



Abschlussbericht zum MNPQ-Projekt (19/14)

AKR-Schadensmonitoring im 60 °C-Betonversuch

Wilma Wallau und Stephan Pirskawetz

in Kooperation mit

Markus Greim und Oliver Teubert

Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH

Bearbeitungszeitraum: September 2015 - August 2017

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Berlin, den 6. November 2017

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Ergebnisse | 3 |
| 2.1 | Modifikationen der Prüfspezifikationen | 3 |
| 2.2 | Innovative Prüfmethode | 6 |
| 2.3 | Messmodul | 7 |
| 2.4 | Minireaktor | 9 |
| 3 | Kontext | 10 |
| 4 | Erfolgskontrollbericht | 11 |
| 4.1 | Beitrag zu den Zielen von MNPQ | 11 |
| 4.2 | Wesentlichen Erfahrungen | 11 |
| 4.3 | Fortschreibung des Verwertungsplans | 12 |
| 4.4 | Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben | 14 |
| 4.5 | Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer | 15 |
| 4.6 | Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung | 15 |

1 Einleitung

Dauerhaftigkeit ist eine der wichtigsten Anforderungen an Beton- und Stahlbetonbauwerke. Zugleich ist die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) für ihre schädigende bis zerstörende Wirkung auf Betongefüge bekannt. Dabei reagieren amorphe oder feinkristalline Silikat-Strukturen der Gesteinskörnung mit den Alkalihydroxiden und dem Wasser der Porenlösung zu einem Alkali-Kieselsäure-Reaktionsprodukt. Dies geht mit einer Volumenzunahme einher, die Gefügeschädigungen an Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix mit sich bringt. Bei der Planung von Betonbauten, die Feuchtigkeit ausgesetzt sind, sind demnach AKR-Vermeidungsstrategien notwendig. Die sicherste Lösung ist es, ausschließlich Gesteinskörnungen zu verbauen, die nicht alkaliempfindlich sind.

Ein vergleichsweise schnelles Verfahren zur Prüfung von Gesteinskörnung auf Alkaliempfindlichkeit ist der 60 °C-Betonversuch. Drei Betonprismen (280 x 75 x 75 mm³) werden dazu in einem Edelstahlbehälter über Wasser stehend gelagert. Bei mindestens 98 % rel. Luftfeuchtigkeit und konstanter Temperatur läuft eine AKR dann beschleunigt ab. Wenn die 28-tägig ermittelte Längsdehnung der Betonprismen den Grenzwert von 0,3 mm/m nach spätestens 140 Tagen übersteigt, gilt die geprüfte Gesteinskörnung als alkaliempfindlich.

An der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) wurde ein Messsystem entwickelt und patentiert, welches die automatische In-situ-Messung der Prüfkörperdehnungen mittels induktiver Wegaufnehmer ermöglicht. So entfallen die regelmäßig vorgesehenen manuellen Messungen. Die resultierenden kontinuierlichen Dehnungsverläufe der störungsfrei eingelagerten Betonprüfkörper sind zudem wesentlich aussagekräftiger als die wenigen diskontinuierlichen Dehnungswerte einer konventionellen Messung. Durch begleitende Erfassung von Schallemissionen und der Ultraschallgeschwindigkeit lassen sich tiefergehende Aussagen über Rissbildungs- und Hydratationsvorgänge während der AKR-provozierenden Lagerung treffen.

Das Ziel dieses Projektes war es ein Messmodul zu entwickeln, welches eine kontinuierliche Dehnungsmessung leicht handhabbar umsetzt. Es sollte in die herkömmliche AKR-Prüftruhe integrierbar sein. Weiterhin sollte ein alleinstehender Apparat (Minireaktor) entwickelt werden, der die automatische Messung einer kleineren Prüfkörperzahl realisiert.

Der Projektplan sah vereinfacht die Geräteentwicklung durch die Fa. Schleibinger Geräte und den Test der Entwicklungen durch die BAM vor. Ausgehend von der technischen Lösung, die im Rahmen vorangehender Projekte an der BAM entwickelt und patentiert wurde, gingen die Bemühungen nun in Richtung verbesserter Handhabbarkeit, Robustheit, Haltbarkeit, Reproduzierbarkeit und Wirtschaftlichkeit bei gleichzeitiger Nähe zu den Vorgaben der Alkali-Richtlinie. Entsprechende Lastenhefte (für Messmodul und Minireaktor) konnten in enger Zusammenarbeit der Partner und durch Vorversuche an der BAM erstellt werden. Basierend auf Erfahrungen aus

Vorgängerprojekten an der BAM und einer Literaturrecherche speziell zur Sensorik wurde ein Versuchsplan erarbeitet. Für die Testmessungen wurden drei Gesteinskörnungen ausgewählt, die häufig (A und B) und weniger häufig (C) als alkalireaktiv klassifiziert werden. In die Messungen mit dem BAM-System wurden Testläufe mit zwei Wirbelstromsystemen verschiedener Hersteller integriert. Eines der Messsysteme erwies sich für die Anwendung im Messmodul als besser geeignet. Außerdem liefen vergleichende Messungen nach der automatischen und der konventionellen Prüfmethode, um festzustellen, inwieweit eine Umstellung der Testmethode und damit einhergehende Abweichungen von der Alkali-Richtlinie tolerierbar sind. Einflüsse weiterer Test- und Auswerteparameter auf die gemessene Dehnung wurden experimentell ermittelt.

Ergebnisse dieser Untersuchungen, dargestellt in Abschnitt 2.1, wurden gemeinsam diskutiert und flossen in die Konzeption und Weiterentwicklung der Geräte ein. Mit der Fertigstellung der Konstruktion und Fertigung dreier Messmodulprototypen begannen die Tests an der BAM. Erfahrungen aus der praktischen Nutzung flossen wiederum in die Konzeption des Minireaktors ein. Allgemein basierte die Kooperation der Projektpartner auf häufigem telefonischen und E-mail-Kontakt. Vier Projekttreffen in Buchbach, Berlin, Regensburg und Gent erleichterten zudem die Zusammenarbeit und Besprechung der Aufgaben, Neuentwicklungen, Ergebnisse und Pläne.

Im Rahmen der Kozeptionierung der Wegmessung nach dem Wirbelstrommessprinzip wurde mit zwei Firmen zusammengearbeitet. In Kooperation mit der Firma Vallen Systeme GmbH wurde die Abdichtung von Schallemissionssensoren verbessert und eine neue Sensorverkabelung auf den Markt gebracht. Außerhalb der Projektkooperation wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Avago Technologies von Broadcom Limited die Einsatzfähigkeit von Kunststofflichtwellenleitern zur Dehnungsmessung in Beton untersucht. Des weiteren ergab sich eine Kooperation mit dem BAM-Fachbereich 8.6 *Faseroptische Sensorik* zur örtlich aufgelösten Dehnungsmessung mittels einbetonierter Glasfasern in Beton.

Für Erfahrungsaustausch mit verschiedenen Akteuren war auf den Konferenzen *Concrete Under Severe Conditions - Environment and Loading* (12. - 14.09.2016 in Lecco) und *Durability of Building Materials and Components* (29. - 31.05.2017 in Gent) sowie auf einem Doktorandenkolloquium *ASR in Concrete Structures due to Simultaneous Cyclic Loading and External Supply of Alkali* (05. - 06.10.2016 in Bochum) Gelegenheit. Im Projektverlauf stellte sich speziell der Feuchtetransport in Beton als wichtiges Thema für die zukünftige Bearbeitung des Forschungsthemas Schädigung durch AKR heraus. Gespräche mit dem Fachbereich 8.2 *Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren* zeigten vielversprechende Kooperationsmöglichkeiten zum Einsatz von dort entwickelten und bereits erprobten Messmethoden zur Feuchtemessung in Beton auf. Für die Untersuchung von Feuchtetransport- und -speichermechanismen stellten sich bei

einem RILEM Kurs zu *Computational Methods for Building Physics and Construction Materials* (24. – 28.04.2017 in Darmstadt) Methoden der Simulation als vielversprechend heraus.

2 Ergebnisse

Mit der Umstellung der konventionell diskontinuierlichen AKR-Prüfung auf die automatisierte Messung sind einige Modifikationen der Prüfspezifikationen nötig. Daraus ergeben sich Fragen zur Vergleichbarkeit der neuen mit der herkömmlichen Prüfmethode. Dieses Kapitel fasst die Einflüsse der Modifikationen auf die Testergebnisse zusammen. Weiterhin wird der kombinierte Einsatz von Weg-, Schallemissions- und Ultraschallsensorik diskutiert. Anschließend werden die Entwicklungen des Messmoduls und des Minireaktors beschrieben.

2.1 Modifikationen der Prüfspezifikationen

Startzeitpunkt der automatisch gemessenen Dehnung

Zu Beginn der Lagerung ändern sich die Temperatur und Luftfeuchtigkeit in den Prüfbehältern. Die automatisch gemessene Dehnung wird daher anfänglich von der thermischen Dehnung des Messrahmens und der Probe beeinflusst. Wann sollte die Auswertung des aufgezeichneten Messsignals beginnen, um solche Störungen auszuschließen?

Die Alkali-Richtlinie sieht vor, die Messungen der Prismendehnung immer bei Referenztemperatur (20 °C) vorzunehmen, damit thermische Dehnung nicht in die Messungen eingeht. Dieses Vorgehen ist bei der automatisierten Prüfung nicht möglich, da die Dehnung kontinuierlich bei 60 °C gemessen wird. Um thermische Einflüsse auf die gemessene Dehnung dennoch ausschließen zu können, muss die Referenzmessung daher auch bei 60 °C erfolgen. Konstante Temperaturen im gesamten Auswertintervall umgehen außerdem einen möglichen Einfluss auf die Temperaturkoeffizienten der Sensoren. Zu Versuchsbeginn dehnen sich aufgrund des Temperaturanstiegs der Messrahmen und der Prüfkörper aus. Abbildung 1a zeigt exemplarisch die im Messrahmen gemessene Dehnung sowie die Temperaturen im Prüfbehälter und an verschiedenen Positionen im Inneren des Prüfkörpers. Die Erwärmung und Ausdehnung des Prüfkörpers dauert länger als die des Messrahmens. Die Prüfkörpertemperatur bestimmt damit den frühestmöglichen Beginn der Auswertung. Bei $t=6$ h ist auch im Inneren der Prismen die Lagerungstemperatur (60 ± 2 °C) erreicht. So kann eine Differenz von sechs Stunden zwischen dem Beginn der Einlagerung bzw. der Messung und dem Startzeitpunkt des Auswertintervalls vorgeschlagen werden.

Grenzwert

Verschiebt sich mit der Umstellung von manueller auf automatische Prüfung der Grenzwert der Prüfkörperdehnung, ab welchem eine Gesteinskörnung als alkalireaktiv einzustufen ist?

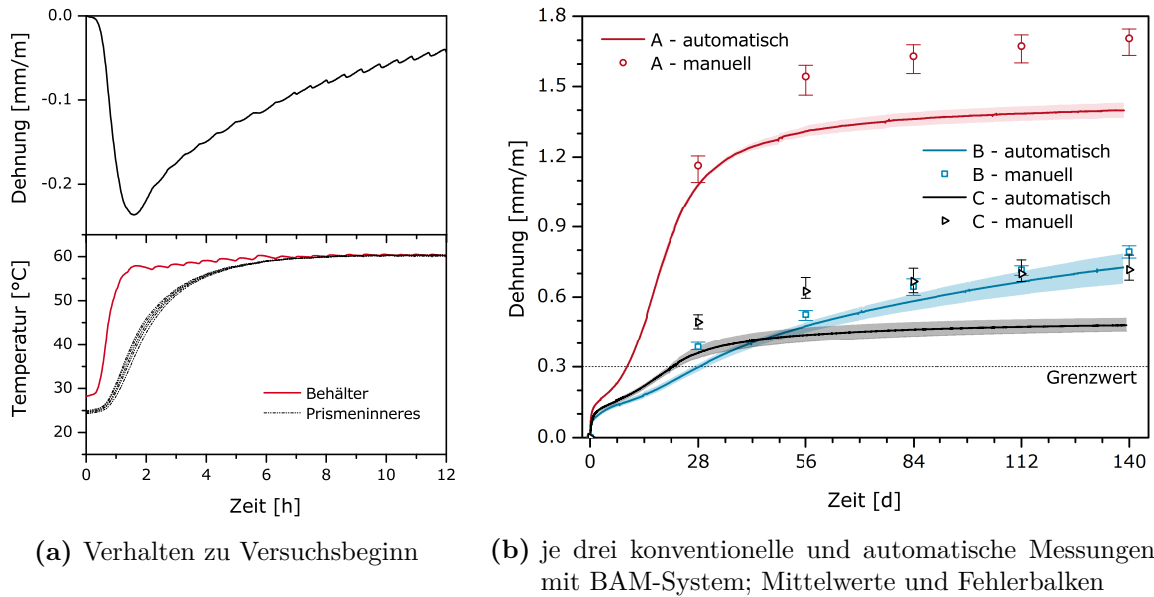


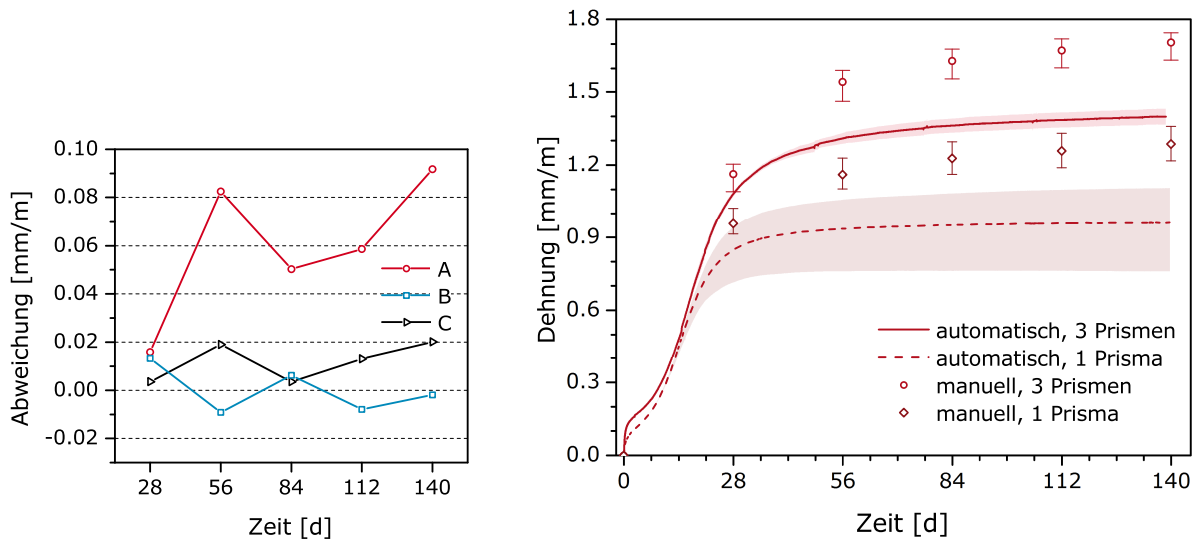
Abbildung 1: Dehnungs- und Temperaturverläufe

Abbildung 1b stellt die konventionellen (manuellen) Prüfergebnisse der drei geprüften Gesteinskörnungen (A, B und C) und die entsprechenden kontinuierlichen Dehnungsverläufe der automatischen Messungen mit dem BAM-System dar. Alle Messungen wurden parallel an drei Prismen durchgeführt, nur eine automatisierte A-Messung fiel aus. Alle drei Gesteinskörnung sind als alkalireaktiv zu klassifizieren, da sie (schon nach dem ersten Messtermin) Dehnungen oberhalb des Grenzwertes 0,3 mm/m aufweisen. Die automatisch und manuell gemessene Dehnungen zeigen vergleichbare Abweichungen von den jeweiligen Mittelwerten. Die diskontinuierlich ermittelten Dehnungen sind systematisch größer als die kontinuierlichen Messergebnisse. So würde sich eine Reduktion des regulären Grenzwertes anbieten. Da die Abweichungen zwischen den automatisch und manuell ermittelten Dehnungen je nach Gesteinskörnung und Versuchsdauer stark divergieren (bis zu $0,3 \text{ mm/m} \equiv \text{Grenzwert}$), kann hier noch keine Empfehlung gegeben werden. Andere Kriterien, wie zum Beispiel ein maximaler Dehnungsgradient, kämen als Alternative für die automatisierte Prüfung infrage. Zur Festlegung eines solchen Alternativkriteriums bzw. eines alternativen Grenzwertes sind vergleichende Messungen mit anderen AKR-Prüfverfahren und insbesondere Messungen mit nicht alkalireaktiven Gesteinskörnungen notwendig.

Drehen der Proben

Zur gleichmäßigeren Wassereexposition werden die konventionell geprüften Prismen alle 28 Tage vertikal gedreht. Dieses Vorgehen lässt sich für die automatischen Messung nur mit unverhältnismäßigem Aufwand adaptieren. Wie wirkt sich das Nicht-Drehen der Prismen auf ihre Dehnung aus?

Durch Vergleich von konventionellen Messdaten mit solchen, die manuell und ohne Drehen der Prüfkörper gewonnen wurden, wird der Einfluss des Nicht-Drehens auf die Dehnung abgeschätzt. Auf das Drehen der Proben zu verzichten, hat keinen signifikanten Einfluss auf die gemessene Dehnung, vgl. Abbildung 2a. Die Differenzen liegen in der Größenordnung der Messabweichungen. Die etwas deutlicheren Abweichungen der stärker expandierenden A-Prismen sind nicht kritisch, da die Klassifikation bei großen Dehnungswerten erleichtert ist.



(a) Dehnungsabweichung zwischen gedrehten und nicht gedrehten Prüfkörpern der Gesteinskörnungen A, B und C (b) je drei manuelle und automatische Messungen an Prismen der Gesteinskörnung A, Vergleich drei und ein Probekörper je Prüfbehälter

Abbildung 2: Abweichungen und Verläufe gemessener Dehnungen

Prüfkörperzahl

Die Alkali-Richtlinie sieht die parallele Prüfung von drei Prismen zusammen in einem Prüfbehälter vor. Solche Prüfbehälter sind schlecht handhabbar und sehr schwer. Durch den Einbau von Messrahmen und Sensorik würde die Masse der Messmodule weiter zunehmen. Nur einen Prüfkörper je Messmodul vorzusehen, wäre eine für die Prüfpraxis adäquate Lösung. Wirkt sich die Reduzierung der Prüfkörperzahl je Behälter auf die Dehnungsmessung aus?

Um den Einfluss der Prüfkörperzahl je Behälter auf das Dehnungsverhalten zu untersuchen, wurden drei A-Prismen jeweils für eine manuelle und automatische Messreihe einzeln in einem Prüfbehälter gelagert und die Ergebnisse mit den obig präsentierten, konventionell mit drei Prismen durchgeführten Prüfungen verglichen, siehe Abbildung 2b. Daraus geht hervor, dass sich einzeln gelagerte Prismen weniger stark ausdehnen als konventionell geprüfte Prismen. Um während der Prüfung AKR-provozierende Bedingungen zu schaffen, wird der Prüfzement mit Al-

kalien angereichert. Während der Lagerung gehen diese teilweise in die Behälterlösung über, was die Alkaliverfügbarkeit in den Prismen und somit deren Expansionspotenzial reduziert. Einzeln eingelagerte Prismen sind stärker von diesem sogenannten Auslaugen betroffen. In der Literatur wird meistens davon ausgegangen, dass während der Lagerung Dampf an der Prismenoberfläche kondensiert und so die lokale Alkalikonzentration herabsetzt. Dies löst einen Alkalitransport aus dem Inneren des Prismas Richtung Oberfläche aus. Das alkali-angereicherte Wasser läuft am Prisma herunter und tropft in die Behälterlösung. Beschleunigt wird dieser Auslaugvorgang durch Temperaturschwankungen und Konvektion der feuchten Luft. So spielt auch die Geometrie des Behälterinneren eine Rolle. Diese Erkenntnis ist besonders wichtig für die Konzeption von Messmodul und Minireaktor, bei der auf reproduzierbare Prüfgeometrien, Reduktion von Temperaturschwankungen und Konvektion der feuchten Luft zu achten ist.

2.2 Innovative Prüfmethode

Für das Monitoring der Schädigungsvorgänge in Betonprüfkörpern während der AKR-provozierenden Lagerung sind neben der kontinuierlich gemessenen Dehnung der Prüfkörper auch zwei weitere Signale aussagekräftig. Durch automatisierte Messung der Ultraschallgeschwindigkeit (US) und die Erfassung von Schallemissionen (SE) lassen sich die Festigkeitsentwicklung (über den dynamischen E-Modul aus der US-Messung) und Rissbildung (Häufigkeit von SE) charakterisieren. So wird ein umfassendes Bild der Schädigungs-, Expansions-, und Hydratationsvorgänge (Festigkeitsentwicklung) gewonnen. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse entsprechender Messungen an Prismen der drei Gesteinskörnungen, deren Dehnungen während der Prüfdauer den Grenzwert übersteigen. Je nach Gesteinskörnung unterscheiden sich neben den Dehnungsprofilen auch die Schallemissionsergebnisse und die Verläufe der Ultraschallgeschwindigkeit. Die geprüften A- und C-Prismen durchlaufen während der Messung drei klar unterscheidbare Phasen: **I** anfängliche Hydratation (steigende US-Geschwindigkeit), **II** Rissbildung (Abnahme der US-Geschwindigkeit, Häufung von SE, Anstieg der Dehnung) und **III** ein Abklingen des Schädigungsprozesses (Rückgang der SE-Aktivität). Bei der mit der Gesteinskörnung B durchgeführten Messserie fallen besonders das abweichende Verhalten der US-Geschwindigkeit und das Nicht-eintreten von Schallereignissen, also das Ausbleiben einer Rissbildungsphase, auf. Zwar sind aus den verschiedenen Verläufen der Dehnungskurven schon Unterschiede in den Schädigungsmechanismen erkennbar, allerdings bedeutet die begleitende Messung von SE und US-Geschwindigkeit einen deutlichen Informationsgewinn bezüglich der Hydratation und des Schädigungsverhaltens. Von einem standardmäßigen Einsatz von automatischen US- und SE-Sensoren im Messmodul wird aus Kostengründen abgesehen. Für Forschungszwecke bleibt diese innovative Prüfmethode jedoch interessant. Um für tiefere Untersuchungen Schallemissions- und Ultraschallgeschwindigkeitssensoren in das Messmodul zu integrieren, genügen kleine Adaptionen.

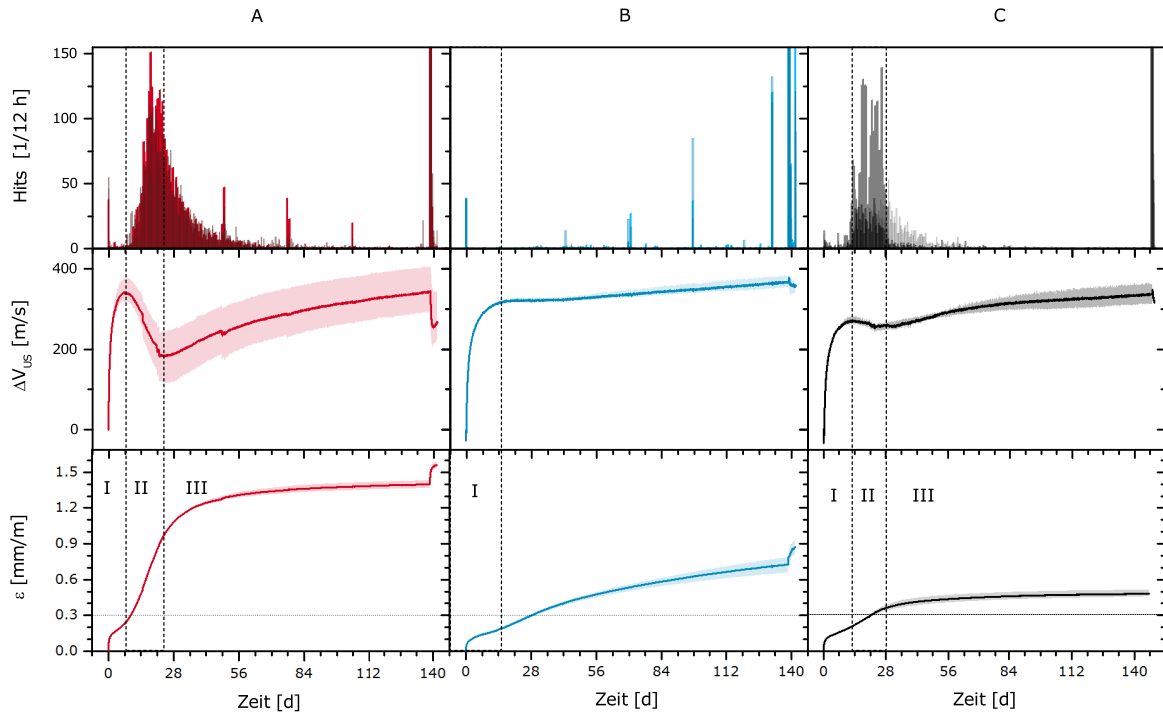


Abbildung 3: zeitliche Entwicklung der Schallemissionen, US-Geschwindigkeit und Dehnung von Prismen der Gesteinskörnungen A (links), B (Mitte) und C (rechts); Mittelwerte mit Fehlerbereichen

2.3 Messmodul

Die im Lastenheft formulierten Anforderungen an das Messmodul beziehen sich u.a. auf eine leichte Handhabe und Bedienbarkeit, die Lagerung/Fixierung und Positionierung von Prisma und Sensor, die Messgenauigkeit, den Messbereich, die Korrosionsbeständigkeit der Sensorik und des Messmoduls und auf die Robustheit und Dichtigkeit der Wegsensorik und des Sensorkabels.

Das vorhandene Messsystem an der BAM als direkte Vorlage zu nutzen, stellte sich als ungünstig heraus, da das dafür entwickelte Messsystem (induktive Wegaufnehmer) viel Raum beansprucht, eine aufwendige und vorsichtige Installation verlangt und damit für die Prüfpraxis ungeeignet ist. Es wurden daher alternative Messsysteme (Wirbelstromsensorik) getestet, die eine kompaktere Bauform des Messmoduls zulassen. Zwei Messsysteme, A und B, waren im Test. Des Messsystems A ist den Lagerungsbedingungen nicht gewachsen und genügen den Anforderungen bezüglich Verlässlichkeit, Langzeitstabilität (mit der Zeit abfallende Dehnungswerte kennzeichnen Langzeitdrift) und Messgenauigkeit (Signale sind teilweise stark von Messrauschen betroffen) nicht. Anders verhält es sich mit dem Messsystem B. Die Messgenauigkeit seiner Sensoren reicht an die der induktiven Wegaufnehmer des BAM-Messsystems heran. Für den Einbau in den Messmodulprototyp wurde daher der Sensor B ausgewählt. Um das neue Messmodul ge-

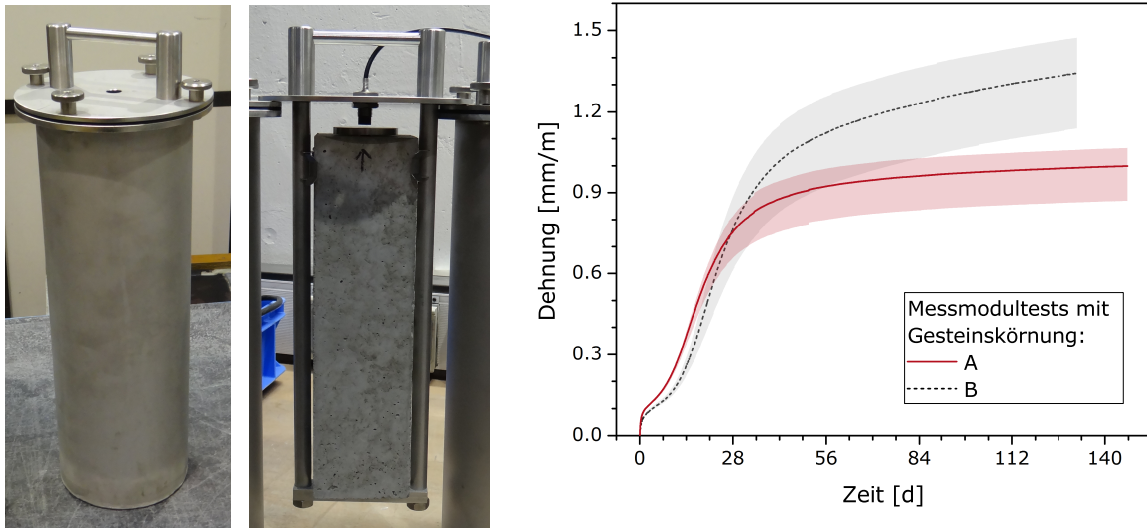


Abbildung 4: Messmodul (erste Version): Behälter, Messrahmen; Dehnungsergebnisse zweier Messmodultests im Klimaschrank (Test mit Gesteinskörnung B ist bei Projektende noch nicht abgeschlossen.)

genüber den konventionellen Prüfbehältern hinsichtlich Arbeitsschutz und Handhabbarkeit zu verbessern, wurde das Messmodul für nur ein Prisma konzipiert. Der Messmodulprototyp (siehe Abbildung 4) besteht aus einem Behälter mit einem abgedichteten und verschraubbaren Deckel. Der Messrahmen ist am Deckel fixiert. Seitlich zwischen Prüfkörper und Messrahmengestänge sind Klemmen arretiert, die den Prüfkörper senkrecht halten. In die obere Messmarke ist ein elektrisch leitfähiges, zylindrisches Sensorgegenstück mit ausreichend großem Durchmesser eingeschraubt. Ein Griff im Deckel ermöglicht die leichte Handhabung vom Messrahmen und dem gesamten Messmodul.

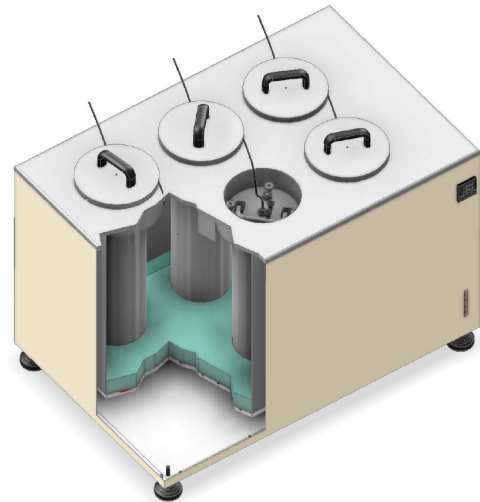
Zwei Prüftestläufe des Messmoduls liefen in konventionellen Klimaschränken bei 60 °C und, zum Schutz der Sensorelektronik vor dem Eindringen von Feuchtigkeit, in trockener Umgebungsluft, siehe Abbildung 5b. Die Dehnungsverläufe zweier Messmodultests zeigen kaum Störungen, vgl. Abbildung 4. Zwei kleine Dehnungssprünge werden auf die anfangs zu fest konzipierte Klemmvorrichtung zur Positionierung der Prismen zurückgeführt. Eine zweite Messmodulversion (Abbildung 5a) ersetzte die Klemmvorrichtung durch eine Führung von am Moduldeckel fixierten Rastbolzen in zwei Bohrungen im Sensorgegenstück, um so die Formänderung des Prüfkörpers nicht zu behindern. Weiterhin wurde die Auflage modifiziert, so dass sich die Höhe des Probekörpers bzw. die Ausgangsweglänge mit zwei Rändelscheiben einstellen lassen. Auf diese Weise ist die Prüfung von Prüfkörpern aller in der AKR-Richtlinie tolerierter Längen ermöglicht. Um die Messmodule in der herkömmlichen AKR-Prüfruhe einzusetzen, ist eine Kapselung der Sensorkabel vorzunehmen.



(a) Messmodul
(zweite Version)
für Lagerung im
herkömmlichen
AKR-Reaktor



(b) Messmodule im Klima-
schrank



(c) Messmodule im Minireaktor

Abbildung 5: Varianten der AKR-provozierenden Lagerung

2.4 Minireaktor

Der Minireaktor war als Apparat angedacht, der die Umgebung auf $60\pm 2^\circ\text{C}$ temperiert und eine ökonomische Anzahl Messmodule (drei bis neun) fassen kann. Bei der Konzeption des alleinstehenden Reaktors ergab sich die Integration der entwickelten Messmodule in einen Wärmeschrank anfangs als preiswürdige Lösung, vgl. Abbildung 5c. Für die Kabelführung durch trockene Umgebungsluft des Wärmeschranks, anstelle der gesättigten Dampfatmosfera im Reaktor, müssen die Sensorkabel nicht eigens gekapselt werden. Problematisch hingegen kann es sein, den Wärmeschrank bei laufender Prüfung zu öffnen, um Messmodule zu entnehmen oder hineinzustellen. Während die hohe Wärmekapazität der dampfgesättigten Luft im konventionellen Reaktor eine Dämpfung von starken Temperaturschwankungen bewirkt, kühlen die Messmodule viel schneller ab, wenn sie von trockener Luft umgeben sind. Wenn die Tests allerdings nicht unterbrochen werden, können die Messmodule problemlos in Klimaschränken temperiert werden. Um einen Druckausgleich zu ermöglichen, wurden kleine Öffnungen in die Behälterwandung oder Dichtung am Deckel eingebracht. Befürchtungen, dass signifikante Mengen an Behälterlösung durch die Öffnung in die trockene Umgebung transportiert werden, haben sich nicht bestätigt.

Im Prototyp des Minireaktors können sechs Messmodulbehälter temperiert werden, siehe Abbildung 5c. Aufgrund der oben beschriebenen Vorteile ist die Temperierung der Messmodule wie im herkömmlichen AKR-Reaktor mit einer Wasserdampfatmosfera realisiert. Zum Schutz des Sensorkabels ist der Bereich oberhalb des Deckels räumlich vom Reaktorinneren getrennt. Offene Fragen bestehen derzeit noch im Hinblick auf die Temperaturgradienten im Messmodulinneren und das damit verbundene Auslaugen der alkaliangereicherten Prüfkörper.

3 Kontext

Die Schäden durch AKR bleiben sowohl volkswirtschaftlich als auch Ressourcen und Klimaschutz betreffend ein Problem, welchem weltweit mit Forschungsaufwendungen begegnet wird. Die Bemühungen gehen dabei vor allem in Richtung Verständnis der Schädigungsmechanismen, Untersuchung verschiedener Einflüsse und Modellierung. Möglichkeiten der automatisierten Dehnungsmessung sind in der Vergangenheit nur von wenigen Wissenschaftlern vorangetrieben worden. Wenn doch, dann eher mit dem Ziel der Aufzeichnung verlässlicher Messdaten für Forschungszwecke als mit der Aussicht auf gesteigerte Verlässlichkeit von AKR-Prüfungen.

Während der Projektbearbeitung verfestigte sich der Eindruck einer hohen Nachfrage besonders von Forschungseinrichtungen nach technischen Umsetzungen einer kontinuierlichen Dehnungsmessung. Besonders für die Datengeneration zur Validierung von Simulationen ist von vielen auch internationalen Forschern und Prüfeinrichtungen mit Interesse zu rechnen. Sobald die Messmethode in Forschungseinrichtungen eingesetzt wird und sich etabliert, kann es gelingen, sie in die Richtlinie zu integrieren. Die Verwertbarkeit der entwickelten Geräte würde sich dann von der Forschungsanwendung hin auf die Prüfpraxis ausweiten.

Die im Projekt gewonnenen experimentellen Ergebnisse flossen bisher in wissenschaftliche Poster und ein Paper, das auf der Konferenz *Durability of Building Materials and Components* 2017 in Gent vorgestellt wurde. Vor internationalem Publikum ließen sich dort die Chancen der Technologie präsentieren. Außerdem konnten im Rahmen eines Vortrags bei dem Doktorandensymposium der DFG-Forschergruppe 1498 *Alkali-Silica-Reaction in concrete structures due to simultaneous cyclic loading and external supply of alkali* 2016 in Bochum Ergebnisse präsentiert und mit Fachpublikum diskutiert werden.

4 Erfolgskontrollbericht

4.1 Beitrag zu den Zielen von MNPQ

Die konkrete Aufgabenstellung dieses MNPQ-Vorhabens eignete sich sehr gut für eine Zusammenarbeit zwischen der BAM und der Fa. Schleibinger Geräte, die deutschlandweit alleiniger Hersteller der regulären Prüftruhen zur Durchführung des 60°C-Betonversuches ist. Die Erkenntnisse aus vergangenen Projekten und den im Rahmen des Projektes getätigten Untersuchungen konnten gut in die Konzeption der Prüfapparate einfließen. Die enge und effektive Zusammenarbeit erlaubte eine zielorientierte Projektbearbeitung.

Aufgrund zeitgleich laufender, anderer wichtiger Projekte der Fa. Schleibinger Geräte traten Verzögerung im angedachten Zeitplan auf. So konnten im Rahmen der Projektlaufzeit nicht alle Geräte getestet werden. Dennoch kann von einem erfolgreichen Technologietransfer gesprochen werden. Der jetzige Stand der Entwicklung erlaubt es die marktgerechte Aufbereitung innerhalb der nächsten zwei Jahre umzusetzen.

4.2 Wesentlichen Erfahrungen

Wie im Abschnitt 2.2 beschrieben, sind Messungen der Schallemissionen und der Ultraschalllaufzeit an AKR-Prüfkörpern sehr aufschlussreich. Das aufwendige und ausgesprochen kostenintensive Messsystem eignet sich allerdings nicht für die Anwendung im kommerziellen Messmodul, da kaum mit Interesse bei praktischen Anwendern zu rechnen ist. Es bleibt jedoch relevant, wenn es einzelnen Anwendern, speziell aus dem Forschungskontext, um die Erweiterung der Erfassungsfunktionen des Moduls zur Charakterisierung des Schadensverlaufes geht. Solche Variationen lassen sich im Bedarfsfall gesondert einrichten.

Bei der Konzeption des Messmoduls waren verschiedene Bauformen im Gespräch. Es wurde diskutiert, wie bei einem geschlossenen Behälter ein Druckausgleich während der Erwärmung und Abkühlung umgesetzt werden kann. Als einfache Lösung wurde eine schlitzförmig Öffnung in der Behälterdichtung zwischen Behälterrund und Deckel erprobt. Kleinere Öffnungen führten während eines vollständigen Prüfzeitraums nur zu einem vernachlässigbarem Verlust von Behälterlösung. Für den Druckausgleich des Messmoduls erwies sich ein kleines Loch in der Behälterwandung mit 0,5 mm Durchmesser als praktikable Lösung.

Die Wirbelstromsensoren sind besonders wegen ihrer kompakten Geometrie, einfachen Handhabung und Eignung für berührungslose Messungen ideal für die Anwendung zur automatischen Dehnungsmessung im 60 °C-Betonversuch. Allerdings traten Zweifel an der Eignung der Wirbelstromsensorik für die Messung in feuchter Umgebung auf. Da Langzeitmessungen in den

herkömmlichen Prüfbehältern und dem neuen Messmodul (5 Monate) plausible Ergebnisse lieferten, können die vorteilhaften Wirbelstromsensoren für die Prüfapparate genutzt werden.

Bei der Materialauswahl der Apparatekomponenten ist vor allem die Korrosionsgefahr zu beachten. Die hohe Luftfeuchtigkeit und alkalische Umgebung bedeuten selbst für geringfügig verschiedene Edelstähle eine erhöhte Gefahr von Kontaktkorrosion. Bei der Ausführung von Messrahmen, Halterungen, Messzapfen, Auflagerkugel, Sensorgegenstück, und anderen Teilen wird daher genauestens auf Gleichheit des Werkstoffs geachtet.

Ein in vielen Forschungsarbeiten untersuchter Einfluss auf die AKR-induzierte Dehnung ist die Größenverteilung der genutzten Gesteinskörnung (Sieblinie). Auch in diesem Projekt zeigte sich, dass ihr Einfluss auf die Dehnung beachtlich sein kann. Die Vorgaben bezüglich der Korngrößen in der Richtlinie sind an den baupraktischen Klassierungen orientiert und daher vergleichsweise grob. Da in der Praxis Unterschiede der Korngrößenverteilung zwischen Chargen der gleichen Gesteinskörnung keine Seltenheit sind, ist die Anwendbarkeit der Prüfergebnisse eines Tests auf ein gesamte Sorte Gesteinskörnung kritisch zu bewerten.

4.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Schutzrechte:

Als Ergebnis der Zusammenarbeit mit dem Projektpartner BAM entwickelte die Fa. Schleibinger Geräte den Prototyp eines AKR-Minireaktors, mit neuartigen Probenbehältern. Dieses Gerät erlaubt das kontinuierliche Schadensmonitoring von sechs Proben in einem sehr kompakten Tischgerät. Ein solches Gerät ist bis jetzt nicht auf dem Markt. Auch ähnliche Konstruktionen sind uns nicht bekannt. Die Konstruktion besitzt wesentliche innovative Alleinstellungsmerkmale. Es wird deshalb vor der Veröffentlichung des Abschlussberichtes die Anmeldung eines gegebenenfalls vorläufigen Patents oder wenigstens Gebrauchsmusters angestrebt.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten:

Die Fa. Schleibinger Geräte produziert seit 13 Jahren den sogenannten AKR-Reaktor. Dieser erlaubt die Beaufschlagung der Betonproben mit 60 °C bei 100 % Luftfeuchtigkeit. Die Messung der Schädigung erfolgt diskontinuierlich, mit den oben geschilderten Nachteilen. Dieses Gerät folgt in seinen Abmessungen und Spezifikationen den Vorgaben der ursprünglichen Französischen Norm NF P18-454 (Décembre 2004) : *Béton - Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction - Essai de performance* und den daraus abgeleiteten nationalen Richtlinien. Die Anlage kann 72 Proben aufnehmen, der Systempreis liegt bei über 30 000 €. Die Erfassung der Dehnung erfolgt offline. Zum zeitintensiven Probenhandling wird ein erfahrener Laborant benötigt.

Die Fortschreibung der entsprechenden Richtlinien, nimmt in Zukunft auch kleinere und mittlere Anbieter von Gesteinskörnung und Frischbeton in die Pflicht, ihre Produkte auf das AKR Potential zu prüfen. In diesem Markt sind im allgemeinen nur kleine Labore mit weniger qualifizierten Mitarbeitern anzutreffen. Der Wille und die Möglichkeit in kostenintensive Labortechnik zu investieren sind dort beschränkt.

Der Minireaktor trifft dort in eine Marktlücke, da mit einem geringeren Kostenrahmen, vollautomatisch Messungen durchgeführt werden können. Die Proben müssen nur einmalig vorbereitet werden. Dabei ist zusätzlich die Streuung der Messdaten geringer als mit dem bisherigen Verfahren. Der Minireaktor kann für die kontinuierliche Messung der Dehnung, für Großanwender relativ einfach hochskaliert werden.

Es ist geplant, den AKR-Minireaktor, komplett mit Sensorik, Temperaturregelung und kontinuierlicher Datenaufzeichnung (Temperaturen, Dehnung) zu einem Ziel-Preis von unter 20 000 € im Laufe des zweiten Halbjahres 2019 auf den Markt zu bringen. Im Jahr 2015 wurden in 2 050 Werken mit 14 350 Mitarbeitern 239 Mio. Tonnen Sand und Kies mit einem Marktwert von 1,5 Milliarden Euro produziert (Quelle: Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V., Bericht der Geschäftsführung, 2015/2016). Wir sehen einen realistischen Bedarf bei ca. 5 bis 10 % der Betriebe in einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren. Dies wären konservativ geschätzt ca. 10 bis 20 Geräte pro Jahr für den Deutschen Markt.

Schwer zu beurteilen ist der Bedarf innerhalb der EU, da dieser stark von der Entwicklung der Normung abhängt. Hier gibt es nach unserem Kenntnisstand noch keine Europäische Norm für den AKR-Betonversuch. Dasselbe gilt für den außereuropäischen Markt. Die Fa. Schleibinger Geräte hat einen Exportanteil von über 60 %. Es sollte sich bei vorsichtiger Prognose noch einmal die gleiche Stückzahl wie im Inland verkaufen lassen. Hier ist der Marketingvorlauf allerdings größer, im Allgemeinen liegt die Vorlaufzeit zur Marktbereitung bei mindestens zwei Jahren.

Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten:

Die Schäden durch die AKR Reaktion belaufen sich momentan allein im Autobahnbereich auf ca. 320 Millionen Euro (Quelle: ntv, 15. Juli 2017). Die kontinuierliche Messung der Dehnung der Betonproben, bei konstanter Feuchte und Temperatur liefert gegenüber der bisherigen Methode geschlossene Messkurven statt nur einige wenige Messwerte. Es ist zu erwarten, dass die Interpretation dieser Kurven, deutlich mehr Rückschlüsse auf die AKR Mechanismen erlaubt als bisher. Dies umso mehr, wenn die Verbreitung der Methode durch ein einfach einsetzbares Gerät wie den AKR-Minireaktor, eine deutlich breitere Datenbasis schaffen wird. Um zukünftige Schäden zu minimieren, und gleichzeitig lokale Gesteinskörnungen verwenden zu können, was wirtschaftlich und ökonomisch ist, müssen trennscharfe Grenzwerte verwendet werden. Die neue Methode wird die Definition dieser Parameter wesentlich voranbringen.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit:

Während des Projektes wurden neben der Dehnung der Proben, verschiedene andere zerstörungsfreie Prüferfahren erfolgreich erprobt. Diese fanden aus Zeit- und Kostengründen, noch keinen Eingang in die Geräteentwicklung. Das Design des AKR-Minireaktors wurde allerdings so konzipiert, dass relativ leicht weitere Messverfahren integriert werden können. Es ist anzustreben, z.B. die Schallemissionsanalyse zusätzlich zu validieren und in die Gerätetechnik einzubinden.

Ähnliche Fragestellungen wie bei der wissenschaftlichen Untersuchung von AKR ergeben sich bei anderen treibenden Reaktionen in Betonen wie schädigender Ettringitbildung. Das entwickelte Gerät kann für solche verwandte Forschungsanwendungen ebenso attraktiv sein.

Bereits erfolgte Verwendung:

Der erste und bisherig einzige Prototyp des AKR-Minireaktors steht beim Projektpartner BAM und kann dort für weitere Untersuchungen eingesetzt werden.

4.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Im Projektverlauf wurde die Einsatzfähigkeit alternativer Methoden zur Dehnungsmessung geprüft. Dazu wurden faseroptische Sensoren in Betonprobekörper einbetoniert und diese im Biegezugversuch beansprucht. Die eingesetzten Kunststofflichtwellenleiter sind für die Dehnungsmessung im vorliegenden Messbereich nicht sensitiv genug. Zwar lässt sich die Dehnung mit Glasfasern (Optical Backscatter Reflectometry) hervorragend messen, allerdings ist die aufwendige Handhabung nicht praxistauglich und die erforderliche Messeinrichtung liegt nicht im finanziellen Rahmen. Auch wurde der Einsatz eingebetteter Sensoren (Vibrating Wire Strain Gages) erwogen. Diese haben jedoch relativ hohe Stückpreise und sind zudem nicht wiederholt einsetzbar. Auch ist die Handhabung der Sensoren bei der Betonage eine zusätzliche Störgröße. Eine solche Lösung würde größere Abweichungen von der Alkali-Richtlinie bedeuten.

Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, hat sich das Wirbelstrommesssystem A für diesen Anwendungsfall nicht bewährt. Gründe dafür sind das Auftreten von Messrauschen und Langzeitdriften des Signals und deren Beeinträchtigung der Messqualität.

Versuche, im Laufe des Projektes eine automatisierte Messung der Prismenmasse umzusetzen, schlugen fehl. Die eingesetzten Kraftmessdosen sind nicht ausreichend sensitiv und die Messungen waren zu stark verrauscht. Für die Prüfpraxis ist eine automatische Messung der Prismenmasse nicht notwendig, da die Richtlinie die Masse nicht als kritische Messgröße sondern für die Kontrolle des Prüfergebnisses vorsieht. Für die Kontrolle der Messung kann vor und nach der Prüfung weiterhin eine manuelle Messung der Masse vorgenommen werden. Dennoch bleibt eine in-situ Messung der Prismenmasse für Forschungsanwendungen eine attraktive Funktion.

4.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Idee eines Anwendertreffens zum Thema AKR wurde entwickelt. So könnte ein Raum entstehen, der den Austausch und die Diskussion über praktische Fragen des Vorgehens bei einer Prüfung ermöglicht. Probleme wären so beim Design der neuen Prüfapparaturen präsent und ließen sich gegebenenfalls beheben. Weiter ist ein Netzwerk für die Durchführung eines Ringversuches und die Gestaltung einer neuen AKR-Richtlinie hinsichtlich automatischer Dehnungsmessung wichtig.

4.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Ausgaben konnten auf die Höhe der Projektmittel beschränkt bleiben. Wie oben erwähnt, kam es bei der Konstruktion und Fertigung von Messmodul und Minireaktor zu Verzögerungen. Erkenntnisse aus den ersten Versuchen mit dem neuen Messmodul konnten jedoch direkt in die Konzeption des Reaktors einfließen. Auf diese Weise konnten Messmodul und Minireaktor vor Ende des Projektes fertiggestellt werden.