

Automatisierte AKR-Prüfung im 60 °C-Betonversuch

Herrn Professor Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt zu seinem 80. Geburtstag gewidmet

Der 60 °C-Betonversuch ist eine in Deutschland und international verbreitete Methode, um die Empfindlichkeit von Gesteinskörnungen und Betonen hinsichtlich einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) zu prüfen. Dieser Beitrag stellt eine neu entwickelte, automatisierte Variante der Prüfmethode in einem Minireaktor vor. Dabei werden die Dehnungen von Betonprismen nicht wie beim konventionellen Test manuell, sondern automatisch in entsprechend ausgerüsteten Prüfbehältern gemessen. Neben einer Reduzierung des Messaufwands bringt die automatisierte Prüfung im Minireaktor weitere Vorteile. Die Dehnungssignale werden, anders als bei der konventionellen Messung, quasi kontinuierlich aufgezeichnet und bilden das Expansionsverhalten der Prismen detailliert ab. Außerdem bleiben Unterbrechungen der AKR-provozierenden Lagerung aus, die bei der konventionellen Prüfung notwendig sind. Im Beitrag werden die automatisierte und konventionelle Prüfung anhand der Dehnungen von Prismen zweier Gesteinskörnungen verglichen. In Übereinstimmung mit vorhergehenden Untersuchungen sind im Minireaktor gemessene Dehnungen systematisch kleiner als manuell gemessene. Als mögliche Ursache werden Unterschiede im Auslaugverhalten experimentell untersucht. Zur Überprüfung der Einstufung der zwei Gesteinskörnungen erfolgen außerdem Referenzprüfungen in der Nebelkammerlagerung bei 40 °C.

1 Einleitung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) gehört zu den chemischen Angriffen auf den Beton. Sie kann unter Umständen zu massiven Schäden führen und die Lebensdauer von Betonbauwerken drastisch verkürzen. Erste Schäden in Beton, die mit der AKR in Verbindung gebracht werden, sind in der Literatur aus den 20er- und 30er-Jahren des 20. Jahrhunderts beschrieben [1, 2]. Trotz jahrzehntelanger Forschung und Entwicklung zu Vermeidungsstrategien treten immer wieder AKR-Schadensfälle auf. Bei einer AKR kommt es durch die Reaktion von bestimmten Gesteinskörnungen mit Alkalien in der Porenlösung des Betons zur Bildung von Reaktionsprodukten, die ein größeres Volumen aufweisen als die Ausgangsstoffe bzw. unter Wasseraufnahme quellfähig sind. Durch die damit verbundene Volumenvergrößerung im Betoninneren können erhebliche Spannungen entstehen [3]. Erreichen diese Spannungen die Zugfestigkeit der Gesteinskörnung oder der Zementsteinmatrix, kommt es zur Schädigung des Betongefüges und im Extremfall zum Versagen des Bauteils. Mitunter kann es Jahrzehnte dauern, bis eine langsam fortschreitende Schädigung infolge

Automated ASR Concrete Prism Testing at 60 °C

The Concrete Prism Test at 60 °C (60 °C-CPT) is a common method to evaluate the susceptibility of concrete and aggregates to the Alkali-Silica Reaction (ASR). This paper presents a new device for an automated version of the 60 °C-CPT. The system monitors the expansion of concrete prisms automatically. Compared to the conventional test method, effort and time consumption are notably reduced. The nearly continuous recording of expansion signals allows for studying of ASR-mechanisms in more detail than the conventional test. In addition, the interruptions of ASR-provoking storage, necessary for manual measurements, are avoided. The presented study compares results of conventional and automated testing of two types of aggregate. In accordance with previous findings, continuously stored prisms generally expand less than the conventionally tested prisms. To find a possible explanation, differences in leaching of alkali from the concrete prisms were quantified. For verifying the alkali-reactivity of the two aggregates, they were also classified in the fog chamber test at 40 °C, the German reference method.

dieser Reaktion makroskopisch sichtbar wird. Aus der beschriebenen Reaktion lassen sich die drei Grundvoraussetzungen einer AKR ableiten: Ein ausreichendes Feuchteangebot, verfügbare Alkalien in der Porenlösung und eine alkaliempfindliche Gesteinskörnung [4]. Die für die Reaktion notwendigen Alkalien (Natrium, Kalium) stammen zum einen aus den Betonkomponenten, insbesondere aus dem Zement, aber auch bestimmte Gesteinskörnungen und Zusatzstoffe/-mittel können dazu beitragen, sodass in der Regel ein pH-Wert in der Größenordnung von 13,5 resultiert. Zum anderen können weitere Alkalien von außen in den Beton eingetragen werden, wie z. B. aus einer Meerwasserumgebung oder durch alkalihaltige Enteisungsmittel [5, 6]. Als alkaliempfindlich gelten Gesteinskörnungen, die amorphes, kryptokristallines oder gittergestörtes SiO₂ enthalten. Besonders reaktionsfreudige Vertreter sind in diesem Zusammenhang Opalsandstein und Flint, aber auch einige Arten von Grauwacke und Quarz-Kiesen können ein beachtliches Reaktionspotenzial aufweisen [4, 7]. Bei Bauteilen, die erhöhter Feuchte und ggf. zusätzlich externem Alkalieintrag ausgesetzt sind, sind AKR-Vermeidungsstrategien notwendig. Vor allem in den Fällen, in denen sich Feuch-

te und ein erhöhter Alkaligehalt nicht ausschließen lassen, gilt es, eine alkaliunempfindliche Gesteinskörnung im Beton zu verwenden. Der in der Praxis sehr langsame, je nach Gesteinskörnung und Exposition der Bauwerke sehr unterschiedliche Ablauf der AKR macht eine eindeutige Identifikation von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen zu einer diffizilen Aufgabe. Seit Beginn der AKR-Forschung wurde eine Vielzahl an Prüfverfahren entwickelt, um diese Aufgabe zu lösen. Um die Klassifizierung in vertretbaren Zeiträumen zu ermöglichen, werden im Rahmen der Prüfverfahren aggressive, AKR-fördernde Randbedingungen wie erhöhte Temperaturen, ggf. ein alkalireicher Prüfzement und hohe Feuchte angesetzt. Neben der Prüfung für die Klassifizierung von Gesteinskörnungen existieren mittlerweile verschiedene Performance-Prüfverfahren, die auch zur Beurteilung von spezifischen Betonrezepturen dienen und bei denen zusätzliche Einwirkungen einbezogen werden. Hierzu zählt beispielsweise der am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf entwickelte 60 °C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr [8, 9], bei dem im Prüfablauf zusätzliche Alkalien in Form einer NaCl-Lösung von außen in die Prüfkörper eingebracht werden. Dieses Prüfverfahren ist inzwischen Bestandteil der „Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen TP B-StB“ [10].

In Deutschland ist die Prüfung von Gesteinskörnungen im AKR-Kontext grundsätzlich in der Alkali-Richtlinie geregelt [11]. Neben der petrografischen Analyse und einem Schnellprüfverfahren an Mörtelproben sind in ihr zwei Betonversuche zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit der zu prüfenden Gesteinskörnung geregelt. Die Betonversuche sind zum einen die Nebelkammerlagerung bei 40 °C als Referenzverfahren und zum anderen der 60 °C-Betonversuch als Alternativverfahren. Die Beurteilung der Empfindlichkeit erfolgt anhand der unter den Prüfbedingungen stattfindenden Ausdehnung von Betonprismen mit der zu prüfenden Gesteinskörnung. Während der Nebelkammerlagerung wird zusätzlich die Rissbildung an einem Würfel beurteilt. Auf internationaler Ebene haben sich näherungsweise vergleichbare Betonversuche bei 38 °C [12, 13] und auch bei 60 °C durchgesetzt [14]. Während die Prüfungen bei 38 bzw. 40 °C eine Dauer von zwölf bzw. neun Monaten benötigen, gilt der 60 °C-Betonversuch mit einer Dauer von fünf Monaten als schnelle AKR-Betonprüfung. Neben der geringeren Prüfzeit des 60 °C-Betonversuchs hat er gegenüber der Nebelkammerlagerung bei 40 °C die Vorteile eines deutlich geringeren apparativen Aufwands und einer erleichterten Handhabung aufgrund geringerer Probekörperabmessungen. Zudem entfallen hier die Herstellung und Prüfung des für die Nebelkammerlagerung zusätzlich vorgeschriebenen Würfels.

Im Rahmen des 60 °C-Betonversuchs nach [11] werden für jede Prüfung drei Probekörper ($28 \times 7,5 \times 7,5 \text{ cm}^3$) hergestellt, die an den Stirnseiten mit Messmarken zur genauen Bestimmung der Probenlänge ausgestattet sind. Einen Tag nach der Herstellung werden sie ausgeschalt,

nach einer 30-minütigen Wasserlagerung vermessen und in einem verschlossenen Edelstahlbehälter über Wasser in einer Klimatruhe bei 60 °C und > 98% rel. Luftfeuchte gelagert. Alle 28 Tage werden sie aus der Klimatruhe entnommen und in einer Klimakammer bei 20 °C und 65% rel. Luftfeuchte für 24 Stunden heruntergekühlt. Nach der anschließenden Vermessung der Länge zur Ermittlung der Ausdehnung erfolgt die erneute Einlagerung bei 60 °C und > 98% rel. Luftfeuchte. Überschreiten die Dehnungen im Zeitraum von 140 Tagen einen Grenzwert von 0,3 mm/m, gilt die Gesteinskörnung als alkaliempfindlich.

Die Nachteile des beschriebenen Prüfverfahrens bestehen zum einen darin, dass der Dehnungsverlauf durch den großen zeitlichen Abstand der Messungen nur lückenhaft abgebildet wird. Gerade im Bereich der AKR-Forschung und -Modellierung ist, neben der Ermittlung von Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, eine detailliertere Beschreibung des Dehnungsverhaltens wünschenswert [15]. Zum anderen ist unklar, welche Auswirkungen das Herunterkühlen der Proben an den Messterminen auf den AKR-Prozess hat. Bei der Durchführung der Messung sind sorgfältiges Vorgehen und eine präzise Einhaltung des Prüfprozesses erforderlich, da z. B. jede Änderung des Temperaturverlaufs einen unkalkulierbaren Einfluss auf die Messergebnisse hat. Gerade bei wechselndem Prüfpersonal können leicht Abweichungen entstehen.

Ziel dieses Beitrags ist es, die Chancen eines automatisierten 60 °C-Betonversuchs und Unterschiede zum konventionellen Verfahren herauszuarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf dem Vergleich der Dehnungsverläufe und des Auslaugverhaltens. Als Referenz zur Überprüfung der Alkaliempfindlichkeit der eingesetzten Gesteinskörnungen wird die Nebelkammerlagerung bei 40 °C herangezogen. Weiterhin werden für die konventionellen Versuche die Entwicklungen der dynamischen E-Moduln diskutiert.

2 Automatisierung des 60 °C-Betonversuchs

In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurde in einem AIF-geförderten Projekt (IGF-Vorhaben 15248 N) eine Vorrichtung entwickelt, mit der die Dehnungen während eines Versuchs automatisch erfasst werden können [16, 17]. Während der Messung bleiben die Proben in den Behältern im Reaktor des 60 °C-Betonversuchs. Dadurch können störende Einflüsse aus Temperaturänderungen und Abweichungen während der manuellen Messungen ausgeschlossen werden. Des Weiteren ist die Datenerfassungsrate nahezu beliebig wählbar, wodurch zeitlich hoch aufgelöste Messungen der Dehnungsentwicklung möglich sind. Parallel dazu erlauben speziell für den dauerhaften Einsatz bei 60 °C und > 98% rel. Luftfeuchte entwickelte Sensoren die Messung von Ultraschallgeschwindigkeiten und Schallemissionen. Durch die Korrelation der akustischen Mes-

sungen mit der Dehnungsentwicklung können Rückschlüsse auf die Schädigungsevolution infolge der AKR gezogen werden.

Die Weiterentwicklung der Vorrichtung zu einem anwenderfreundlichen Messsystem erfolgte in einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt (MNPQ 19/14) [18]. Kernstück des Systems sind zylindrische Edelstahlbehälter zur Aufnahme der Proben. Am Deckel der Behälter sind Messrahmen zur Aufnahme einer Probe befestigt. Die Dehnungsmessung erfolgt berührungslos über Wirbelstromsensoren, die in die Deckel integriert sind. Wie beim 60°C-Betonversuch werden die Behälter ca. 3,5 cm hoch mit Wasser gefüllt, ohne dass die Proben darin eintauchen. Die Behälter werden in einem speziell für dieses System entwickelten Minireaktor gelagert. Nach den für den 60°C-Betonversuch nötigen Vorbereitungen und dem Einsetzen der Proben in die Messrahmen und Behälter erfolgt die Dehnungsmessung automatisch. Die Bilder 1 und 2 zeigen den Prototyp des Minireaktors sowie einen Behälter mit Messrahmen, die für die hier präsentierten Messungen verwendet wurden.

Mit dem automatisierten Versuch soll der konventionelle 60°C-Betonversuch möglichst genau abgebildet werden. Einige Abweichungen lassen sich jedoch nicht vermeiden bzw. stellen aus Sicht der Autoren eine Verbesserung des Verfahrens dar. So werden die Proben im automatisierten Verfahren für die Messungen nicht mehr von 60°C auf 20°C gekühlt. Es muss daher ein Referenzzeitpunkt für den Beginn der Dehnungsmessung festgelegt werden, bei dem das Messsystem und die Proben bei 60°C im thermischen Gleichgewicht sind, die AKR aber mit Sicherheit noch nicht begonnen hat. Zwar wäre das Kühlen auch bei der automatischen Messung möglich, es gibt aber Hinweise, dass Temperaturänderungen während des Versuchs zu zusätzlichen Dehnungen führen [15]. Daher erscheint es zielführender, die Temperatur konstant zu halten.

Das im konventionellen Versuch vorgeschriebene Drehen der Proben ist bei der automatischen Messung nicht möglich. Wie im MNPQ-Projekt 19/14 gezeigt werden konnte, hat das Drehen aber keinen Einfluss auf das Prüf-



Bild 1 Prototyp des Minireaktors
Prototype of the benchtop reactor



Bild 2 Prototyp des Behälters mit Messrahmen für den Minireaktor
Prototype of a container with measurement frame

ergebnis. Die Anzahl der Proben pro Prüfbehälter bzw. das Verhältnis von Behälter- zu Probenvolumen hat dagegen einen signifikanten Einfluss auf die Dehnungsentwicklung. Als mögliche Ursache wird ein unterschiedliches Auslaugen der Proben diskutiert [19]. Aus ergonomischen Gründen und um die Messsysteme für verschiedene Proben zu entkoppeln wurde entschieden, nur noch eine Probe in einem Behälter zu lagern. Die aus diesen Unterschieden resultierenden Abweichungen zum konventionellen Versuch müssen bei der Bewertung der Dehnungsmessungen berücksichtigt werden.

3 Durchgeführte Untersuchungen

Die im Folgenden dargestellten Untersuchungen sollen zur Klärung der Frage beitragen, wie sich die AKR-Dehnungsentwicklung zwischen dem beschriebenen automatisierten und dem konventionellen Verfahren unterscheidet. Hierfür wurden in einer Charge hergestellte Probekörper zum einen im automatischen Verfahren (Prototyp des Minireaktors) und zum anderen im konventionellen 60°C-Betonversuch nach Alkali-Richtlinie [11] geprüft. Zudem erfolgte der Vergleich dieser Prüfungen mit dem Referenzverfahren der Alkali-Richtlinie, der Nebelkammerlagerung bei 40°C.

Untersucht wurden zwei Betone mit verschiedenen Gesteinskörnungen, wobei auf die nach Alkali-Richtlinie vorgeschriebenen Rezepturen mit einem NA-Zement verzichtet wurde. Die Zusammensetzungen der beiden untersuchten Betone sind in Tab. 1 dargestellt. Durch die Wahl der Gesteinskörnungen sollte eine möglichst große Spanne der Empfindlichkeit untersucht werden. Während der Grauwacke-Splitt (GW) zu den deutlich alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen vom Typ „slow/late“ gehört, gilt der verwendete Quarz-Kies (QK) als eher AKR-unempfindlich.

Tab. 1 Betonzusammensetzungen
Concrete mixture

| Bestandteil | | Menge | |
|--|----------------------|-------|------|
| | | GW | QK |
| Natursand ohne mechanisch gebrochene Anteile 0/2 | [Vol.-%] | 30 | 30 |
| Grauwacke-Splitt 2/8 | [Vol.-%] | 40 | – |
| Grauwacke-Splitt 8/16 | [Vol.-%] | 30 | – |
| Quarz-Kies 2/8 | [Vol.-%] | – | 40 |
| Quarz-Kies 8/16 | [Vol.-%] | – | 30 |
| CEM I 32,5 R (Na ₂ O-Äquivalent: 1,3 M.-%) | [kg/m ³] | 400 | 400 |
| w/z-Wert | | 0,45 | 0,45 |

Für die Untersuchungen im 60 °C-Betonversuch wurden für jede Prüfserie (Minireaktor und konventionell) und beide Betonrezepturen je drei Prüfkörper mit den Abmessungen 280 × 75 × 75 mm³ hergestellt. Im Rahmen der Nebelkammerlagerung bei 40 °C erfolgte für beide Rezepturen die Herstellung von je drei Prismen (500 × 100 × 100 mm³) für die Dehnungsmessungen und eines Würfels (Kantenlänge: 300 mm) für die Beurteilung der Rissbildung.

Nach der Herstellung lagerten die Proben mit feuchten Tüchern abgedeckt für 24 Stunden in der Schalung. Nach dem Ausschalen erfolgten die Nullmessungen und die Einlagerung in die Behälter bzw. Prüfklimata der jeweiligen Lagerungsarten. Im Rahmen der konventionellen Prüfungen wurden bei jedem Messtermin die Dehnungen, die Massen und die Eigenfrequenz der Biegeschwingung zur Ermittlung der dynamischen E-Moduln nach [20] aller Prüfkörper bestimmt. Die Beurteilung der Rissbildung an den Würfeln in der Nebelkammerlagerung erfolgte zu jedem Messtermin. Neben der Ermittlung der Dehnungen während des automatisierten 60 °C-Betonversuchs wurden vor und nach der Lagerung konventionelle Dehnungs-, Masse- und Eigenfrequenzmessungen an allen Probekörpern durchgeführt. Innerhalb der ersten 24 Stunden erfolgte die Aufzeichnung der Dehnungen minütlich, danach stündlich. Zur Klärung der Frage eines möglicherweise unterschiedlichen Auslaugverhaltens der Probekörper bei konventioneller und automatisierter Prüfung im 60 °C-Betonversuch wurden die Natrium- und Kaliumgehalte sowie die pH-Werte der Wasserbäder in den Behältern (Behälterlösung) ermittelt. Bei den konventionellen Prüfungen wurden hierfür an jedem Messtermin 20 ml der Behälterlösung entnommen. Im Rahmen der automatisierten Verfahren erfolgte lediglich der Vergleich der Nullmessung zum Wert am Ende der Lagerung, um das Prüfklima während dieser Zeit aufrechtzuerhalten und die Messungen nicht zu stören. Da sich die Mengen der Behälterlösungen aufgrund der unterschiedlichen Behältergeometrien und Anzahl der Probekörper unterscheiden, wurden die Auslaugversuche im Hinblick auf die Masse der gemessenen Bestandteile in der Behälterlösung je Probekörper ausgewertet.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ergebnisse der Nebelkammerlagerung

Die Nebelkammerlagerung bei 40 °C als Referenzprüfverfahren nach [11] bestätigt, dass die Grauwacke als alkaliempfindliche Gesteinskörnung einzuordnen ist. Wie Bild 3 zeigt, überschreiten die gemessenen Dehnungen den Grenzwert von 0,6 mm/m bereits zur Messung im Alter von 84 Tagen. Zu diesem Zeitpunkt wurden auch Risse am Würfel beobachtet. Nach 112 Tagen wurden Rissbreiten über dem Grenzwert von 0,2 mm festgestellt. Auch die Prismen zeigten eine deutliche Rissbildung.

Innerhalb der ersten 28 Tage unterscheiden sich die Dehnungen der Prismen mit Quarzkies (QK) bzw. Grauwacke (GW) nur geringfügig. Der starke Anstieg innerhalb der ersten Lagerungstage ist hauptsächlich auf thermische und hygri-sche Dehnungen der Probekörper zurückzuführen. Im Alter von 56 Tagen ist eine leicht erhöhte Dehnung der Prismen mit Grauwacke gegenüber den Prismen mit Quarzkies erkennbar. Diese Entwicklung setzt sich im folgenden Lagerungszeitraum beschleunigt fort, was auf eine intensiv ablaufende AKR in den Prismen mit Grauwacke schließen lässt. Gestützt wird dies durch die Entwicklungen der dynamischen E-Moduln (Bild 4). Die Änderung des dynamischen E-Moduls ist zum einen Ausdruck der Festigkeitsentwicklung infolge der Hydratation und zum anderen spiegelt sie die Entfestigung des Gefüges durch die AKR wider. Während die Hydratation in beiden Fällen innerhalb der ersten 28 Tage dominiert, führt die beginnende AKR in den Prismen mit Grauwacke anschließend zu einer Entfestigung und somit zu einer Abnahme des dynamischen E-Moduls. Mit dem starken Anstieg der Dehnungen ab dem 56. Tag geht dann eine signifikante Abnahme des dynamischen E-Moduls, sogar unter den Anfangswert, einher. Ab dem 112. Tag verlangsamt sich die Dehnungsentwicklung, was auf ein Abklingen der AKR hindeutet. Obwohl die Messungen noch nicht abgeschlossen sind, deutet sich bei

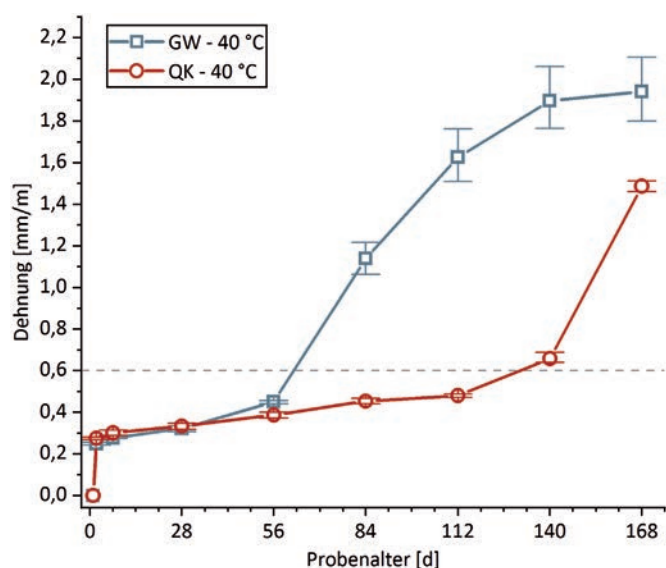


Bild 3 Dehnungsverläufe während der Nebelkammerlagerung bei 40 °C
Expansion of concrete prisms during storage in fog chamber at 40 °C

den Prismen mit Grauwacke der für alkaliempfindliche Gesteinskörnungen typische S-förmige Verlauf an [21]. Gleichzeitig mit dem Abklingen der AKR beginnt der dynamische E-Modul wieder anzusteigen. Dies ist vermutlich auf eine Verdichtung des Gefüges durch AKR-Produkte [22], auf eine ggf. stattfindende Nachhydratation oder auch auf teilweises Hineinwachsen von Ettringitkristallen in die Risse zurückzuführen [23].

Im Gegensatz zu den Prismen mit Grauwacke steigt der E-Modul der Prismen mit Quarzkies bis zum Alter von 56 Tagen weiter an und zeigt erst anschließend eine zunehmend fallende Tendenz. Zum Messtermin im Alter von 140 Tagen wird der Dehnungsgrenzwert erstmalig leicht überschritten. Anschließend steigen die Dehnungen zum nächsten Messtermin stark an. Erste Risse am Würfel zeigten sich nach 140 Tagen, wobei die Rissweiten auch nach 168 Tagen noch unter 0,2 mm lagen. Trotzdem der verwendete Quarzkies als AKR-unempfindlich gilt, ist die verwendete Charge aufgrund des vorliegenden Testergebnisses als alkaliempfindlich einzustufen. Weitere Messungen lagen zum Zeitpunkt der Einreichung dieses Beitrags noch nicht vor. Es ist nicht auszuschließen, dass auch die Rissweiten am Würfel bis zum Ende der Lagerung nach neun Monaten den Grenzwert von 0,2 mm überschreiten.

4.2 Ergebnisse des konventionellen und automatisierten 60 °C-Betonversuchs

Bild 5 zeigt die konventionell und automatisiert gemessenen Dehnungen der Prismen mit beiden Gesteinskörnungen. Für die automatisierte Dehnungsmessung wird der Referenzzeitpunkt, zu dem die Längenänderung $\Delta l = 0$ gesetzt wird, auf sechs Stunden seit dem Beginn der Lagerung festgelegt. Frühere Messungen haben gezeigt, dass Prismen und Messeinrichtung im Behälter innerhalb dieser Zeit ein thermisches Gleichgewicht bei 60 °C erreichen [18].

Schon beim ersten Messtermin nach 28 Tagen überschreiten die konventionell gemessenen Dehnungen der Prismen beider Mischungen den Grenzwert. Damit sind die Gesteinskörnungen als alkaliempfindlich zu klassifizieren. Im Folgenden steigen die Dehnungen weiter an, wobei die Dehnungsgradienten kleiner werden.

Die automatisch gemessenen Dehnungen zeigen ein ähnliches Verhalten, weisen allerdings durchgehend niedrigere Werte auf. Dennoch überschreiten auch die kontinuierlichen Dehnungen den für die konventionelle Prüfung gültigen Grenzwert. Sowohl bei der automatisierten als auch bei der manuellen Messung werden, wie in der Nebelkammerlagerung, an den Prismen mit Grauwacke größere Dehnungen gemessen als an den Prismen mit Quarzkies.

Die Dehnungsverläufe der automatischen Messung lassen genauere Rückschlüsse auf Unterschiede im Expansions-

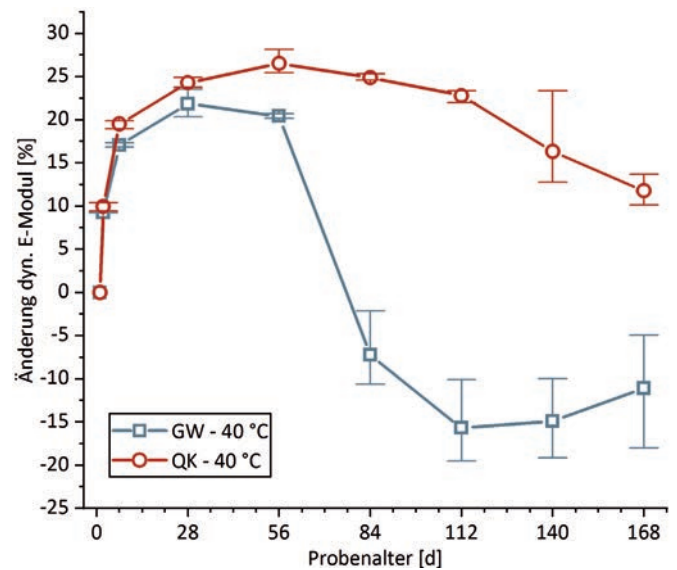


Bild 4 Entwicklung der relativen dynamischen E-Moduln während der Nebelkammerlagerung bei 40 °C
Relative change of dynamic modulus of elasticity of concrete prisms during storage in fog chamber at 40 °C

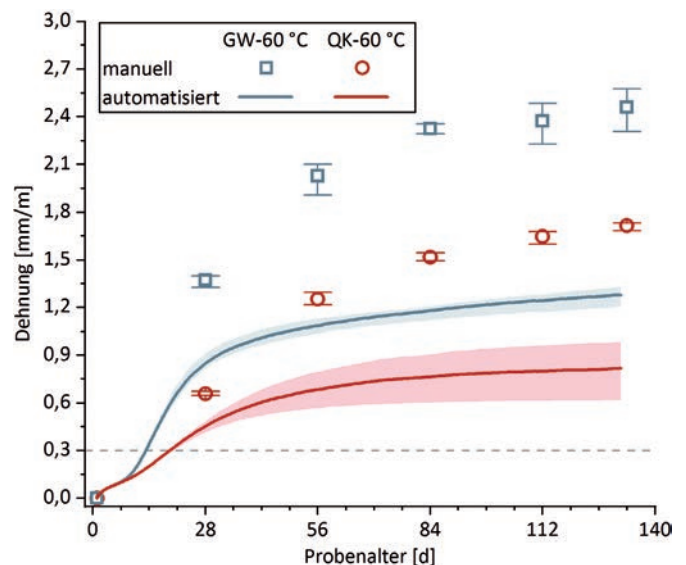


Bild 5 Automatisiert und konventionell gemessene Dehnungsverläufe im 60 °C-Betonversuch
Automated and manually measured expansion results of concrete prism test at 60 °C

verhalten zu. Beide Kurven zeigen einen S-förmigen Verlauf, wie er für alkaliempfindliche Gesteinskörnungen in der Nebelkammer typisch ist und wie er sich in Bild 3 auch für die Grauwacke andeutet. Allerdings sind die Verzögerungszeiten, d.h. die Zeiten, bis sich die automatisch gemessenen Dehnungen merklich beschleunigen, mit sieben Tagen deutlich kürzer und von Beginn an durch einen signifikanten Anstieg geprägt (Bild 5). In diesen ersten sieben Tagen der Lagerung sind die Dehnungsverläufe der Prismen beider Mischungen nahezu identisch. Die anfängliche Volumenzunahme kann auf hygri-sche Dehnung der Prismen in der Atmosphäre mit $\geq 98\%$ rel. Luftfeuchte zurückgeführt werden. Ab dem siebten Lagerungstag expandieren die Prismen mit Grauwacke stärker als jene mit Quarzkies. Das aus der Ableitung der Kurve ermittelte Maximum der Dehnrate, welches auf ei-

ne Phase ausgeprägter Reaktion mit einhergehender Rissbildung hindeutet, wird nach 15 Tagen erreicht. Bei den Prismen mit Quarzkies tritt die maximale Dehnrates erst nach 17 Tagen auf, wobei nur ca. 2/5 des Maximums der Dehnrates der Prismen mit Grauwacke erreicht werden. Nach 28 Tagen gehen die Dehnrates beider Prüfserien deutlich zurück. Daraus kann auf ein Abklingen der Reaktion geschlossen werden.

Auf die Reaktionskinetik der AKR lässt sich aus den Dehnungsverläufen nur indirekt rückschließen, da eine Vielzahl von gekoppelten Prozessen und Mechanismen (u. a. Hydratation, Transport von Alkalien und Porenlösung, hygri-sche Dehnung und Rissbildung) die Expansion der Prismen mit beeinflusst.

Ein großer Vorteil der automatischen gegenüber der konventionellen Messung liegt in der Quantität der Messdaten. Während bei der konventionellen Prüfung nach dem ersten Messtermin je Prisma ein Dehnungswert gemessen wird, liegt zu diesem Zeitpunkt der automatischen Messung bereits eine solide Messdatengrundlage mit eindeutigem Trend vor. Der vermutlich auch im konventionellen Versuch auftretende S-förmige Dehnungsverlauf ist aus den Daten infolge des großen zeitlichen Abstands zwischen den Messterminen hier nicht ersichtlich. Aufgrund der fehlenden Information über die Verzögerungszeit sind keine zuverlässigen Aussagen über die maximale Dehnrates und deren zeitliches Auftreten möglich. Außerdem liefert die automatisierte Prüfung mit Überschreitung des Grenzwerts eine fundierte Datenbasis für eine frühe Bewertung der Gesteinskörnung und erlaubt ggf. einen vorzeitigen Abbruch des Versuchs. Zudem lassen sich die Überschreitungen des Grenzwerts jederzeit feststellen, und nicht nur im monatlichen Takt.

Die manuell gemessenen Dehnungen sind, wie Bild 5 zeigt, generell höher als die kontinuierlich gemessenen Dehnungen. Dies stimmt mit bisherigen Forschungsergebnissen überein [15, 19, 21]. Eine mögliche Ursache liegt in den Abkühl- und Aufheizzyklen, welche mit den manuellen Messungen einhergehen. Durch Änderung der Umgebungstemperatur und -feuchte werden Wärme- und Stofftransport im Prisma verstärkt. Diese können direkt Lösungsgleichgewichte und den Reaktionsmechanismus beeinflussen und so zu zusätzlicher AKR-induzierter Dehnung führen. Auch können die zyklisch variierenden Temperatur- und Feuchtegradienten zusätzliche Rissbildung und verstärkte hygri-sche Dehnung zur Folge haben. Diesbezüglich durchgeführte Untersuchungen bestätigen die Erhöhung der Dehnungen durch das Herunterkühlen [15]. Hierbei wurde der Abkühlprozess während einer automatischen Messung simuliert. Es zeigte sich, dass die Dehnrates nach dem erneuten Aufheizen auf 60 °C deutlich größer war als unmittelbar vor dem Herunterkühlen. Der wahrscheinlich zusätzlich dehnungssteigernde Effekt durch das Öffnen und Entnehmen der Proben aus den Behältern für die konventionellen Messungen wurde bei der beschriebenen Untersuchung nicht nachgestellt. Der Einfluss der konventionellen Messungen auf

die Dehnungen ist daher vermutlich noch größer als mit dieser Messung gezeigt.

Die Ergebnisse der Eigenfrequenzmessungen sind in Bild 6 dargestellt. Obwohl die Dehnungsverläufe qualitativ ähnlich sind, zeigen die Entwicklungen der dynamischen E-Moduln ein sehr unterschiedliches Verhalten. Durch die gegenüber der Nebelkammerlagerung nochmalige Beschleunigung der AKR im 60 °C-Betonversuch können sich Hydratation und Entfestigung infolge AKR überlagern. Bei den Prismen mit Quarzkies dominiert innerhalb der ersten 28 Tage die Hydratation, was zu einem Anstieg des dynamischen E-Moduls führt. Im Gegensatz dazu wird bei den Prismen mit Grauwacke durch eine früh beginnende AKR bereits in diesem Zeitraum eine Abnahme des dynamischen E-Moduls gemessen. Im weiteren Verlauf steigt der dynamische E-Modul der Prismen mit Grauwacke wieder an. Dieser Anstieg ist vermutlich auf die zuvor schon beschriebenen Phänomene der Gefügeverdichtung zurückzuführen. Die, wie auch in der Nebelkammer beobachtet, später einsetzende AKR in den Prismen mit Quarzkies führt erst nach 28 Tagen zu einer Abnahme des dynamischen E-Moduls. Auch in diesem Fall steigt er im weiteren Verlauf wieder an.

Wie bereits erwähnt, kann sich die Auslaugung der Probekörper auf die Dehnung der Proben auswirken. Die vergleichende Analyse zu Versuchsende (Bild 7) zeigt, dass die Anreicherung von Alkalien in der Behälterlösung im automatischen Versuch deutlich höher ist als im konventionellen. Die Alkalien können nur durch Auslaugung aus den Proben in die Behälterlösung gelangt sein. Die kleineren Dehnungen im automatischen Versuch sind also nicht nur auf die konstanten Lagerungsbedingungen, sondern zum wahrscheinlich größeren Teil auf die stärkere Auslaugung zurückzuführen. Da das Verhältnis von Proben- zu Behältervolumen beim automatischen Mess-

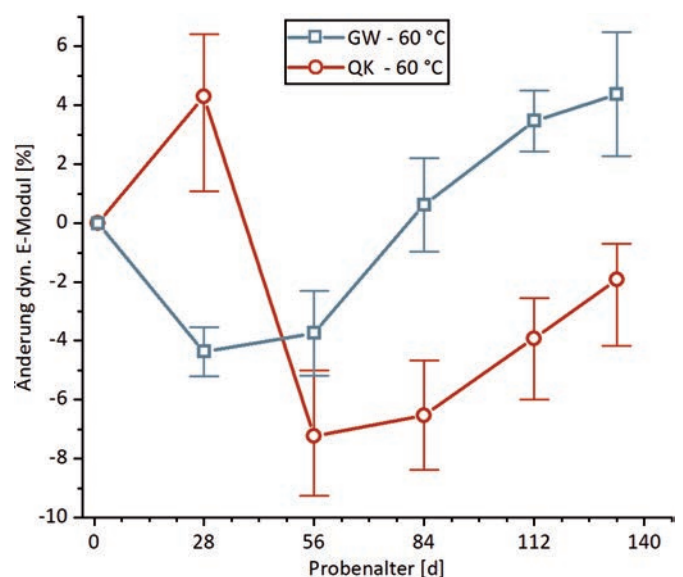


Bild 6 Entwicklung der relativen dynamischen E-Moduln während der konventionellen Prüfung im 60 °C-Betonversuch
Relative change of dynamic moduli of elasticity during conventional concrete prism testing at 60 °C

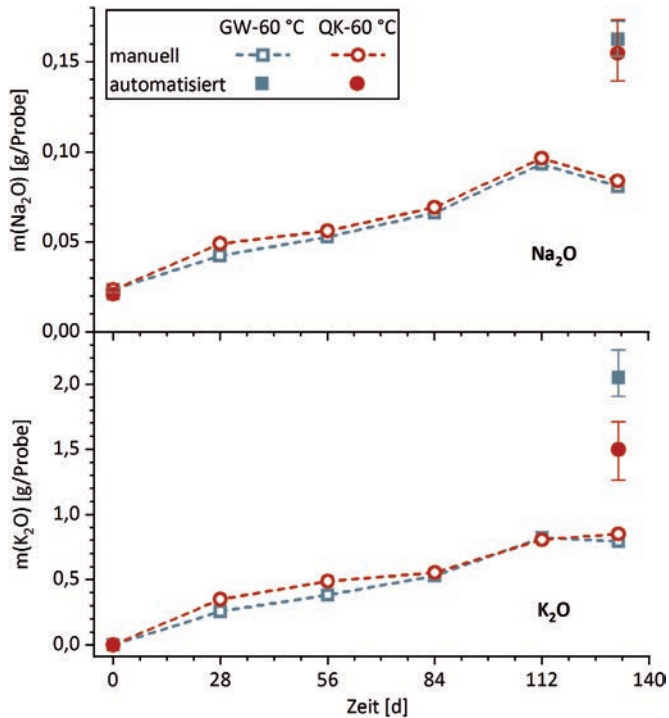


Bild 7 Masse der Alkalioxide in der Behälterlösung bezogen auf die Probeanzahl
Mass of alkali oxides in the aqueous solution in testing containers (referred to the number of prisms stored per container)

system und im konventionellen Versuch nahezu gleich ist, kann in diesen Volumenverhältnissen keine Ursache für die erhöhte Auslaugung gefunden werden. Den hauptsächlichsten Beitrag zur Auslaugung liefert vermutlich eine Besonderheit des Prototyps des Minireaktors. Konstruktionsbedingt ist die Temperatur der Behälterdeckel während der Prüfung geringfügig niedriger als im Behälterinneren. Bei der hohen Luftfeuchte im Behälter genügt dieser sehr kleine Temperaturunterschied, um Wasser am Deckel kondensieren zu lassen. Dieses tropft über der Probe ab und wäscht die Alkalien aus. Durch eine thermische Optimierung des Minireaktors kann dieses Problem behoben werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag sind erste Ergebnisse der automatisierten Messung mit einem eigens für die AKR-provozierende Lagerung im 60 °C-Betonversuch entwickelten Minireaktor vorgestellt. Die Dehnungsentwicklungen von Prismen mit zwei unterschiedlich alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen sind konsistent mit denen aus dem konventionellen 60 °C-Betonversuch. Allerdings sind die automatisch gemessenen kleiner als die manuell gemessenen Dehnungen. Die Hauptursache liegt in der im Prototyp des Minireaktors konstruktionsbedingt erhöhten Auslaugung der Proben. In dieser Hinsicht gibt es bereits Ansätze, den Minireaktor zu optimieren. Eine weitere mögliche Ursache liegt in den vermiedenen Temperaturwechseln zu den Messterminen. Daher wird es auch nach einer technischen Optimierung des Minireaktors nötig sein, einen den automatischen Messungen angepassten Grenzwert zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit zu definieren. Hierfür, und um Erfahrungen mit der Methode zu sammeln, ist nach erfolgter Optimierung in Bezug auf die Auslaugung eine Einbindung in die jährlich angebotenen Ringversuche nach Alkali-Richtlinie [11] angestrebt.

Mit der automatischen Messung ist eine zeitlich hochauflösende Untersuchung des Dehnungsverhaltens möglich. Das erlaubt ggf. eine frühzeitigere Einstufung der Gesteinskörnung als im konventionellen Versuch. Ähnlich wie für die Dehnungen ist ein Monitoring des dynamischen E-Moduls durch die Messung von Ultraschallgeschwindigkeiten implementierbar. Dies kann z. B. zur Aufklärung der Interaktion zwischen fortschreitender Hydratation und Gefügedegradation durch AKR beitragen.

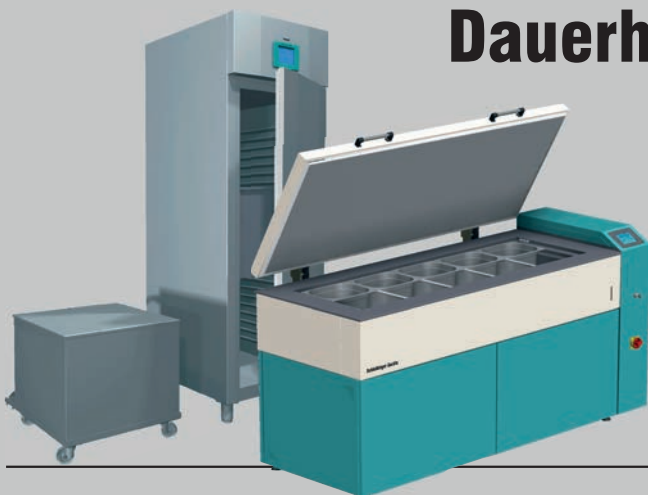
Dank

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Förderung der Entwicklung des Minireaktors im Rahmen des Programms MNPQ-Transfer.

Dauerhaftigkeit von Beton

Prüfen von Frost-Tau-Widerstandsfähigkeit und AKR:

- Slabtester
- CDF/CIF-Prüfanlage
- AKROMAT - MiniAKR-Reaktor mit Online-Monitoring



Literatur

- [1] SWAMY, R. N. (ed.): *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*, Blackie and Son Ltd, 1992.
- [2] SIMS, I.; POOLE, A.: *A worldwide view of AAR: Updating Swamy*. ICAAR, Sao Paulo, Brasilien, 2016.
- [3] STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2. aktualisierte und erw. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2013.
- [4] STARK, J.: *Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Schriftenreihe FIB Nr. 3, F.A. Finger-Inst. für Baustoffkunde Weimar, 2008.
- [5] GIEBSON, C.: *Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken und Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel*. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2013.
- [6] DRESSLER, A.: *Einfluss von Tausalz und puzzolanischen, aluminiumhaltigen Zusatzstoffen auf die Mechanismen einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton*. Dissertation, TU München, 2013.
- [7] FERNANDES, I.; DOS ANJOS RIBEIRO, M.; BROEKMANS, M. A. T. M. et al.: *Petrographic Atlas: Characterisation of Aggregates Regarding Potential Reactivity to Alkalis*. 2016.
- [8] MÜLLER, C.; BORCHERS, I.; EICKSCHEN, E.: *Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren*, Straße und Autobahn 59, 5, S. 272-281, 2008.
- [9] SIEBEL, E.; BÖHM, M.; BORCHERS, I. et al.: *AKR-Prüfverfahren-Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz*. Teile 1 und 2, Beton, Heft 56 u. 57, 2006.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Technische Prüfvorschriften für Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweise TP B-Stb-Teil 1.1.09: AKR-Potenzial und Dauerhaftigkeit von Beton (60 °C-Betonversuch mit Alkalizufuhr)*. Ausgabe 2018.
- [11] DAfStb: *Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton: (Alkali-Richtlinie)*. Aug. Oktober 2013, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [12] ASTM C 1293: *Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*. ASTM International, West Conshohocken 2018.
- [13] RILEM TC 106-AAR: *RILEM Recommended Test Method AAR-2: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – The ultra-accelerated mortar-bar test and RILEM Recommended Test Method AAR-3: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Method for aggregate combinations using concrete prisms*. Materials and Structures 33, S. 283–293, 2000.
- [14] RILEM TC 219-ACS: *RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1 – Detection of Potential Alkali-Reactivity – 60 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms*. RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures, 2015.
- [15] WALLAU, W.; PIRSKAWETZ, S.; VOLAND, K. et al.: *Continuous expansion measurement in accelerated concrete prism testing for verifying ASR-expansion models*. Materials and Structures, 51, 3, 2018.
- [16] WEISE, F.; VOLAND, K.; PIRSKAWETZ, S. et al.: *Innovative measurement techniques for characterising internal damage processes in concrete due to ASR*. ICAAR, Houston, Texas, USA, 2012.
- [17] WEISE, F.; PIRSKAWETZ, S.; MAIER, B. et al.: *Continuous strain measurement when testing the influence of the alkali-silica reaction on microstructural changes in concrete*. Patent (EP 2397848 A1), 2010.
- [18] WALLAU, W.; PIRSKAWETZ, S.; GREIM, M. et al.: *AKR-Schadensmonitoring im 60 °C-Betonversuch*. Abschlussbericht zum MNPQ-Projekt (19/14), 2017. <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A106750463X/AKR-Schadensmonitoring-im-60%C2%B0C-Betonversuch-Abschlussbericht/>.
- [19] VOLAND, K.: *Einfluss der Porosität von Beton auf den Ablauf einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, 2015.
- [20] BUNKE, N.: *Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048*. Berlin: Beuth, 1991.
- [21] LARIVE, C.: *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alkali-réaction et de ses effets mécaniques*. Dissertation, Ecole nationale des ponts et chaussées, 1997.
- [22] LINDGÅRD, J.: *Alkali-silica reaction (ASR) – Performance testing*, Dissertation, NTNU Trondheim, 2013.
- [23] ÖZKAN, H.: *Kriechen von Beton unter Einfluss einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Dissertation, Universität Stuttgart, 2018.

Autoren



Enno Krütt, M. Sc.
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Deutschland
enno.kruett@bam.de

Wilma Wallau, M. Sc.
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Deutschland
wilma.wallau@bam.de



Prof. Dr.-Ing. Birgit Meng
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Deutschland
birgit.meng@bam.de



Dipl.-Ing. Markus Greim
Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH
Gewerbstraße 4
84428 Buchbach
Deutschland
greim@schleibinger.com



Dipl.-Ing. Stephan Pirskawetz
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Deutschland
stephan.pirskawetz@bam.de