

Eberhard Eickschen, Christoph Müller, Düsseldorf

# Alkali-Kieselsäure-Reaktion im kommunalen Straßenbau

## Alkali-silica reaction in municipal road construction

### Übersicht

Viele Verkehrsflächen im kommunalen Bereich werden unter Bezug auf das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 zur Alkaliempfindlichkeit aufgrund der Einordnung in die Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk100 der Feuchtigkeitsklasse WS zugeordnet. Die Eignung von Gesteinskörnungen bzw. Betonen für die Feuchtigkeitsklasse WS kann durch eine WS-Grundprüfung oder eine AKR-Performance-Prüfung des Betons nachgewiesen werden. Da in vielen Regionen keine entsprechenden Nachweise vorliegen, ist oftmals kein Transportbeton lieferbar. Die Einstufung WS wurde für Autobahnen (hohe dynamische Belastung und Alkalizufuhr von außen) gewählt. Bei kommunalen Flächen ist aber infolge der geringeren Geschwindigkeit die dynamische Verkehrsbelastung nicht so hoch. Zudem werden im innerstädtischen Bereich oft keine Taumittel eingesetzt, sodass die Alkalizufuhr und das Risiko einer schädigenden AKR im Vergleich zum Autobahnbau geringer ausfallen dürften. Möglicherweise ist die Feuchtigkeitsklasse WA oder eine vergleichbare Zuordnung ausreichend. In einem Forschungsvorhaben wurden daher Bohrkern aus Flächen des kommunalen Straßenbaus und Laborbetone mit den für die Feuchtigkeitsklassen WS bzw. WA entwickelten Prüfverfahren geprüft. Aus den Versuchsergebnissen wurden Kriterien erarbeitet, um die Alkaliempfindlichkeit und eine praxistgerechte Zuordnung der Feuchtigkeitsklasse von Betonen im Bereich des kommunalen Straßenbaus zu beurteilen.

### 1 Einleitung und Untersuchungsziel

Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) an Betonfahrbahndecken auf Bundesautobahnen in Deutschland führten zur Entwicklung von AKR-Performance-Prüfverfahren [1–5]. Zur Vermeidung von Schäden auf Autobahnen und Bundesfernstraßen wurde das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 zur Alkaliempfindlichkeit mit entsprechenden Prüfverfahren veröffentlicht [6]. In Abhängigkeit der aus den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO) abgeleiteten Bau- bzw. Belastungsklasse [7] werden darin die Feuchtigkeitsklassen WA (Beton, der während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht ist und häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt ist) bzw. WS (Beton, der zusätzlich zu der Beanspruchung nach Klasse WA einer hohen dynamischen Beanspruchung ausgesetzt ist) zugewiesen (Tabelle 1). Die Eignung von Gesteinskörnungen

### Abstract

With reference to the General Circular on Road Construction No. 04/2013 on alkali reactivity, many traffic areas in the municipal sector are assigned to moisture class WS on account of being allocated to load classes Bk1.8 to Bk100. The suitability of aggregates or concrete mixes for moisture class WS can be verified by subjecting the concrete to WS aggregate testing or an ASR performance test. A lack of appropriate verification in many regions means that ready-mixed concrete can often not be supplied. The WS classification was selected for motorways (high dynamic loads and external alkali supply). On account of the lower speeds involved, the dynamic traffic load is however not as high in municipal areas. An additional aspect is that de-icing agents are often not used in urban areas, so that there is less likelihood of alkali supply and a lower risk of deleterious ASR here than in the case of motorways. Moisture class WA or a comparable classification may therefore be sufficient. Drill cores from the municipal road construction sector and laboratory concretes were therefore tested with the methods developed for moisture classes WS and WA in a research project. The test results were taken as a basis for drawing up criteria for alkali reactivity assessment and for the practical assignment of concrete moisture classes in the municipal road construction sector.

### 1 Introduction and aim of the investigation

Damage to concrete pavements on Federal motorways in Germany arising from alkali-silica reaction (ASR) led to the development of ASR performance test methods [1–5]. The General Circular on Road Construction No. 04/2013 on the topic of alkali reactivity and corresponding testing procedures was published with a view to avoiding damage on motorways and trunk roads [6]. In this, the moisture classes WA (concrete which is often moist, or moist

**Tabelle 1: Feuchtigkeitsklassen von Verkehrsflächen (Bundesfernstraßen) bei Anwendung des Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau ARS 04/2013 [6]**

**Table 1: Moisture classes of traffic areas (trunk roads) with application of the General Circular on Road Construction ARS No. 04/2013 [6]**

RStO 01 Design-related load B <sup>1)</sup>	RStO 12 Dimensioning-related load B <sup>1)</sup>	RStO 01 Construction class	RStO 12 [7] Load class	Moisture class, trunk roads as per ARS [6]
> 32		SV	Bk100	WS
10 to 32		I	BK32	
3 to 10	3.2 to 10	II	BK10	
0.8 to 3	1.8 to 3.2	III	Bk3.2	
	1.0 to 1.8		Bk1.8	
0.3 to 0.8	0.3 to 1.0	IV	Bk1.0	WA
0.1 to 0.3	< 0.3	V	Bk0.3	
to 0.1		VI		

<sup>1)</sup> Equivalent 10 t standard axles in million

bzw. Betonen für die Klasse WS kann durch eine WS-Grundprüfung oder eine AKR-Performance-Prüfung des Betons nachgewiesen werden. Viele Verkehrsflächen im kommunalen Bereich werden den Belastungsklassen Bk1,8 bis Bk100 und damit in Analogie zu dem Rundschreiben der Feuchtigkeitsklasse WS zugeordnet. Hierzu zählen z.B. Bushaltestellen, Parkflächen oder Straßentypen nach den Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen (RASt) [8] im innerstädtischen Bereich (Tabelle 2).

Die Einstufung WS wurde für Autobahnen (Alkalizufuhr von außen und hohe dynamische Beanspruchung) gewählt. Bei kommunalen Flächen dürfte infolge der geringeren Geschwindigkeit die dynamische Verkehrsbelastung nicht so hoch sein. Zudem werden oft weniger oder keine Taumittel, sondern abstumpfende Mittel eingesetzt, sodass die Alkalizufuhr und das Risiko einer schädigenden AKR geringer ausfallen dürfte. Möglicherweise ist die Feuchtigkeitsklasse WA oder eine vergleichbare Zuordnung ausreichend. Für die Feuchtigkeitsklasse WA wären die Regelungen der Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [9] anzuwenden.

Bei vielen Anwendungen des kommunalen Straßenbaus handelt es sich im Vergleich zum Autobahnbau um kleinere Baulose, für die sich der Aufbau einer eigenen Baustellenmischanlage nicht lohnt. Der Beton wird daher i.d.R. von Transportbetonwerken geliefert. Die Praxis nach Einführung des ARS hat gezeigt, dass insbesondere bei kleineren Bauvorhaben Probleme auftreten, da nunmehr infolge der Belastungsklassen die Feuchtigkeitsklasse WS gefordert wird. Da in vielen Regionen weder WS-Grundprüfungen noch Performance-Prüfungen vorliegen, ist die Anwendung der Betonbauweise im innerstädtischen Bereich vielfach nicht möglich. Transportbeton mit den notwendigen Nachweisen ist nicht lieferbar. Ziel des Forschungsvorhabens war es nunmehr, für den Bereich kommunaler Verkehrsflächen grundlegende Erkenntnisse zur praxisingerechten Zuordnung der Feuchtigkeitsklasse und der entsprechenden Bewertung des Betons z.B. durch Performance-Prüfungen zu liefern. Die praxisingerechte Wahl der Feuchtigkeitsklasse und die Bewertung durch ein geeignetes Prüfverfahren schützen vor Fehlanwendungen durch eine schädigende AKR und ermöglichen den Einsatz regional verfügbarer Ausgangsstoffe. Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit der Betonbauweise werden damit verbessert.

## 2 Umfang der Untersuchungen

Das Forschungsvorhaben wurde in drei Arbeitspaketen bearbeitet. Zunächst wurden Betonflächen im kommunalen Bereich oder vergleichbarer Anwendung mit guten Praxiserfahrungen ausgewählt. Voraussetzung war eine mindestens 10-jährige Liegezeit ohne Anzeichen einer schädigenden AKR. Die Strecken wurden visuell auf AKR-spezifische Schadensmerkmale begutachtet und – falls vorhanden – folgende Daten erhoben: Ausgangsstoffe (Zementart, Alkaligehalt, Gesteinskörnungen), Betonzusammensetzung und sonstige Randbedingungen (Baujahr, Oberbau, Taumiteleinsetzung). Um das Verhalten der Betone in Laborprüfungen festzustellen, wurden in einem zweiten Schritt Bohrerkerne aus den Decken entnommen und mit den vom VDZ für die Feuchtigkeitsklassen WA bzw. WS entwickelten Prüfverfahren geprüft [1 bis 5]. Außerdem wurden Chloridprofile ausgewählter Betondecken bestimmt und mit den Ergebnissen von Autobahnen (WS [9]) verglichen. Schließlich wurden ausgewählte Betone im Labor nachgestellt und eine WS- bzw. WA-Performance-Prüfung unter Verwendung der Informationen der damaligen Erstprüfung sowie eine Nebelkammerprüfung der Gesteinskörnungen (Splitt und Kies) nach Alkali-Richtlinie [9] durchgeführt.

## 3 Versuchsergebnisse

### 3.1 Arbeitspaket 1: Auswahl Flächen

Um die Eignung von Betonen für kommunale Verkehrsflächen und deren praktische Bewehrung nachzuweisen, wurden Beispiele mit guten Praxiserfahrungen ausgewählt (Tabelle 3). Voraussetzung war eine mindestens 10-jährige Liegezeit ohne Anzeichen einer schädigenden AKR. Einige potenziell geeignete Flächen konnten nicht in die Untersuchung einbezogen werden, da

**Tabelle 2: Belastungsklassen und daraus abgeleitete Feuchtigkeitsklassen für typische Entwurfsituationen im kommunalen Straßenbau [8]**  
**Table 2: Load classes and moisture class derived from these for typical design situations in the municipal road construction sector [8]**

Typical design situation in accordance with [8]	Load class	Moisture class
Road without surrounding structures	Bk10 to Bk100	WS
Connecting road	Bk3.2/Bk10	
Industrial road	Bk3.2 to Bk100	
Commercial road	Bk1.8 to Bk100	
Main business road	Bk1.8 to Bk10	
Local business road	Bk1.8 to Bk10	
Local access road	Bk3.2/Bk10	WA/WS
Village main road	Bk1.0 to Bk3.2	
Access road	Bk1.0 to Bk3.2	
Distributor road	Bk1.0 to Bk3.2	WA
Residential road	Bk0.3/Bk1.0	
Residential street	Bk0.3	

for lengthy periods, and is often exposed, or exposed for lengthy periods, to an external supply of alkalis) and WS (concrete, which in addition to the action effect associated with class WA is subject to a high dynamic load level) are assigned on the basis of the construction or load class [7] derived from the Directives for the standardisation of the superstructures of trafficked surfaces (RStO) (Table 1). The suitability of aggregates or concrete mixes for class WS can be verified by subjecting the concrete to WS aggregate testing or an ASR performance test. Many traffic areas in the municipal sector are assigned to load classes Bk1.8 to Bk100 and thus, by analogy, to moisture class WS in accordance with the circular. These include bus stops, parking areas or types of roads based on the Directives for Urban Road Design (RASt) [8] in the urban sector (Table 2), for example.

The WS classification was selected for federal motorways (external alkali supply and high dynamic load). On account of the lower speeds involved, the dynamic traffic load is probably not as high in municipal areas. In addition, gritting agents tend to be used rather than de-icing agents, thus reducing the alkali supply and the risk of deleterious ASR. Moisture class WA or a comparable classification may therefore be sufficient. The stipulations of the Alkali Guidelines of the German Committee for Structural Concrete (DAfStb) [9] would be applicable to moisture class WA.

Many applications in the field of municipal road construction involve smaller construction jobs than in the case of motorways and so do not warrant setting up an on-site mixing plant. The concrete therefore tends to be supplied by ready-mixed concrete companies. Practical experience since the introduction of the ARS has shown that problems are encountered with smaller building projects in particular, because moisture class WS is now demanded on the basis of the load class. As neither WS aggregate testing nor performance tests are available in many regions, it is often not possible to use concrete construction methods in urban areas. Ready-mixed concrete with the necessary verification cannot be supplied. The aim of the current research project was to provide the municipal traffic area sector with findings as a basis for practicable moisture class assignment and corresponding evaluation of the concrete by way of performance tests, for example. Practice-oriented selection of the moisture class and evaluation by way of a suitable test method help to guard against incorrect usage associated with deleterious ASR and permit the use of regionally available starting materials. The durability and cost-effectiveness of concrete construction are thus enhanced.

deren Eigentümer auf Nachfrage der Entnahme von Bohrker-  
nen nicht zustimmten (z.B. ein Omnibusbahnhof bzw. eine Lkw-  
Stellfläche). Anstelle dieser Flächen wurde ein Autobahnabschnitt  
(Nr. 3) in die Untersuchung einbezogen, der mit einem in der Re-  
gion verwendeten Beton gleicher Zusammensetzung hergestellt  
wurde. Aus einem Zementwerk wurden drei Flächen mit unter-  
schiedlichem Schwerverkehr und Taumittelauftrag ausgewählt (Nr.  
7, 8 und 9). Von der Ortsumgehung B8n in Düsseldorf (Nr. 5 und  
6) wurden zwei Varianten mit unterschiedlichen Oberbetonen ein-  
bezogen. Außerdem wurden ein Busbahnhof (Nr. 4) und zwei in-  
nerstädtische Straßen in Berlin (Nr. 1) und Wiesbaden (Nr. 2) aus-  
gewählt. Der im Straßenbereich in Wiesbaden verwendete Beton  
(Nr. 2) wurde auch innerhalb der im Straßenbereich gelegenen Bu-  
shaltestellen verwendet.

Die ausgewählten Flächen wurden visuell auf AKR-bedingte  
Schadensbilder begutachtet [10]. Dabei wurden keine AKR-  
spezifischen Merkmale festgestellt. Vereinzelt waren feine ober-  
flächennahe Schwindrisse vorhanden.

Zu jedem Baulos wurden die zugänglichen Daten (z.B. Aus-  
gangstoffe, Betonzusammensetzung, Bau- bzw. Belastungs-  
klasse, Baujahr, Oberbau) erfasst (Tabelle 4). Außerdem wur-  
den z.B. Informationen zu Einbauverfahren und zur Taumittel-

**Tabelle 3: Bezeichnung und Baujahr der ausgewählten Betonflächen**  
**Table 3: Designation and year of construction of selected concrete**  
**areas**

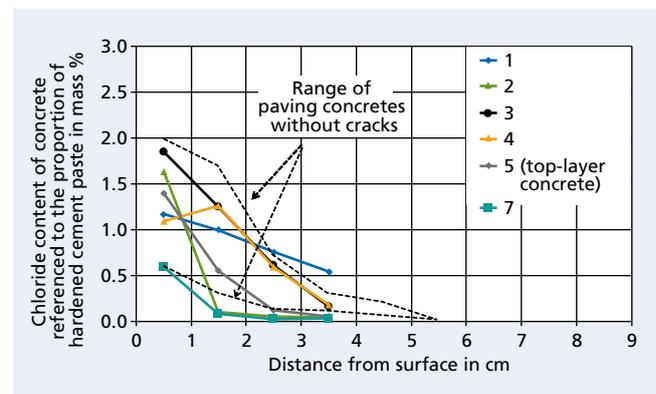
No.	Usage/type of traffic area	Year of construction
1	Road, left-turn lane	2003
2	Road	2002
3	Motorway hard shoulder with same concrete as other areas in the region in the municipal sector	2005
4	Bus station	2004/2005
5	B8n_I bypass (trunk road)	2002
6	B8n_II bypass (trunk road)	2002
7	Factory road	2004
8	Parking area	2007
9	Lorry parking area	1996

**Tabelle 4: Kennwerte der Betondecken**  
**Table 4: Characteristic values of concrete pavements**

No.	Concrete pavement construction method	Cement	kg/m <sup>3</sup>	Na <sub>2</sub> O in mass %	Age (years)	Classification in moisture class WS/WA	Use of de-icing agents in winter
1	Single-layer	CEM I 32,5 R	380	0.91	12	WS (Bkl I)	High
2		CEM I 42,5 R	370	0.82	13	WS (Bkl I)	Low
3		CEM I 32,5 R	350	0.58	10	WS (Bkl SV)	High
4		CEM II/B-T 42,5 N	355	0.79	9	WS (Bkl II)	High
5	Top-layer concrete I	CEM I 32,5 R	370	0.70	14	WS (Bkl SV)	High
6	Top-layer concrete II		375				
5/6	Bottom-layer concrete I/II		360				
7	Single-layer	CEM II/B-S 42,5 N	350	0.78	11	WS (Bkl III)	Low
8		CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R	360	0.87	8	WA (Bkl V)	High
9		CEM I 32,5 R	340	0.85	19	WS/WA (Bkl III/IV)	Low

## 2 Scope of the studies

The research project was conducted in three work packages. The first step was to study concrete sections from the municipal sector or comparable applications where good practical experience had been gained. A prerequisite was a service life of at least 10 years without any evidence of deleterious ASR. The sections were visually inspected for ASR-specific damage characteristics and the following data were recorded where available: Starting materials (cement type, alkali content, aggregates), concrete composition and other boundary conditions (year of construction, surface, use of de-icing agents). In order to establish the behaviour of the concretes in laboratory experiments, the second step involved taking drill core samples from the pavements and examining them with the testing procedures developed by VDZ for the moisture classes WA and WS [1 to 5]. Chloride profiles were also determined for selected concrete pavements and compared to the results from motorways (WS [9]). Finally, selected concretes were replicated in the laboratory. WS and WA performance testing was conducted on the basis of the information from the original initial test, and 40 °C fog chamber testing of the aggregates (crushed stone and gravel) was performed in accordance with the Alkali Guidelines [9].



**Bild 1: Wasserlösliche Chloridgehalte in Bohrker-  
nen von Betonfah-  
bahndecken aus Autobahnen (gestrichelte Linien [11]) und in Bohr-  
kernen aus dem kommunalen Bereich bezogen auf den Zement-  
steinanteil in Abhängigkeit von dem Abstand zur Oberfläche**  
**Figure 1: Water-soluble chloride content of drill cores from motor-  
way concrete pavements (dashed lines [11]) and of drill cores from  
the municipal sector referenced to the proportion of hardened ce-  
ment paste in relation to the distance from the surface**

beaufschlagung erhoben. Mit Ausnahme der Ortsumgebung B8n (2-schichtiger Beton) waren die Betone einschichtig eingebaut worden. Hinsichtlich der Verkehrsbelastung ist davon auszugehen, dass zum Zeitpunkt des Baus die Flächen 1 bis 7 den Bauklassen SV und I bis III zugeordnet wurden und damit heute formal der Feuchtigkeitsklasse WS entsprechen. Die Fläche 8 ist der Klasse WA und die Fläche 9 der Klasse WS/WA zuzuordnen. Bezüglich der Taumittelbeaufschlagung während des Winterdiensts konnten nur qualitative Angaben erhoben werden. Auf die Fläche des Bauloses 8 (Abstellfläche) wurde im Winter regelmäßig Taumittel aufgebracht. Der Taumittelauftrag wurde qualitativ als gering, mittel oder stark eingestuft.

**3.2 Arbeitspaket 2: Bohrkernuntersuchungen**

Aus den neun Flächen wurden Bohrkern entnommen. Aus einem Bohrkern jeder Fläche wurde eine Betonprobe entnommen und es wurden Dünnschliffe auf AKR-typische Merkmale (Risse, Gel) untersucht. Zum Entnahmezeitpunkt ergaben sich bei keiner Fläche Hinweise auf eine schädigende AKR. Außerdem wurden das Chloridprofil und die Dehnung im 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr bestimmt.

**3.2.1 Chloridprofil**

Zur Abschätzung des Eindringverhaltens von Natriumchlorid in den Beton wurde der Chloridgehalt von sechs ausgewählten Betondecken über den Querschnitt bestimmt. Das ermittelte Chloridprofil im oberflächennahen Bereich wurde mit Daten von Bohrkernen aus Autobahnen (WS [11]) verglichen. Bild 1 zeigt den wasserlöslichen Chloridgehalt im Beton bezogen auf den Zementsteinanteil in Abhängigkeit vom Abstand zur Oberfläche. Die gestrichelten Linien umschließen den Wertebereich für an Autobahnproben ermittelte Werte (WS). Der lösliche Chloridgehalt im Zementstein nahm bis zu einer Tiefe von rd. 5 cm kontinuierlich ab. Dabei zeigte sich kein systematischer Unterschied zwischen den kommunalen Flächen und Autobahnen. Mit Ausnahme der nicht mit Taumitteln beaufschlagten Werksstraße (Fläche 7) lagen die anderen Flächen im Wertebereich der Autobahnen (WS). Dass bei kommunalen Fahrbahndecken grundsätzlich geringere Chloridprofile infolge eines defensiveren Tausalzeinsatzes auftreten, konnte anhand der untersuchten Proben nicht bestätigt werden.

**3 Test results**

**3.1 Work package 1: Selection of areas**

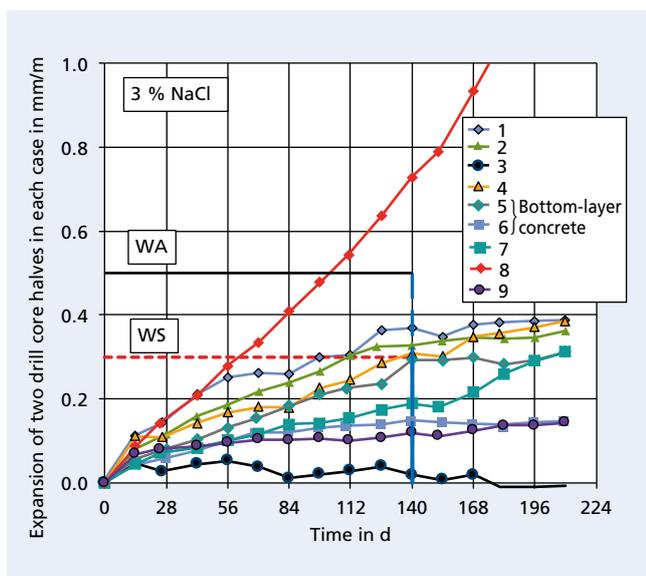
Examples for which good practical findings exist were selected to verify the suitability of concrete mixes for municipal traffic areas and their successful use in practice (Table 3). A prerequisite was a service life of at least 10 years without any evidence of deleterious ASR. Certain potentially suitable areas could not be incorporated into the study, as their owners did not consent to drill core samples being taken when asked (e.g. a bus station and a lorry parking area). Instead of these areas, a section of motorway (no. 3) which had been produced with a concrete of the same composition as used in the region was included in the study. Three areas of a cement plant with differing amounts of heavy traffic and de-icing agent application were selected (no. 7, 8 and 9). Two areas with different top-layer concretes from the B8n bypass in Düsseldorf (no. 5 and 6) were included. In addition, a bus station (no. 4) and two urban roads in Berlin (no. 1) and Wiesbaden (no. 2) were selected. The concrete used in the road area in Wiesbaden (no. 2) was also employed for the bus stops in the area of the road.

The selected areas were visually inspected for ASR-induced damage patterns [10]. This did not reveal any ASR-specific characteristics. Isolated fine near-surface shrinkage cracks were found.

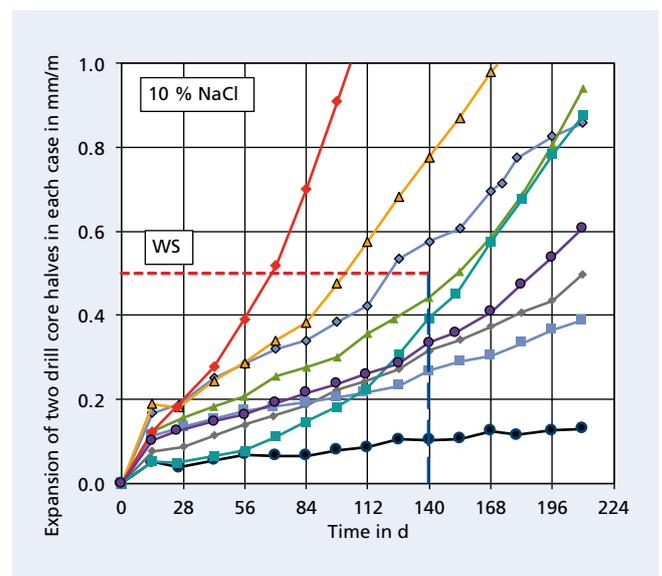
The accessible data were recorded for each construction job (e.g. starting materials, concrete composition, construction/load class, year of construction, surface) (Table 4). Information was also gathered on the placement method and treatment with de-icing agents, for example. With the exception of the B8n bypass (2-layer concrete), the concretes were placed in single layers. With regard to the traffic load, it can be assumed that at the time of construction areas 1 to 7 were assigned to construction classes SV and I to III and therefore formally comply with moisture class WS today. Area 8 is assigned to class WA and area 9 to class WS/WA. It was only possible to acquire qualitative information concerning the treatment with de-icing agents during gritting operations. Area no. 8 (parking area) was regularly treated with de-icing agent in winter. De-icing agent application was qualitatively classified as low, medium or high.

**3.2 Work package 2: Drill core investigations**

Drill core samples were taken from the nine areas. A sample of concrete was taken from the drill core of each area and thin sections



**Bild 2:** Dehnungen von Bohrkernhälften (Mittelwert aus zwei Bohrkernhälften) aus den neun Flächen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 3 %ige NaCl-Lösung  
*Figure 2:* Expansion of drill core halves (mean value from two drill core halves) from the nine areas in the 60 °C concrete test with external alkali supply through a 3 % NaCl solution



**Bild 3:** Dehnungen von Bohrkernhälften (Mittelwert aus zwei Bohrkernhälften) aus den neun Flächen im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen durch eine 10 %ige NaCl-Lösung  
*Figure 3:* Expansion of drill core halves (mean value from two drill core halves) from the nine areas in the 60 °C concrete test with external alkali supply through a 10 % NaCl solution

### 3.2.2 Bohrkernprüfung im 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen

Für die Prüfungen wurden von jedem der neun Flächen zwei Bohrkern verwendet. Die Bohrkern wurden in Längsrichtung halbiert und Messmarken im Abstand von 20 cm angeordnet. Bei den beiden zweischichtigen Betondecken (Nr. 5 und 6) wurden die Dehnungen der rd. 5 cm bis 7 cm dicken Oberbetone mit zusätzlichen 10-cm-Messstrecken auf der oberen Stirnfläche bzw. der Innenseite der Mantelfläche gesondert erfasst.

Das Restdehnungspotenzial des Betons wurde mit dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr von außen für die Feuchtigkeitsklassen WA (3 %ige NaCl-Lösung) bzw. WS (3 %ige und 10 %ige NaCl-Lösung) ermittelt. Wenn die Dehnungen nach zehn Zyklen bei 3 %iger Alkalizufuhr den Wert von 0,50 mm/m nicht überschreiten, kann der Beton der Feuchtigkeitsklasse WA zugeordnet werden. Für die Feuchtigkeitsklasse WS darf bei 10 %iger Alkalizufuhr ein Wert von 0,50 mm/m bzw. bei 3 %iger Lösung ein Wert von 0,30 mm/m nicht überschritten werden. Die Prüfdauer wurde über die normalen 10 Zyklen auf 15 Zyklen verlängert.

Es zeigte sich, dass die kurze Messstrecke von 10 cm nicht geeignet war, um reproduzierbare Messwerte zu erzielen. In den Bildern ist daher jeweils nur der Unterbeton der Betone B8n\_I und B8n\_II (lfd. Nr. 5 und 6) dargestellt. Bei einer Konzentration von 3 % NaCl ist mit einer Ausnahme keine nennenswerte Zunahme der Dehnung nach zehn Zyklen zu verzeichnen (Bild 2). Den möglichen Ursachen der hohen Dehnungen der lfd. Nr. 8 ist nachzugehen. Die Dehnungen der Betone liegen unter dem Wert von 0,50 mm/m und können daher der Feuchtigkeitsklasse WA zugeordnet werden. Die meisten Betone wären zudem anhand der Prüfergebnisse auch für die Feuchtigkeitsklasse WS ( $\leq 0,30$  mm/m) geeignet.

Bei einer Konzentration von 10 % NaCl ist ein wesentlich stärkerer Anstieg der Dehnungen auch über den Wert von zehn Zyklen hinaus zu verzeichnen (Bild 3). Das Bewertungskriterium für die Feuchtigkeitsklasse WS von 0,50 mm/m nach zehn Zyklen wird von sechs der neun Varianten unterschritten. Sehr gering sind die Dehnungen des Betons 3 aus dem Seitenstreifen einer Autobahn, der in gleicher Zusammensetzung in mehreren kommunalen Flächen der Region eingebaut wurde.

## 3.3 Arbeitspaket 3: Herstellung von Laborbetonen

### 3.3.1 Allgemeines

Im Arbeitspaket 3 wurden die Ausgangsstoffe (Zement, Gesteinskörnungen) jener Betone beschafft, aus denen die Betondecken der

of this were investigated for ASR-specific characteristics (cracks, gel). At the time of sampling there was no indication of deleterious ASR in any of the areas. Moreover, the chloride profile and the expansion in the 60 °C concrete test with alkali supply were determined.

### 3.2.1 Chloride profile

The chloride content of six selected concrete pavements was obtained via the cross-section to estimate the sodium chloride penetration behaviour in the concrete. The near-surface chloride profile determined was compared to data from drill cores from motorways (WS [11]). Fig. 1 shows the water-soluble chloride content of the concrete referenced to the proportion of hardened cement paste in relation to the distance from the surface. The dashed lines outline the range of values obtained from motorway samples (WS). The soluble chloride content of the hardened cement paste decreased continuously down to a depth of around 5 cm. No systematic difference became apparent between the municipal areas and the motorways. With the exception of the factory road (area 7) which was not treated with de-icing agents, the other areas fell within the value range of the motorways (WS). The samples investigated could not confirm that lower chloride profiles generally occur in municipal road pavements as a result of a more sparing use of de-icing agents.

### 3.2.2 Drill core investigation in 60 °C concrete test with external alkali supply

Two drill cores from each of the nine areas were used for the tests. The drill cores were halved lengthways and measuring marks were placed at intervals of 20 cm. In the case of the two 2-layer concrete pavements (no. 5 and 6), the expansion of the approx. 5 cm to 7 cm thick top-layer concrete was separately recorded with additional 10 cm measurement sections on the top end face and on the inside of the lateral surface.

The residual expansion potential of the concrete was determined by way of the 60 °C concrete test with external alkali supply for the moisture classes WA (3 % NaCl solution) and WS (3 % and 10 % NaCl solution). If the expansion after ten cycles with 3 % alkali supply does not exceed a value of 0.50 mm/m, the concrete can be assigned to moisture class WA. For moisture class WS, values of 0.50 mm/m and 0.30 mm/m must not be exceeded with 10 % alkali supply and 3 % solution respectively. The test duration was extended from the normal ten cycles to a total of 15 cycles.

**Tabelle 5: Betonzusammensetzungen gemäß der jeweiligen alten Erstprüfung für die nachträgliche Performance-Prüfung**  
**Table 5: Concrete compositions in accordance with the applicable original initial test for the subsequent performance test**

Characteristic value	Area			
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 8
Cement	380 kg/m <sup>3</sup> CEM I 42,5 N WS test cement	370 kg/m <sup>3</sup> CEM I 42,5 N WS test cement	350 kg/m <sup>3</sup> CEM I 42,5 N	360 kg/m <sup>3</sup> CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R
Na <sub>2</sub> O equivalent	0.76 doped to 0.91 mass %	0.76 doped to 0.82 mass %	0.64 mass %	0.87 mass %
Water	168 kg/m <sup>3</sup>	173.9 kg/m <sup>3</sup>	140 kg/m <sup>3</sup>	153 kg/m <sup>3</sup>
w/c ratio	0.44	0.47	0.40	0.43
Air content	4.5 vol. %	4.5 vol. %	4.5 vol. %	4.5 vol. %
Aggregates	Values in vol. %, bulk density in kg/dm <sup>3</sup>			
Sand 0/2 mm	31 vol. %, 2.68	30 vol. %, 2.64	29 vol. %, 2.63	28 vol. %, 2.66
Gravel 2/8 mm	25 vol. %, 2.62	20 vol. %, 2.62	19 vol. %, 2.63	23 vol. %, 2.64
Gravel 8/16 mm	–	–	–	13 vol. %, 2.64
Crushed stone 8/11	–	–	14 vol. %, 2.70	–
Crushed stone 11/16	–	–	14 vol. %, 2.70	–
Crushed stone 8/16	44 vol. %, 2.76	50 vol. %, 2.80	–	36 vol. %, 2.65
Crushed stone 16/22	–	–	24 vol. %, 2.70	–

**Tabelle 6: Zemente für die Performance-Prüfungen mit dem 60 °C-Betonversuch**  
**Table 6: Cements for performance tests with the 60 °C concrete test**

Area	Cement on placement		Current cement		Cement for experimental programme
	Cement type	Na <sub>2</sub> O in mass %	Cement type	Na <sub>2</sub> O in mass %	
1	CEM I 32,5 R	0.91	CEM I 42,5 R	1.00	WS test cement CEM I 42,5 R Na <sub>2</sub> O = 0.76 mass % doped to 0.91 mass %
2	CEM I 42,5 R	0.82	Clinker production discontinued	–	WS test cement CEM I 42,5 R Na <sub>2</sub> O = 0.76 mass % doped to 0.82 mass %
3	CEM I 32,5 R	0.58	CEM I 52,5 N (so)	0.25	CEM I 42,5 N Na <sub>2</sub> O = 0.64 mass %
8	CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R	0.87	CEM II/A-M (S-LL) 42,5 R	0.87	Current cement

Proben Nr. 1, 2, 3 und 8 bestehen, und daraus im Labor nachträglich Betone hergestellt. Unter Verwendung der Informationen der damaligen Erstprüfung wurde nachträglich eine AKR-Performance-Prüfung mit dem 60 °C-Betonversuch mit 3 %iger und 10 %iger NaCl-Lösung durchgeführt. Die Betone für die Performance-Prüfungen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Da die damals verwendeten Zemente in drei Fällen nicht mehr verfügbar waren, wurde ein AKR-Prüfzement aufdotiert (Nr. 1 bzw. Nr. 2) bzw. ein vergleichbarer Zement (Nr. 3) verwendet (Tabelle 6). Außerdem wurde die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung nach Alkali-Richtlinie in der 40 °C-Nebelkammerlagerung geprüft (vier Kiese und vier Splitte). Die Betonzusammensetzungen entsprachen der Alkali-Richtlinie (Tabelle 7).

3.3.2 AKR-Performance-Prüfung

Bei einer Konzentration von 3 % NaCl lagen die Dehnungen aller Betone unter dem Wert von 0,50 mm/m und könnten daher der Feuchtigkeitsklasse WA zugeordnet werden (Bilder 4a bis d). Drei Betone wären anhand der Prüfergebnisse ebenfalls für die Feuchtigkeitsklasse WS (< 0,30 mm/m) geeignet. Die im Vergleich zu anderen Flächen hohen Bohrkerndehnungen des Betons mit der Nr. 8 zeigten sich bei der (nachträglichen) Performanceprüfung nicht mehr (Bild 4d). Bei einer Konzentration von 10 %

It became apparent that the short measurement section of 10 cm was not suitable for obtaining reproducible measured values. Only the bottom-layer concrete is therefore shown in the illustrations for the concretes B8n\_I and B8n\_II (no. 5 and 6). With one exception, no significant increase in expansion was found after ten cycles for a concentration of 3 % NaCl (Fig. 2). The possible causes of the great expansion obtained with no. 8 must be investigated. As the expansion of the concretes is below a value of 0.50 mm/m, these can be assigned to moisture class WA. Based on the test results, the majority of the concretes would also be suitable for moisture class WS (≤ 0.30 mm/m).

A far greater increase in expansion, even beyond the value for ten cycles, can be seen for a concentration of 10 % NaCl (Fig. 3). Six of the nine types remained below the 0.50 mm/m assessment criterion after ten cycles for moisture class WS. Concrete 3 from the hard shoulder of a motorway, which was used in the same composition in several municipal areas in the region, exhibited very little expansion.

3.3 Work package 3: Production of laboratory concretes

3.3.1 General

Work package 3 involved obtaining the starting materials (cement, aggregates) of the concrete used to make the concrete pavements of samples no. 1, 2, 3 and 8 and then producing concretes from these in the laboratory. Based on the information from the original initial test, an ASR performance test was subsequently conducted by way of the 60 °C concrete test with a 3 % and 10 % NaCl solution. The concrete compositions for the performance tests are listed in Table 5.

As the cements originally used were no longer available in three cases, an ASR test cement was doped (no. 1 and no. 2) or use was made of a comparable cement (no. 3) (Table 6). The alkali reactivity of the aggregate was also tested in accordance with the Alkali Guidelines with 40 °C fog chamber storage (four gravels and four crushed stones). The concrete compositions corresponded to the Alkali Guidelines (Table 7).

**Tabelle 7: Betonzusammensetzungen für die Prüfung in der 40 °C-Nebelkammer**  
**Table 7: Concrete compositions for testing in 40 °C fog chamber**

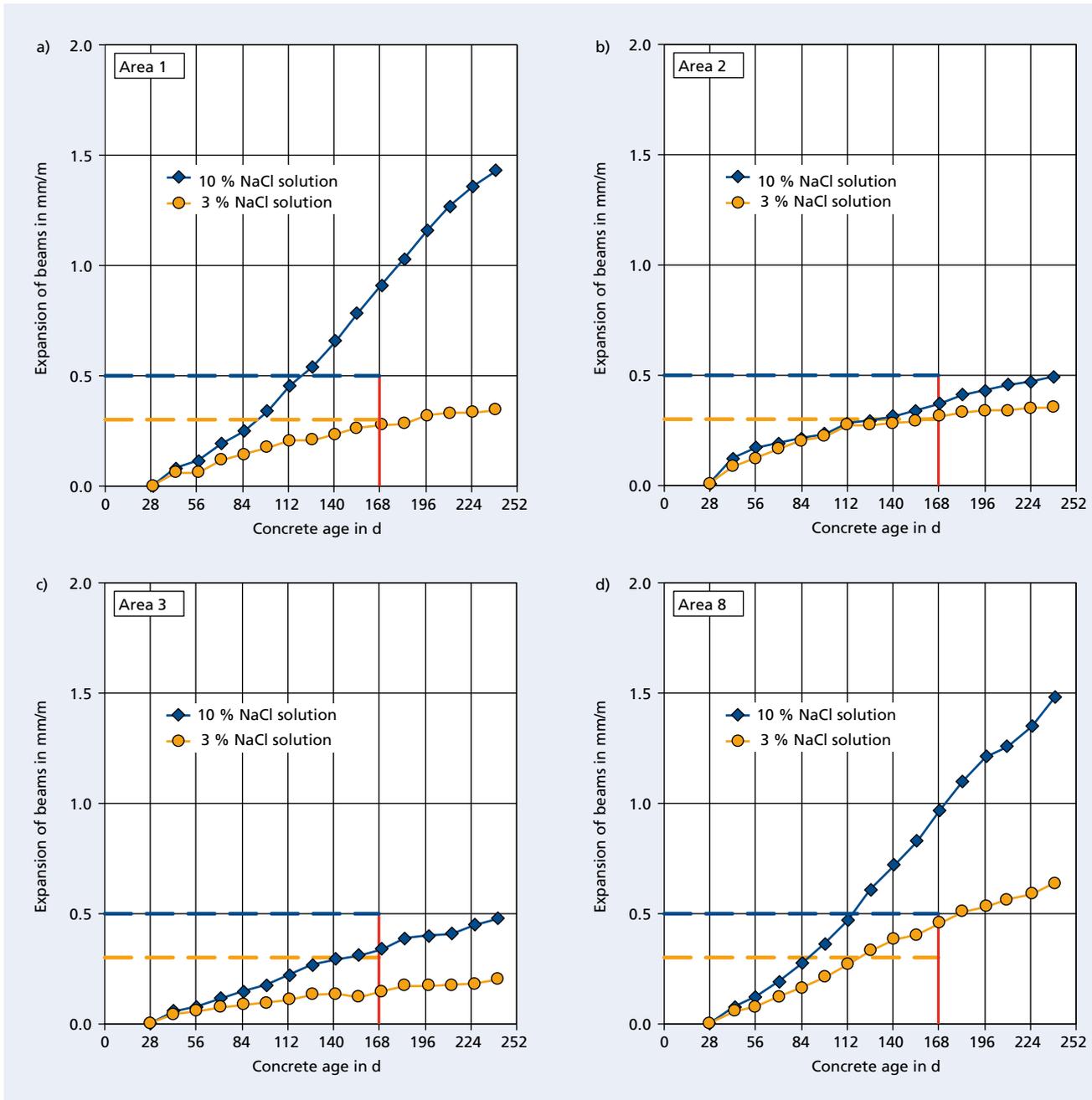
Characteristic values of concrete compositions								
Cement	400 kg/m <sup>3</sup> CEM I 32,5 R ASR test cement							
Na <sub>2</sub> O	1.30 mass % (doped from 1.13 mass % with K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )							
Water	w/c = 0.45: 180 kg/m <sup>3</sup>							
Air content	1.0 vol. %							
Sand 0/2	30 vol. % natural sand (VDZ standard sand)							
Aggregate in vol. %								
Area	1		2		3		8	
Particle size group	0/16 mm		0/16 mm		0/22 mm		0/16 mm	
	Gravel	Crushed stone	Gravel	Crushed stone	Gravel	Crushed stone	Gravel	Crushed stone
2/8 mm	40	40	40	40	20	20	40	40
8/16 mm	30	30	30	30	20	20	30	30
16/22 mm	–	–	–	–	30	30	–	–

3.3.2 ASR performance test

As, with a concentration of 3 % NaCl, the expansion of all the concrete mixes was below a value of 0.50 mm/m, these could be assigned to moisture class WA (Figs. 4a to d). Based on the test results, three of the concrete mixes would also be suitable for moisture class WS (≤ 0.30 mm/m). The high level of drill core expansion exhibited by concrete no. 8 as compared to other areas was no longer found in the (subsequent) performance test (Fig. 4d). A far greater increase in expansion, even beyond the value for ten cycles, can be seen for a concentration of 10 % NaCl. Two types (no. 2 and no. 3, Figs. 4b and 4c) remained below the 0.50 mm/m assessment criterion after ten cycles for moisture class WS.

3.3.3 40 °C fog chamber storage

Five of the eight aggregates investigated (Figs. 5a to h) met the requirements after 270 days: Cube crack width



**Bild 4: Dehnung von Betonbalken im 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr von außen; a) Fläche 1; b) Fläche 2; c) Fläche 3; d) Fläche 8**  
**Figure 4: Expansion of concrete beams in the 60 °C concrete test with external alkali supply; a) Area 1; b) Area 2; c) Area 3; d) Area 8**

NaCl ist ein wesentlich stärkerer Anstieg der Dehnungen auch über den Wert von zehn Zyklen hinaus zu verzeichnen. Das Beurteilungskriterium für die Feuchtigkeitsklasse WS von 0,50 mm/m nach zehn Zyklen wurde von zwei Varianten (Nr. 2 und Nr. 3, Bilder 4b und 4c) unterschritten.

### 3.3.3 40 °C-Nebelkammerlagerung

Von den acht untersuchten Gesteinen (Bilder 5a bis h) bestanden fünf die Anforderungen nach 270 Tagen: Rissbreite Würfel < 0,20 mm und Dehnung Prismen  $\leq$  0,60 mm/m. Folgende drei Gesteine verfehlten die Anforderungen:

- Kies aus Fläche Nr. 1: Dehnung und Rissbreite überschritten (Bild 5 a),
- Splitt aus Fläche Nr. 3: Dehnung und Rissbreite überschritten (Bild 5 f),
- Splitt aus Fläche Nr. 8: Rissbreite am letzten Messtermin überschritten (Bild 5 h).

< 0.20 mm and prism expansion  $\leq$  0.60 mm/m. The following three aggregates failed to meet the requirements:

- Gravel from area no. 1: Expansion and crack width exceeded (Fig. 5 a),
- Crushed stone from area no. 3: Expansion and crack width exceeded (Fig. 5 f),
- Crushed stone from area no. 8: Crack width exceeded on last measurement date (Fig. 5 h).

On the basis of these results, these three aggregates would be assigned to alkali reactivity class E III-S (alkali reactive). In accordance with the Alkali Guidelines they could then not be used for moisture class WA without taking other measures. A low-alkali cement has to be used in the case of cement contents up to and including 350 kg/m<sup>3</sup>. For cement contents > 350 kg/m<sup>3</sup>, the aggregate has to be replaced or the suitability of the concrete has to be verified in a performance test.

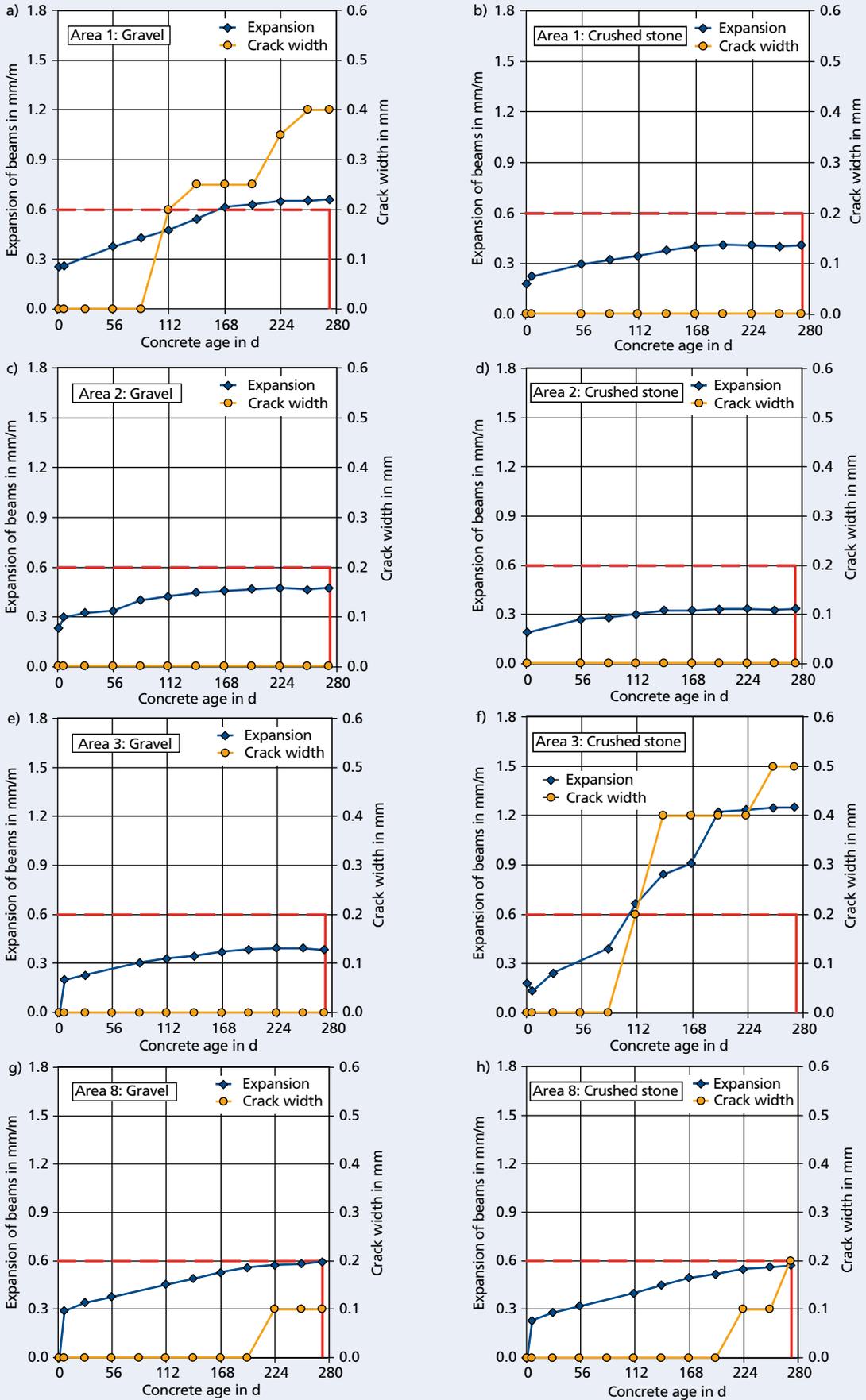


Bild 5: Dehnung von Betonbalken und Rissbreite von Betonwürfeln in der 40 °C-Nebelkammerlagerung; a) und b) Fläche 1; c) und d) Fläche 2; e) und f) Fläche 3; g) und h) Fläche 8 (jeweils links Kies und rechts Splitt)

Figure 5: Expansion of concrete beams and crack width of concrete cubes in 40 °C fog chamber storage; a) and b) Area 1; c) and d) Area 2; e) and f) Area 3; g) and h) Area 8 (gravel on the left and crushed stone on the right in each case)

Diese drei Gesteinskörnungen wären anhand dieser Ergebnisse der Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S zuzuordnen. Sie dürfen dann nach Alkali-Richtlinie nicht ohne Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse WA verwendet werden. Bei Zementgehalten bis einschließlich 350 kg/m<sup>3</sup> muss ein na-Zement verwendet werden. Bei Zementgehalten > 350 kg/m<sup>3</sup> ist die Gesteinskörnung auszutauschen oder in einer Performance-Prüfung die Eignung des Betons nachzuweisen.

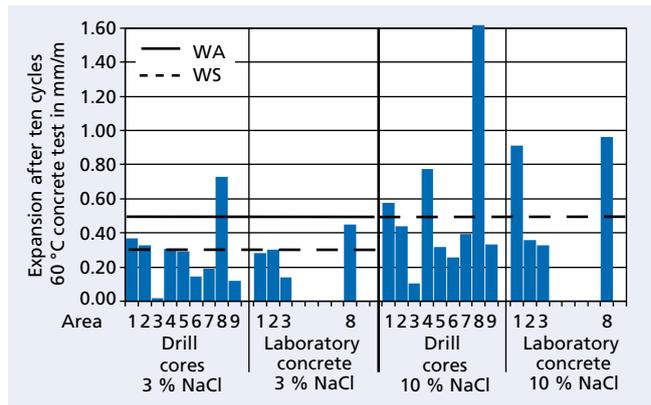
**4 Zusammenfassung**  
**4.1 Allgemeines**

Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion können vermieden werden, indem Betone mit einer für den jeweiligen Anwendungszweck (= Feuchtigkeitsklasse) ausreichend geringen Alkaliempfindlichkeit eingesetzt werden. Im IGF-Vorhaben IGF 18775 N wurden Kriterien erarbeitet, um die Alkaliempfindlichkeit von Betonen im Bereich des kommunalen Straßenbaus angemessen beurteilen zu können. Dabei wurden der 60 °C-Betonversuch mit unterschiedlichen Natriumchlorid-Konzentrationen und die 40 °C-Nebelkammerlagerung verwendet.

**4.2 Bewertung der Betone mit den Prüfverfahren**

Im 60 °C-Betonversuch zeigten alle Bohrkern mit einer Ausnahme Dehnungen unterhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA (Bild 6 links, 3 % NaCl). In einem Fall (Fläche Nr. 8) traten Dehnungen über dem Bewertungskriterium auf. Die Fläche ist nach Angaben des Probenbereitstellers im Alter von zehn Jahren ungeschädigt. Der Beton würde aufgrund der Zuordnung der Gesteinskörnung anhand der Nebelkammerprüfung zur Klasse E III-S nicht der Alkali-Richtlinie in der Feuchtigkeitsklasse WA entsprechen. Bei der Fläche Nr. 3 aus dem Seitenstreifen einer Bundesautobahn ist der Splitt ebenfalls E III-S zuzuordnen und darf nach Alkali-Richtlinie bei einem Zementgehalt > 350 kg/m<sup>3</sup> nicht in der Feuchtigkeitsklasse WA verwendet werden. Bei einem Zementgehalt bis 350 kg/m<sup>3</sup> kann die Gesteinskörnung mit na-Zement verwendet werden. Der Beton der untersuchten Fläche 3 lag bei 350 kg/m<sup>3</sup> und der verwendete Zement hatte na-Eigenschaft (Tabelle 4).

Acht von neun Bohrkernen zeigten Dehnungen unterhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA. Der eine Beton mit Dehnungen oberhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA wäre aufgrund der Nebelkammerergebnisse einer der verwendeten Gesteinskörnungen nicht WA-geeignet gewesen. Die vier Laborbetone zeigten durchgängig Dehnungen unterhalb des Bewertungskriteriums für die Feuchtigkeitsklasse WA. Fünf von neun Bohrkernen erfüllten ebenfalls die Bewertungskriterien für die Feuchtigkeitsklasse WS (Bild 6 links, 3 % NaCl). Diese galt ebenfalls für zwei Laborbetone.



**Bild 6: Dehnung der Bohrkernhälften bzw. der Betonbalken nach zehn Zyklen der Wechsellagerung im 60 °C-Betonversuch mit Alkali-Zufuhr von außen durch eine 3 bzw. 10 %ige Natriumchloridlösung**  
**Figure 6: Expansion of drill core halves/concrete beams after ten cycles of alternating storage in the 60 °C concrete test with external alkali supply through a 3 and 10 % sodium chloride solution**

**4 Summary**  
**4.1 General**

Damage from alkali-silica reaction can be avoided by using concretes with alkali reactivity low enough for the application concerned (= moisture class). Criteria to permit appropriate assessment of the alkali reactivity of concretes in the municipal road construction sector were drawn up in the IGF project IGF 18775 N. This involved using the 60 °C concrete test with various sodium chloride concentrations and 40 °C fog chamber storage.

**4.2 Assessment of concretes with the test methods**

All but one of the drill cores revealed expansion below the assessment criterion for moisture class WA in the 60 °C concrete test (Fig. 6 on the left, 3 % NaCl). Expansion above the assessment criterion was found in one case (area no. 8). According to the sample provider, the area is ten years old and undamaged. On account of the assignment of the aggregate to class E III-S (alkali reactive) on the basis of fog chamber testing, the concrete would not correspond to the Alkali Guidelines in moisture class WA. In the case of area no. 3 from the hard shoulder of a motorway, the crushed stone is likewise assignable to E III-S, which means that, according to the Alkali Guidelines, it cannot be used in moisture class WA with a cement content > 350 kg/m<sup>3</sup>. With a cement content up to 350 kg/m<sup>3</sup> the aggregate can be used with low-alkali cement. For the concrete of area 3 in the investigation, the content was 350 kg/m<sup>3</sup> and the cement used had low-alkali properties (s. Table 4).

**Tabelle 8: Vorschlag für die Beurteilung der Feuchtigkeitsklasse von Flächen im kommunalen Bereich im Vergleich zu Bundesfernstraßen gemäß ARS**  
**Table 8: Proposal for the moisture class assessment of areas in the municipal sector as opposed to trunk roads in accordance with ARS**

RStO 01 Design-related load B <sup>1)</sup>	RStO 12 Dimensioning-related load B <sup>1)</sup>	RStO 01 Construction class	RStO 12 [7] Load class	Moisture class	
				Trunk roads as per ARS	Municipal sector (VDZ proposal)
> 32		SV	Bk100	WS	WS
10 to 32		I	Bk32		
3 to 10	3.2 to 10	II	Bk10		
0.8 to 3	1.8 to 3.2	III	Bk3.2		
	1.0 to 1.8		Bk1.8		
0.3 to 0.8	0.3 to 1.0	IV	Bk1.0	WA	WA Extension up to Bk10
0.1 to 0.3	< 0.3	V	Bk0.3		
to 0.1		VI			

<sup>1)</sup> Equivalent 10 t standard axles in million

### 4.3 Vorschlag für die Bewertung von Betonflächen im kommunalen Bereich

In den untersuchten Fällen erscheint die Anwendung der Regeln der Alkali-Richtlinie für die Feuchtigkeitsklasse WA für Fahrbahndecken angemessen. Es wird vorgeschlagen, dass sich bei Betonfahrbahndecken im kommunalen Bereich bis einschließlich der Belastungsklasse Bk10 die AKR-vorbeugenden Maßnahmen zukünftig an der Feuchtigkeitsklasse WA orientieren (Tabelle 8). Die Betonzusammensetzungen und die Ausgangsstoffe müssen den Anforderungen der Alkali-Richtlinie entsprechen. Die Anforderungen an Zemente nach TL Beton-StB blieben unabhängig von der Feuchtigkeitsklasse bestehen, wenn die Ausschreibung Bezug auf die TL Beton-StB nimmt. Bei Einstufung in die Feuchtigkeitsklasse WA können in bestimmten Fällen für den Zement zusätzlich die Anforderungen der DIN 1164-10 (na-Zement) gelten. Performance-Prüfungen wären dann in den in der Alkali-Richtlinie definierten Fällen oder in Zweifelsfällen durchzuführen.

### Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben IGF 18775 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Eight out of nine of the drill cores exhibited expansion below the assessment criterion for moisture class WA. The one concrete with expansion above the assessment criterion for moisture class WA would not have been suitable for WA on account of the fog chamber results for one of the aggregates used. All four of the laboratory concretes exhibited expansion below the assessment criterion for moisture class WA. Five out of nine drill cores also met the assessment criteria for moisture class WS (Fig. 6, on the left, 3 % NaCl). This likewise applied to two laboratory concretes.

### 4.3 Proposal for the assessment of concrete areas in the municipal sector

In the cases examined, application of the stipulations of the Alkali Guidelines for moisture class WA appears to be appropriate for road pavements. For concrete road pavements in the municipal sector up to and including load class Bk10, the recommendation is to base measures to prevent ASR on moisture class WA in the future (Table 8). The concrete compositions and the starting materials must conform to the requirements of the Alkali Guidelines. The requirements for cements in accordance with the Technical delivery terms for materials and material mixtures for base courses with hydraulic binders and concrete pavements (TL Beton-StB) would still apply irrespective of the moisture class if the invitation to tender makes reference to TL Beton-StB. In the event of classification in moisture class WA, the cement may additionally be subject to the requirements of DIN 1164-10 (low-alkali cement) in certain cases. Performance tests would then have to be conducted in the cases defined in the Alkali Guidelines or in case of doubt.

### Note on sponsorship

The IGF project IGF 18775 N of the research association VDZ gGmbH was sponsored by the Federation of Industrial Cooperative Research Associations within the framework of the scheme to promote Industrial Collective Research and Development (IGF) of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy based on a resolution passed by the German Bundestag.

### Literatur / Literature

- [1] Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.; Müller, Ch.; Bokern, J.; Schäfer, E.: AKR-Prüfverfahren: Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz. *Beton* 56 (2006) H. 12, S. 599–604; 57 (2007) H. 1–2, S. 63–71
- [2] Müller, Ch.; Borchers, I.; Eickschen, E.: AKR-Prüfverfahren: Auf dem Weg zur Performance-Prüfung. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007) H. 8, S. 528–538
- [3] Müller, Christoph; Borchers, Ingmar; Eickschen, Eberhard: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren - Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance und WS-Grundprüfungen. *Beton* 62 (2012) H. 10, S. 397–406
- [4] Müller, Christoph; Borchers, Ingmar: AKR-Performance-Prüfungen: Erweiterung der Datenbasis mit dem 60 °C-Betonversuch unter besonderer Berücksichtigung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen: AiF-Forschungsvorhaben Nr. 16569 N, VDZ gGmbH, Düsseldorf 2014
- [5] Borchers, Ingmar; Müller, Ch.: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA. 18. Internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsbericht Bd. 2, Weimar 2012, S. 327–336
- [6] Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 – Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften – 04.4: Straßenbefestigung, Bauweisen – Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)
- [7] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO 12, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Ausgabe 2012, FGSV Verlag, Köln 2012
- [8] Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen, RAST 06, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, Ausgabe 2006, FGSV Verlag, Köln 2006
- [9] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton: Alkali-Richtlinie. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2013
- [10] Empfehlungen für die Schadensdiagnose und die bauliche Erhaltung von AKR-geschädigten Fahrbahndecken aus Beton. Fortschreibung April 2012
- [11] Auswirkungen der Alkalizufuhr durch Taumittel auf Bindemittel für Beton mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen: Schlussbericht zu Vorhaben Nr. 15977 N. Verein Deutscher Zementwerke, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Düsseldorf, Berlin 2011