturverlauf während der Frostperioden 2002 bis 2005, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF3-2 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

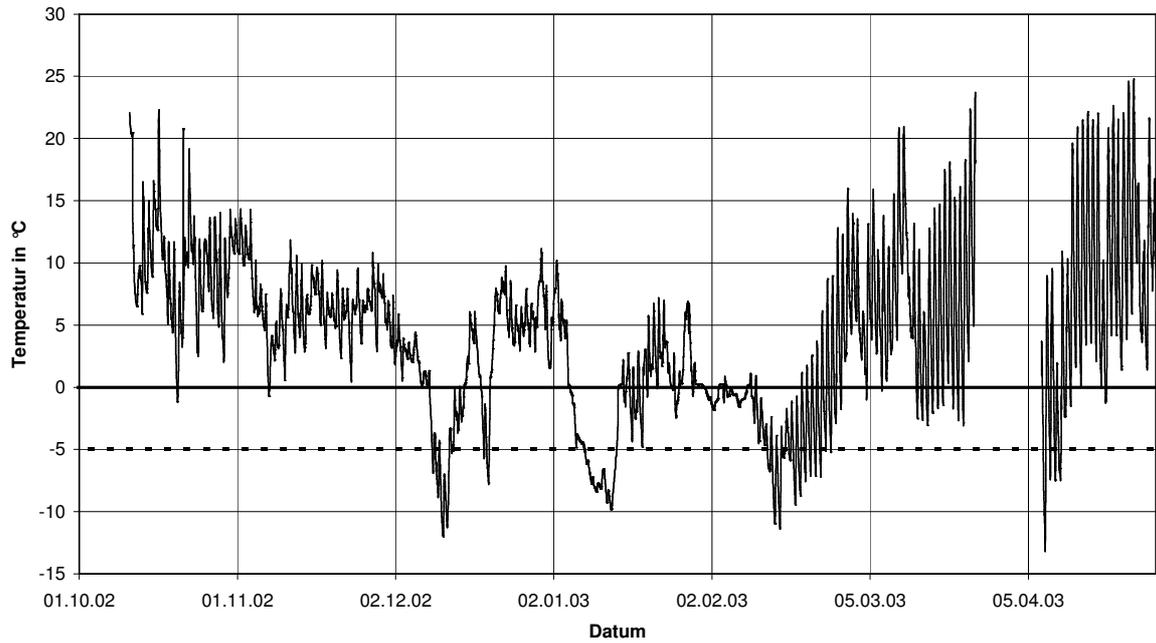


Bild 36: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2002/2003, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF3-2 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

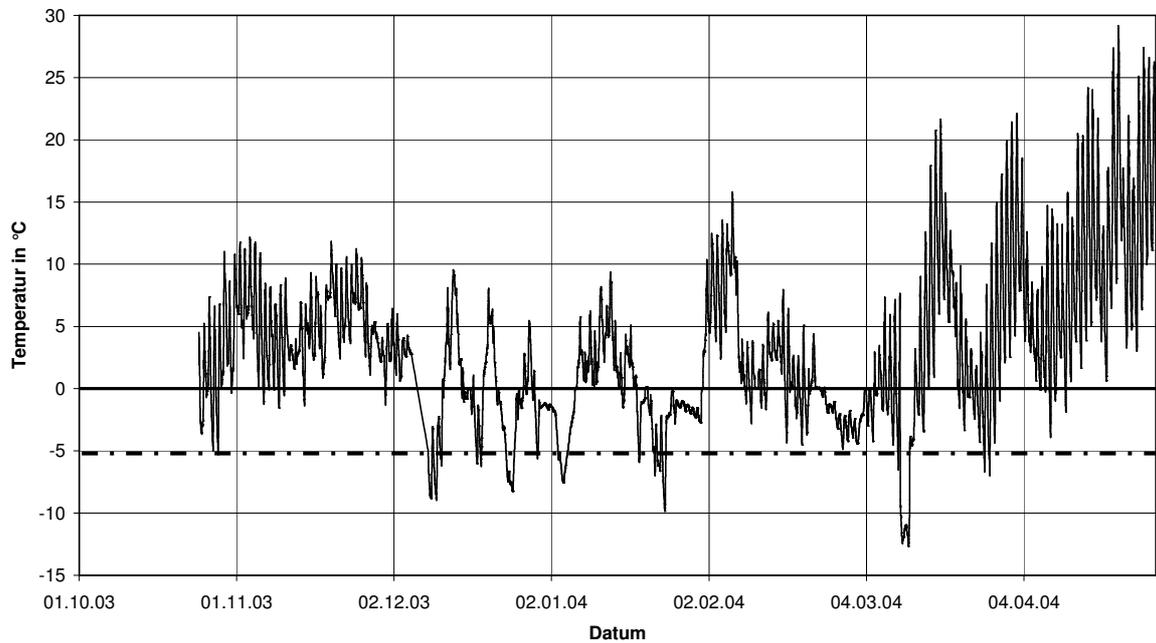


Bild 37: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2003/2004, gemessen in der Auslageprobe der Mischung XF3-2 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

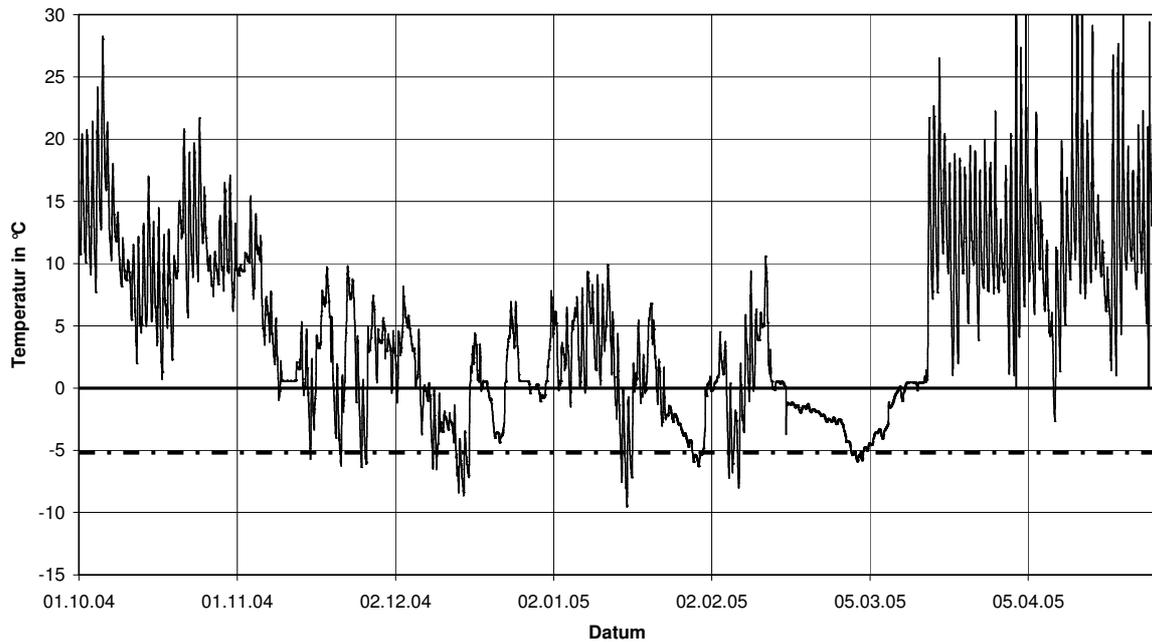


Bild 38: Temperaturverlauf während der Frostperiode 2004/2005, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 in einer Tiefe von 0,5 cm unter der Oberfläche.

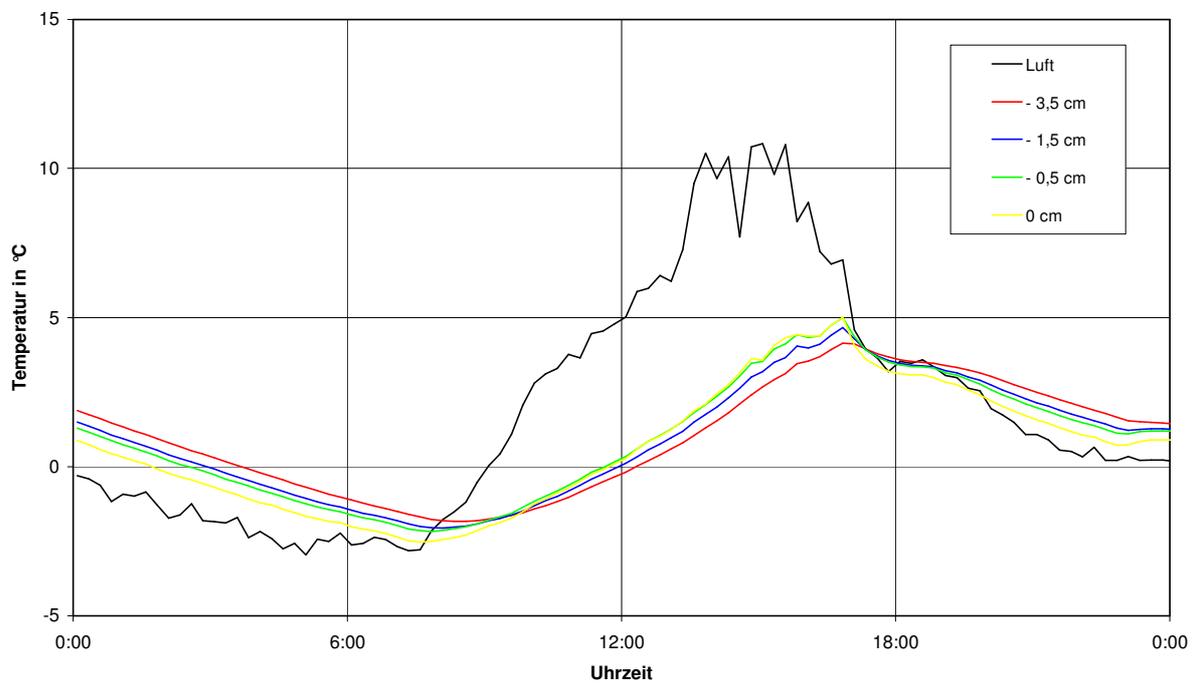


Bild 39: Ausschnitt eines Temperaturverlaufs über 24 Stunden in den angegebenen Abständen unter der Oberfläche der Auslagerungsprobe der Mischung XF1-3 bzw. in der Luft in der Nähe der Prüffläche.

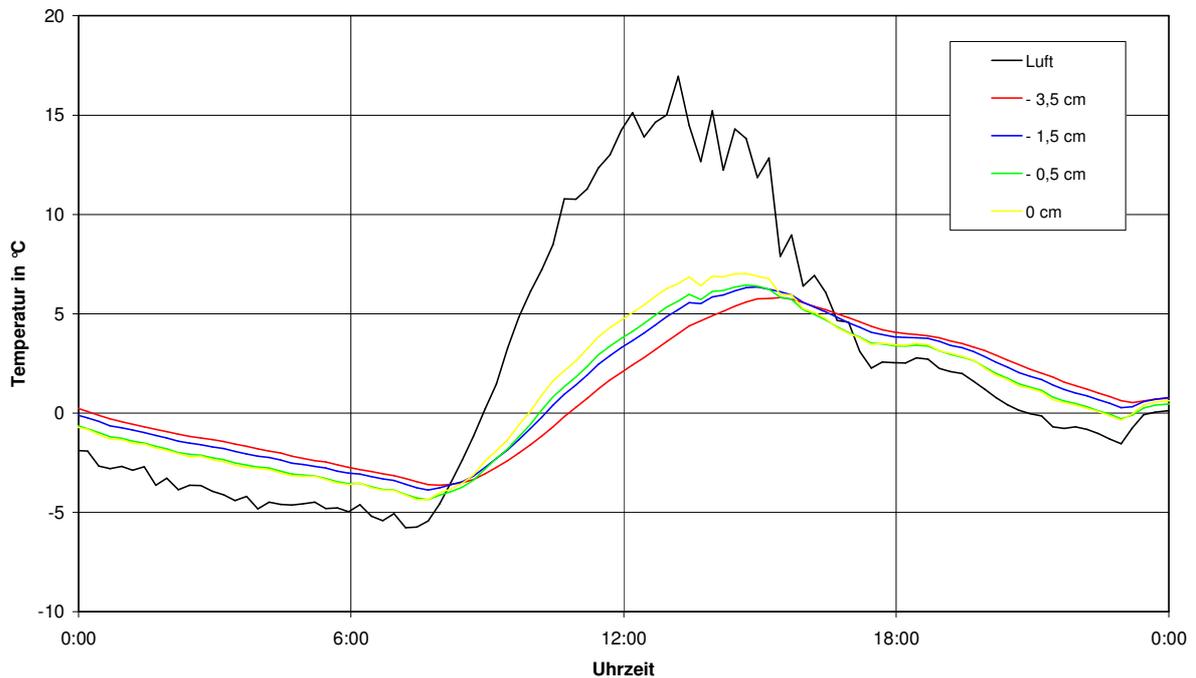


Bild 40: Ausschnitt eines Temperaturverlaufs über 24 Stunden in den angegebenen Abständen unter der Oberfläche der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 bzw. in der Luft direkt über der Prüffläche.

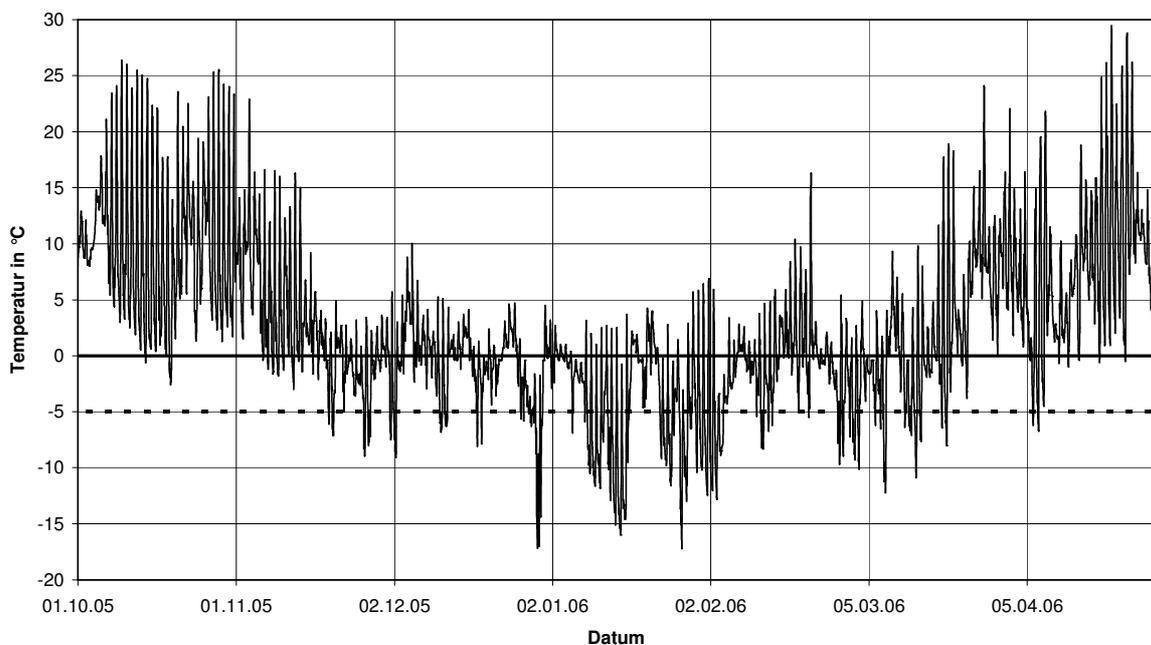


Bild 41: Temperaturverlauf (stündliche Tiefsttemperaturen) während der Frostperiode 2005/2006, gemessen von der Wetterstation Hohenheim in einer Höhe von 5 cm über dem Boden.

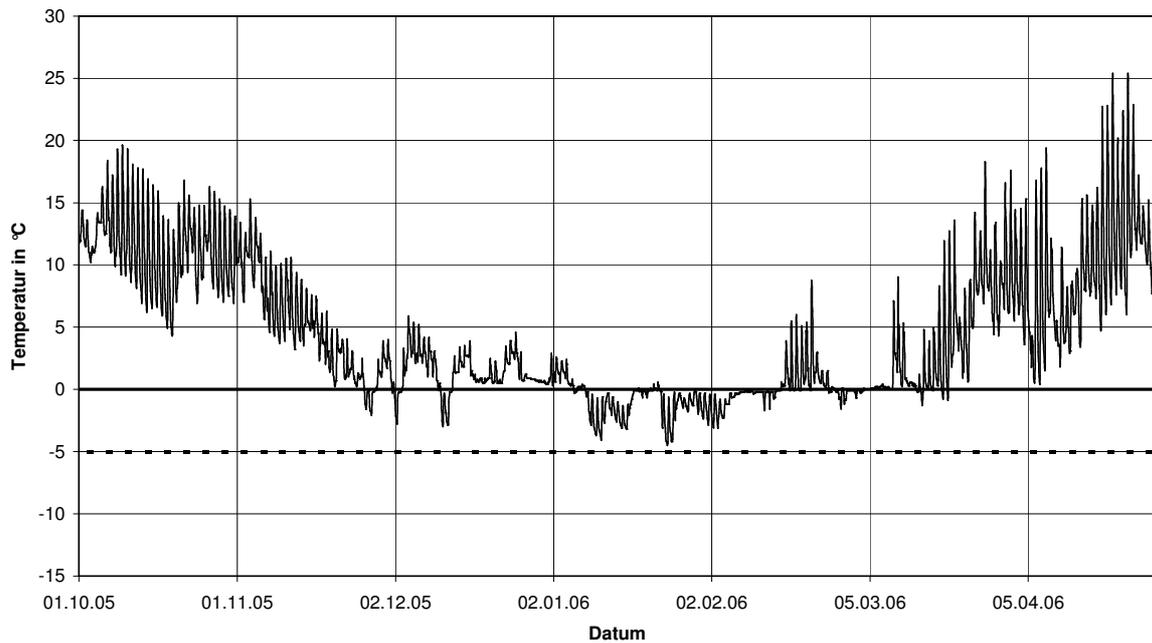


Bild 42: Temperaturverlauf (stündliche Tiefsttemperaturen) während der Frostperiode 2005/2006, gemessen von der Wetterstation Hohenheim in einer Tiefe von 2 cm unter unbewachsenem Boden.

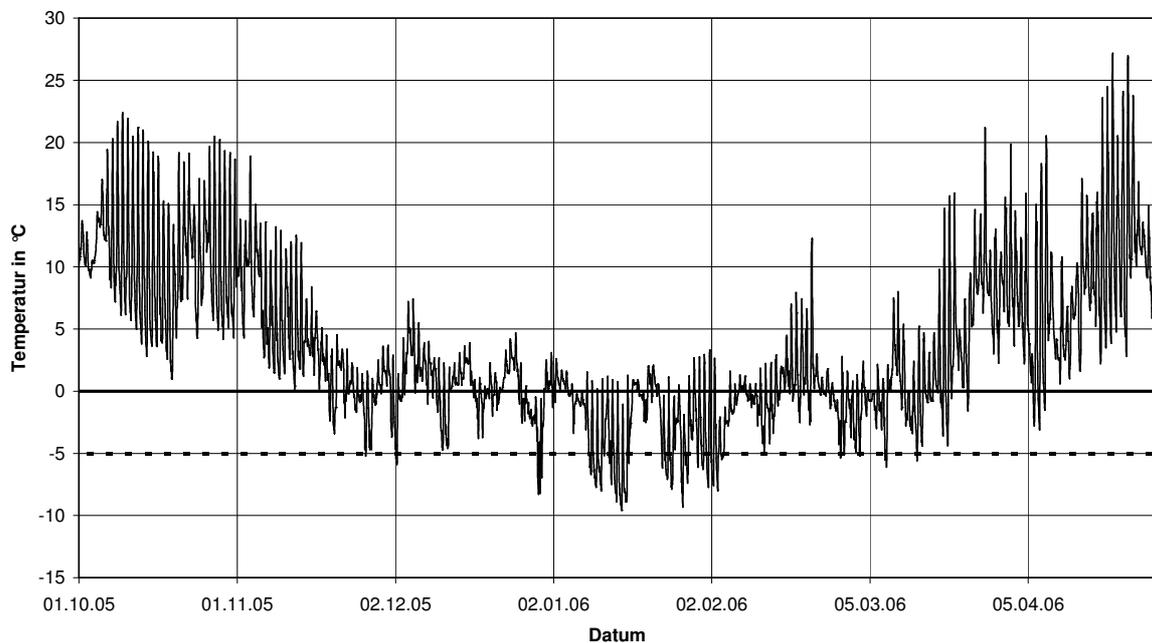


Bild 43: Temperaturverlauf (stündliche Tiefsttemperaturen) während der Frostperiode 2004/2005, berechnet als Mittelwert aus den von der Wetterstation Hohenheim gemessenen Temperaturen in einer Höhe von 5 cm über dem Boden und in einer Tiefe von 2 cm unter unbewachsenem Boden.

Tabelle 12: Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der gemessenen Tiefsttemperaturen der Auslagerungsproben XF1 und XF3.

<b>Auslagerungsproben XF1 (vertikale Ausrichtung)</b>					
Anzahl Frost-Tau-Wechsel (in Klammer: Temperaturwechsel mit $T_{\min} < -5 \text{ °C}$ )					
Frostperiode	Messposition				
	- 3,5 cm	- 1,5 cm	- 0,5 cm	0 cm	Luft
2002/2003	33 (18)	35 (19)	35 (21)	41 (27)	64 (52)
2003/2004	42 (10)	45 (11)	45 (11)	51 (17)	78 (33)
2004/2005	25 (12)	28 (12)	28 (15)	38 (15)	72 (40)
2005/2006	60 (27)	63 (27)	67 (27)	74 (33)	79 (34)
<b>Gesamt</b>	<b>160 (67)</b>	<b>171 (69)</b>	<b>175 (74)</b>	<b>204 (92)</b>	<b>293 (159)</b>
Tiefsttemperaturen in °C – Proben XF1					
2002/2003	-13,8	-13,7	-13,8	-14,1	-10,5
2003/2004	-9,2	-9,3	-9,3	-9,6	-10,4
2004/2005	-10,9	-11,1	-11,2	-11,7	-14,0
2005/2006	-11,5	-11,5	-11,6	-13,7	-14,8
<b>Auslagerungsproben XF3 (horizontale Ausrichtung)</b>					
Anzahl Frost-Tau-Wechsel (in Klammer: Temperaturwechsel mit $T_{\min} < -5 \text{ °C}$ )					
Frostperiode	Messposition				
	- 3,5 cm	- 1,5 cm	- 0,5 cm	0 cm	Luft
2002/2003	45 (24)	45 (25)	49 (26)	51 (26)	58 (40)
2003/2004	59 (19)	60 (18)	66 (19)	68 (21)	71 (29)
2004/2005	41 (19)	43 (20)	49 (20)	50 (20)	69 (65)
<b>Gesamt</b>	<b>145 (62)</b>	<b>148 (63)</b>	<b>164 (65)</b>	<b>169 (67)</b>	<b>198 (134)</b>
Tiefsttemperaturen in °C - Proben XF3					
2002/2003	-12,8	-13,0	-13,2	-13,4	-14,9
2003/2004	-12,5	-12,5	-12,5	-12,8	-14,5
2004/2005	-9,4	-9,4	-9,6	-9,7	-10,4

Tabelle 13: Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und der gemessenen Tiefsttemperaturen, ermittelt aus den Temperaturdaten der Wetterstation Hohenheim.

Anzahl Frost-Tau-Wechsel (in Klammer: Temperaturwechsel mit $T_{\min} < -5 \text{ °C}$ )				
Frostperiode	Messposition			
	Position 1 (Luft 2m über Boden)	Position 2 (Luft 5 cm über Boden)	Position 3 (2 cm unter unbe- wachsenem Boden)	berechnet aus Position 2 und 3
2005/2006	77 (28)	126 (81)	29 (0)	97 (37)
Tiefsttemperaturen in °C				
2005/2006	-11,6	-17,2	-4,5	-9,6

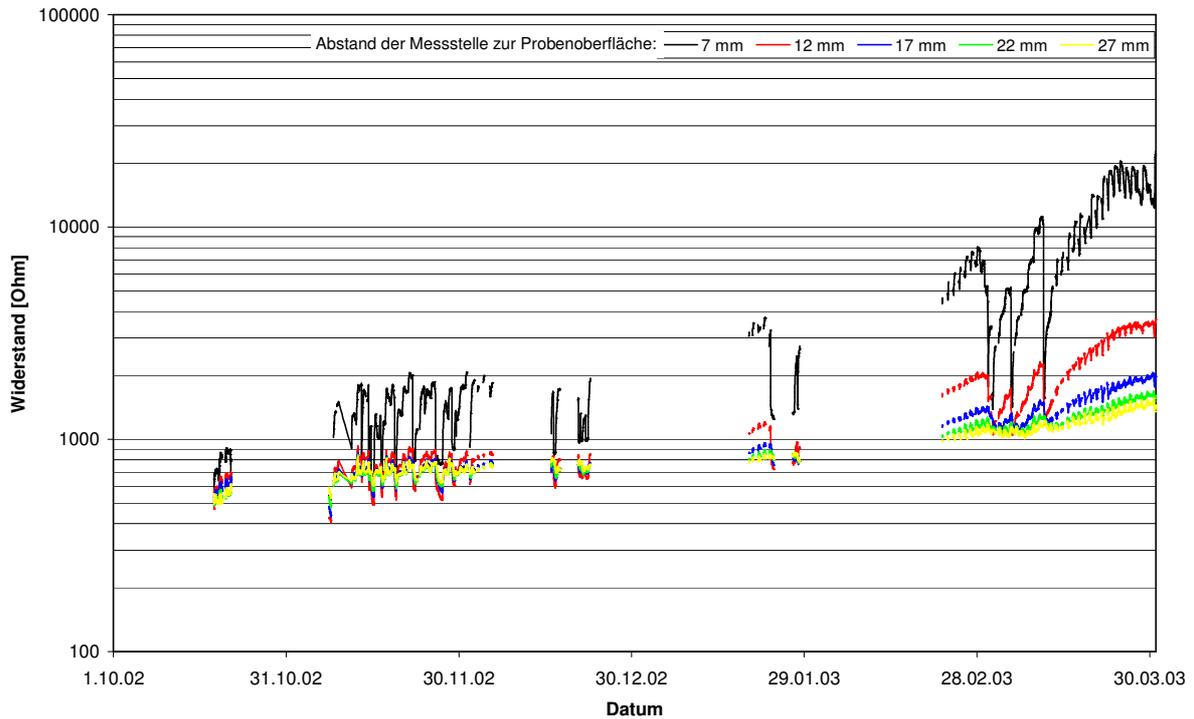


Bild 44: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2002/2003, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF1-3 in den angegebenen Tiefen.

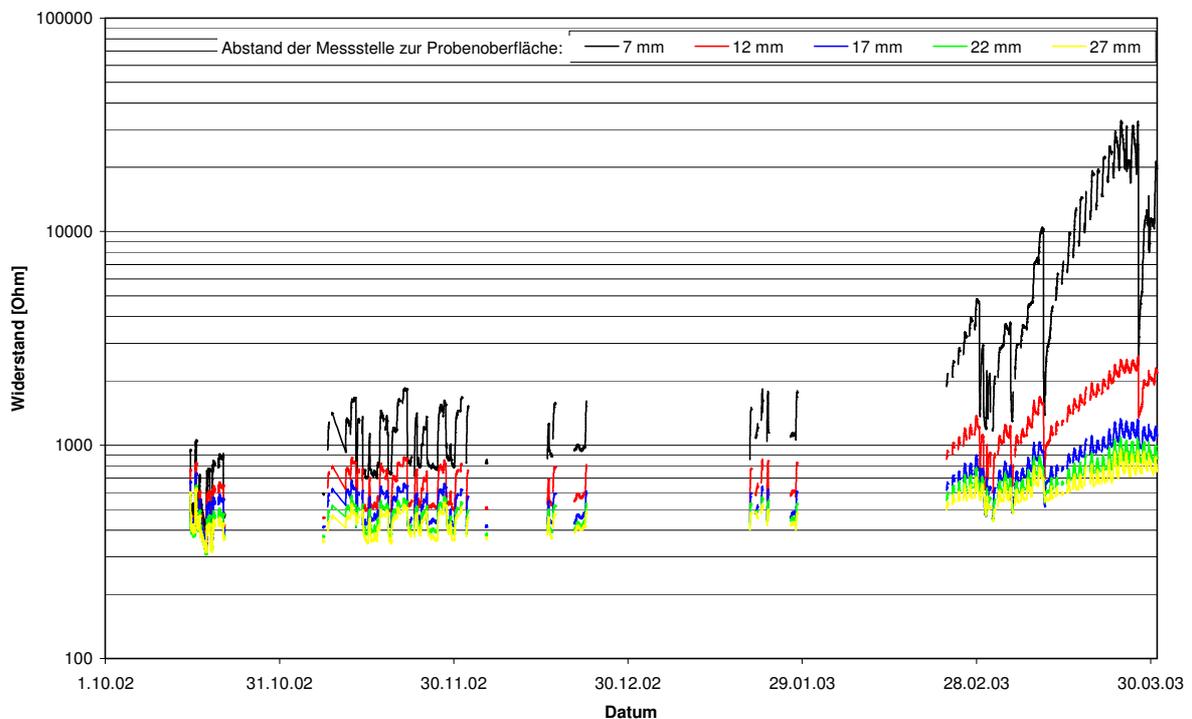


Bild 45: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2002/2003, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 in den angegebenen Tiefen.

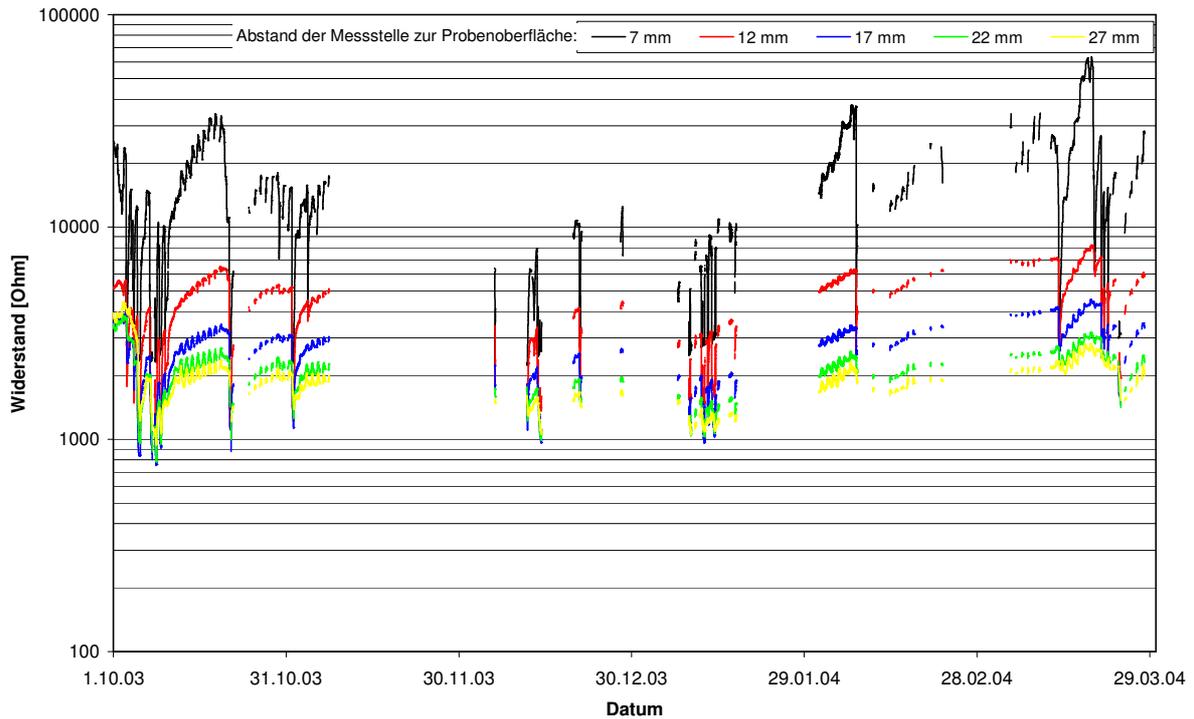


Bild 46: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2003/2004, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF1-3 in den angegebenen Tiefen.

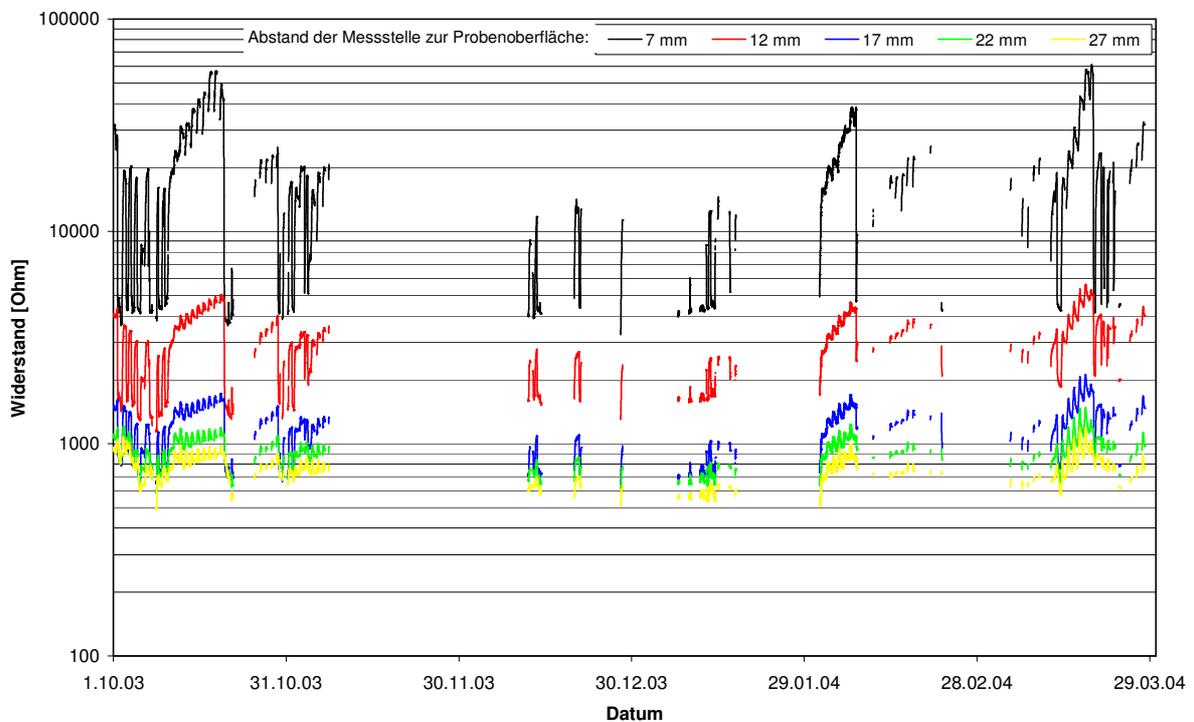


Bild 47: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2003/2004, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 in den angegebenen Tiefen.

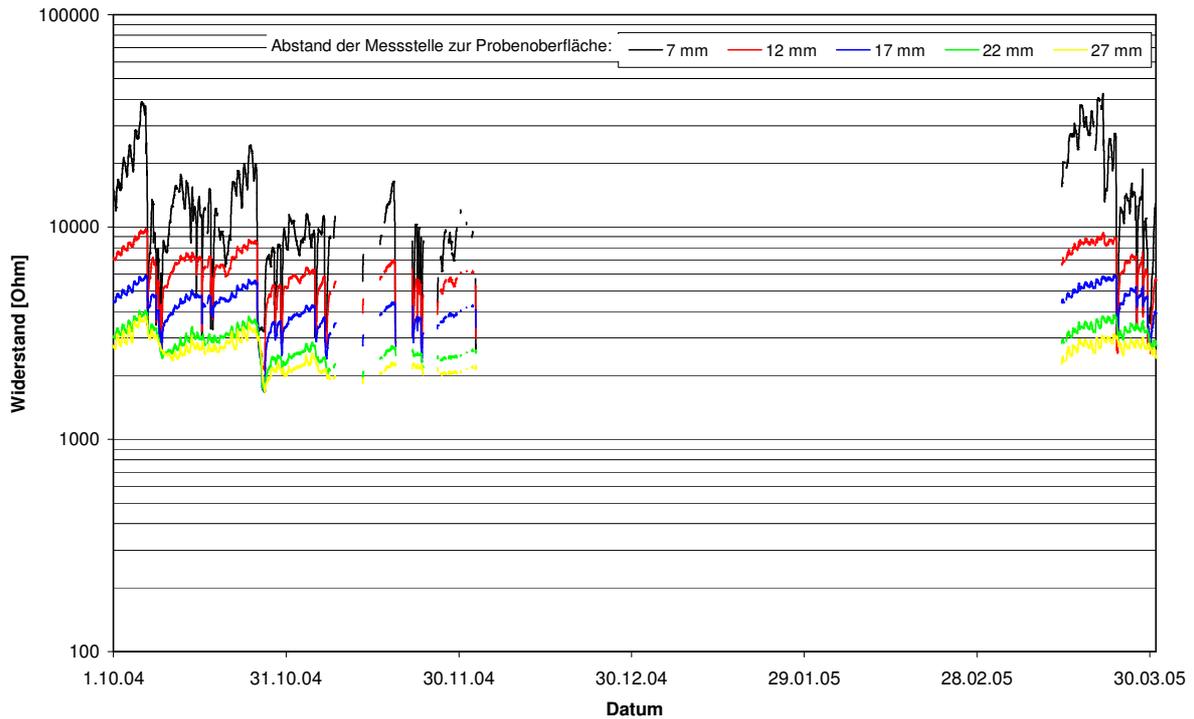


Bild 48: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2004/2005, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF1-3 in den angegebenen Tiefen.

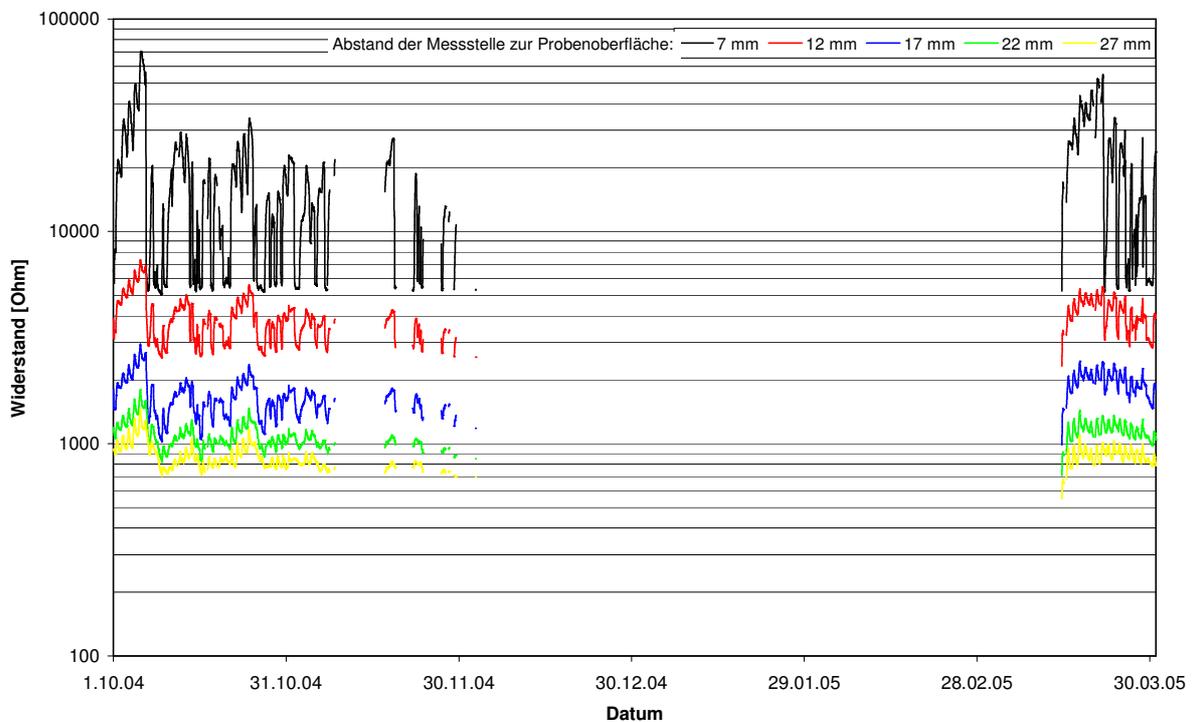


Bild 49: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2004/2005, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 in den angegebenen Tiefen.

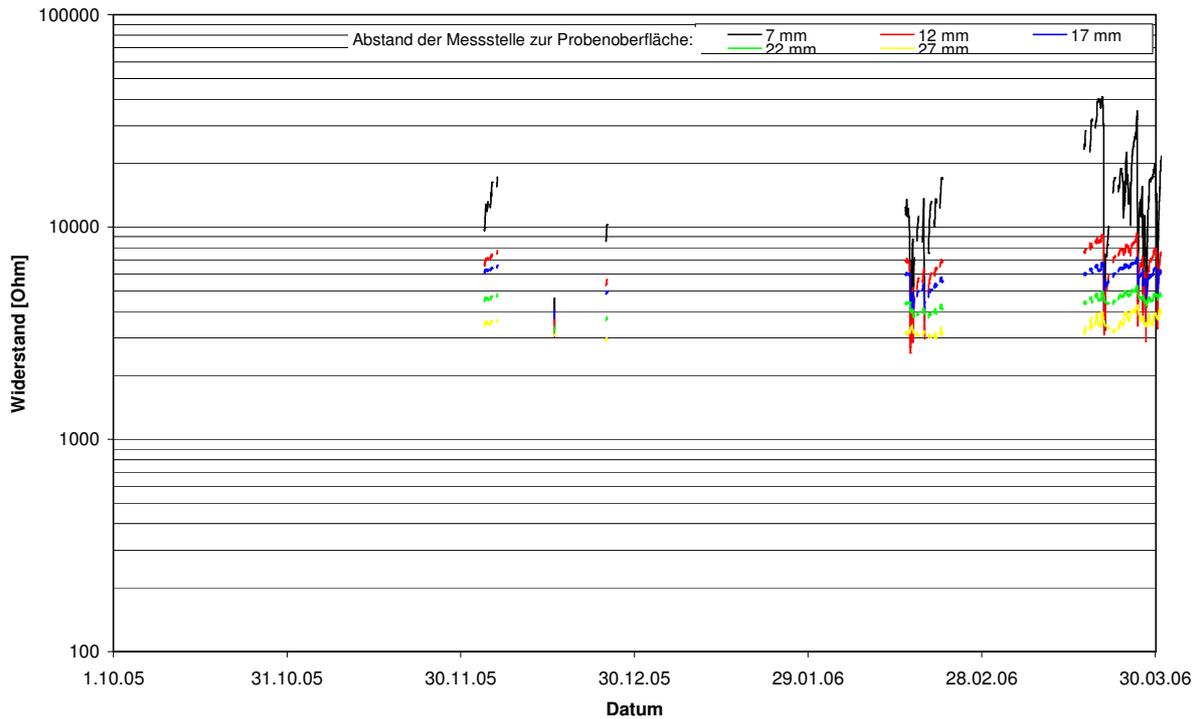


Bild 50: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2005/2006, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF1-3 in den angegebenen Tiefen.

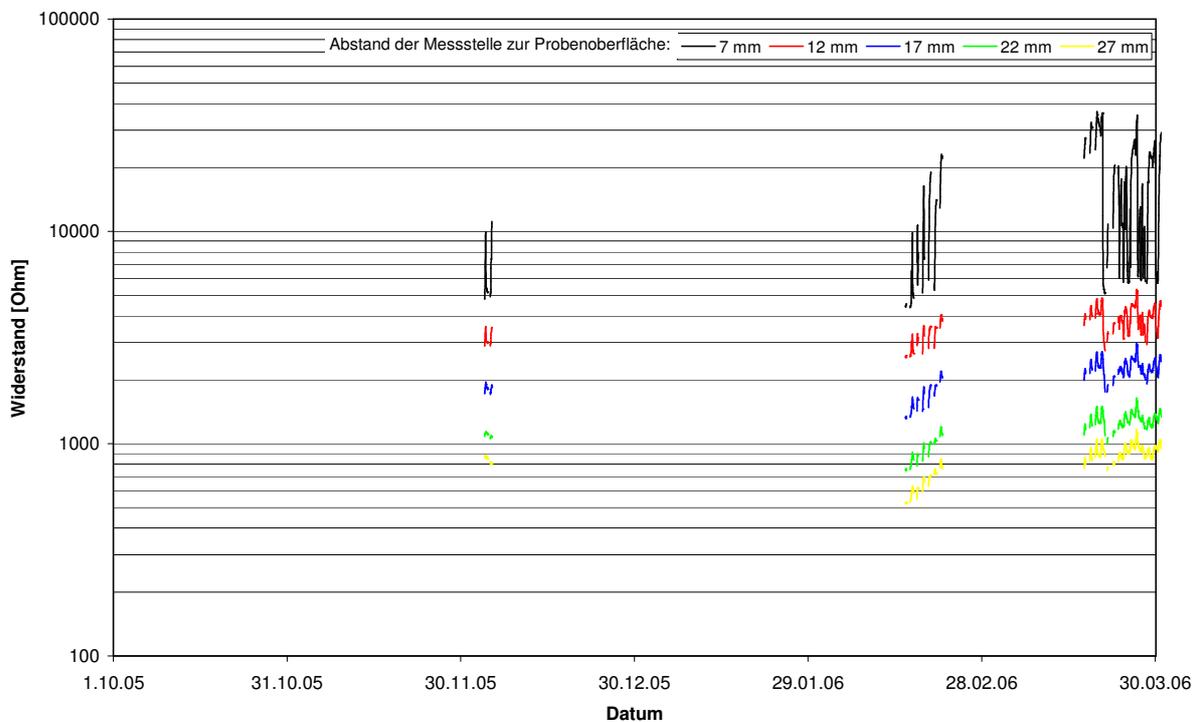
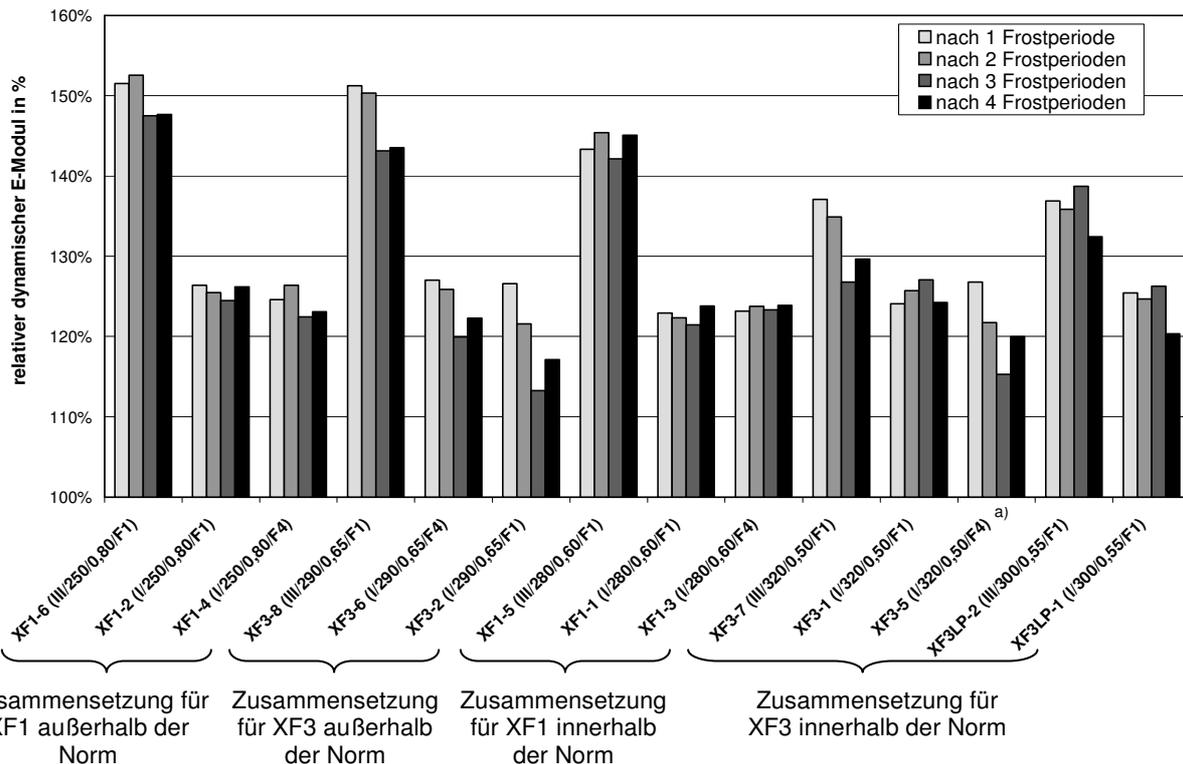


Bild 51: Elektrolytischer Widerstand (Temperatur kompensiert) während der Frostperiode 2005/2006, gemessen in der Auslagerungsprobe der Mischung XF3-2 in den angegebenen Tiefen.



a) Frostwiderstand  $F_4$  der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 52: Zusammenstellung der relativen dynamischen E-Moduln der Auslagerungsproben nach 1, 2, 3 und 4 Frostperioden bezogen auf die Ausgangsmessung im Alter von 28 Tagen.

Tabelle 14: Relative Massenänderung der Auslagerungsproben (Mittelwert aus allen ausgelagerten Proben einer Mischung) bezogen auf die nach der Frostperiode 2002/2003 bestimmte Masse der Prüfkörper.

Prüftermin nach Frostperiode	Relativen Massenänderung in % der Mischung					
	XF1-1	XF1-2	XF1-3	XF1-4	XF1-5	XF1-6
2003/2004	0,33	0,15	0,13	0,00	0,43	0,18
2004/2005	0,22	0,57	0,38	0,10	0,42	0,10
2005/2006	-0,25	-0,05	-0,12	-0,48	0,10	-0,42

Prüftermin nach Frostperiode	Relativen Massenänderung in % der Mischung							
	XF3-1	XF3-2	XF3-5	XF3-6	XF3-7	XF3-8	XF3LP-1	XF3LP-2
2003/2004	-0,10	-0,28	-0,08	-0,27	-0,08	-0,15	-0,20	-0,18
2004/2005	0,13	0,10	0,24	0,05	0,08	0,07	0,18	0,12
2005/2006	-0,30	-0,36	-0,10	-0,23	-0,15	-0,28	-0,52	-0,25

Tabelle 15: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abplatzungen) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abplatzungen - Kennwert F nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF1-1/1	0	0	0	0
XF1-1/2	0	0	0	0
XF1-1/3	0	0	0	0
XF1-1/4	0	0	0	0
XF1-1/5	0	0	0	0
XF1-1/6	0	0	0	0
XF1-1	0,0	0,0	0,0	0,0
XF1-2/1	0	0	0	1
XF1-2/2	0	0	0	0
XF1-2/3	0	0	0	0
XF1-2/4	0	0	0	0
XF1-2/5	0	0	0	1
XF1-2/6	0	0	0	0
XF1-2	0,0	0,0	0,0	0,3
XF1-3/1	0	0	0	0
XF1-3/2	0	0	0	0
XF1-3/3	0	0	0	0
XF1-3/4	0	0	0	0
XF1-3/5	0	0	0	0
XF1-3/6	0	0	1	1
XF1-3	0,0	0,0	0,2	0,2
XF1-4/1	0	0	1	0
XF1-4/2	0	0	0	0
XF1-4/3	0	0	1	1
XF1-4/4	0	0	1	0
XF1-4/5	0	0	1	0
XF1-4/6	0	0	1	0
XF1-4	0,0	0,0	0,8	0,2
XF1-5/1	0	0	0	0
XF1-5/2	0	0	0	0
XF1-5/3	0	0	0	0
XF1-5/4	0	0	0	0
XF1-5/5	0	0	1	0
XF1-5/6	0	0	1	0
XF1-5	0,0	0,0	0,3	0,0
XF1-6/2	0	0	0	0
XF1-6/3	0	0	0	0
XF1-6/4	0	0	0	0
XF1-6/5	0	0	0	0
XF1-6/6	0	0	0	0
XF1-6	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 16: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abplatzungen) der angegebenen XF3-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abplatzungen - Kennwert F nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF3-1/1	0	0	0	0
XF3-1/2	0	0	0	0
XF3-1/3	0	0	1	0
XF3-1/4	0	0	0	0
XF3-1/5	0	0	0	0
XF3-1/6	0	0	0	0
XF3-1	0,0	0,0	0,2	0,0
XF3-2/1	0	0	0	0
XF3-2/2	0	0	0	1
XF3-2/3	0	0	0	0
XF3-2/4	0	0	0	0
XF3-2/5	0	0	0	1
XF3-2	0,0	0,0	0,0	0,4
XF3-5/1	0	0	0	0
XF3-5/2	0	0	0	0
XF3-5/3	0	0	1	0
XF3-5/4	0	0	0	0
XF3-5/5	0	0	0	0
XF3-5	0,0	0,0	0,2	0,0
XF3-6/1	0	0	0	0
XF3-6/2	0	0	0	1
XF3-6/3	0	0	0	1
XF3-6/4	0	0	0	0
XF3-6/5	0	0	0	1
XF3-6/6	0	0	0	0
XF3-6	0,0	0,0	0,0	0,5
XF3-7/1	0	0	0	1
XF3-7/2	0	0	0	1
XF3-7/3	0	0	0	1
XF3-7/4	0	0	0	0
XF3-7/5	0	0	0	1
XF3-7/6	0	0	0	1
XF3-7	0,0	0,0	0,0	0,8
XF3-8/1	0	0	0	1
XF3-8/2	0	0	0	1
XF3-8/3	0	0	0	1
XF3-8/4	0	0	0	1
XF3-8/5	0	0	0	1
XF3-8/6	0	0	0	1
XF3-8	0,0	0,0	0,0	1,0

Tabelle 17: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abplatzungen) der angegebenen XF3-Auslagerungsproben mit LP-Bildner nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abplatzungen - Kennwert F nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF3LP-1/1	0	1	1	1
XF3LP-1/2	0	0	1	1
XF3LP-1/3	1	1	1	1
XF3LP-1/4	0	0	1	0
XF3LP-1/5	0	0	1	0
XF3LP-1/6	0	0	1	0
XF3LP-1	0,2	0,3	1,0	0,5
XF3LP-2/1	0	0	1	0
XF3LP-2/2	0	0	1	0
XF3LP-2/3	0	0	1	1
XF3LP-2/4	0	0	1	1
XF3LP-2/5	0	0	1	1
XF3LP-2/6	0	1	1	0
XF3LP-2	0,0	0,2	1,0	0,5

Tabelle 18: Ergebnisse (Mittel- und ggf. Einzelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (pop-outs) der angegebenen Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006. Es wurden nur die Mischungen bzw. Probekörper angegeben, an denen im Untersuchungszeitraum pop-outs mit einem Kennwert PO  $\geq 1$  festgestellt wurden.

Mischung / Probe Nr.	pop-outs - Kennwert PO nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF1-4/6	0	0	1	0
XF1-4	0,0	0,0	0,2	0,0
XF3-5/5	0	0	1	0
XF3-5	0,0	0,0	0,2	0,0
XF3-6/1	0	0	1	0
XF3-6/2	0	1	1	0
XF3-6/3	0	0	1	1
XF3-6/4	0	0	2	1
XF3-6/5	0	0	0	1
XF3-6/6	0	1	2	1
XF3-6	0,0	0,3	1,2	0,7
XF3-7/6	0	0	1	0
XF3-7	0,0	0,0	0,2	0,0

Tabelle 19: Ergebnisse (Einzel- und Mittelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Risse) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Risse - Kennwert C nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF1-1/1	0	0	0	1
XF1-1/2	0	0	0	1
XF1-1/3	0	1	1	1
XF1-1/4	0	0	1	1
XF1-1/5	0	0	0	2
XF1-1/6	0	0	0	1
XF1-1	0,0	0,2	0,3	1,2
XF1-2/1	0	0	1	1
XF1-2/2	0	0	0	1
XF1-2/3	0	0	0	1
XF1-2/4	0	0	0	1
XF1-2/5	0	0	0	1
XF1-2/6	0	0	0	1
XF1-2	0,0	0,0	0,2	1,0
XF1-3/1	0	0	1	0
XF1-3/2	0	0	1	1
XF1-3/3	0	0	1	1
XF1-3/4	0	0	1	1
XF1-3/5	0	0	0	1
XF1-3/6	0	0	1	1
XF1-3	0,0	0,0	0,8	0,8
XF1-4/1	0	0	1	0
XF1-4/2	0	0	1	1
XF1-4/3	0	0	1	1
XF1-4/4	0	0	1	1
XF1-4/5	0	0	1	1
XF1-4/6	0	0		1
XF1-4	0,0	0,0	1,0	0,8
XF1-5/1	0	0	0	1
XF1-5/2	0	1	1	1
XF1-5/3	0	0	1	1
XF1-5/4	0	0	0	1
XF1-5/5	0	1	1	1
XF1-5/6	0	0	1	1
XF1-5	0,0	0,3	0,7	1,0
XF1-6/2	0	0	1	0
XF1-6/3	0	0	1	1
XF1-6/4	0	0	1	1
XF1-6/5	0	0	1	1
XF1-6/6	0	0	1	0
XF1-6	0,0	0,0	1,0	0,6

Tabelle 20: Ergebnisse (Mittel- und ggf. Einzelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Risse) der angegebenen XF3-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Risse - Kennwert C nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF3-1	0,0	0,0	0,0	0,0
XF3-2/1	0	0	1	0
XF3-2/2	0	1	1	0
XF3-2/3	0	1	1	0
XF3-2/4	0	0	1	0
XF3-2/5	0	0	1	1
XF3-2	0,0	0,4	1,0	0,2
XF3-5/1	0	1	1	1
XF3-5/2	0	1	1	1
XF3-5/3	0	1	1	1
XF3-5/4	0	1	1	1
XF3-5/5	0	1	1	1
XF3-5	0,0	1,0	1,0	1,0
XF3-6/1	0	1	2	2
XF3-6/2	1	2	3	3
XF3-6/3	1	1	1	2
XF3-6/4	1	1	3	1
XF3-6/5	1	1	2	1
XF3-6/6	1	1	2	2
XF3-6	0,8	1,2	2,2	1,8
XF3-7/1	0	0	1	0
XF3-7/2	0	0	1	0
XF3-7/3	0	0	1	0
XF3-7/4	0	1	1	1
XF3-7/5	0	0	1	0
XF3-7/6	0	0	1	0
XF3-7	0,0	0,2	1,0	0,2
XF3-8/1	1	2	3	3
XF3-8/2	0	2	3	1
XF3-8/3	0	2	2	1
XF3-8/4	1	3	4	2
XF3-8/5	1	2	2	2
XF3-8/6	1	3	4	2
XF3-8	0,7	2,3	3,0	1,8
XF3LP-1	0,0	0,0	0,0	0,0
XF3LP-2	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 21: Ergebnisse (Mittel- und ggf. Einzelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abwitterung und Fläche) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	<b>Abwitterung - Kennwert W und Fläche (%)</b> nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF1-1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF1-2/1	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-2/2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (10)
XF1-2/3	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-2/4	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-2/5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (10)
XF1-2/6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (10)
XF1-2	0,0 (0)	0,2 (0)	0,5 (5)	1,0 (10)
XF1-3	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)
XF1-4/1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF1-4/2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF1-4/3	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-4/4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF1-4/5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF1-4/6	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-4	0,0 (0)	0,0 (0)	0,3 (3)	0,3 (3)
XF1-5/1	0 (0)	0 (0)	1 (20)	1 (10)
XF1-5/2	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-5/3	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-5/4	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-5/5	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (20)
XF1-5/6	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF1-5	0,0 (0)	0,5 (0)	1,0 (12)	1,0 (12)
XF1-6/2	2 (10)	2 (10)	2 (30)	3 (50)
XF1-6/3	2 (20)	2 (20)	3 (30)	3 (50)
XF1-6/4	2 (20)	2 (20)	3 (30)	3 (40)
XF1-6/5	1 (10)	2 (10)	2 (20)	3 (40)
XF1-6/6	2 (10)	2 (10)	2 (30)	3 (50)
XF1-6	1,8 (14)	2,0 (14)	2,4 (28)	3,0 (46)

Tabelle 22: Ergebnisse (Mittel- und ggf. Einzelwerte) der visuellen Untersuchung der Prüfflächen (Abwitterung und Fläche) der angegebenen XF3-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	<b>Abwitterung - Kennwert W und Fläche (%)</b> nach der Frostperiode			
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
XF3-1/1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
XF3-1	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,2 (0)
XF3-2/1	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-2/2	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-2/3	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-2/4	0 (0)	1 (0)	1 (20)	1 (20)
XF3-2/5	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-2	0,0 (0)	1,0 (0)	1,0 (12)	1,0 (12)
XF3-5	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)
XF3-6/4	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-6/6	0 (0)	0 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-6	0,0 (0)	0,0 (0)	0,3 (3)	0,3 (3)
XF3-7/1	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-7/2	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-7/3	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-7/4	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-7/5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
XF3-7/6	0 (0)	1 (0)	1 (10)	1 (10)
XF3-7	0,0 (0)	0,8 (0)	0,8 (8)	1,0 (8)
XF3-8/1	1 (0)	2 (10)	2 (20)	2 (30)
XF3-8/2	1 (10)	2 (30)	2 (40)	3 (40)
XF3-8/3	1 (10)	2 (20)	2 (40)	3 (40)
XF3-8/4	1 (10)	2 (20)	2 (30)	3 (40)
XF3-8/5	1 (10)	2 (20)	2 (30)	2 (40)
XF3-8/6	1 (10)	2 (10)	2 (20)	2 (30)
XF3-8	1,0 (8)	2,0 (18)	2,0 (30)	2,5 (37)
XF3LP-1/1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
XF3LP-1/2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
XF3LP-1/3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF3LP-1/4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
XF3LP-1/5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF3LP-1/6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
XF3LP-1	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,5 (0)
XF3LP-2/1	1 (10)	2 (10)	2 (10)	2 (30)
XF3LP-2/2	1 (10)	2 (20)	2 (20)	2 (40)
XF3LP-2/3	0 (0)	1 (10)	1 (10)	2 (40)
XF3LP-2/4	1 (10)	2 (20)	2 (20)	3 (30)
XF3LP-2/5	1 (10)	2 (10)	2 (10)	2 (30)
XF3LP-2/6	0 (0)	2 (10)	2 (10)	2 (30)
XF3LP-2	0,7 (7)	1,8 (13)	1,8 (13)	2,2 (33)

Tabelle 23: Ergebnisse (Mittel- und Einzelwerte) der Berechnung des Abwitterungsgrades ( $W \times$  geschädigte Fläche  $> W-1$ ) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abwitterungsgrad nach der Frostperiode				Bildserie einer Prüf- fläche (Beispiel) siehe
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	
XF1-1/1	0,0	0,0	0,0	0,0	Bild 53, Beilage 48
XF1-1/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-1/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-1/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-1/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-1/6	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-2/1	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-2/2	0,0	0,0	0,0	0,1	
XF1-2/3	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-2/4	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-2/5	0,0	0,0	0,0	0,1	Bild 54, Beilage 48
XF1-2/6	0,0	0,0	0,0	0,1	
XF1-2	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-3/1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-3/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-3/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-3/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-3/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-3/6	0,0	0,0	0,0	0,0	Bild 55, Beilage 49
XF1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-4/1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-4/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-4/3	0,0	0,0	0,1	0,1	Bild 56, Beilage 49
XF1-4/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-4/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-4/6	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF1-5/1	0,0	0,0	0,2	0,1	Bild 57, Beilage 50
XF1-5/2	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-5/3	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-5/4	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-5/5	0,0	0,0	0,1	0,2	
XF1-5/6	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-5	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF1-6/2	0,2	0,2	0,6	1,5	
XF1-6/3	0,4	0,4	0,9	1,5	
XF1-6/4	0,4	0,4	0,9	1,2	
XF1-6/5	0,1	0,2	0,4	1,2	
XF1-6/6	0,2	0,2	0,6	1,5	Bild 58, Beilage 50
XF1-6	0,3	0,3	0,7	1,4	

Tabelle 24: Ergebnisse (Mittel- und Einzelwerte) der Berechnung des Abwitterungsgrades ( $W \times$  geschädigte Fläche  $> W-1$ ) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abwitterungsgrad nach der Frostperiode				Bildserie einer Prüf- fläche (Beispiel) siehe
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	
XF3-1/1	0,0	0,0	0,0	0,0	Bild 59, Beilage 51
XF3-1/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-1/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-1/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-1/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-1/6	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-2/1	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-2/2	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-2/3	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-2/4	0,0	0,0	0,2	0,2	Bild 60, Beilage 51
XF3-2/5	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-2	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-5/1	0,0	0,0	0,0	0,0	Bild 61, Beilage 52
XF3-5/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-5/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-5/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-5/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-6/1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-6/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-6/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-6/4	0,0	0,0	0,1	0,1	Bild 62, Beilage 52
XF3-6/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-6/6	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-6	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-7/1	0,0	0,0	0,1	0,1	Bild 63, Beilage 53
XF3-7/2	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-7/3	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-7/4	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-7/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3-7/6	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-7	0,0	0,0	0,1	0,1	
XF3-8/1	0,0	0,2	0,4	0,6	
XF3-8/2	0,1	0,6	0,8	1,2	
XF3-8/3	0,1	0,4	0,8	1,2	Bild 64, Beilage 53
XF3-8/4	0,1	0,4	0,6	1,2	
XF3-8/5	0,1	0,4	0,6	0,8	
XF3-8/6	0,1	20	0,4	0,6	
XF3-8	0,1	0,4	0,6	0,9	

Tabelle 25: Ergebnisse (Mittel- und Einzelwerte) der Berechnung des Abwitterungsgrades ( $W \times$  geschädigte Fläche  $>$  W-1) der angegebenen XF1-Auslagerungsproben nach den Frostperioden 2002/2003 bis 2005/2006.

Mischung / Probe Nr.	Abwitterungsgrad nach der Frostperiode				Bildserie einer Prüf- fläche (Beispiel) siehe Bild 65, Beilage 54
	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006	
XF3LP-1/1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1/2	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1/3	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1/4	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1/5	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1/6	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-1	0,0	0,0	0,0	0,0	
XF3LP-2/1	0,1	0,2	0,2	0,6	
XF3LP-2/2	0,1	0,4	0,4	0,8	Bild 66, Beilage 54
XF3LP-2/3	0,0	0,1	0,1	0,8	
XF3LP-2/4	0,1	0,4	0,4	0,9	
XF3LP-2/5	0,1	0,2	0,2	0,6	
XF3LP-2/6	0,0	0,2	0,2	0,6	
XF3LP-2	0,1	0,3	0,3	0,7	

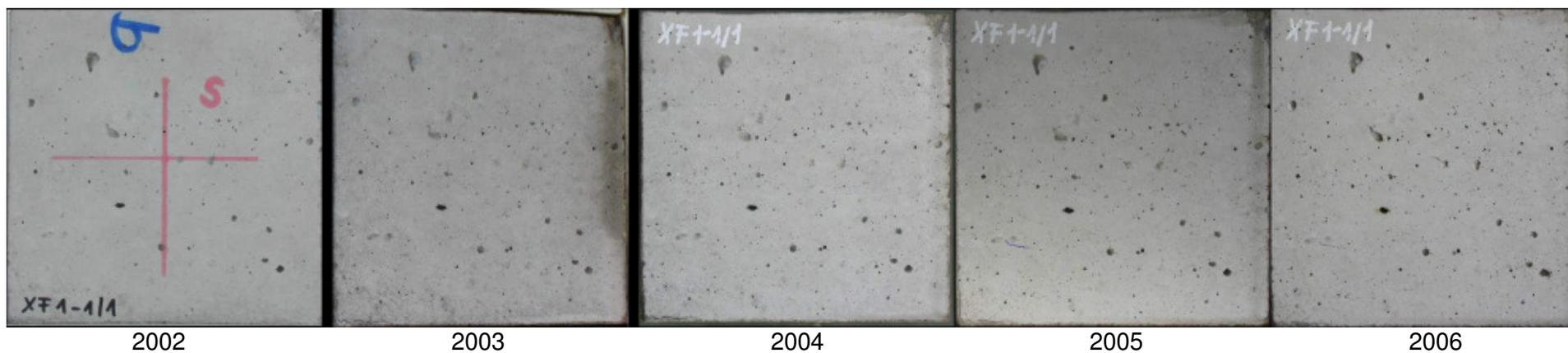


Bild 53: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-1/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 54: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-2/5 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 55: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-3/6 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 56: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-4/3 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 57: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-5/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 58: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF1-6/6 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.

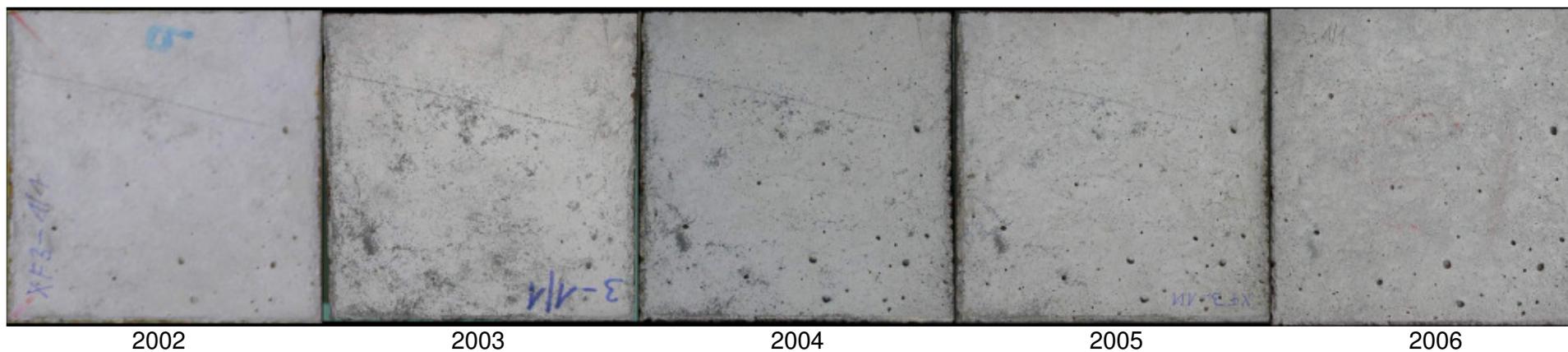


Bild 59: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3-1/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 60: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3-2/4 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 61: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3-5/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 62: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3-6/4 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.

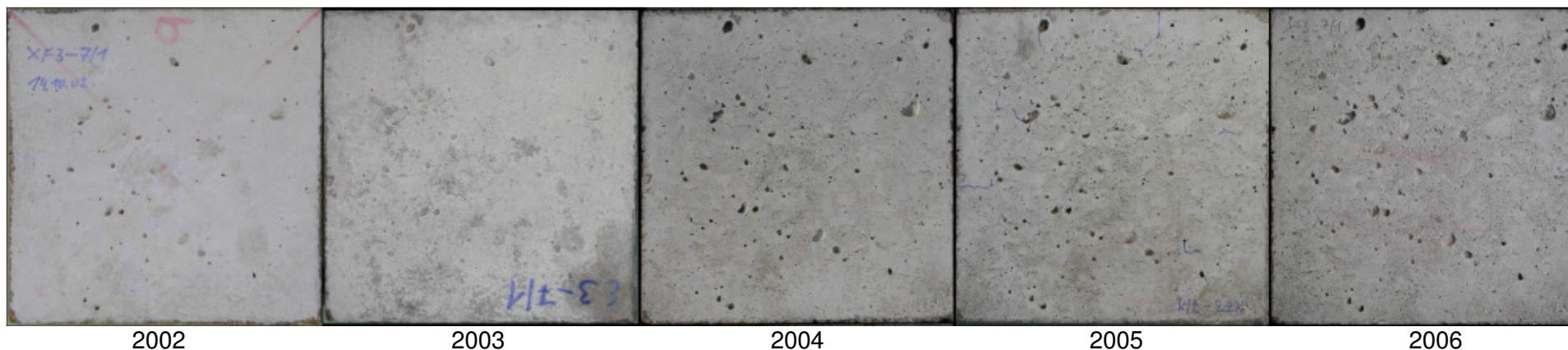


Bild 63: Bildserie der Prüflfläche des Probekörpers XF3-7/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.

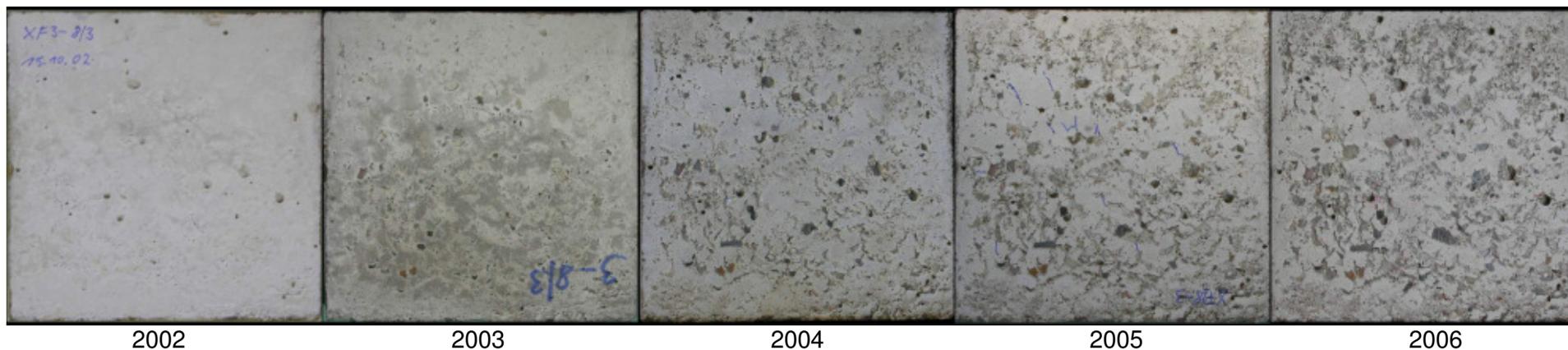


Bild 64: Bildserie der Prüflfläche des Probekörpers XF3-8/3 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.



Bild 65: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3LP-1/1 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.

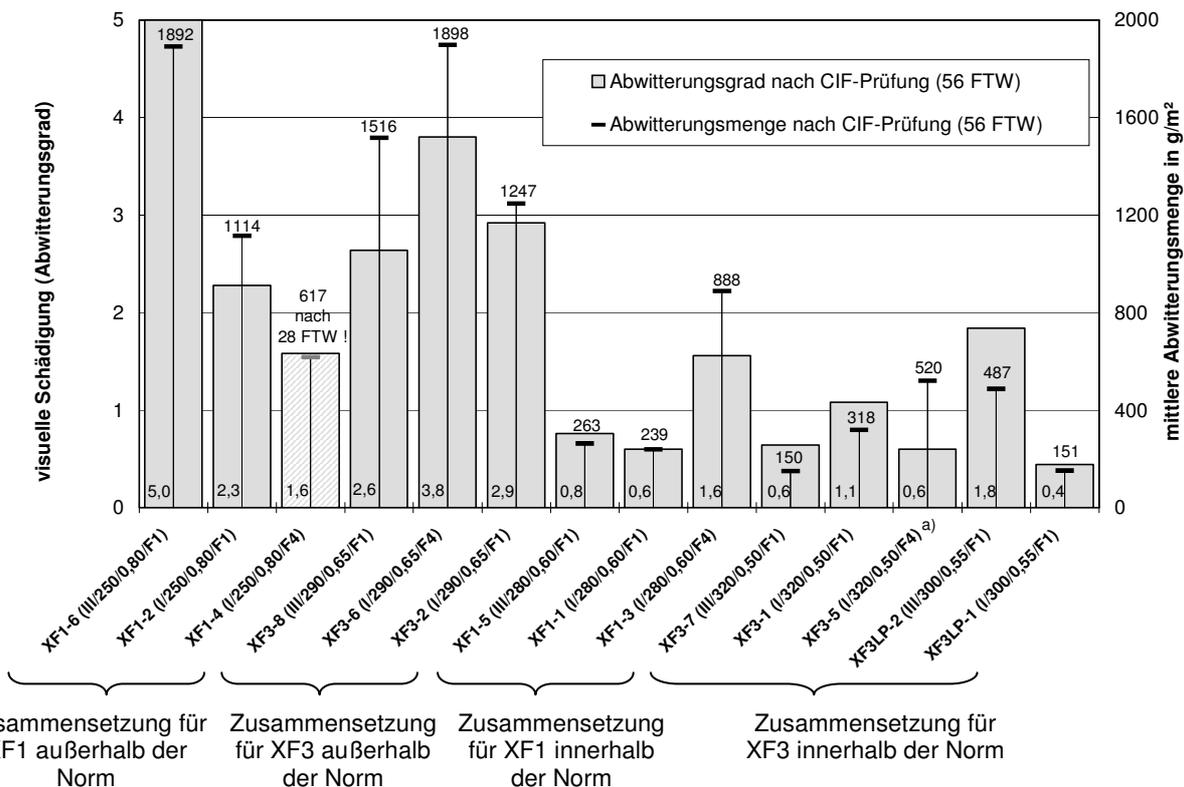


Bild 66: Bildserie der Prüffläche des Probekörpers XF3LP-2/2 nach der Herstellung (2002) und im Frühjahr der Jahre 2003 bis 2006.

Tabelle 26: Auszug aus den Klimadaten vom Institut für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim, Station Hohenheim (407 m NN), Messung 2 m über dem Boden.

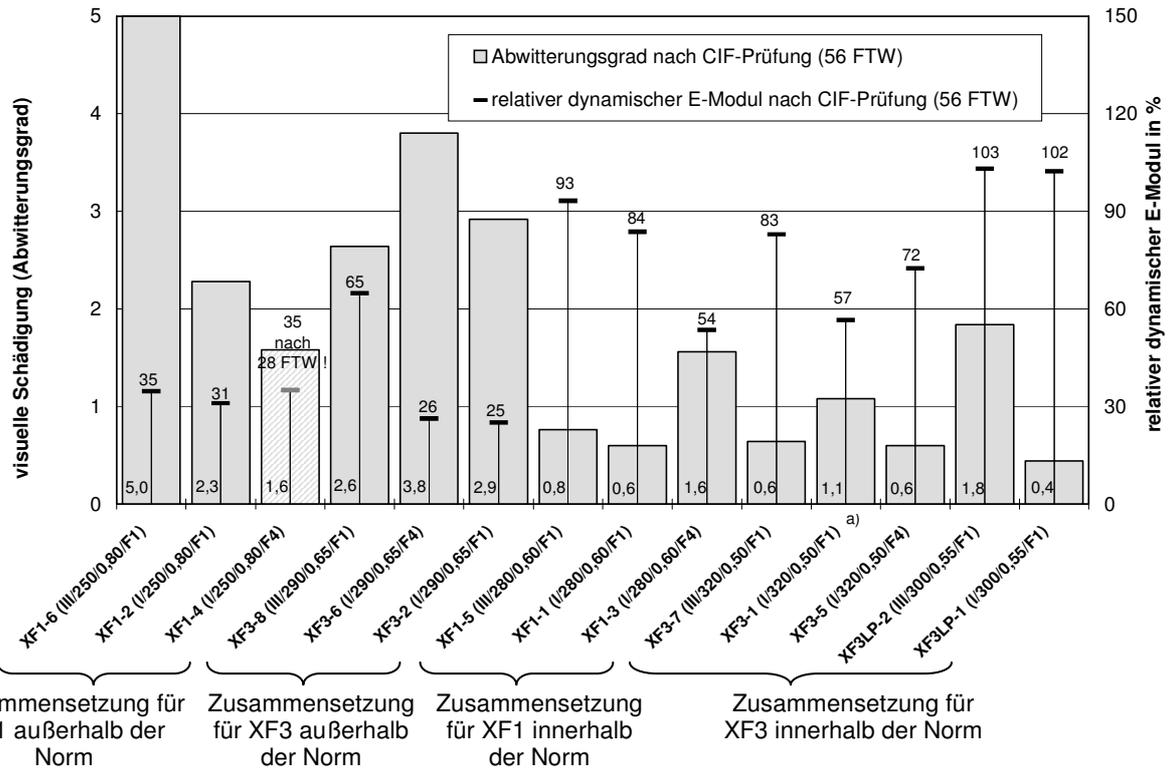
Jahr	Anzahl Frosttage <sup>1)</sup>	Anzahl Eistage <sup>2)</sup>	absolute Tiefsttemperatur
1996	111	41	- 16,8 °C
1997	70	17	- 13,9 °C
1998	75	21	- 10,9 °C
1999	67	17	- 11,9 °C
2000	48	6	- 14,6 °C
2001	71	7	- 17,6 °C

<sup>1)</sup> Frosttag: Die tiefste Temperatur des Tages in 2 m Höhe liegt unter dem Gefrierpunkt (0°C), die höchste Temperatur aber über 0°C.  
<sup>2)</sup> Eistag: Die höchste Temperatur des Tages in 2 m Höhe liegt unter dem Gefrierpunkt (0°C), d.h. es herrscht durchgehender Frost.



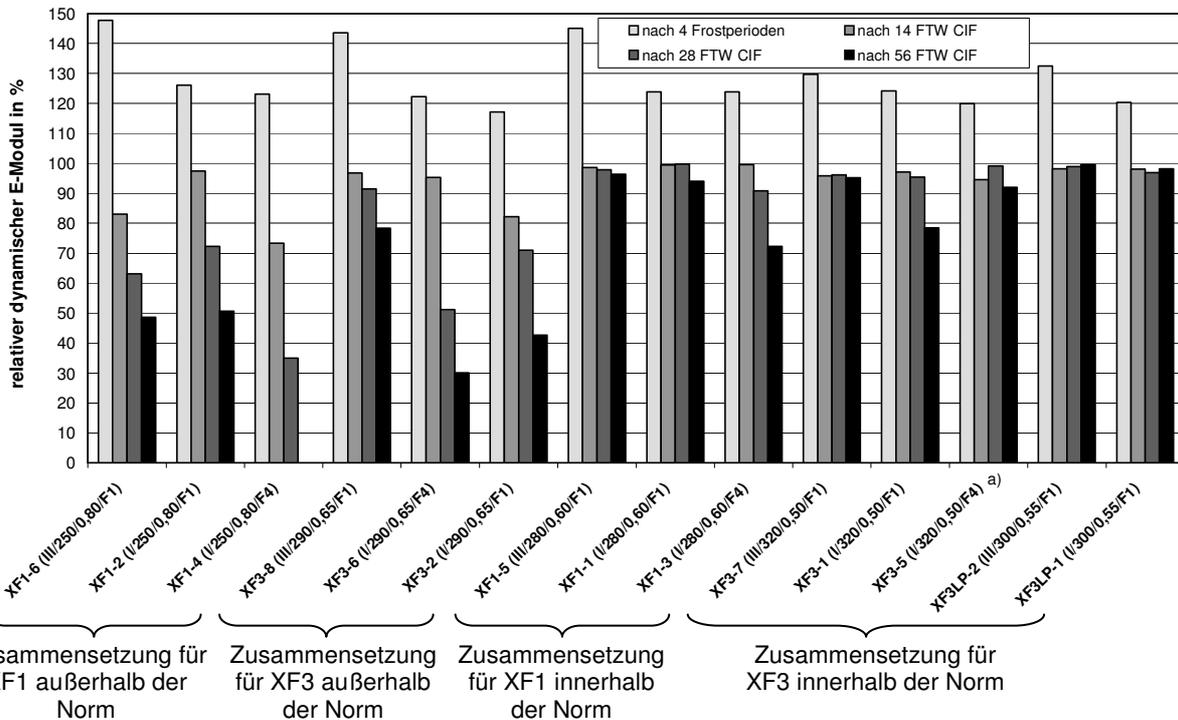
a) Frostwiderstand F<sub>4</sub> der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 67: Gegenüberstellung der visuellen Schädigung ausgedrückt über den Abwitterungsgrad und der mittleren Abwitterungsmenge nach 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4].



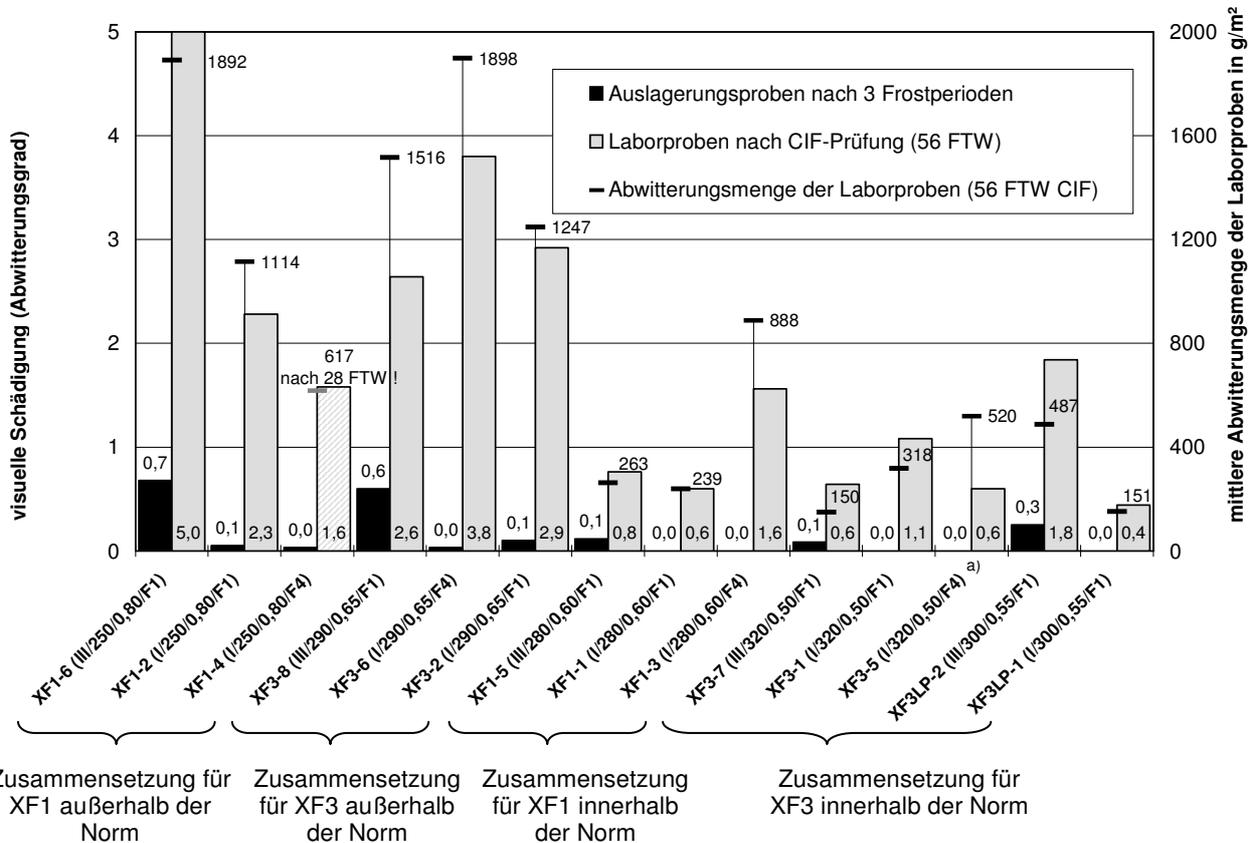
a) Frostwiderstand F<sub>4</sub> der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 68: Gegenüberstellung der visuellen Schädigung ausgedrückt über den Abwitterungsgrad und dem relativen dynamischen E-Modul nach 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4].



a) Frostwiderstand F<sub>4</sub> der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 69: Gegenüberstellung der relativen dynamischen E-Moduln der Auslagerungsproben nach 4 Frostperioden und dem relativen dynamischen E-Modul nach 14, 28 und 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4].



Zusammensetzung für XF1 außerhalb der Norm      Zusammensetzung für XF3 außerhalb der Norm      Zusammensetzung für XF1 innerhalb der Norm      Zusammensetzung für XF3 innerhalb der Norm

a) Frostwiderstand F<sub>4</sub> der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 70: Gegenüberstellung der visuellen Schädigung der Auslagerungsproben nach 3 Frostperioden sowie der Laborproben (ausgedrückt über den Abwitterungsgrad) und der Abwitterungsmenge der Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4].

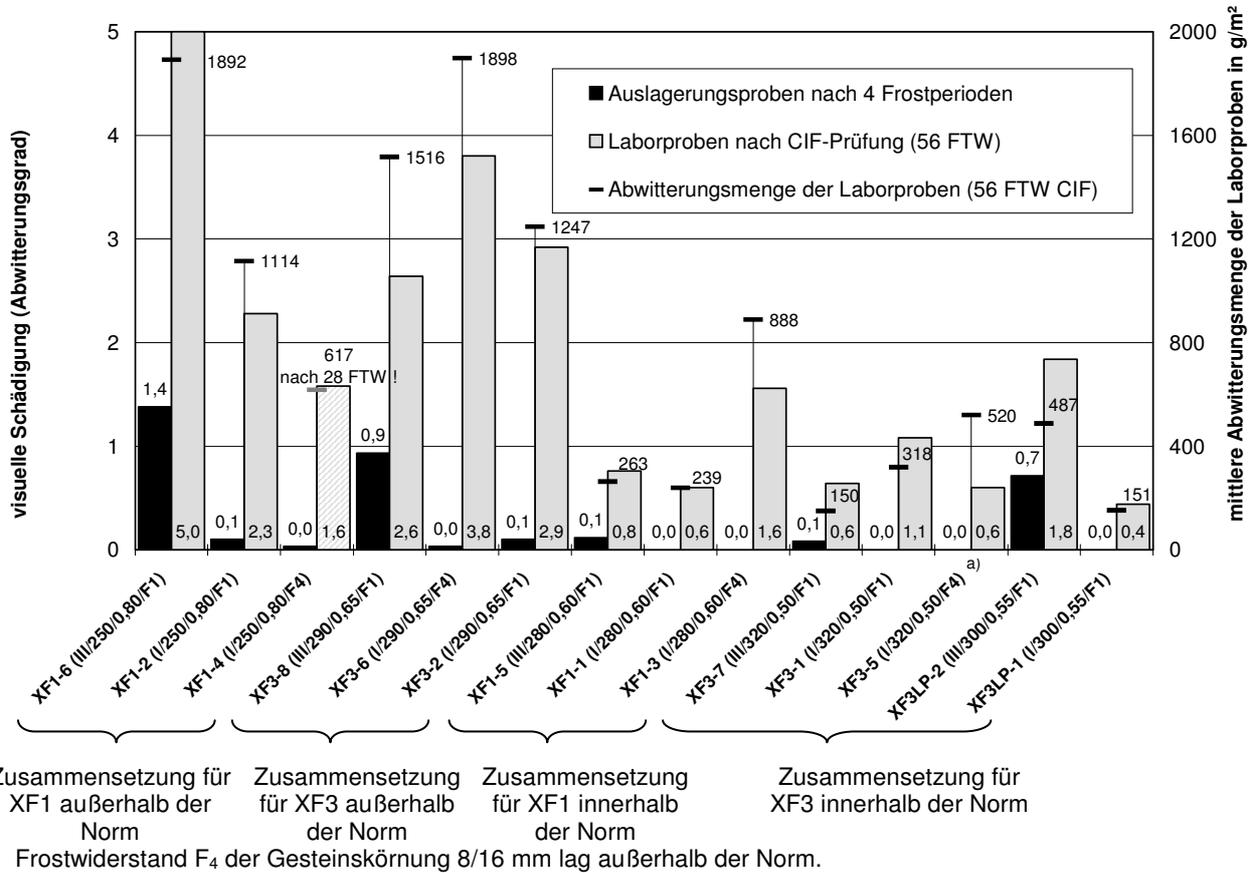
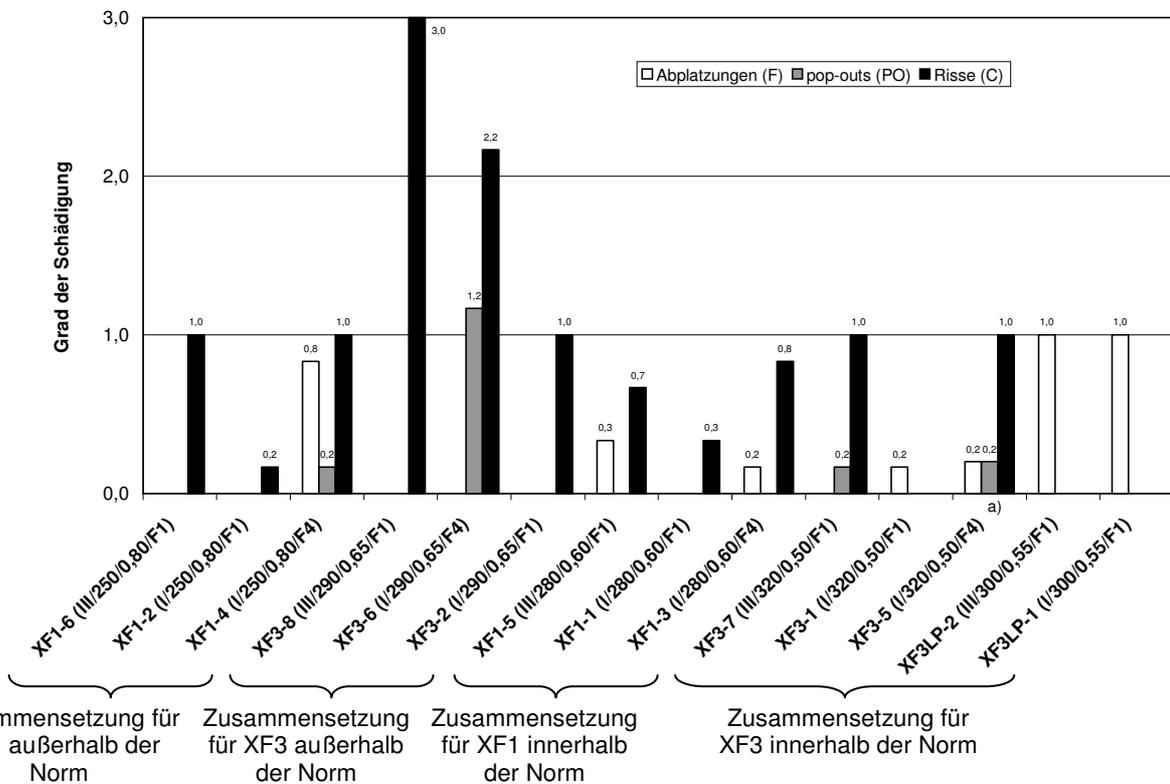
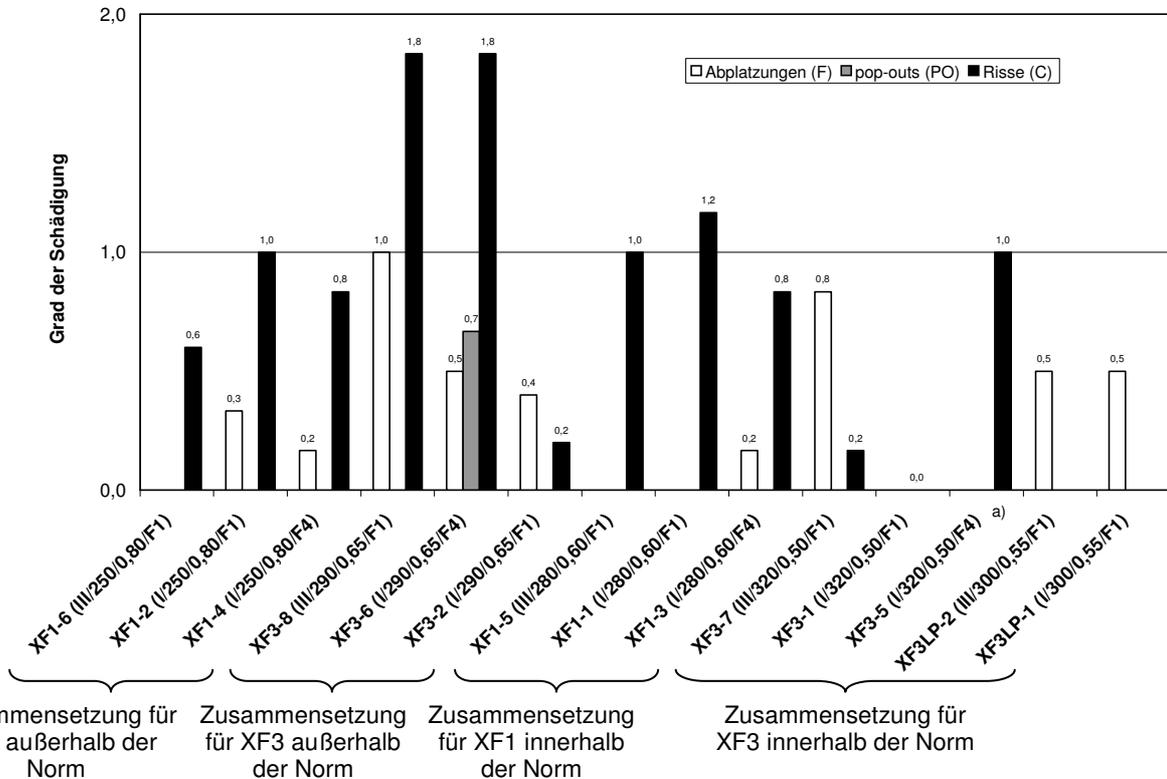


Bild 71: Gegenüberstellung der visuellen Schädigung der Auslagerungsproben nach 4 Frostperioden sowie der Laborproben (ausgedrückt über den Abwitterungsgrad) und der Abwitterungsmenge der Laborproben nach 56 Frost-Tau-Wechsel gemäß der CIF-Prüfvorschrift [4].



a) Frostwiderstand F<sub>4</sub> der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 72: Mittelwerte der Schädigungsgrade (Abplatzungen (F), pop-outs (PO) und Risse (C)) bei der visuellen Beurteilung der Auslagerungsproben der angegebenen Mischungen nach der 3 Frostperioden.



a) Frostwiderstand  $F_4$  der Gesteinskörnung 8/16 mm lag außerhalb der Norm.

Bild 73: Mittelwerte der Schädigungsgrade (Abplatzungen (F), pop-outs (PO) und Risse (C)) bei der visuellen Beurteilung der Auslagerungsproben der angegebenen Mischungen nach der 4 Frostperioden.

**Inhaltsverzeichnis:**

1.	Vorbemerkungen, Auftrag.....	2
2.	Allgemeine Angaben zu den untersuchten Betonen.....	3
3.	Ausgangsstoffe, Zusammensetzung und Kennwerte der untersuchten Betonen .....	4
4.	Angaben zur Auslagerung der Betonproben .....	7
5.	Angewendete Prüf- und Untersuchungsverfahren zur Erfassung und Beschreibung des Frostwiderstandes .....	9
5.1.	Frostprüfung nach dem CIF-Prüfverfahren .....	9
5.2.	Messung des dynamischen E-Moduls der Auslagerungsproben .....	9
5.3.	Temperaturmessung - Klimadaten.....	10
5.4.	Messung des elektrolytischen Widerstandes im Beton .....	11
5.5.	Visuelle Beurteilung der äußeren Schädigung von Betonproben .....	13
6.	Ergebnisse der Frostprüfungen und Untersuchungen.....	19
6.1.	Ergebnisse der Laborproben.....	19
6.1.1.	Ergebnisse der CIF-Prüfung (Laborproben).....	19
6.1.2.	Ergebnisse der Temperaturmessungen (Laborproben).....	19
6.1.3.	Ergebnisse der Messung des elektrolytischen Widerstandes (Laborproben) .....	19
6.1.4.	Ergebnisse der visuellen äußeren Schädigung (Laborproben).....	20
6.2.	Ergebnisse der Auslagerungsproben.....	20
6.2.1.	Ergebnisse der Temperaturmessungen (Auslagerungsproben).....	20
6.2.2.	Ergebnisse der Messung des elektrolytischen Widerstandes (Auslagerungsproben) .....	21
6.2.3.	Ergebnisse der Messung des dynamischen E-Moduls (Auslagerungsproben) .....	21
6.2.4.	Ergebnisse der visuellen äußeren Schädigung (Auslagerungsproben).....	21
7.	Diskussion der Ergebnisse der Frostprüfungen und Untersuchungen .....	22
7.1.	Temperatur in den Betonproben .....	22
7.2.	Elektrolytischer Widerstand (Multi-Ring-Elektrode) .....	23
7.3.	Laborproben: Vergleich der Ergebnisse der CIF-Prüfung mit der visuellen Beurteilung (Abwitterungsgrad) .....	23
7.4.	Vergleich der Ergebnisse des relativen dynamischen E-Moduls der Laborproben (CIF-Prüfung) mit den Auslagerungsproben .....	23
7.5.	Vergleich der visuellen Beurteilung der Auslagerungsproben mit der Abwitterungsmenge der Laborproben (CIF-Prüfung) .....	24
8.	Zusammenfassung .....	25
Beilagen	.....	1 - 60