

# Frühreaktionen beim Beschichten von Betonflächen mit Neigung zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Dr.-Ing. André Molkenthin  
Specht, Kalleja + Partner GmbH, Berlin  
[molkenthin@skp-ingnieure.com](mailto:molkenthin@skp-ingnieure.com)

Dipl.-Phys. Gerd Wilsch  
Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin  
[gerd.wilsch@bam.de](mailto:gerd.wilsch@bam.de)

cand. Dipl.-Ing. (FH) Daniel Huckebrink,  
Beuth Hochschule Berlin

## Einleitung:

Das Beschichten von Betonflächen, die eine hohe Neigung zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zeigen, stellt besondere Anforderungen an die verwendeten Materialien, die Vorerkundung, das Instandsetzungskonzept sowie die Ausführung bzw. Verarbeitung der Beschichtungswerkstoffe. Erschwerend kommt hinzu, dass eine AKR oft nicht erkannt oder wesentlich unterschätzt wird. Dieser Schadensprozess kann jedoch unter fördernden Randbedingungen erhebliche Schäden an instand gesetzten Betonflächen hervorrufen. In letzter Zeit häufen sich die Informationen über Frühreaktionen zwischen der oberflächennahen Randzone des Betons und bestimmten Grundiermaterialien. Der nachstehende Beitrag berichtet über Untersuchungsergebnisse mit ausgewählten Grundier- und Beschichtungsmaterialien auf Betonen, die zu einer frühreaktiven AKR neigen.

Die Versuche zeigen, dass eine Reaktion des Grundiermaterials mit der reaktiven, amorphen Kieselsäure aus der Gesteinskörnung nur bei ausgesuchten Grundierungen auftreten kann. Selbst unter den verschärfenden Reaktionsbedingungen einer Nebelkammerlagerung können kunststoffmodifizierte Grundierungen kaum freie Alkalien für die Entfaltung der AKR bereitstellen sowie ein Anlösen der amorphen Kieselsäure hervorrufen.

## **1. Schadenspotential der Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

Die Anwesenheit von löslichen und reaktiven Alkalien einerseits sowie amorpher Kieselsäure in den Gesteinskörnungen andererseits kann, unter Zutritt von Wasser, in Betonbauwerken den Schadensprozeß der Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) auslösen.

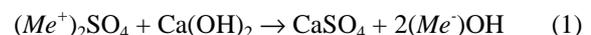
Die Zahl jener Verkehrsbauwerke, die dem Schadensprozess der Alkali-Kiesel-Säure unterworfen sind, vergrößert sich in den letzten Jahren zunehmend. Während derzeit das allgemeine Forschungsinteresse auf die Bekämpfung der AKR an Fahrbahndeckenbetonen fokussiert ist, wird der Reaktion in Parkhausbauten wenig Aufmerksamkeit zuteil. Das Schadensausmaß an Straßenbetonen führte unlängst dazu, dass sich der Bundestag [4] mit dem Problem auseinandersetzte.

Eigene Erfahrungen zeigen, dass die Alkali-Kieselsäure-Reaktion selbst von sachkundigen Ingenieuren und Fachfirmen bei der Erkundung nicht beachtet oder unterschätzt wird. Während der durch Auftaumittel hervorgerufene Prozess der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion fast immer für sämtliche Schäden herangezogen wird, bleibt die Wirkung der mitgeführten Anionen bei Taumitteln verkannt.

Dabei kann die Tiefenwirkung der durch die AKR initiierten Schäden weit reichender als bei allen anderen Schädigungen sein.

Der Schadensmechanismus selbst führt zur Bildung quellfähiger gelartiger Reaktionsprodukte in Form von Alkalisilikathydraten, die einen mehr oder weniger hohen Anteil an Calcium aufnehmen. Die Produktion des treibenden Gels erfolgt vorwiegend in der Grenzfläche zwischen Bindemittelmatrix und Gesteinskorn sowie im Gestein selbst. Das entstandene Gel infiltriert die Zementsteinmatrix und füllt selbst grobe Bestandteile des Porensystems aus. Die aufgrund des Treibdrucks entstandenen Mikrorisse setzen sich in der Betonmatrix fort und können diese zerstören.

Zunächst reagiert das bei der Reaktion von Zement mit Wasser gebildete Kalziumhydroxid mit den gelösten Alkalisulfaten:

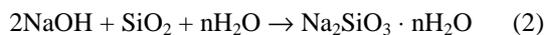


*(Me<sup>+</sup> = entspricht Na<sup>+</sup> bzw. K<sup>+</sup>)*



Abbildung 1: Gelausscheidungen nach 15 Tage Lagerung im Nebelkammerklima

Die Bildung der Alkalihydroxide steigert den pH-Wert der Lösung. Die Alkalihydroxide rufen mit dem reaktiven Siliziumdioxid der Gesteinskörnung unter Beteiligung von Wasser das treibende Alkali-Kieselsäure-Gel hervor:



Die Wirkung von außen zugeführter Alkalien, insbesondere aus Auftaumitteln oder Meerwasser- auch in Kombination mit einer Frostbeanspruchung, erhöht das Alkalipotential und beschleunigt die schädigende AKR.

Meist findet eine Überlagerung mehrerer Schadensprozesse statt. So sieht Breitenbücher [1] in der aktuell diskutierten Rißschädigung von Fahrbahndeckenbetonen einen vielschichtigen Prozeß, der aus der Überlagerung verschiedener Spannungszustände des Betons in Verbindung mit Alkali-Kieselsäure-Reaktionen abläuft. Lastabhängige, hygische und thermische Zustände erzeugen erste Rißvorschäden, in die Wasser und Tausalzlösungen vordringen. Auch ohne solche Anomalien in der Struktur walken die Verkehrsüberrollungen die taumittelhaltigen Oberflächenwasser in den Beton ein.

Diese Mechanismen würdigt nunmehr auch die DIN 1045-2 durch die Übernahme der Feuchtigkeitsklassen der Alkalirichtlinie. Die höchste Exposition WS klassifiziert beispielhaft Betone, die hoher dynamischen Beanspruchung und direktem Alkalieintrag ausgesetzt sind.

## 2. Schadensfall und Vorüberlegungen

### 2.1 Schadensfall

Die Motivation, Untersuchungen zur Reaktionsanfischung einer AKR durch Beschichtungswerkstoffe vorzunehmen, entstand einerseits anhand von vorliegenden Veröffentlichungen [1], andererseits durch eine konkrete Schädigung innerhalb einer norddeutschen Tiefgarage.

Die betreffende Garage wurde 1973 errichtet und ist seit nunmehr 35 Jahren in Nutzung. Die Stellplatzkapazität umfasst etwa 598 nutzbare Stellplätze auf verschiedenen Parkgeschossen. Die Ein- und Ausfahrt befinden sich in halber Gebäudehöhe.

Zunächst wurden die massiven Zerstörungen der oberflächennahen Randzone durch die eingeschalteten Statiker als alleiniges Problem der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion aufgefasst. Nach Feststellung von Schadensumfang und -intensität hatten die Verantwortlichen lokale Abstützungen in verschiedenen Decks eingeleitet.

In Anschluß an diese Sicherung beauftragte der Eigentümer unser Ingenieurbüro mit der genauen Untersuchung der Schadensursachen. Dabei war durch intensive Untersuchungen festzustellen, dass die primären Schäden durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion initiiert wurden.

Mit der Prüfung in der 40°C-Nebelkammer ist eine differenzierte Abstufung hinsichtlich Beginn und Verlauf einer Schädigung des Betons möglich. Die Auslagerungen von Bohrkernen in das Nebelkammerklima rief frühzeitig heftige Reaktionen durch Gelausscheidung hervor (Abbildung 1).

Als reaktive Gesteinskörnungen wurde, unterstützt durch petrografische und mineralogische Untersuchungen, ein Kies mit Opalsandstein/Flint der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF identifiziert.

Die Zerstörung des Betongefüges betrug bei den deutlich geschädigten Decks bis 8 cm Tiefe und erreichte vereinzelt sogar 12 cm (Abbildung 2).

Die Reprofilierung flächig geschädigten Bereiche erfolgte durch einen in spezieller Rezeptur festgelegten Beton. Als Bindemittel kam ein CEM III/B 42,5 N/NA zur Auswahl. Zwar bedeutete dieser Zement längere Abbinde- und Erhärungszeiten; jene Einschränkung war aber gegenüber der Sicherheit gegen erneute Treibreaktionen vertretbar.

Vor der Instandsetzung stellte sich allerdings die Frage, ob der Kontakt von Grundiermaterialien als Bestandteile des zukünftigen Beschichtungssystems auf bislang ungeschädigten Betonoberflächen eine Gelausscheidung und Treibreaktion provozieren kann.

Beide abgestimmten Komponenten, eine 2K EP-Grundierung (total solid) und die entwickelte Betonrezeptur wurden deutlich vor Beginn der Gesamtinstandsetzung an Probeflächen getestet.



Abbildung 2: Ausbruchstellen im Fahrbahnbeton der untersuchten Tiefgarage

## 2.2 Vorüberlegungen

Erwartet wurden beim Kontakt von ungeeigneten Grundiermaterialien drei Szenarien, unter denen frühzeitige Treibreaktionen infolge der aufgetragenen Beschichtungsmaterialien entstehen können:

- Anlösen der amorphen und reaktiven Kieselsäure in den Gesteinskörnungen durch wässrige oder/und lösemittelhaltige Komponenten der Beschichtungsmaterialien
- Reaktionen lösemittelhaltiger Bestandteile mit bereits gebildeten Alkalisilikathydraten (Gel)
- Transport löslicher Alkalien an die Grenzfläche zwischen Beschichtung und Betonoberfläche und lokale Konzentrationserhöhung der Alkalien

Fall a) könnte durch verwendete Benzylalkohole oder Aminhärter in den Polykondensationsharzen ausgelöst werden. Dem steht gegenüber, dass aus ökologischen Gründen und im Hinblick auf den Arbeitsschutz heutige Beschichtungsmaterialien einen geringen Anteil solcher Produkte aufweisen und darauf geprüft werden [3]. Zudem ist die reaktionsauslösende Kontaktzeit zum Anlösen der Kieselsäure als zu gering einzustufen.

Fall b) ist demgegenüber wahrscheinlicher. Eine oberflächennahe Schädigung durch Mikrorisse wird bei rißüberbrückenden Beschichtungssystemen i.d.R. hingenommen. Wie sich die Betonmatrix unterhalb der Oberfläche gestaltet, wird bei den meisten Untersuchungen als nicht relevant erachtet. Vermutet wird, dass durch die Mikrorisse ein Teil der lösemittelhaltigen Bestandteile tiefer vordringt und den Alkalisilikathydraten.

Anomalien, wie Risse, Lunken und Makroporen begünstigen wiederum den Transport von flüssigen Komponenten.

Fall c) wird als der im Baupraktischen wohl maßgebende Fall angesehen. Durch lösemittelhaltige oder wässrige Komponenten der Grundiermaterialien nur im geringen Umfange verursacht, kommt es vor allem durch die Veränderung des Diffusionsverhaltens an der Oberfläche zur einer Verschiebung der löslichen Alkalien. Insbesondere bei eingeschlossener Feuchtigkeit oder rückwärtiger Durchfeuchtung ist ein Transport der Alkalien zur Kontaktfläche möglich. Es kommt es zu einer Erhöhung des Alkaligehalts und zur Steigerung reaktiven Potentials.

## 3. Versuchsprogramm

### 3.1 Probensystematik

Die Probenherstellung erfolgte aus Bohrkernen im Durchmesser 100 mm, die in jeweils 3 cm starke Scheiben mit trockenem Sägeschnitt geteilt wurden. Jede der Scheiben musste sich einer Sichtprüfung unterziehen, um zu gewährleisten, dass ein

repräsentativer Anteil an reaktiver Gesteinskörnung an der zu applizierenden Oberflächen vorhanden ist. Die Applikation erfolgte mit 6 + 1 ausgewählten bauchemischen Produkten. Dabei werden die einzelnen Beschichtungsmaterialien wie folgt klassifiziert:

**Material A:** wässrige EP-Dispersion (farblos)

**Material B:** lösemittelhaltige EP Imprägnierung

**Material C:** niedrigviskoses 2K EP-Bindemittel (total solid)

**Material D:** 2K EP-Bindemittel (total solid)

**Material E:** niedrigviskoses EP-Reaktionsharz

**Material F:** 1-komponentige Tiefenhydrophobierung, Silanbasis

Zusätzlich wurde als **Material G** der Aminhärter des Materials C ausgewählt.

Es wurden mit den Materialien A bis F jeweils 3 Probenkörper beschichtet. Damit konnten drei klimatische Bedingungen getestet werden:

- Klima 1:** trockene Raumluft, relative Feuchte 45%, Raumlufttemperatur 23°C
- Klima 2:** feuchte Umgebung im Klimaschrank, 70% r.F. bei Lagerungstemperatur von 23°
- Klima 3:** Lagerung unter Bedingungen einer Nebelkammer; 80% r.F. und 40°C Lagerungstemperatur

Eine komplette Übersicht über das Versuchsprogramm ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Aufgrund der Voruntersuchungen an Bohrkernen der Tiefgarage zur Bestimmung des Restdehnungspotentials lagen Erkenntnisse über die frühreaktive Wirkung der Gesteinskörnung vor.

So war bereits die intensive Gelbildung nach 10 bis 15 Tage Lagerung in der Nebelkammer nachgewiesen (Abbildung 1).

Die Versuche mit den Beschichtungsmaterialien in den Klimabedingungen 2 und 3 wurden aufgrund dieser Vorkenntnisse dem Zeitregime nach Abbildung 3. unterworfen.

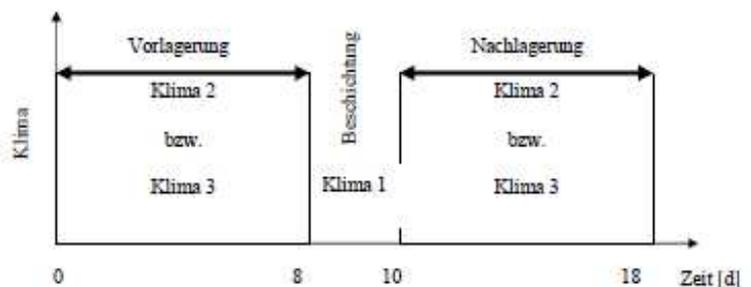


Abbildung 3: Zeitregime bei der Vorlagerung, dem Beschichten und der Nachlagerung der Proben bei Klima 2 und 3



Abbildung 4: beschichtete Probenoberfläche mit reaktiven Gesteinskörnungen 3

#### 4. Untersuchungsmethoden

Vor, während und nach dem Auftragen der Beschichtungsmaterialien wurden die Proben vorwiegend visuell auf Umwandlungen und Anomalien überprüft. Dabei zeigten sich an denen unter Klima 1 hergestellten und beschichteten Probekörpern keine erkennbare äußerliche Veränderung. Die Proben unter Einfluß der Klimabedingungen 2 und 3 befanden sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch in der Präparation. Eine Vorstellung der Ergebnisse wird im Rahmen des Vortrages gegeben.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Ionenverteilung in der betroffenen Randzone der Proben erfolgen mit dem analytischen Spektroskopieverfahren der Laser-induzierte Beakdown Spektroskopie (LIBS). Das Verfahren wurde bereits mehrfach im Rahmen zurückliegender Kolloquien vorgestellt [6] und wurde in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt [5].

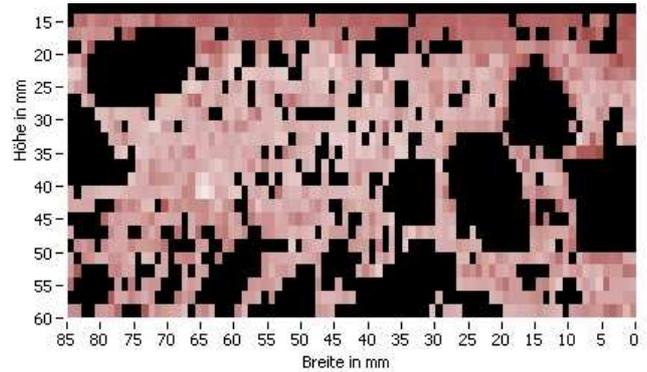


Abbildung 5: Darstellung mit LIBS der Kaliumverteilung in einer Probe. Prägnant sind die K- Anreicherungen an der Randzone (dunkelbraun bei 15 mm Tiefe)

Es liefert ohne größere Probenvorbereitung mit Hilfe spektraler Zerlegung von emittiertem Plasmalicht eine Multielementbetrachtung der Oberfläche.

Für die Darstellung des Ionenhaushalts notwendigen Elemente lassen sich mit LIBS in hinreichender Genauigkeit detektieren (Abbildung 5).

Zudem wurde mikroskopisch die Bildung von Alkalisilikaten untersucht. An den Probekörpern der Klimastufe 1 waren bis 5 Tage nach Applikation der Beschichtungsmaterialien keine Gelausscheidungen festzustellen.

Ablöseerscheinungen, Aufwölbungen und ein Verlust an Haftigenschaften zwischen Beschichtungswerkstoff und Betonoberflächen konnten ebenfalls für diese Probegruppe ausgeschlossen werden.

Lagerung	Verwendete Grundiermaterialien						
	Material A	Material B	Material C	Material D	Material E	Material F	Material G
	wässrige EP-Dispersion	Lösemittelhaltige EP Imprägnierung	niedrigviskoses 2K EP Bindemittel (total solid)	2K EP Bindemittel (total solid)	niedrigviskoses EP-Reaktionsharz (total solid)	lösemittelfreie Tiefenhydrophobierung (Silan)	Aminhärter aus Material C
trocken	●	●	●	●	●	●	●
feucht	◆	◆	◆	◆	◆	◆	▬
Nebelkammer	◆	◆	◆	◆	◆	◆	▬

Tabelle 1: Übersicht über die Grundierungen und klimatischen Ausgangsparameter

- ohne Veränderung der klimatischen Rahmenbedingungen
- ◆ Lagerung nach Zeitregime gemäß Abbildung 4
- ▬ keine Probenherstellung

## 5. Ergebnisse

Die bisherigen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bei trockenen Betonen unter Ausgleichsfeuchte eine Beschichtung mit lösemittelhaltigen oder wässrigen Beschichtungswerkstoffen möglich erscheint, ohne dass eine Bildung von Alkalisilikathydraten einsetzt. Zu beachten ist jedoch dabei der Aspekt, dass solche Bedingungen unter baupraktischen Gesichtspunkten kaum über die gesamte Fläche abgesichert werden können. Die vorgestellten Zwischenergebnisse verdeutlichen ferner, dass die alleinige Kontakt- und Reaktionszeit bei solchen klimatischen Bedingungen kaum ausreichen dürfte, um einen -zeitlich wesentlich längeren- Prozess der AKR zu initiieren. Bei den Reaktionszeiten der Beschichtungsmaterialien handelt es sich um Zeiträume von bis zu 48h; demgegenüber stehen bei frühreaktiven Gesteinskörnungen Zeiträume von 8-10 Tagen für die Treibreaktion unter verschärften Bedingungen des Nebelkammerklimas entgegen. Die zeitlichen Abläufe *in natura* dürften dem gegenüber weitaus länger ausfallen.

Somit fokussieren sich die weiteren Untersuchungen auf die Klimabedingungen 2 und 3, die innerhalb der Vortrages dargestellt werden.

## 6. Schlußfolgerungen

Es empfiehlt sich generell, den Alkaligehalt der Randzone bei AKR-belasteten Flächen vor einer Instandsetzung zu bestimmen. Chloridhaltige Auftausalze sorgen auch dafür, dass zusätzliche Alkalien in den Beton eindringen. Zudem existiert, je nach Bindemittel, ein Reservoir an löslichen und reaktiven Alkalien, die bereits alleine die AKR auslösen können. Insbesondere bei den früher verwendeten Portlandzementen ist in etwa 75% des Gesamtalkaligehaltes als löslich und reaktiv anzusehen [7].

Das Verfahren LIBS bietet für die Untersuchung der Alkaliverteilung vielschichtige Möglichkeiten. Eine Bestimmung des Restdehnungspotentials unter Bedingung des Nebelkammerklimas sei bei Verdacht auf alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen empfohlen.

Eine Vielzahl der angebotenen Grundier- und Beschichtungswerkstoffen basieren auf der Verwendung von lösemittelhaltigen oder wässrigen Komponenten. Fehlt der Nachweis, dass solche Produkte kein Anlösen amorpher Kieselsäure der Gesteinskörnungen bewirken oder zum Transport löslicher Alkalien beitragen, ist der Rückgriff auf lösemittelfreie Werkstoffe zu empfehlen.

Bei Instandsetzungen größerer Schadstellen sollten Betone zum Einsatz kommen, die Zemente mit

geringem  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äquivalent}}$  im Bindemittel aufweisen. Dies ist insbesondere bei NA-Zementen gegeben.

Ferner neigen Zemente mit Zusätzen aus Hüttensanden, Flugaschen oder Silicastauben dazu, weniger Alkalien freizusetzen.

Bei der Wahl des Gesamtbeschichtungskonzeptes ist insbesondere bei Deckenkonstruktionen darauf zu achten, dass an den nicht befahrenen Flächen, i.d.R. Unterseiten, ein Teildiffusionswiderstand von  $s_{\text{dH}_2\text{O}} \leq 2,5$  m nach [8] durch die verwendeten Produkte eingehalten wird.

## Literatur

- [1] Rheinwald, G.: *Blasenbildung an Beschichtungen durch Substratreaktion*; 5. Internationales Kolloquium Industriefußböden 2003
- [2] Breitenbücher, R.: *Besonderheiten bei Alkali-Kieselsäure-Reaktionen in Betonfahrbahndecken*, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 8
- [3] Merkblatt Deutsche Bauchemie: *Prüfverfahren zur Bestimmung des Masseverlustes und Einordnung eines Epoxidharzsystems als „Total solid“*, 2008
- [4] Drucksache 16/12210 des Deutschen Bundestages „Zerstörung des Fahrbahnbelages durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion“ vom 10.03.2009, Bundesanzeiger
- [5] Molkenhain, A.: *Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (LIBS) zur hochauflösenden Analyse der Ionenverteilung in zementgebundenen Feststoffen* Universität Duisburg-Essen 2008 und BAM Dissertationsreihe 42
- [6] Bruns, M.; Balzer, H.; Wilsch, G.: *Bildgebende Laseranalyse der Chlorid- und Sulfatverteilung im Beton*, 3. Kolloquium Verkehrsbauten, Esslingen 2008
- [7] Schäfer, E.: *Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins*, Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 69/2006
- [8] Stark, J.; et al.: *Alkali-Kieselsäure-Reaktion*, Heft 3 der Schriftenreihe des FIB Weimar, 2008