

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ gGmbH
Forschungseinrichtung 1:	VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungseinrichtung 2:	Bauhaus-Universität Weimar F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Forschungseinrichtung 3:	Technische Universität München Centrum Baustoffe und Materialprüfung
IGF-Vorhaben-Nr.:	19077 BG
Bewilligungszeitraum	01.03.2016 – 28.02.2019

Forschungsthema:

## **Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigten Bedingungen in AKR-Prüfverfahren**

### **1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Seit der Einführung des ARS Nr. 04/2013 [1] muss die Eignung von groben Gesteinskörnungen (> 2 mm) bzw. Betonen für Fahrbahndecken für die Feuchtigkeitsklasse WS durch WS-Grundprüfungen bzw. AKR-Performance-Prüfungen nachgewiesen werden. Die mit der Einführung des ARS Nr. 04/2013 festgelegte Vorgehensweise soll sicherstellen, dass AKR-Schäden in Betonfahrbahndecken künftig zuverlässig vermieden werden.

Auch wenn die Vorgehensweise nach dem ARS 04/2013 eine zuverlässige Bewertungsgrundlage für definitiv AKR-bedenkliche Gesteine darstellt, existieren bisher wenige Erfahrungen zum Verhalten von Gesteinen, die bislang als unbedenklich galten bzw. aus Regionen ohne nachgewiesene AKR-Schäden in Fahrbahndecken stammen. Hinzu kommt, dass es aufgrund der vielfältigen Variationen von Gesteinen gleichen Typs nicht möglich ist, pauschale Aussagen zur Alkali-Reaktivität einzelner Gesteinsvorkommen ohne nähere Prüfung zu treffen.

Vor diesem Hintergrund sollte das IGF-Vorhaben 19077 BG Erkenntnisse über das Verhalten verschiedener Gesteine unter beschleunigenden Bedingungen in AKR-Prüfungen liefern. Die Ergebnisse sollten dazu dienen, die Wirkung von verschiedenen Temperaturen, Lagerungslösungen und Lösungskonzentrationen in Prüfungen mit unterschiedlichen groben Gesteinskörnungen besser einschätzen zu können. Zusätzlich sollte der Einfluss des Sandes untersucht werden. Hierzu wurden zum einen die kombinierten Einflüsse aus Temperatur und Lagerungslösung auf das Dehnungsverhalten von Betonen in Prüfungen mittels 60 °C

Betonversuch mit Alkalizufuhr und Klimawechsellaagerung untersucht. Zum anderen wurden Löseversuche an den Gesteinskörnungen in künstlicher Porenlösung durchgeführt, um ein vertieftes Verständnis für das Verhalten der groben und feinen Gesteinskörnungen erhalten zu können.

## **2           Arbeitsprogramm**

Im ersten Arbeitsschritt wurden grobe Gesteinskörnungen unterschiedlichen petrographischen Typs (zwei Basalte, drei Granite, ein Rhyolith, ein Kalkstein, eine Grauwacke) und unterschiedliche Sande (vier Natursande, ein Kalksteinbrechsand) ausgewählt und chemisch, physikalisch und mineralogisch charakterisiert.

Den zweiten Arbeitsschritt bildete die Durchführung von Betonversuchen mit den Prüfverfahren 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr nach TP B-StB Teil 1.1.09 [2] und Klimawechsellaagerung nach TP B-StB Teil 1.1.10 [3]. Ein Teil der Betonversuche zielte darauf ab, den Einfluss des Sandes auf das Dehnungsverhalten von Betonen unter beschleunigenden Prüfbedingungen zu analysieren. Ein weiterer Schwerpunkt der Betonversuche bestand in der Untersuchung des Verhaltens von bayerischen Graniten in AKR-Betonversuchen. Im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr wurden zudem die Einflüsse unterschiedlicher Lagerungstemperaturen und NaCl-Konzentrationen der Prüflösungen untersucht, um ein besseres Verständnis für die Wirkung der beschleunigenden Prüfbedingungen zu gewinnen.

Im dritten Arbeitsschritt wurden Löseversuche mit den Gesteinskörnungen in synthetischer Porenlösung durchgeführt, um ein vertieftes Verständnis für das Löseverhalten der Gesteinskörnungen zu gewinnen. Hierbei sollten, wie auch beim 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr, die Einflüsse verschiedener Temperaturen und NaCl-Konzentrationen ermittelt werden.

## **3           Ergebnisse**

### **3.1       Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsstoffe**

Als Gesteinskörnungen für das Untersuchungsprogramm wurden zwei Basalte, drei Granite, ein Rhyolith, ein Kalkstein, eine Grauwacke, vier Natursande und ein Kalksteinbrechsand ausgewählt. Die Gesteinskörnungen wurden chemisch, physikalisch und mineralogisch charakterisiert. Eine Gegenüberstellung der chemisch-mineralogischen und physikalischen Eigenschaften mit den Ergebnissen der Betonversuche (Arbeitsschritt 2) und der Löseversuche (Arbeitsschritt 3) ergab, dass sich allein auf Basis von chemischen und mineralogischen Untersuchungen keine sicheren Aussagen zum AKR-Potential der Gesteinskörnungen treffen lassen. Dies bestätigte Erfahrungen aus anderen Untersuchungen.

### **3.2       Betonversuche**

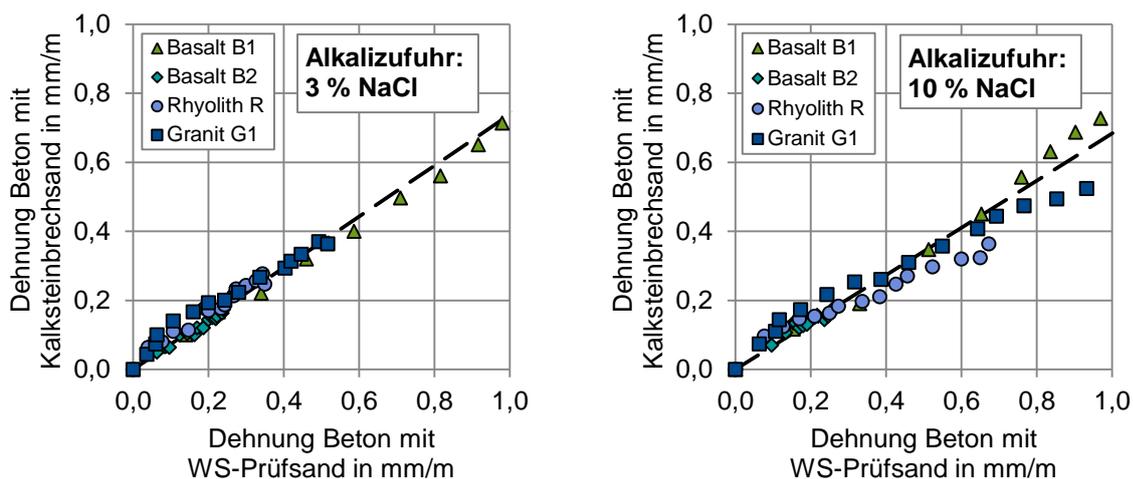
Die Durchführung von 60 °C Betonversuchen bei Variation der Prüfbedingungen und der Betonzusammensetzungen sollte dazu beitragen, die Einflüsse von prüftechnischen und stofflichen Parametern auf die Prüfergebnisse zu beschreiben.

Dabei kamen zwei Prüfverfahren (Forschungseinrichtungen 1 und 3: 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr nach TP B-StB Teil 1.1.09 [2], Forschungseinrichtung 2: Klimawechsellaagerung nach TP B-StB Teil 1.1.10 [3]) zum Einsatz, um überprüfen zu können, ob diese zu

vergleichbaren Aussagen kommen. Für die 4 Betone, die parallel mit beiden Prüfverfahren untersucht wurden, ergaben sich zwei übereinstimmende Bewertungen des AKR-Potentials. In den beiden anderen Versuchen bestanden dagegen Unterschiede in der Bewertung.

An den Forschungseinrichtungen 1 und 3 wurden Untersuchungen mit dem 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr unter Variation der Prüfbedingungen hinsichtlich Temperatur und Konzentration der NaCl-Lösung durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass bei einer reduzierten Prüftemperatur von 40 °C anstelle von 60 °C bei allen untersuchten Betonen nur geringe Dehnungen auftraten. Gleiches galt für die Versuchsreihen, in denen die üblicherweise als Prüflösung verwendeten NaCl-Lösungen gegen entionisiertes Wasser ausgetauscht wurden. In beiden Fällen waren die Dehnungsverläufe der Betone untereinander so ähnlich, dass bei diesen Prüfbedingungen keine differenzierte Beurteilung des unterschiedlichen AKR-Potentials möglich war.

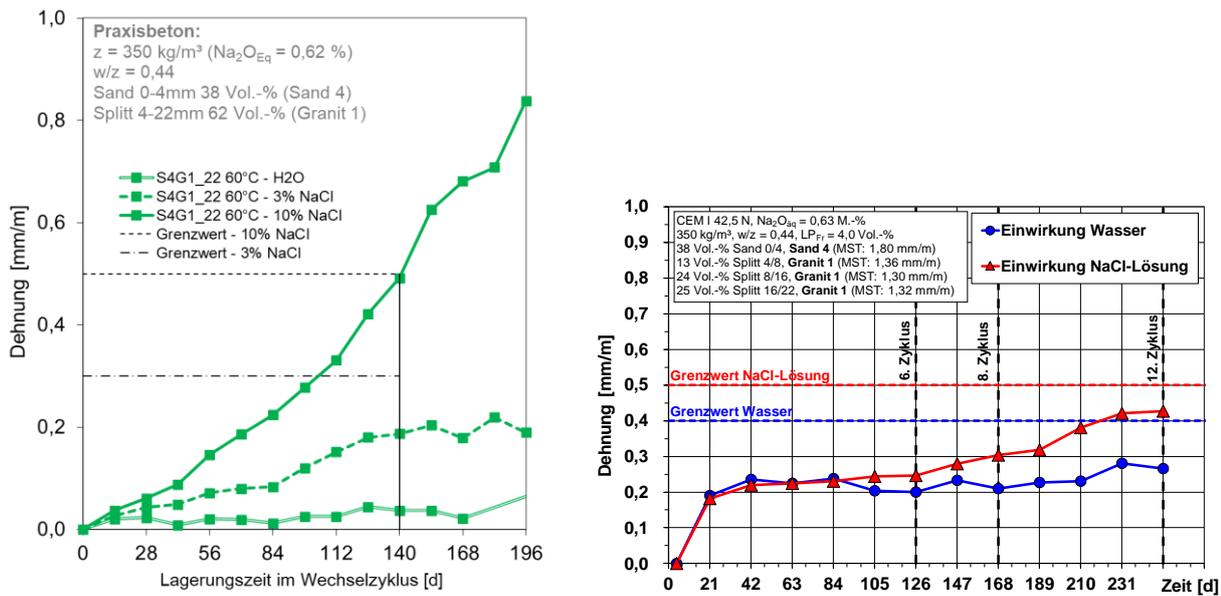
Ein Teil der Betonversuche an der Forschungseinrichtung 1 zielte darauf ab, den Einfluss des Sandes auf das Dehnungsverhalten von Betonen im 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr zu analysieren. Der Austausch des in WS-Grundprüfungen gemäß ARS 04/2013 genutzten WS-Prüfsandes gegen einen hinsichtlich AKR als inert einzustufenden Kalksteinbrechsand führte in allen untersuchten Fällen zu einer Reduktion der Dehnungen. In allen Versuchen ergaben sich für den Beton mit WS-Prüfsand verglichen mit dem jeweiligen Beton mit Kalksteinbrechsand und der gleichen groben Gesteinskörnung etwa proportionale Dehnungsverläufe, d. h. die grundsätzliche Charakteristik der Kurvenverläufe blieb beim Austausch des WS-Prüfsandes gegen Kalksteinbrechsand erhalten, s. **Bild 1**. Bei den Betonen, in denen unterschiedliche Natursande mit einem hinsichtlich AKR als inert einzustufenden Kalksteinsplitt kombiniert wurden, lagen die Dehnungen in der Nähe oder oberhalb der zur Beurteilung des AKR-Potentials in der Feuchtigkeitsklasse WS verwendeten Grenzwerte. Der Einfluss des Sandes auf die Prüfergebnisse fiel somit je nach Kombination mit der groben Gesteinskörnung unterschiedlich aus.



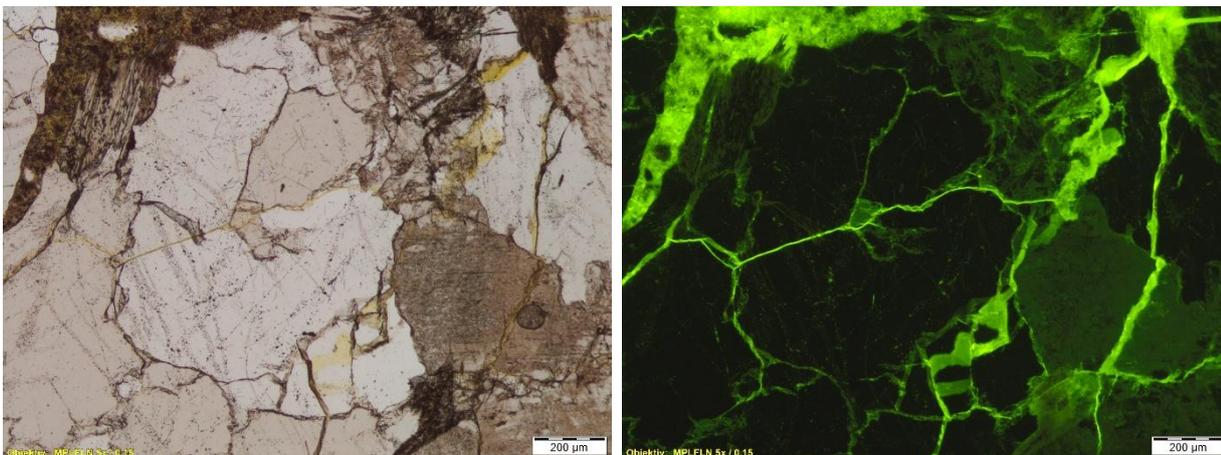
**Bild 1** Gegenüberstellung der Dehnungen der Betone mit WS-Prüfsand und der Betone mit Kalksteinbrechsand bei sonst gleicher Zusammensetzung und gleichen Prüfbedingungen; Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

Ein weiterer Schwerpunkt der Betonversuche bestand in der Untersuchung des Verhaltens von bayerischen Graniten in AKR-Betonversuchen. Hierzu wurden drei Granite, die sich bzgl. der Petrographie und der Ergebnisse im Schnellprüfverfahren nach Alkali-Richtlinie [4]

signifikant unterscheiden, ausgewählt. Das Verhalten einer nachweislich AKR-beständigen Praxisbetonrezeptur mit einem Granit aus Bayern konnte mit beiden gemäß ARS Nr. 04/2013 zugelassenen und in der TP StB beschriebenen AKR-Prüfverfahren – der Klimawechsellagerung und dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr – bestätigt werden, s. **Bild 2**. Die Anwendung beider Prüfverfahren zeigte zudem auf, dass alle drei Granite in Betonzusammensetzungen gemäß WS-Grundprüfung, in der Waschbeton- sowie in der Unter- und Oberbetonrezeptur ( $D > 8$ ), die Anforderungen an ein ausreichend geringes AKR-Potential nicht erfüllen. Lichtmikroskopie, REM-EDX und LA ICP-MS belegten übereinstimmend, dass die grenzwertüberschreitenden Dehnungen in den Betonversuchen durch eine im Granit ablaufende AKR hervorgerufen werden, s. stellvertretend **Bild 3**.



**Bild 2** Dehnungsentwicklung des geprüften Praxisbetons mit Granit 1 im 60 °C-Betonversuch in unterschiedlichen Lagerungslösungen (links, Forschungseinrichtung 3) und in der Klimawechsellagerung (rechts, Forschungseinrichtung 2)



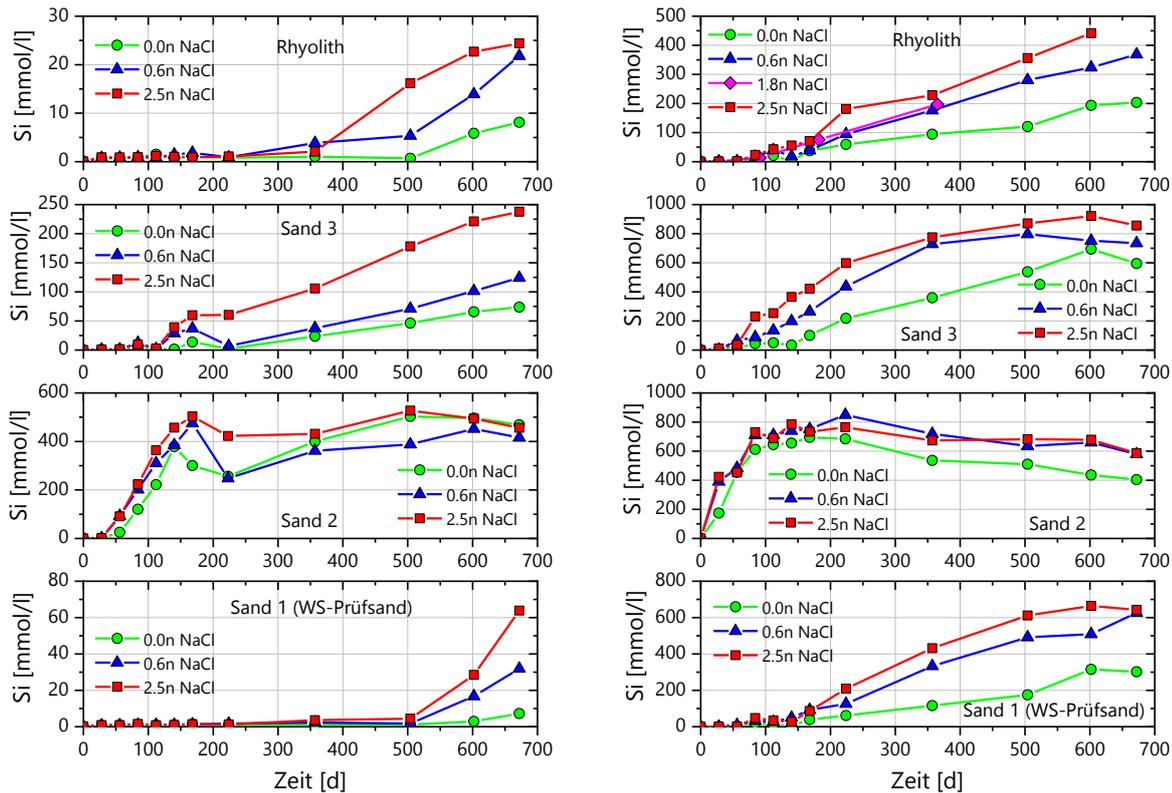
**Bild 3** Mikroskopische Aufnahme mit normalem Durchlicht (links) und UV-Licht (rechts) des Betons mit Granit G2 (Zusammensetzung Oberbeton 0/8 für WS-Grundprüfung) nach 14 Zyklen im 60 °C-Betonversuch mit 10 % NaCl-Zufuhr; Ausgeprägte Rissbildung im Inneren eines Granitkorns mit bevorzugtem Verlauf der Risse entlang der Korngrenzen von Quarzkristallen

Mit den übrigen Betonversuchen sollten Erkenntnisse zum Verhalten verschiedener Gesteinskörnungen (Basalt, Kalkstein, Rhyolith, Grauwacke) in (nachgestellten) WS-Grundprüfungen generiert werden. Hierbei konnten teilweise die Erfahrungen für bisher in der Baupraxis unauffällige Gesteinskörnungen bestätigt werden. In einigen Fällen zeigte sich aber, dass kritische Dehnungen bei einer WS-Grundprüfung auftreten können, die nicht allein auf eine AKR zurückzuführen sind. Für Basalt 1 und den Kalkstein konnten die maßgebenden Ursachen für die erhöhten Dehnungen nicht eindeutig geklärt werden. Die Frage, ob sich derartige Effekte auch in der Praxis zeigen würden oder es sich um Prüfartefakte handelt, lässt sich daher aktuell noch nicht beantworten.

### 3.3 Löseversuche

Im dritten Arbeitsschritt wurde das Löseverhalten der Gesteinskörnungen in synthetischer Porenlösung untersucht. Dabei sollten die Einflüsse der Prüfbedingungen (Temperatur, NaCl-Zufuhr und Lagerungsdauer) untersucht werden. Als synthetische Porenlösung wurde in den Versuchen eine wässrige Lösung mit Kaliumhydroxid (pH 13,8-14,0) verwendet. Um die Versuchsbedingungen weiter den Bedingungen anzunähern, denen Gesteinskörnungen im Beton ausgesetzt sind, wurde Calciumhydroxid im Überschuss zugegeben. In Anlehnung an die Prüfbedingungen in den AKR-Prüfverfahren erfolgte bei vielen Versuchsserien die Zugabe von NaCl, wobei die Konzentrationen entsprechend den Prüflösungskonzentrationen beim 60 °C Betonversuch mit Alkalizufuhr bzw. bei der Klimawechsellagerung gewählt wurden. Für die Lagerung wurden Lösung und die zerkleinerte bzw. abgesiebte Gesteinskörnung (0,5 – 1 mm bei groben Gesteinskörnungen, 0,5 – 2 mm bei Sanden) im Massenverhältnis von 4:1 gemischt. Zu den festgelegten Prüfterminen wurden Lösung und Gesteinskörnung getrennt voneinander entnommen und analysiert.

Es wurde deutlich, dass sich das Löseverhalten (insb. Si und Al betreffend) von Gesteinskörnungen mit steigender Temperatur stark verändern kann und nicht mehr mit den Verhältnissen bei geringeren Temperaturen, wie sie während der Nutzung von Betonen in Fahrbahndecken auftreten, übereinstimmen muss, s. beispielhaft **Bild 4**. Es wurde außerdem deutlich, dass die Zufuhr von NaCl zu einer erhöhten Si-Freisetzung führte, was eine Erklärung für die AKR-fördernde Wirkung einer äußeren NaCl-Zufuhr darstellt. Ähnlich wie bei der Temperatur hängt auch die Höhe der NaCl-bedingten Si-Freisetzung von der jeweiligen Gesteinskörnung ab. In den Löseversuchen mit Granit wurden vergleichbare mikroskopische Schädigungsmerkmale einer AKR hervorgerufen wie im 60 °C-Betonversuch mit NaCl-Zufuhr. Das Ziel, AKR-Beanspruchungen einer Gesteinskörnung aus dem 60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr sowie der Klimawechsellagerung in Löseversuchen nachzustellen, wurde damit insgesamt erreicht.



**Bild 4** Si-Konzentrationen bei 45 °C (links) und bei 60 °C (rechts) und jeweils unterschiedlichen NaCl-Konzentrationen; Ergebnisse der Forschungseinrichtung 2

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19077 BG der VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## 4 Regelwerke

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013 (ARS Nr. 04/2013): Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Bonn, 22. Januar 2013
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen, TP B-StB Teil 1.1.09 – AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Beton-versuch mit Alkalizufuhr), Ausgabe 2018
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonbauweisen: Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen, TP B-StB Teil 1.1.10 – AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (Klima-wechsel-lage-rung), Ausgabe 2018.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (Hrsg.): DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Beuth Verlag, 2013