

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15977 N
Bewilligungszeitraum: 01.02.2009 – 31.07.2011
Forschungsthema: **Auswirkungen der Alkalizufuhr durch Taumittel auf Bindemittel für Beton mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen**

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann im Beton unter ungünstigen Randbedingungen wie hohe Feuchte- und Alkaligehalte bzw. pH-Werte zu Schädigungen führen. Hierbei werden aus Gesteinskörnungen lösliche Kieselsäureanteile zu einem quellfähigen Gel umgesetzt, das eine Dehnung des Bauteils und Rissbildungen verursachen kann. Neben den Alkalien, die im Beton durch die Ausgangsstoffe enthaltenen sind, können Alkalien auch von außen, z. B. durch Taumittel oder Meerwasser, zugeführt werden.

Die Diskussion, ob die Zufuhr von Alkalien bei der Beaufschlagung von Betonflächen mit Taumitteln zu einem erhöhten Risiko einer schädigenden AKR führt, wird seit mehr als 30 Jahren geführt. Die Forschung ist sich einig, dass es sich bei den möglichen Einflüssen um sehr komplexe Wechselwirkungen vom Eindringverhalten der Lösungen über die chemisch-mineralogischen Auswirkungen auf die Hydratphasen des Bindemittels bis zum Auslösen oder Verstärken der eigentlichen AKR an der Gesteinskörnung handelt. Hierbei spielen Faktoren wie z. B. die Zementart, eingesetzte Zusatzstoffe, die verwendete Gesteinskörnung, Art und Konzentration des Taumittels, Feuchte, Temperatur und Carbonatisierung eine Rolle. Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten, auch aus dem Haus des Antragstellers, hat sich den einzelnen Einflussgrößen gewidmet, ohne zu einer abschließenden und allgemein akzeptierten Quantifizierung des Einflusses der Taumittelbeaufschlagung zu kommen. In der internationalen Literatur reichen die Beurteilungen von der Zurückweisung jeglichen Einflusses über differenziertere Betrachtungen verschiedener Zement- und Gesteinskörnungsarten bis hin zur Feststellung, dass Taumittelbeaufschlagung jeden Beton mit einer potentiell reaktiven Gesteinskörnung unabhängig von den sonstigen Parametern zerstört. Die Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliwirkung in Beton (Alkali-Richtlinie)“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton berücksichtigt den potentiellen Einfluss einer Alkalizufuhr von außen durch die Definition einer separaten Feuchtigkeitsklasse (WA). Hierbei ist die Verwendung einer dichten Gesteinskörnung der Empfindlichkeitsklasse EIII bei entsprechender Auswahl von Zementart und -gehalt nur über ein Gutachten auf Basis von Performance-Prüfungen zugelassen. Die dennoch vorhandene Unsicherheit über das Ausmaß des Einflusses einer Alkalizufuhr von außen führt bei den Entscheidungsträgern entsprechender Bauvorhaben zur Formulierung von teilweise überzogenen Anforderungen, die z. T. darüber die Betonbauweise unwirtschaftlich erscheinen lässt.

Zur Bewertung von Gesteinskörnungen oder ganzer Betonmischungen (Performance-Verfahren) auch unter Alkalizufuhr von außen mussten spezielle Prüfverfahren entwickelt werden. Mörtel und Betone werden unter Tausalzbeaufschlagung geprüft und die Ergebnisse mit den Erfahrungen aus Auslagerungsversuchen und aus der Praxis verglichen. Auch wenn mit den derzeitigen Prüfverfahren bereits eine Grundlage für die Bewertung von Gesteinskörnungen und Betonmischungen geschaffen wurde, ist ein intensiverer Vergleich der chemischen und physikalischen Effekte im Labor- bzw. Bauwerksbeton die Voraussetzung für eine differenziertere Bewertung hinsichtlich einer schädigenden AKR, insbesondere auch für projektbezogene Betonrezepturen.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel dieses Vorhabens war zum einen, an geschädigten und ungeschädigten Bauwerksbetonen die Verteilung der Alkalien, ihre Bindungsform, sowie die Anwesenheit von Reaktionsprodukten zu ermitteln. Neben chemischen Untersuchungsmethoden wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) zur quantitativen Bestimmung der Verteilung der Ionen mit hoher örtlicher Auflösung die „Laser Induced Breakdown Spectroscopy“ (LIBS) eingesetzt. In Laborversuchen sollte geklärt werden, ob und unter welchen Randbedingungen dieser in Bauwerksbetonen vorgefundene Zustand in entsprechend dotierten Zementsteinen AKR-relevante Reaktionen hervorruft und mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen zu AKR-Schäden (Dehnungen und Rissbildungen) führt. Neben Erkenntnissen für leistungsbezogene Betonentwürfe werden Aussagen zur Relevanz von Prüfverfahren zum AKR-Widerstand eines Betons oder einer Gesteinskörnung unter Taumittelbelastung gewonnen.

Zunächst erfolgte eine detaillierte chemisch-mineralogische Untersuchung von Straßenbetonen, die einer langfristigen Taumittelbeanspruchung ausgesetzt waren. Hierzu wurden Bohrkern aus Straßendeckenbetonen herangezogen, die Betriebsphasen von bis zu 20 Jahren und entsprechende Taumittelbelastungen aufwiesen. An diesen Proben wurden tiefenabhängig die Konzentrationen, Verteilungsmuster und Bindungsformen der Alkalien sowie der Anionen Chlorid, Sulfat und Hydroxid ermittelt. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf Mineralphasen gelegt, die eine taumittelbedingte Umwandlung von Hydratationsprodukten belegen und dadurch zu einer Veränderung, z. B. des pH-Wertes in der Porenlösung des Zementsteins geführt haben können. Im Vergleich dazu wurden Probekörper vergleichbarer Betone, die gängigen Prüfverfahren unter Taumittelbelastung ausgesetzt waren, tiefenabhängig auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung untersucht. Ziel dieser Versuchsreihe war es zu ermitteln, ob die realen Bauwerksverhältnisse durch die heutigen (Schnell)Prüfverfahren abgedeckt werden.

Mit der Zielsetzung, alternativ zur klassischen nasschemischen Analytik eine effizientere chemische Untersuchung von Betonproben zu ermöglichen, wurden Vergleichsproben mit der neuartigen Methode der „Laser Induced Breakdown Spectroscopy“ (LIBS) analysiert und das Messverfahren auf die Erfordernisse der Baustoffuntersuchungen angepasst.

Im zweiten Schritt wurden die am Bauwerk vorgefundenen Alkaligehalte, ermittelt in diskreten Tiefenlagen des Betons, in kleinformatigen, vorhydratisierten Probekörpern nachgestellt. Dies erfolgte zunächst an Zementsteinproben, um Reaktionen des Taumittels mit den hydratisierten Bindemittelphasen ohne Überlagerung durch möglicherweise zeitgleich auftretende Reaktionen mit Gesteinskörnungen untersuchen zu können. Diese Probekörper wurden unterschiedlichen Lagerungstemperaturen und -feuchten ausgesetzt. Es wurde beobachtet, ob und wie sich die dotierten Tausalzgehalte auf die Zusammensetzung der Porenlösung und der Mineralphasen auswirkten. Die Ergebnisse ermöglichen einerseits Rückschlüsse, ob eindringende Taumittel die Gefahr einer schädigenden AKR im Beton erhöhen können. Andererseits sind auch Rückschlüsse auf die Effektivität der heute angewendeten (Schnell)Prüfverfahren möglich.

Im dritten Arbeitsschritt wurden Mörtelprüfkörper, die mit unterschiedlich reaktiven Gesteinskörnungen hergestellt wurden, mit realitätsnahen Taumittelgehalten durchtränkt und verschiedenen Lagerungsarten unterzogen. Zeitabhängig wurde die Dehnungsreaktion beobachtet.

3 Ergebnisse

3.1 Bohrkernuntersuchungen

Die Bohrkernuntersuchungen dienten für eine Bestandsaufnahme, in welchem Umfang Taumittellösungen in der Betriebsphase in einen Straßenbeton eingedrungen sind und welche mineralogischen Veränderungen durch die Reaktion der Taumittellösung mit dem Zementstein des Betons hervorgerufen wurden. Die Ergebnisse lieferten die Grundlage für die labor-technischen Untersuchungen an Zementsteinen (Arbeitsschritt 2).

Die Bohrkernproben wurden aus den Fahrstreifen von verschiedenen Bundesautobahnen entnommen. Zum Zeitpunkt der Probenahme wiesen die Betone ein Alter von 10 bis 20 Jahren auf. Es wurden sowohl Plattenmitten als auch Fugenbereiche beprobt, wobei gerissene und ungerissene Betonproben gewonnen wurden. Teilproben der Betone wurden der BAM für LIBS-Untersuchungen übergeben. An dem übrigen Probenmaterial wurden tiefenabhängig chemische und mineralogische Untersuchungen durchgeführt.

In Übereinstimmung mit Literaturdaten zeigte sich im ungerissenen Beton eine Eindringtiefe für Chlorid von maximal 50 mm. Natrium drang lediglich 20 bis 30 mm tief ein, während Kalium an der Betonoberfläche zum Teil ausgewaschen war. Diese Ergebnisse der chemischen Analysen wurden durch die LIBS-Messungen bestätigt (Vergleich der Bilder 1 und 2).

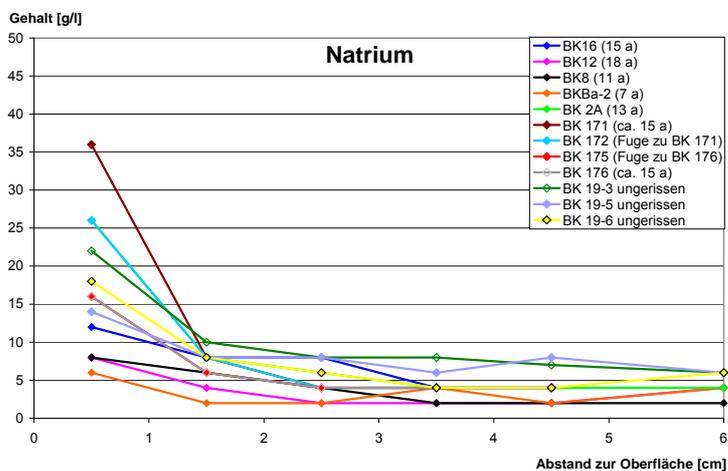
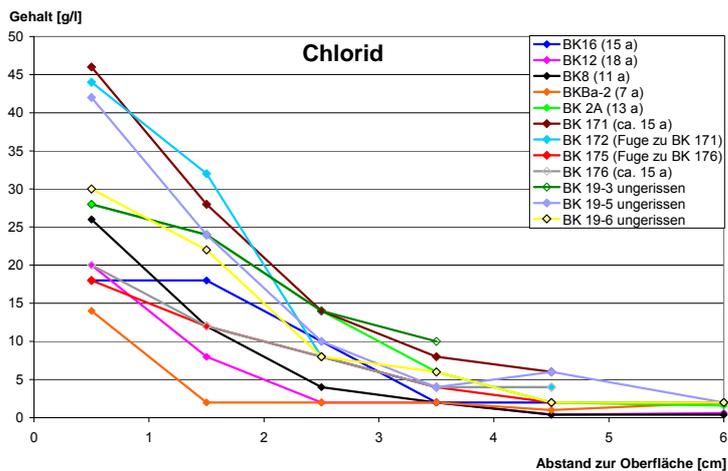


Bild 1

Berechnete Ionenkonzentrationen der „Porenlösungen“ in den Betonbohrkernen, ermittelt aus den wasserlöslichen Ionengehalten und einem rechnerischen Ansatz zum Porenlösungsvolumen

oben: Chlorid

unten: Natrium

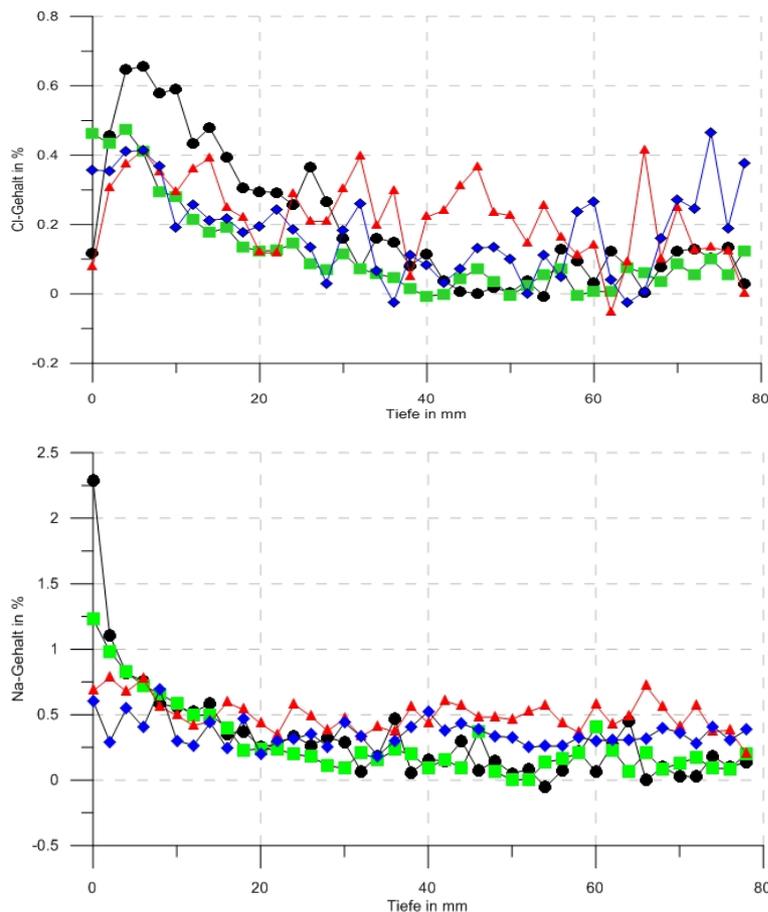


Bild 2

Eindringprofile von Na- und Cl-Ionen, mittels „LIBS“ an den Bohrkernen 171 (schwarz), 172 (grün), 175 (rot) und 176 (blau) ermittelt

oben: Chlorid

unten: Natrium

Während ein Teil des eingedrungenen Chlorids in Hydratphasen wie Friedel'schem Salz gebunden war, verblieb Natrium überwiegend in der Porenlösung. Aus den wasserlöslichen Ionengehalten und einem rechnerischen Ansatz zum Volumen der Porenlösung im Beton ließen sich Salzkonzentrationen von bis zu 5 M.-% NaCl in der Porenlösung der Betone ableiten, wobei in der äußersten Betonrandschicht teilweise auch höhere Gehalte auftraten. In gerissenen Betonen und im unmittelbaren Fugenbereich fand die Taumittellösung auch Zutritt zu tiefer liegenden Betonbereichen (Bild 3). Die LIBS-Messungen belegten aber, dass die Tausalze von der Fugensohle aus nur noch wenig tiefer in den Beton vordrangen. Es waren auch keine Anreicherungseffekte zu beobachten. Die direkte Beobachtung von kleinräumigen, an die Risse oder Fugen gebundenen Veränderungen in den Ionengehalten durch die LIBS-Messungen lieferten keine eindeutigen Ergebnisse. Auch bei Rissen konnten keine nennenswerten Einträge in den umgebenden Beton verzeichnet werden.

Die mineralogischen Untersuchungen an den Straßendeckenbetonen wurden durch die Dominanz der silikatischen und quarzischen Gesteinskörnungen erschwert (Bild 4). Selbst bei hochauflösender XRD ließen sich nur begrenzt Aussagen zu Mineralneubildungen treffen. In guter Übereinstimmung zu lichtmikroskopischen Untersuchungen an Dünnschliffen wurde die carbonatisierte Randzone mit einer Tiefe von wenigen Millimetern abgebildet. In den durch Taumittel belasteten Betonabschnitten bildeten sich chloridhaltige Hydratphasen, ähnlich dem Friedel'schen Salz. Auswirkungen dieser Umbildungen auf AKR-relevante Parameter, wie z. B. den pH-Wert, ließen sich analytisch nicht nachvollziehen.

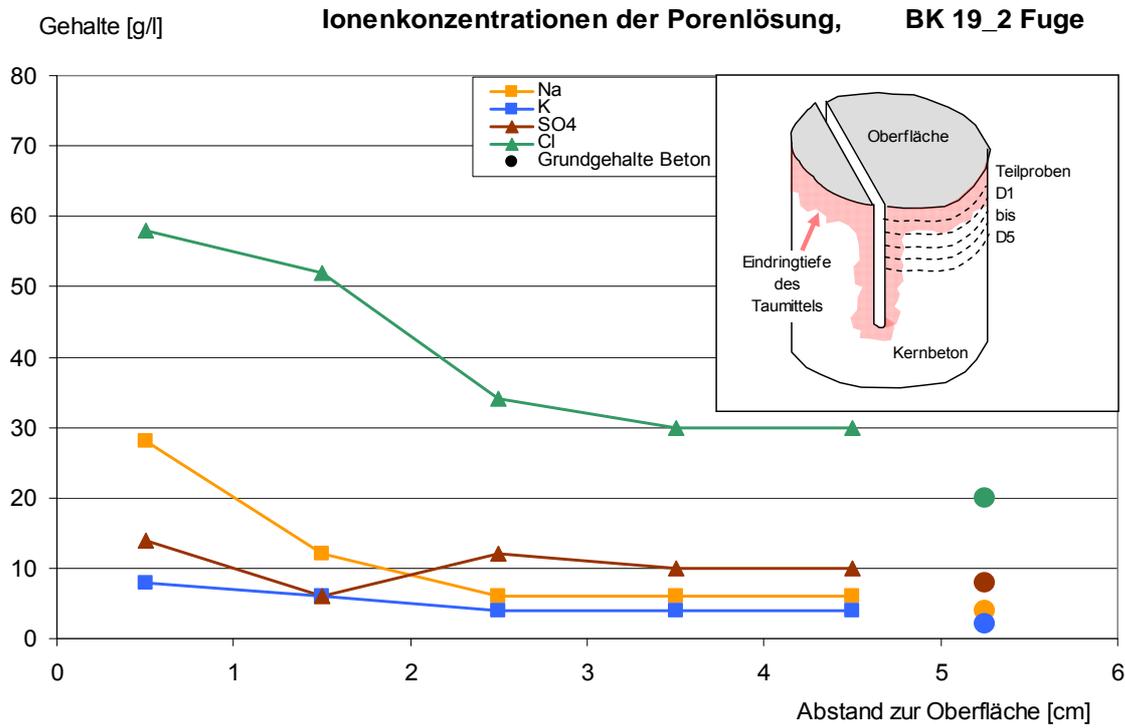


Bild 3 Berechnete Ionenkonzentrationen der „Porenlösungen“ im unmittelbaren Kontakt zur Fuge mit skizzierter Eindringtiefe des Taumittels im Bohrkern 19_2

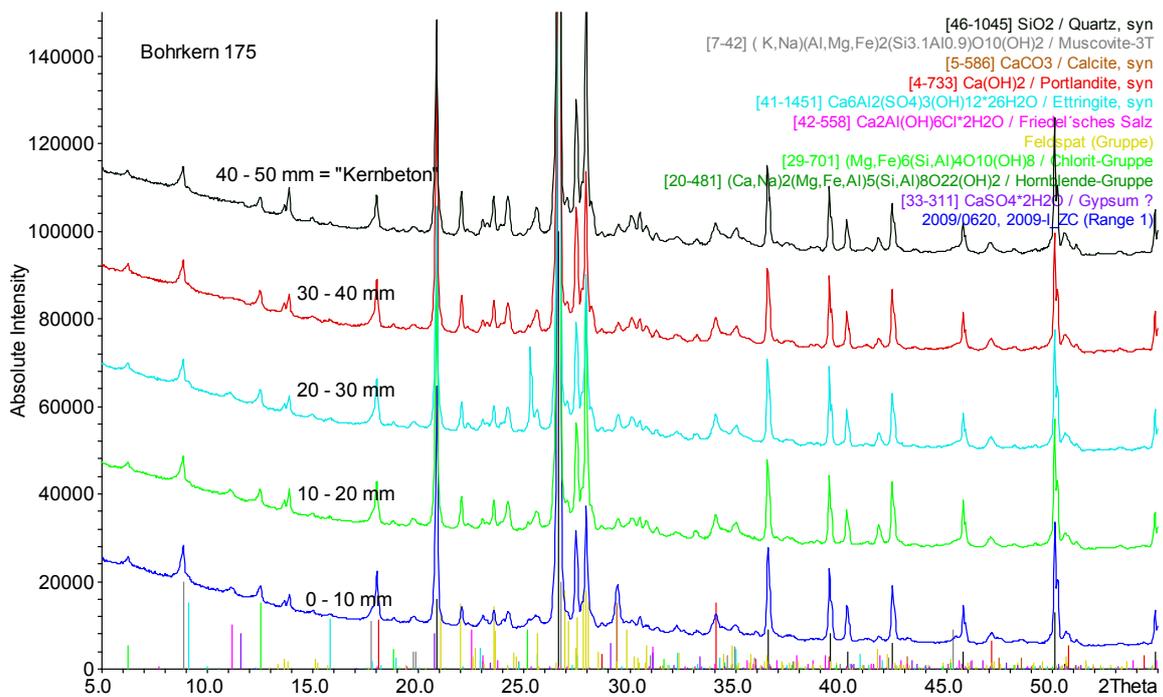


Bild 4 Röntgendiffraktogramme der Betonproben aus BK 175 (Gesamtaufnahme 5 bis 55° 2θ) mit Zuordnung der Reflexlagen der Mineralphasen

Geht man beim Betonstraßenbau von einer Ausführungsstärke des Straßendeckenbetons von etwa 25 bis 30 cm aus, wird auch durch langjährige Taumittelbeaufschlagung nur ein vergleichsweise geringes Volumen von den Lösungen erreicht. Lediglich im Bereich von Rissen und unvollständig abgedichteten Trennfugen erreichen die Lösungen etwas größere Tiefen, finden dort aber ebenfalls nur eine begrenzte, kleinräumige Verteilung. Demnach sind die Riss- und Fugenkanten an der Betonoberfläche die am stärksten durch die Taumittel beeinflussten Bereiche des Straßendeckenbetons.

3.2 Betonuntersuchung an Laborprüfkörpern

Zur Bewertung der bautechnischen Eignung von Betonmischungen im Hinblick auf potentielle Schädigungen durch AKR werden verschiedene Laborprüfverfahren eingesetzt. Dabei werden Prüfkörper der Betone zyklischen Befeuchtungen mit Taumittelösungen und Lagerungen bei unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt, um eine zeitraffende Simulation der möglichen Belastung im Bauwerk zu erreichen. Die Bewertung der Betonrezeptur erfolgt über die Messung des Dehnungsverhaltens dieser Prüfkörper.

Im Wesentlichen haben sich in Deutschland zwei Prüfverfahren etabliert, die in gutachtlichen Betonbewertungen zur AKR angewendet werden. Dies ist die Betonprüfung in einer Klimasimulationskammer nach dem Entwurf des Finger-Institutes der Bauhaus-Universität Weimar, sowie die 60 °C-Betonversuche mit Taumittelzufuhr nach dem Entwurf des Vereins Deutscher Zementwerke (im weiteren Bericht mit den Bezeichnungen „FIB“ und „VDZ“).

Aus beiden Prüfverfahren wurde jeweils ein Prüfkörper nach Abschluss der Untersuchungen herangezogen und chemisch-mineralogisch untersucht. Ziel des Arbeitsschrittes war der Abgleich der in den Prüfkörpern und in den Bauwerksbetonen auftretenden chemischen und mineralogischen Bedingungen, die im Hinblick auf eine mögliche AKR Relevanz haben können. Hiermit sollten die Belastungsmechanismen verglichen werden und eventuelle Prüfartefakte aus den verschärften Prüfbedingungen erkannt werden.

Die Bilder 5 und 6 stellen anhand der wasserlöslichen Chlorid- und Natriumgehalte (bezogen auf den ermittelten Zementgehalt) den Vergleich der Taumittelbeaufschlagung auf die unterschiedlichen Probengruppen dar. In Bezug auf den Chloridgehalt stellten sich in den Laborprüfkörpern Werte ein, die bis zu doppelt so hoch waren wie in der Oberfläche des chloridreichsten Straßenbetons. Auch beim Vergleich tiefer liegender Probenbereiche waren die Chloridgehalte der Laborprüfkörper immer deutlich höher als bei den Straßenbetonproben. Beim Natrium verstärkte sich dieser Effekt aufgrund des unterschiedlichen Eindringverhaltens noch. Somit ist die Taumittelbelastung bei den Laborprüfkörpern im Vergleich zur baupraktischen Situation ausreichend hoch. Eine Überhöhung der beeinflussenden Faktoren ist in den als „beschleunigte“ Verfahren konzipierten Prüfungen durchaus beabsichtigt. Inwiefern sich durch die überhöhten Gehalte eventuell Prüfartefakte einstellen, soll in den nachfolgenden Zementstein- und Mörtelversuchen mit hohen Taumitteldosierungen überprüft werden.

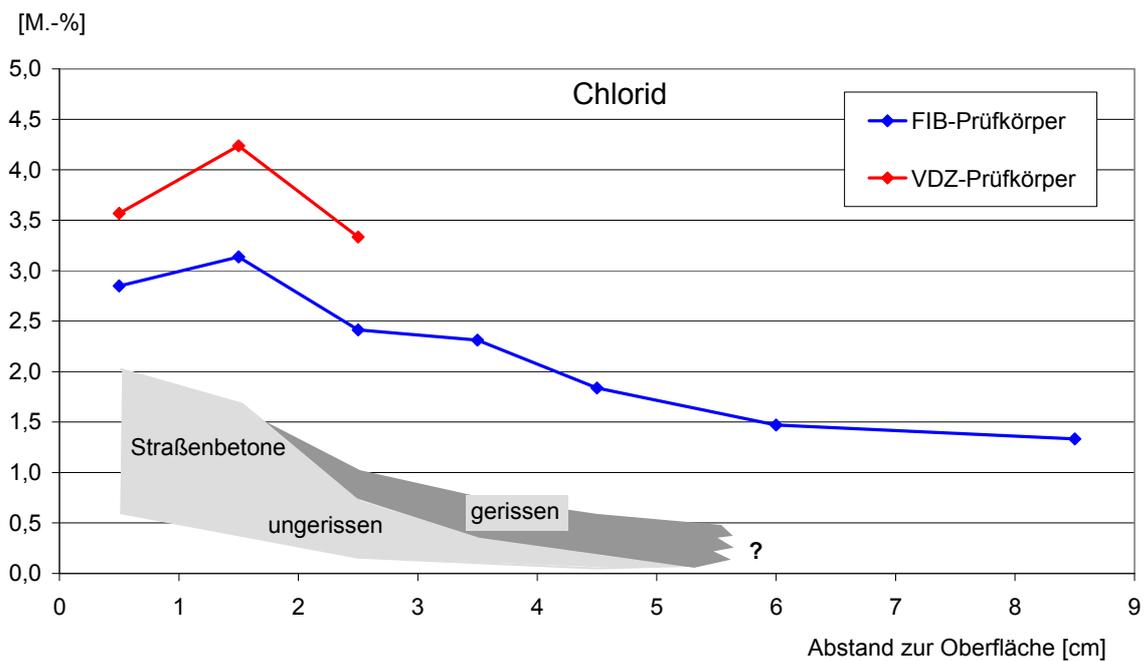


Bild 5 Vergleich der wasserlöslichen Chloridgehalte in den Laborprüfkörpern und den Straßenbetonen (M.-%, bezogen auf den ermittelten Zementanteil)

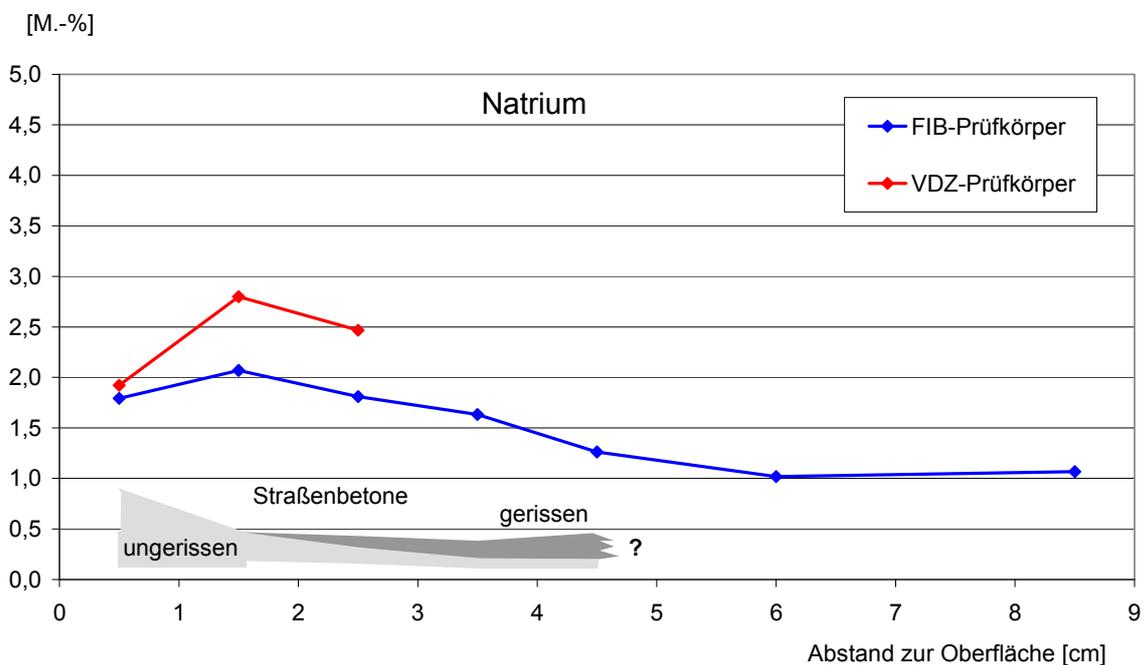


Bild 6 Vergleich der wasserlöslichen Natriumgehalte in den Laborprüfkörpern und den Straßenbetonen (M.-%, bezogen auf den ermittelten Zementanteil)

3.3 Zementsteinuntersuchungen

Ziel der Zementsteinuntersuchungen war der Nachweis von chemisch-mineralogischen Reaktionen zwischen einer Taumittelösung (NaCl) und den Mineralphasen des hydratisierten Zementsteins. Diese Reaktionen können in Abhängigkeit von der Konzentration an Taumittel und den Lagerungsbedingungen die chemische Zusammensetzung der Porenlösung im Zementstein verändern. Die Auswahl der Zemente für die Zementsteinuntersuchungen orientierte sich sowohl an baupraktischen als auch an chemisch-mineralogischen Gesichtspunkten. Sie umfasst Straßendeckenzemente (CEM I, CEM II/B-S) sowie CEM I mit unterschiedlichen Alkali- und Aluminatgehalten. Vorhydratisierte Zementsteine der Proben wurden mit den aus den Bohrkernuntersuchungen abgeleiteten Taumittelgehalten dotiert, verschiedenen Lagerungsarten (Variation Temperatur und Umgebungsfeuchte) ausgesetzt und anschließend chemisch-mineralogisch untersucht.

Durch die fortschreitende Hydratation der Zementsteine stieg der Anteil an gebundenem Wasser. Parallel dazu war eine geringfügige Carbonatisierung zu beobachten. Bei der Salzbeaufschlagung wurde in Abhängigkeit der Salzkonzentration und der Lagerungstemperatur Chlorid in die Hydratationsprodukte eingebaut bzw. physikalisch so fest angelagert, dass keine Auswaschung bei neuerlicher Wasserbeanspruchung erfolgte. Eine zusätzliche, zwischenzeitliche Bindung von Natrium aus der Salzlösung erfolgte erst bei sehr hohen Beaufschlagungskonzentrationen und bei der Warmlagerung. Bei fortdauernder Beaufschlagung fand eine weitgehende Freisetzung des Natriums statt. Kalium wurde kontinuierlich bis auf Spurengehalte ausgelaugt.

Die mineralogischen Untersuchungen an den Zementsteinen lieferten die erwarteten Zusammenhänge zwischen Klinkerphasenbestand und Mineralogie der hydratisierten Proben (Bild 7). So richtete sich der Portlanditgehalt nach dem Klinkeranteil des Zementes. Bei C_4AF -reichen HS-Zementen fanden sich nach den vergleichsweise kurzen Beobachtungszeiten noch deutliche Anteile an unreaktiertem Aluminatferrit (Brownmillerit).

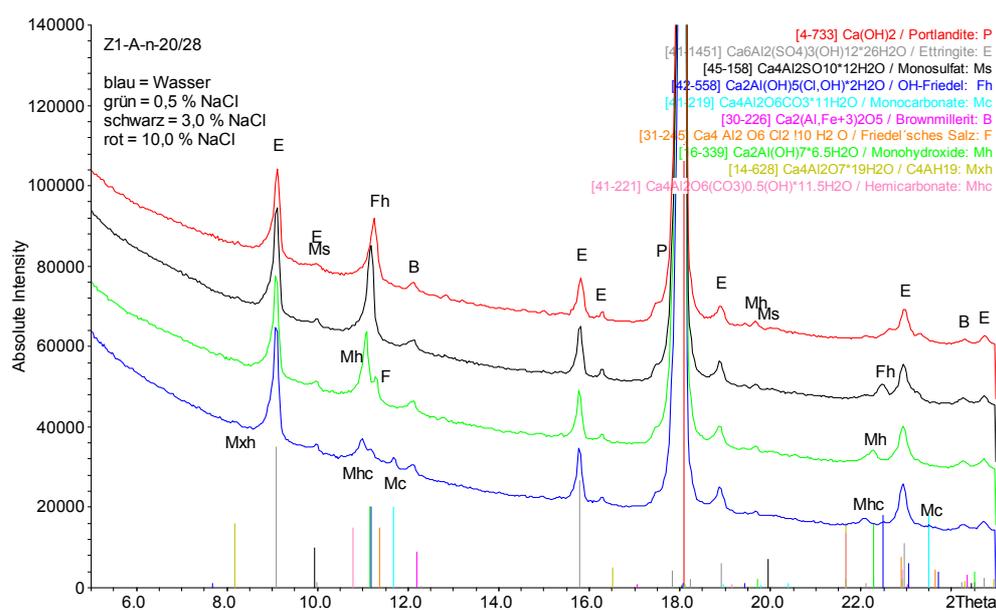


Bild 7 Phasenidentifizierung an den Röntgendiffraktogrammen der Zementsteine mit einem CEM I, Lagerung für 28 Tage bei 20 °C mit verschiedenen Prüflösungen

Im Hinblick auf eine mögliche AKR-Relevanz war in Hydratationsprodukten die Austauschreaktion von Chlorid- gegen Hydroxidionen von besonderem Interesse, weil diese eine Erhöhung des pH-Wertes in der Porenlösung hervorrufen können. Es waren verschiedene chloridhaltige Phasen nachweisbar, deren Auftreten in erster Linie von den Lagerungsbedingungen und nachrangig von der verwendeten Zementsorte abhängig war. Bei der geringeren Beaufschlagungskonzentration von 0,5 M.-% NaCl fanden sich in der Regel zwei differenzierbare Phasen: zum einen ein hydroxidhaltiges Friedelsches Salz mit bei höheren Temperaturen zunehmenden Anteilen der rhomboedrischen Kristallmodifikation, zum anderen ein Hydroxidaluminat, dessen Gitterparameter auf den Einbau geringer Chloridgehalte hindeutete. Bei der höheren Salzbeaufschlagung bildete sich hingegen meistens eine chloridhaltige Mischphase aus, deren Gitterparameter auf einen höheren Chloridanteil schließen ließ. Auch hier fand bei höherer Lagerungstemperatur oder bei sehr hohen Salzkonzentrationen eine Verschiebung in Richtung der rhomboedrischen Modifikation statt.

Die Bildung aller Chlorid-Hydroxid-Mischphasen aus Calciumaluminathydraten hat zur Freisetzung von zusätzlichen OH⁻-Ionen geführt und eine Erhöhung des pH-Wertes bewirkt. Die Untersuchungen an den Beaufschlagungslösungen zeigten unabhängig von der Lagerungsart mit steigender Salzfracht tatsächlich erhöhte pH-Werte, die einer Verdoppelung bis Verdreifachung der OH⁻-Konzentration in der „Porenlösung“ entsprachen. Dieser Effekt war bei etwa 3 M.-% NaCl in der Beaufschlagungslösung am stärksten ausgeprägt. Ob diese Veränderungen allerdings signifikante Auswirkungen auf eine AKR haben können, wurde in den Mörtelversuchen (siehe Kapitel 3.4) untersucht. Bei der Warmlagerung der Proben, die unter anderem die Bedingungen der Performance-Prüfverfahren abbilden soll, traten durchweg niedrigere pH-Werte als bei den übrigen Lagerungsformen auf. Der Grund dafür dürfte die beginnende thermische Instabilität von Ettringit sein, wodurch sich infolge gelöster SO₄-Ionen veränderte Löslichkeitsbedingungen für die OH⁻-Ionen ergaben. Dieselbe Ursache war auch für die etwas reduzierten pH-Werte der Porenlösungen aus den mit 10 %iger Salzlösung beaufschlagten Proben anzunehmen, da auch hier verstärkte Lösungserscheinungen beim Ettringit zu verzeichnen waren.

Die beschriebenen Reaktionen und Phasenumwandlungen fanden sich in vergleichbarer Form bei allen untersuchten Zementen. Die ausgewählten unterschiedlichen Alkaligehalte der Zemente beeinflussten das Grundniveau der pH-Werte geringfügig. Da die wesentlichen mineralogischen Reaktionen und Bindungen an den Calciumaluminathydraten erfolgten, stellte sich in erster Linie der C₃A-Gehalt der Zemente als bestimmender Faktor dar. Bild 8 zeigt die durch die Salzlagerung bedingte Zunahme der Hydroxid-Konzentration in der Porenlösung in Abhängigkeit vom C₃A-Gehalte der Zemente dar. Demnach wiesen die HS-Zemente die geringsten und die aluminatreicheren Zemente die stärksten Auswirkungen der Salzlagerung auf den pH-Wert auf.

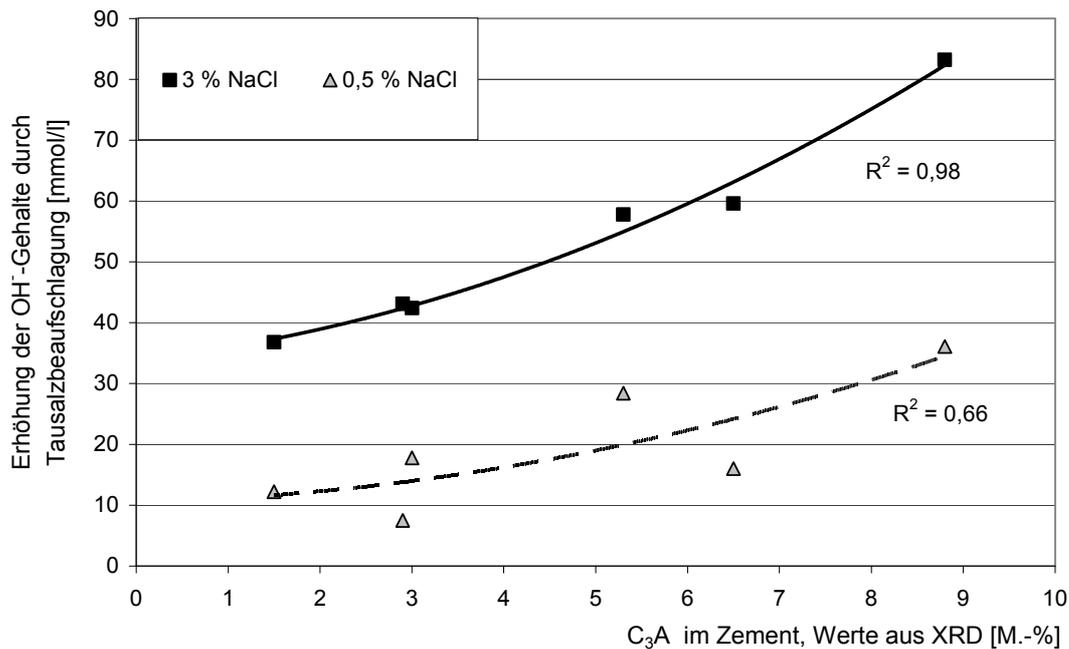


Bild 8 Zunahme der Hydroxid-Konzentration bei Lagerung in 0,5 % bzw. 3,0 %-NaCl-Lösung in Abhängigkeit vom C₃A-Gehalt der Zemente

3.4 Mörteluntersuchungen

Ziel der Dehnungsmessungen an den mit Tausalz beaufschlagten Mörtelprüfkörpern war es, systematische Zusammenhänge zwischen Zementart, Taumittelbelastung und Lagerungsbedingungen im Hinblick auf eine potentiell schädigende AKR zu erarbeiten.

Im Verlauf des Forschungsvorhabens konnte für die Mörteluntersuchungen eine Lagerungszeit von fast einem Jahr realisiert werden (Bild 9). In diesem Zeitraum traten bei den meisten der Mörtel nur geringe Dehnungen auf. Unabhängig von der Mörtelzusammensetzung ist vor allem die notwendigerweise gewählte Prüfkörpergeometrie (Flachprismen) hierfür verantwortlich. Außerdem waren durch Überlagerung der Dehnungen mit autogenem Schwinden und Trocknungsschwinden Schwankungen in den Prüfwerten zu verzeichnen. In Summe der Einflüsse waren daher häufig keine kontinuierlichen Dehnungskurven zu ermitteln, so dass nicht immer stichhaltige Differenzierungen der Kurven möglich waren. Dennoch lassen sich aus den erkennbaren Trends einige Rückschlüsse ziehen.

Die Beaufschlagung mit NaCl-Lösung bewirkte im Vergleich zur Tränkung mit Wasser in jedem Fall eine stärkere Dehnung aller Mörtel mit reaktivem Grauwackebrechsand. Dieser Effekt trat in Abhängigkeit von der Konzentration der Beaufschlagung und der Lagerungsbedingungen unterschiedlich stark auf. Bei der Konzentration der Tausalzlösung erwies sich bei Lagerung unter Raumtemperatur ein Gehalt von 3 M.-% NaCl als pessimal, was in guter Übereinstimmung mit Literaturwerten steht. Eine Lösungskonzentration von 0,5 M.-% zeigte keine erkennbaren Einflüsse.

Die Lagerungsbedingungen wirkten sich ebenfalls deutlich aus. Den geringsten Einfluss zeigte die Lagerung bei 40 °C, während 20 °C als auch 60 °C zu höheren Dehnungsbeträ-

gen führten. Bei den Einflüssen auf die chemische Zusammensetzung der Porenlösung war die 60 °C-Lagerung aufgrund resultierender niedrigerer pH-Werte (Sulfat-/ Hydroxid-Gleichgewichte) aufgefallen. Offensichtlich führte das aber nicht zu einer Abschwächung der AKR im System Mörtel oder Beton.

Anders als bei den chemischen Untersuchungen zeigten die Mörteluntersuchungen keine systematischen Einflüsse aus dem verwendeten Zement, und zwar weder im Bezug auf das Alkaliäquivalent noch auf die mineralogische Zusammensetzung.

Die Dehnungsmessungen an den verschiedenen gelagerten Mörtelprismen werden über das Ende des Forschungsvorhabens hinaus fortgesetzt.

4 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Ein erstes Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, an geschädigten und ungeschädigten Straßenbetonen den Einfluss von Taumitteln in der Baupraxis zu ermitteln. Im VDZ wurden hierzu Bohrkern von Straßenbetonen, die Nutzungsphasen von bis zu 20 Jahren ausgesetzt waren, die Verteilung der Alkalien, ihre Bindungsform sowie die vorhandenen Reaktionsprodukte untersucht. Im ungerissenen Beton wurden vergleichsweise geringe Eindringtiefen für Chlor (bis zu 5 cm) und Natrium (bis zu 3 cm) nachgewiesen. Im unmittelbaren Rissbereich oder an unvollständig abgedichteten Fugen zeigten sich die erhöhten Konzentrationen kleinräumig auch in tieferen Betonbereichen, ohne dass es dort zu Anreicherungen gekommen war. Ein Teil des Chlorids wurde in aluminatischen Hydratationsprodukten eingebunden, ein Teil verblieb ebenso wie das Natrium in der Porenlösung des Betons. In Kombination mit rechnerischen Ansätzen wurden die Salzgehalte in der Porenlösung des jeweiligen Betons auf rd. 0,5 bis rd. 3 M.-% NaCl abgeschätzt.

Zur quantitativen Bestimmung der Verteilung der Alkalien mit hoher örtlicher Auflösung und unter Berücksichtigung der Heterogenität des Betons wurde von der BAM die „Laser Induced Breakdown Spectroscopy“ (LIBS) eingesetzt. Durch Optimierung des Messaufbaus (Variation des Lasers und des Spektrometers, Verkleinerung des Fokusbereichs, Konstruktion des Messkopfes, Automatisierung der Messung und Verfeinerung der Auswerterroutinen, Kalibrierung an Referenzproben) wurde sowohl der wissenschaftliche Nutzen als auch die Effizienz der Messmethode gesteigert. Die an den Bohrkernproben des Forschungsvorhabens gewonnenen Ergebnisse decken sich weitgehend mit den konventionell chemisch bestimmten Daten. Vereinzelt ließen sich auch charakteristische Ergebnisse mit einer höheren Ortsauflösung gewinnen.

Ergänzende Untersuchungen an Laborprüfkörpern aus Belastungsprüfungen mit Tausalzbeaufschlagung, lieferten vergleichbare Erkenntnisse. Es wurde nachgewiesen, dass die Prüfbedingungen der entsprechenden Verfahren einerseits zu ausreichend hohen Salzbelastungen in den Prüfkörpern führen, andererseits aber keine unrealistisch überhöhten Konzentrationen auftreten, die zu Prüfartefakten führen könnten. Auch an den Laborprüfkörpern konnte durch die Vermessung mittels der LIBS-Methode ein detailliertes Verteilungsmuster der Salzbelastung ermittelt werden.

Ein weiteres Ziel des Vorhabens bestand in der Klärung der Frage, ob und unter welchen Randbedingungen die in Straßenbetonen vorgefundenen Tausalzgehalte und -verteilungen in entsprechend dotierten Probekörpern AKR-relevante Eigenschaftsänderungen hervorrufen können. Hierzu wurden zunächst hydratisierte Proben verschiedener Zemente mit unterschiedlich konzentrierten Salzlösungen beaufschlagt und unter verschiedenen Temperatur- und Feuchtebedingungen gelagert. Die sich einstellenden AKR-relevanten Auswirkungen auf die Zementsteine und deren Porenlösung korrelierten nicht mit dem primären Alkaligehalt der Zemente, sondern allenfalls mit deren Gehalt an Calciumaluminat.

Im letzten Schritt des Forschungsvorhabens erfolgten Dehnungsmessungen an Mörtelproben, die mit diesen Zementen und definiert reaktiven Gesteinskörnungen hergestellt und dann mit Tausalz beaufschlagt wurden. Generell wurden durch die Einwirkung des Salzes höhere Dehnungen im Mörtel hervorgerufen, wenn eine reaktive Gesteinskörnung verwendet wurde. Eine Korrelation der Dehnungswerte mit dem primären Alkaligehalt der Zemente oder ihrer Klinkerphasenzusammensetzung war hierbei aber nicht zu erkennen. Die maximalen Dehnungen wurden mit den Prüfparametern erreicht, die auch in den Performance-Prüfungen an Betonen angewendet werden. Somit liegen diese Prüfverfahren für die Bewertung potentiell schädlicher Alkalireaktionen im Beton auf der sicheren Seite.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

Das IGF-Vorhaben 15977 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages