

# Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe

## Abschlussbericht

**Thema:** Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse  
Teilprojekt 5 - Bauwerksuntersuchungen  
Kennzeichen V 419

**Auftraggeber:** Deutscher Ausschuss für Stahlbeton  
10772 Berlin

**Auftrags-Nr.:** 02 30 79 0671                      **Textseiten:** 41

**Datum:** 31.07.2006                              **Anlagen:** 2

**Bearbeiter:** Dr.-Ing. U. Guse                      **Durchwahl:** 0721 / 608-3894

**ausgefertigt:** 2fach: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin  
1fach: Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Karlsruhe

Veröffentlichung und auszugsweise Wiedergabe  
bedarf der schriftlichen Genehmigung des Instituts

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		<b>Seite</b>
1	Einführung .....	3
2	Beurteilung der Betonqualität ausgeführter Bauwerke .....	3
2.1	Beurteilungskriterien .....	3
2.2	Untersuchungsmethoden .....	7
3	Beschreibung der untersuchten Bauwerke .....	9
3.1	Fahrbahndecke - BAB A 5 bei Kronau .....	9
3.2	Wasserbecken in einem Wasserwerk bei Karlsruhe .....	11
4	Temperaturmessungen in der Fahrbahndecke .....	13
4.1	Methode .....	13
4.2	Ergebnisse - Überblick .....	16
4.3	Ergebnisse - Frostbeanspruchung .....	20
5	Fahrbahndecke .....	25
5.1	Vorbemerkungen .....	25
5.2	Untersuchungsmethoden .....	25
5.3	Ergebnisse der Untersuchungen .....	27
6	Wasserbecken .....	33
6.1	Vorbemerkungen .....	33
6.2	Ergebnisse der Untersuchungen .....	33
7	Schlussfolgerungen .....	37
8	Zusammenfassung .....	39
9	Literatur .....	40
	Anlage 1, Untersuchungsergebnisse Fahrbahndecke	
	Anlage 2, Untersuchungsergebnisse Wasserbecken	

## **1 Einführung**

Um eine Korrelation zwischen den unter Praxisverhältnissen gegebenen klimatischen Beanspruchungen von Betonen und Frost-Laborprüfungen herstellen zu können, sind Kenntnisse über die tatsächliche Beanspruchung der Bauwerke im Winter erforderlich. Weiterhin werden Kennwerte benötigt, anhand derer ein Bauwerksbeton im Hinblick auf den Frostwiderstand charakterisiert oder mit dem im Labor untersuchten Beton verglichen werden kann.

Die im Labor gewonnenen Ergebnisse von Frostprüfungen an Betonen werden üblicherweise Grenzwerten gegenübergestellt. Anhand dieses Vergleichs wird entschieden, ob der untersuchte Beton einen ausreichenden Frostwiderstand aufweist. Unklar bleibt dabei aber oft, welcher Zusammenhang zwischen dem Prüfergebnis und dem tatsächlichen Frostwiderstand des Betons in der Praxis besteht. Insbesondere die voraussichtliche Zeitspanne, in der der Beton der Beanspruchung in der Praxis widersteht, ist bisher kaum abschätzbar.

Die Aufgaben im Teilprojekt 5 "Bauwerksuntersuchungen" des Forschungsschwerpunktes des DAfStb "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" bestanden darin, den Zustand von Bauwerksbetonen zu verfolgen und Eigenschaften sowie Strukturkenndaten von Bauwerksbetonen zu ermitteln. Weiterhin waren Daten zu gewinnen, die Auskunft über die tatsächlichen Beanspruchungen der Bauwerke in der Frostperiode geben.

Anhand dieser Ergebnisse war zu prüfen, ob sich Aussagen zum tatsächlichen Frostwiderstand oder Frost-Tausalz widerstand des Betons ableiten lassen und inwieweit eine Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen von Laborprüfungen besteht.

Untersuchungsobjekte waren zwei Bauwerke, die ab der Herstellung über einen Zeitraum von 1999 bis 2006 beobachtet wurden. Parallel zur augenscheinlichen Bewertung erfolgten Untersuchungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und zur Charakterisierung der Struktur der Bauwerksbetone.

## **2 Beurteilung der Betonqualität ausgeführter Bauwerke**

### **2.1 Beurteilungskriterien**

Für die Bewertung des Zustands frostbeanspruchter Bauwerke existieren in Deutschland aber auch im Ausland keine Vorgaben in Merkblättern, Richtlinien oder Normen. Dementsprechend ist kein Klassifizierungssystem vorhanden, das als Grundlage für die Einordnung der Bauwerke, ausgehend von ihrem Zustand (abgewitterte Oberfläche, Rissbildungen), herangezogen werden kann.

Die Kriterien, die zur Bewertung der Prüfungen des Frost- und Frost-Tausalz widerstands von Betonen im Labor genutzt werden, wie z.B. die Abwitterungstiefe, der flächenbezogene Masseverlust, der prozentuale Masseverlust oder der flächenbezogene Volumenverlust, gelten nur für die jeweilige Prozedur mit definierter Probengeometrie, -herstellung, -lagerung und Prüfung entsprechend des festgelegten Temperaturzyklus und der zugehörigen Zyklenanzahl. Dementsprechend ist eine direkte Übertragung der Beurteilungskriterien und damit auch der Ergebnisse der Frost-Laborprüfverfahren auf

Bauwerke nicht abgesichert und es ist nicht möglich, ausgehend von den Ergebnissen der Laborprüfungen, anzugeben, mit welchen Veränderungen (z.B. Abwitterungen) nach wie vielen Jahren der Nutzung zu rechnen ist und wann ggf. der Grenzwert, der in der Prüfung zugrunde gelegt wurde, erreicht werden könnte.

Auch die Herstellung eines Zusammenhangs zwischen der am Bauwerk vorgefundenen Schädigung und der Frost-Laborprüfung ist kaum möglich. Selbst wenn Abwitterungstiefen (Substanzverluste) am Bauwerk bestimmt werden und ein Bezug zum Ausgangszustand herstellbar ist, kann nicht auf einen vergleichbaren Zustand bei der Laborprüfung geschlossen werden. Als Bezugsbasis zur Bestimmung der Abwitterungstiefen am Bauwerk kann dabei z.B. ein Oberflächenbereich dienen, der schadensfrei ist und damit noch den Ausgangszustand repräsentiert, d.h. der Schalungs- oder Bearbeitungsstrukturen aufweist. Erschwert wird die Herstellung eines Zusammenhangs insbesondere dadurch, dass neben den tatsächlich wirksamen Feuchteverhältnissen im Bauwerk in der Regel unklar ist, welche Temperaturen am Bauwerk auftraten (Maximum, Minimum, Abkühl- und Auftauraten) und welche Zyklenanzahl für die Bewertung bzw. Einordnung der festgestellten Abwitterungstiefe zugrunde zu legen ist.

Dies bedeutet aber auch, dass die Bewertungskriterien der Laborprüfungen nicht gleichzeitig als Grenzwerte für die Beurteilung von Bauwerken dienen können. Vielmehr müssten auf die Nutzung abgestimmte, zeitabhängige Abwitterungen bzw. Substanzverluste, die am Bauwerk auftreten können, vereinbart werden. Eine solche Klassifizierung entspricht nicht der aktuellen Praxis. In der Regel existieren feste Grenzwerte, die Betone mit einem ausreichenden Widerstand bei einer Frost- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung von Betonen mit unzureichendem Widerstand trennen sollen. Eine Abstufung der zulässigen Abwitterungen in Abhängigkeit von der Nutzung ist bisher nicht üblich.

Aus dem Dargestellten resultiert folglich die Frage, welche Möglichkeiten sich dennoch für die Bewertung des Zustands frostbeanspruchter Bauwerke bieten und welche Kriterien herangezogen werden können.

Liegen keine Daten vor, die eine Beurteilung der Frostbeanspruchung des Bauwerks ermöglichen, so kann auf der Basis der langjährigen mittleren täglichen Temperaturen und der Anzahl der Eis- und Frosttage, die für den Zeitraum von 1961 - 1990 (klimatologischer Referenzzeitraum) für 311 Messstationen des Deutschen Wetterdienstes zusammengestellt wurden [17], eine grobe Abschätzung der Temperaturen und der Anzahl der Frost-Tau-Zyklen, der ein Bauwerk ausgesetzt war, vorgenommen werden.

Entsprechende Langzeitmessungen zur Temperatur- und Feuchtebeanspruchung an Bauwerken sind aufwändig und bisher nur für einzelne Objekte verfügbar. So sind z.B. die Ergebnisse von Messungen an zwei Brücken (bei Mannheim bzw. Rottweil) zur Erfassung der Beanspruchung durch Frost und Tausalze, die Hilsdorf und Kottas [11] durchführten, verfügbar. Ergebnisse von Messungen an einer Schleuse des Main-Donau-Kanals veröffentlichten Westendarp und Schulze [30]. Aus diesen Messungen kann man ableiten, dass zwischen den realen Beanspruchungen (Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit sowie minimale und maximale Temperatur während der Frostperioden) und den Laborprüfverfahren erhebliche Differenzen bestehen, wobei der Effekt, der durch die verschärften Bedingungen in den Laborprüfungen entsteht, bisher nur unzureichend abgeschätzt werden kann (veränderter Schadensmechanismus oder Zeitraffereffekt).

Hinsichtlich der Einordnung der auftretenden Veränderungen am Bauwerk, werden häufig vom Betreiber bzw. Eigentümer subjektive Bewertungsmaßstäbe angelegt, die sich an der Art der Nutzung orientieren. So können bereits vereinzelt Absprengungen über großen Zuschlägen (pop-outs), in Bereichen, die stark frequentiert sind, z.B. an Tankstellen oder in Fußgängerzonen, zu Beanstandungen führen. Andere, aber auch bisher nicht genau definierte Maßstäbe, die sich auf eine Reduzierung der Nutzungsfähigkeit beziehen, sollten z.B. bei Wasserbauwerken, Kläranlagen, Kühlturminnenschalen oder Fahrbahndecken zugrunde gelegt werden.

Schadensarten bzw. Schadensbilder, die infolge von Frostbeanspruchung und Frost-Tausalzbeanspruchung auftreten, sind mit entsprechenden Fotos und einer Einteilung nach der Intensität der Oberflächenveränderung z.B. vom ACI [1] zusammengestellt worden. Grenzwerte, ab denen von einer bedeutsamen Schädigung am Bauwerk bzw. einer Reduzierung der Nutzungsfähigkeit auszugehen ist, werden in dieser Zusammenstellung nicht angegeben.

Im Rahmen einer Empfehlung für die Durchführung und Auswertung von Frost-Tauwechselprüfungen ohne und mit Taumitteln stellte RILEM [19] die verschiedenen Bewertungskriterien, die bei Laborprüfungen angewendet werden, zusammen. Als Kriterien für die Bewertung von Frost-Tauwechselprüfungen ohne Taumittel werden die Ermittlung der Längenänderung, die Ultraschallprüfung (Bestimmung der Resonanzfrequenz) und Festigkeitsprüfungen (Druck- und Biegezugfestigkeit) aufgeführt. Diese Methoden werden herangezogen, um insbesondere innere Schädigungen, d.h. Rissbildungen, nachzuweisen. Ohne Ausgangs- bzw. Referenzwerte sind diese Prüfungen auf Bauwerke nicht anwendbar.

Anhand der für eine Bewertung von Frost-Tauwechselprüfungen mit Taumitteln angegebenen Kriterien, die sich auf Veränderungen der Probenoberfläche beziehen, kann auch eine Beurteilung von Bauwerksbetonen vorgenommen werden. Die in der Tabelle 1 nach [19] zusammengestellten Orientierungswerte ermöglichen, eine Grenze zwischen Betonen mit hohem und geringem Frost-Tausalzwidestand zu ziehen. Diese Grenze könnte z.B. bei den Werten liegen, die für einen Beton mit einem hohen Widerstand nach 50 Frost-Tau-Zyklen in der Tabelle 1 angegeben sind (fett gedruckte Werte).

Für die in der Tabelle 1 in der ersten Spalte aufgeführten Frost-Tau-Zyklen geht man in [19] von folgenden Mindestanforderungen aus: Die Minimaltemperatur sollte während des Abkühlzeitraums von 16 - 17 Stunden bei einer Frostbeanspruchung zwischen -15 und -10 °C und bei einer Tausalzbeanspruchung bei -20 °C liegen. Der Auftauzeitraum umfasst dementsprechend 7 - 8 Stunden bei einem Frost-Tau-Zyklus innerhalb von 24 Stunden. Für die Abkühlgeschwindigkeit werden 1,0 - 2,0 °C/Stunde und für die Auftaugeschwindigkeit 2,0 - 3,0 °C/Stunde genannt. Diese Raten entsprechen den in Deutschland unter Praxisbedingungen zu beobachtenden maximalen Abkühl- und Auftaugeschwindigkeiten in der Betonrandzone (bis 20 mm), was u.a. durch die Messungen von Hilsdorf und Kottas [11] belegt werden kann. Die Ergebnisse eigener Untersuchungen sind im Abschnitt 4 des vorliegenden Berichts zusammengestellt.

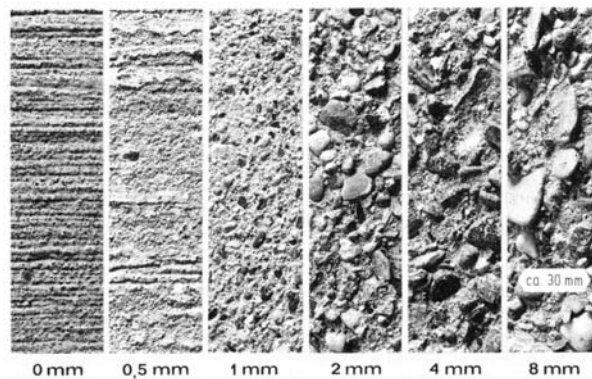
Zur Veranschaulichung der in der Tabelle 1 aufgeführten Abwitterungsstadien sind im Bild 1 Oberflächenstrukturen bei verschiedenen Abtragstiefen nach Grube und Rechenberg [7] dargestellt.

**Tabelle 1:** Exemplarische Kriterien für Betone mit hohem und geringem Frost-Tausalz widerstand nach RILEM [19], die als Bewertungssystem von Laborprüfungen empfohlen werden aber gleichzeitig auch für die Beurteilung von Bauwerksbetonen verwendet werden können

Anzahl der Frost-Tau-Zyklen	Masseverlust [kg/m <sup>2</sup> ]		maximale Abwitterungstiefe <sup>2)</sup> [mm]		abgewitterter Flächenanteil [%]		Rating ASTM C 672-92 <sup>1)</sup> [-]	
	Widerstand		Widerstand		Widerstand		Widerstand	
	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch	gering	hoch
10	0,5	0,2	2,0	0,2	20	10	1	0
20	1,5	0,3	3,0	0,4	20	20	2	0
25	3,0	0,5	5,0	0,6	40	20	2	1
30	3,8	0,6	6,0	0,6	50	20	3	1
40	4,5	0,8	8,0	0,8	70	25	3	1
50	5,0	<b>0,9</b>	10,0	<b>1,0</b>	90	<b>25</b>	3	<b>1</b>

- <sup>1)</sup>
- 0: keine Abwitterung
  - 1: sehr geringe Abwitterung (max. 3,2 mm Tiefe (1/8 in), keine großen Gesteinskörner sichtbar)
  - 2: geringe bis mäßige Abwitterung
  - 3: mäßige Abwitterung (einzelne große Gesteinskörner sichtbar)
  - 4: mäßige bis starke Abwitterung
  - 5: starke Abwitterung (große Gesteinskörner sind in der gesamten Oberfläche sichtbar)

- <sup>2)</sup> Die Bestimmung der Abwitterungstiefe sollte mit einer Genauigkeit von 0,2 mm vorgenommen werden, ausgehend von einer ungeschädigten Fläche oder einem vergleichbaren Bezugshorizont.



**Bild 1:** Oberfläche eines Betons mit 32 mm Größtkorn bei mittleren Abtragstiefen von 0 - 8 mm nach Grube und Rechenberg [7]

## 2.2 Untersuchungsmethoden

Für die Beurteilung der Oberflächenstruktur eines frostbeanspruchten Bauteils liegt kein allgemein anerkanntes Verfahren vor. Um eine Bewertung vorzunehmen, sollte neben der fotografischen Dokumentation auch der abgewitterte Flächenanteil und die Abwitterungstiefe erfasst werden (vgl. Tabelle 1). Dafür ist es erforderlich einen Bezugshorizont festzulegen. Dies kann z.B. eine Fläche sein, die offensichtlich noch den Ausgangszustand repräsentiert und Schalungs- oder Bearbeitungsstrukturen (geglättete oder abgezogene Fläche) aufweist.

Zur Bestimmung der Rautiefe abgewitterter horizontaler Flächen kann das Sandflächenverfahren nach Kaufmann [13] genutzt werden. Für die spezielle Untersuchung des Oberflächenprofils kann ein Abguss (Kunststoff, Gips) angefertigt werden. Um die abgewitterte Masse zu bestimmen, ist die Rohdichte des Betons in der Oberflächenzone zu ermitteln.

Neben Bohrkernen für Festigkeitsprüfungen, für die häufig ein Durchmesser von 100 mm ausreicht, sind für weitere Untersuchungen, auf die nachfolgend noch hingewiesen wird, und insbesondere für die Prüfung des Frostwiderstandes oder des Frost-Tausalzwidestandes der Bauwerksproben im Labor Bohrkern mit einem Durchmesser von 150 mm zu empfehlen, da hiermit ein größerer Ausschnitt aus der Oberflächenzone für die Prüfungen zur Verfügung steht.

Druckfestigkeitsprüfungen liefern nur orientierende Werte und dürfen nicht getrennt von der Beanspruchungsart bewertet werden. Bei einer Frost-Tauwechselbeanspruchung ohne Taumittleinwirkung kann z.B. nach Siebel [25] ab einer Druckfestigkeit von 45 N/mm<sup>2</sup> von einem hohen Widerstand ausgegangen werden. Proben mit Druckfestigkeiten ab 35 N/mm<sup>2</sup> lassen auf einen ausreichenden Frostwiderstand bei mäßiger Wassersättigung schließen. Liegt dagegen eine Frost-Tauwechselbeanspruchung mit Taumittleinwirkung vor, so kann die Druckfestigkeit nicht ohne Kenntnis der Luftporenkennwerte des Betons bewertet werden. Ist ein ausreichender Abstandsfaktor (Bauwerksproben:  $\leq 0,24$  mm) und Mikroluftporengehalt (Bauwerksproben:  $\geq 1,5$  Vol.-%) vorhanden, so gehen Stark und Wicht [29] von einem Erfahrungswert für die Druckfestigkeit von 30 N/mm<sup>2</sup> aus, ab dem ein hoher Widerstand bei dieser Beanspruchungsart gegeben ist.

Da aber die Druckfestigkeit keine Aussage über die Eigenschaften der Bauteilrandzone (0 - 20 mm) liefert, die den Frost- bzw. Frost-Tausalzwidestand des Betons entscheidend bestimmt, sind weitere Methoden heranzuziehen, die eine Beurteilung der Gefügestruktur ermöglichen. Probenmaterial aus einer größeren Tiefe des Bauteils sollte parallel als Vergleichsmaterial entnommen werden, um herstellungsbedingte Einflüsse auf die Beschaffenheit der Bauteilrandzone des Bauteils zu erfassen. Dazu sind insbesondere zu zählen: die Verdichtung, Einflüsse der Schalhaut und des Trennmittels, das Glätten bzw. Abziehen der Oberfläche horizontaler Flächen und die Nachbehandlung.

Folgende Methoden, die auch im Heft 422 des DAfStb [3] beschrieben sind, können herangezogen werden, wobei der versuchstechnische Aufwand entsprechend der angegebenen Reihenfolge steigt:

- Rohdichte,
- Porosität,
- Ultraschall-Laufzeit oder Resonanzfrequenz bzw. dynamischer E-Modul,
- Transportkennwerte (kapillare Wasseraufnahme, Gaspermeabilität),

- Schnitte bzw. Schliffe für die Beurteilung von Gefügeschäden (Risse) und Ermittlung von Luftporenkennwerten,
- Porenstruktur (z.B. mittels Quecksilberdruckporosimetrie),
- Frost- oder Frost-Tausalzprüfung im Labor.

Eine grundsätzliche Aussage, welcher Widerstandskategorie (hoch, mittel, niedrig) der Bauwerksbeton zuzuordnen ist, ist nur durch Frost- bzw. Frost-Tausalzprüfung an Bohrkernen möglich. Entsprechende Methoden enthält der Sachstandbericht des DAfStb [27]. Für die Untersuchung von Bauwerksproben bieten sich in der Regel Bohrkernscheiben mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 70 mm an [2]. Hiermit kann die Oberfläche der Konstruktion aber auch Probenmaterial aus tieferen Bereichen beurteilt werden.

Zur Beurteilung der Betonqualität können die Ergebnisse der aufgeführten Untersuchungsmethoden, die an Proben aus dem Rand- und Kernbereich gewonnen wurden, gegenübergestellt werden. Sind die Ergebnisse des Kernbereichs als Bezugsbasis nutzbar (Erhärtung des Betons unter optimalen Bedingungen), so sollte es möglich sein, die Betonqualität der Bauteiloberfläche im Vergleich zu beurteilen und Einflüsse herauszuarbeiten, die aus den Herstellungsbedingungen und der Nachbehandlung resultieren.

Korrelationen zwischen Transportkenngrößen und dem Frostwiderstand von Beton sind in der Literatur vereinzelt zu finden. Eine Zusammenstellung solcher Korrelationen geben Kropp und Hilsdorf [14]. Umfassende Hinweise zu Prüfverfahren, die im Labor bzw. vor Ort für die Beurteilung des Zustands von Bauwerksbetonen herangezogen werden können, sind in [27] enthalten. Ergänzende Hinweise zur Schadensaufnahme liefert auch die in [26] veröffentlichte Systematik zur Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

Neben den aufwendigen Frostprüfungen an Bauwerksproben, die auch nicht immer widerspruchsbzw. zweifelsfreie Ergebnisse liefern [10, 15, 25, 31], hat es nicht an Versuchen gefehlt die Frostbeständigkeit anhand eines Kennwerts zu beurteilen, der möglichst sicher und auch schnell bestimmbar sein sollte. Folgende grundsätzliche Entwicklungen sind dabei dem Schrifttum zu entnehmen.

Hirschwald [12] führte umfangreiche Versuche an Natursteinen durch. Basierend auf der Betrachtung des Porenraums, der für eine spannungsfreie Ausdehnung des gefrierenden Wassers im Porensystem theoretisch mindestens erforderlich ist (9 Vol.-%), legte er einen praktischen Sättigungsgrad  $S \leq 0,8$  fest, der von frostbeständigen Natursteinen bei der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nicht überschritten werden sollte.

Schäfer [20] untersuchte die Eignung des Sättigungsgrades zur Klassifizierung von Betonen hinsichtlich des Frostwiderstandes und wertete das internationale Schrifttum zu dieser Problematik aus. Er kam zu dem Schluss, dass mit dem Sättigungsgrad (ehemals DIN 52103) die sichere Beurteilung des Frostwiderstands von Beton nicht möglich ist. Begründet wird dies insbesondere mit dem fehlenden Nachweis, dass der Frostwiderstand mit steigendem Sättigungsgrad graduell sinkt. Auf der Basis seiner Untersuchungen führte Schäfer einen Kennwert mit der Bezeichnung "Porenverhältnis" ein. Dieser Quotient aus dem Mikroluftporengehalt ( $L_{300}$  bzw.  $A_{300}$ ) und dem Kapillarporengehalt (vereinfacht: volumenbezogene Wasseraufnahme des Betons unter Atmosphärendruck), der mit 100 zu multiplizieren ist, steht in deutlich besserer Beziehung zum Frostwiderstand als der Sättigungsgrad.



Werte bis 4 deuten dabei auf einen kleinen, Werte von 4 bis 10 auf einen mittleren und Werte über 10 auf einen großen Frostwiderstand des Betons hin. Wurde der Kennwert "Porenverhältnis" zudem mit der Biegezugfestigkeit vor der Frostbeanspruchung multipliziert, so war die Korrelation mit dem Frostwiderstand in den Untersuchungen von Schäfer noch enger.

Fagerlund [4, 5] zeigte, wie der kritische Sättigungsgrad, d.h. der Sättigungsgrad, ab dem eine Schädigung des Betons durch das gefrierende Wasser eintritt, betonspezifisch bestimmt werden kann und welche Faktoren beeinflussend wirken. Damit verdeutlichte er die Komplexität, die bei der Beurteilung des Frostwiderstands von Beton auf der Basis des Sättigungsgrades zu beachten ist.

### **3 Beschreibung der untersuchten Bauwerke**

#### **3.1 Fahrbahndecke - BAB A 5 bei Kronau**

Im Juni 1999 wurde unter Verwendung eines CEM II/B-S 32,5 R der Streckenabschnitt der BAB A 5, Frankfurt - Basel, AK Walldorf - AS Bruchsal, vom Betriebskilometer 594+255 bis 598+210 (FDE St. Leon II/99) erneuert [8]. Während der Herstellung des Fahrbahndeckenbetons konnten Temperatursensoren in den rechten und den mittleren Fahrstreifen eingebaut und eine Messstelle eingerichtet werden [9].

Die Lage der Strecke ist Bild 2 zu entnehmen. Geographisch befindet sie sich im nördlichen Oberrheingraben zwischen den Städten Mannheim und Karlsruhe auf einer Höhe über NN von ca. 107 m.

Eine Teilansicht der Strecke, in dem auch die Messstelle für die Erfassung der Temperatur in der Fahrbahn sowie der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte liegt, zeigt das Bild 3.

Der durchschnittliche tägliche Verkehr wird für den zu beobachtenden Streckenabschnitt auf der BAB A 5 in der Karte der Verkehrsstärken von 2000, bezogen auf den gesamten Querschnitt mit insgesamt 6 Fahrstreifen, wie folgt angegeben:

- nördlich der Anschlussstelle Kronau 96.390 Kraftfahrzeuge in 24 Stunden, davon Schwerverkehr  $DTV^{(SV)} = 15.110$ ,
- südlich der Anschlussstelle Kronau 89.480 Kraftfahrzeuge in 24 Stunden, davon Schwerverkehr  $DTV^{(SV)} = 12.590$ .

Aufgrund der hohen Wassersättigung des Straßenbetons und des Einsatzes von Tausalzen ist die Beanspruchung der Betonfahrbahn entsprechend der DIN 1045-2/DIN EN 206-1 in die Expositions-kategorie XF4 einzuordnen.

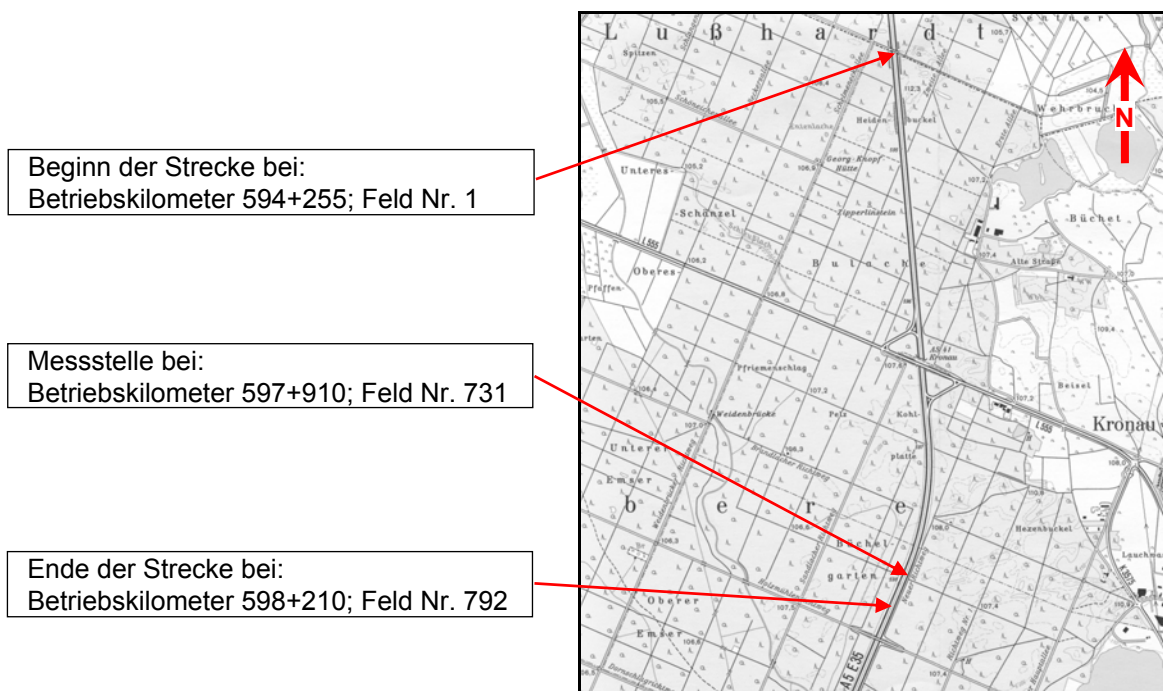
Der Fahrbahnaufbau gliedert sich im untersuchten Streckenabschnitt von oben nach unten wie folgt:

- Fahrbahndecke, 26 cm,
- Bitumenversiegelung U 60 K mit Splittabstreuerung 2/5,
- hydraulische Verfestigung, 30 cm,

- Kiessand.

Im Bild 4 ist der Fahrbahnaufbau an zwei Bohrkernen aus dem Streckenabschnitt dargestellt. Angaben zur Zusammensetzung des Betons der Fahrbahndecke enthält die Tabelle 2 und zur Verfestigung die Tabelle 3.

In den Jahren 1999 bis 2005 erfolgten insgesamt 6 Bauwerksbesichtigungen, bei denen die Proben für die Untersuchungen (Bohrkerne) entnommen werden konnten.



**Bild 2:** Lageplan der Untersuchungsstrecke, BAB A 5 Frankfurt – Basel, zwischen dem AK Walldorf und der Anschlussstelle Bruchsal in Höhe der AS Kronau



**Bild 3:** Streckenabschnitt der BAB A 5 bei Kronau



**Bild 4:** Bohrkerne aus der Plattenmitte (linkes Probenteil: Betondecke, rechtes Probenteil: Verfestigung)  
**oben:** bei Betriebskilometer 594+835  
**unten:** bei Betriebskilometer 597+905

**Tabelle 2:** Zusammensetzung des Betons im Untersuchungsabschnitt der BAB A 5 bei Kronau

Zement	CEM II/B-S 32,5 R; im Mittel 360 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung	Sand 0/2 und Feinkies 2/8 aus dem nördlichen Oberrheingebiet Splitt (Quarzporphyr) 8/11, 11/16 und 16/22 aus dem Nordschwarzwald
Wassermenge	im Mittel 0,43
Zusatzmittel	LP-Bildner und Fließmittel

**Tabelle 3:** Zusammensetzung der Verfestigung im Untersuchungsabschnitt der BAB A 5 bei Kronau

Bindemittel	HT 35, im Mittel 190 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung	Sand 0/2 sowie rezykliertes Ausbaumaterial (Beton, Teer-Pectacete-Verfestigung)
Druckfestigkeit	10 N/mm <sup>2</sup>

### 3.2 Wasserbecken in einem Wasserwerk bei Karlsruhe

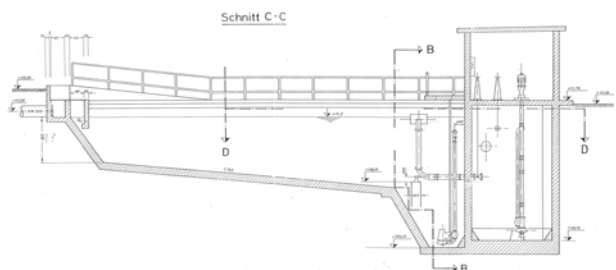
Bei den im Bild 5 dargestellten offenen Wasserbecken handelt es sich um Absetzbecken, in denen das Spülwasser, das bei der Reinigung der Trinkwasserfilter (Kiesfilter) anfällt, gesammelt wird. Während einer mehrtägigen Standzeit des Spülwassers setzen sich die darin enthaltenen Eisen- und Manganverbindungen ab. Das überstehende Wasser wird abgepumpt und der Schlamm verbleibt im

Beckentiefpunkt (Sumpf). In größeren Zeitabständen entfernt man den Eisen-Mangan-Schlamm aus dem Sumpf.

Entsprechend dieser Nutzung wechselt der Wasserstand in den Becken, so dass die Wände bis etwa zur halben Höhe (maximaler Füllstand) und die Böden der Becken periodisch mit Wasser gesättigt werden. In der kalten Jahreszeit sind neben den Wandbereichen, die sich im Übergang vom Wasser zur Luft befinden, folglich auch die tiefer liegenden wassergesättigten Wandbereiche und die Böden der direkten Frostbeanspruchung ausgesetzt. Diese Beanspruchung ist entsprechend der aktuellen DIN 1045-2/DIN EN 206-1 in die Expositionsklasse XF3 einzuordnen.

Die in den Jahren 1965/1966 errichtete Stahlbetonkonstruktion wurde im Jahre 2000 instand gesetzt. Auf die Wände wurde eine vollflächige Spritzbetonschicht im Trockenspritzverfahren in einer Dicke von ca. 40 ... 50 mm (zweilagig, obere Lage geglättet) aufgetragen und auf die Bodenplatte eine Betonschicht (Verbundestrich) in einer Dicke von 50 ... 150 mm. Die Zusammensetzung der Betone enthält die Tabelle 4.

In den Jahren 2000 bis 2005 erfolgten insgesamt 4 Bauwerksbesichtigungen, bei denen die Proben für die Untersuchungen (Teilstücke der Betonschichten) entnommen werden konnten.



**Bild 5:** Absetzbecken für das Filtrerrückspülwasser in einem Wasserwerk bei Karlsruhe, entleerter Zustand; links: Ansicht, rechts: Längsschnitt

**Tabelle 4:** Zusammensetzung des Spritzbetons an den Beckenwänden und des Betons auf den Böden in den Wasserbecken

	Wände	Böden
Zement	CEM I 42,5 R; im Mittel 470 kg/m <sup>3</sup>	CEM I 32,5 R; im Mittel 340 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung	Sand 0/4 aus dem Gebiet der Saar	Sand 0/2 und Feinkies 2/8 aus dem Gebiet der Saar
Wasserzementwert	im Mittel 0,53	im Mittel 0,60
Zusatzmittel	ohne	ohne

## 4 Temperaturmessungen in der Fahrbahndecke

### 4.1 Methode

Während der Herstellung der Fahrbahndecke im Streckenabschnitt der BAB A 5, Frankfurt - Basel zwischen dem Autobahnkreuz Walldorf und der Anschlussstelle Bruchsal, wurden beim Betriebskilometer 597+910 in den rechten und den mittleren Fahrstreifen der Strecke jeweils 4 Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Diese Temperatursensoren dienen zur Erfassung der temperaturbedingten Beanspruchung der Fahrbahndecke im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Straßenwesen BASt geförderten Forschungsvorhabens. In [9] sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Bild 6 zeigt die Lage der Temperatursensoren in der Fahrbahn. Die Lage der Messstelle ist im Bild 2 dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass der Streckenabschnitt der BAB A 5 nahezu in Nord-Süd-Richtung verläuft und von einem Waldgebiet umgeben ist. Der Abstand zwischen der Fahrbahn und dem Waldrand beträgt etwa 15 m (vgl. Bild 3). Damit ist der Bereich der Fahrbahn, in dem sich die Temperatursensoren befinden, folglich ganztägig der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Durch die Bäume wird der Bereich nur beim unmittelbaren Auf- bzw. Untergang der Sonne beschattet.

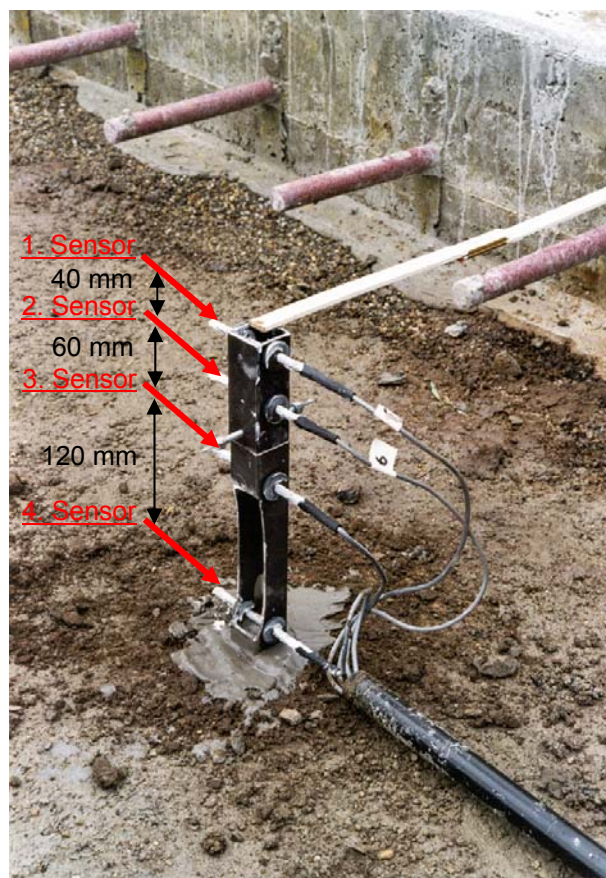
Die Positionierung der Sensoren erfolgte vor dem Betoneinbau in einem Haltegestell, um eine stabile Lage während des Übergangs des Gleitschalungsfertigers zu gewährleisten. Das Haltegestell bestand aus einem Stahlprofil mit PVC-Buchsen, in denen die Sensoren stecken. Dargestellt ist die Einbausituation in den Bildern 7 und 8.

Der Abstand zwischen den 4 Temperatursensoren innerhalb der Fahrbahndecke ist jeweils durch das Haltegestell einheitlich vorgegeben (vgl. Bild 7). Er beträgt zwischen dem 1. Sensor (oberen) und dem 2. Sensor 40 mm, zwischen dem 2. und dem 3. Sensor 60 mm und dem 3. und dem 4. Sensor (unteren) 120 mm.



**Bild 6:** Ansicht der Messstelle (Blick Richtung Süden); die roten Pfeile markieren die Orte der Temperaturmessung in der Fahrbahndecke; rechts im Bild ist der Schutzkasten für die Datenerfassungseinheit und die Stromversorgung sowie der Mast mit den Sensoren für die Erfassung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte zu erkennen





**Bild 7:** Anordnung der Sensoren für die Temperaturmessung in der Fahrbahndecke

Aufgrund der Einbaubedingungen vor Ort waren geringfügige Unterschiede in der Höhenlage unter der Fahrbahnoberfläche zwischen den Sensoren im rechten und mittleren Fahrstreifen unvermeidlich. So liegt der obere Sensor im rechten Fahrstreifen 20 mm und im mittleren Fahrstreifen 15 mm unter der Oberfläche. Daraus ergeben sich folgende Einbautiefen:

- im rechten Fahrstreifen von - 20 mm, - 60 mm, - 120 mm und - 240 mm,
- im mittleren Fahrstreifen von - 15 mm, - 55 mm, - 115 mm und - 235 mm.

Der Abstand der Temperaturmessstellen von der Außenkante der Fahrbahndecke beträgt 3,5 m (rechter Fahrstreifen) und 7,5 m (mittlerer Fahrstreifen). Damit liegen die Sensoren jeweils im Bereich der rechten Rollspur (vgl. Bild 8).

An einem Mast neben der Fahrbahn befanden sich zusätzlich zu den Messstellen in den Fahrstreifen Sensoren, mit denen die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte am Einbauort in ca. 2 m Höhe über der Fahrbahn gemessen werden konnte (vgl. Bild 6). Weiterhin war an diesem Mast auch der Schutzkasten für die prozessorgesteuerte Speichereinheit vom Typ Squirrel 1202 der Firma Grant und die Stromversorgung (12 V Akkumulator) montiert.



**Bild 8:** Einbau der Haltegestelle mit den Sensoren für die Temperaturmessung im rechten und mittleren Fahrstreifen, jeweils im Bereich der rechten Rollspur

Für die Temperaturmessungen in den Fahrbahnen wurden Thermistoren Typ U mit einer Genauigkeit im Bereich zwischen 0 °C und 75 °C von  $\pm 0,2$  °C verwendet. Die Thermistoren befanden sich in Edelstahlhülsen (vgl. Bild 7). Die Messung der Lufttemperatur erfolgt mittels Platin-Widerstand Pt 1000, der eine Genauigkeit im Bereich zwischen -10 °C und 40 °C von  $\leq \pm 0,3$  °C, aufweist.

Zur Messung der relativen Luftfeuchte (r.F.) diente ein kapazitiver Polymer-Sensor des Typs Humicap<sup>®</sup> 180 mit einer Genauigkeit im Bereich zwischen 0 und 90 % r.F. von  $\pm 2$  % r.F. und im Bereich zwischen 90 und 100 % r.F. von  $\pm 3$  % r.F.. Der Feuchtesensor wurde im zeitlichen Abstand von jeweils ca. 1,5 Jahren kalibriert bzw. ausgetauscht.

Die Messwerte wurden kontinuierlich vom Einbau des Betons am 08. Juni 1999 bis zum 04. Mai 2006 im 10-Minuten-Takt aufgezeichnet. Da die Speicherung der Messdaten im Sommer 1999 auf der Grundlage der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ) begann, wurde diese Zeiteinstellung (MESZ) während des gesamten Messzeitraumes ununterbrochen beibehalten. Alle Zeitangaben im vorliegenden Bericht basieren folglich auf der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ).

## 4.2 Ergebnisse - Überblick

An der Messstelle wurden neben dem Temperaturngang in der Fahrbahndecke auch die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte erfasst. Hinsichtlich der Einordnung dieser lokalen Klimadaten kann ein Vergleich mit den Daten der nächstgelegenen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes im Oberrheingraben vorgenommen werden. Dies sind die Stationen Mannheim und Karlsruhe, die nördlich bzw. südlich der Strecke gelegen sind. Für den Zeitraum von 1961 – 1990, d.h. für die klimatologische Bezugsperiode, sind die in der Tabelle 5 zusammengestellten Mittelwerte verfügbar [17]. Die Tabelle 6 enthält die Zusammenstellung der über ein Jahr gemittelten Daten und die Extremwerte, die an der Messstelle beobachtet wurden.

Das in den Tabellen 6 und 7 angegebene mittlere tägliche Maximum  $m_X$  bzw. Minimum  $m_N$  der Temperatur ist der Quotient aus der Summe der Tagesmaxima bzw. Tagesminima des Jahres und der Anzahl der Tage des Jahres. Der Quotient aus der Summe der Tagesmittelwerte und der Anzahl der Tage des Jahres liefert das mittlere tägliche Mittel  $m_M$ . Der Tagesmittelwert berechnet sich als Quotient aus der Summe der Einzelwerte eines Tages und der Anzahl der registrierten Messwerte eines Tages (144 Messwerte). Berücksichtigt wurden bei der Berechnung dieser Daten nur die Jahre des Messzeitraums für die jeweils die kompletten Daten vom 01. Januar bis 31. Dezember vorliegen. Dementsprechend fehlen die Jahre 1999 (Daten ab 08.06.1999) und 2006 (Daten bis 04.05.2006).

**Tabelle 5:** Klimadaten der Stationen in Mannheim (nördlich der Messstelle) und Karlsruhe (südlich der Messstelle) für den Zeitraum 1961-1990 nach [17]

	Mannheim	Karlsruhe
mittlere tägliche Temperatur, Maximum $m_{TX}$ / Minimum $m_{TN}$ [°C]		
Januar	3,8 / -1,4	3,8 / -1,4
Februar	6,0 / -0,7	6,0 / -0,7
März	10,5 / 1,9	10,7 / 1,9
April	15,0 / 4,9	15,1 / 4,9
Mai	19,7 / 9,0	19,7 / 8,9
Juni	22,8 / 12,2	22,8 / 12,2
Juli	24,8 / 13,8	25,2 / 14,0
August	24,6 / 13,6	24,8 / 13,8
September	21,1 / 10,6	21,2 / 10,6
Oktober	15,0 / 6,6	15,1 / 6,7
November	8,3 / 2,4	8,5 / 2,4
Dezember	4,7 / -0,4	4,8 / -0,4
Jahr	14,7 / 6,1	14,8 / 6,1
mittleres tägliches Temperaturmittel $m_{TM}$ [°C]	10,2	10,3
absolutes Temperaturmaximum $x_{TX}$ [°C]	36,7	38,5
absolutes Temperaturminimum $x_{TN}$ [°C]	-20,5	-20,0
mittlere jährliche Anzahl der Eistage (Temperaturmaximum < 0 °C) [d]	14	14
mittlere jährliche Anzahl der Frosttage (Temperaturminimum < 0 °C) [d]	66	68
mittlere jährliche Anzahl der Sommertage (Temperaturmaximum $\geq$ 25 °C) [d]	51	53
mittlere relative Feuchte [%]	75	76
mittlere jährliche Niederschlagshöhe [mm]	668	770
mittlere jährliche Sonnenscheindauer [h]	1673	1691



**Tabelle 6:** Jahresmittelwerte und -extremwerte der Lufttemperatur und der rel. Luftfeuchte im Messzeitraum

		2000	2001	2002	2003	2004	2005	Mittel
Lufttemperatur [°C]	mX	16,2	16,2	16,2	17,2	16,1	16,1	<b>16,3</b>
	xX	34,8	34,8	36,4	<b>39,8</b>	33,7	35,6	<b>35,9</b>
	mN	7,3	7,1	7,2	6,4	6,6	6,4	<b>6,8</b>
	xN	-10,2	-14,9	<b>-16,8</b>	-13,1	-8,4	-15,9	<b>-13,2</b>
	mM	11,8	11,5	11,6	11,6	11,2	11,1	<b>11,5</b>
relative Luftfeuchte [%]	mX	94	92	92	91	93	93	<b>93</b>
	xX	99	99	98	100	100	98	<b>99</b>
	mN	56	54	56	48	53	53	<b>53</b>
	xN	15	22	21	15	20	21	<b>19</b>
	mM	79	77	77	71	76	77	<b>76</b>
mX: mittleres tägliches Maximum		mN: mittleres tägliches Minimum						
xX: absolutes Maximum		xN: absolutes Minimum						
mM: mittleres tägliches Mittel								

Aus der Tabelle 6 erkennt man, dass die gemessenen mittleren Werte gegenüber den in der Tabelle 5 für die Bezugsperiode angegebenen Werte etwas nach oben verschoben sind. Das absolute Temperaturmaximum der Bezugsperiode 1961 - 1990 wurde im Messzeitraum überschritten, das absolute Temperaturminimum aber nicht erreicht.

Insgesamt gesehen lag der Messzeitraum in einer Periode mit einem tendenziell wärmeren Klima als in der Bezugsperiode 1961 - 1990 (vgl. Tabelle 5 und 6). Dies resultiert insbesondere daraus, dass das Jahr 2000 als das wärmste Jahr des 20. Jahrhunderts (1901 - 2000) eingestuft wird und im Jahr 2003 der heißeste Sommer in Süddeutschland seit Beginn der Aufzeichnung der Klimadaten im Jahr 1755 auftrat [18]. In Karlsruhe wurde mit 40,2 °C das absolute Temperaturmaximum für Deutschland am 9. und 13. August 2003 registriert. An der Messstelle trat ein absolutes Temperaturmaximum mit 39,8 °C am 13.08.2003 auf.

Weiterhin enthält die Tabelle 6 die über ein Jahr gemittelte rel. Luftfeuchte und deren Extremwerte. Das mittlere tägliche Mittel der rel. Luftfeuchte lag in 5 von 6 Jahren mit 76 % bis 79 % etwas über dem Mittelwert der Bezugsperiode 1961 - 1990 (75 % bzw. 76 %). Auffällig ist die niedrige rel. Luftfeuchte im Jahr 2003. Der heiße Sommer war auch durch geringe Niederschlagsmengen gekennzeichnet, die in Süddeutschland zum Teil nur bei 50 bis 75 % des vieljährigen Mittels der Bezugsperiode von 1961 - 1990 lagen.

Die jeweils über ein Jahr gemittelten Daten zum Temperaturgang in der Fahrbahndecke sowie die Extremwerte sind in der Tabelle 7 zusammengefasst. Aus der Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass im mittleren Fahrstreifen größere Extremwerte als im rechten Fahrstreifen auftraten. Das absolute Maximum im Messzeitraum zeigte sich mit 43,9 °C und das absolute Minimum mit -12,9 °C jeweils im mittleren Fahrstreifen. Auch im mittleren Mittel (mM) unterscheiden sich die Fahrstreifen. Ein etwas höherer Wert ist für den rechten Fahrstreifen festzustellen. Als Ursache für dieses Phänomen ist der stärkere Verkehr, insbesondere der stärkere Schwerlastverkehr, im rechten Fahrstreifen anzunehmen, der eine stärkere Luftbewegung erzeugt und damit die Erwärmung des rechten Fahrstreifens im Sommer sowie dessen Abkühlung im Winter geringfügig vermindert.

**Tabelle 7:** Jahresmittelwerte und -extremwerte der Temperatur [°C] in der Fahrbahndecke im Messzeitraum

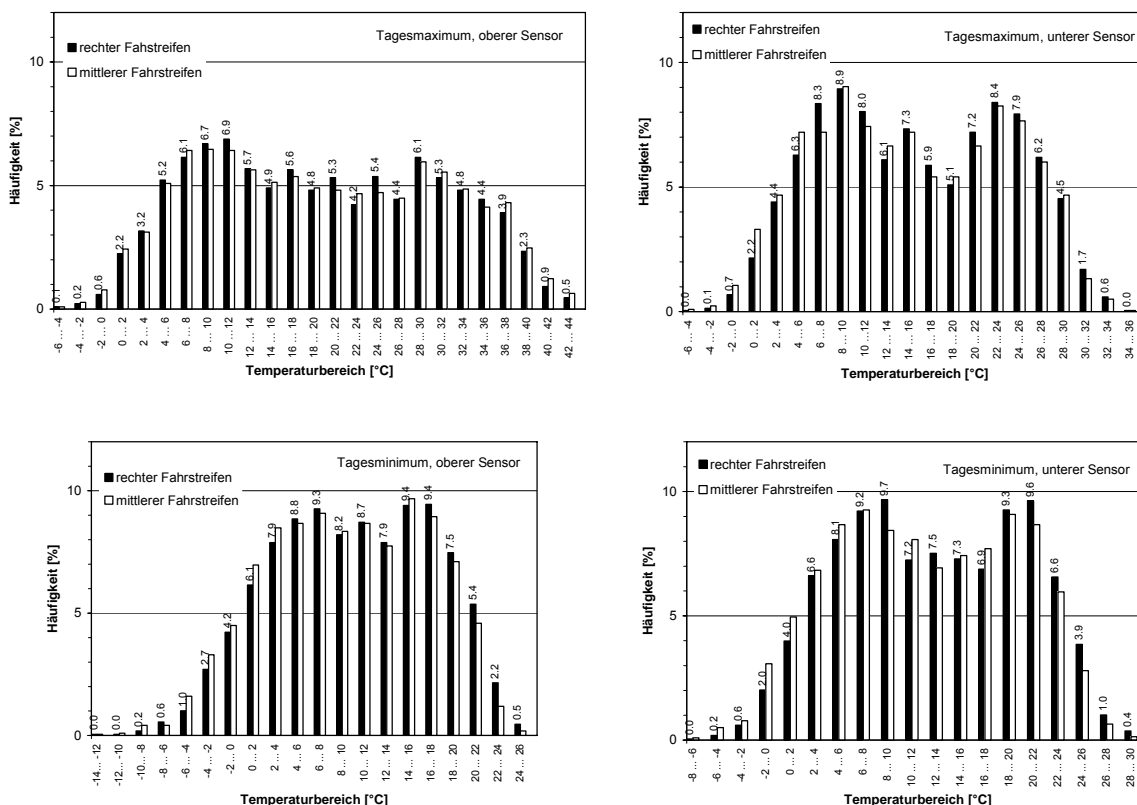
			2000	2001	2002	2003	2004	2006	Mittel
rechter Fahrstreifen	- 20 mm	mX	19,6	19,4	19,3	20,9	19,3	19,7	<b>19,7</b>
		xX	41,3	40,2	42,1	<b>43,5</b>	41,6	43,1	<b>42,0</b>
		mN	10,4	10,0	10,2	10,1	9,7	9,8	<b>10,0</b>
		xN	-7,3	-9,5	<b>-12,4</b>	-9,4	-5,2	-9,2	<b>-8,8</b>
		mM	14,2	13,9	14,0	14,6	13,6	13,8	<b>14,0</b>
	- 60 mm	mX	18,2	18,1	18,1	19,5	18,0	18,2	<b>18,4</b>
		xX	38,6	37,9	39,7	41,2	39,2	40,5	<b>39,5</b>
		mN	11,0	10,6	10,8	10,8	10,3	10,4	<b>10,7</b>
		xN	-6,5	-8,3	-11,4	-8,4	-4,3	-8,0	<b>-7,8</b>
		mM	14,1	13,8	13,9	14,5	13,6	13,8	<b>14,0</b>
	- 120 mm	mX	17,0	16,9	16,9	18,0	16,7	17,0	<b>17,1</b>
		xX	35,7	34,8	36,5	38,4	35,9	37,6	<b>36,5</b>
		mN	11,7	11,5	11,6	11,7	11,1	11,3	<b>11,5</b>
		xN	-5,4	-6,5	-10,0	-7,1	-3,1	-6,3	<b>-6,4</b>
		mM	14,1	13,9	14,0	14,6	13,7	13,9	<b>14,0</b>
	- 240 mm	mX	15,6	15,3	15,5	16,5	15,7	16,1	<b>15,8</b>
xX		31,0	30,6	31,4	34,1	31,6	32,8	<b>31,9</b>	
mN		12,7	12,5	12,6	13,2	12,7	13,1	<b>12,8</b>	
xN		-3,5	-3,6	-7,4	-4,6	-1,9	-2,3	<b>-3,9</b>	
mM		14,1	13,8	13,9	14,8	14,2	14,5	<b>14,2</b>	
mittlerer Fahrstreifen	- 15 mm	mX	19,8	19,5	19,5	21,0	19,4	19,7	<b>19,8</b>
		xX	42,1	40,7	42,9	<b>43,9</b>	42,0	43,3	<b>42,5</b>
		mN	9,8	9,5	9,6	9,5	9,0	9,1	<b>9,4</b>
		xN	-8,4	-9,9	<b>-12,9</b>	-9,8	-5,4	-10,3	<b>-9,5</b>
		mM	13,9	13,6	13,7	14,2	13,2	13,4	<b>13,7</b>
	- 55 mm	mX	18,4	18,2	18,2	19,6	18,0	18,3	<b>18,5</b>
		xX	39,3	38,2	40,1	41,5	39,3	40,5	<b>39,8</b>
		mN	10,7	10,4	10,5	10,5	10,0	10,1	<b>10,4</b>
		xN	-7,3	-8,5	-11,7	-8,6	-4,2	-8,8	<b>-8,2</b>
		mM	14,1	13,8	13,9	14,4	13,4	13,6	<b>13,9</b>
	- 115 mm	mX	16,8	16,6	16,6	17,7	16,3	16,6	<b>16,8</b>
		xX	35,7	34,6	36,3	38,1	35,4	36,9	<b>36,2</b>
		mN	11,4	11,0	11,1	11,3	10,6	10,8	<b>11,0</b>
		xN	-6,3	-6,8	-10,4	-7,3	-3,5	-7,1	<b>-6,9</b>
		mM	13,5	13,2	13,3	13,8	12,9	13,1	<b>13,3</b>
	- 235 mm	mX	15,5	15,2	15,2	16,0	14,9	15,0	<b>15,3</b>
xX		31,4	30,6	31,5	34,1	31,2	32,2	<b>31,8</b>	
mN		12,3	12,0	12,1	12,4	11,5	11,7	<b>12,0</b>	
xN		-4,3	-4,1	-7,9	-5,1	-3,3	-4,4	<b>-4,9</b>	
mM		13,8	13,5	13,6	14,1	13,1	13,3	<b>13,6</b>	
mX: mittleres tägliches Maximum			mN: mittleres tägliches Minimum						
xX: absolutes Maximum			xN: absolutes Minimum						
mM: mittleres tägliches Mittel									

Weiterhin ist zu erkennen, dass die jahreszeitliche Spannweite (Sommer - Winter) zwischen der Maximal- und Minimaltemperatur mit zunehmender Tiefe abnimmt. Betrachtet man die Mittelwerte der Jahre 2000 - 2005, so verringert sie sich zwischen absolutem Maximum und absolutem Minimum von ca. 51 K (42 °C bis -9 °C) am oberen Sensor auf ca. 37 K (32 °C bis -5 °C) am unteren Sensor und zwischen mittlerem täglichem Maximum und mittlerem täglichem Minimum von ca. 10 K (20 °C bis 10 °C) am oberen Sensor auf ca. 3 K (15,5 °C bis 12,5 °C) am unteren Sensor. Die Maximalwerte

(mittlere und absolute) sinken dabei mit zunehmender Tiefe und die Minimalwerte (mittlere und absolute) steigen leicht an. Es ist auch zu erkennen, dass die Temperatur in der gesamten Fahrbahn-  
 decke in jedem Winter unter 0 °C absinkt.

Im Bild 9 sind die Häufigkeitsverteilungen der Maximal- und Minimaltemperaturen an den oberen und unteren Sensoren in der Fahrbahndecke dargestellt. Zugrunde liegen die maximalen und die minimalen Temperaturen, die an den Tagen des Zeitraums von 6 Jahren, beginnend mit dem Start der Messungen am 08.06.1999 bis zum 07.06.2005, auftraten. Es zeigt sich, dass das mittlere tägliche Maximum und das mittlere tägliche Minimum nach Tabelle 7 nicht in den Temperaturbereichen liegen, die am häufigsten auftreten, sondern jeweils genau zwischen den zwei ausgeprägten Peaks der Häufigkeitsverteilungen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrstreifen besteht hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens einzelner Temperaturbereiche nicht.

Ansatzweise ist aus dem Bild 9 zu erkennen, dass im mittleren Fahrstreifen Temperaturen über 36 °C bei den Tagesmaxima und Temperaturen unter 4 °C bei den Tagesminima etwas häufiger auftreten als im rechten Fahrstreifen, was auch auf den Einfluss des stärkeren Schwerlastverkehrs im rechten Fahrstreifen, verbunden mit einer stärkeren Luftbewegung, hindeutet.

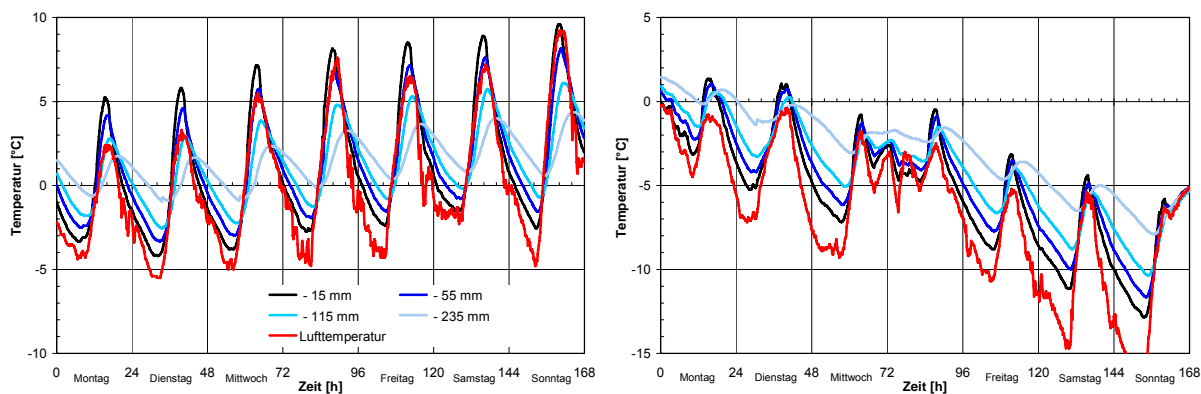


**Bild 9:** Häufigkeitsverteilung der Temperaturen im Zeitraum vom 08.06.1999 bis 07.06.2005  
**links:** oberer Sensor in der Fahrbahndecke bei -20 bzw. -15 mm  
**rechts:** unterer Sensor in der Fahrbahndecke bei -240 bzw. -235 mm  
**oben:** Tagesmaximum; **unten:** Tagesminimum

### 4.3 Ergebnisse - Frostbeanspruchung

Anhand der Daten des Messzeitraums (7 Winter) wurden für die Quantifizierung der Frostbeanspruchung die Eis- und Frosttage, die Häufigkeitsverteilung der dabei zu beobachtenden Minimal- und Maximaltemperaturen der Lufttemperatur und an den oberen Sensoren, die Anzahl der Nulldurchgänge der Temperatur sowie die dabei auftretenden Abkühl- und Auftauraten an den oberen Sensoren in den Fahrstreifen ermittelt.

Beispiele für die Beanspruchung der Fahrbahndecke durch Frost und Auftauvorgänge zeigt das Bild 10. Darin ist eine Woche mit einer großen Anzahl von Nulldurchgängen der Lufttemperatur (Anzahl: 15) und von Nulldurchgängen am oberen Sensor (Anzahl: 13, in einer Tiefe von -15 mm) sowie die Woche, in der die tiefste Temperatur registriert wurde (Luft und Fahrbahn), dargestellt.

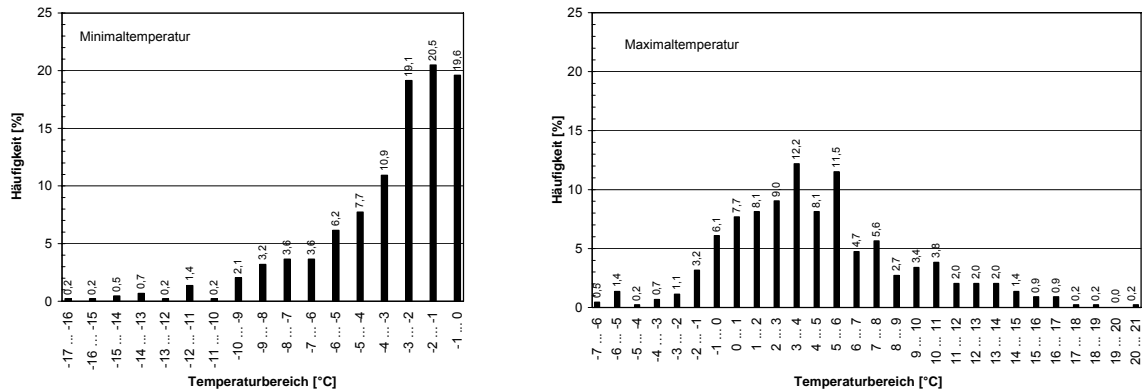


**Bild 10:** Beispiele für die Frostbeanspruchung der Fahrbahndecke im Messzeitraum  
**links:** häufige Frost-Tauwechsel, Temperaturgang in der 8. KW 2003  
**rechts:** tiefste Temperatur im Messzeitraum, Temperaturgang in der 1. KW 2002

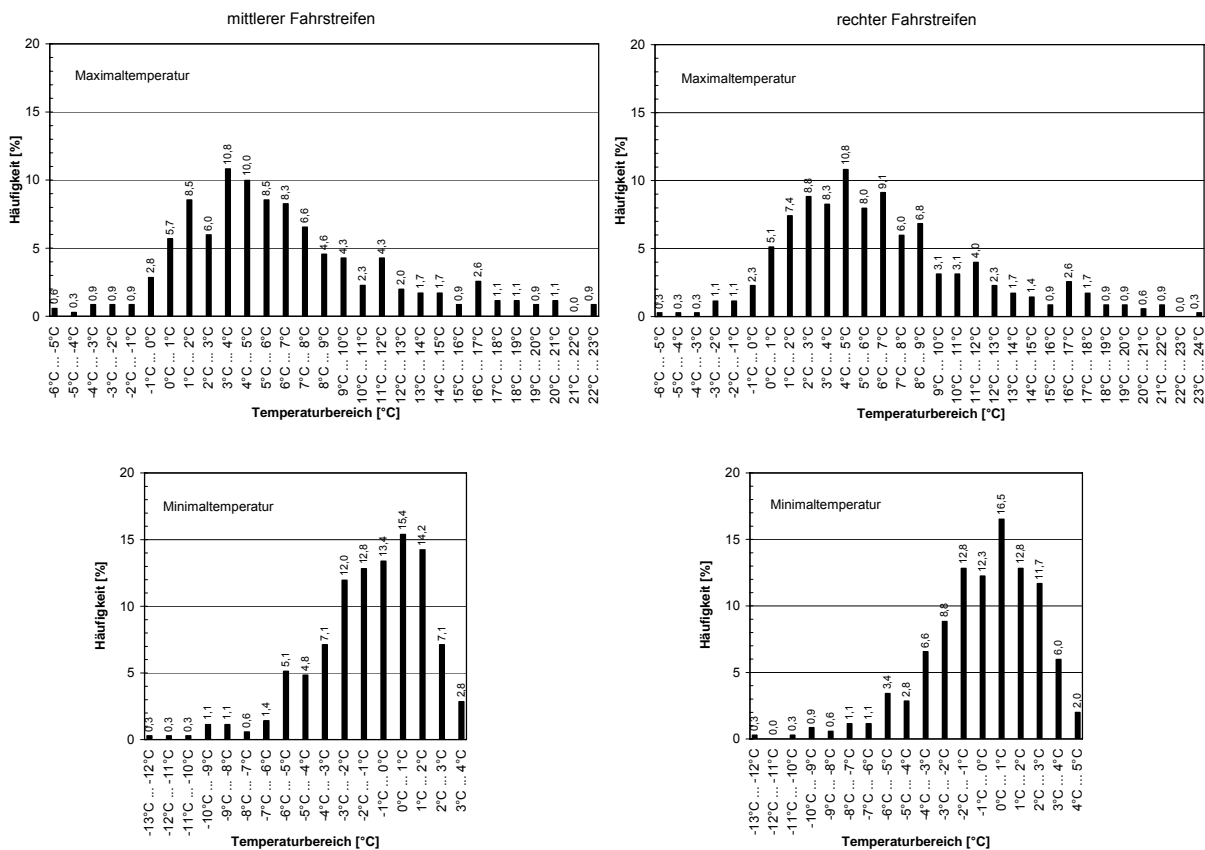
Insgesamt ist festzustellen, dass im Messzeitraum keine extreme Frostbeanspruchung auftrat. Die niedrigste Lufttemperatur lag im Messzeitraum bei  $-16,8\text{ °C}$  und damit deutlich über dem absoluten Minimum, das vom DWD [17] für die Stationen Karlsruhe und Mannheim in der Bezugsperiode von 1961 bis 1990 mit  $-20\text{ °C}$  angegeben wird (vgl. Tabelle 5).

Das Bild 11 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximaltemperatur der Luft an den Frost- und Eistagen. Daraus erkennt man, dass die häufigste Minimaltemperatur im Bereich zwischen  $-1$  und  $-2\text{ °C}$ , d. h. knapp unterhalb des Gefrierpunkts, liegt. Als häufigste Maximaltemperatur ist aus dem Bild 11 eine Temperatur zwischen  $3$  und  $4\text{ °C}$  abzulesen.

Die Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximaltemperatur an den oberen Sensoren in der Fahrbahndecke an Frost- und Eistagen zeigt das Bild 12. Daraus ist zu erkennen, dass die häufigste Minimaltemperatur im Bereich zwischen  $0$  und  $1\text{ °C}$ , d. h. knapp oberhalb des Gefrierpunkts, liegt. Als häufigste Maximaltemperatur ergibt sich aus Bild 12 für den rechten Fahrstreifen eine Temperatur zwischen  $4$  und  $5\text{ °C}$  und für den mittleren Fahrstreifen zwischen  $3$  und  $4\text{ °C}$ .



**Bild 11:** Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximalwerte der Lufttemperatur an Frost- und Eistagen im Messzeitraum  
links: Minimaltemperatur  
rechts: Maximaltemperatur



**Bild 12:** Häufigkeitsverteilung der Minimal- und der Maximaltemperaturen an Frost- und Eistagen am oberen Sensor in der Fahrbahndecke im Messzeitraum  
links: mittlerer Fahrstreifen  
rechts: rechter Fahrstreifen  
oben: Maximum an Frost- und Eistagen; unten: Minimum an Frost- und Eistagen

Summiert man die Häufigkeiten der Minimaltemperaturen im Bild 12 in den Temperaturbereichen über 0 °C, so zeigt sich, dass im gesamten Messzeitraum nur an 50 % (rechter Fahrstreifen) bis 60 % (mittlerer Fahrstreifen) der Eis- und Frosttage die Temperatur in der oberen Zone der Fahrbahndecke unter 0 °C lag. Dies spiegelt sich auch in der Anzahl der Nulldurchgänge an den oberen Sensoren wieder, die in der Tabelle 8 zusammengestellt sind. Theoretisch wären für einen Frosttag zwei Nulldurchgänge anzunehmen.

Aus der Tabelle 8 sind neben den Nulldurchgängen auch die Anzahl der Frost- und Eistage im Messzeitraum an den oberen Sensoren in der Fahrbahndecke zusammengestellt. Man erkennt, dass insbesondere die ersten zwei Winter des Messzeitraums sehr mild waren. Vom DWD [17] wird für die Stationen Karlsruhe und Mannheim, ausgehend von der Bezugsperiode von 1961 bis 1990, eine mittlere Anzahl von 66 (Karlsruhe) und 68 Frosttagen sowie 14 Eistagen angegeben (vgl. Tabelle 5).

Die Nulldurchgänge an den oberen Sensoren in der Tabelle 8 sind ein Maß für die Beanspruchung (Frost-Tauwechsel) der die Oberseite der Betondecke im Messzeitraum ausgesetzt war. Es ist zu erkennen, dass im rechten Fahrstreifen eine geringere Anzahl registriert wurde als im mittleren Fahrstreifen. Weiterhin erkennt man, dass die Intensität der Frostbeanspruchung der Fahrbahndecke, gemessen an der Anzahl der Nulldurchgänge, im Messzeitraum von 1999 bis 2006 anstieg.

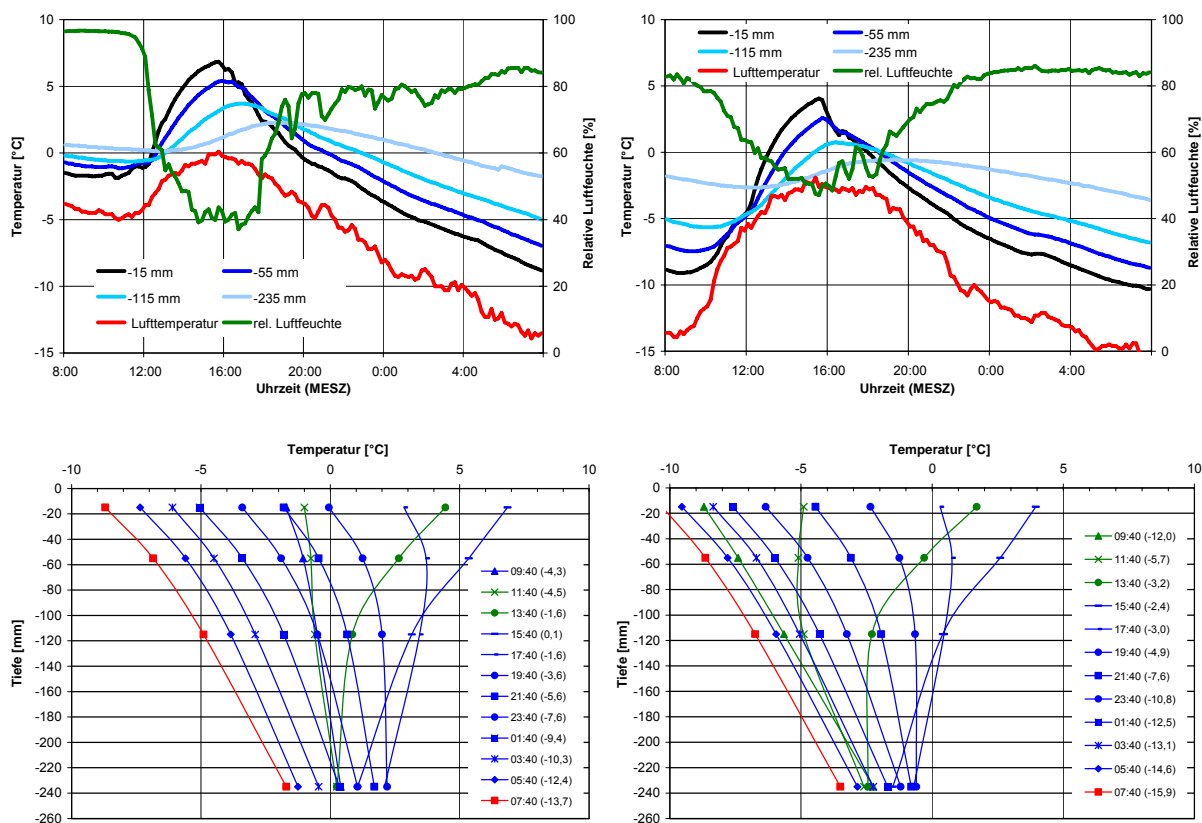
**Tabelle 8:** Anzahl der Frost- und Eistage sowie der Nulldurchgänge am oberen Sensor im rechten und im mittleren Fahrstreifen im Messzeitraum

Winter	Lufttemperatur		Fahrbahntemperatur - Nulldurchgänge	
	Frosttage	Eistage	mittlerer Fahrstreifen Sensor bei -15 mm	rechter Fahrstreifen Sensor bei -20 mm
1999/2000	43	6	38	36
2000/2001	42	1	40	36
2001/2002	42	16	52	48
2002/2003	53	14	74	58
2003/2004	66	2	92	70
2004/2005	57	14	104	76
2005/2006	73	9	82	68
Frosttag: Temperaturminimum der Luft unter 0 °C Eistag: Temperaturmaximum der Luft unter 0 °C Nulldurchgang: Vorzeichenwechsel der Temperatur (Frost-Tauwechsel-Beanspruchung)				

Für die Abschätzung der bei der Frostbeanspruchung auftretenden Amplituden der Temperatur können die Bilder 11 und 12 herangezogen werden. Daraus ist zu erkennen, dass ca. 95 % der Temperaturamplituden an Eis- und Frosttagen in der oberen Zone der Fahrbahndecke -6 °C nicht unterschreiten und 17 °C nicht überschreiten. Bei der Lufttemperatur liegen 95 % der Temperaturamplituden unterhalb des Gefrierpunktes im Bereich bis -9 °C und oberhalb des Gefrierpunktes im Bereich bis 14 °C. Hierbei ist aber zu beachten, dass diese Werte nicht unmittelbar hintereinander auftreten, sondern zeitversetzt an verschiedenen Tagen der Winterperiode. Die größte beobachtete winterliche

Temperaturspanne betrug am 27./28.02.2005 (8./9. KW 2005), gemessen am oberen Sensor im mittleren Fahrstreifen, ca. 16 K (von 7 °C am 27.02.2005 bis -9 °C am 28.02.2005).

Ein weiterer Parameter zur Charakterisierung der Frost-Tauwechselbeanspruchung ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperaturänderung vollzieht. Bild 13 zeigt den kompletten Temperaturverlauf an zwei Tagen, an denen auch die größten Abkühl- und Auftauraten im gesamten Messzeitraum auftraten. Da die Speicherung der Messdaten im Sommer 1999 auf der Grundlage der mitteleuropäischen Sommerzeit (MESZ) begann, wurde diese Zeiteinstellung während des gesamten Messzeitraumes ununterbrochen beibehalten und die Zeitangaben im folgenden Text beziehen sich darauf.



**Bild 13:** Temperaturgang mit der größten Abkühl- und Auftaurate bei Frostbeanspruchung im Messzeitraum am oberen Sensor

**links:** Abkühlrate am 27.02.2005 mit 0,95 K/h von 15:40 - 08:00 Uhr und 2,3 K/h von 16:20 - 17:50 Uhr

**rechts:** Auftaurate am 28.02.2005 mit 2,3 K/h von 08:30 - 15:30 Uhr und 4,1 K/h von 12:10 - 13:10 Uhr sowie einer Abkühlrate von 2,5 K/h zwischen 15:40 - 16:40 Uhr

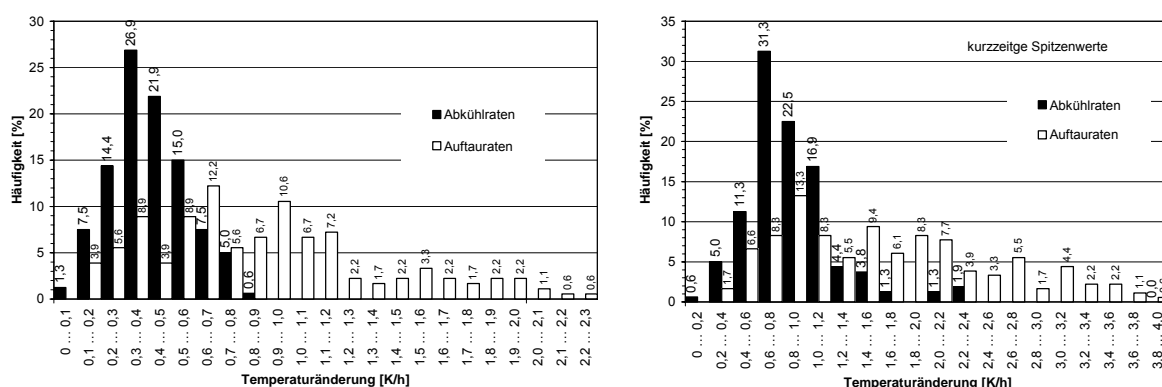
**oben:** Temperaturgang in der Fahrbahndecke (mittlerer Fahrstreifen)

**unten:** Veränderung des Temperaturgradienten im Tagesverlauf (grün = Erwärmung, blau = Abkühlung, rot = größte Temperaturdifferenz); Uhrzeit und jeweilige Lufttemperatur in Klammern

Die Auswertung der Frost-Tau-Zyklen des Messzeitraums ergab, dass sich während der ca. 16-stündigen Phase der Abkühlung der oberen Zone der Fahrbahndecke am 27.02.2005 in der Zeit von 15:40 - 08:00 Uhr MESZ (16:40 - 9:00 Uhr MEZ) eine Abkühlrate von 0,95 K/h einstellte. Am darauffolgenden Tag, dem 28.02.2005, erreichte die Auftaurate während der ca. 8-stündigen Phase der Erwärmung (8:30 - 15:30 Uhr MESZ) in der oberen Zone der Fahrbahndecke 2,3 K/h.

Die Abkühlung erfolgt am Abend (vgl. Bild 13) zunächst häufig schneller als bei Betrachtung der gesamten 16-stündigen Abkühlphase. Im Zeitraum von 16:00 - 18:00 Uhr MESZ steigt dabei die Abkühlgeschwindigkeit auf einen kurzzeitigen Spitzenwert von 2,3 K/h an, z.B. gemessen am 24. und 25.02.2001 sowie am 27.02.2005, und erreichte am 28.02.2005 ein Maximum von 2,5 K/h. Auch das Auftauen beschleunigt sich zur Mittagszeit (12:00 bis 13:00 Uhr MESZ). Gemessen wurden am 03.03.2002 und am 27.02.2005 in dieser Zeitspanne 3,9 K/h sowie am 28.02. und 01.03.2005 als maximale Rate 4,1 K/h. Die maximale mittägliche Auftaurate im Winter unterscheidet sich damit kaum von der höchsten sommerlichen Erwärmungsrate, die für den Messzeitraum mit 4,2 K/h bestimmt wurde.

Weiterhin lassen sich die ermittelten Abkühl- und Auftauraten in einer Häufigkeitsverteilung darstellen. Eine vollständige Auswertung aller Abkühl- und Auftauphasen im Messzeitraum wurde für den oberen Sensor im rechten Fahrstreifen durchgeführt. Für Tage, an denen hohe Geschwindigkeiten bei der Temperaturänderung auftraten, erfolgte die Auswertung auch für den mittleren Fahrstreifen, in dem überwiegend die bereits aufgeführten Extremwerte beobachtet wurden. Im Bild 14 sind die Häufigkeitsverteilungen sowohl für die gesamte Phase der Abkühlung (ca. 16 Stunden) und der Erwärmung (ca. 8 Stunden) als auch für die Spitzenwerte am Abend (Abkühlung) und am Mittag (Erwärmung) dargestellt. Daraus erkennt man, dass die häufigsten Abkühl- und Auftauraten etwa bei einem Drittel der jeweiligen Extremwerte liegen, sowohl bei der gesamten Phase der Abkühlung und der Erwärmung als auch bei den Spitzenwerten.



**Bild 14:** Häufigkeitsverteilung der Abkühl- und Auftauraten bei Frostbeanspruchung am oberen Sensor im rechten Fahrstreifen für den Messzeitraum  
**links:** Abkühl- und Auftauraten während der gesamten Phase der Abkühlung (ca. 16 Stunden) und der Erwärmung (ca. 8 Stunden)  
**rechts:** kurzzeitige Abkühl- und Auftauraten am Abend (Abkühlung) und am Mittag (Erwärmung)



## 5 Fahrbahndecke

### 5.1 Vorbemerkungen

Die beobachtete Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau liegt seit dem Juli 1999, d.h. seit sieben Jahren, unter Verkehr. Im Jahr 2003 (nach dem 4. Winter) waren vereinzelt Abplatzungen auf dem Standstreifen zu erkennen. Eine systematische Untersuchung erfolgte nach dem 5. Winter im Frühjahr 2004. Es zeigte sich, dass die Abplatzungen, die sich oft über groben Gesteinskörnern ("pop-outs") befinden, ausschließlich im Standstreifen auftreten, der bisher keiner Verkehrsbeanspruchung unterlag. In diesem Bereich ist die Feinmörtelschicht, die in den Fahrstreifen bereits deutlich verringert bzw. abgetragen ist, noch vorhanden.

Einen ersten Anhaltspunkt für dieses Verhalten der Oberfläche unter Frost-Tausalzbeanspruchung lieferten Untersuchungen zum Frost-Tausalzwiderstand mit dem CDF-Verfahren an Bohrkernen, die im Alter von 6 Monaten entnommen wurden. Durch weitere Untersuchungen erhärtete sich die Vermutung, dass Bereiche in der Strecke existieren, in denen die Oberfläche, infolge der Dicke der Feinmörtelschicht und/oder ihrer Zusammensetzung, empfindlicher auf die Beanspruchung durch Frost und Tausalz reagiert. Diese Vermutung bestätigte sich im vorliegenden Fall später in der Praxis.

Nachfolgend sind Ergebnisse zusammengestellt, die von den Untersuchungen an Bohrkernen stammen, die während des Zeitraums seit der Inbetriebnahme der Strecke entnommen wurden.

### 5.2 Untersuchungsmethoden

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit gemäß DIN 1048-2: 1991 dienten Teilstücke aus dem Mittelbereich der Bohrkern ( $\varnothing$  150 mm,  $h/d = 1$ , planparallel geschliffene Belastungsflächen). Weiterhin erfolgte an diesen Proben auch die Ermittlung der Rohdichte.

Zur Bestimmung der Gesamtporosität diente das im DAfStb Heft 422 [3], Abschnitt 2.1.5.4, beschriebene Verfahren zur Wasseraufnahme unter Vakuum mit anschließendem Druck von  $15 \text{ N/mm}^2$ . Das für die Berechnung der Porosität erforderliche Probenvolumen wurde durch Tauchwägung im Anschluss an die Sättigung unter Druck ermittelt. Abweichend von diesem Verfahren wurden die Proben vor der Vakuumsättigung zunächst 7 Tage unter Wasser gelagert, um die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nach DAfStb Heft 422, Abschnitt 2.1.5.2, zu bestimmen. Nach der Sättigung mit Wasser unter Druck trockneten die Proben bei  $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Als Prüfkörper dienten Kopfteile (Höhe ca. 50 mm) und Fußteile (Höhe 20 ... 50 mm) der Bohrkern.

Die Luftporenkennwerte des Festbetons (Luftgehalt  $A$ , Abstandsfaktor  $\tau$  und Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$ ) wurden an Prismen aus den Kopfteilen der Bohrkern nach DIN EN 480-11: 1999 bestimmt.

An Kleinbohrkernen mit einem Durchmesser von 15 mm und einer Länge von jeweils ca. 20 mm, die aus den Kopf- bzw. Fußteilen der Bohrkern entnommen wurden, dienten zur Ermittlung der Porengrößenverteilung. Die Proben trockneten bei  $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Das angewandte Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie ist im DAfStb Heft 422 [3], Abschnitt 4.3.5, beschrieben. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Quecksilberdruckporosimeter der Firma Micromeritics Auto Pore 3 im Druck-

bereich bis 200 MPa. Bei der Auswertung wurde ein Rand- bzw. Kontaktwinkel von  $141,3^\circ$  zugrunde gelegt.

Die Untersuchung der Widerstandsfähigkeit des Betons gegenüber einer Frost-Tausalzbeanspruchung erfolgte gemäß des in [22] beschriebenen CDF-Verfahrens an den Kopfteilen der Bohrkerne (Höhe ca. 70 mm), deren Mantelfläche mit einem aluminiumkaschierten Butyl-Kautschuk-Band abgedichtet wurde. Die Prüfungen begannen mit der Vorlagerung in der 3%igen NaCl-Lösung in unterschiedlichen Altersstufen des Betons (vgl. Anlage 1).

Die Bestimmung des Gesamtchloridgehaltes erfolgte durch potentiometrische Titration nach Salpetersäureaufschluss von Probenmaterial aus verschiedenen Tiefenbereichen gemäß [28].

Für die Feuchtebestimmungen dienten Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm, die aus dem Standstreifen und dem rechten Fahrstreifen, verteilt über die gesamte Strecke, entnommen wurden. Nach der Entnahme trocknete zunächst die Oberfläche dieser Bohrkerne ab. Danach wurden die Bohrkerne in PE-Folie verpackt in das Labor transportiert. Dort wurden die Bohrkerne in dünne Scheiben mittels der im Bild 15 dargestellten Versuchsmethode (modifizierter Spaltzugversuch) zerlegt, um die Feuchteverteilung (Profil) zu bestimmen. Die abgespaltenen Scheiben trockneten bei  $105 \pm 2^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz (7 ... 10 Tage).



**Bild 15:** Modifizierter Spaltzugversuch an Bohrkerne

**links:** Prinzipdarstellung

**rechts:** minimale Dicke der abspaltbaren Scheiben

Neben der gravimetrischen Feuchtebestimmung an Bohrkerne wurde die Feuchteverteilung auch zerstörungsfrei ermittelt. Zur Anwendung kam dabei ein eigenes Hochfrequenzmessverfahren, das auf dem Dielektrizitätsprinzip basiert [16]. Das Messprinzip der zerstörungsfreien Feuchtemessmethode beruht auf der Reflexion hochfrequenter elektromagnetischer Wellen, wobei die Phasenverschiebung zwischen der einfallenden und der reflektierten Welle sowie die Dämpfung bestimmt wird. Der resultierende Reflexionsfaktor hängt von den dielektrischen Eigenschaften des anliegenden Mediums ab und wird messtechnisch mit einem Vektor-Voltmeter erfasst. Aus dem im Frequenzbereich 100 MHz - 500 MHz gemessenen Reflexionsfaktor kann der komplexe Dielektrizitätskoeffizient des

Mediums ermittelt und auf dessen Grundlage der Wassergehalt des anliegenden Mediums, z.B. des Betons, berechnet werden. Der Messaufbau, der auch für die Untersuchungen vor Ort diente, ist im Bild 16 dargestellt.



**Bild 16:** Messaufbau zur Bestimmung des Feuchtegehalts im Beton (dielektrische Methode) in verschiedenen Tiefen

**links:** Netzwerkanalysator (HP 8712 ET), Notebook zur Steuerung der Messung einschließlich der Datenerfassung und die verschiedenen Oberflächensonden

**rechts:** Einsatz des Messsystems vor Ort

### 5.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Entnahme der Bohrkern aus der Fahrbahndecke wurde zunächst so gewählt, dass sie verschiedenen Tagesleistungen entstammen, um einen möglichst repräsentativen Überblick über die gesamte Strecke zu erhalten. Davon ausgehend konnten Bereiche festgelegt werden, die ergänzende Untersuchungen, d.h. zusätzliche Bohrkernentnahmen, erforderten. In der Anlage 1 sind die Untersuchungsergebnisse zusammengestellt, die im Zusammenhang mit der Beurteilung des Frost-Tausalz-widerstandes der Fahrbahndecke gewonnen wurden. Für jeden entnommenen Bohrkern sind in der Anlage 1 die Kennwerte (Festigkeit, Porosität und Porenstruktur, Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck und unter Vakuum, Luftporengehalt, Mikroluftporengehalt, Abstandsfaktor, CDF-Test) und der gegenwärtige Zustand der Oberfläche im Bereich der jeweiligen Bohrkernentnahmestelle dokumentiert. Bohrkern, an denen die Feuchte bestimmt wurde, standen nicht für die umfassende Kennwert-ermittlung zur Verfügung (unvollständige Tabellen in der Anlage 1).

Insgesamt zeigte sich im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften, dass die Druckfestigkeit des Betons zwischen dem 60. Tag der Kontrollprüfung und den Untersuchungen nach 5 Jahren von im Mittel 56 N/mm<sup>2</sup> auf 73 N/mm<sup>2</sup> anstieg, was einer Steigerung von 30 % entspricht. Für die Spaltzug-

festigkeit war in diesem Zeitraum eine Zunahme von ca. 40 % und beim statischen E-Modul um 5 % zu verzeichnen.

Die Bestimmung der Gesamtporosität an der Oberseite der Betondecke ergab eine geringe Reduzierung während des Untersuchungszeitraums von im Mittel 15,5 Vol.-% im Alter von 6 Monaten auf 14,9 Vol.-% im Alter von 5 Jahren. An der Unterseite der Betondecke ist eine deutlichere Verringerung des Porenvolumens festzustellen, und zwar von 14,7 Vol.-% im Alter von 6 Monaten auf 11,9 Vol.-% nach 5 Jahren.

Die Ergebnisse der Porenstrukturanalysen mittels Quecksilberdruckporosimeter (vgl. Anlage 1) zeigen, dass sich die Porengrößenverteilungen im Oberflächenbereich (0 ... 20 mm) aber auch in den anderen untersuchten Tiefenbereichen (22 - 42 mm und 220 - 240 mm) im Untersuchungszeitraum geringfügig veränderte. Das Maximum in der Porenradienverteilung, das bei den Untersuchungen im Alter von 6 Monaten im Bereich von 0,045 ... 0,063  $\mu\text{m}$  lag, trat bei den Untersuchungen im Alter von 5 Jahren im Bereich von 0,048 ... 0,066  $\mu\text{m}$  auf.

Man erkennt in den Bildern, die die Ergebnisse der Porenstrukturanalysen in der Anlage 1 zeigen, dass Porenanteile in verschiedenen Radienbereichen auftreten. Anteile im Bereich von ca. 0,01  $\mu\text{m}$  resultieren im vorliegenden Fall größtenteils aus der Porosität der eingesetzten Gesteinskörnungen aus Quarzporphyr, wie entsprechende Vergleichsuntersuchungen an Gesteinsproben zeigten. Porenanteile des Zementsteins, die der Gelporosität zuzurechnen sind, werden mit dem Verfahren nur unvollständig erfasst. Dieser Sachverhalt erklärt auch die Differenz zwischen dem mit der Quecksilberdruckporosimetrie erfassten Porenvolumen und der Gesamtporosität. Neben dem Maximum in der Porenradienverteilung im oben angegebenen Bereich, das den Kapillarporen zuzuordnen ist, sind auch Porenanteile im Bereich zwischen 0,1 und 1  $\mu\text{m}$  stets vorhanden. Diese sind im vorliegenden Fall eines LP-Betons weitgehend auf die künstlich eingeführten Luftporen zurückzuführen. Der kleinere Radius, den die Luftporenanteile gegenüber einer mikroskopischen Analyse aufweisen, resultiert aus dem Umstand, dass diese Poren bei dem Verfahren der Quecksilberdruckporosimetrie über kleinere Zugangsöffnungen mit Quecksilber gefüllt werden und somit in der Auswertung nicht der tatsächlich vorhandene Radius der Luftporen dargestellt werden kann, sondern nur der Radius ihrer Zugangsöffnungen.

Die Auswertung der Analysen zum Luftporensystem ergab, dass ca. 60 % der Proben das Kriterium für den Mikroluftporengehalt ( $\geq 1,5$  Vol.-%) erfüllen und ca. 85 % der Proben einen ausreichenden Abstandsfaktor ( $\leq 0,24$  mm) aufweisen [6].

Zur Quantifizierung des Tausalzeintrags erfolgte nach dem fünften Winter eine Bestimmung des Gesamtchloridgehalts. Diese ergab für die Tiefe von 0 - 10 mm Werte von 0,94 bzw. 0,95 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt (vgl. Tabelle 9). Damit erhöhte sich die Chloridkonzentration gegenüber den Untersuchungen nach dem ersten Winter (Tiefe 0 - 10 mm: 0,46 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt) und nach dem zweiten Winter (Tiefe 0 - 10 mm: 0,34 ... 0,46 Masse-% bezogen auf den Zementgehalt) um einen Faktor 2 bis 3.

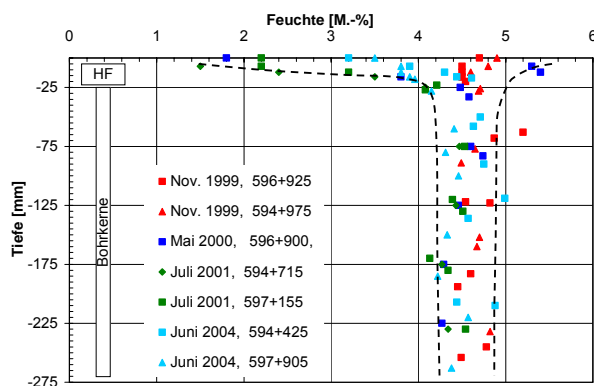
Die Chloridkonzentration ist ab einer Tiefe von 30 mm nicht mehr auf einen Eintrag durch Streusalze zurückzuführen. Sie entspricht ab dieser Tiefe der Konzentration, die durch das eingesetzte Gestein und den Zement bestimmt wird (Grundkonzentration). Damit ist die Entwicklung der Chloridkonzentration

tration und der Eindringtiefe vergleichbar mit den Ergebnissen, die z.B. bei Untersuchungen von Brückenkappen, die aus einem CEM I hergestellt wurden, zu beobachten war [11]. In diesen Untersuchungen wurde nach einer fünfjährigen Tausalzbeanspruchung in der Randzone eine Chloridkonzentration von ca. 0,6 Masse-% (Neckarbrücke bei Mannheim) und ca. 1,8 Masse-% (Eschachtalbrücke bei Rottweil) festgestellt. Die Eindringtiefe lag bei 25 mm (Mannheim) und bei etwa 50 mm (Rottweil).

Die Ergebnisse der Feuchtebestimmungen mittels gravimetrischer und dielektrischer Methode sind im Bild 17 zusammengestellt. Darin sind die dielektrisch ermittelten integralen Feuchtegehalte des jeweiligen Messvolumens der Oberflächensonden eingetragen. Die gravimetrisch ermittelten Feuchtegehalte beziehen sich jeweils auf die Mitte der abgespaltenen Bohrkernscheiben mit Dicken von 30 bis 60 mm.

**Tabelle 9:** Chloridgehalt in der Fahrbahndecke in verschiedenen Tiefen nach fünfjährigem Betrieb der Strecke

Bohrkern Nr.	Tiefe [mm]	Gesamtchloridgehalt [Masse-%]	
		bezogen auf die Gesamteinwaage	bezogen auf die Zementmasse
25	0 - 10	0,152	0,95
	10 - 20	0,030	0,19
	20 - 30	0,015	0,09
	30 - 40	0,013	0,08
	40 - 50	0,010	0,06
34	0 - 10	0,151	0,94
	10 - 20	0,061	0,38
	20 - 30	0,016	0,10
	30 - 40	0,011	0,07
	40 - 50	0,011	0,07



**Bild 17:** Feuchteverteilung in der Fahrbahndecke im Zeitraum von 1999 bis 2004 an verschiedenen Orten des Untersuchungsabschnitts; **HF:** Bereich der Feuchtebestimmung mit dem Hochfrequenzmessverfahren (Dielektrizitätsprinzip); **Bohrkerne:** Bereich der Feuchtebestimmung durch Trocknung von Bohrkernstückchen

Aus dem Bild 17 ist zu entnehmen, dass in der Oberflächennzone (bis etwa 1 cm Tiefe unterhalb der Fahrbahnfläche) deutliche Schwankungen des Feuchtegehalts infolge der Witterungsverhältnisse auftreten. Die Werte lagen zu den Messterminen zwischen 1,5 M.-% und 5,5 M.-%. In den tieferen Bereichen ab ca. 2 cm blieb der Feuchtegehalt im Untersuchungszeitraum (1999 bis 2004) praktisch unverändert. Er betrug im Mittel 4,5 M.-% (Spannweite von 4,2 bis 4,9 M.-%). Diese Spannweite zeigt, dass ständig ein relativ hoher Sättigungsgrad des Porensystems mit Wasser vorliegt. Ausgehend von einer Porosität des Betons von 12 - 15 Vol.-% (vgl. Anlage 1) und einer mittleren Trockenrohdichte des Betons von 2,25 kg/dm<sup>3</sup> ergibt sich der entsprechende Wassersättigungsgrad im Mittel zu 75 % (Spannweite: 65 % bis 85 %).

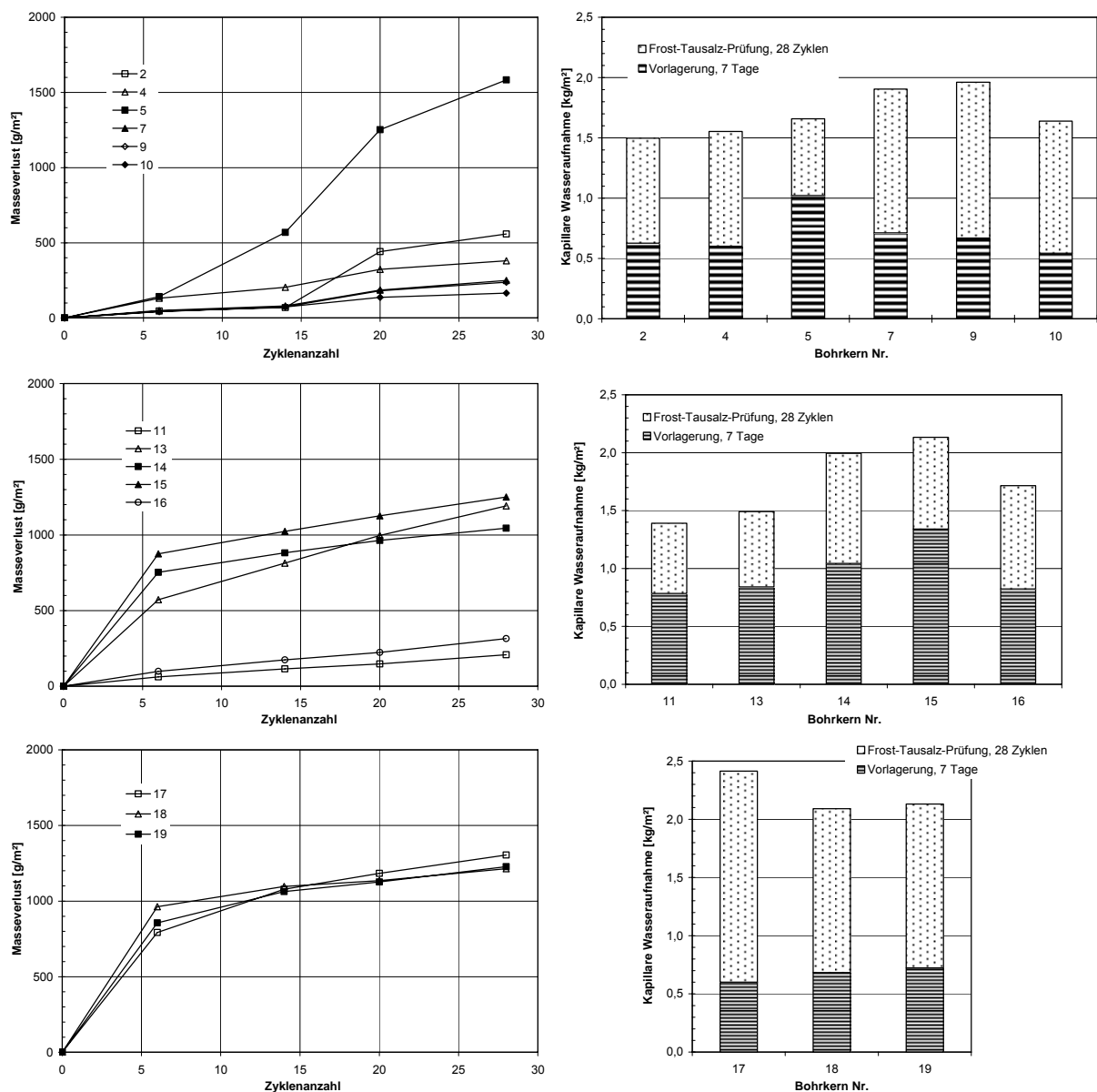
Bei der Prüfung des Frost-Tausalzwidehrstands mittels CDF-Verfahrens im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung wurde ein Masseverlust von ca. 600 g/m<sup>2</sup> ermittelt und damit das Abnahmekriterium von 1500 g/m<sup>2</sup> deutlich unterschritten. Entsprechende Prüfungen an Bohrkernen, von denen der obere Bereich (Oberfläche) mit einer Höhe von 70 mm geprüft wurde, erbrachten Masseverluste (Abwitterungen), die im Bereich von 170 bis 1600 g/m<sup>2</sup> lagen (vgl. Bild 18). Vergleichsweise hohe Masseverluste gegenüber der erweiterten Eignungsprüfung zeigten sich bei den Bohrkernen Nr. 5, 15, 17, 18 und 19 mit 1200 - 1600 g/m<sup>2</sup>. Die Begutachtung der Strecke ergab zudem, dass insbesondere im Bereich, aus dem der Bohrkern Nr. 5 entnommen wurde, tatsächlich Absprengungen festzustellen sind und sich somit das Prüfergebnis (1600 g/m<sup>2</sup>) in der Praxis widerspiegelt.

Diese Ergebnisse der Laborprüfungen an Bauwerksproben deuteten darauf hin, dass die Eigenschaften des Betons in der Oberflächennzone Schwankungen unterliegen. Von Bedeutung für diese Schwankungen sind die während der Fertigung vorherrschenden Witterungsbedingungen und die durchgeführten Nachbehandlungsmaßnahmen. So erfolgte die Herstellung eines Teils der Betondecke im untersuchten Abschnitt bei hochsommerlicher Witterung, und zwar mit Lufttemperaturen bis zu 30 °C und einer relativen Luftfeuchte von minimal 30 % verbunden mit stetigem Wind. Damit kam der Nachbehandlung eine besondere Bedeutung zu. Planmäßig wurde auf die mit einem nachgeschleppten Jutetuch strukturierte Oberfläche ein helles Nachbehandlungsmittel aufgesprüht. Als Zusatzmaßnahme diente das Besprühen der Oberfläche des erhärteten Betons mit Wasser, was allerdings nicht durchgängig realisiert wurde. Eine Begleiterscheinung des hochsommerlichen Wetters waren heftige Gewitter. Das schwerste in der Region im Jahre 1999, infolge dessen auch der Zugverkehr zwischen Mannheim und Karlsruhe zum Erliegen kam, ereignete sich während der Herstellung der Betondecke. Neben der ungünstigen Wirkung der heftigen Niederschläge auf die frische Oberfläche der Fahrbahndecke war insbesondere der Einfluss des deutlich erhöhten Wassergehalts der Gesteinskörnungen für die Betonherstellung am folgenden Tag von Bedeutung.

Hinsichtlich der Aufklärung der Ursachen für das unterschiedliche Verhalten der Oberfläche der Fahrbahndecke werden im Folgenden die ermittelten Kennwerte betrachtet.

Aus der Anlage 1 erkennt man, dass zwischen den Bereichen, die unterschiedlich empfindlich auf die Frost-Tausalzbeanspruchung reagieren (Bereiche mit Abplatzungen: vgl. Anlage 1, Bilder 9, 15, 43, 45, 47), zum Teil ein Festigkeitsunterschied besteht. Anhand dieses Kriteriums ist aber kein Rückschluss auf ein ungünstiges Verhalten insbesondere im Bereich des Bohrkerns Nr. 5 (Anlage 1, Bild 9) möglich.

Es zeigt sich aber, dass bei der Hälfte der Proben aus Bereichen mit Abplatzungen die Anforderung hinsichtlich des Mikroluftporengehalts nicht erfüllt ist. Das Gleiche gilt auch für den Abstandsfaktor. Ein systematischer Unterschied ist für die Luftporenkennwerte in den unterschiedlich empfindlichen Bereichen jedoch nicht festzustellen. Dementsprechend kann auch anhand dieses klassischen Kennwertes das unterschiedliche Verhalten der Oberfläche nicht schlüssig erklärt werden.



**Bild 18:** Ergebnisse der Prüfungen des Frost-Tausalz widerstands mittels CDF-Verfahrens an den Bohrkernen in verschiedenen Altersstufen (verschiedene Entnahmetermine)  
**links:** Masseverlust während der Frostbeanspruchung  
**rechts:** kapillare Flüssigkeitsaufnahme (3%ige NaCl-Lösung) während der Vorlagerung und während der Frostbeanspruchung  
**oben:** Prüflager 6 Monate; **Mitte:** Prüflager 12 Monate; **unten:** Prüflager 26 Monate

Aufschlussreicher sind die Porenstrukturuntersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Aus dem erfassten Porenvolumen und den Kennwerten der Intrusionskurven (Anlage 1) kann abgeleitet werden, dass die Oberflächenschäden im vorliegenden Fall dort auftreten, wo ein höheres Porenvolumen vorhanden ist und das Maximum in der Porenradienverteilung bei größeren Werten liegt (hier über  $0,06 \mu\text{m}$ ), jeweils im Vergleich aller untersuchten Proben. Die Oberflächenschicht des Betons erreicht hier offenbar schneller einen kritischen Sättigungsgrad als in Bereichen, in denen der Beton ein Maximum unterhalb von  $0,06 \mu\text{m}$  aufweist.

Proben, bei denen vergleichsweise große Werte für das Maximum der Porenradienverteilung ermittelt wurden, zeigten auch höhere Abwitterungen in der Frost-Tausalzprüfung (CDF-Test). Hinzuweisen ist allerdings darauf, dass das Abnahmekriterium von  $1500 \text{ g/m}^2$  nur vom Bohrkern Nr. 5 überschritten wurde. Auch war der Masseverlust bei den Bohrkernen Nr. 13, 14, 15, 17, 18 und 19 während der ersten sechs Frost-Tauwechsel besonders stark ausgeprägt (vgl. Bild 18). Dieser hohe Masseverlust zu Beginn der Prüfung ist in einer besonders empfindlichen Feinmörtelschicht an der Oberfläche der Fahrbahndecke begründet, da im weiteren Verlauf der Prüfung deutlich geringere Masseverluste beobachtet wurden. Weiterhin ist bei den Bohrkernen Nr. 5, 17, 18 und 19 zu beachten, dass diese aus dem Bereich der Fahrbahn stammen, der während eines heftigen Gewitterregens bzw. am folgenden Tag gefertigt wurde. Dieses Gewitter ging auf den eingebauten Beton und den Beton, der sich noch auf den Transportfahrzeugen befand, nieder und durchnässte auch die Zuschlaglagerhalden intensiv. Die Verschiebung des Maximums in der Porenradienverteilung zu vergleichsweise hohen Werten kann für diesen Bereich folglich mit einem erhöhten Wasserzementwert in Verbindung gebracht werden.

Unterzieht man weiterhin die von den Proben während der Frost-Tausalzbeanspruchung kapillar aufgenommene Flüssigkeitsmenge einer Bewertung (vgl. Bild 18), so fällt auf, dass die Bohrkern Nr. 17, 18 und 19 vergleichsweise hohe Aufnahmeleistungen zeigten, die in dieser Ausprägung bei den anderen Proben aus der Fahrbahndecke nicht festgestellt wurden. Dies kann als Untermauerung für den weiter oben dargestellten Zusammenhang zwischen dem Maximum in der Porenradienverteilung und den Transporteigenschaften des Porensystems angesehen werden (Maximum in der Porenradienverteilung über  $0,06 \mu\text{m}$ ).

Einen weiteren Hinweis liefern die Untersuchungen zur Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck, Vakuum sowie bei einem Druck 150 bar (vgl. Anlage 1). Die damit bestimmbare Entwicklung des Sättigungsgrades des Porensystems mit Wasser ergab, dass im Bereich mit den Abplatzungen etwas höhere Werte vorliegen als im Bereich ohne Abplatzungen. Um die Oberflächenschicht anhand des Sättigungsgrades eindeutiger charakterisieren zu können, ist die Untersuchung dünnerer Scheiben (ca. 10 mm statt 50 mm) für zukünftige Untersuchungen anzuraten. Des Weiteren sind im Zusammenhang mit der Interpretation des Kennwertes Sättigungsgrad auch die im Abschnitt 2.2 dargestellten Aspekte zu beachten.

Aus den dargestellten Ergebnissen bzw. Kennwerten ist aber auch abzuleiten, dass es sich im vorliegenden Fall um Abplatzungen handelt, die auf den unmittelbaren Oberflächenbereich des bisher noch nicht befahrenen Standstreifens beschränkt bleiben. Dass sich die Schädigung in die Tiefe fortsetzt bzw. auch in den Fahrstreifen auftritt, ist nicht zu erwarten.



## **6 Wasserbecken**

### **6.1 Vorbemerkungen**

Die instand gesetzten Wasserbecken werden seit dem Jahr 2000 genutzt. Aufgrund des jahreszeitlich schwankenden Wasserbedarfs unterliegt die Füllung und die Entleerung keinem festen Rhythmus. Es ist davon auszugehen, dass ein Becken im Winter innerhalb von 14 Tagen einmal gefüllt und nach einigen Tagen Standzeit entleert wird. Im Sommer kann sich dieser Zeitraum bis auf 2 Tage verkürzen, d.h. nach der Füllung beträgt die Standzeit bis zur Entleerung maximal 2 Tage, worauf die erneute Füllung folgt.

Da an diesem Objekt während des Beobachtungszeitraumes keine Temperaturmessungen erfolgten, muss hinsichtlich der tatsächlichen Frostbeanspruchung der Wasserbecken auf die Ergebnisse der Temperaturmessungen an der BAB A 5 bei Kronau zurückgegriffen werden. Aufgrund der geografischen Lage der Bauwerke dürfte die Übertragbarkeit der im Abschnitt 4 dargestellten Ergebnisse möglich sein. Beide Objekte befinden sich in der Oberrheinebene nördlich von Karlsruhe in größeren Waldgebieten (vgl. Tabelle 5). Sie liegen annähernd auf gleicher Höhe, d.h. ca. 110 m über NN.

Bei den Bauwerksuntersuchungen zeigten sich weder an den Wänden noch an den Böden der Becken Veränderungen, die auf eine Schädigung durch die Frostbeanspruchung hindeuten.

Hinsichtlich der angewendeten Verfahren zur Untersuchung der Betone sind die entsprechenden Angaben dem Abschnitt 5.2 zu entnehmen.

### **6.2 Ergebnisse der Untersuchungen**

In der Anlage 2 sind die Untersuchungsergebnisse zusammengestellt, die während des Beobachtungszeitraumes der Wasserbecken gewonnen wurden. Neben den Kennwerten (Festigkeit, Porosität und Porenstruktur, Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck und unter Vakuum, CIF-Test) ist in der Anlage 2 auch der gegenwärtige Zustand der Oberfläche der Becken dokumentiert.

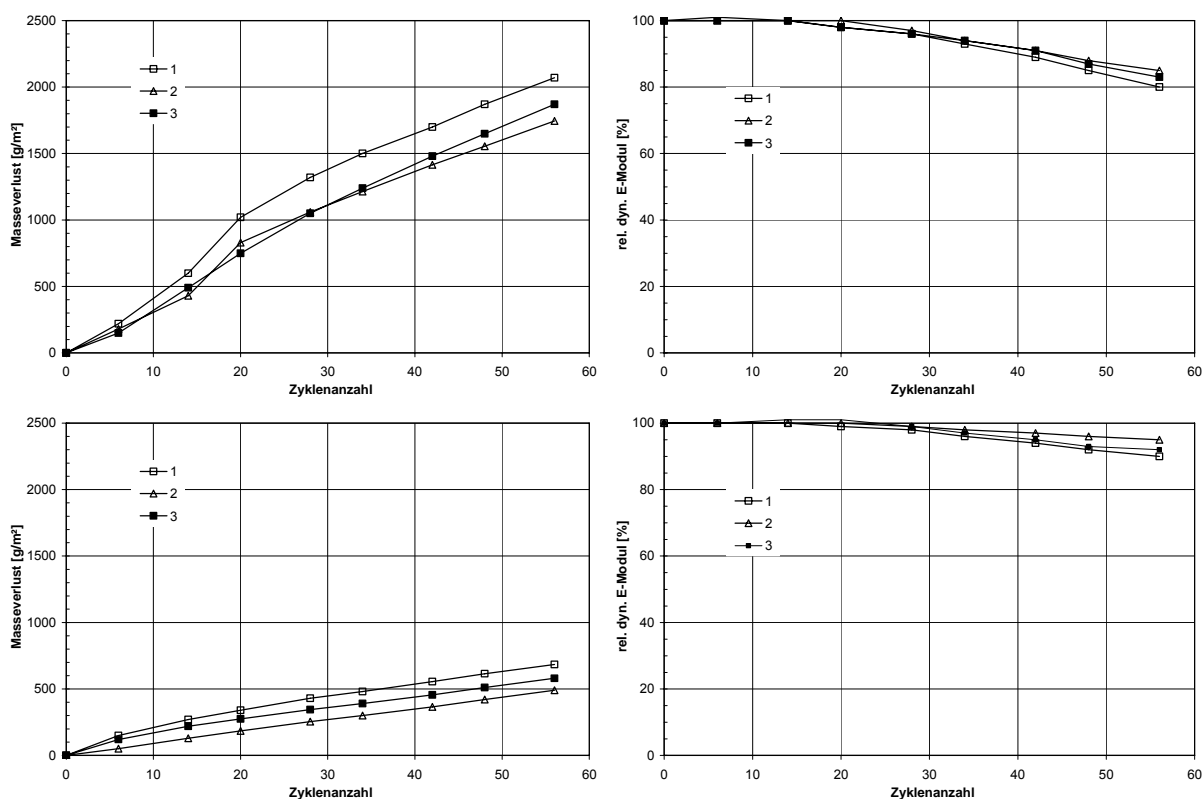
Zunächst soll aber auf die Untersuchungen eingegangen werden, die an Prüfkörpern erfolgten, die während der Instandsetzungsarbeiten hergestellt wurden. In der Tabelle 10 sind Ergebnisse zusammengestellt, die von Untersuchungen an Proben aus Spritzkissen bzw. Platten (Abmessungen 500 mm x 500 mm x ca. 120 mm) stammen, die Bau begleitend angefertigt wurden. Die Druckfestigkeitsprüfungen erfolgten an Bohrkernen (Durchmesser 100 mm,  $h/d = 1$ ) aus den Spritzkissen bzw. Platten im Alter von 28 bis 30 Tagen. Des Weiteren wurden aus diesen Platten auch die Proben für die Prüfung der Wasserundurchlässigkeit (Bohrkerne mit einem Durchmesser von 150 mm) nach die DIN 1048-5: 1991 (Prüfalter 35 Tage) und auch die Proben für die Prüfung des Frostwiderstandes (150 mm x 150 mm x 70 mm) mit demineralisiertem Wasser (Prüfalter 60 Tage) nach dem CIF-Test [23] gewonnen.

Die Verringerung des dynamischen E-Moduls während dieser Frostprüfung betrug bei den Proben aus dem Spritzbeton, der auf die Wände aufgetragen wurde, 5 % bis 10 % und bei dem Beton, aus dem die Böden gefertigt wurden, 15 % bis 20 % (vgl. Bild 19). Damit lag dieses Kriterium bei beiden

Betonen innerhalb des zulässigen Bereichs. Hinsichtlich des zulässigen Bereichs sind der Literatur folgende Angaben zu entnehmen: Nach [24] gilt ein Beton als geschädigt, wenn der relative dynamische E-Modul unter 80 % absinkt. In [2] liegt der Grenzwert bei 75 %.

**Tabelle 10:** Ergebnisse von Prüfungen der Druckfestigkeit und der Wasserundurchlässigkeit

Becken Nr.		Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	größte Wassereindringtiefe [mm]
1	Wand	46	25
	Boden	33	29
2	Wand	32	36
	Boden	25	19
3	Wand	45	12
	Boden	38	25



**Bild 19:** Ergebnisse der Prüfungen des Frostwiderstands mittels CIF-Verfahren an den Platten mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 70 mm aus separat hergestellten Proben  
**links:** Masseverlust während der Frostbeanspruchung  
**rechts:** Veränderung des relativen dynamischen E-Moduls während der Frostbeanspruchung  
**oben:** Boden; **unten:** Wand

Des Weiteren ist aus der Tabelle 4 im Abschnitt 3.2 zu erkennen, dass die Wasserzementwerte der eingesetzten Betone der Anforderung der alten DIN 1045: 1988 an Beton mit hohem Frostwiderstand entsprechen ( $\leq 0,6$ ), nicht aber den Grenzwerten der aktuellen DIN 1045-2/DIN EN 206-1 ( $\leq 0,5$ , ohne Verwendung von LP-Bildner). Eine wesentliche Anforderung an Beton, der unter den Bedingungen der Expositionsklasse XF3 ohne die Zugabe eines Luftporenbildners eingesetzt wird, ist damit nicht erfüllt. Neben dem Wasserzementwert, der über dem höchstzulässigen Wert von 0,5 liegt, betrifft dies auch die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen (Tabelle 10). Die in der DIN 1045-2/DIN EN 206-1 geforderte Mindestdruckfestigkeit C 35/45 wurde nicht erreicht. DIN 1045: 1988 forderte hier mindestens einen B 25. Eine Anforderung hinsichtlich der Wasserundurchlässigkeit, die in der DIN 1045: 1988 mit  $\max e_w \leq 50$  mm für Beton mit hohem Frostwiderstand enthalten war, sieht die DIN 1045-2/DIN EN 206-1 nicht vor.

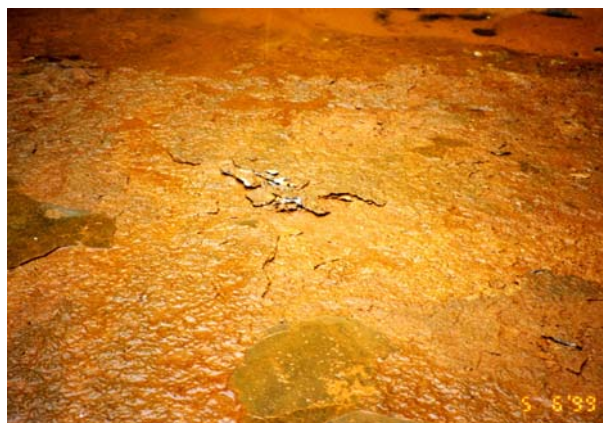
Ausgehend von diesen Untersuchungsergebnissen liegt folglich der Schluss nahe, dass es sich bei den eingesetzten Betonen um solche handelt, für die nicht zweifelsfrei die Eignung für die Expositionsklasse XF3 nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1 (Herstellung ohne LP) nachweisbar ist. Die Anforderungen der alten DIN 1045: 1988 hingegen wurden erfüllt. Da die Eignung für die Expositionsklasse XF1 nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1 als gegeben anzusehen ist, könnte man die Betone, hinsichtlich ihrer Zusammensetzung und Festigkeit, einem Übergangsbereich zuordnen, der zwischen den Anforderungen liegt, die an Betone für die Anwendung unter den Bedingungen der Expositionsklasse XF1 und XF3 zu stellen sind.

Zur Klärung des tatsächlichen Verhaltens der Betone unter der gegebenen Frostbeanspruchung (vgl. Abschnitt 4) lieferten die Untersuchungen an Bauwerksproben zusätzliche Erkenntnisse.

Bei den Bauwerksuntersuchungen zeigte sich, dass sich weder an den Wänden noch an den Böden der Becken Veränderungen vollziehen, die auf eine Schädigung durch die Frostbeanspruchung hindeuten. Anlage 2 zeigt den Zustand der Becken im Sommer 2005 im Überblick und in repräsentativen Details. Daraus ist der schadensfreie Zustand des Spritzbetons an den Wänden, insbesondere im Übergangsbereich zwischen der Wasseroberfläche und der Luft (Wasserwechselzone), zu erkennen. Auch an den Böden, die vor der Instandsetzung erhebliche Schäden aufwiesen (vgl. Bild 20), sind keine Abwitterungen zu erkennen.

Um den Frostwiderstand der Betone einzuschätzen, wurden auch Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie und zum Sättigungsgrad der Betone durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in Anlage 2 zusammengestellt. Hinsichtlich der Porenstruktur der Betone erkennt man aus der Anlage 2, Bilder 4 bis 6, dass neben dem Maximum in der Porenradienverteilung, das den Kapillarporen zuzuordnen ist, auch ausgeprägte Porenanteile im Bereich zwischen 0,1 und 1  $\mu\text{m}$  vorhanden sind. Diese sind hier jedoch nicht auf die Zugabe eines Luftporenbildners zurückzuführen, sondern resultieren aus der jeweiligen Verarbeitungstechnologie der Betone (Spritzbeton und Einbau eines steifen Betons am Boden).

Die Bestimmung des Sättigungsgrades der Betone zeigte weiterhin, dass sich ein deutlicher Anteil des Porenvolumens der Betone auch unter Vakuum nicht mit Wasser füllt (Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck  $< 0,83$ , vgl. Anlage 2, Tabelle 1). Da kein LP-Bildner verwendet wurde, ist dieser im Hinblick auf den Frostwiderstand günstige Aspekt den angewendeten Verarbeitungstechnologien, auf die im Zusammenhang mit der Porenstruktur bereits hingewiesen wurde, zuzuschreiben.



**Bild 20:** Zustand der Beckenböden vor der Instandsetzung im Jahr 1999

**links:** Übersicht, **rechts:** Detail

Dass dieser im Laborversuch ermittelte Sättigungsgrad auch unter praktischen Bedingungen nicht überschritten wird, zeigten entsprechende Untersuchungen zur Bestimmung des Feuchtegehaltes der Betone. Für den Spritzbeton (Wände) ergaben diese Untersuchungen, dass der Feuchtegehalt im Bereich von 5 bis 8 Masse-% schwankt und im Mittel bei 7 Masse-% liegt. Ausgehend von einer Gesamtporosität des Betons von 21 Vol.-% (vgl. Anlage 2) und einer mittleren Trockenrohddichte von  $2,10 \text{ kg/dm}^3$  liegt der Wassersättigungsgrad bei einem Feuchtegehalt des Betons von 8 Masse-% bei 80 % (0,80). Der Feuchtegehalt des Betons am Boden betrug bei den Untersuchungen 7,5 bis 8,5 Masse-%. Hier ergibt sich ausgehend von einem Gesamtporenraum von 22 Vol.-% (vgl. Anlage 2) und einer mittleren Trockenrohddichte von  $2,06 \text{ kg/dm}^3$  ebenfalls ein Sättigungsgrad von 80 % bei einem Feuchtegehalt des Betons von 8,5 Masse-%.

Die Carbonatisierungstiefe an der Beckenwand betrug nach 5 Jahren 2 bis 3 mm. Am Boden zeigte sich eine neutralisierte Randzone von ca. 3 mm, was sich auch in der Porenstruktur (vgl. Anlage 2, Bild 4) widerspiegelt.

## 7 Schlussfolgerungen

Veränderungen an einem Bauwerk infolge der Frostbeanspruchung sollten sich auf der Basis von Laboruntersuchungen voraussagen lassen. Welche Möglichkeiten zurzeit dafür bestehen wurde an zwei Bauwerken, die den Expositionsclassen XF3 und XF4 zuzuordnen sind, untersucht. Parallel zur Beobachtung des Zustandes der Bauwerke im Zeitraum von 1999 bis 2006 erfolgten Laborprüfungen an Bauwerksproben. Dabei wurden die Beanspruchungen mit den Frostprüfverfahren CDF- und CIF-Test nach [22, 23] simuliert und Kennwerte an den Betonproben bestimmt, die Rückschlüsse auf den Frostwiderstand zulassen. Des Weiteren wurde an der Fahrbahndecke der Temperaturgang im Beobachtungszeitraum gemessen und daraus die für die Charakterisierung der Frostbeanspruchung erforderlichen Parameter ermittelt.

Anhand der Auswertungen der Temperaturmessungen (Abschnitt 4) erkennt man, dass zwischen der Beanspruchung in der Natur und bei den Frostprüfverfahren CDF- und CIF-Test [22, 23, 24] erhebliche Unterschiede bestehen. Dies betrifft insbesondere die Maximal- und die Minimaltemperatur sowie die Abkühl- und die Auftaurate. Ein Prüfverfahren stellt in der Regel aber eine Konvention dar. Zu vielfältig sind die tatsächlichen Bedingungen, als dass ihr Spektrum in einer Laborprüfung umfassend abgebildet werden könnte. Geht man von der grundsätzlichen Eignung der eingesetzten Verfahren zur Simulation der Frostbeanspruchung von Bauwerken aus, so stellt sich die Frage, ob den Verfahren ein "Zeitraffereffekt" oder eine Überhöhung der Beanspruchung zugrunde liegt. Bei einer beschleunigt ablaufenden Beanspruchung ("Zeitraffereffekt") wäre folglich zu klären, welche Zyklanzahl welchem Zeitraum in der Praxis, und zwar in Abhängigkeit von den klimatischen Bedingungen am Bauwerksstandort, entspricht. Eine Überhöhung der Beanspruchung bewirkt ggf. eine Veränderung des Schadensmechanismus und führt damit zu einem Schadensbild, das so in der Praxis nicht auftritt. Damit ist die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse auf die Praxis nur eingeschränkt möglich oder sogar ausgeschlossen.

Wie stellt sich diese Problematik bei den hier untersuchten Bauwerken dar?

Bei den Laborprüfungen an Bohrkernen aus der Fahrbahndecke zeigten sich bei der Frost-Tausalzprüfung mittels CDF-Test Unterschiede in der Widerstandsfähigkeit. Die vergleichsweise hohe Abwitterung von ca. 1600 g/m<sup>2</sup> (vgl. Abschnitt 5.3) wurde zunächst als Ausreißer betrachtet. Nach dem vierten Winter waren aber auch an der Fahrbahndecke Abplatzungen festzustellen, insbesondere in dem Bereich aus dem der Bohrkern mit der vergleichsweise hohen Abwitterung stammte. Dies bedeutet, dass auf der Basis der Ergebnisse des angewandten Frostprüfverfahrens eine Vorhersage zum Verhalten der Fahrbahndecke, die nicht der Verkehrsbeanspruchung unterlag (Standstreifen), unter Frost-Tausalzbeanspruchung möglich wäre. Aus den Ergebnissen lässt sich aber nicht ableiten, dass z.B. 2 Zyklen im CDF-Test einem Jahr unter Praxisbedingungen entsprechen würden. Folglich sind die Versuchsergebnisse der Frostprüfung immer unter Beachtung der spezifischen Randbedingungen einzeln zu beurteilen und mit weiteren Materialkennwerten zu untersetzen. Im Falle des Fahrbahndeckenbetons lieferte insbesondere die Quecksilberdruckporosimetrie einen Kennwert (Lage des Maximums in der Porenradienverteilung), der mit den Ergebnissen der Frostprüfung korreliert. Anhand der Porenanteile im Bereich zwischen 0,1 und 1 µm lässt sich aber nur bei Kenntnis der lichtmikroskopisch ermittelten Luftporenkennwerte auf einen LP-Beton mit einem wirksamen Luftporensystem schließen. Der Sättigungsgrad des Porensystems mit Wasser kann darüber hinaus die Vorhersage des Verhaltens des Fahrbahndeckenbetons unter Frostbeanspruchung ergänzen, aber als Kennwert

allein das Verhalten des Betons nicht umfassend beschreiben. Seit Schäfer [20] die Eignung des Sättigungsgrades zur Klassifizierung von Betonen hinsichtlich des Frostwiderstandes untersuchte gilt, dass mit diesem Kennwert die sichere Beurteilung des Frostwiderstands von Beton nicht möglich ist, da der Nachweis nicht erbracht werden konnte, dass der Frostwiderstand mit steigendem Sättigungsgrad graduell sinkt. Damit kann ein Sättigungsgrad von ~91 % (0,91) nicht pauschal als Grenzwert herangezogen werden, der frostbeständige von frostgefährdeten Betonen trennt. Aber auch die aufwändigere Bestimmung des kritischen Sättigungsgrades nach Fagerlund [4] ist für die Charakterisierung des Frostwiderstandes des Betons nur dann nutzbar, wenn umfassende Informationen zum Feuchtezustand des Bauwerks während der Frostbeanspruchung vorliegen.

Im vorliegenden Fall deutet der Kennwert Sättigungsgrad in der Mehrzahl der Untersuchungen auf einen Beton hin, der über einen ausgeprägten Anteil am Porenvolumen verfügt ( $\geq 15\%$ , d.h. Sättigungsgrad  $\leq 0,85$ ), der sich unter Atmosphärendruck und unter Vakuum nicht mit Wasser füllt und damit einen hohen Frostwiderstand erwarten lässt. Insbesondere an der Unterseite der Fahrbahndecke wurden allerdings auch vereinzelt Sättigungsgrade  $\geq 0,90$  ermittelt, die eine zweifelsfreie Klassifizierung des Betons beeinträchtigen. Insgesamt gesehen ist für die Bestimmung des Sättigungsgrades die Untersuchung dünner Scheiben ( $\leq 10 \dots 20$  mm) zu prüfen. Bereiche mit Abplatzungen an der Oberfläche des Standstreifens wären damit evtl. eingrenzbar.

Die Untersuchungen an den Wasserbecken zeigten, dass zwischen der in der Laborprüfung (CIF-Test) ermittelten Abwitterung und dem Verhalten in der Praxis bisher kein Zusammenhang hergestellt werden konnte. Aus den Veränderungen des dynamischen E-Moduls (Laufzeit eines Ultraschallsignals) kann hingegen abgeleitet werden, dass die eingesetzten Betone als ausreichend frostbeständig einzustufen sind. Gestützt wird dieses Ergebnis wiederum durch die Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie und die ermittelten Sättigungsgrade. Diese Kennwerte deuten hier auf Betone mit einem relativ hohen Anteil am Porenvolumen hin (Sättigungsgrad  $\leq 85\%$ ), der sich nicht mit Wasser füllt, was einen frostbeständigen Beton erwarten lässt.

Hinsichtlich der Kriterien, auf deren Grundlage bei der Frost-Laborprüfung die Bewertung der Betone erfolgen sollte, bestätigte sich, dass der Masseverlust bei einer Frost-Tausalzbeanspruchung die maßgebende Größe darstellt. Bei der Frostbeanspruchung kann der Masseverlust hingegen nicht allein als Kennwert dienen. Hier ist die Änderung der Ultraschall-Laufzeit als Kriterium heranzuziehen. Die Festlegung eines Grenzwertes für die Beurteilung der untersuchten Betone bleibt immer verfahrensspezifisch. Ein Beispiel dafür ist die zu erreichende Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, während der dynamische E-Modul infolge von Gefügeveränderungen durch die Frostbeanspruchung nicht unter ein tolerierbares Niveau gesunken ist. Scripture et al. [21] gingen z.B. bereits bei ihren Untersuchungen aus dem Jahr 1951 davon aus, dass ein frostbeständiger Beton nach 200 Frost-Tau-Wechseln noch mindestens 70 % des Ausgangswertes des dynamischen E-Moduls aufweisen sollte. Im BAW-Merkblatt "Frostprüfung" [2] des Jahres 2004 gilt ein Beton als geeignet, wenn in der CIF-Prüfung nach 28 Frost-Tau-Wechseln ein relativer dynamischer E-Modul von 75 % nicht unterschritten wird.

Als Verfahren für die Beurteilung des Widerstands von Betonen gegenüber einer Frost-Tausalzbeanspruchung unter Bedingungen, die der Expositionsklasse XF4 nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1 zuzuordnen sind, kann auf der Basis der vorliegenden Untersuchungen der CDF-Test [22] empfohlen werden.

Für die Charakterisierung des Frostwiderstandes von Betonen, deren Anwendung unter den Bedingungen der Expositionsklasse XF3 nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1 erfolgt, bietet sich der CIF-Test [24] entsprechend der Prüfvorschrift der BAW [2] als Beurteilungsgrundlage an.

Die im Fall der Fahrbahndecke erkennbare Übereinstimmung zwischen der Laborprüfung und dem Verhalten in der Praxis, hinsichtlich des Auftretens von Ablösungen der Feinmörtelschicht an der Oberfläche der Fahrbahndecke, reicht als Nachweis für die Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse keinesfalls aus. Hierfür ist eine umfassende Aufbereitung und Auswertung sämtlicher Teilprojekte des DAfStb-Forschungsschwerpunktes "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" erforderlich.

## **8 Zusammenfassung**

Gegenstand des Teilprojektes 5 - Bauwerksuntersuchungen - im Forschungsschwerpunkt "Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse" war es, den Zustand von Bauwerksbetonen zu verfolgen und deren Eigenschaften zu ermitteln. Untersuchungsobjekte, die ab der Herstellung über einen Zeitraum von 1999 bis 2006 beobachtet wurden, waren eine Fahrbahndecke aus Beton, die der Expositionsklasse XF4 nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1 zuzuordnen ist, und ein offenes Wasserbecken, das in die Expositionsklasse XF3 nach dieser Norm einzustufen ist.

Zu den Eigenschaften, die an den Bauwerksbetonen ermittelt wurden, zählten die Festigkeit, die Porosität und die Porenstruktur, die Luftporenkennwerte sowie die Wasseraufnahme. Weiterhin wurden Daten gewonnen, die Auskunft über die tatsächlichen Temperaturbeanspruchungen und den Feuchtezustand der Bauwerke in der Frostperiode geben. Anhand der Ergebnisse dieser Untersuchungen war zu prüfen, welche Aussagen sich davon zum tatsächlichen Frost- und Frost-Tausalz widerstand des Bauwerksbetons ableiten lassen und inwieweit eine Übereinstimmung mit den Resultaten von Frostprüfungen an Bauwerksproben im Labor besteht.

Grundsätzlich bestätigte sich, dass mit den eingesetzten Frost-Laborprüfverfahren CDF- und CIF-Test Informationen zum Verhalten von Bauwerksbetonen gewonnen werden können. Ergänzende Informationen lieferten die Luftporenkennwerte, die Porenstrukturuntersuchungen und die Wasseraufnahmeproofung im Zusammenhang mit der Berechnung des Sättigungsgrades. Mit den angewandten Untersuchungen war es möglich, Zusammenhänge zwischen den Laborprüfungen und dem Verhalten in der Praxis herzustellen. Eine direkte Umsetzung der Ergebnisse der Laborprüfungen auf eine äquivalente Zeitdauer, die der Bauwerksbeton der Beanspruchung in der Praxis widersteht, ist auf der Basis der vorliegenden Ergebnisse aber noch nicht möglich.

## 9 Literatur

- [1] ACI: ACI Manual of Concrete Practice Part 1. American Concrete Institute, Detroit, 1979
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt Frostprüfungen von Beton, 2004
- [3] Bunke, N.: Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. DAfStb-Heft Nr. 422, 1991
- [4] Fagerlund, G.: The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and Structures*, Vol. 10 (1977) No. 58, S. 231-253
- [5] Fagerlund, G.: Effect of the freezing rate on the frost resistance of concrete. *Nordic Concrete Research*, Vol. 11 (1992) No.1, S. 20-36
- [6] FGSV: Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. FGSV AG Betonstraßen, Ausgaben 1991 und 2004
- [7] Grube, H.; Rechenberg, W.: Betonabtrag durch chemisch angreifende saure Wässer. *Beton*, Nr. 11, 1987, S. 446-451
- [8] Guse, U.; Müller, H. S.; Kraeft, U.; Härdtl, R.: Fahrbahndeckenbeton mit Portlandhüttezement CEM II/B-S für die Autobahn A 5 Walldorf - Bruchsal. *Beton - Informationen* 42. Jg. (2002) Heft Nr. 1, S. 8-15
- [9] Guse, U.; Müller, H. S.: Untersuchungen zur Beanspruchung und Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 08.156/1999/LRB der BAST, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [10] Hallauer, O.: Dauerhaftigkeit verschiedener Betone in Meerwasser und in sulfathaltigem Wasser. *Beton - Informationen* 42. Jg. (2002) Heft Nr. 5, S. 55-78
- [11] Hilsdorf, H. K.; Kottas, R.: Beanspruchung von Brückenbauwerken durch Frost und Tausalze. Vorträge der DBV-Arbeitstagung am 16. Juni 1993 in Wiesbaden, Deutscher Beton-Verein E.V., 1994
- [12] Hirschwald, J.: Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. Berlin, 1912
- [13] Kaufmann, N.: Das Sandflächenverfahren. *Straßenbau-Technik* Jg. 24 (1971) Nr. 3, S. 131-135
- [14] Kropp, J.; Hilsdorf, H. K.: Performance Criteria for Concrete Durability. RILEM Report 12, E & FN Spon London, 1995
- [15] Lang, E.: Frostwiderstand von Betonen mit Hochofenzement. *Beton - Informationen*, 40. Jg. (2000) Heft Nr. 1, S. 9-11
- [16] Müller, H. S.; Mouhasseb, H.; Guse, U.: Weiterentwicklung und Praxiserprobung eines neuen dielektrischen Messverfahrens zur Feuchtebestimmung bei Beton. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben AiF Nr. 12523 N/DBV 226, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe (TH), 2002
- [17] Müller-Westermeier, G.: Klimadaten von Deutschland, Zeitraum 1961 - 1990. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes Offenbach am Main, 1996
- [18] Müller-Westermeier, G. et al.: Die Witterung in Deutschland. In: Klimastatusberichte des Deutschen Wetterdienstes der Jahre 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- [19] RILEM Technical Committee 4 - CDC: Methods of carrying out and reporting freeze/thaw tests on concrete without and with de-icing chemicals. *Materials and Structures* Vol. 10 (1977) No. 58, S. 209-215
- [20] Schäfer, A.: Frostwiderstand und Porengefüge des Betons - Beziehungen und Prüfverfahren. DAfStb-Heft Nr. 167, 1964



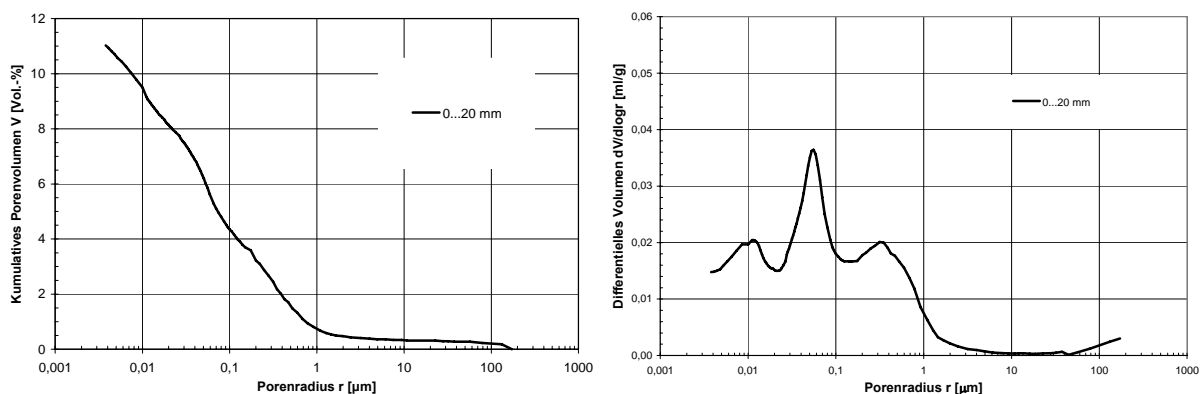
- [21] Scripture, E. W.; Benedict, S. W.; Litwinowicz, F.J.: Air Entrainment and Resistance to Freezing and Thawing. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 23. (1951) No. 4, S. 297-308
- [22] Setzer, M. J., Fagerlund, G., Janssen, D. J.: CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton - Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF), RILEM Recommendation. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, Nr. 4, 1997, S. 100-106
- [23] Setzer, M. J.; Auberg, R.: CIF-Test - Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, Nr. 4, 1998, S. 94-105
- [24] Setzer, M. J. et al.: Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B. *Materials and Structures*, Vol. 37, December 2004, S. 743-753
- [25] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. *Beton* Nr. 9, 1992, S. 496-501
- [26] Siebel, E.; Dahms, J.: Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. *Beton*, Nr. 9, 1997, S. 533-537
- [27] Siebel et al.: Sachstandbericht Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. *DAfStb-Heft* Nr. 560, 2005
- [28] Springenschmid, R.: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. *DAfStb-Heft* Nr. 401, 1989
- [29] Stark, J.; Wicht, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. Birkhäuser Verlag, 2001
- [30] Westendarp, A.; Schulze, M.: Frostbeanspruchung von Verkehrswasserbauwerken. *Beton*, Nr. 5, 2000, S. 260-266
- [31] Wiens, U., Schneider, E.; Lutze, D.: Zum Frost- und Frost-Tausalzwiderstand von flugaschehaltigen Betonen - Interpretation von Prüfergebnissen und Praxiserfahrungen. In: *Tagungsband der 3. Fachtagung des IBPM und WISSBAU Essen Beratende Ingenieures. mbH am 05. Oktober 2000 in Essen*

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 1, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2342
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm Gesamtporosität, 200 ... 250 mm	Vol.-%	15,6
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm Atmosphärendruck Vakuum (10 mbar)	-	0,77 0,88
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm Atmosphärendruck Vakuum (10 mbar)	-	- -
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 1:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 1,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



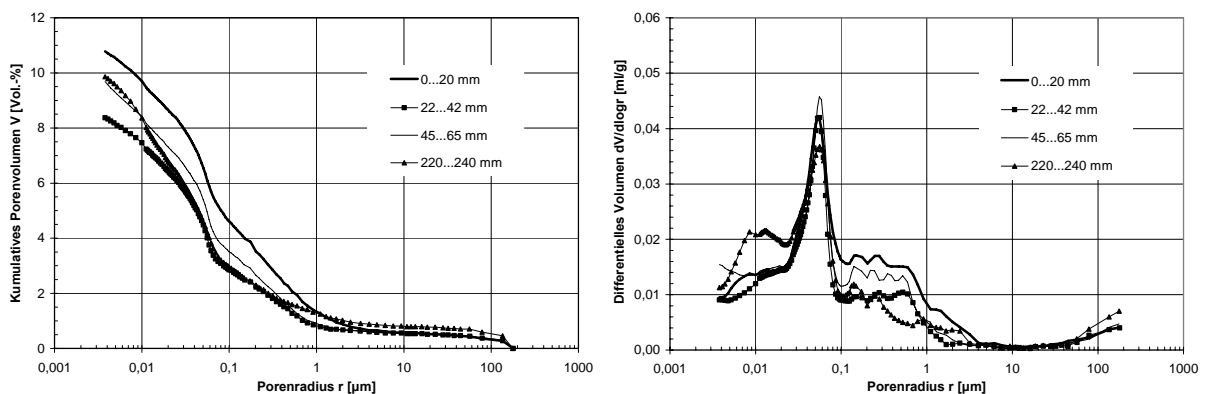
**Bild 2:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 1 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 2:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 2, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2330
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	61
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	14,4
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		16,2
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		0,86
Luftporengehalt A	Vol.-%	1,39
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	0,97
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,22
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	559



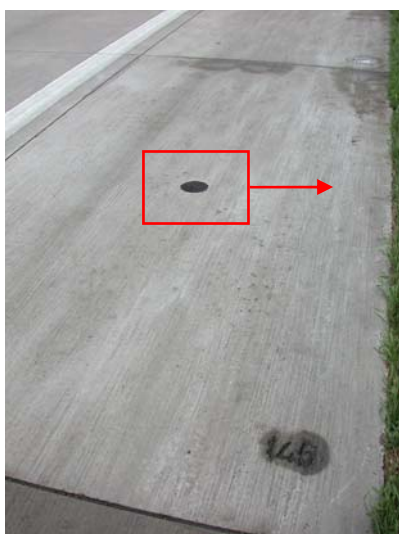
**Bild 3:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 2,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



**Bild 4:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 2 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 3, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2325
Spaltzugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	3,2
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,4
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,9
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-

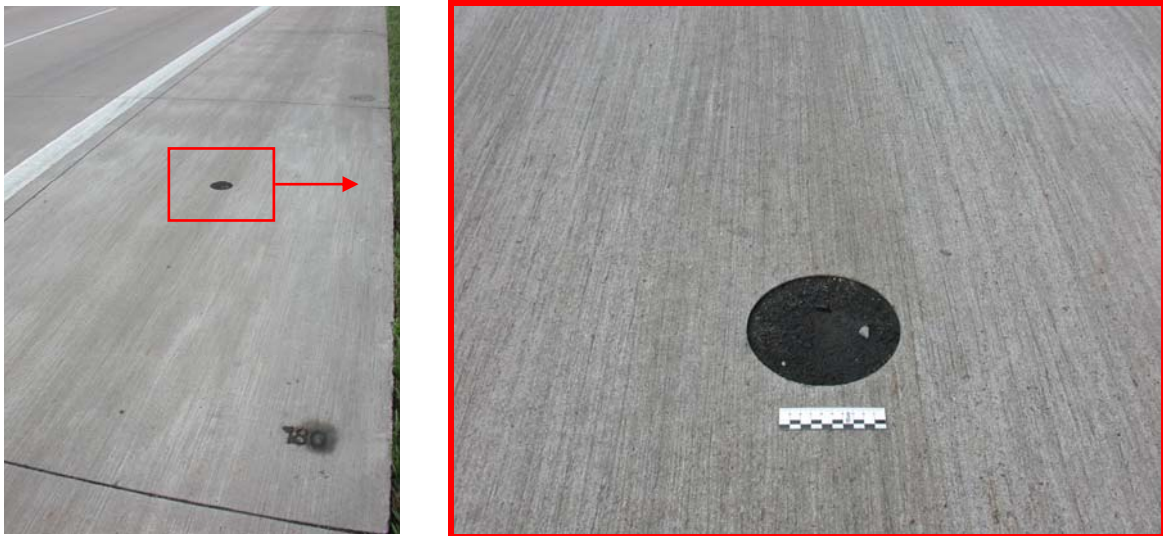


**Bild 5:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 3,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

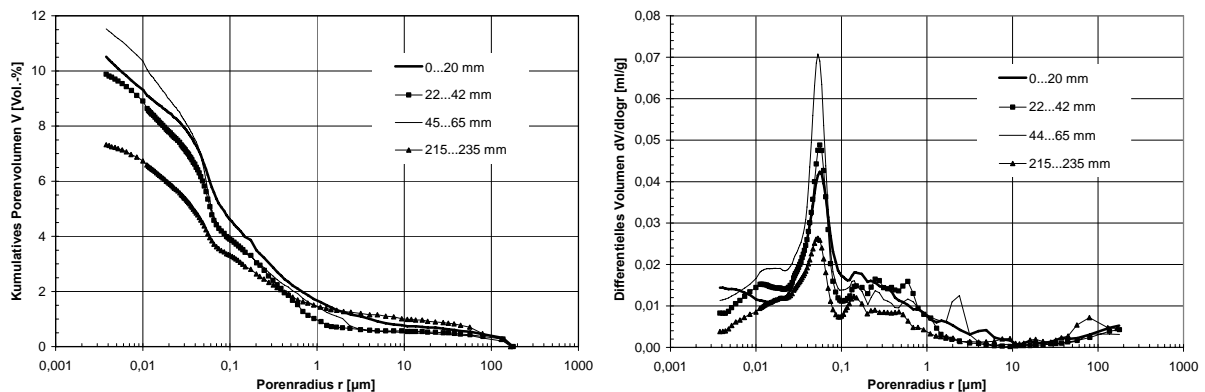
**Bild 6:** Es erfolgten keine Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

**Tabelle 4:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 4, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2320
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	62,5
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,1
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		13,9
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		0,94
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,16
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,57
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,22
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	380



**Bild 7:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 4,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

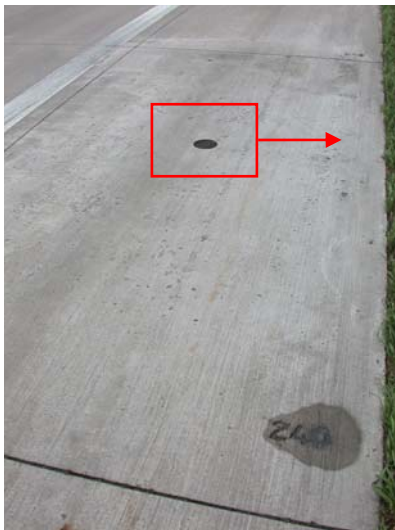


**Bild 8:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 4 in verschiedenen Tiefen

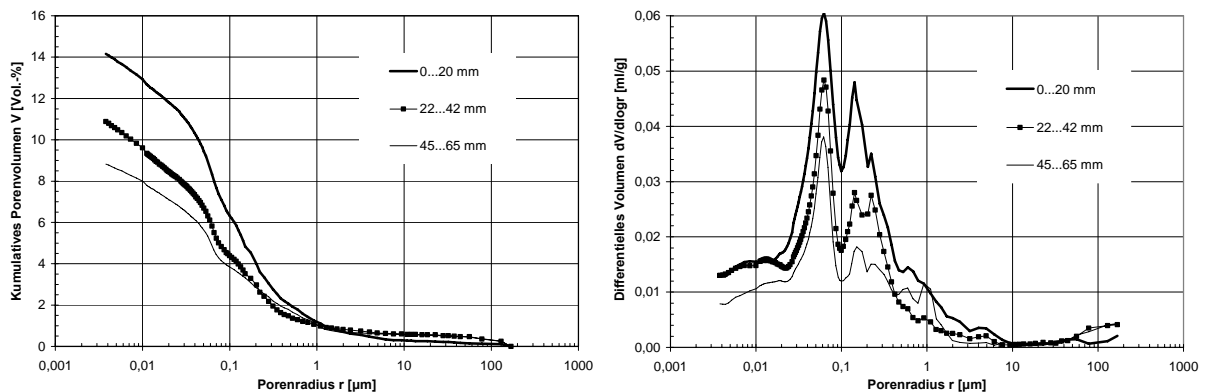


**Tabelle 5:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 5, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2305
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	56
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,9
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		-
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,29
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,35
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,24
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1583



**Bild 9:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 5,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre  
Abwitterung ca. 100 ... 200 g/m<sup>2</sup>



**Bild 10:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 5 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 6:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 6, Prüfalter: 6 Monate

<b>Kennwert</b>		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	-
Spaltzugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	3,0
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,7
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,4
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 11:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 6,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

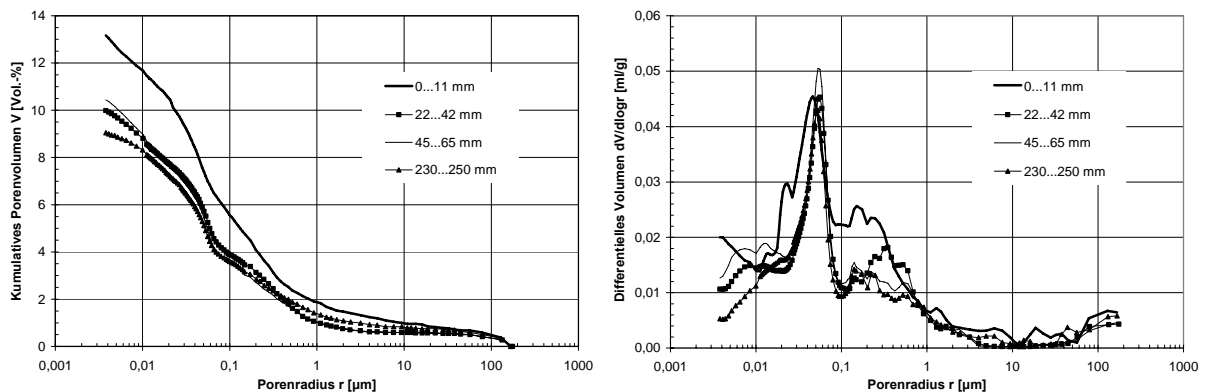
**Bild 12:** Es erfolgten keine Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

**Tabelle 7:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 7, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2340
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	61
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,7
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		14,0
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		0,76
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,02
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,53
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,23
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	249



**Bild 13:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 7,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



**Bild 14:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 7 in verschiedenen Tiefen

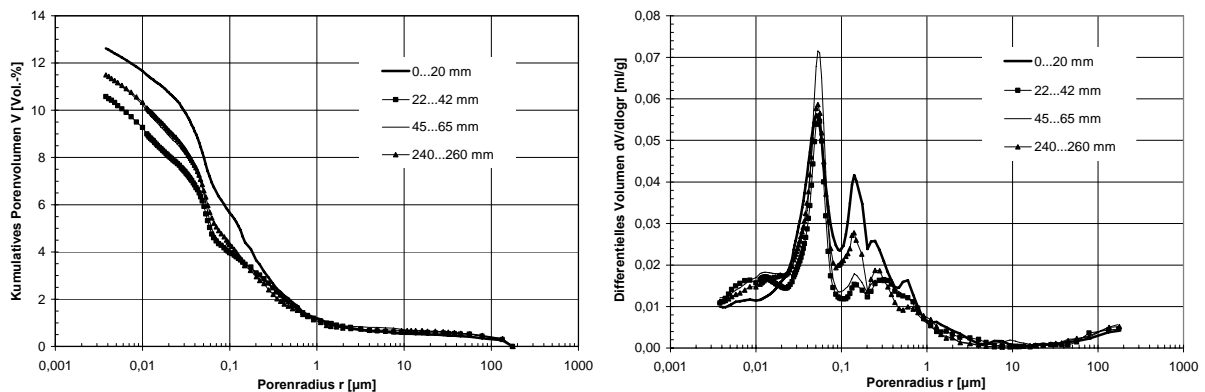


**Tabelle 8:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 8, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2334
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	-
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	16,2
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,3
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	
Atmosphärendruck		0,66
Vakuum (10 mbar)		0,79
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,67
Vakuum (10 mbar)		0,75
Luftporengehalt A	Vol.-%	1,89
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,30
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,25
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 15:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 8,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



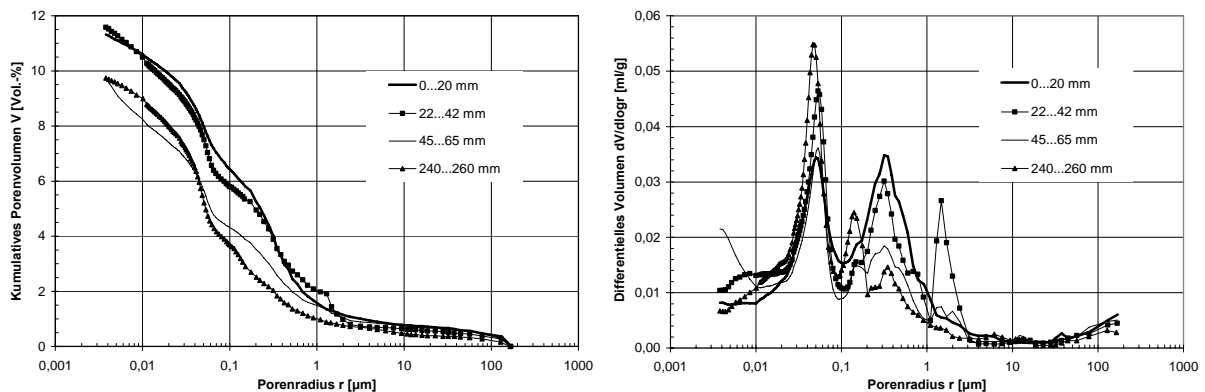
**Bild 16:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 8 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 9:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 9, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2349
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	65
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,2
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		13,1
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		0,80
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,85
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,22
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,24
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	238



**Bild 17:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 9,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



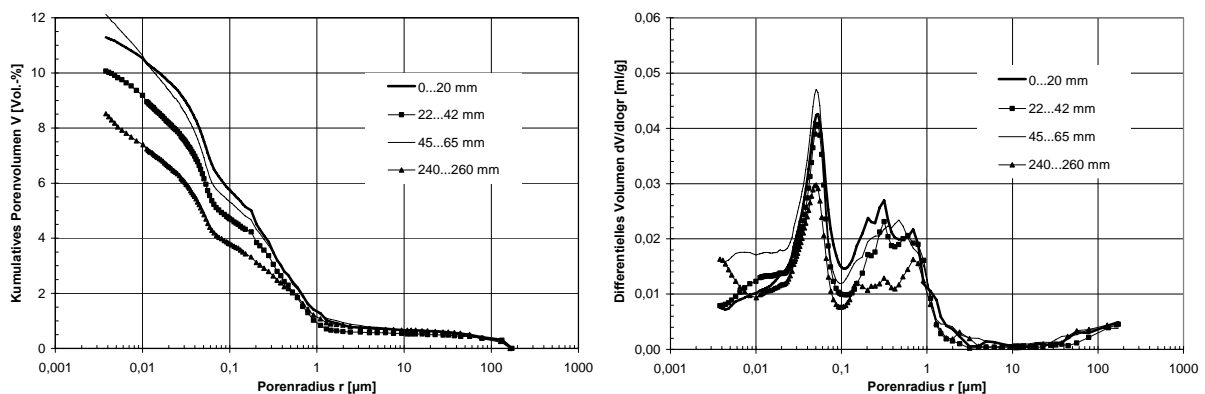
**Bild 18:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 9 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 10:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 10, Prüfalter: 6 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2337
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	58
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,8
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		14,0
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		0,79
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,67
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,90
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,19
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	166



**Bild 19:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 10,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



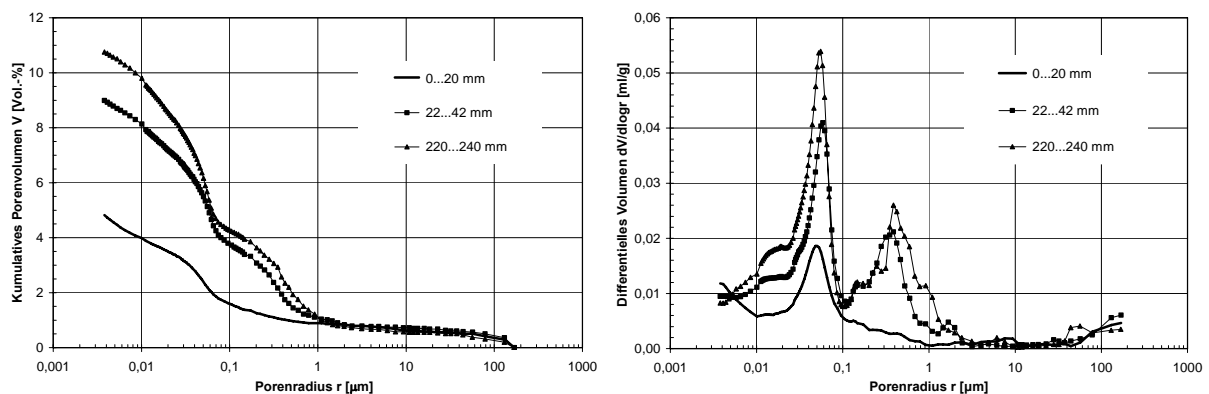
**Bild 20:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 10 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 11:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 11, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2355
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	61
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	14,1
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,6
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		0,75
Atmosphärendruck		0,77
Vakuum (10 mbar)		
Luftporengehalt A	Vol.-%	1,50
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,40
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,19
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	209



**Bild 21:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 11,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



**Bild 22:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 11 in verschiedenen Tiefen



**Tabelle 12:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 12, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2354
Spaltzugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	3,5
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	-
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		-
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-

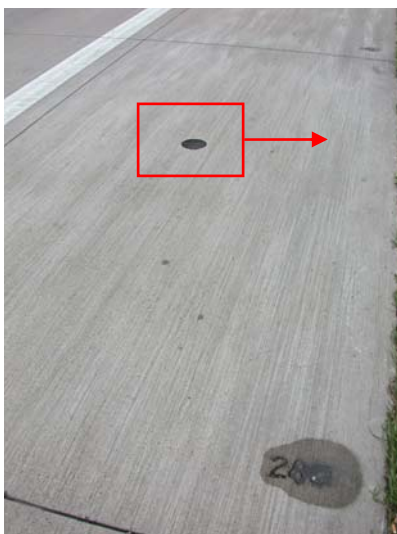


**Bild 23:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 12,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

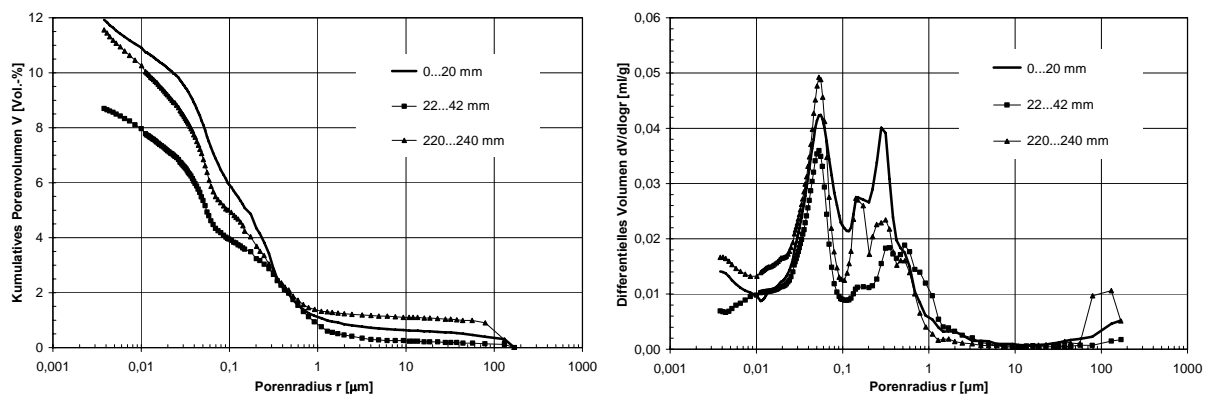
**Bild 24:** Es erfolgten keine Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

**Tabelle 13:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 13, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2356
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	66
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,0
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,4
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,72
Vakuum (10 mbar)		0,76
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,30
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	2,00
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,18
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1192



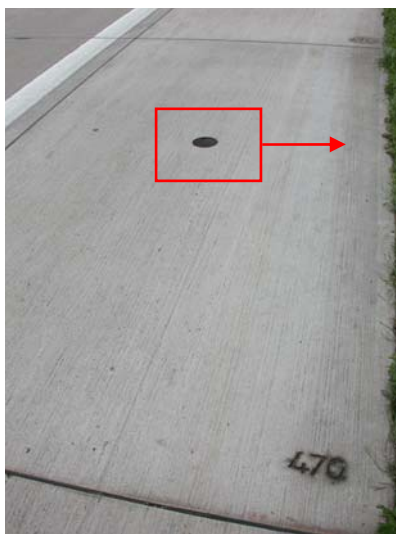
**Bild 25:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 13,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



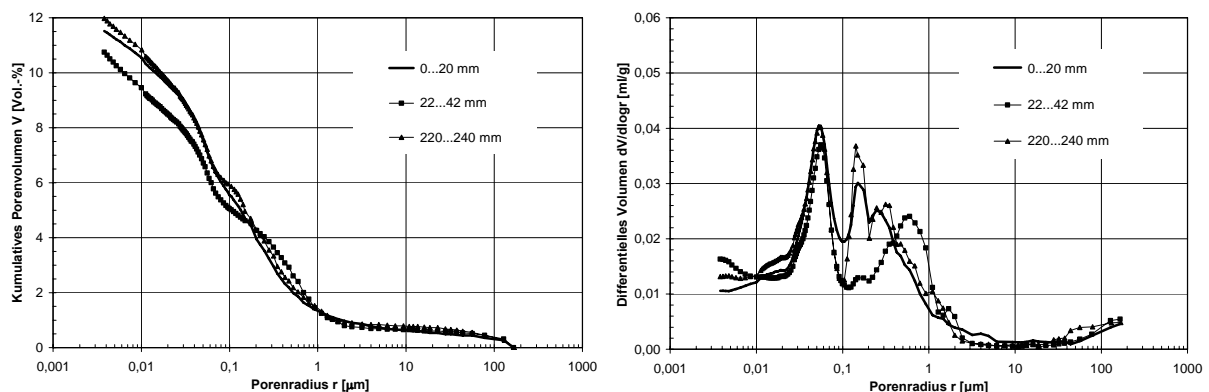
**Bild 26:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 13 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 14:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 14, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2363
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	65
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,4
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,3
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,68
Vakuum (10 mbar)		0,74
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,00
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,60
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,22
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1045



**Bild 27:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 14,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



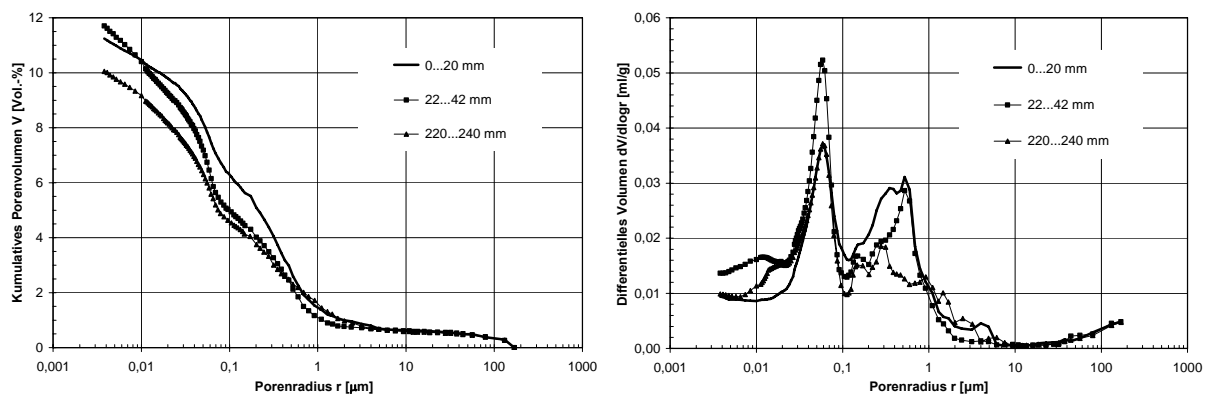
**Bild 28:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 14 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 15:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 15, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2335
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	61
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,9
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,7
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		0,75
Atmosphärendruck		0,79
Vakuum (10 mbar)		
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,40
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,60
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,22
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1251



**Bild 29:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerens Nr. 15,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



**Bild 30:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkeren Nr. 15 in verschiedenen Tiefen

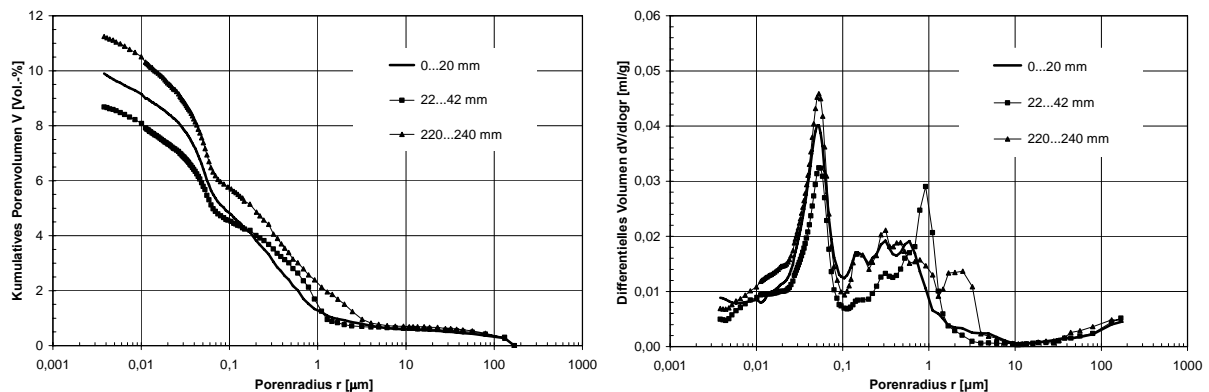


**Tabelle 16:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 16, Prüfalter: 12 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2345
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	58
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,3
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,2
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		0,71
Atmosphärendruck		0,78
Vakuum (10 mbar)		
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,00
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,50
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,20
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	315



**Bild 31:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 16,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



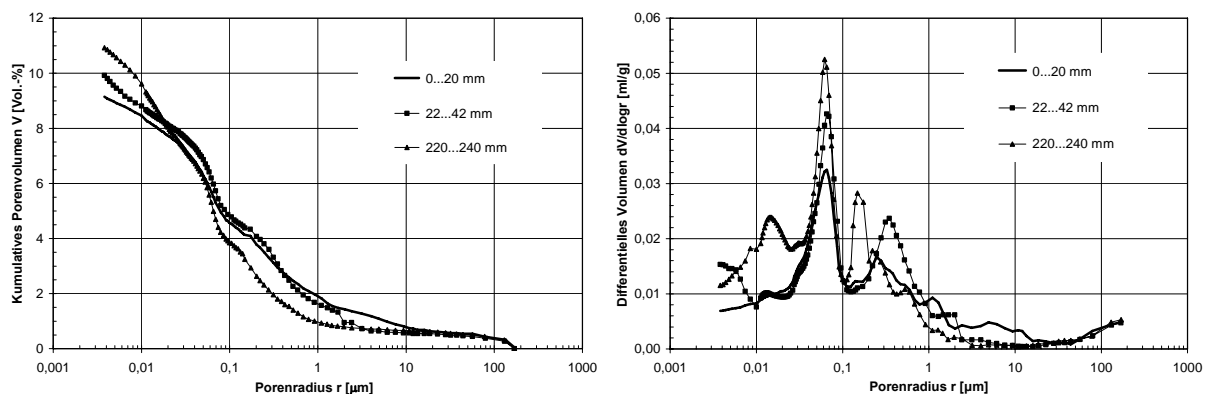
**Bild 32:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 16 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 17:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 17, Prüfalter: 26 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2335
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	58
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,2
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,6
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,76
Vakuum (10 mbar)		0,83
Luftporengehalt A	Vol.-%	1,64
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,05
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,24
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1305



**Bild 33:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 17, beeinflusst durch Gewittereinwirkung während der Herstellung; Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



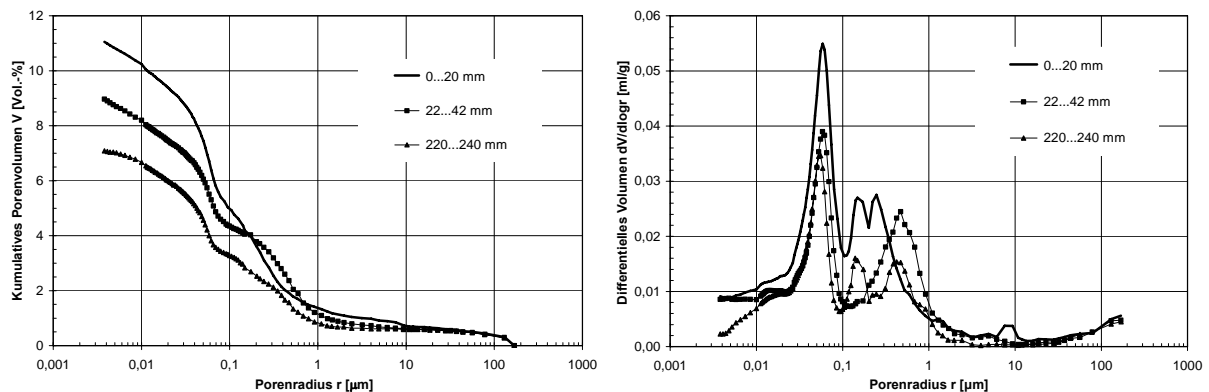
**Bild 34:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts), Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 17 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 18:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 18, Prüfalter: 26 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2326
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	66
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	14,4
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,5
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		0,69
Atmosphärendruck		0,82
Vakuum (10 mbar)		
Luftporengehalt A	Vol.-%	2,17
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,42
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,24
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1214



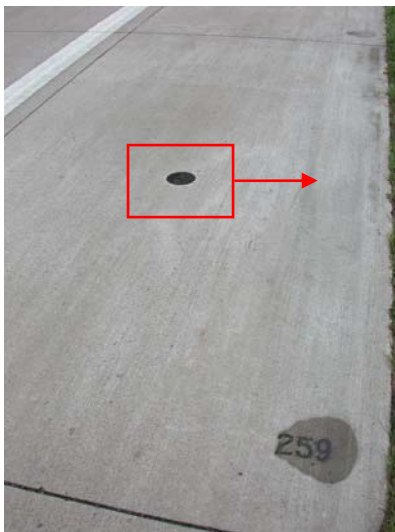
**Bild 35:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 18,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



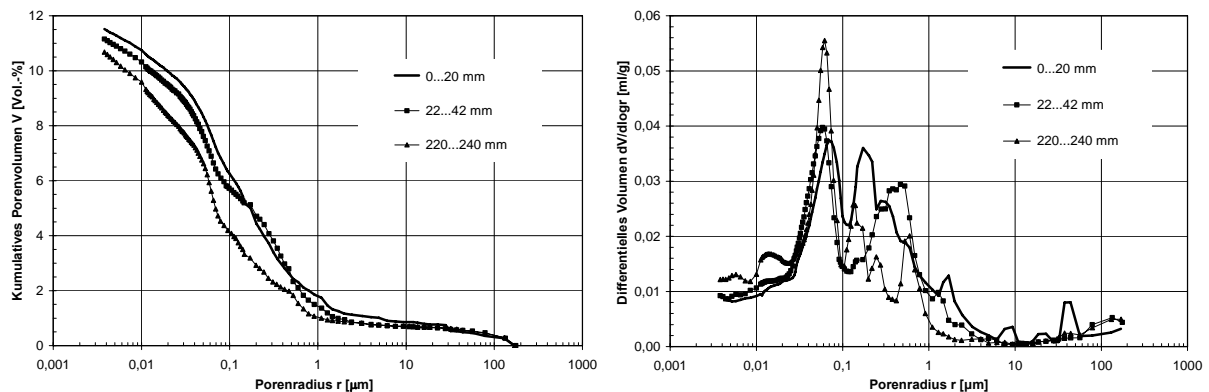
**Bild 36:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 18 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 19:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 19, Prüfalter: 26 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2323
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	66
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	14,8
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		15,2
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		0,75
Atmosphärendruck		0,86
Vakuum (10 mbar)		
Luftporengehalt A	Vol.-%	3,14
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,93
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,20
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	1228



**Bild 37:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 19,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre



**Bild 38:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 19 in verschiedenen Tiefen



**Tabelle 20:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 20, Prüfalter: 26 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2335
Spaltzugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	3,8
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	-
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		-
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 39:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 20,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

**Bild 40:** Es erfolgten keine Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

**Tabelle 21:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 21, Prüfalter: 26 Monate

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2338
Spaltzugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	2,8
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	-
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		-
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		-
Atmosphärendruck		-
Vakuum (10 mbar)		-
Luftporengehalt A	Vol.-%	-
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	-
Abstandsfaktor $\tau$	mm	-
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 41:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 21,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 6 Jahre

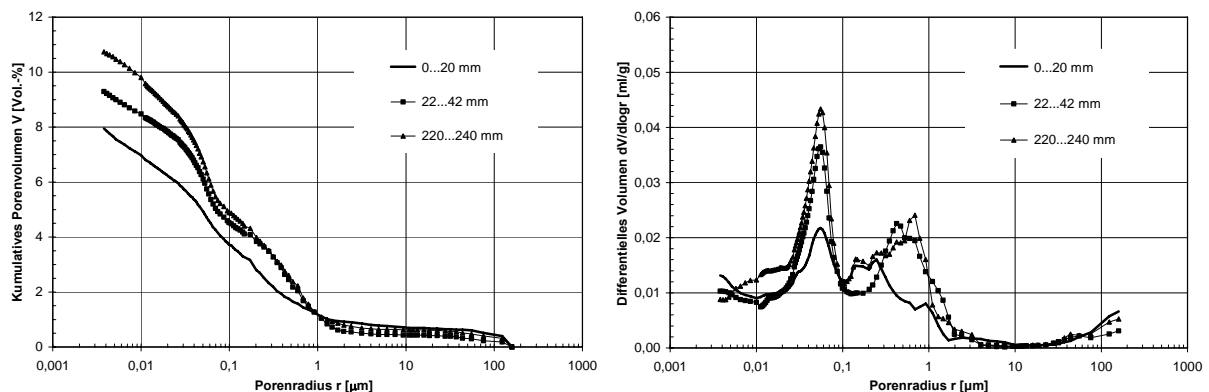
**Bild 42:** Es erfolgten keine Untersuchungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

**Tabelle 22:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 22 aus einem Bereich mit Abplatzungen, Prüfalter: 5 Jahre

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2364
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	75
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	14,7
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		11,5
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	
Atmosphärendruck		0,83
Vakuum (10 mbar)		0,86
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,91
Vakuum (10 mbar)		0,93
Luftporengehalt A	Vol.-%	3,10
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	2,18
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,16
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 43:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 22,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre  
Abwitterung ca. 50 ... 150 g/m<sup>2</sup>



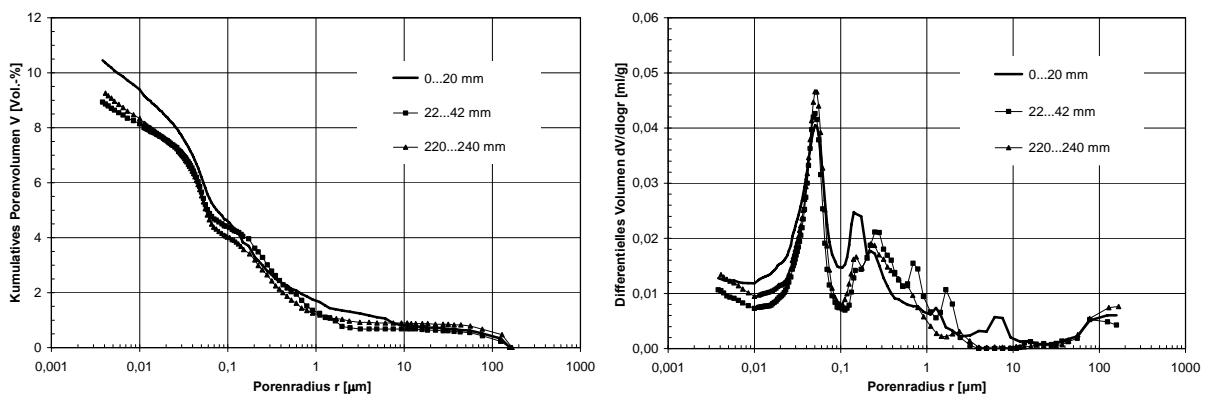
**Bild 44:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 22 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 23:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 23 aus einem Bereich mit Abplatzungen, Prüfalter: 5 Jahre

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2332
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	77
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	18,7
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		12,4
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	
Atmosphärendruck		0,83
Vakuum (10 mbar)		0,91
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,89
Vakuum (10 mbar)		0,95
Luftporengehalt A	Vol.-%	5,24
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	1,88
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,25
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



**Bild 45:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerens Nr. 23,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre  
Abwitterung ca. 50 ... 150 g/m<sup>2</sup>



**Bild 46:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkeren Nr. 23 in verschiedenen Tiefen

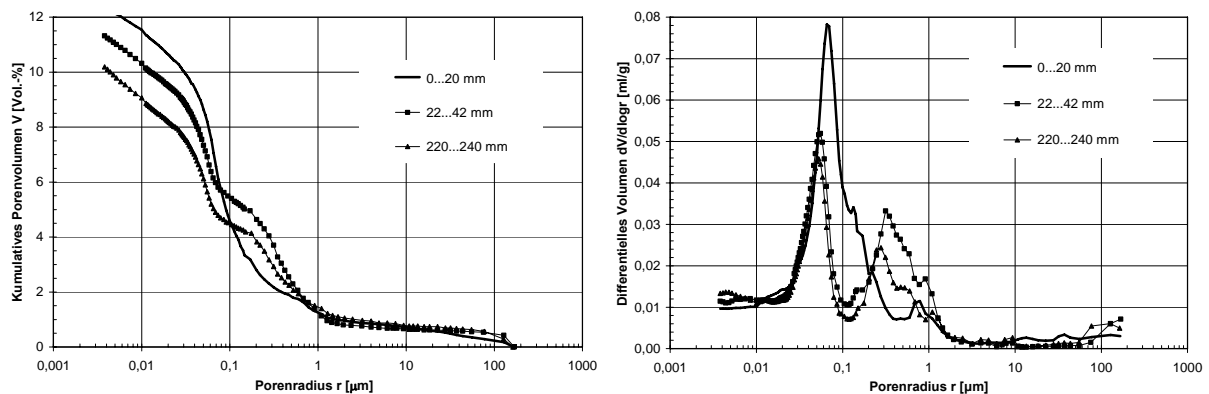


**Tabelle 24:** Ergebnisse der Untersuchungen an der Fahrbahndecke der BAB A 5 bei Kronau  
Bohrkern Nr. 24 aus einem Bereich mit Abplatzungen, Prüfalter: 5 Jahre

Kennwert		
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2344
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	72
Gesamtporosität, 0 ... 50 mm	Vol.-%	15,6
Gesamtporosität, 200 ... 250 mm		12,0
Sättigungsgrad, 0 ... 50 mm	-	
Atmosphärendruck		0,81
Vakuum (10 mbar)		0,84
Sättigungsgrad, 200 ... 250 mm		
Atmosphärendruck		0,89
Vakuum (10 mbar)		0,91
Luftporengehalt A	Vol.-%	3,63
Mikroluftporengehalt A <sub>300</sub>	Vol.-%	2,14
Abstandsfaktor $\tau$	mm	0,16
CDF-Test, Gesamtmasseverlust	g/m <sup>2</sup>	-



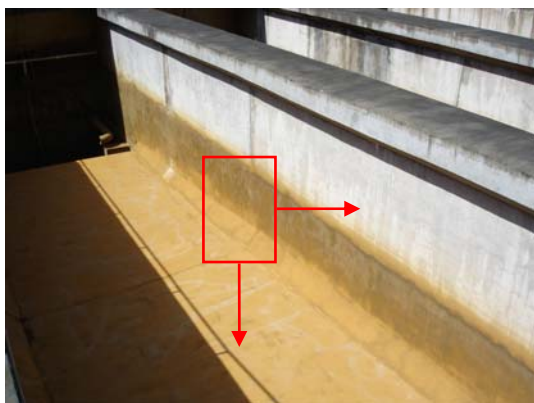
**Bild 47:** Zustand der Fahrbahndecke im Bereich der Entnahmestelle des Bohrkerns Nr. 24,  
Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre  
Abwitterung ca. 50 ... 150 g/m<sup>2</sup>



**Bild 48:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts),  
Probenmaterial aus dem Bohrkern Nr. 24 in verschiedenen Tiefen

**Tabelle 1:** Ergebnisse der Untersuchungen an den Wasserbecken Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3, Prüfalter: 3 Jahre

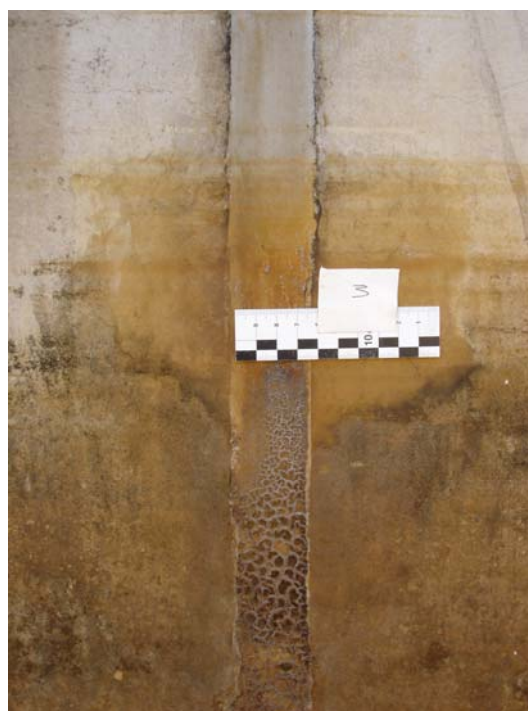
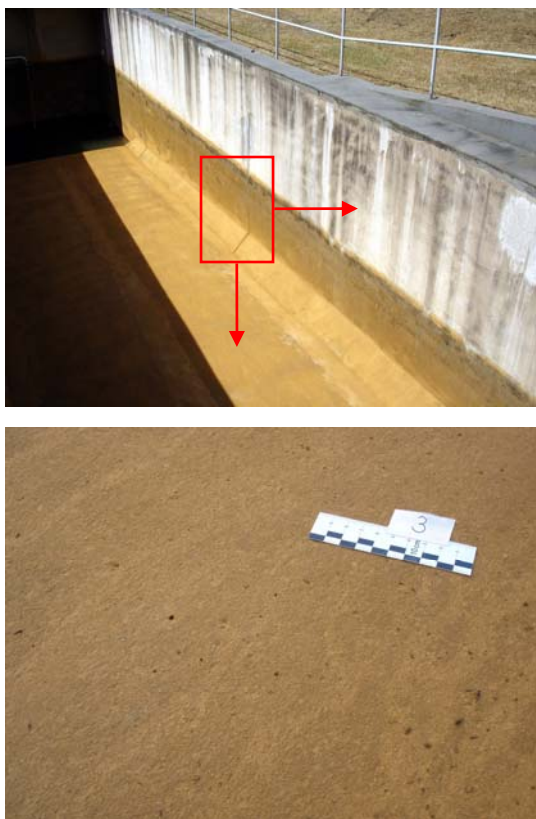
Kennwert		Wand (Spritzbeton)	Boden
Rohdichte	kg/m <sup>3</sup>	2195	2115
Druckfestigkeit (h/d=1)	N/mm <sup>2</sup>	45 (39 - 55)	32 (25 - 38)
Gesamtporosität, 0 ... 20 mm	Vol.-%	20,7	22,6
Gesamtporosität, 25 ... 45 mm		23,3	22,1
Sättigungsgrad, 0 ... 20 mm	-	0,82	0,76
Atmosphärendruck		0,84	0,84
Vakuum (10 mbar)	-	0,83	0,77
Sättigungsgrad, 25 ... 45 mm		0,84	0,82
Atmosphärendruck	-		
Vakuum (10 mbar)			
CIF-Test			
Gesamtmasseverlust nach 56 Zyklen	g/m <sup>2</sup>	500 - 700	1700 - 2100
rel. dyn. E-Modul nach 56 Zyklen	%	90 - 95	80 - 85



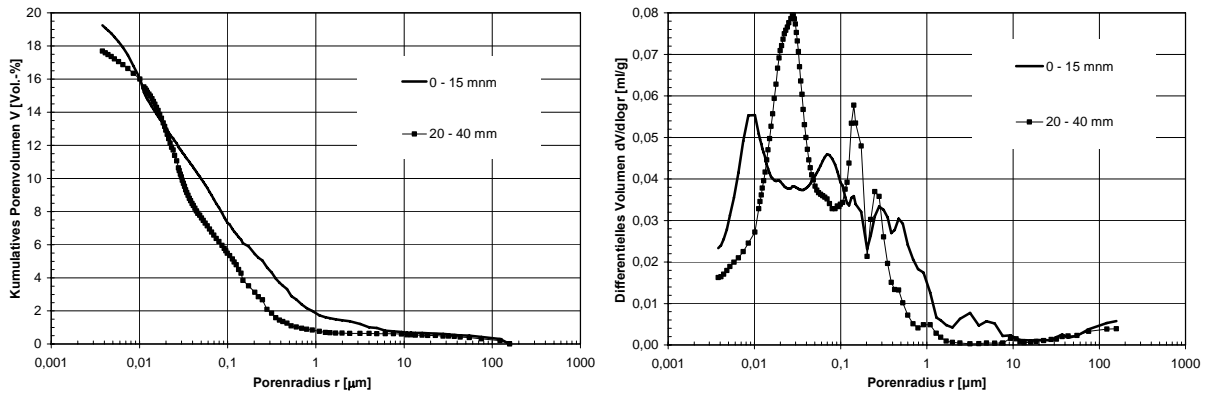
**Bild 1:** Zustand der Oberflächen im Becken Nr. 1, Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre; oben links: Übersicht, unten links: Detail Boden, rechts: Detail Wand



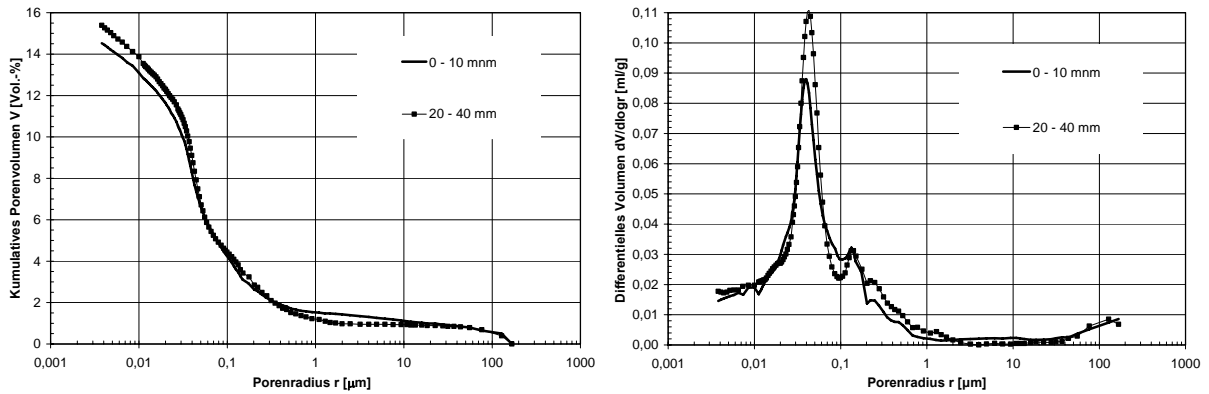
**Bild 2:** Zustand der Oberflächen im Becken Nr. 2, Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre; oben links: Übersicht, unten links: Detail Boden, rechts: Detail Wand



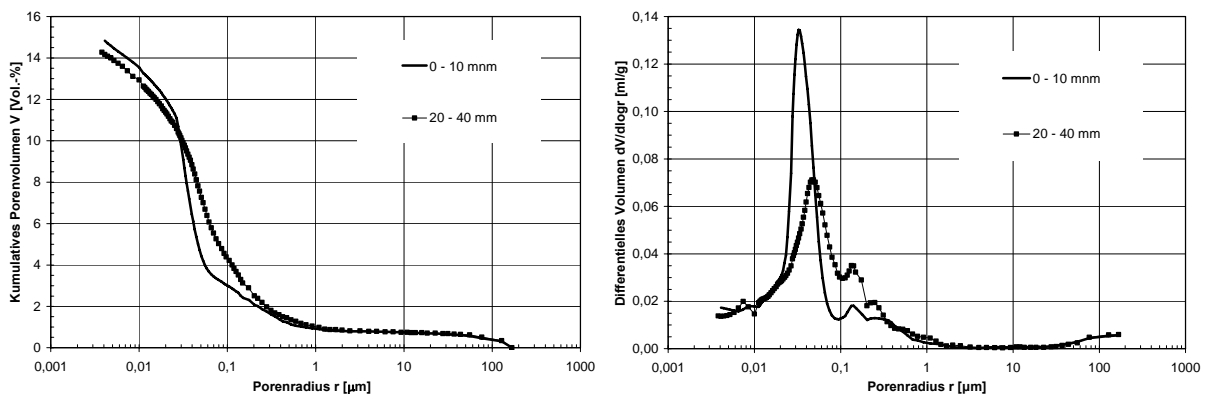
**Bild 3:** Zustand der Oberflächen im Becken Nr. 3, Zeitraum nach der Herstellung bzw. Nutzungsdauer: 5 Jahre; oben links: Übersicht, unten links: Detail Boden, rechts: Detail Wand



**Bild 4:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts), Probenmaterial aus dem **Boden** in verschiedenen Tiefen im Becken Nr. 1



**Bild 5:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts), Probenmaterial aus der **Wand** (Spritzbeton) in verschiedenen Tiefen, Probe A



**Bild 6:** Quecksilbergefülltes Porenvolumen (Bild links) und Porenradienverteilung (Bild rechts), Probenmaterial aus der **Wand** (Spritzbeton) in verschiedenen Tiefen, Probe B