

Entwicklung eines direkten Prüfverfahrens zur Alkaliempfindlichkeitsbeurteilung von Gesteinskörnungen – der BTU-SP-Schnelltest

Robert Bachmann, Klaus-Jürgen Hüniger, Yvonne Scholz
Lehrstuhl Baustoffe/Bauchemie

Kurzfassung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist eine den Beton schädigende Reaktion, bei der Alkalien aus dem Zement, Kieselsäure aus der Gesteinskörnung und Feuchtigkeit beteiligt sind. Trotz jahrzehntelangen Untersuchungen und entsprechenden, angehäuften Erkenntnissen ist die Alkali-Kieselsäure-Reaktion immer noch eine den Beton schädigende Reaktion mit zahlreichen ungelösten Fragen. Aufgrund zahlreicher Schadensfälle der jüngsten Zeit im Betonstraßenbau, bei denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion maßgeblich beteiligt war, ist insbesondere der Handlungsbedarf dahin gehend gewachsen, schnellere und vor allem sichere Prüfverfahren zur Einstufung von Gesteinskörnungen zu entwickeln. National wie international liegt dabei der Schwerpunkt bei Beton- und Mörtelprüfverfahren. Dieser Artikel zeigt einen ganz anderen Weg auf, nämlich direkt am Korn ohne komplexe Mörtel- und Betonversuche unter Anwendung chemischer und physikalischer Grundlagentheorien Prüfungen durchführen zu können.

Aufbauend auf der in 2007 erschienenen, überarbeiteten Alkalirichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) wird gezeigt, dass es in Ergänzung der dort festgelegten Prüfverfahren an Betonprüfkörpern (Problem: dauert mit 9 Monaten zu lange) und an Mörtelproben (Problem: unzuverlässig bei der Einstufung) ein alternatives chemisch-physikalisches Prüfverfahren gibt. Dieses Prüfverfahren, als BTU-Löse- und Porositäts-Test bezeichnet (BTU-SP-Test), funktioniert direkt am Korn ohne Beton- oder Mörtelherstellung in einem Zeitraum bis maximal 14 Tagen. Das wichtigste jedoch ist, dass dieses neue Prüfverfahren eine schnelle und vor allem zuverlässige Einstufung in Alkaliempfindlichkeitsklassen ermöglicht.

Als chemischer Parameter wird der sogenannte Kieselsäureüberschuss, bzw. die freie Kieselsäure, ermittelt. Das ist die Kieselsäure, die aus dem Gestein im alkalischen Milieu freigesetzt wird und die tatsächlich für eine AKR zur Verfügung steht (der alumosilicatische gebundene Anteil, der betonunschädigend ist, wird nicht berücksichtigt). Als wichtiger physikalischer Parameter des Gesteins fließt zusätzlich die offene Porosität in die Betrachtungen ein. Offene Poren dienen als Puffer- bzw. Ablagerungsraum für die Kieselsäure und reduzieren die Wirkung der freien Kieselsäure zusätzlich.

Beide Messwerte werden in ein Diagramm eingetragen, wobei sich bestimmte Bereiche A, B und C ergeben. Im Bereich A liegt das unemp-

findliche Material, im Bereich C die empfindlichen Gesteine, im Bereich B hängt die Empfindlichkeit maßgebend von der offenen Porosität ab. Die Zuordnung zu Empfindlichkeitsklassen des Gesteins erfolgt somit eindeutig über die Lage des Messpunktes bezüglich der Bereiche im Diagramm. Anhand dieser beiden Kriterien konnten in der Zwischenzeit über 100 Gesteinsproben hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeit schnell und sicher eingestuft werden.

Insbesondere im Hinblick auf eine Nachhaltigkeit im Betonstraßenbau, aber auch im allgemeinen Ingenieurbau, sollte diesem Verfahren zukünftig eine wichtige Rolle zukommen, ist es doch erstmals möglich, zeitnah die Qualität von Gesteinskörnungen, die für Betonbaumaßnahmen vorgesehen sind, zuverlässig zu beurteilen. Und diese Zuverlässigkeit ermöglicht die Herstellung dauerhafter Betonbauwerke.

Abstract

The Alkali-Silica-Reaction (ASR) is a damaging reaction of concrete structures where alkalis from the cement, soluble silica from the aggregate and humidity are involved. In spite of many investigations which have been performed during a long period of time many questions must be answered always yet to understand this reaction. Caused by many damaged concrete roads in the last years it is necessary to develop fast and especially reliable test methods for assessment of concrete aggregate materials. In Germany but also in many other countries the main research direction is to develop concrete and mortar bar test methods. The following paper shows another way for testing aggregate by using chemical and physical knowledge`s directly at aggregate grains without concrete or mortar tests.

Based on the alkali guideline of the German Committee of Structural Concrete (DAfStb) which has been published in 2007 it is shown that an alternative chemical-physical test method exists in addition to the concrete prism test (the problem is: it takes with 9 month to long) and to the mortar bar tests (the problem here is: it is not reliably enough). This new test method, called BTU-solution and porosity-test (BTU-SP-test), works directly at grains without a mortar or concrete producing process and takes up to 14 days only. But most important is that this test allows a fast and especially reliable classification of aggregate materials in alkali sensitivity classes.

The chemical parameter is the so called surplus or free silica. This silica, which comes from the aggregate in the alkaline pore solution, is really able for an ASR-damaging process (the aluminosilicate bound part of the whole silica, which does not affect an ASR, is not considered). An important physical parameter is the open porosity, which must be determined in an additional way. Obviously open pores serve as a deposit chamber where silica can be stored. Based on this physical mechanism the damaging amount of the free silica is reduced furthermore.

Both values the free silica value and the open porosity value are marked on in a diagram. The result is a cloud of points but certain areas can be differentiated. Area A represents the non reactive rock materials, in area C the reactive ones can be found. In area B the sensitivity depends on the open porosity in an important way. This method allows an exact classification of rocks to sensitivity classes and more than 100 samples could be determined and classified in the last time.

This test method should play an important role under consideration of the durability of concrete structures especially of concrete roads because it is possible for the first time to determine the quality of rock materials, which should be used as aggregate in concrete buildings in a very short period of time. But this reliability allows to produce durable concrete buildings.

1 Einleitung

Die Zunahme von Schädigungen an Betonbauwerken, bei denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) maßgeblich beteiligt ist, zeigt deutlich den Bedarf weiterer Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet an. Insbesondere die in letzter Zeit festgestellte teilweise doch beträchtlich reduzierte Nutzungsdauer (von 30 auf ca. 10 Jahre) bei Autobahnen und anderen Fahrbahnbetonen belegt ein immer noch vorhandenes unzureichendes Wissen bei dieser sehr komplexen Reaktion im Beton. Eine AKR ist nämlich gekennzeichnet dadurch, dass Alkalien aus dem Bindemittel Zement bzw. auch von außen zugeführt mit bestimmten Gesteinskörnungen bei Vorhandensein genügend hoher Feuchtigkeit zu einem Alkalisilicatgel reagieren können, welches über ein doch beträchtliches Quellpotenzial verfügt. Damit kommt neben dem Zement auch der Qualität der in einem Beton eingesetzten Gesteinskörnungsmaterialien eine sehr große Bedeutung zu für die Herstellung dauerhafter Betone. Und insbesondere bei der Charakterisierung des Naturproduktes Gesteinskörnung, welches inhomogen zusammengesetzt, welches in der Lagerstätte deutlichen Schwankungen unterworfen sein kann und dessen Zusammensetzung sowieso von Gesteinsart zu Gesteinsart unterschiedlich ist, sind noch viele Fragen offen. Damit hat eine bessere, d. h. sichere, und auch schnellere Charakterisierung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen auch sehr viel mit Nachhaltigem Bauen zu tun.

Zum Umgang mit dieser Problematik gibt es in Deutschland seit 35 Jahren die sogenannte Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). 2007 wurde die Alkali-Richtlinie in wichtigen Passagen inhaltlich überarbeitete, um insbesondere den Fragen des Er-

kennens alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen besser Rechnung zu tragen. Neben einem über 9 Monate Prüfzeitraum andauernden Betonversuch (Nebelkammerlagerung bei 40°C) wurden erstmals als vorzuschaltende Tests zwei Mörtelschnelltests in die Richtlinie mit aufgenommen. Diese Tests sollen bereits nach 14 Tagen bzw. 4 Wochen eine Einstufung von Gesteinskörnungen in Alkaliempfindlichkeitsklassen ermöglichen. Problematisch für die einwandfreie Anwendung ist jedoch, dass diese Mörtelschnelltests nur eine exakte Einstufung in alkaliunempfindlich (Bezeichnung E I-S) zulassen, da hierbei der festgelegte Dehnungsgrenzwert der Mörtelprismen unterschritten wird. Bei Überschreitung des Dehnungsgrenzwertes jedoch ist keine Einstufung möglich.

Basierend auf dem an der BTU Cottbus von [HILL, 2004] und [HILL, HÜNGER, 2005] entwickelten direkten chemischen Schnelltest für präkambrische Grauwacken (BTU-Test) wird im Rahmen eines AiF geförderten Forschungsprojektes am LS Baustoffe/Bauchemie dieser Test weiterentwickelt zu einem direkten AKR-Prüfverfahren, welches anwendbar sein soll auf eine Vielzahl im Beton verwendeter Gesteinsarten.

Um die Bandbreite im Reaktionspotenzial derzeit in Deutschland verwendeter Gesteinsarten als Gesteinskörnung im Beton zu veranschaulichen, wird auf Abb. 1 verwiesen. Hier sind die Dehnungsverläufe, ermittelt nach dem Betonversuch nach Alkali-Richtlinie Teil 3 bis zu einem Jahr Lagerung in einer Nebelkammer zusammengestellt.

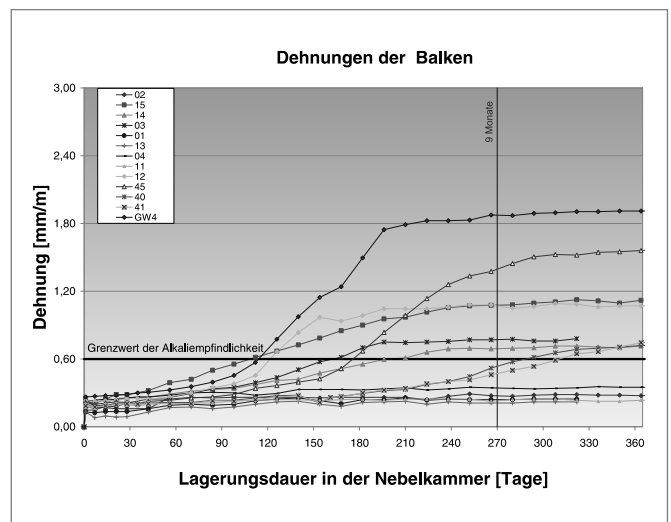


Abbildung 1: Dehnungen der Balken bei 40 °C Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie Teil 3

Als Grenzwert nach diesem Betonversuch wurde eine Dehnung von 0,6 mm/m festgelegt (als dicke waagerechte Linie im Diagramm eingezeichnet). Die Dehnungen werden dabei an genau festgelegten Betonprüfkörper ermittelt, hergestellt mit einer zu prüfenden Gesteinsart bestimmter Körnungen. Wird der Dehnungsgrenzwert nach 9 Monaten Lagerung überschritten, muss die geprüfte Gesteinskörnung als alkaliempfindlich (E III-S) eingestuft werden, liegt der Endwert der Dehnung unter dem Grenzwert, ist das Gestein unempfindlich bezüglich AKR.

Die Prüfdauer, aber auch der sehr hohe Aufwand bei dieser Prüfung machen diesen Betonversuch für den praktischen Anwendungsfall zur Überwachung einer Kiesgrube bzw. eines Steinbruches ungeeignet. Andererseits hat dieser Versuch hinsichtlich der Exaktheit der Einstufung von Gesteinskörnungen national wie auch international eine sehr hohe Akzeptanz, was daran liegt, dass die zu prüfende Gesteinskörnung dem tatsächlichen Betonmilieu (hochalkalihaltiges Porenwasser aus dem Zementstein und permanente Feuchtigkeit durch die Nebelkammer) über einen langen Zeitraum ausgesetzt ist.

Bereits vor ca. 25 Jahren wurden deshalb Untersuchungen angestellt [OBERHOLSTER, DAVIES 1986], die Reaktion zu beschleunigen. Höhere Temperaturen (80°C), geringere Korngrößen gegenüber den Betonkorngrößen (bis 4 mm) und intensivere Alkalieinwirkung (durch Lagern in heißer Natronlauge) wurden gewählt. Dieses Verfahren, auch als NBRI/RILEM-Test bezeichnet, hat international eine hohe Akzeptanz gefunden. Basierend auf diesen internationalen Erfahrungen wurden auch in Deutschland in den letzten Jahren Mörtelschnelltests entwickelt.

2 Untersuchungen mit Mörtelschnelltests der Alkali Richtlinie Teil 3

Mit der Überarbeitung der Alkali-Richtlinie des DAfStb (Fassung Februar 2007) [DAfStb-RICHTLINIE, 2007] gibt es erstmals einen verbindlichen Mörtelschnelltest zur Prüfung von gebrochenen Gesteinskörnungen. Das dort als Referenzverfahren aufgeführte Verfahren basiert dabei auf dem Verfahren nach FRANKE [FRANKE, 2003] welches wiederum auf dem internationalen NBRI/RILEM-Test aufbaut. Dazu werden die Mörtelprismen in 80 °C heißer 1-molarer Natronlauge 13 Tage lang gelagert und der Grenzwert auf 1 mm/m festgelegt. Als Alternativverfahren wurde der Test nach STARK [STARK et al., 2006] mit aufgenommen, der auf dem Verfahren nach PHILIPP [PHILIPP und EIFERT, 2004] basiert, welches eine Lagerung von 21 Tagen bei 70 °C über Wasser und einem Grenzwert von 2 mm/m vorsieht. Der Unterschied zwischen den Verfahren von STARK und PHILIPP ist, dass nach STARK die Messtemperatur definiert auf 20 °C abgekühlt werden muss und der Grenzwert auf 1,5 mm/m absinkt, gleichzeitig sich aber die Lagerungsdauer auf 28 Tage erhöht.

Das Hauptproblem bei der Anwendung von Mörtelschnelltests ist jedoch die nicht absolut zuverlässige Aussagefähigkeit über die Reaktivität von Gesteinskörnungen. Beim Vergleich mit dem Betonversuch (nach Alkali-Richtlinie Teil 3), dem einzig belastbaren Test bisher, zeigen sich teilweise deutliche Differenzen. Es ergibt sich dabei eine Übereinstimmung mit den internationalen Erfahrungen, dass die Tests oftmals nur in eine Richtung aussagefähig sind, was bedeutet, dass beim Unterschreiten des Grenzwertes eine Einstufung als nicht reaktiv (E I-S) erfolgt, jedoch beim Überschreiten keine Einstufung möglich ist. Alternativ kann danach eine 9-monatige Nebelkammerlagerung angeschlossen werden, um eventuell doch noch eine Einstufung in E I-S zu erreichen. Dies ist absolut praxisfern und mit Hinblick auf Vorlaufzeiten im Straßenbau von wenigen Wochen und der Inhomogenität von natürlichen Gesteinskörnungen nicht akzeptabel.

Tabelle 1:

Ergebnisse der Prüfungen mit Mörtelschnelltest und Betonversuch nach Alkali-Richtlinie (Teil 3) an ausgesuchten Gesteinen mit abweichenden Einstufungen

Probenbezeichnung	Verfahren nach PHILIPP (ähnlich AR Teil 3)	Verfahren nach FRANKE (nach AR Teil 3)	Betonversuch 40°C Nebelkammer (nach AR Teil 3)	Bemerkung
GW 97-2	E I-S	k. E.	E I-S	Widerspruch innerhalb des Schnelltests
GW 97-5	–	k. E.	E I-S	Widerspruch zum Betonversuch
GW 97-6	E I-S	k. E.	E III-S	Widerspruch
14/1	E I-S	k. E.	E III-S	Widerspruch
41/3	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	Widerspruch
KR	E I-S	k. E.	E I-S	Widerspruch
45/1	E I-S	k. E.	E III-S	Widerspruch
45/2	E I-S	k. E.	E III-S	Widerspruch
42/1	k. E.	E I-S	E III-S	Widerspruch
15/1	k. E.	E I-S	E III-S	Widerspruch
23/2	k. E.	E I-S	–	Widerspruch
24/2	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	Widerspruch
32/1	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	Widerspruch
32/2	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	Widerspruch
33/1	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	Widerspruch

k. E. – keine Einstufung möglich, d. h. Dehnung über dem Grenzwert

Ein zusätzliches Problem der Mörtelschnelltests ist außerdem ihre große Streuung der Messergebnisse und teilweise sogar gegensätzlichen Aussagen (Tab. 1). Interessanterweise sind diese Abweichungen unabhängig von der Gesteinsart und treten in nahezu allen Gesteinsgruppen auf. Von einer zufriedenstellenden Lösung im Sinne aller (Bau)Beteiligten kann also weiterhin nicht gesprochen werden.

3 Alternativen – Löseuntersuchungen direkt an der Gesteinkörnung

3.1 Chemische Lösungsanalysen nach alkalischer Lagerung (BTU-Test)

Die beschriebenen Probleme mit den Mörtelschnelltests der neuen Alkali-Richtlinie zeigen deutlich, dass weiterhin erheblicher Klärungsbedarf bei der Identifizierung von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen besteht.

Das an der BTU Cottbus von Hill/Hüniger entwickelte Löseverfahren zur Bestimmung der überschüssigen Kieselsäure an präkambrischen Grauwacken erweist sich dabei als eine gegenüber dem Betontest nach

Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAFStb qualitativ sowie quantitativ gleichwertige Prüfmethode. Eine kurzfristige sowie sichere Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz direkt am Gestein ist somit wissenschaftlich begründet möglich, weshalb das Verfahren als Alternative bzw. Ergänzung angewendet werden könnte [HILL und HÜNGER, 2004]. Die Lösungsanalyse ist eine korngößen- und zeitabhängige Untersuchungsmethode. Dabei werden die Gehalte an SiO_2 photometrisch und Al_2O_3 komplexometrisch bestimmt. Hierfür erfolgt die Lagerung der Kiese bei 80°C in einer 0,1 m KOH-Lösung ($\text{pH}=13$) im Klimaschrank mit einer Gesamtlagerungsdauer von 14 Tagen.

Zunächst werden die Proben in drei verschiedene Korngruppen (0,25/0,5; 1/2; 4/8) abgesiebt, anschließend gewaschen und getrocknet. Danach erfolgt die Einwaage mit je 10 g jeder Probe und die Zugabe von 100 ml 0,1 m KOH-Lösung ($\text{pH}=13$) in geschlossene HDPE-Behälter und anschließender Lagerung bei 80°C im Klimaschrank. Nach 48 h erfolgt die erste Lösungsanalyse, indem die Lösung abfiltriert und eine chemische Analyse des Eluats durchgeführt wird. Diese beinhaltet eine photometrische Bestimmung der SiO_2 Gehalte und eine komplexometrische Bestimmung der Al_2O_3 Gehalte. Alle weiteren Lösungsanalysen finden anschließend im Zwei-Tage-Rhythmus, einschließlich des 14. Tages, statt. Zur Auswertung wird das Mittel der Analysewerte der drei Korngruppen der jeweiligen Kiese herangezogen [HILL, 2004].

Für die spätere direkte Gegenüberstellung von Kieselsäureüberschussanteilen und anderen Vergleichswerten ist es notwendig, die über eine alumosilicatische Komplexbildung hinaus vorliegenden SiO_2 -Anteile in der Lösung zu quantifizieren. Die Berechnung des hierfür maßgeblichen schädigenden Kieselsäureüberschuss [nach Hill] ergibt sich aus nachstehender Gleichung:

$$\text{SiO}_{2\text{ü}} = \text{SiO}_{2\text{ges}} - 1,4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}} \quad [\text{mg/l}] \quad (\text{Gl. 1-1})$$

$\text{SiO}_{2\text{ü}}$ in der Lösungsphase vorliegender SiO_2 -Anteil, der nicht über eine alumosilicatische Komplexbildung verbraucht wird in [mg/l]

$\text{SiO}_{2\text{ges}}$ in der Lösungsphase vorliegender Gesamt- SiO_2 -Anteil in [mg/l]

$\text{Al}_2\text{O}_{3\text{ges}}$ in der Lösungsphase vorliegender Gesamt Al_2O_3 -Anteil in [mg/l]

Dabei stellt der Wert **1,4** den aus NMR-Untersuchungen der alkalischen Lösungen ermittelten alumosilicatischen Bindungsfaktor der Kieselsäure dar. Durch die bisher vorliegenden Untersuchungen an weiteren Gesteinen konnte dieser Faktor in seiner Größenordnung für Rhyolithe, andere Hartgesteine und Kiese bestätigt werden.

3.2 Übertragung des BTU-Löseverfahrens auf weitere Gesteinsarten

Weiterführende Untersuchungen am LS Baustoffe/Bauchemie hatten zum Ziel, die grundsätzliche Anwendbarkeit des bisher auf präkambrische Grauwacken beschränkten BTU-Löseverfahrens auch für andere Gesteinskörnungen zu prüfen.

Als potenziell alkaliempfindlich (E III-S) gilt eine beliebige Gesteinskörnung nach bisherigem Erkenntnisstand, wenn der maximale Kieselsäureüberschuss innerhalb der 14-tägigen Lagerungsdauer den Grenzwert von 100 mg/l erreicht bzw. überschreitet. Proben, bei denen sich ein maximaler Kieselsäureüberschuss unter 100 mg/l ergibt, gelten dementsprechend als alkaliunempfindlich (E I-S). Um die ermittelten Werte (Tab. 2) kalibrieren zu können, ist dazu die Herstellung von Betonbalken mit anschließender Nebelkammerlagerung (nach Alkali Richtlinie Teil 3) notwendig. Dabei zeigte sich, dass der ermittelte Grenzwert für den maximalen Kieselsäureüberschuss von 100 mg/l prinzipiell auch für andere Gesteinskörnungen anwendbar ist.

Tabelle 2:

Ergebnisse des direkten Löseverfahrens und der Prüfung sowie Einstufung nach Alkali-Richtlinie (Teil 3) für ausgewählte Gesteinsarten

Probenbezeichnung	max. $\text{SiO}_{2\text{ü}}$ [mg/l] (Grenzwert: 100,0)	Dehnung ϵ [mm/m] (Grenzwert: 0,60)	Einstufung (nach AR Teil 3)
GW 2A	319,4	2,36	E III-S
GW 2B	44,6	0,27	E I-S
GW 3	267,8	1,81	E III-S
Rhy 11	30,4	0,24	E I-S
Rhy 13	327,86	0,21	E I-S
Kies 01	26,0	0,24	E I-S
Kies 02	208,3	0,27	E I-S
Kies 03	268,5	0,78	E III-S
Kies 45	329,2	1,45	E III-S
Grano 15	236,5	1,08	E III-S

Untersuchungen an einer Vielzahl von Gesteinsarten (mit dem Löseverfahren wurden über 100 Gesteinsproben bisher untersucht) zeigten aber auch, dass teilweise auch Gesteine mit einem Wert von über 100 mg/l sich inert gegenüber einer AKR verhielten. Somit konnte die Einstufung als alkaliempfindlich (E III-S) nach Grenzwertüberschreitung nicht generell für andere Gesteinsarten übernommen werden. Worin kann hierzu die Ursache liegen?

Im Rahmen einer Diplomarbeit zur Untersuchung verschiedener physikalischer Eigenschaften an präkambrischen Grauwacken stellte sich heraus, dass die offene Porosität der Gesteine einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktivität hat.

4 Korrelation von Kieselsäureüberschuss und offener Porosität

Die Ermittlung der offenen Porosität an Gesteinskörnungen wurde mit Hilfe der Pyknometer Methode der DIN 1097-6:2000 [DIN 1097] vorgenommen. Die Berechnung erfolgte in Anlehnung an DIN EN 1936:2006 [DIN 1936]. Für eine einfachere Handhabung der komplexen Prozedur wurde die mittels Pyknometer Methode ermittelten Werte mit Hilfe der Berechnung durch die Gleichung nach DIN EN 1936:2006 angepasst. Die Ergebnisse der ermittelten offenen Porositäten für ausgewählte Gesteine zeigt Abb. 2 exemplarisch.

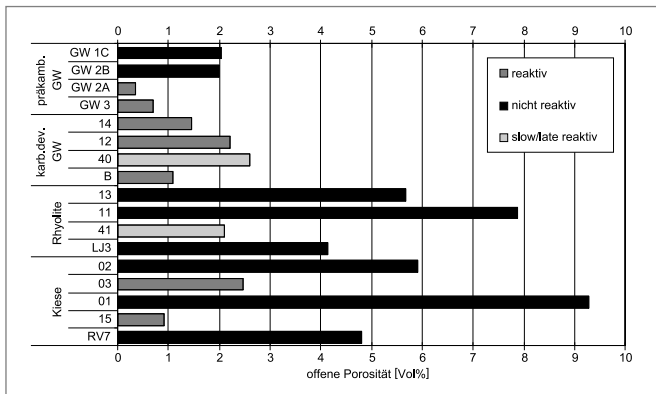


Abbildung 2:
Verteilung der offenen Porosität an ausgewählten Gesteinskörnungen

Wie in Abb. 2 zu sehen ist, haben z. B. die nicht reaktiven Grauwacken GW 1C und GW 2B eine offene Porosität von ca. 2 Vol.% und die reaktiven Grauwacken einen Wert von weniger als 1 Vol%. Das bedeutet in einer Verallgemeinerung der Aussage: Vergleicht man die Porositäten innerhalb einer Gesteinsart, so kann festgestellt werden, dass offensichtlich empfindliche Gesteine generell eine geringere offene Porosität besitzen als unempfindliche. Bei den Kiesen und den Rhyolithen ist dieses Verhalten ebenfalls auffällig, wobei die absoluten Porositäts-Messwerte jedoch wesentlich größer sind, als bei den präkambrischen Grauwacken. Bei den karbonisch-devonischen Grauwacken kann dieser Vergleich momentan nicht durchgeführt werden, einfach aus dem Grund, da es bei unseren Untersuchungen bisher keine unempfindliche Grauwacke dieses Typs gibt.

Wie passen diese physikalischen Kennwerte zu den unabhängig hiervon ermittelten chemischen AKR-Kennwerten „Kieselsäureüberschuss“?

Da von allen so untersuchten Gesteinskörnungen das Ergebnis sowohl des Betonversuchs als auch der Bestimmung des Kieselsäureüberschusses ebenfalls vorliegen, können alle drei Kennwerte zusammengefasst dargestellt werden. Die grafische Darstellung ist in Abb. 3 zu sehen.

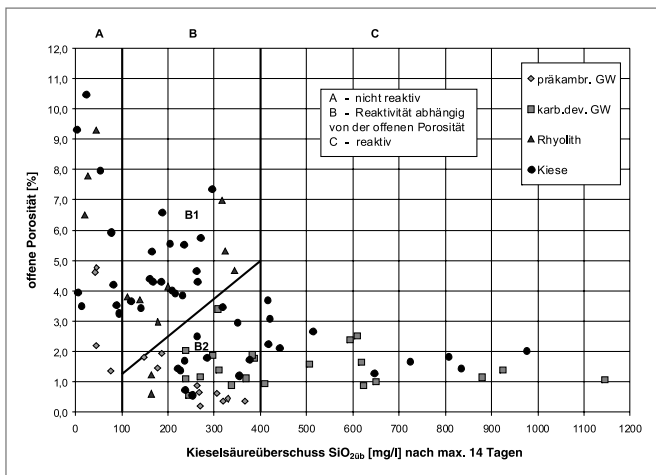


Abbildung 3:
Gegenüberstellung von überschüssigem SiO_2 -Anteil (nach 14 Tagen) und offener Porosität (BTU-SP-Test)

In Abb. 3 sind die Daten der ermittelten Kieselsäureüberschüsse gegen die zugehörigen Werte der offenen Porosität aufgetragen. Auf den ersten Blick erscheint das Ergebnis wie eine lose Ansammlung von Wertepunkten, welche sich wolkenförmig um einen Bereich konzentrieren. Ausgehend von unserer Erfahrung mit Dehnungen an Betonbalken kann die Grafik in drei Bereiche aufgeteilt werden. Der erste Bereich (Bereich A) enthält alle Gesteinsproben, die Kieselsäureüberschüsse unterhalb von 100 mg/l und offene Porositäten von 1 bis zu 11 Vol.% besitzen. Weiterhin hat eine hohe Anzahl von Proben Kieselsäureüberschüsse zwischen 100-400 mg/l und Porositäten bis zu 7 Vol.% (Bereich B). Und letztlich existieren auch Proben (Gesteine) mit Kieselsäureüberschuss-Werten von über 400 mg/l und Porositäten von 1 bis 3 Vol.% (Bereich C).

Von Gesteinen mit einem Kieselsäureüberschuss von über 400 mg/l (Bereich C) wissen wir anhand des Betonversuches, dass es sich um AKR-empfindliche Gesteinskörnungen handelt. Das betrifft vor allem karbonisch-devonische Grauwacken und gebrochene Kiese des Oberrheins. Aufgrund des sehr hohen Kieselsäurelösevermögens spielt die offene Porosität keine Rolle bei der Beurteilung. Aus dem BTU-Löseverfahren für präkambrische Grauwacken ergibt sich ein doch ebenfalls recht strenger Grenzwert von 100 mg/l freier Kieselsäure für reaktive Gesteinskörnungen. Somit sollten auch Gesteine in Abb. 3, deren Messpunkt unterhalb dieses Grenzwertes liegt, ebenfalls nicht reaktiv sein. Sämtliche Betonversuche bestätigen diese Einstufung. Aber was passiert mit den Werten zwischen 100 und 400 mg/l Kieselsäureüberschuss?

Im Bereich B der Grafik (Abb. 3) lassen sich zwei getrennte Wertebereiche erkennen. Dabei kann eine lineare Grenzlinie zwischen diesen Bereichen mit einem konstanten Anstieg gezogen werden. Wertepunkte, die unterhalb dieser Linie liegen, zeigen eine reaktive Gesteinskörnung an. Alle Punkte, welche über der Linie liegen, sind nicht reaktive Gesteine. Grundlage für diese exakte Zuordnung ist auch hier der Betonversuch.

Für Punkte, die nahe an der Grenzlinie liegen, kann zusätzlich die Aussage getroffen werden, dass es sich sehr wahrscheinlich um sogenannte slow/late Gesteine handelt. Hierbei handelt es sich um Gesteine, die, wie der Name sagt, langsam und spät reagieren. Dieses Verhalten zeigt sich z. B. im Betonversuch dadurch, dass der Dehnungsgrenzwert von 0,6 mm/m erst sehr spät (nach 8-9 Monaten oder auch noch später) überschritten wird. Weitere Untersuchungen zur Spezifizierung werden dazu fortlaufend ergänzt.

Wie kann dieses Verhalten erklärt werden?

Hierzu läuft derzeit ein DFG-gefördertes Forschungsprojekt. Offensichtlich wird ein gewisser Teil der freiwerdenden Kieselsäure neben der aluminosilicatischen Bindung (chemisch) zusätzlich adsorptiv in Hohlräumen der Gesteinskörnungen gebunden. Diese Hohlräume sind dann von außen zugängliche Porenräume oder Risse in der Gesteinskörnung. Und genau solche Gefügebestandteile werden durch den Parameter „Offene Porosität“ erfasst. Offensichtlich scheint also die Grenze, bei welcher ein Gestein reaktiv oder nicht reaktiv reagiert, vom Wert der freien Kieselsäure und zusätzlich noch von der offenen Porosität abzuhängen. Hierbei ist besonders zu beachten, dass die offene Porosität je nach Gestein variiert, wobei die Gesamtporosität mehr oder weniger konstant bleibt.

Vergleicht man nun die so ermittelten Werte mit den Ergebnissen aus den Mörtelschnelltests und dem Betonversuch der aktuellen Alkali-Richtlinie so ergibt sich ein eindeutiges Bild (Tab. 3).

Tabelle 3:

Vergleich der Ergebnisse der Prüfungen der Mörtelschnelltests und Betonversuche nach Alkali-Richtlinie (Teil 3) mit dem BTU-SP Verfahren an ausgesuchten Gesteinen

Probenbezeichnung	Verfahren nach PHILIPP (ähnlich AR Teil 3)	Verfahren nach FRANKE (nach AR Teil 3)	Betonversuch 40°C Nebelkammer (nach AR Teil 3)	Einstufung nach BTU-SP Verfahren
GW 97-2	E I-S	k. E.	E I-S	E I-S
GW 97-5	–	k. E.	E I-S	E I-S
GW 97-6	E I-S	k. E.	E III-S	E III-S
14/1	E I-S	k. E.	E III-S	E III-S
41/3	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	E III-S
KR	E I-S	k. E.	E I-S	E I-S
45/1	E I-S	k. E.	E III-S	E III-S
45/2	E I-S	k. E.	E III-S	E III-S
42/1	k. E.	E I-S	E III-S	E III-S
15/1	k. E.	E I-S	E III-S	E III-S
23/2	k. E.	E I-S	–	E I-S
24/2	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	E I-S
32/1	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	E I-S
32/2	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	E I-S
33/1	E I-S	k. E.	lfd. Unters.	E I-S

k. E. – keine Einstufung möglich d. h. Dehnung über dem Grenzwert

Ergeben sich noch deutliche Diskrepanzen zwischen den Mörtelschnelltests und dem Betonversuch, so bleibt das BTU-SP Verfahren bisher in allen untersuchten Proben konform zur wesentlich länger dauernden Nebelkammerlagerung.

Damit kann nach der Untersuchung von über 100 Gesteinsproben konstatiert werden, dass mit dem BTU-Löse- und Porositäts-Test (BTU-SP-Test) einerseits ein im Sinne der Alkalirichtlinie zuverlässiger Test, kalibriert am 9-monatigen Betonversuch existiert, andererseits aber auch ein wesentlich schnellerer Test zur Verfügung steht, der es ermöglicht innerhalb von 10-14 Tagen eine Aussage über die Reaktivität der Gesteinskörnung zu treffen.

Literatur

- DAFStb-RICHTLINIE:** „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton – DAFStb. Beuth-Verlag, Berlin, 2007.
- HILL, S.; 2004:** Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Kieselsäure- und Aluminiumlöseverhalten. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 154 S.
- HILL, S.; HÜNGER, K.-J.; 2005:** Direct assessment of the alkali sensitivity of Precambrian greywacke from Lausitz. Cement International, 1, pp. 104-119.
- HÜNGER, K.-J.:** Zum Reaktionsmechanismus präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz bei ihrer Verwendung als Gesteinskörnung

im Beton. Habilitation, BTU Cottbus 268 S., 2005, ISBN 3-8322-4670-3 (Shaker-Verlag)

- OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G.; 1986:** An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of silicious aggregates. Cement and Concrete Research, 16, S. 181-189.
- FRANKE, L.; 2003:** Schnelltest auf Alkaliwirkung für deutsche Beton-Zuschläge. Kurzberichte aus der Bauforschung, 1, S. 37-45.
- STARK, J.; FREYBURG, E.; SEYFARTH, K. UND GIEBSON, C.; 2006:** AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. In: beton, Verlag Bau+Technik, 12/2006, S.574-581.
- PHILIPP, O. UND EIFERT, K.; 2004:** Bestimmung der Alkaliempfindlichkeit von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung. in: BFT 10/2004, S. 6-19.
- HILL, S.; HÜNGER, K.-J.; 2004:** Alkaliempfindlichkeit Lausitzer Grauwacken – Neue Perspektiven hinsichtlich eines direkten Prüfverfahrens. Forum der Forschung 17, BTU Cottbus.
- DIN EN 1097-6:2000:** Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 1936:2006:** Prüfverfahren für Naturstein-Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität. Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.



Dipl.-Ing. Robert Bachmann, geb. 1977, Studium des Bauingenieurwesens an der BTU Cottbus mit Kernfach Baustoffe/Bauchemie, seit Juli 2006 an der BTU Cottbus als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Baustoffe/Bauchemie, Mitarbeiter des Drittmittelprojektes „Direktes Prüfverfahren zur Alkaliempfindlichkeitsbeurteilung von Gesteinskörnungen“.



Priv.-Doz. Dr.-Ing.habil., Dr. rer. nat. K.-J. Hüniger, geb. 1957, Diplom-Mineraloge mit Kernfach Kristallographie, Studium an der Universität Leipzig, 1989 Promotion zum Dr. rer. nat. an der Bauhaus-Universität Weimar mit einer Arbeit über Fasergipsbildung, seit 1990 an der BTU Cottbus als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Baustoffe/Bauchemie, 2005 Habilitation zum Dr.-Ing. habil. mit einer Arbeit zum Reaktionsmechanismus präkambrischer Grauwacken im Beton. Arbeitsschwerpunkte: u. a. Forschungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Grauwackespaltung im Beton. Arbeitsschwerpunkte: u. a. Forschungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Grauwackespaltung im Beton. Arbeitsschwerpunkte: u. a. Forschungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Grauwackespaltung im Beton. Arbeitsschwerpunkte: u. a. Forschungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR), Grauwackespaltung im Beton.



Dipl.-Ing. Yvonne Scholz, geb. 1976, Studium des Bauingenieurwesens an der BTU Cottbus mit Kernfach Baustoffe/Bauchemie, seit Mai 2005 an der BTU Cottbus als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Baustoffe/Bauchemie, Mitarbeiterin des Drittmittelprojektes „Lösekinetik von slow/late Zuschlägen“.