

# Beurteilung des AKR-Schädigungspotentials von Betonen mittels Klimawechsellagerung

Die Kombination neu entwickelter Untersuchungsverfahren (Mörtelschnelltest, Klimawechsellagerung) mit gezielten Analysemethoden soll sowohl für Gesteinskörnungen als auch für Betone eine zuverlässige Aussage zum AKR-Schädigungspotential ermöglichen.

## 1 Einleitung

Während der Nutzungsdauer wirken auf Außenbauteile Umgebungsbedingungen ein, die den Beton durch häufige Feuchte- und Temperaturwechsel beanspruchen. Feuchte- und Temperaturwechsel können zu thermischen und hygrischen Zwangsbeanspruchungen, zum Stoffaustausch mit der Umgebung sowie zu Transport-, Lösungs- und Ausfällungsvorgängen im Betongefüge führen. Bei nicht sachgerecht zusammengesetzten und/oder hergestellten Betonen setzen diese Vorgänge Schadensmechanismen in Gang [1], die die Dauerhaftigkeit des Bauwerks beeinträchtigen, seine Nutzungsdauer reduzieren und aufwendige Sanierungsmaßnahmen erforderlich machen. Die für das konkrete Bauwerk tatsächlich erzielte Dauerhaftigkeit des Betons ist immer das Ergebnis einer Vielzahl veränderlicher Einflussfaktoren in Wechselwirkung mit den jeweilig einwirkenden Umgebungsbedingungen. Eine Prognose der Dauerhaftigkeit wird sich anhand von Erfahrungswerten zunehmend schwieriger gestalten. Für „Performance-Prüfverfahren“ ist daher die Zielstellung abzuleiten, die Neigung von Betonen zu schädigenden Gefügeveränderungen und Phasenneubildungen möglichst konsequent in Abhängigkeit von folgenden Faktoren zu quantifizieren:

- Betonzusammensetzung,
- Herstellungs-, Transport-, Verarbeitungs- und Erhärtungsbedingungen (insb. Temperatur sowie Art und Dauer der Nachbehandlung),
- Umgebungsbedingungen.



Bild 1. Blick in die geöffnete Klimasimulationskammer

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Beton für Außenbauteile werden am F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde Klimawechsellagerungen zur zeitraffenden Simulation mitteleuropäischer Klimabedingungen durchgeführt, die wesentliche Einflüsse aus den Umgebungsbedingungen durch alternierende Feuchte- und Temperaturwechsel in einer neuartigen Klimasimulationskammer beinhalten (Bild 1). Ziel dieser Untersuchungen ist es, durch die Simulation europäischer Klimabedingungen die Neigung von Betonen für Außenbauteile zu schädigenden Phasenneubildungen und Gefügeveränderungen und eine dadurch eingeschränkte Dauerhaftigkeit nachzuweisen. Dabei stehen schädigende Veränderungen infolge AKR und verspäteter Ettringitbildung im erhärteten Beton im Vordergrund. Schäden durch Bewehrungskorrosion und durch Betonkorrosion infolge chemischen Angriffs sowie unzureichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands sind derzeit nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die Vorgänge, die durch komplex einwirkende Umgebungsbedingungen im Beton ausgelöst werden können, müssen durch geeignete Prüfbedingungen möglichst zeitraffend provoziert werden. Nachfolgend werden erste Ergebnisse vorgestellt, die unter Anwendung eines speziell für das Problem der beton-schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) entwickelten Klimawechsellagerungsprogramms erzielt wurden.

## 2 Klimawechsellagerung (KWL)

### 2.1 Verfahrensbeschreibung

Nach umfangreichen Vorversuchen [2], [3] wurde für die Problematik AKR ein Klimawechsellagerungsprogramm entwickelt, das pessimale Bedingungen bezüglich der AKR (45 °C + 100 % rel. Feuchte = Nebelphase) durch längere Einwirkungsdauer stärker wichtet.

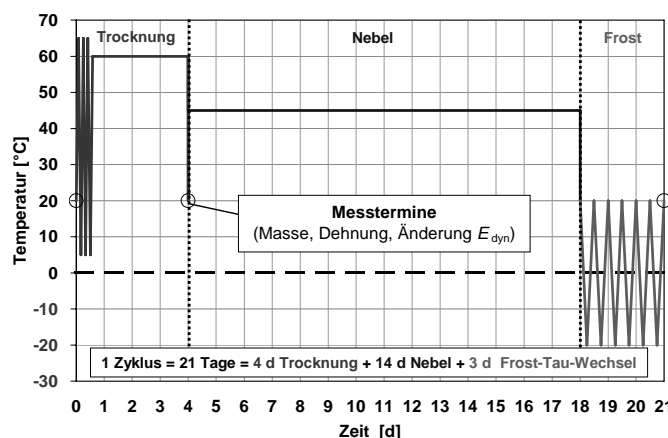


Bild 2. Zyklusschema des AKR-Programms für die Klimasimulationskammer

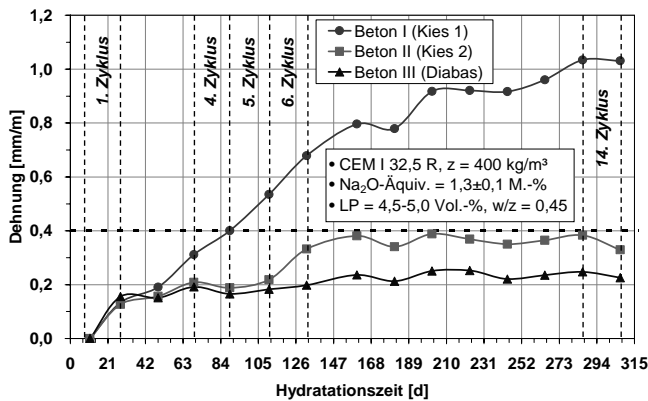


Bild 3. Dehnungen für 3 LP-Betone mit unterschiedlichen Gesteinskörnungen durch Klimawechsellaagerung

Ein kompletter Programmzyklus besteht i.w. aus Trocknungsphase, Nebelphase und Frost-Tau-Wechselphase und dauert 21 Tage (Bild 2). Es sind nach den bisherigen Erfahrungen mindestens vier bis sechs Zyklen erforderlich, um die Dauerhaftigkeit eines Betons bezüglich AKR beurteilen zu können. Je nach Betonzusammensetzung und Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung kann die erforderliche Zyklenanzahl variieren.

Die Klimawechsellaagerung (KWL) wird an Betonbalken ( $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$ ) durchgeführt, an denen vor Beginn der Wechsellaagerung sowie nach jeder Trocknungs- und Frost-Tau-Wechselphase Dehnungsmessungen, zerstörungsfreie Untersuchungen zur Bestimmung des dynamischen E-Moduls sowie Masseermittlungen zur Erfassung der wechselnden Feuchtegehalte durchgeführt werden. Als zerstörungsfreie Beurteilungskriterien hinsichtlich Beginn und Intensität der Gefügeschädigung werden irreversible Dehnungen und Massezunahmen sowie der Abfall des dynamischen E-Moduls bei vergleichbarem Feuchtezustand des Probekörpers und vorheriger Temperierung auf  $20^\circ\text{C}$  herangezogen. Es erfolgt außerdem eine augenscheinliche Beurteilung der Probekörper hinsichtlich beginnender bzw. sich verstärkender Rißbildung, Verfärbungen, Gelastritt, Auftreten von „pop-outs“, Verformungen und anderweitiger sichtbarer Veränderungen. Zur Feststellung möglicher Gefügeveränderungen und Phasenneubildungen werden nach Beendigung der Klimawechsellaagerung mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen mittels Polarisationsmikroskop sowie ggf. auch an Bruchflächen mittels Rasterelektronenmikroskop (REM, ESEM/EDX) durchgeführt. Alle Messungen werden immer bei  $20^\circ\text{C}$  durchgeführt, um den Einfluß der Temperatur auf die Dehnungsmessung zu eliminieren. Das Abnahmekriterium für die Klimawechsellaagerung wurde daher auf  $0,4 \text{ mm/m}$  (anstatt  $0,6 \text{ mm/m}$  wie in der Alkali-Richtlinie) festgelegt.

## 2.2 Erste Ergebnisse mittels KWL

Dehnungen und Masseänderungen werden auf die Meßwerte nach der ersten Trocknungsphase bezogen, um den Einfluß des differierenden Austrocknungs- und Anfangsschwindverhaltens unterschiedlicher Betone zu reduzieren. Grundlagenuntersuchungen an drei LP-Betonen mit jeweils verschiedenen Gesteinskörnungen ergaben, daß an den Probekörpern aus Beton I mit Kies 1 nach drei Zyklen Klimawechsellaagerung ein erhöhter Anstieg der Dehnung eintritt, nach vier Zyklen das Abnahmekriterium von  $0,4 \text{ mm/m}$  überschritten und nach 14 Zyklen eine Dehnung von  $1,03 \text{ mm/m}$  erreicht wird (Bild 3). Nach dem sechsten Zyklus wurde auch eine Rißbildung im Kantenbereich festgestellt. Beim Beton II mit Kies 2 tritt nach der anfänglichen Feuchtedehnung ein erneuter Dehnungsanstieg nach sechs Zyklen ein. Vom 7.-12. Zyklus stagniert die Dehnung im Bereich des Abnahmekriteriums. Beim Beton III mit Diabas trat nach Errei-

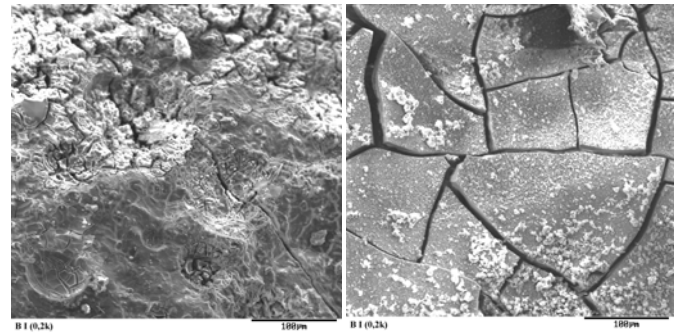


Bild 4. REM-Aufnahmen Bruchfläche Beton I (Gel, Risse)



Bild 5. Abbruch eines durch AKR geschädigten Autobahnabsturzes (Deutschland, 2002)

chen der Feuchtedehnung (ca.  $0,2 \text{ mm/m}$ ) keine wesentlichen Zunahme der Dehnung mehr auf. Während der Klimawechsellaagerung hat bei Beton I eine schädigende AKR stattgefunden, wie durch REM/EDX-Untersuchungen nachgewiesen werden konnte (Bild 4).

## 3 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

### 3.1 Gegenwärtige Situation

Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) an Betonbauwerken sind ein weltweites Problem und haben in den letzten Jahren trotz Normen und Richtlinien in beunruhigendem Ausmaß zugenommen (Bild 5). In der Bundesrepublik Deutschland wird der Umgang mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen derzeit im wesentlichen durch die Alkali-Richtlinie des DAfStB geregelt [4]. Historisch bedingt steht dabei die Klassifizierung und Handhabung von Gesteinskörnungen mit Opalsandstein, Flint oder Kieselkreide im Vordergrund, die für erste AKR-Schäden verantwortlich waren. Bei den deutschlandweit vorhandenen Gesteinskörnungen vom Typ „slow/late“ bestehen dagegen erhebliche Schwierigkeiten, den Grad der Alkaliempfindlichkeit und das Schädigungspotential sicher zu beurteilen. Die Nebelkammerlagerung nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie soll eine „ja/nein“-Aussage zur Alkaliempfindlichkeit solcher Gesteinskörnungen liefern. Die vorgeschriebene Prüfzeit von neun Monaten ist extrem lang für ein Prüfverfahren, trotzdem werden viele slow/late Gesteinskörnungen in dieser Zeit nicht als alkaliempfindlich erkannt und dementsprechend vorbehaltlos (E I) in der Praxis eingesetzt. Als Folge ist in vielen Bauwerksbetonen bereits ein latentes AKR-Schädigungspotential vorhanden.

Viele Schnelltests (z.B. NBRI-Test/ASTM C 1260) arbeiten mit sehr scharfen Testbedingungen, so daß auch Gesteinskörnungen vorschnell als „ungeeignet“ eingestuft werden, die erfahrungsgemäß unter Beachtung weiterer Randbedingungen

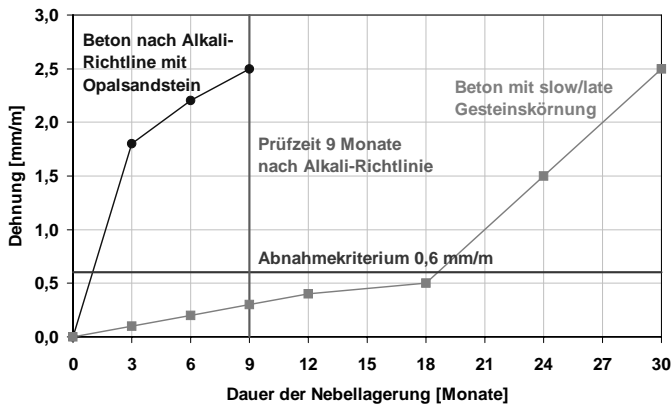


Bild 6. Dehnungsverhalten von Beton mit Opalsandstein und slow/late Gesteinskörnung während der Nebelkammerlagerung (schematisch)

(z.B. Zementart/-gehalt, w/z-Wert) in der Praxis nicht zu Schädigungen führen.

Der Einfluß einer Alkalizufuhr von außen (z.B. Taumittel) auf den Verlauf der AKR kann derzeit überhaupt nicht zuverlässig bewertet werden, denn Prüfverfahren dazu existieren nicht. Sicherheitshalber schreibt die Alkali-Richtlinie aufgrund unzureichender Erfahrungen vor, daß als bedenklich eingestufte Gesteinskörnungen bei einer möglichen Alkalizufuhr von außen generell auszutauschen sind. Unter dem Blickwinkel begrenzter natürlicher Ressourcen und des nachhaltigen Bauens wäre eine differenziertere Betrachtungsweise für den Einsatz von Gesteinskörnungen im Hinblick auf die Vermeidung einer betonschädigenden AKR wünschenswert. Durch die Kombination mehrerer Untersuchungsverfahren soll zukünftig erreicht werden, daß in möglichst kurzer Zeit bei konkreten Baumaßnahmen sowohl für die vorgesehenen Gesteinskörnungen als auch für die vorgesehene Betonzusammensetzung eine zuverlässige Aussage zum AKR-Schädigungspotential möglich ist. Die Anwendung des Mörtelschnelltests in Kombination mit der Klimawechsellaagerung bietet dazu eine neue Möglichkeit.

### 3.2 Gesteinskörnung vom Typ slow/late

Die vergleichsweise schnell ablaufende AKR bei Verwendung von Opalsandstein und Flint kann als Spezialfall der AKR angesehen werden, der durch die gültige Alkali-Richtlinie klar und erfolgreich geregelt werden konnte. Schwieriger zu handhaben ist dagegen die AKR-Problematik der langsam und spät reagierenden Gesteinsarten (slow/late), deren Reaktionsmechanismus deutlich komplizierter ist und noch nicht vollständig geklärt werden konnte. Dem Typ slow/late sind insbesondere verschiedene Grauwacken, Quarzite, Quarzporphyre und Streßquarze zuzuordnen. Bei Prüfung derartiger slow/late Gesteinskörnungen nach der Alkali-Richtlinie Teil 3 mittels neunmonatiger Nebelkammerlagerung wird häufig weder der Dehnungsgrenzwert von 0,6 mm/m (Balken) überschritten noch zeigen sich kritische Rißbreiten über 0,2 mm (Würfel). Aufgrund des langsameren Reaktionsmechanismus kommt es erst viel später zur Schädigung (Bild 6).

Petrographisch läßt sich die Alkaliempfindlichkeit von slow/late Gesteinskörnungen nicht anhand eines einzelnen, pauschalen Parameters bewerten, da selbst innerhalb einer Gesteinsart oft extreme Unterschiede im Verhalten auftreten können. Lichtmikroskopische Untersuchungen am Dünnschliff sind eine bewährte Methode, um wichtige Parameter für die

Tabelle 1. Wichtigste Kennwerte des Mörtelschnelltests

Gesteinskörnung	0,5/1 + 1/2 (Prüfkörnung) + 0,1/0,5
Zement, w/z-Wert	CEM I 32,5 R, w/z = 0,50
Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	2,5 M.-% durch Zugabe von NaOH
Prismen	4×4×16 cm <sup>3</sup> (DIN EN 196-1)
Lagerung	70 °C über Wasser für 28 Tage
Messung	Dehnung/Masse bei 20 °C (Prismen)

Alkaliempfindlichkeit von Gesteinen zu bestimmen. Dazu gehört die Bestimmung der dominierenden SiO<sub>2</sub>-Modifikation, Partikelgröße, Porosität, Gitterstörungen und Subkornausbildung (Maß für Größe der Korngrenzfläche des Quarzes). Die Anteile an Feinquarz sind für die Reaktivität des Korns von besonderer Bedeutung. Neuere Untersuchungen von Freyburg et al. ergaben, daß auch die Röntgendiffraktometrie (XRD) unterstützend zur Petrographie eingesetzt werden kann [5].

### 3.3 Beurteilung des AKR-Schädigungspotentials

Zur ersten Einschätzung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung wird am FIB ein Mörtelschnelltest verwendet, der von Philipp et al. [6] auf der Basis des NBRI-Tests entwickelt wurde und der am FIB nochmals gezielt modifiziert wurde (Tabelle 1). Aussagekräftige Ergebnisse liegen bereits nach 28 Tagen vor.

Im Bild 7 sind exemplarisch typische Dehnungskurven für drei unterschiedlich alkaliempfindliche Gesteinskörnungen dargestellt. Dehnungen deutlich über 1,5 mm/m nach 28 Tagen sind als kritisch anzusehen, so daß besonders die hier untersuchte Grauwacke (3,3 mm/m nach 28 Tagen) als stark alkaliempfindlich einzustufen ist. Derartige Gesteinskörnungen sollen jedoch mit dem Mörtelschnelltest keinesfalls grundsätzlich von der Verwendung im Beton ausgeschlossen werden. Die Testergebnisse zeigen aber deutlich, daß im Einzelfall mittels Betonversuch (KWL) nachzuweisen ist, ob solche Gesteinskörnungen unter bestimmten Bedingungen (z.B. Verwendung von NA-Zementen) eingesetzt werden können (Performance-Prinzip).

Verkehrsflächen (Straßen, Flughäfen) sind zusätzlich durch eine äußere Alkalizufuhr infolge aufgetragener Taumittel gefährdet. Um für diesen wichtigen Anwendungsfall Aussagen treffen zu können, werden Balken (z.B. Straßenbeton mit slow/late Gesteinskörnung) in der Klimasimulationskammer mit Taumittelauflösung (NaCl, Na/KCH<sub>3</sub>COO) und im Vergleich mit destilliertem Wasser beaufschlagt. Für den untersuchten Straßenbeton im Bild 8 lagen die Dehnungen nach 4 - 5 Zyklen mit

Beaufschlagung von NaCl- bzw. KCH<sub>3</sub>COO-Lösung bei 0,97 mm/m und damit deutlich über der Variante mit destilliertem Wasser (0,43 mm/m). Das deutet auf eine Schadensverstärkung durch Taumittelwirkung hin. In der Praxis sind AKR-Schäden an Straßenbetonen mit dieser Gesteinskörnung bereits aufgetreten [7].

An Bauwerksbetonen, insbesondere Straßenbetonen, entstehen während der Nutzung häufig Risse, die die Durchlässigkeit erhöhen, so daß Wasser und Tausalze von außen leichter in den Beton eindringen und den Ablauf von Schädigungsprozessen beschleunigen können. Um mittels Klimawechsellaagerung den Einfluß der Rißbildung auf die Dauerhaftigkeit beurteilen zu können, werden parallel hergestellte Probekörper einer mechanischen Vorschädigung unterzogen. Die so erzeugten Mikrorisse erhöhen die Permeabilität des Betongefüges ebenso wie die an Bauwerksbetonen auftretenden Risse.

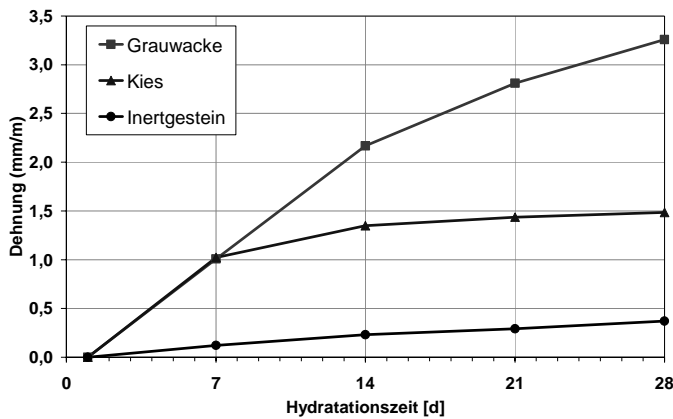


Bild 7. Typische Dehnungskurven des Mörtelschnelltests

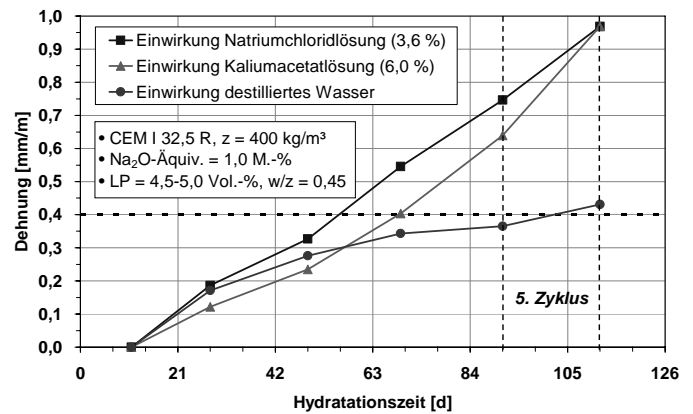


Bild 8. Dehnungskurven (KWL) für einen Straßenbeton mit Einwirkung von Taumitteln und destilliertem Wasser

#### 4 Zusammenfassung

Die gegenwärtige Situation in Deutschland macht es erforderlich, daß hinsichtlich AKR Richtlinien und Untersuchungsmethoden erweitert, verbessert und neu entwickelt werden müssen [8]. Schäden durch AKR sind ein internationales Problem, wie weltweite Untersuchungen zu Reaktionsmechanismen und Testmethoden zeigen [9]. Die beiden hier vorgestellten Untersuchungsverfahren zeigen eine neue praktikable Möglichkeit auf, das AKR-Schädigungspotential für Betone im Einzelfall zu bewerten, was bisher mit der Alkali-Richtlinie nicht möglich war. Die Ergebnisse aus dem Mörtelschnelltest ermöglichen nach vier Wochen eine Voreinschätzung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen. Begleitende petrographische, röntgenographische und mikroskopische Untersuchungen können die Ergebnisse aus dem Mörtelschnelltest unterlegen und präzisieren. Die am FIB entwickelte Klimawechsellagerung (KWL) als Performance-Test ermöglicht es, die für den Anwendungsfall vorgesehene Betonzusammensetzung zu prüfen. Durch die Simulation typischer Klimabedingungen in Form von Feuchte- und Temperaturwechseln werden im Betongefüge Lösungs-, Transport-, Ausfällungs- und Akkumulationsvorgänge beschleunigt, so daß anhand der Kennwerte Dehnung, Masseänderung und dynamischer E-Modul sowie anhand der Folgeuntersuchungen (Dünnschliffe, ESEM/REM/EDX) Aussagen zum Schädigungspotential und damit zur Dauerhaftigkeit des Betons getroffen werden können. Im Ergebnis kann die vorgesehene Betonzusammensetzung verifiziert und optimiert werden. Um den Bezug zur Praxis zu erhöhen, kann durch Untersuchungen an gezielt vorgeschädigten Probekörpern der Einfluß einer Rißbildung auf die Dauerhaftigkeit beurteilt werden. Betone können auch hinsichtlich einer Alkalizufuhr von außen bewertet werden, indem Probekörper während der Klimawechsellagerung mit den in der Praxis eingesetzten Taumitteln beaufschlagt werden.

Bevorstehende Forschungsarbeiten am FIB sollen die Korrelation zwischen Klimawechsellagerung und Prüfung nach gültiger Alkali-Richtlinie (Nebelkammer) klären. Gleichzeitig werden intensive Grundlagenuntersuchungen zum AKR-Reaktionsmechanismus vorangetrieben.

#### Literatur

- [1] Stark, J. und Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton – Der Baustoff als Werkstoff. Basel, Birkhäuser Verlag, 2001
- [2] Stark, J.; Seyfarth, K., Heinrich, U.: Initial testing experiences of HPC under climatic simulation conditions, Proceedings International Conference on Durability of High-Performance Concrete, Essen, 2004
- [3] Seyfarth, K. und Dombrowski, K.: Einfluß von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton – Klimasimulationskammer statt Nebelkammer?!. Tagungsband 4. Baustoffkolloquium, 17. Freiburger Steine- und Erden-Kolloquium, 30.09. - 1.10.2004, TU Bergakademie Freiberg
- [4] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton – DAfStb: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. DAfStb – DIN, Berlin, 2001
- [5] Freyburg, E. und Berninger, A.-M.: Mikroprozesse beim Ablauf der Alkali-Kiesel-Säure-Reaktion. in 15. Internationale Baustofftagung 24.-27. 09.2003, Weimar, Tagungsbericht - Band 2. 2003. S. 2-0719-0734
- [6] Philipp, O. und Eifert, K.: Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung. Betonwerk+Fertigteile Technik 10/2004, Bauverlag Gütersloh, 2004, S. 6-19
- [7] Öttl, C.: Die schädigende Alkalireaktion von gebrochener Oberrhein-Gesteinskörnung im Beton. Dissertation, Otto-Graf-Institut Stuttgart, 2004
- [8] Bödeker, W.: Alkalireaktion im Bauwerksbeton – Ein Erfahrungsbericht. DAfStb – DIN, Berlin, 2003, S. 7-40
- [9] Tang M. und Deng M. (Editoren): Alkali-Aggregate Reaction in Concrete - Proceedings of the 12<sup>th</sup> ICAAR (Vol. I+II). Peking, 2004