



concrete concepts | Fraunhoferstr. 30 b | 80469 München

Ingenieurgesellschaft mbH  
Brandes | Lay | Rucker  
Fraunhoferstr. 30 b  
D-80469 München

fon +49.(0)89.20208175  
fax +49.(0)89.20208176

info@concrete-concepts.eu  
www.concrete-concepts.eu

München, 27.09.2007

## **Widerstand von Straßenbeton bei früher Frost-Tausalz-Beanspruchung**

Dipl.-Ing. Chr. Brandes, Dipl.-Ing. Doris Strehlein, Dipl.-Ing. Anne Schnittger,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl

veröffentlicht zur Betonstraßentagung 2007 in Erfurt

Geschäftsführer:  
Dipl.-Ing. Christian Brandes  
Dr.-Ing. Sascha Lay  
Dipl.-Ing. Petra Rucker

Bank:  
Dresdner Bank, München  
BLZ 700 800 00  
Konto 390 141 500

Sitz:  
Amtsgericht München  
HRB 161046  
Steuern.: 143/126/10109

# Widerstand von Straßenbeton bei früher Frost-Tausalz-Beanspruchung

Dipl.-Ing. Chr. Brandes, Dipl.-Ing. Doris Strehlein, Dipl.-Ing. Anne Schnittger,  
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl,

*Im Rahmen eines Forschungsvorhabens<sup>1</sup>, das am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung an der TU München bearbeitet wurde, wurde die Fragestellung, inwieweit sich bei der Verwendung synthetischer Luftporenbildner das Luftporengefüge im Festbeton und im Speziellen der Frost-Tausalz-Widerstand verändert, untersucht [1]. Des Weiteren wurde untersucht, ab wann ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht wird, damit auch bei einer frühen Verkehrsfreigabe bei niedrigen Temperaturen im Herbst bzw. Winter Schäden infolge der frühen Belastung vermieden werden. Es zeigte sich, dass Betone, die entsprechend den Regeln der ZTV Beton Stb 01 hergestellt werden, unabhängig des verwendeten Luftporenbildners dauerhaft einer Frost-Tausalz-Beanspruchung standhalten. Des Weiteren konnte auch für den Fall einer frühen Verkehrsbeanspruchung nachgewiesen werden, dass bei Einhaltung der bestehenden Regelungen auch in jungem Alter ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand der untersuchten Betone vorlag.*

## 1 Einleitung

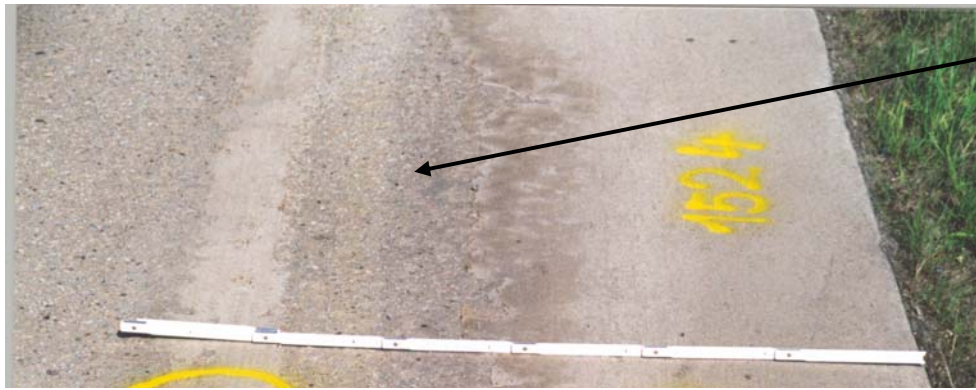
Betonfahrbahndecken zeichnen sich auch bei einer hohen Verkehrsbelastung in der Regel durch eine sehr große Dauerhaftigkeit aus und werden daher vermehrt beim Bau von Autobahnen und sonstigen hoch belasteten Verkehrsflächen wie beispielsweise Flughafenbetriebsflächen verwendet. Beanspruchungen durch rollenden Verkehr bzw. durch Witterung und dem damit verbundenen Frost-Tausalz-Angriff dürfen die Gebrauchstauglichkeit während der Nutzung nicht beeinträchtigen.

Um Grundlagen zur Herstellung dauerhafter Oberflächentexturen zu schaffen, wurden in der Vergangenheit Erkenntnisse über eine optimale Betonzusammensetzung und die Gestaltung der Oberfläche gewonnen. Betone mit einer dauerhaften Oberflächentextur können durch eine ausreichende Frischbetonstabilität und damit verbundene Oberflächenmörtelfestigkeit zielsicher hergestellt werden. Allerdings fehlten Erkenntnisse bezüglich des Frost-Tausalz-Widerstandes vor allem bei der Verwendung synthetischer Luftporenbildner. Hier wurde eine feinere Mikroluftporenstruktur, gekennzeichnet durch einen geringeren Abstandsfaktor bei gleichem Mikroluftporengehalt, im Beton erwartet.

In den vergangenen Jahren wurden vor allem bei Autobahnabschnitten, die im Spätherbst betoniert und relativ kurzfristig für den Verkehr freigegeben wurden, immer wieder Abplatzungen des Oberflächenmörtels festgestellt. In Bild 1 ist beispielhaft eine derartige Oberflächenschädigung, wie sie nach einem Jahr festgestellt wurde, dargestellt.

---

<sup>1</sup> Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 08.179/2004/LGB „Luftporenkennwerte in Abhängigkeit der Art und Dosierung des LP-Bildners und Zusammenhang mit dem Frost-Tausalz-Widerstand ‚texturierter‘ Betonstraßendecken“ durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine beim Autor.



geschädigte  
Oberfläche

Bild 1: Beispiel eines Oberflächenschadens nach einem Winter

Gut zu erkennen sind die oberflächigen Abwitterungen, teilweise wurde der gesamte Oberflächemörtel bis auf die tiefer liegenden Schichten mit Grobzuschlag abgetragen. Innere Schädigungen in Form von Mikrorissen konnten dagegen nur im oberflächennahen Bereich gefunden werden. Der hier dargestellte Streckenabschnitt wurde im Herbst hergestellt. Untersuchungen im Rahmen der Eigenüberwachung gaben keinen Hinweis auf eine ungenügende Betonqualität zum Zeitpunkt des Einbaus.

Ausgehend von derartigen Schadensbildern wurde der Frost-Tausalz-Widerstand in jungem Alter untersucht. Dieser muss auch bei einer frühen Verkehrsfreigabe, wie sie zum Beispiel am Ende von Baulosen oder im Bereich von Baustellenumleitungen bzw. Überleitungen auf andere schon freigegebene Bereiche stattfindet, gewährleistet sein. Derzeit ist in den ZTV-Beton StB 01 [2] die Verkehrsfreigabe von Betonstraßen der Bauklassen SV, I bis III ab dem Erreichen von 60 % der Nennfestigkeit vorgesehen. Der Bezug zum Frost-Tausalz-Widerstand selbst oder zum erforderlichen Austrocknungs- bzw. Reifegrad der frostbeanspruchten Zone bei Verkehrsfreigabe fehlt. Systematische Untersuchungen zum Einfluss des Feuchtegehaltes und der Reife unter Berücksichtigung einer Mikroporenverteilung, wie sie mit den neuen Luftporenbildnern möglich ist, sollten eine zielsichere Einschätzung des zu erwartenden Frost-Tausalz-Widerstandes bei einer Verkehrsfreigabe auch in jungem Alter ermöglichen.

## 2 Durchgeführte Untersuchungen

### 2.1 Verwendete Betone

Als Betone wurden praxisübliche Straßenbetone verwendet. Diese entsprachen alle der ZTV Beton Stb 01:

#### *Herkömmliche Straßenbetone*

Als Referenzmischung (Beton A) wurde ein Beton mit einem Straßenzement CEM I 32,5 R, einem Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$  und einem Wasserzementwert von 0,45 gewählt. Als Zuschläge wurden quarzitischer Sand 0/4 sowie Granit 2/8 bzw. 8/16 verwendet. Einzelne Betone wurden zusätzlich mit einem Zement CEM II B-S 32,5 R, der aus dem gleichen Werk wie der Portlandzement stammte, hergestellt (Beton B). Diese beiden Betone sind als typisch für den einschichtigen Bau von Betonfahrbahnen anzusehen.

#### *Hochfester Straßenbeton*

Darüber hinaus wurde ein hochfester Beton hergestellt (Beton C). Dieser wurde mit dem gleichen Portlandzement, wie er auch in der Referenzmischung verwendet wurde, hergestellt. Um eine hohe Festigkeit zu erreichen, wurde ein Wasserzementwert von 0,35 gewählt und es wurden 4 M.-% Silikastaub bezogen auf den Zement zugegeben. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit wurde ein Zementgehalt von  $500 \text{ kg/m}^3$

verwendet. Ein derartiger Beton kann als typisch für den Einsatz im zweischichtigen Aufbau angesehen werden.

#### *Winterrezeptur*

Zusätzlich wurde in das Forschungsprogramm eine Winterrezeptur aufgenommen (Beton W). Diese unterschied sich zur Referenzrezeptur nur in der Verwendung eines Portlandzements der Festigkeitsklasse 42,5 R.

#### *Luftporenbildner*

Insgesamt wurden 7 unterschiedliche Luftporenbildner untersucht. Diese unterschieden sich in der Art des Wirkstoffes, bzw. bei gleichem Wirkstoff durch das Herstellwerk. Es wurden zwei herkömmliche Wurzelharze (W), zwei modifizierte Wurzelharze (mW), zwei synthetische Tenside (sT) und ein Gemisch eines modifizierten Wurzelharzes mit einem synthetischen Tensid verwendet. In Vorversuchen wurde für die unterschiedlichen Beton/Luftporenmittel-Kombinationen der erforderliche Zusatzmittelgehalt ermittelt, mit dem ein Luftporengehalt im Frischbeton von 4,5 bzw.  $3,0 \pm 0,5$  Vol.-% eingestellt werden kann. Hierbei ergaben sich bei allen Betonen Zusatzmittelgehalte im Rahmen der empfohlenen Dosierung.

## **2.2 Ermittelte Kennwerte**

Aus den Betonen wurden Probekörper zur Ermittlung der jeweiligen Kennwerte hergestellt. Eine genaue Darstellung der jeweils durchgeführten und hier vorgestellten Untersuchungen ist in der Diskussion der Ergebnisse enthalten. Folgende Kenngrößen wurden an den Betonen ermittelt:

- zeitliche Entwicklung des Luftporengehalts, der Konsistenz und der Temperatur am Frischbeton
- Luftporenkennwerte am Festbeton entsprechend dem Merkblatt „Luftporenbeton“ [3]
- zeitliche Entwicklung der Druck- und der Biegezugfestigkeit nach DIN 12390
- Frost-Tausalz-Widerstand nach dem Merkblatt „Frostprüfung“ [4]
- Elektrolytwiderstand mittels Multiringelektrodenmessung
- Hydratationsgrad in unterschiedlichen Tiefenstufen an gesondert hergestellten Mörtelproben
- Oberflächentextur mittels Sandflächenverfahren, SRT-Pendel und einem laseroptischen Verfahren [5]
- Frost-Tausalz-Widerstand an jungem Beton nach einem modifiziertem CDF-Verfahren (geringere Höchsttemperatur, kein kapillares Saugen); vgl. Abschnitt 3.2.1

## **3 Ergebnisse und Diskussion**

### **3.1 Einfluss des verwendeten Luftporenbildners**

An Probekörpern der unterschiedlichen Beton/Luftporenbildner-Kombinationen wurden im Alter von 28 Tagen CDF-Versuche zur Einschätzung des Frost-Tausalz-Widerstandes durchgeführt. Um eventuelle Unterschiede während des Frostsaugens bzw. eine starke Schädigung bedingt durch das Erreichen des kritischen Sättigungsgrades zu erkennen, wurden die Probekörper statt mit 28 Frost-Tau-Wechseln mit 56 Frost-Tau-Wechseln beansprucht, vgl. Bild 2.

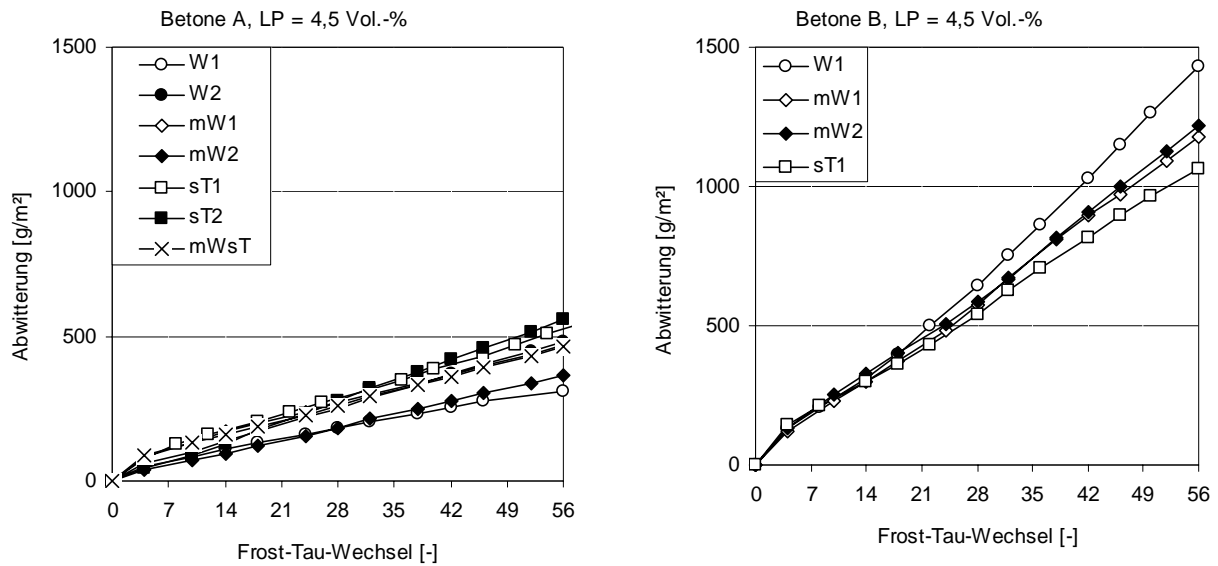


Bild 2: Abwitterung bis 56 Frost-Tau-Wechsel in Abhängigkeit des verwendeten Luftporenbildners; links: Beton A (CEM I 32,5 R), rechts: Beton B (CEM II B-S 32,5 R)

Legt man das Abwitterungskriterium entsprechend dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ zugrunde, erfüllen alle Betone – auch jene mit einem verminderten Luftporengehalt von 3,0 Vol.-% (hier nicht dargestellt) – die Anforderungen. Der Verlauf der Abwitterung über die Zeit ist in der Regel annähernd linear. Das heißt, von 28 FTW auf 56 FTW verdoppelt sich in etwa die Frostschädigung.

Weder anhand der Abwitterungen noch der Entwicklung des dynamischen E-Moduls konnte ein Einfluss der Art des verwendeten Luftporenmittels auf den Frost-Tausalz-Widerstand festgestellt werden. So wiesen zum Beispiel die synthetischen Tenside bei Beton A tendenziell höhere Abwitterungen auf, bei Beton B waren die Abwitterungen dagegen tendenziell niedriger als bei den übrig verwendeten Luftporenbildnern.

Um etwaige Einflüsse des ausgebildeten Mikroluftporensystems zu erfassen, wurden im Folgenden die durch die verschiedenen LP-Mittel eingestellten Luftporenkennwerte mit dem Abwitterungsverhalten in Beziehung gesetzt, vgl. Bild 3.



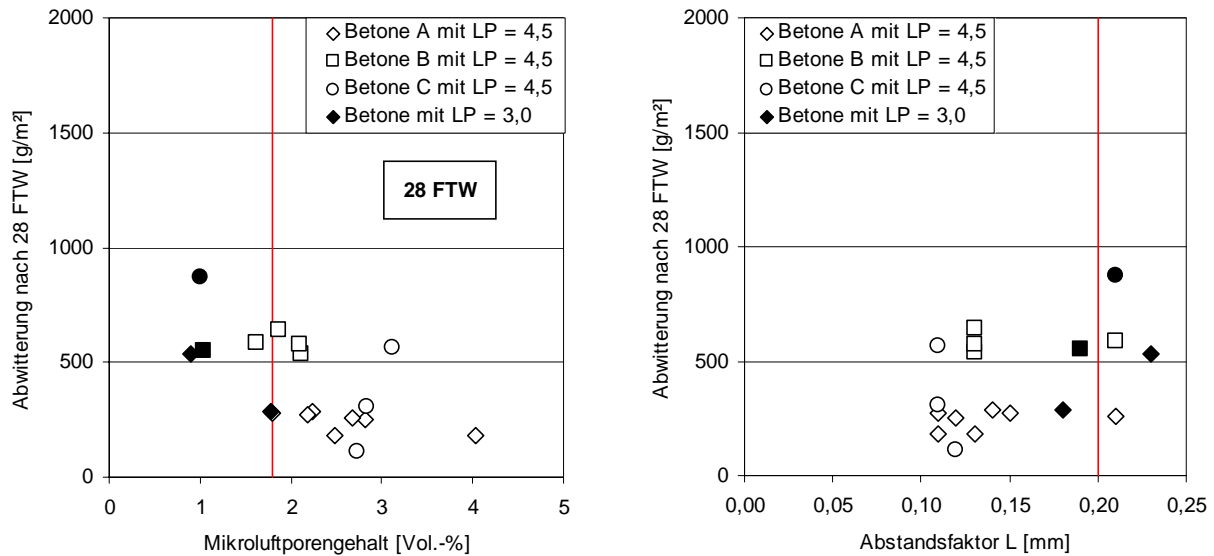


Bild 3: Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit des Mikroluftporengehalts bzw. des Abstandsfaktors im Festbeton; senkrechte Linien markieren die jeweiligen Grenzwerte nach ZTV Beton Stb 01 [2]

Deutlich zu erkennen ist, dass die Betone mit dem verringerten Luftgehalt im Frischbeton von 3 Vol.-% auch die niedrigsten Mikroluftporengehalte bzw. die größeren Abstandsfaktoren aufweisen. Während die Betone mit 4,5 Vol.-% Luftporen im Frischbeton größtenteils auch die Anforderungen an den Mikroluftporengehalt des Festbetons (1,8 Vol.-%) und den Abstandsfaktor (0,20 mm) erfüllen, weisen die Betone mit reduziertem Luftporengehalt größtenteils deutlich geringere Mikroluftporengehalte von ca. 1 Vol.-% im Festbeton auf.

Es lässt sich zwischen Mikroluftporengehalt und Abwitterungen sowohl nach 28 (vgl. Bild 3) als auch nach 56 Frost-Tau-Wechseln (hier nicht dargestellt) tendenziell ein Zusammenhang erkennen. Demnach reduziert sich der Frostwiderstand mit abnehmendem Mikroluftporengehalt. Bei Betonen, die mit einem Luftporengehalt von nur 3,0 Vol.-% hergestellt wurden, zeigt sich ebenfalls eine Abhängigkeit zwischen Mikroluftporengehalt und Abwitterungen.

Es zeigte sich, dass bei den hier untersuchten Zementen die Zementart einen weit größeren Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand besitzt als die Luftporenkennwerte am Festbeton. Beton A, hergestellt mit einem reinen Portlandzement (CEM I), weist bei ähnlichen Luftporengehalten geringere Abwitterungen auf, als Beton B, welcher einen Portlandhüttenzement (CEM II/B-S) enthält. Da jedoch jeweils nur ein Zement je Zementart untersucht wurde, kann im Rahmen dieses Projekts keine allgemeingültige Aussage bezüglich des Einflusses der Zementart auf den Frost-Tausalz-Widerstand getroffen werden.

Eine Änderung des Mikroluftporengehalts hat innerhalb der jeweiligen Betongruppe (gleicher Beton, unterschiedliche Luftporenbildner) bei den hier untersuchten Straßenbetonen kaum Auswirkungen. Beton C zeigt mit 3,0 Vol.-% Luftporen sehr hohe Abwitterungen. Bei dieser Serie traten nicht nur die charakteristischen „Pop-outs“ über der Gesteinskörnung auf, sondern die gesamte Oberfläche ist stark angewittert. Aufgrund des beabsichtigt dichten Gefüges des Zementsteins bedingt durch den geringen w/z-Wert und den zugegebenen Silikastaub, wurde eine hohe Frostbeständigkeit und damit geringe Abwitterungen erwartet. Da hochfeste Betone jedoch aufgrund des dichteren Gefüges eine sehr feine Kapillarstruktur aufweisen, werden bei Eisbildung kürzere Distanzen zu den Expansionsräumen benötigt, um eine Frostsprengung zu vermeiden. Der Abstandsfaktor, welcher bei einem Frischbeton-

Luftporengehalt von  $3,0 \pm 0,5$  Vol.-% eingestellt wird, reicht hierfür offensichtlich nicht mehr aus.

Zwischen Abstandsfaktor und Frost-Tausalz-Widerstand zeigt sich in dem hier untersuchten Bereich kein deutlicher Zusammenhang, ein tendenzieller Anstieg der Abwitterung mit steigendem Abstandsfaktor ist jedoch zu erkennen.

Bei der Untersuchung eines Einflusses des verwendeten Luftporenbildners auf die Druck- bzw. Biegezugfestigkeit war ebenfalls keine Veränderung nachzuweisen.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass alle Betone, die entsprechend ZTV-Beton Stb 01 hergestellt worden waren, einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufwiesen. Eine starke Veränderung des Frost-Tausalz-Widerstandes durch die Wahl des Wirkstoffes des Luftporenbildners konnte nicht abgeleitet werden.

## **3.2 Untersuchungen zur frühen Verkehrsfreigabe**

### **3.2.1 Übersicht**

Für diese Untersuchungen stand die Entwicklung des Frost-Tausalz-Widerstandes bei einer praxisnahen Belastung im jungen Betonalter im Vordergrund. In der Regel wird bis zur Herstellung der Verkehrstauglichkeit eines Autobahnabschnittes (Abbau des Fertiglers, Aufbringen der Fahrbahnmarkierung, Anbringen der Schutzplanken, Anbringen der Beschilderung) nach dem letzten Betoniertermin mit einer Mindestdauer von 3 bis 5 Tagen gerechnet. Zeitlich kritischer können Ausbesserungsstellen sein. Hier werden nur einzelne Felder ersetzt, eine Freigabe für den Verkehr kann schon nach dem Erreichen einer ausreichenden Festigkeit erfolgen. Da es sich in letzterem Fall um Spezialfälle und nicht die Regeleinbauweise handelt und hier zumeist auf eine schnelle Hydratation optimierte Betonrezepturen zum Einsatz kommen, wurde der Fokus der folgenden Untersuchungen auf praxisübliche Straßenbetone gelegt.

Untersuchungen, die das Thema einer frühen Frostbeanspruchung behandeln, beziehen sich meist auf das einmalige Gefrieren des noch hydratisierenden Betons und die Auswirkungen auf die späteren Eigenschaften wie die Druckfestigkeit oder die Dichtigkeit. Systematische Untersuchungen, die die Schädigung bei einer frühzeitigen Frost-Tausalz-Beanspruchung behandeln, sind dem Autor dagegen nicht bekannt.

Für die Untersuchungen wurden aus den vorab untersuchten Betonen zum Einfluss der Luftporenbildner ein modifiziertes Wurzelharz (mW2) und ein synthetisches Tensid (sT2) ausgewählt. Als Betone wurden die Referenzmischung Beton A ( $350 \text{ kg/m}^3$  CEM I 32,5 R; w/z-Wert = 0,45) sowie eine Winterrezeptur (Beton W), bei der statt des Zements der Festigkeitsklasse 32,5 R die Festigkeitsklasse 42,5 R eingesetzt wurde, ausgewählt.

Als Probekörper wurden Würfel hergestellt. Die Oberfläche der Würfel wurde abgezogen und entsprechend dem Vorgehen aus [5] texturiert und mit einem Nachbehandlungsmittel nachbehandelt. Hierdurch sollte erreicht werden, dass die Prüfungen praxisnah durchgeführt werden. Die Betone wurden mit unterschiedlichen Frischbetontemperaturen zwischen  $5^\circ\text{C}$  und  $20^\circ\text{C}$  hergestellt und auch dementsprechend in einer Trockenlagerung bis zur jeweiligen Prüfung gelagert.

Jeweils ein Probekörper je Serie wurde nach dem Abziehen der Oberfläche nicht texturiert. An dieser Fläche wurden nach dem Abschleifen der obersten Mörtelschicht die Luftporenkennwerte am Festbeton ermittelt. Hierbei stellte sich, sofern die Luftporenkennwerte auf den höheren Mörtelgehalt dieser Schicht umgerechnet werden, ein vergleichbares Mikroluftporengefüge, wie dies auch im Beton selbst nachgewiesen wurde, ein. Durch diese

Untersuchungen wurde sichergestellt, dass etwaige Aussagen der nachfolgenden Untersuchungen nicht auf eine Veränderung des Luftporengefüges an der Oberfläche zurückzuführen sind, wie beispielsweise eine Ansammlung von Luftporen im Mörtel oder das Austreiben der Luftporen durch das Glätten.

Voruntersuchungen hatten gezeigt, dass eine Nasslagerung im Vergleich zur Trockenlagerung zu geringeren Abwitterungen führt und demnach nicht als pessimal anzusehen ist. Aus diesem Grund wurde der Schwerpunkt der Hauptversuche auf die Untersuchung von Probekörpern gelegt, deren Oberfläche austrocknen konnte. Stichpunktartig wurden nass gelagerte Probekörper mit untersucht.

Eine Vorbelastung durch eine Lagerung unter dem Gefrierpunkt wurde nicht durchgeführt. Durch die unterschiedlich eingestellten Temperaturen während des Betonierens und der Lagerung sollten die Bedingungen, wie sie bei einer Herstellung von Bauabschnitten im Spätherbst bzw. Frühwinter zu finden sind, abgebildet werden.

An den Betonen wurde vorab für jede der Lagerungstemperaturen die Entwicklung der Druckfestigkeit bestimmt. Hieraus wurden anschließend die Zeitpunkte zur Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes unter Berücksichtigung der aktuellen Vorschriften aus der ZTV Beton Stb 01 [2] gewählt. Zu diesen Zeitpunkten wurde mit der Frost-Tausalz-Beanspruchung begonnen, als Verfahren wurde ein modifizierter CDF-Test gewählt. So wurde, damit die Betone wirklich auch eine Frost-Tausalz-Beanspruchung zu dem gewählten Termin erfahren, auf die 7-tägige kapillare Vorsättigung verzichtet. Des Weiteren wurde, um eine Hydratation während der Frost-Tau-Wechsel nicht stärker als in der Praxis zu erzielen, die Maximaltemperatur entsprechend der jeweils gewählten Lagerungstemperatur vor der Prüfung angepasst. Die Haltedauer dieser Temperatur wurde entsprechend verlängert, so dass der restliche Temperaturgang gleich blieb und sichergestellt wurde, dass die Probekörper trotz verminderter Maximaltemperatur auftauen und eine Taumittelaufnahme durch die Mikroeislinsepumpe während der Auftauphase möglich ist.

An den Probekörpern wurden während der Frost-Tau-Wechsel die innere Schädigung mit Hilfe des dynamischen E-Moduls und die äußere Schädigung in Form der Abwitterungen bewertet. Zusätzlich wurde die Taumittelmenge, welche von den Probekörpern aufgenommen wurde, bestimmt. Bei der Messung der Ultraschalllaufzeit konnte bei keiner der untersuchten Serien eine innere Schädigung abgeleitet werden. Die Serien wiesen vielmehr vor allem bei einer Prüfung in jungem Alter eine deutliche Zunahme des dynamischen E-Moduls während der Wechsel auf. Dies ist auf die andauernde Hydratation und auf die Taumittelaufnahme der Probekörper zurückzuführen. Auf eine Darstellung der inneren Schädigung wird daher im Folgenden verzichtet.

Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Abwitterung rund um den Faktor 1,5 bis 2 größer wird, wenn statt der im Merkblatt „Frostprüfung“ [4] geforderten an Teflon geschalteten Prüffläche eine abgezogene oder sogar abgezogene und texturierte Fläche bewittert wird. Auf der sicheren Seite liegend kann also das allgemein anerkannte Akzeptanzkriterium für einen frost-tausalz-beständigen Beton von maximal 1.500 g/m<sup>2</sup> Abwitterung auch für diese Versuche verwendet werden.

Neben den Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand erfolgten auch begleitende Untersuchungen zur Oberflächendauerhaftigkeit bei einer frühen Verkehrsbeanspruchung.



### 3.2.2 Einfluss der Lagerungstemperatur auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Die Untersuchungen zum Einfluss der Lagerungstemperatur wurden an allen Betonen durchgeführt. Die Ergebnisse der Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes des Betons A (Referenzmischung) mit dem synthetischen Tensid sind in Bild 4 dargestellt.

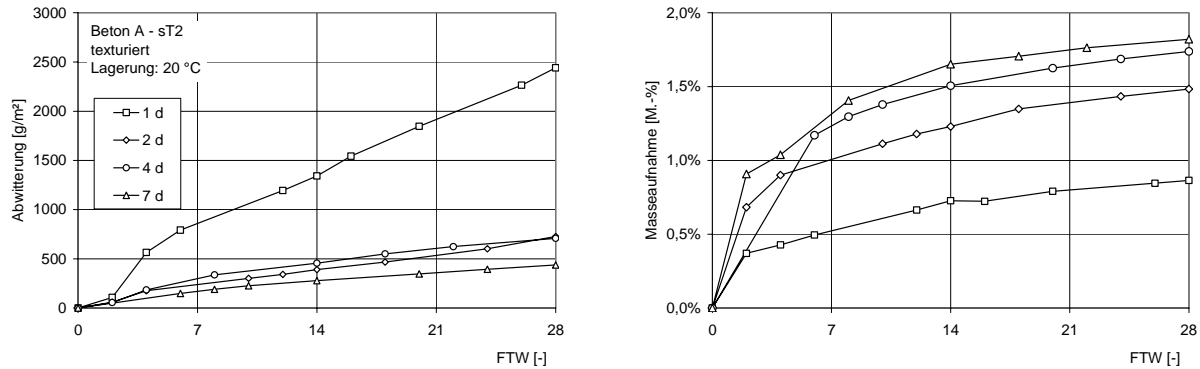


Bild 4: Abwitterung und Masseaufnahme in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts (Beton A – sT2, Oberfläche texturiert)

Die Ergebnisse dieser Serie zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Schädigung in Bezug auf das Prüfalter. So wiesen die Probekörper, die in einem Alter von einem Tag in die CDF-Truhe eingelagert wurden, eine Schädigung von deutlich mehr als 1.500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf. Die Betone, die ab einem Alter von 2 Tagen geprüft wurden, wiesen unabhängig vom Alter eine deutlich niedrigere Abwitterung in Höhe von ca. 700 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf.

Interessant ist, dass alle Abwitterungsverläufe in etwa linear verlaufen. Es ist davon auszugehen, dass zumindest bei den in sehr jungem Alter eingelagerten Probekörpern keine weitere Hydratation während der Frost-Tausalz-Prüfung stattfindet, diese führt aber offensichtlich nicht zu einer Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes bzw. einer Verminderung der Abwitterungsrate.

Die Betone, die zu einem späteren Zeitpunkt geprüft wurden, wiesen eine leicht größere aufgenommene Taumittelmenge als die Probekörper, die in sehr jungem Alter geprüft wurden, auf. Der Unterschied ist vor allem auf eine unterschiedliche Taumittelaufnahme zu Beginn der Frost-Tau-Wechsel und damit auf einen unterschiedlichen Trocknungsgrad zurückzuführen. Der Verlauf der Feuchtezunahme (Steigung der Kurven) nach dieser Anfangsphase, der geprägt ist von der Frostpumpe, ist bei allen geprüften Serien relativ identisch.

In den nachfolgenden Diagrammen sind die Abwitterungen des gleichen Betons bei den Lagerungs- bzw. Prüftemperaturen von 10 °C bzw. 5 °C dargestellt.

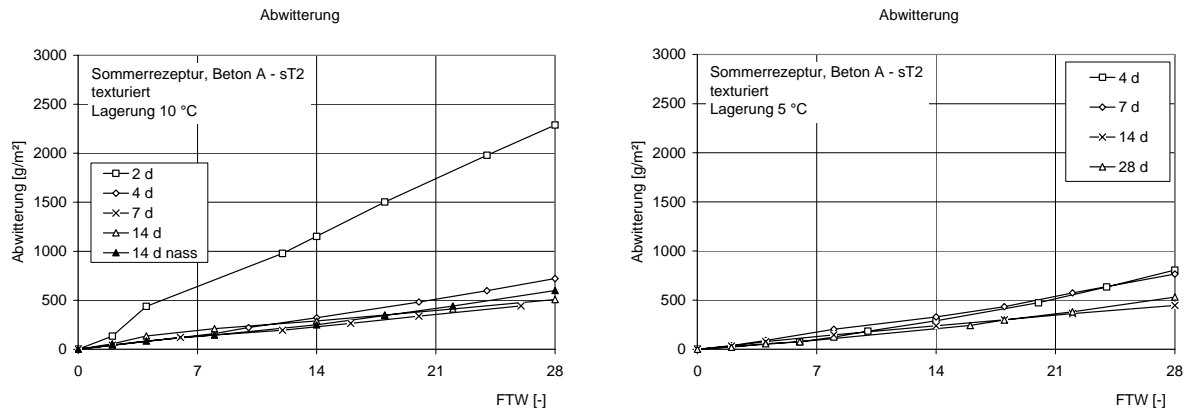


Bild 5: Abwitterung in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts; links: Lagerungstemperatur 10 °C, rechts: Lagerungstemperatur 5 °C (Beton A – sT2, Oberfläche texturiert)

Bei den Betonen der Lagerung 10 °C wurden erwartungsgemäß in jungem Alter deutlich höhere Abwitterungen, als diese bei der 20 °C Lagerung ermittelt wurden, gemessen. So wiesen die Probekörper, welche in einem Alter von 2 Tagen in die Frosttruhe eingelagert wurden, Abwitterungen von ca. 2.300 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf. Zu diesem Zeitpunkt wurden bei den Probekörpern der 20 °C-Lagerung erst Abwitterungen von rund 700 g/m<sup>2</sup> ermittelt. Erst ab einem Prüfalter von 4 Tagen konnten auch für den bei 10 °C gelagerten Beton Abwitterungen in ähnlicher Höhe, die auf einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand schließen lassen, ermittelt werden. Bei der Prüfung der Probekörper, welche bei 5 °C hergestellt und gelagert gewesen waren, konnte ab dem ersten Prüftermin im Alter von 4 Tagen ein ausreichend hoher Frost-Tausalz-Widerstand festgestellt werden. Eine Prüfung zu einem früheren Zeitpunkt wurde nicht durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei allen hier untersuchten Lagerungsarten ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand spätestens ab einem Alter von 4 Tagen zu erwarten ist.

### 3.2.3 Einfluss des Luftporenbildners auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Neben den Untersuchungen an der Rezeptur, bei der ein synthetisches Tensid verwendet wurde (vgl. Abschnitt 3.2.2), wurden auch Untersuchungen an einem Beton mit einem modifiziertem Wurzelharz durchgeführt. In Bild 6 sind die Abwitterungen dieses Betons bei den Lagerungstemperaturen 20 °C (links) bzw. 5 °C (rechts) dargestellt.

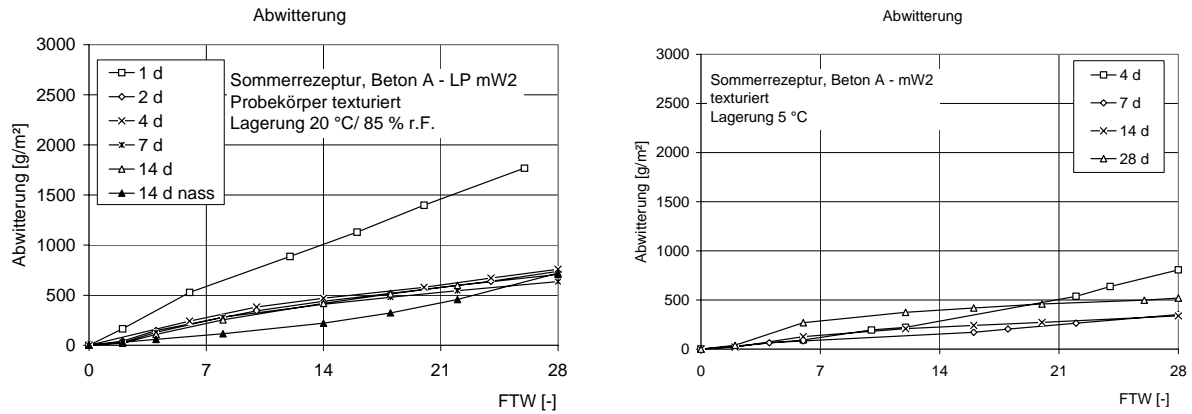


Bild 6: Abwitterung in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts; links: Lagerungstemperatur 20 °C, rechts: Lagerungstemperatur 5 °C (Beton A – mW2, Oberfläche texturiert)

Es zeigte sich ein ähnliches Verhalten, wie dies auch bei der Rezeptur mit dem anderen Luftporenbildnern festgestellt werden konnte. So waren bei der 20 °C ab einem Prüfalter von 2 Tagen die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln kleiner als 1.500 g/m<sup>2</sup>, bei der 5 °C-Lagerung konnte ab dem ersten Prüfzeitpunkt im Alter von 4 Tagen ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand ermittelt werden. Ein Unterschied in der Verwendung dieser beiden Luftporenbildner konnte hier nicht nachgewiesen werden.

### 3.2.4 Einsatz einer Wintermischung und Auswirkungen auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Bei kalten Witterungen werden in der Regel so genannte Wintermischungen verwendet. Hierbei werden durch eine Erhöhung des Zementgehalts oder der Verwendung eines Zements höherer Festigkeitsklasse der Anteil an freigesetzter Hydrationswärme vor allem in jungem Alter erhöht sowie die Festigkeitsentwicklung im Vergleich zu sonst üblichen Straßenbetonrezepturen beschleunigt. Bei den hier durchgeführten Versuchen wurde ein Zement der Festigkeitsklasse 42,5 R gewählt. Damit die Rezepturen an sich weiter vergleichbar bleiben, fand keine Erhöhung des Zementgehalts statt.

In Bild 7 sind die Abwitterungen der Winterrezeptur bei den Lagerungstemperaturen 20 °C und 5 °C dargestellt.

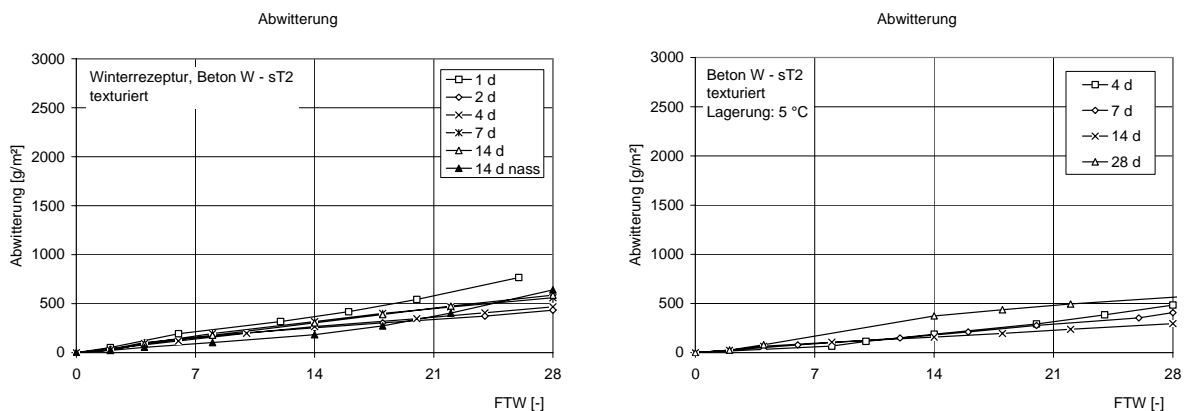


Bild 7: Abwitterung in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts; links: Lagerungstemperatur 20 °C, rechts: Lagerungstemperatur 5 °C (Beton W – sT2, Oberfläche texturiert)

Im Vergleich zu den Abwitterungen der Sommerrezepturen (Bild 5 und Bild 6) wiesen alle Serien der Winterrezeptur einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand bei Prüfbeginn auf. So wurden selbst bei einer 20 °C-Lagerung bei einem Prüfbeginn im Alter von 24 Stunden Abwitterungen von unter 1.000 g/m<sup>2</sup> ermittelt.

Generell wurden erwartungsgemäß bei der Winterrezeptur geringfügig niedrigere Abwitterungen ermittelt, was auf die höhere Festigkeit der Zementsteinmatrix sowie den feineren Kapillarporenraum zurückzuführen ist.

Insgesamt zeigen die Untersuchungen an der Winterrezeptur, dass durch die Verwendung eines Zements der Festigkeitsklasse 42,5 R eine schnellere Entwicklung des Frost-Tausalz-Widerstandes erreicht wird.

### 3.2.5 Untersuchungen zur Oberflächendauerhaftigkeit bei früher Verkehrsbeanspruchung

An ausgewählten Serien wurden Untersuchungen zur Oberflächendauerhaftigkeit zu unterschiedlichen Belastungszeitpunkten durchgeführt. Die Belastungszeitpunkte wurden hierbei unter Berücksichtigung der vorangegangenen Untersuchungen zu 3 Tagen (10 °C-Lagerung) bzw. 2 Tagen (20 °C-Lagerung) sowie als Referenz jeweils zu 28 Tagen gewählt. Die Oberflächendauerhaftigkeit wurde mit einem nach [5] modifizierten Verfahren bewertet. So wurden die Probekörper einer Beprallung (60 Minuten – PA 60), 6 Frost-Tau-Wechsels sowie einer zweiten Beprallung (60 Minuten - PA 120) ausgesetzt. Zu Beginn der Untersuchungen sowie nach jeder Belastung wurde die Oberflächentextur mit einem laseroptischen Verfahren aufgenommen. Nach jeder Belastung wurde außerdem die abgewitterte Menge gewogen, vgl. Bild 8.

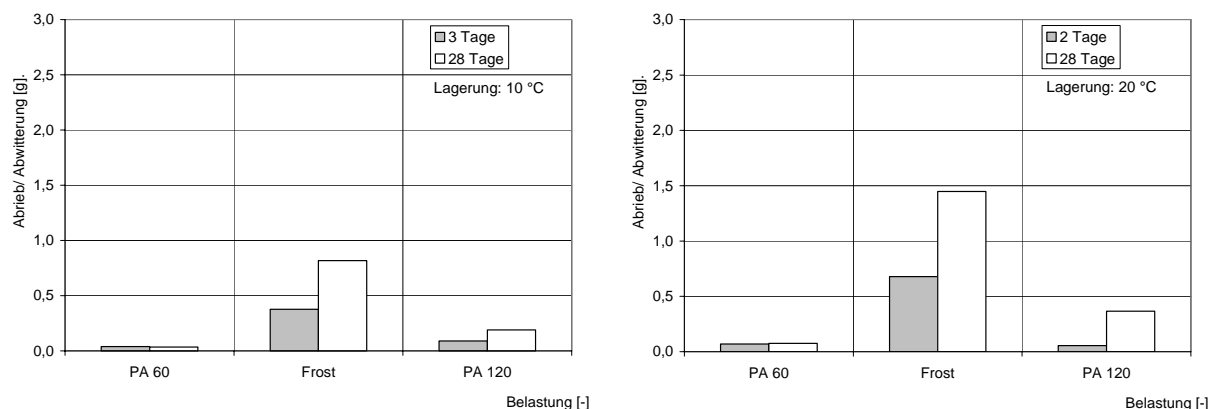


Bild 8: Abwitterungen infolge Frost bzw. Abplatzungen infolge Prallabrieb während des Oberflächenzyklus, umgerechnet auf die beprallte Fläche

Die Menge der Abplatzungen in jungem Alter war generell als sehr gering zu bewerten. Dies wird sowohl durch den ermittelten Abrieb während der Prallbeanspruchung als auch durch den optischen Vergleich der Oberflächen deutlich. Zu berücksichtigen ist hierbei auch, dass es sich bei dem Abrieb bei diesen geringen Mengen augenscheinlich auch zu einem großen Anteil um Abrieb der Gummikugeln selbst handelt. Selbst die geringen Mengen sind demnach nicht vollständig einem Abtrag des Oberflächenmörtels zuzuschreiben. Eine Zunahme der Frost-Tausalz-Schädigung in jungem Alter durch die vorangegangene Beprallung konnte nicht festgestellt werden, die Abwitterungen liegen in dem auch vorher ermittelten Bereich. Ebenso konnte keine deutliche Erhöhung des durch die Prallbeanspruchung hervorgerufenen Abriebs in jungem Alter durch eine vorangegangene

Frost-Tausalz-Belastung ermittelt werden. Auch bei der Beprallung, die der Frostbeanspruchung nachgeschaltet worden war, wurden nur sehr geringe Abriebsmengen ermittelt.

Dagegen wiesen die Serien, die erst in einem Alter von 28 Tagen geprüft wurden, nach einem anfänglich geringen Abrieb nach der ersten Beprallung eine deutlich höhere Abwitterung und ebenso einen deutlich höheren Abrieb nach der Frost-Tausalz-Belastung auf. Die auf 28 Frost-Tau-Wechsel extrapolierten Abwitterungen liegen etwas höher als die in den vorangegangenen Serien ermittelten Abwitterungen, aber mit maximal  $700 \text{ g/m}^2$  immer noch deutlich unter dem Akzeptanzkriterium. Es wird vermutet, dass die höhere Schädigung durch eine austrocknungsbedingte Vorschädigung in Form von Mikrorissen hervorgerufen wurde.

Die Untersuchungen zeigen, dass es möglich ist, eine Oberflächentextur herzustellen, die zu den ermittelten Zeitpunkten der Verkehrsfreigabe aufgrund einer frühen Frost-Tausalz-Belastung einen Widerstand gegenüber einer Verkehrsbeanspruchung aufweist, der gegenüber einem Widerstand im Alter von 28 Tagen als vergleichbar einzustufen ist. Demnach ist bei einer geeigneten Zusammensetzung nicht davon auszugehen, dass durch eine frühe Verkehrsfreigabe durch die Belastung des Verkehrs höhere Schädigungen der Oberflächentextur auftreten.

### **3.2.6 Austrocknungsverhalten und Hydratationsgrad**

An der Sommerrezeptur wurden das Austrocknungsverhalten mittels der Multiringelektrode [6] sowie der Hydratationsgrad an Mörtelproben ermittelt, vgl. Bild 9. Mit der Multiringelektrode kann tiefenabhängig der elektrolytische Widerstand gemessen werden. Ein höherer gemessener Widerstand ist auf einen niedrigeren Gehalt an freiem Wasser z.B. infolge fortschreitender Hydratation bzw. Austrocknens in dem Mörtel in der unmittelbaren Umgebung der Multiringelektrode zurückzuführen. Die Untersuchungen wurden durchgeführt, um einen etwaigen Zusammenhang zwischen den randnah ermittelten Feuchteverhältnissen, den Abwitterungen sowie der Druckfestigkeit zu untersuchen.

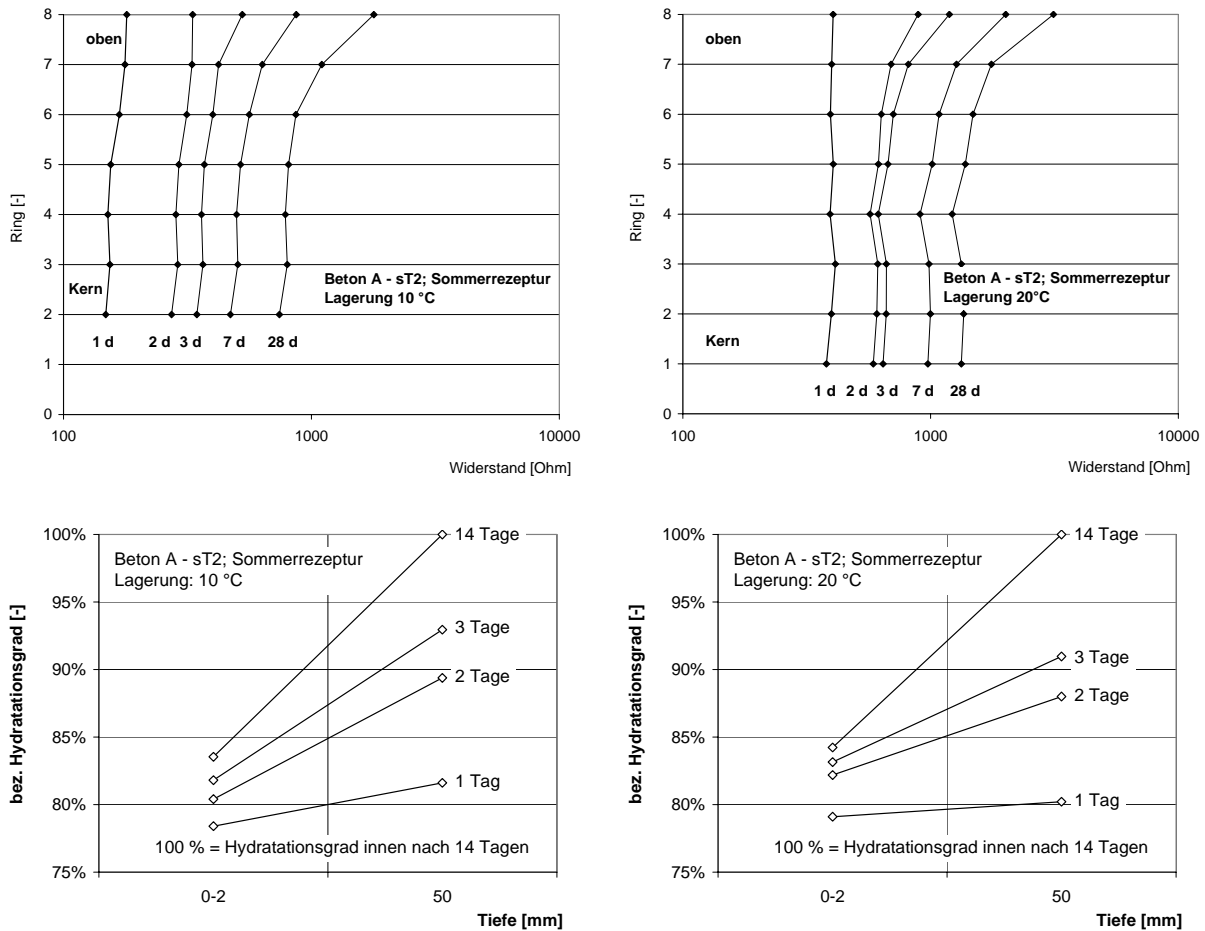


Bild 9: Entwicklung des elektrolytischen Widerstandes (oben) bzw. des Hydratationsgrades (unten); links: Lagerung 10 °C, rechts: Lagerung 20 °C

Zu Beginn der Hydratation ist naturgemäß ein hoher Anteil an freiem Wasser verfügbar. Dies führt vor allem zu Beginn der Messung zu sehr niedrigen Widerständen. Die ermittelten Werte waren hierbei abhängig vom Hydratationsgrad des Betons. Es konnte festgestellt werden, dass der Startwert bei einer Messung im Alter von einem Tag von der Temperatur bzw. bei gleicher Temperatur von der Feinheit des Zements abhängt, d.h. der Startwert steigt mit steigender Lagerungstemperatur sowie geringerer Feinheit des Zements. Durch die weitere Hydratation des Betons findet ein Verbrauch dieses Wassers statt, was zu einer weiteren Steigerung des Widerstandes führt. Auf diesen Effekt ist vor allem im Kernbereich der Probekörper die Zunahme des Widerstandes zurückzuführen.

Eine weitere Erhöhung des Widerstandes findet durch das Austrocknen an der Oberfläche statt. Dies ist mit steigendem Alter an den gekrümmten Verläufen der Widerstände zu erkennen. So wurde ab einem Alter von rund 2 bis 3 Tagen eine ausgeprägtere Erhöhung nahe der Oberfläche festgestellt, als dies im Kernbereich alleine durch die Hydratation der Fall war. Das Maß der Erhöhung ist hierbei wiederum abhängig von der Lagerungstemperatur und geringfügig auch von der Feinheit des verwendeten Zements.

In Bezug auf den zu erwartenden Frost-Tausalz-Widerstand sind die Ergebnisse insofern interessant, als sie zeigen, dass ab einem Alter von spätestens 3 Tagen in der ersten hier untersuchten Schicht, die in einer Tiefe von 5 bis 7,5 mm liegt, eine deutliche Austrocknung hin zur Oberfläche statt findet. Unter der Berücksichtigung, dass es sich bei der für den Frost-Tausalz-Widerstand relevanten Zone um eine etwa 0,7 mm (entspricht 1.500 g/m<sup>2</sup>) und damit nochmals viel dünnere oberflächennahen Schicht handelt, ist in dieser Zone nochmals

von einem deutlich früheren Beginn der Austrocknung und einen schärferen Gradienten an der Oberfläche auszugehen.

### 3.2.7 Korrelation Druckfestigkeit – Frost-Tausalz-Widerstand

In der ZTV-Beton StB 01 [2] ist eine Verkehrsfreigabe von Betonstraßen der Bauklassen SV, I bis III ab einer Druckfestigkeit von 60 % der Nenndruckfestigkeit vorgesehen. Im Vorfeld der Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit wurde daher die Druckfestigkeitsentwicklung der Betone in Abhängigkeit der Lagerungsdauer und -art ermittelt. In Bild 10 ist die Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln der jeweiligen Druckfestigkeit zu Beginn der Frostprüfung gegenüber gestellt.

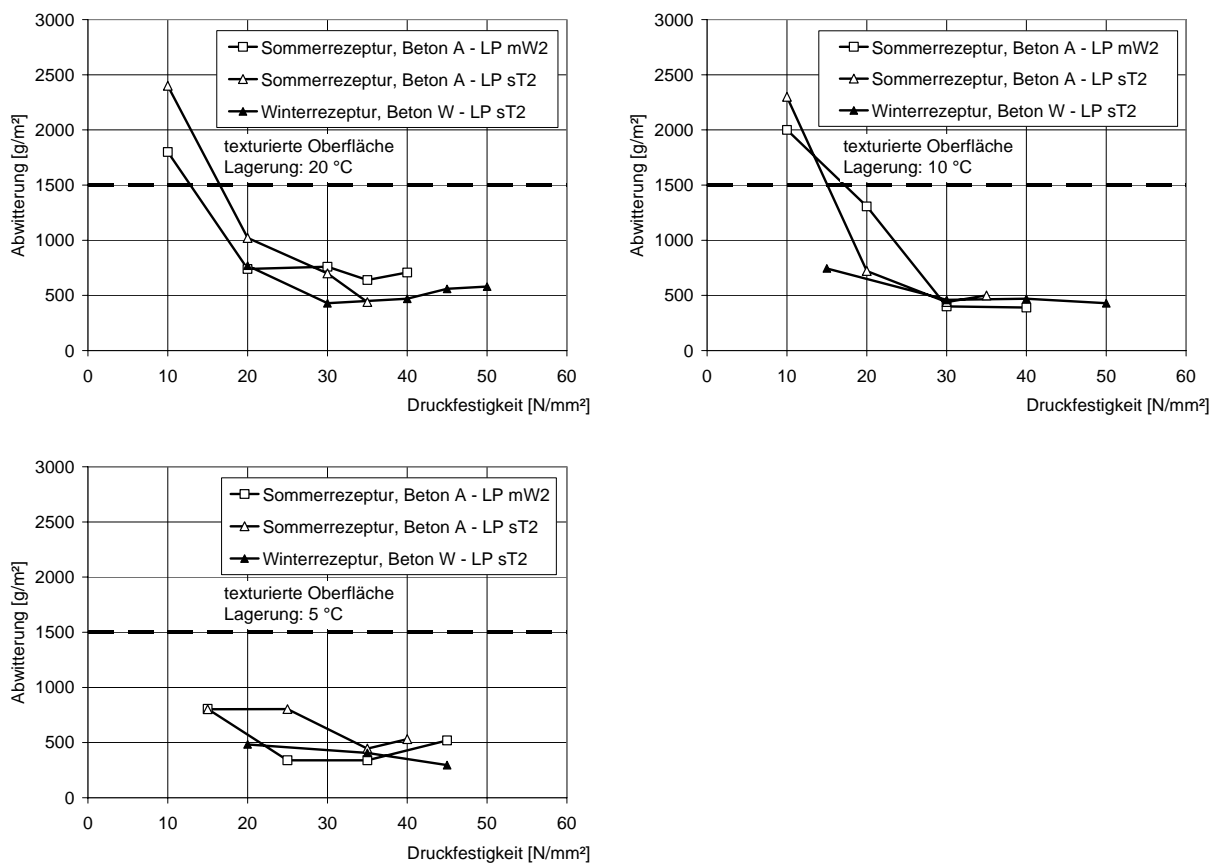


Bild 10: Abwitterung in Abhängigkeit der Druckfestigkeit für unterschiedliche Lagerungstemperaturen (texturierte Oberfläche)

Die Gegenüberstellung der Druckfestigkeit zu Prüfbeginn und der Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln zeigen, dass ab einer Druckfestigkeit von 20 N/mm<sup>2</sup> eine ausreichende Frost-Tausalz-Beständigkeit (Kriterium: Abwitterung < 1.500 g/m<sup>2</sup>) besteht. Ab einer Druckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup> erbrachte eine weitere Steigerung der Druckfestigkeit keine weitere Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes.

Die Ergebnisse der Ermittlung der Austrocknung und des Hydratationsgrades (vgl. Abschnitt 3.2.6) haben gezeigt, dass die ermittelte Druckfestigkeit, die ihren Ursprung vor allem in der Hydratation des Kernbetons hat, aufgrund der schnellen Austrocknung der oberflächennahen Schicht nicht zwingend einen Rückschluss auf die Eigenschaften der Oberfläche aufweisen muss. Allerdings bestätigen die Ergebnisse die Vorgaben der ZTV Beton hinsichtlich der

frühen Verkehrsfreigabe, nach der eine Freigabe ab einer Druckfestigkeit von rund 25 N/mm<sup>2</sup> möglich ist. Zu beachten ist allerdings, dass diese Druckfestigkeit bei den kühleren Lagerungen von 5 °C bzw. 10 °C im Vergleich zur Laborlagerung bei 20 °C erst deutlich später erreicht wurde.

## **4 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis**

Ziel der Untersuchungen war, die Luftporenverteilung in Straßenbetonen mit neuen synthetischen Luftporenbildnern und die Auswirkungen auf die Festbetoneigenschaften zu bestimmen. So fehlten insbesondere für die neue Generation der synthetischen LP-Bildner systematische Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen dem Frost-Tausalz-Widerstand von Straßenbeton und den vorhandenen Kennwerten des Mikroluftporengefüges. Zusätzlich sollte der Frost-Tausalz-Widerstand in jungem Alter, der bei einem frühen Angriff, d.h. bei frühzeitiger Verkehrsfreigabe maßgebend wird, untersucht werden.

Die Untersuchungen ergaben, dass die Art des Wirkstoffes im verwendeten Luftporenbildner keinen signifikanten Einfluss auf Frisch- und Festbetoneigenschaften besitzt. Die Anforderungen des BAW-Merkblatts „Frostprüfung“ an Abwitterung und innere Schädigung während der Frostprüfung wurden von allen geprüften Betonen erfüllt. Das Abwitterungsverhalten und die Oberflächendauerhaftigkeit waren unabhängig von der Art des Luftporenbildners. Die Menge und die Verteilung der Mikroluftporen im Festbeton hatten ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die Frost-Tausalz-Beständigkeit der Betone. Zum Erreichen einer ausreichenden Frostbeständigkeit ist es wichtig, die Anforderungen entsprechend dem „Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton“ einzuhalten.

Des Weiteren konnte im Rahmen dieser Untersuchungen schon in einem sehr jungen Alter ab einer Druckfestigkeit von rund 20 N/mm<sup>2</sup> ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand nachgewiesen werden. Bei den hier untersuchten Betonen lag der Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe nach ZTV Beton Stb 01 deutlich auf der sicheren Seite. Die Regelungen zur Verkehrsfreigabe können entsprechend dieser Untersuchungen beibehalten werden.

Sollte baupraktisch eine Abweichung von den bisherigen Regelungen der ZTV Beton Stb 01 erforderlich sein, kann zur Optimierung des Zeitpunkts der Verkehrsfreigabe und zur Ausnutzung der betonspezifischen Eigenschaften folgendes Vorgehen vorgeschlagen werden: In einem ersten Schritt sollte die Sensitivität der gewählten Rezeptur auf eine frühe Verkehrsfreigabe untersucht werden. Hierdurch sind noch in der Planungsphase eine Optimierung der Rezeptur und ein Vergleich unterschiedlicher Rezepturen hinsichtlich dieser Kenngröße möglich. In einem weiteren Schritt sollte im Rahmen der Bautätigkeit durch angepasste CDF-Tests sichergestellt werden, dass der tatsächlich erreichte Widerstand unter Berücksichtigung der tatsächlichen Umgebungsbedingungen ausreichend für die Verkehrsfreigabe ist.

Die Untersuchungen legen darüber hinaus nahe, dass andere Einflüsse wie zum Beispiel ein unzureichendes LP Gefüge im Mörtelbereich, eine nicht optimal zusammengesetzte Mörtelphase bzw. eine zu dicke Mörtelschicht, eine schon sehr frühzeitig unterbrochene Hydratation (unzureichende Nachbehandlung, Temperaturen unter 0 °C) oder Mikrorisse bedingt durch Temperatur- bzw. Feuchtegradienten für Schäden verantwortlich sind, die derzeit einer frühen Verkehrsfreigabe zugeschrieben werden.



## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Schießl P., Brandes Chr., Schnittger A., Strehlein D.: „Luftporenkennwerte in Abhängigkeit der Art und Dosierung des LP-Bildners und Zusammenhang mit dem Frost-Tausalz-Widerstand „texturierter“ Betonstraßendecken (kurz: LP-Kennwerte und Frost-Tausalz-Widerstand von Straßenbeton) FE 08.179/2004/LGB“; Forschungsbericht; Eigenverlag; München 2007
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB 01), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Betonstraßen“, FGSV Verlag, Köln – FGSV 899, Ausgabe 2001
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen: Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, FGSV Verlag GmbH, Mai 2004
- [4] Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt Frostprüfung von Beton (BAW-Merkblatt „Frostprüfung“, Dezember 2004
- [5] Wenzl, P., Beckhaus, K.: Dauerhaftigkeit von Betondeckenoberflächen – FE 8.157 /1999/LRB; Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen
- [6] Dauberschmidt, C.; Harnisch, J.: Messung des Wassergehaltes von Beton mit Hilfe nachträglich eingebauter Multiringelektroden; Kurzbericht Nr. 16 (2003); ibac der RWTH Aachen; Aachen 2003