

Der Einfluss von puzzolanischen Zusatzstoffen vulkanischen Ursprungs auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton

vorgelegt von

Dipl. Erdw. Philip Gregor Bürgisser
aus Basel (CH)

zur Erlangung der Doktorwürde (Dr. rer. nat.)
am Fachbereich für Geologische Wissenschaften
der Freien Universität Berlin

- 1. Gutachter:** Univ.-Prof. Mag. Dr. R. Abart
Departement für Lithosphärenforschung, Universität Wien
- 2. Gutachter:** Prof. u. Dir. Dr. B. Meng
BAM Bundesanstalt für Materialforschung
und –prüfung, Berlin

Tag der Disputation: 21.1.2011

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen eines von der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) geförderten Doktorandenprogramms in der Fachgruppe VII.1 für Baustoffe in Kooperation mit dem Fachbereich für Geologische Wissenschaften der Freien Universität von Berlin.

Herrn Univ.–Prof. Mag. Dr. Rainer Abart möchte ich für die Übernahme des Referats danken. Einen großen Dank gilt Frau Prof. u. Dir. Dr. Birgit Meng für die intensive fachliche Betreuung und die intensiven fachlichen Gespräche. Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Dr. Urs Müller aussprechen, der es in unzähligen konstruktiven und fachlichen Gesprächen verstanden hat, mein Fortkommen zu entwickeln. Herrn Univ.-Prof. Mag. Dr. Rainer Abart möchte ich ebenfalls für die fachlichen Gespräche danken und dass er mir die Möglichkeit gab an der Elektronenstrahlmikrosonde des Fachbereichs für Geologische Wissenschaften der Freien Universität von Berlin arbeiten zu dürfen. Besonderen Dank gilt daher auch Herrn Dr. Ralf Milke, der mich in unzähligen Stunden in Geheimnisse der Elektronenstrahlmikrosonde einweihte und mir immer wieder helfend zur Seite stand.

Ein großer Dank gilt auch den Herrn Dr. Gerd Nolte und Dr. Sascha Dieter der Fachgruppe V.1, die mir Möglichkeit gab meine Proben an dem Rasterelektronenmikroskop zu untersuchen, vor allem möchte ich mich bei Herrn Romeo Saliwan-Neumann bedanken, der mit mir geduldig unzählige Proben untersuchte.

Zum großen Dank verpflichtet fühle ich mich auch gegenüber meinen Kolleginnen und Kollegen der Fachgruppe VII.1, die durch geduldige, teils sehr intensive Gespräche und tatkräftige Mitarbeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Nennen möchte ich an dieser Stelle.

Herrn Dipl.-Geol. André Gardej, Herrn Dipl.-Geow. Martin Riedl, Herrn Dipl.-Ing. Christian Lehmann, Frau Dipl.-Ing. Bärbel Maier, Herrn Fred Grassmel, Frau Dipl.-Ing. Constanze Förster, Herrn Dipl.-Ing. Frank Haamkens, Herrn Dr.-Ing. Patrik Fontana, Frau Dr.-Ing. Aude Chabrelie, Frau Claudia Hagemeister, Herrn Matthias Lindemann, Frau Dipl.-Ing. Elgin Rother, Frau Dipl.-Ing. Katja Voland, Herrn Mirko Hallmann, Herrn Peter Benkendorf, Herrn Dirk Wend.

Zum Schluss möchte ich meinen Eltern danken, die immer an mich geglaubt haben und mich dabei unterstützten diesen Weg zu gehen. Ich danke auch Sabina für den nötigen Rückhalt, die moralische Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Diese Arbeit ist meinem Vater gewidmet

Wer sich zu wichtig für kleine Arbeiten hält, ist oft zu klein für wichtige Arbeiten

(Jaques Tati)

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit untersuchte, welchen Einfluss der natürliche puzzolanische Zusatzstoff Trass auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) im Beton hat. Von industriellen puzzolanischen Zusatzstoffen wie Flugasche und Hüttensand ist aus verschiedenen Studien bekannt, dass sie eine AKR-hemmende Wirkung besitzen. Puzzolanische Zusatzstoffe haben einen Einfluss auf den Chemismus der C-S-H-Phasen. So besitzt Flugasche die Fähigkeit Aluminium in die C-S-H-Phasen einzubauen. Somit kommt es zu einer Erhöhung des Al/Ca-Verhältnisses der C-S-H-Phasen. Diese führt zu einer Erhöhung der Alkalisorption durch die C-S-H-Phasen. Als Folge davon werden der Porenlösung Alkalien entzogen. Dieser Effekt erzeugt zusammen mit dem Verbrauch von Ca-Hydroxid durch die puzzolanische Reaktion eine Erniedrigung des pH-Werts der Porenlösung. Somit sinkt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer AKR im Beton.

Über den Einfluss von Trass auf die AKR existierten bisher sehr wenige Erkenntnisse. In Deutschland sind von älteren Wasserbauwerken, die mit trasszementhaltigem Beton errichtet wurden, AKR bedingte Schäden bekannt. Trass ist ein pyroklastisches Auswurfmaterial von Vulkanen und besteht aus einem Gemisch von Gesteinsbruchstücken, Tonmineralien, vulkanischen Gläsern und Zeolithen, d.h. die einzelnen Trassbestandteile können teilweise wie die Flugasche reaktives Aluminium in Form von Al_2O_3 besitzen. Daher wurde der Frage nachgegangen, ob Trass wie die Flugasche in der Lage ist das Al/Ca-Verhältnis der C-S-H-Phasen zu erhöhen und ob dies zu einer Erhöhung der Alkalisorption führen kann. Im weiteren wurde das Alkali-Auslaugungsverhalten nach der ASTM C311 Norm untersucht, da es nicht wünschenswert ist, dass es durch den Zusatzstoff Trass zu einer zusätzlichen Auslaugung von Alkalien kommt. Um dies zu ergründen wurden unter anderem Mörtel- und Betonserien in Anlehnung an Teil 3 der Alkalirichtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) hergestellt und bei 40°C und 100% r.F. während 360 Tagen ausgelagert. Der Chemismus der C-S-H-Phasen wurde mittels REM-EDX und Mikrosondenmessungen bestimmt. Um auf den Schädigungsgrad einer eventuell ablaufenden AKR schliessen zu können, wurden die Längenänderungen über die 360 Tage der Mörtel- und Betonserien gemessen und Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und polierten Anschliffen durchgeführt.

Die mikrochemischen Untersuchungen über die 360 Tage Auslagerungszeit der C-S-H-Phasen zeigten, dass es bei den trasshaltigen Mörtelserien zu einer Erhöhung des Al/Ca-Verhältnisses der C-S-H-Phasen gegenüber der Portlandzementmörtelserie kam. Die Messungen der trasshaltigen Serien ergaben, dass der Al-Einbau in die C-S-H-Phasen erst verzögert einsetzt. Dies deutet auf eine langsame puzzolanische Reaktion des Trasses hin. Es erwies sich, dass bei der Verwendung von Trass die Gesamtalkalienkonzentration des Zementsteins erhöht wurde. Die Mikrogefügeuntersuchungen an den trasshaltigen Mörtelserien ergaben, dass ab einem Auslagerungsalter von 180 Tagen erste typische durch die AKR bedingte Schädigungen in Form von Rissen in den reaktiven Gesteinskörnungen und AKR Gelbildung erkennbar waren. Im weiteren zeigten die Gefügeuntersuchungen, dass die vulkanischen Gläser des Trasses reagierten und sich teilweise vollständig auflösten und damit den Alkaliengehalt der C-S-H-Phasen und der Porenlösung erhöhten. Die Auslaugungsversuche nach ASTM C311 ergaben, dass die Trasse unterschiedlich hohe Alkaligehalte besitzen und ein ebenso unterschiedliches Auslaugungsverhalten zeigen. Dieses manifestiert sich teils in den höheren Dehnungsraten der Mörtel- und Betonserien. Die Ergebnisse zeigten, dass Trasse als Zusatzstoffe mit höherem Anteil an mobilisierbaren Alkalien nicht generell eine AKR in Beton unterdrücken, sondern fördern. Die Ergebnisse zeigten, dass ein enger Zusammenhang zwischen der Phasenzusammensetzung der Trasse, der Reaktivität der Trasskomponenten, den granulometrischen Eigenschaften der verwendeten Trasse, der Alkalibindung durch aluminiumhaltige C-S-H-Phasen und der Konzentration von Alkalien in der Porenlösung existiert.

1	Einführung	1
1.1	Beton – Einige Fakten	1
1.2	Dauerhaftigkeitsaspekte von Beton	2
1.3	Problemstellung und Zielsetzung	4
2	Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) – Stand des Wissens	6
2.1	Historisches zur AKR	6
2.2	Prinzipieller Mechanismus und typische Schadensbilder einer AKR	6
2.2.1	Äußere makroskopische Schadensbilder	6
2.2.2	Mikroskopische Schadensbilder	7
2.3	Einflussgrößen auf die Entstehung und den Verlauf einer AKR	8
2.3.1	Alkaliangebot	9
2.3.2	Gesteinskörnungen	10
2.3.3	Betonfeuchtigkeit (und Umgebungstemperatur)	11
2.3.4	Konstruktive Faktoren	11
2.4	Reaktionsmechanismen der AKR	12
2.4.1	Allgemeiner Reaktionsmechanismus und die Rolle der Calciumionen	12
2.4.2	Der Chemismus der Reaktionsprodukte	13
2.5	Klinkerersatzstoffe und Betonzusatzstoffe	16
2.5.1	Flugasche	16
2.5.2	Hüttensand	17
2.5.3	Mikrosilika	18
2.5.4	Trass	18
2.6	Zusammensetzung und Hydratation des Portlandzements	23
2.7	Struktur und Eigenschaften der C-S-H-Phasen	24
2.7.1	Struktur der C-S-H-Phasen	24
2.7.2	Alkalibindungsverhalten der C-S-H-Phasen	25
2.7.3	Der Einfluss von Al^{3+} auf die Alkalibindung der C-S-H-Phasen	25
2.7.4	Der Einfluss von Flugasche	27
2.7.5	Der Einfluss von Hüttensand	28
2.7.6	Der Einfluss von Trass und natürlichen Puzzolanen	29
2.8	Der Einfluss von Puzzolanen und Hüttensand auf die Porenlösung	29
2.9	Temperatureinfluss	30
2.10	Prüfmethoden zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion	31
2.10.1	Prüfverfahren nach DAfStb	31
2.10.2	NBRI Test Methode	32

2.10.3	AFNOR Testmethoden	32
2.10.4	ASTM-Prüfverfahren.....	33
3	Versuchsdurchführung	35
3.1	Versuchskonzept	35
3.2	Probenkörperserien	37
3.3	Auswahl der Gesteinskörnung.....	38
3.4	Auswahl und Charakterisierung des Zements und der Klinkerersatzstoffe	38
3.5	Probenherstellung.....	41
3.6	Untersuchungsverfahren und Methoden	42
3.6.1	Dehnungsmessungen.....	42
3.6.2	Gefügeuntersuchungen und mikrochemische Untersuchungen.....	42
3.6.3	Bestimmung des Auslaugungspotentials der Zusatzstoffe nach ASTM C311.....	44
4	Ergebnisse.....	45
4.1	Mörtelserien bei 40°C Nebelkammerlagerung.....	45
4.1.1	Längenänderung (Abb. 26).....	45
4.1.2	Gefügeuntersuchungen	46
4.1.3	Mikrochemische Untersuchungen	56
4.1.4	Zeitlicher Vergleich des Chemismus der C-S-H-Phasen in den einzelnen Mörtelserien	65
4.2	Betonserien der 40 °C Lagerung	66
4.2.1	Längenänderung	66
4.2.2	Gefügeuntersuchungen	67
4.2.3	Charakterisierung der AKR-Reaktionsprodukte.....	72
4.3	Betonserien der 60 °C Lagerung (Reaktorprüfung)	75
4.3.1	Längenänderung	75
4.3.2	Gefügeuntersuchungen	76
4.3.3	Charakterisierung der Reaktionsprodukte	77
4.3.4	Vergleich des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der 40 °C und 60 °C Lagerung.....	79
4.3.5	Bestimmung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der bei 60 °C gelagerten Betonserien.....	83
4.4	Der Temperatureinfluss auf den Chemismus der C-S-H-Phasen in Zementsteinen mit Klinkerersatzstoffen	84
4.5	Bestimmung des Auslaugungspotentials der Zusatzstoffe nach ASTM C311.....	85
5	Diskussion der Ergebnisse der einzelnen Serien und Schlussfolgerungen.....	87
5.1	Einfluss der Alkalidotierung und der Auslagerungsart bei den Serien mit reinen Portlandzement: M-K, B-K und B-K-60.....	87

5.2	Der Einfluss von Hüttensand: Serie M-KH.....	88
5.3	Der Einfluss von Flugasche: Serien M-KF, B-KF und B-KF-60	88
5.4	Der Einfluss verschiedener Trasse	89
5.4.1	Rheinischer Trass: Serien M-KT1, B-KT1 und KT1-60.....	89
5.4.2	Italienischer Trass	91
5.4.3	Der Einfluss von Italienischem Trass I: Serien M-KT2, B-KT2 und B-KT2-60	91
5.4.4	Der Einfluss von Italienischem Trass II: Serien M-KT3, B-KT3 und B-KT3-60	92
5.5	Schlussfolgerungen	93
6	Zusammenfassung und Ausblicke	95
6.1	Zusammenfassung	95
6.2	Ausblick	96
7	Literatur	98
8	Anhang	105
9	Lebenslauf	135

1 Einführung

1.1 Beton – Einige Fakten

Für Architekten und Bauingenieure ist Beton ein faszinierender Baustoff, da er sich dank seinen Eigenschaften zu fast jeder beliebigen Form verarbeiten lässt. Das Bauen mit Beton erlaubt dem Architekten eine Unzahl von spielerischen Freiheiten bei der Gestaltung von Bauwerken und dem Ingenieur elegante Lösungen von konstruktiven Aufgaben bezüglich den Anforderungen für die Nutzung/Funktionalität, dem Tragverhalten und der Dauerhaftigkeit von Baukonstruktionen. Heutige modernste Betontechnologie ermöglicht unter Zuhilfenahme von innovativen Materialien und Verarbeitungs- und Anwendungsverfahren die Realisierung von immer filigraneren Tragkonstruktionen im Ingenieurbau, die bei hoher Tragfähigkeit auch ästhetische Ansprüche erfüllen (z.B. Brückenbauwerke, Tragwerke im Hochbau) und in dieser Form in der Vergangenheit nicht möglich waren. Ohne den modernen und gleichzeitig sehr wirtschaftlichen Beton wäre der weltweite Bedarf an Wohn-, Repräsentations- und Infrastrukturbauwerken nicht zu decken. Der Beton trägt daneben zur Sicherheit unserer Infrastruktur bei. So werden beispielsweise Stützmauern aus Beton erstellt, um die Gefahr von Hangrutschungen zu minimieren und Straßen- und Eisenbahntunnel werden teilweise oder ganz mit Beton ausgekleidet. Aber auch der Bau von Kraftwerken, die gegenüber der Gefahr von Flugzeugabstürzen gesichert sein müssen, wäre ohne den Einsatz von Beton undenkbar.

Die grundlegenden Komponenten von Beton sind das Bindemittel, die Gesteinskörnungen in Form von Sand und Kies sowie Wasser. Weitere Bestandteile sind die Bewehrung, bestehend aus Stahl (meist gerippte Stäbe und Stahlmatten, neuerdings auch Stahlfasern) und chemische Additive, welche die Verarbeitung des Betons und Erstarrung/Erhärtung des Bindemittels beeinflussen (Zusatzmittel). Als Bindemittel wurde in der Vergangenheit häufig reiner Portlandzement eingesetzt. Für besondere Anforderungen (z.B. niedrige Hydratationswärme, hohe Dichtigkeit) wurden jedoch auch früher schon Zemente verwendet, bei denen ein nicht unerheblicher Anteil des Portlandzements durch andere latent hydraulische (z.B. Hüttensand) oder puzzolanische Stoffe ersetzt worden sind (Hochofen-, Puzzolanamente).

Aufgrund der Diskussion zur Steigerung der Nachhaltigkeit zementgebundener Baustoffe, die seit den letzten zehn Jahren stattfindet, werden dem Beton immer häufiger puzzolanische bzw. inerte Zusatzstoffe¹ (meist industrielle Reststoffe oder natürliche Rohstoffe) direkt beim Mischen zusammen mit Portlandzement (CEM I) zugegeben oder es kommen vermehrt Zemente zum Einsatz, bei denen Zementklinker durch andere Stoffe (Klinkerersatzstoffe²) ersetzt werden (z.B. Puzzolane, Gesteinsmehle, Hüttensand). Letztere werden im Zementwerk in festgelegten Mengenverhältnissen gemischt und kommen als CEM II bis CEM V in den Handel.

Diese Arbeit befasst sich unter anderem mit einem natürlichen Rohstoff, der schon seit sehr langer Zeit als puzzolanische Komponente in Bindemittelsystemen verwendet wurde. Es handelt sich hierbei um vulkanische Asche, die in Deutschland als „Trass“ bezeichnet wird. Trass-

¹ Als Zusatzstoffe (auch Betonzusatzstoffe) werden Puzzolane, latent hydraulische Stoffe oder Gesteinsmehle bezeichnet, die dem Frischbeton beim Herstellen beigegeben werden. Zusatzstoffe beeinflussen die Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons und die Festigkeitseigenschaften des Festbetons.

² Klinkerersatzstoffe bezeichnen Hauptbestandteile eines Zements, bei denen es sich nicht um Zementklinker handelt. Klinkerersatzstoffe werden entweder zusammen mit den Zementklinkern vermahlen oder getrennt gemahlen und nachträglich gemischt. Häufig werden als Klinkerersatzstoffe die gleichen Materialien verwendet, die auch als Betonzusatzstoffe zum Einsatz kommen können.

vorkommen werden weltweit als Quelle von Klinkerersatzstoffen zur Zementherstellung genutzt. Seit römischer Zeit wurde Trass als puzzolanische Komponente in Kalkmörtel verwendet, um diesen dauerhafter zu machen. Die Bezeichnung „Trass“ stammt aus dem Holländischen: Tyrass = Kitt oder Kleber, wo seit dem 17. Jh. ein reger Handel zwischen Deutschland und Holland mit Tuffgestein und vulkanischen Aschen aus der Eifel einsetzte, da sich mit Trass ein unter Wasser erhärtender und wasserbeständiger Mörtel herstellen ließ, der besonders für die Wasserbauwerke zur Erschließung neuer Landflächen in Holland benötigt wurde [2].

Durch die vermehrte Verwendung von Zementen, die Klinkerersatzstoffe enthalten, und Betonzusatzstoffen wird das Gesamtsystem bei der Herstellung von Beton wesentlich komplexer. Daraus ergeben sich Fragestellungen bezüglich der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton. Insbesondere Dauerhaftigkeitsaspekte können bei Veränderungen der Bindemittelzusammensetzung durch den Einsatz von Klinkerersatzstoffen nachhaltig beeinflusst werden, die sich z.B. auf die Mechanismen bei bestimmten Betonschädigungsarten sowohl im positiven als auch negativen auswirken können. Insbesondere natürliche reaktive Zusatz- bzw. Klinkerersatzstoffe (u.a. Trass) sind meist sehr heterogen zusammengesetzt und lassen sich in ihrem Verhalten bei bestimmten Schädigungsmechanismen in Betonen nur sehr schwer vorherbestimmen.

Das Thema dieser Arbeit befasst sich deshalb mit einer an Beton häufiger auftretenden Schädigungsart, der **Alkali-Kieselsäure-Reaktion**, und deren Beeinflussung durch den Klinkerersatzstoff **Trass**. Im Folgenden sollen einige Dauerhaftigkeitsaspekte von Beton genauer betrachtet und die Problem- sowie Zielstellung vertieft werden.

1.2 Dauerhaftigkeitsaspekte von Beton

Jedes Bauwerk aus Beton ist Einflussfaktoren ausgesetzt, die eine große Auswirkung auf dessen Lebensdauer haben. Unter dem Begriff Dauerhaftigkeit versteht man, dass Bauteile aus Beton über die vorgesehene Nutzungsdauer gegenüber allen Einflüssen, die auf diese einwirken, bei ausreichender Wartung und Instandhaltung genügend beständig sind [1].

Die Einflussfaktoren lassen sich in **äußere** und **innere** Faktoren aufspalten. Diese Einflussfaktoren sind in DIN EN 206 genau definiert und sind in diesem Regelwerk zu Expositionsklassen zusammengefasst [3]. Äußere Einflussfaktoren wirken von außen auf das Material ein. Zu den wichtigsten äußeren Einflussfaktoren können Feuchte, Temperatur und eventuell vorhandene schädliche Ionen (z.B. SO_4^{2-} , Cl^-) gezählt werden, denen ein Bauwerk oder Bauteil aus Beton ausgesetzt ist. Mechanismen, die überwiegend durch äußere Faktoren beeinflusst werden, hinterlassen im Material oftmals Gradienten, die sich von außen zum Materialinnern verändern (z.B. Konzentrationsgradienten, Porositätsgradienten).

Innere Einflussfaktoren werden durch das Material selbst festgelegt. Hierbei sind die Zusammensetzung und das Materialgefüge die wesentlichsten Größen. Die Zusammensetzung wird hierbei von den Bindemittleigenschaften (z.B. Calcium-, Aluminium-, Alkaligehalt des Zements und der Zementersatz- bzw. Zusatzstoffe) und den Eigenschaften der Gesteinskörnungen (z.B. Beständigkeit im alkalischen Milieu) festgelegt. Beim Materialgefüge spielt die Porenstruktur des Zementsteins und der Gesteinskörnungen eine wichtige Rolle. Die Porenstruktur legt die „Dichtigkeit“ eines Betons fest und beeinflusst den Materialtransport im Beton. Weiterhin hat sie einen wesentlichen Einfluss auf Quell- und Kristallisationsdrücke, die durch Reaktionsprodukte oder Eis auf das Materialgefüge ausgeübt werden können. Innere und manche äußere Faktoren, welche auf die Dauerhaftigkeit eines Betons einwirken, können durch die Wahl verschiedener Materialparameter ansatzweise beeinflusst werden. Zu nennen sind die Wahl des Was-

ser/Zement-Werts (w/z-Wert) bzw. Wasser/Bindemittel-Werts (w/b-Wert), die Art des Zements und eventuell verwendeter Zusatzstoffe sowie die Art der Gesteinskörnungen.

Die **Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)** ist ein Schädigungsmechanismus, der nur im Beton auftritt und zu einer starken Beeinträchtigung dessen Dauerhaftigkeit führen kann. Bei der AKR sind äußere, aber auch zu einem hohen Maß innere Einflussfaktoren für den Verlauf einer Schädigung verantwortlich. Unter der betonschädigenden AKR wird die Reaktion zwischen empfindlichen Bestandteilen der Gesteinskörnung und Alkalien verstanden. Der SiO_2 -Anteil in bestimmten Gesteinskörnungen kann im alkalischen Milieu des Betons bevorzugt mobilisiert werden. Dabei kann es zu einer chemischen Reaktion zwischen diesem mobilisierten SiO_2 und den Alkalien der Porenlösung kommen, die entweder aus dem Zement stammen oder von außen eingedrungen sind. Bei dem Reaktionsprodukt handelt es sich in erster Linie um gelförmige Alkalisilikate, welche bei einer Erhöhung der Umgebungsfuchte quellen und infolgedessen Zwangsspannungen auf das Gefüge ausüben, die zu einer Betonschädigung in Form von starker Rissbildung führen können. Diese Art der Schädigung, die schon wenige Jahre nach Erstellung eines Bauwerks auftreten kann, führt unter Umständen zu einer möglichen Reduzierung der Gebrauchstauglichkeit und –dauer [4].

Bei der AKR sind neben den inneren Faktoren, wie dem Alkaligehalt der Porenlösung und Beständigkeit der Gesteinskörnung im Beton, wichtige äußere Faktoren die Zufuhr von Feuchte und zusätzlichen Alkalien. Deshalb können besonders Bauwerke wie z.B. Brücken, Wasserbauten, Tunnel, Galerien, Stützmauern und Betonfahrbahnen von einer AKR betroffen sein, da sie sich oft an exponierten Stellen, d.h. an Orten mit erhöhter Feuchtigkeit, befinden (Abb. 1). Betonfahrbahndecken von Straßen, Flughäfen oder Betonparkdecks können AKR-bedingte Schäden aufweisen, da sie im Winter häufig dem Einfluss von Taumitteln ausgesetzt sind. Die Alkalien des Taumittels können mit dem Tauwasser in den Beton eindringen und die Porenlösung mit Alkalien anreichern [4].



Abb. 1: Betonstützmauer mit typischen für die AKR netzartigen Rissmuster (aus [4]).

Die Sanierung eines betroffenen Bauwerkes ist meist mit einem hohen Arbeits- und Kostenaufwand verbunden. In der Bundesrepublik Deutschland waren 2009, laut einer Erklärung der Bundesregierung vom März desselben Jahres, rund 411 Autobahnkilometer von AKR-Schäden betroffen. Die Reparaturkosten für die Instandsetzung der Fahrbahndecken wurden hierbei auf rund 100.000 Euro pro Autobahnkilometer geschätzt [5].

1.3 Problemstellung und Zielsetzung

Für die Herstellung von Beton kommen heute immer häufiger industrieller Reststoffe in Form von Zusatzstoffen oder Klinkerersatzstoffen zum Einsatz. Beide können die Eigenschaften des Betons bezüglich seiner Dauerhaftigkeit maßgeblich beeinflussen. Von den industriellen Zusatzstoffen wie Flugasche [9, 10, 11], Hüttensand [10, 12] und Mikrosilika [13, 14] ist bekannt, dass sie eine AKR verhindern oder verlangsamen können. Der AKR-hemmende Effekt der Zusatzstoffe wird mit der damit verbundenen Absenkung des pH-Werts der Porenlösung [9, 10-12] erklärt. Der pH-Wert der Porenlösung des Betons ohne Zusatzstoffe liegt im Bereich von $\text{pH} = 13,5 \dots 13,8$. In diesem alkalischen Milieu ist die Löslichkeit der amorphen und teilkristallinen Kieselsäure der reaktiven Gesteinskörnungen sehr hoch [15]. Durch den Einsatz von reaktiven Zusatzstoffen/Klinkerersatzstoffen kommt es zur puzzolanischen Reaktion, d.h. in der Porenlösung gelöstes Calciumhydroxid reagiert mit der Kieselsäure der Zusatzstoffe unter der Bildung von Calciumsilikathydratphasen (C-S-H). Dabei kommt es zu einer Absenkung des pH-Werts der Porenlösung; gleichzeitig wird die Löslichkeit von SiO_2 von potentiell reaktiven Gesteinskörnungen gesenkt und dadurch die Gefahr einer AKR verringert.

Diverse Untersuchungen, unter anderem mit Flugasche [10,16-19], konnten zeigen, dass die Puzzolane bzw. latent hydraulische Stoffe einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Chemismus der Calciumsilikathydrate (C-S-H-Phasen) haben, die bei der Hydratation der Zementklinker entstehen. Es wurde nachgewiesen, dass sich bei Verwendung von Flugasche der Aluminiumgehalt der C-S-H-Phasen infolge einer Substitution von Si^{4+} durch Al^{3+} , erhöht. Dadurch entsteht an den C-S-H-Phasen ein negatives Ladungsdefizit, welches ermöglicht, dass die für die AKR verantwortlichen Alkaliionen (Na^+ , K^+) gebunden werden [20, 21] und somit der Gesamtalkaligehalt der Porenlösung verringert wird.

Die Wirkungsweise natürlicher puzzolanischer Klinkerersatzstoffe/Zusatzstoffe wie Trass auf den Verlauf einer AKR ist hingegen immer noch unklar. In der Literatur sind nur wenige Arbeiten beschrieben, die sich mit dem Einfluss von natürlichen Puzzolanen auf eine AKR im Beton beschäftigen. In verschiedenen Studien wird dem Trass jeweils eine hemmende oder fördernde Wirkung zugeschrieben. Dies liegt teilweise auch daran, dass sich vulkanische Aschen von Vorkommen zu Vorkommen extrem unterscheiden. Kritische Parameter sind hierbei das Verhältnis kristalliner Mineralphasen zur Glasphase, der Gesamtalkaligehalt und der Alkaligehalt reaktiver Komponenten. Bisher ist unklar, inwieweit der Alkaligehalt von Trass dem wirksamen Alkaligehalt des Bindemittels anzurechnen ist. Genaue Daten zur chemischen Zusammensetzung der C-S-H-Phasen von trasshaltigen Zementsteinen fehlen hierzu völlig.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es deshalb, den Einfluss des natürlichen Puzzolans Trass auf den Verlauf einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion zu untersuchen. Der Schwerpunkt der Studie lag hierbei nicht in vergleichenden phänomenologischen Untersuchungen möglichst vieler verschiedener Gesteinskörnungs- und Trasskombinationen, sondern in der Erkennung und Beschreibung von Reaktionsmechanismen zwischen **einer** reaktiven Gesteinskörnung, dreier ausgewählter Trasse und der sich einstellenden Porenlösung im Zementstein. Um einen Vergleich mit anderen Zementhauptkomponenten zu erhalten, wurden zwei weitere Klinkerersatzstoffe, eine Steinkohlenflugasche und ein Hüttensand, in die Untersuchungen einbezogen.

Im Rahmen der Arbeit sollte im Vergleich untersucht werden, inwieweit Trass, Flugasche und Hüttensand die Chemie der C-S-H-Phasen beeinflussen. Neben der weiter oben beschriebenen Substitution von Silizium gegen Aluminium bei den aluminiumhaltigen Klinkerersatzstoffen sollte gezeigt werden, inwieweit der Alkaligehalt von Trass zum Alkaligehalt der Porenlösung beiträgt. Der Alkaligehalt von Flugasche und Hüttensand wird in der Regel nicht oder nur zu einem geringen Verhältnis zum wirksamen Alkaligehalt des Zements angerechnet. Von Trass sind hierzu jedoch noch keine zuverlässigen Daten bekannt.

Aus den Erfahrungen von Flugasche lassen sich als Arbeitshypothese ähnliche Reaktionen mit Trass im Zementstein erwarten, da auch Trass Aluminium als Hauptkomponente enthält: Die Reaktion von Trass erhöht den Aluminiumgehalt der C-S-H-Phasen und deren Sorptionskapazität für Alkalien. Eine erhöhte Anlagerung von Alkalien an den C-S-H-Phasen reduziert gleichzeitig den Gesamtalkaligehalt der Porenlösung und verringert damit die Gefahr einer AKR. Trasse können jedoch je nach Vorkommen unterschiedliche Gesamtalkaligehalte aufweisen. Besonders saure Magmen produzieren vulkanische Aschen mit hohem Alkaligehalt, welcher zu einem nicht unerheblichen Anteil in der Glasphase gebunden ist. Bei der puzzolanischen Reaktion der alkalihaltigen Glasphase im Zementssystem ist deshalb mit einer Freisetzung von Alkalien in die Porenlösung des Zementsteins zu rechnen, was unter Umständen die Gefahr einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion beträchtlich erhöht.

Die Wirkung des natürlichen Puzzolans Trass im Beton kann sich hypothetisch deshalb sowohl negativ als auch positiv auswirken. Inwieweit sich die oben skizzierten Reaktionen bei trasshaltigen Proben dann wirklich einstellen und welche Faktoren hierbei eine Rolle spielen, wurde in dieser Arbeit im Detail untersucht.

2 Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) – Stand des Wissens

2.1 Historisches zur AKR

Schon in den frühen 20er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde vermutet, dass der Alkaligehalt im Zement in Verbindung mit bestimmten Gesteinskörnungen für Schäden im Beton verantwortlich sein könnte. T.A. Stanton [23] berichtete 1940 in den „Proceedings of the American Society Civil Engineering“, dass opalhaltige Gesteinskörnung für die Betonschädigung bei einem neu errichteten Staudamm nahe Los Angeles in Kalifornien verantwortlich sein könnten. 1947 wurde dieses Phänom erstmals in dem Lehrbuch „Chemistry of Portland Cement“ von R.H. Bouge beschrieben. In den frühen 50er Jahren wurden auch aus anderen Ländern und Kontinenten Schadensfälle gemeldet, die alle dasselbe Schadensbild aufwiesen. Der erste in Deutschland gemeldete Schadensfall einer AKR wurde 1968 in Schleswig-Holstein an der Lachwehrbrücke in der Umgebung von Lübeck, die 1965 errichtet wurde, gemeldet. Bis dahin war man in Deutschland der Auffassung, dass dieses Problem nicht bestehen würde. In der ehemaligen DDR wurden erste AKR Schäden 1974 entdeckt. Mittlerweile war auch der prinzipielle Mechanismus bekannt, der zu den Schäden führte. So wurde 1974 vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) eine erste Richtlinie mit dem Titel „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton“ publiziert.

2.2 Prinzipieller Mechanismus und typische Schadensbilder einer AKR

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist die chemische Reaktion zwischen den Alkalien der Porenlösung des Betons und alkaliempfindlichen Bestandteilen der Gesteinskörnung. Der SiO_2 -Anteil bestimmter Gesteinskörnungen kann im alkalischen Milieu des Betons mobilisiert werden. Dabei kommt es zu einer chemischen Reaktion zwischen dem aus der Gesteinskörnung mobilisiertem SiO_2 und den Alkalien, die im Zement enthalten sind oder von außen eingetragen werden (z.B. durch Taumittel). Es entsteht dabei ein überwiegend gelförmiges Reaktionsprodukt, welches bei Wasseraufnahme quillt und zu hohen Expansionsdrücken führen kann. Als Folge davon kommt es zu einem Aufbau von Zwangsspannungen, welche sich durch Risse und Abplatzungen am Bauwerk wieder abbauen [4].

2.2.1 Äußere makroskopische Schadensbilder

Ein typisches Schadensbild bei einer AKR ist eine deutliche Netzrissebildung bei gleichzeitigem Austreten von Reaktionsprodukten und Calciumhydroxid aus den Rissen (Abb. 2). Die Risse weiten sich hierbei über einen längeren Zeitraum zu einem polygonalen Rissnetz aus, das sich mit zunehmender Dauer über den ganzen Beton erstrecken kann (Abb. 2). Die Rissbreiten nehmen mit der Zeit zu und erreichen Breiten bis zu mehreren Millimetern. Der Verlauf der Risse und ihr Auftreten sind von der Vorspannung (bei Spanngliedern), dem Bewehrungsgehalt und den konstruktiven Verhältnissen am Bauwerk abhängig. Anhand von Bohrkernen wird deutlich, dass die Risse häufig durch Gesteinskörnungen hindurch laufen bzw. Risse sogar an Gesteinskörnungen beginnen. Der Korndurchmesser der reaktiven Gesteinskörnung beeinflusst hierbei maßgeblich die Rissbreiten und die Rastergröße des Rissnetzes. Das Rissnetz ist bei der Sand- oder Feinkiesfraktion meist feinmaschiger ausgebildet als bei der Grobfraktion. Ein ebenso nicht vernachlässigbarer Faktor ist die Art der Exposition. Mit Erhöhung des Feuchteintrags ist meist auch eine Erhöhung der Rissanzahl verbunden und eine Vertiefung der geschädigten Zone. Typisch für AKR-bedingte Schäden an Massivbauwerken ist eine geringe-

re Schädigung der Oberfläche im Vergleich zu tieferen Zonen. Das liegt daran, dass die Alkalien der ersten Zentimeter des Betons durch Regen oder Feuchte ausgewaschen werden und dadurch im Vergleich zu tieferen Zonen nicht mehr für eine AKR zur Verfügung stehen. Durch eine AKR hervorgerufene starke Schädigung führt immer zu einem Festigkeitsverlust des Betons [27].



Abb. 2 Pier in Trondheim (Norwegen) mit AKR-geschädigtem Beton.

2.2.2 Mikroskopische Schadensbilder

Aufgrund des äußeren Schadensbildes lässt sich in der Regel noch keine sichere Zuordnung der Schadensursache durchführen. Zur sicheren Erkennung von AKR-bedingten Schäden werden daher mikroskopische Methoden angewandt. Anhand von Dünnschliffen oder polierten Anschliffen können mittels Polarisationsmikroskop und/oder Rasterelektronenmikroskopie (REM) die durch die AKR hervorgerufenen Änderungen im Gefüge, wie Risse und Ablagerungen von Reaktionsprodukten, beobachtet werden. Die mikroskopische Ausbildung der Gefügeschädigungen sind wie beim makroskopischen Schadensbild abhängig vom Reaktionsfortschritt, der Art und Größe der reaktiven Gesteinskörnung, den Umweltbedingungen (Feuchte, Temperatur, möglicher Alkalieintrag) und des ursprünglichen Betongefüges (insbesondere der Porosität). Mikroskopisch lassen sich im Dünnschliff drei verschiedene Hauptschadensmerkmale erkennen: Risse, Reaktionsprodukte (meist in gelartiger Form) und in manchen Fällen angelöste Gesteinskörnungen (Abb.3). Am Anfang der Reaktion der AKR sind die Risse in der Regel auf die Gesteinskörnungen beschränkt und meist sind in diesem Stadium noch keine Reaktionsprodukte optisch erkennbar. Dies liegt daran, dass in diesem frühen Stadium die expansiven Kräfte noch zu schwach sind um gegen die Zugfestigkeit des Betons aufzukommen. Mit dem weiteren Reaktionsfortschritt und der daraus folgenden Expansion bilden sich neue Risse, welche teilweise mit Reaktionsprodukten gefüllt sind und maximale Rissbreiten von mehreren Millimetern annehmen können. Die Risse verlaufen dann häufig über die Zementsteinmatrix durch mehrere Gesteinskörnungen.

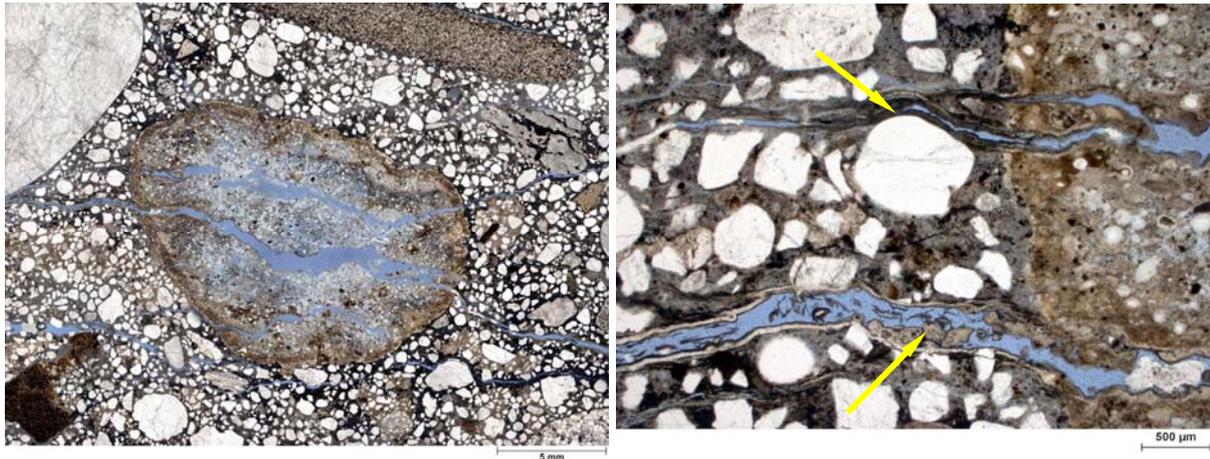


Abb. 3 Lichtmikroskopische Aufnahmen einer AKR-geschädigten Gesteinskörnung (links Übersicht, rechts Detail). Erkennbar sind typische Hauptschadensmerkmale bestehend aus Rissen im Zementstein und in der stark angelösten Gesteinskörnung (Opalsandstein) sowie das in den Zementstein eingedrungene AKR-Reaktionsprodukt (Pfeile). Poren und Risse sind durch einen blauen Farbstoff im Epoxidharz kenntlich gemacht.

2.3 Einflussgrößen auf die Entstehung und den Verlauf einer AKR

Das Eintreten einer AKR im Beton ist im Wesentlichen von den folgenden drei Einflussgrößen abhängig:

- Angebot an Alkalien in der Porenlösung des Zementsteins
- Reaktivität der Gesteinskörnung
- Betonfeuchtigkeit

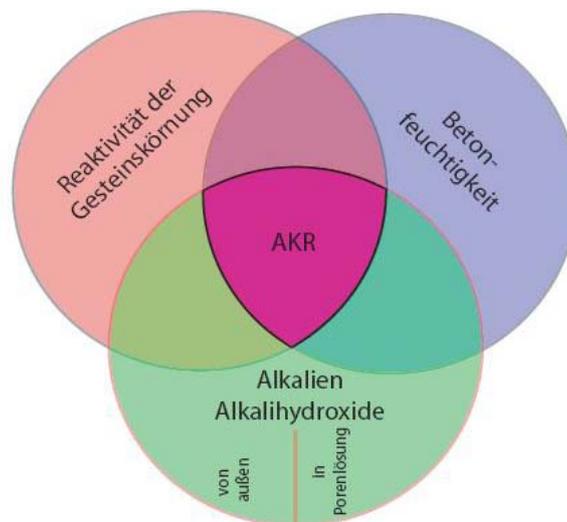


Abb. 4 Einflussgrößen auf eine AKR (nach [4]).

In den folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Größen eingegangen und ihr Einfluss auf die AKR diskutiert.

2.3.1 Alkaliangebot

Der Alkaligehalt des Zements ist ein wichtiges Kriterium für das Auftreten einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und beeinflusst wesentlich den Gesamtalkaligehalt der Porenlösung¹. Dieser hängt nicht nur vom Alkaligehalt des Zements ab, sondern auch vom Zementgehalt des Betons. So konnten Locher und Sprung [24, 25] in Laborversuchen an opalhaltigen Gesteinskörnungen und Portlandzement nachweisen, dass bei einem Wert von $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}} \geq 0,6$ M.-% eine AKR auftreten kann. Sie untersuchten außerdem den Einfluss des Zementgehalts in Abhängigkeit vom wirksamen Alkaligehalt. Sie postulierten, dass bei einem Zementgehalt von maximal 500 kg/m^3 und einem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}} \leq 0,6$ M.-% keine Schäden durch AKR zu erwarten sind (Abb.5).

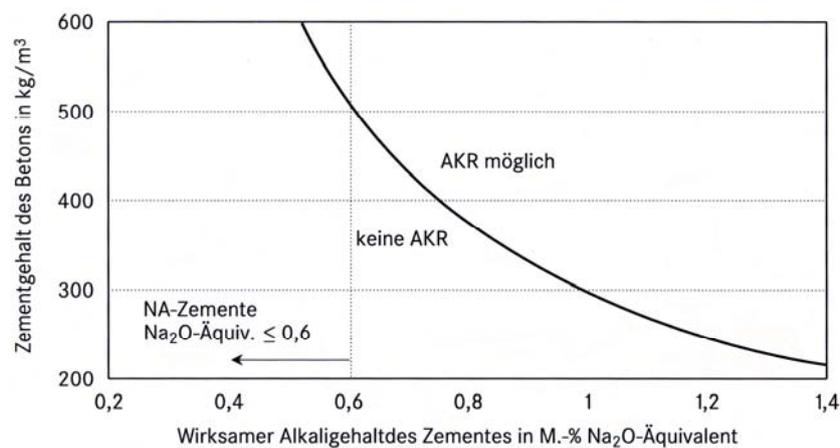


Abb. 5 Grenzen der spezifischen Zementmenge im Beton zur Verminderung einer AKR in Abhängigkeit der spezifischen Zementmenge des Betons und dem Alkaligehalt des Zements (aus [1]).

Alkalien können in verschiedenen Formen im Zement vorhanden sein. So können sie als Alkalisulfate gebunden sein. In dieser Form werden sie sofort im Anmachwasser gelöst. Sie können aber auch in den Klinkermineralien eingebaut sein. Die Alkalien werden dann erst im Laufe der Hydratation freigesetzt. Alkalien sind aber auch Bestandteil vieler reaktiver Klinkerersatzstoffe bzw. Zusatzstoffe wie Trass, Hüttsand und Flugasche. Aus der Praxis ist jedoch bekannt, dass Hüttsand und Flugasche Alkalien nur teilweise und sehr langsam an die Porenlösung im Zementstein abgeben und deshalb auch nicht als vollständig wirksamer Alkaligehalt angerechnet werden.

Alkalien können aber auch durch Eintrag von außen dem Beton zugeführt werden. Dies kann durch Taumittleintrag (Streusalz), durch eindringendes alkalihaltige Grund- bzw. Bergwässer [26] oder durch Meerwassereintrag erfolgen. Bei einer AKR-Schädigung infolge externer Alkalizufuhr spielen auch noch andere Faktoren eine wichtige Rolle, z.B. eine eventuell vorhandene Vorschädigung des Betons durch Frost/Tau-Angriff, plastisches Schwinden oder infolge dynamischer Belastung.

¹ Der Alkaligehalt in Zement und Beton wird als Natriumäquivalent ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$) angegeben. Hierbei gilt: $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}} = c_{\text{Na}_2\text{O}} + 0,658 \cdot c_{\text{K}_2\text{O}}$ ($c_{\text{Na}_2\text{O}}$ bzw. $c_{\text{K}_2\text{O}}$ = Konzentration an Na_2O bzw. K_2O in M.-%).

2.3.2 Gesteinskörnungen

Als potentiell alkaliempfindliche Gesteinskörnungen gelten alle diejenigen, die amorphe, kryptokristalline oder stark fehlgeordnete SiO_2 -Phasen enthalten. Potentiell reaktive SiO_2 -Phasen sind Opal, Chalcedon und Stressquarz (= tektonisch beanspruchter Quarz mit zahlreichen Fehlstellen). Die Auflösungskinetik ist vom kristallinen Zustand der Phasen und der Art sowie dem pH-Wert der Lösung abhängig. So wird grobkristalliner, wenig gestörter Quarz nur an der Oberfläche angelöst. Durch diese Aufrauhung ergibt sich ein guter Verbund mit dem Zementstein. Liegt nun das SiO_2 in amorpher Form vor, ist das für das SiO_2 typische tetraedrische Gitter nur nahgeordnet. Durch diese Nahordnung im Gitter sind nicht mehr alle Bindungslängen HO-Si-OH gleich lang und somit auch nicht mehr gleich stark gebunden. Dies führt zu einer Erhöhung der Löslichkeit im basischen Milieu. Mackenzie [15] hat beobachtet, dass die Löslichkeit von amorpher Kieselsäure bei einem $\text{pH} \geq 12$ sehr stark ansteigt (Abb. 6). Da der pH-Wert des Betons bei ca. 13,5 liegt, kommt es bei Gesteinskörnungen, die amorphes SiO_2 , kryptokristalline oder teil- bzw. fehlgeordnete SiO_2 -Phasen enthalten, zu einer Reaktion mit den Hydroxid-Ionen der Porenlösung.

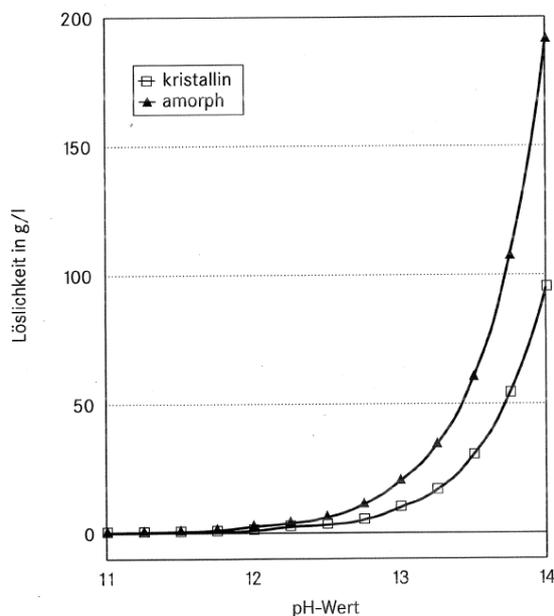


Abb. 6 Löslichkeit von amorphen und kristallinen SiO_2 in Abhängigkeit des pH-Werts bei 25 °C (aus [15]).

Neben den bereits besprochenen SiO_2 -Phasen können noch weitere Phasen potentiell AKR-empfindlich reagieren. Einige dieser Phasen sind zusammen mit den SiO_2 -Phasen und potentiell AKR-empfindlichen Gesteinen in Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1 Übersicht der alkaliempfindlichen Phasen und Gesteine

Potentiell reaktive Phasen	
SiO ₂ Phasen	Opal, Hornstein, Chalcedon, Flint, Quarz (gestresst)
Alumosilikate	Tonminerale, Zeolithe
Weitere Phasen	Gläser (natürliche und technische)
Potentiell reaktive Gesteine	
Magmatite	Granit, Basalt, Porphyr, Rhyolith
Sedimente	Grauwacke, Radiolarit, Opalsandstein, Kieselkalk, Sandstein (manche)
Metamorphite	Gneis, Mylonit, Schiefer

2.3.3 Betonfeuchtigkeit (und Umgebungstemperatur)

Der Einfluss von Feuchte ist die dritte wichtige Voraussetzung zur Auslösung einer AKR. Es ist aus der Praxis bekannt, dass an Betonbauwerken, die starken und häufigen klimatischen Schwankungen wie Nass-Trocken-Wechsel oder konstanter Feuchtebelastung ausgesetzt sind, öfters AKR-bedingte Schäden auftreten als an Bauwerken in konstanter Umgebung bei geringerer Feuchtebelastung. Dies betrifft insbesondere Bauwerke, die sich im Bereich von Gewässern und in Nebelzonen befinden. Um diese Feuchtigkeitseinflüsse praxisgerecht zu erfassen, wurden in der Alkalirichtlinie des DAfStb [22] folgende in Tabelle 2 beschriebenen Feuchtigkeitsklassen definiert.

Tab. 2 Feuchtigkeitsklassen nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb aus [22]

Feuchtigkeitsklasse	Zuordnung aufgrund der zu erwartenden Umwelteinflüsse
„trocken“ (W0)	Betonbauteile, die unter normaler Nachbehandlung nicht für längere Zeit feucht und nach dem Austrocknen während der Nutzung weitgehend trocken bleiben.
„feucht“ (WF)	Betonbauteile, die während der Nutzung häufig oder längere Zeit feucht sind.
„feucht + Alkalizufuhr von außen“ (WA)	Betonbauteile, die zusätzlich zu der Beanspruchung nach Feuchtigkeitsklasse WF häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen ausgesetzt sind.

Neben der Feuchte spielt die Umgebungstemperatur eine wichtige Rolle bei der Reaktionsgeschwindigkeit. Unter niedrigen Temperaturbedingungen (z.B. in subarktischer oder arktischer Umgebung) ist die Wahrscheinlichkeit einer AKR geringer als in gemäßigten oder heißen Zonen. Jedoch kann auch bei niedrigen Temperaturen eine AKR nicht vollkommen ausgeschlossen werden, wie einige Schadensfälle an Staudämmen aus dem Alpenraum zeigen [4].

2.3.4 Konstruktive Faktoren

Neben den drei wichtigsten zuvor genannten Einflussgrößen besitzen konstruktive Faktoren einen nicht unerheblichen Einfluss auf den Verlauf einer AKR. AKR-bedingte Schäden treten meist an Bauwerken wie Brücken, Wasserbauten und Verkehrsflächen, die direkten Wasserkontakt haben, auf. Entscheidend ist hierbei die Lage und Orientierung des Bauwerkes bzw.

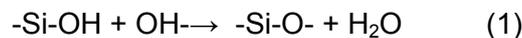
der einzelnen Bauteile bezüglich ihrer Feuchteexposition. Die Art der Konstruktion (z.B. Stahl-, Spannbeton sowie Bewehrungsgehalt und Anordnung) hat ebenfalls einen Einfluss auf die Stärke und den zeitlichen Verlauf der Schäden. Bei massigen Bauteilen mit einer Bauteildicke von größer einem Meter ist der Feuchtigkeitsgehalt im Inneren des Betons über die geplante Nutzungsdauer nahezu 100 %. Somit sind in diesen Bauteilen die idealen Bedingungen für eine AKR gegeben [4].

2.4 Reaktionsmechanismen der AKR

2.4.1 Allgemeiner Reaktionsmechanismus und die Rolle der Calciumionen

Der Reaktionsmechanismus kann als Säure-Base-Reaktion der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung mit der Porenlösung verstanden werden, wie zahlreiche Untersuchungen von Dent Glasser und Kataoka [28], Locher [29], und Sprung [30] belegen. Dent Glasser und Kataoka [28] postulierten, dass eine AKR in mehreren Reaktionsschritten folgendermaßen abläuft:

- An der Oberfläche der Gesteinskörner reagieren die Hydroxidionen der Porenlösung zunächst mit den Silanolgruppen (-Si-OH)¹ der reaktiven Kieselsäure



- Weiterhin können die Silanolbrücken der Kieselsäure durch Hydroxidionen aufgebrochen werden:



- Dabei entsteht auf der Gesteinsoberfläche eine negative Ladung und es kommt anschließend zu einer Anlagerung der Alkalien, A⁺ (Na⁺, K⁺) und Calciumionen (Ca²⁺), die in der Porenlösung vorliegen.



Bei diesem letzteren Reaktionsschritt entsteht ein quellfähiges, gelförmiges Reaktionsprodukt bestehend aus einem meist Ca- und wasserhaltigen Alkalisilikaten mit nicht genau definierter Zusammensetzung.

Chatterji [31, 32] hingegen erklärt die Bildung von expansiven Gel analog zur Bildung von Kolloiden. Er schreibt den Oberflächen des Zementsteins und den reaktiven Gesteinskörnungen eine negative Ladung zu, die von einer hydratisierten Kationen-Doppelschicht umgeben werden. In dieser positiv geladenen elektrischen Doppelschicht sind Kationen wie Na⁺, K⁺ und Ca²⁺ enthalten (Abb. 7 a). Die Konzentration von Ca²⁺ ist in diesem System von großer Bedeutung, da sie der limitierende Faktor für den Massentransport der Alkalien zur reaktiven Gesteinskörnung ist. In der Porenlösung herrscht ein Lösungsgleichgewicht zwischen Portlandit und der Porenlösung, deshalb ist die Porenlösung Ca²⁺ gesättigt. Die Calciumionen bewegen sich wie die in der Porenlösung gelösten Alkalien in Richtung der reaktiven kieselhaltigen Gesteinskörner und lagern sich an. Dadurch können die gelösten Ionen der Kieselsäure nicht durch die Doppelschicht treten und es kommt zu einer Erhöhung des Quelldrucks des Gels, da immer mehr Na⁺, K⁺, OH⁻ Ionen und H₂O-Moleküle durch die elektrische Doppelschicht diffundieren (Abb. 7b). Bei gleichzeitiger Bildung von AKR-Gel können die H⁺-Ionen der protonierten Silanol-Gruppen nicht durch die semipermeable Doppelschicht diffundieren. (Abb. 7c). Da immer mehr OH⁻-Ionen zur reaktiven Gesteinskörnung diffundieren und keine H⁺-Ionen durch die semipermeable Doppelschicht nach außen gelangen können, kommt es zu einem Druckaufbau,

¹ Silanolgruppen können an der Oberfläche von z.B. Quarzen bzw. Gesteinskörner vorkommen

der zu Rissbildung in der Zementsteinmatrix (Abb. 7d) und in der Gesteinskörnung führen kann (Abb.7e).

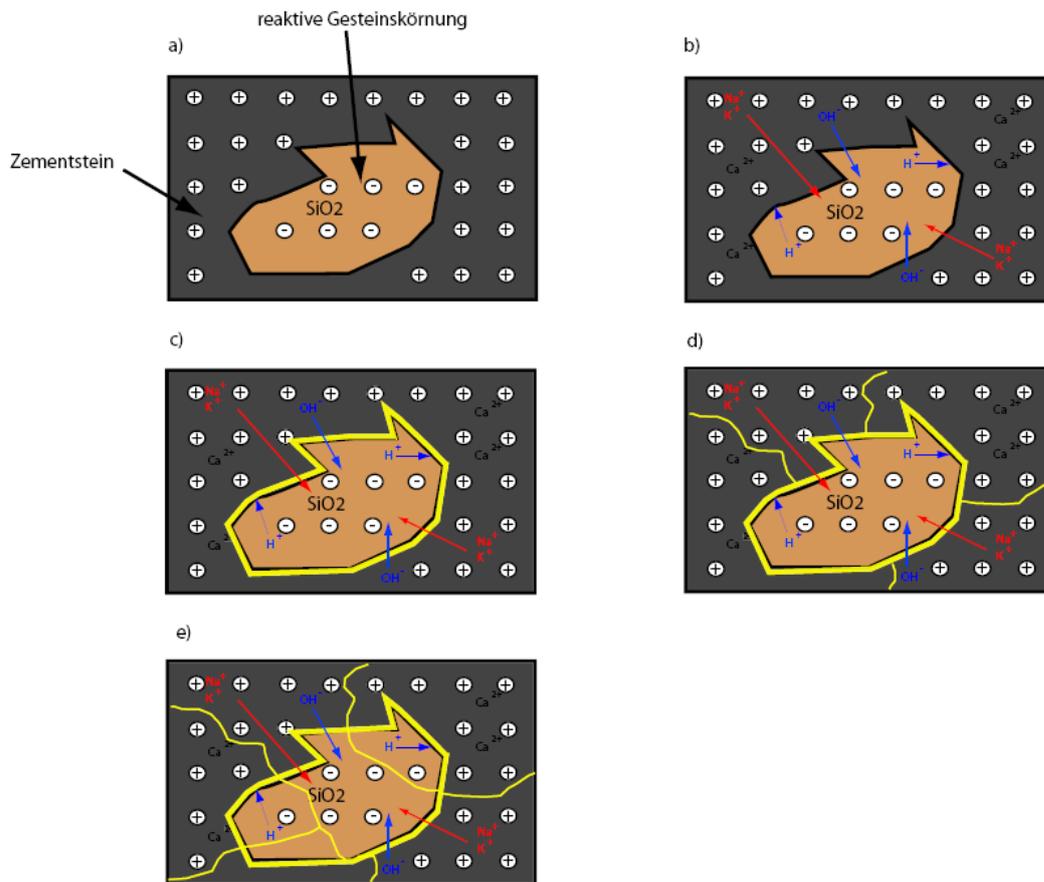


Abb. 7 Reaktionsmechanismus der AKR modifiziert nach Folliard und Chatterji [31].

Chatterji schrieb Ca²⁺-Ionen folgende Einflüsse auf eine AKR zu:

- Eine hohe Ca²⁺-Konzentration erniedrigt die Kieselsäurediffusion und
- beschleunigt das Eindringen von Na⁺, K⁺, OH⁻ sowie H₂O in die elektrische Doppelschicht zur reaktiven Gesteinskörnung.

Wenn nun reaktive Klinkerersatzstoffe/Zusatzstoffe verwendet werden, kommt es zu einer puzzolanischen Reaktion. Dabei reagiert die Kieselsäure der Zusatzstoffe mit den Ca²⁺-Ionen der Porenlösung. Die Ca²⁺-Konzentration in der Porenlösung wird dabei über die Lösung von Portlandit im Zementstein konstant gehalten. Im Verlauf dieser puzzolanischen Reaktion wird der Portlanditgehalt jedoch aufgebraucht und die Ca²⁺-Konzentration in der Porenlösung nimmt ab. Dies hat zur Folge, dass gelöste Kieselsäure aus der elektrischen Doppelschicht diffundieren kann und somit einer Bildung eines expansiven Reaktionsprodukts entgegenwirkt.

2.4.2 Der Chemismus der Reaktionsprodukte

Zum Chemismus von Reaktionsprodukten eines AKR-Gels existieren verschiedene Theorien. Nach Diamond [33] zeigen die AKR Reaktionsprodukte eine große Variabilität in der chemischen Zusammensetzung. Diese Variabilität spiegelt sich auch in deren Ca²⁺-Gehalt wieder. Er unterteilt die AKR-Gele deshalb in „high Ca“- und „low Ca“-Produkte.

Thomas [34] konnte zeigen, dass die Calciumkonzentration den Verlauf einer AKR und die Bildung von Reaktionsprodukten beeinflusst. Er beobachtete, dass eine markante Expansion des Gels nur auftrat, wenn genügend Portlandit (CH) im Zementssystem zur Verfügung stand (bzw. die Calciumkonzentration in der Porenlösung genügend hoch war). Die Gele in Systemen mit geringem Portlanditgehalt zeigten nur geringe Expansionen. Diese Beobachtungen bestätigen die früheren Experimente, die von Diamond [33] durchgeführt wurden und den zuvor von Chatterji [31] vorgestellten Reaktionsmechanismus.

Es ist von vielen Autoren beobachtet worden, dass es bei den gelförmigen Reaktionsprodukten über die Zeit zu einer Kristallisation kommen kann. Dazu wurden verschiedene Mechanismen postuliert. Thaulow [35] und andere Autoren zeigten [6], dass die kristalline Form des Öfteren in Rissen in den Gesteinskörnungen zu beobachten war. In den Rissen in der Zementsteinmatrix hingegen war das gelförmige AKR Reaktionsprodukt zu beobachten. Thaulow schloss aus dieser Beobachtung, dass der Unterschied zwischen dem kristallinen und amorphen Reaktionsprodukt in der unterschiedlichen Umgebung der Porenlösung und dem Zementstein zu suchen ist.

Helmuth und Stark [36] zeigten in ihren Untersuchungen, das AKR-Gele als Mischphasen eines Zweikomponentensystems mit Endgliedern von etwa konstanter Zusammensetzung betrachtet werden kann. Dabei bildet ein Endglied ein Alkalisilikat (17 % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ und 83 % SiO_2) und das andere Endglied ein Alkali-Calcium-Silikat (6,6 % $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$, 52,6 % CaO und 40 % SiO_2 , alle Angaben in Masse-%). Diese Werte stimmen sehr gut mit den Untersuchungen von Powers [37, 38] überein.

Thaulow [35] bestimmte für die amorphen AKR-Gele einen Si-Gehalt von 55-63 %, für Ca 20-30 % und für die Alkalien (Na+K) einen Wert von 15 %. Für die kristallinen AKR-Reaktionsprodukte fand er nahezu konstante Werte von Si =70 %, Ca = 15 % und Na+K = 15 % (Abb. 8). Thaulow zeigte auch, dass amorphe Reaktionsprodukte, welche in engem Kontakt mit der Zementsteinmatrix stehen, in altem Betonen Ca-reicher als in jungem Betonen sind. Außerdem wies er nach, dass die Menge an Ca mit der Entfernung zu der Gesteinskörnung zunimmt. Aus dieser Beobachtung schloss er, dass der Ca-Gehalt im Reaktionsprodukt abhängig ist von dem Ionenaustausch zwischen dem Produkt und dem Zementstein, dem Abstand des Produkts zur reaktiven Gesteinskörnung und der Auslagerungszeit des Reaktionsprodukts in der Zementsteinmatrix.

Die Untersuchungen von Müller et al. [6] an einem alten Wasserbauwerk aus trasszementhaltigem Beton aus den 1930er Jahren, das AKR Schäden aufwies, zeigten bei der Analyse der AKR-Produkte eine ähnliche chemische Zusammensetzung wie die bei Thaulow beschriebenen AKR-Gele. Es stellte sich heraus, dass sich die chemische Zusammensetzung des AKR-Produkts in kristalliner und gelförmiger Ausbildung in den Poren und der Gesteinskörnung unterschieden (Abb. 9). Zusätzlich wurden sehr calciumreiche und alkaliarme Reaktionsprodukte mit Ca/Si-Verhältnissen von $> 0,5$ beschrieben.

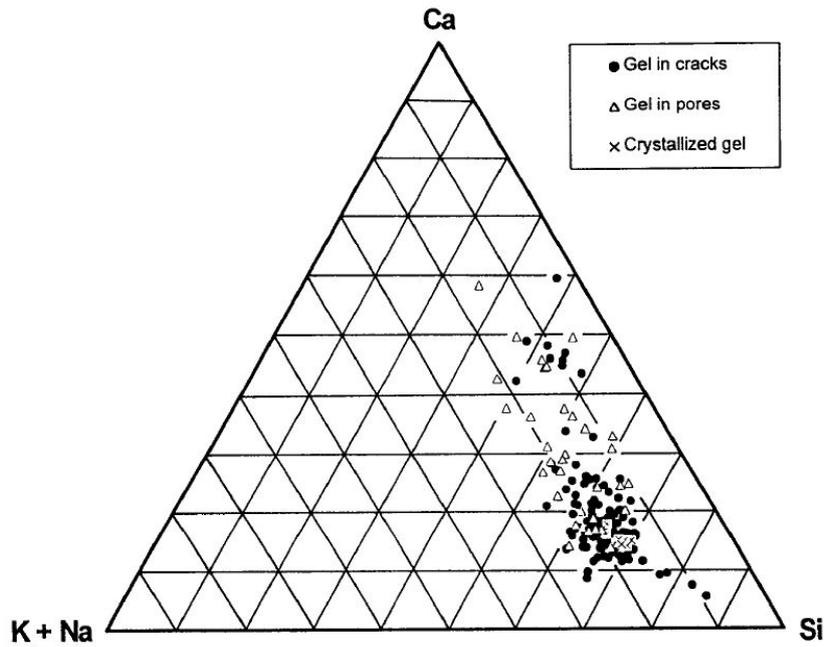


Abb. 8 Zusammensetzung des Chemismus von AKR-Reaktionsprodukten aus AKR-geschädigten alten Betonen (Angaben in M.-%). Aus [35].

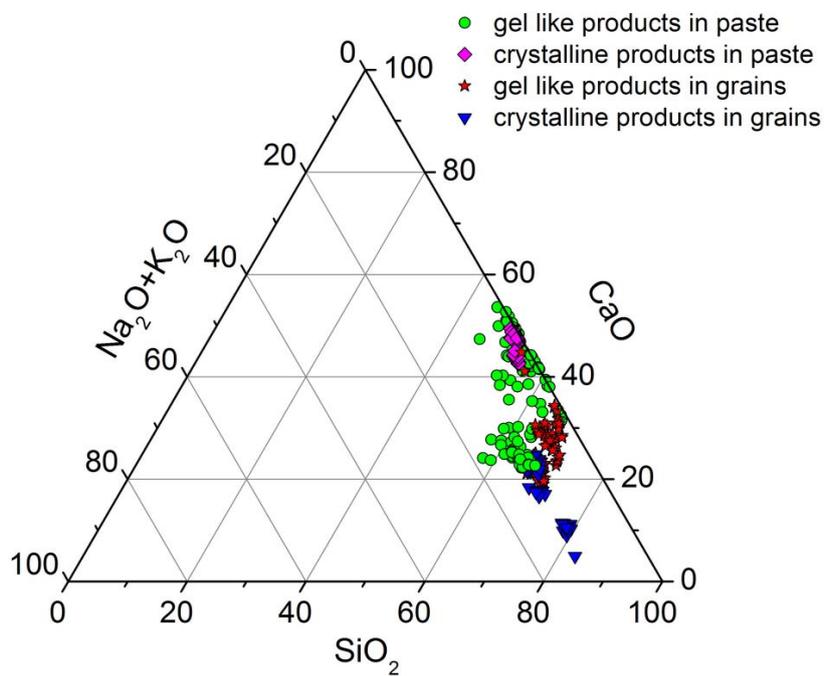


Abb. 9 Chemische Zusammensetzung eines AKR-Gels in einem trasszementhaltigen Beton aus den 1930-er Jahren (in M.-%). Aus [6].

2.5 Klinkerersatzstoffe und Betonzusatzstoffe

Bei Klinkerersatzstoffen und Betonzusatzstoffen handelt es sich, wie eingangs erwähnt, oftmals um dieselben anorganischen Stoffe. Sie werden dem Zement aus Nachhaltigkeitsgründen als Hauptbestandteil (Klinkerersatzstoffe) oder dem Beton aus Gründen der Verarbeitung, Dauerhaftigkeit oder Festigkeit zugegeben (Zusatzstoffe). Es existieren zwei Typen dieser Stoffe: inerte und reaktive. Zu den inerten Zusatzstoffen werden Gesteinsmehle wie Kalksteinmehl und Basaltmehl gezählt. Die reaktiven Stoffe können im Zementssystem mit der Porenlösung zu Hydratphasen reagieren und werden wie folgt eingeteilt:

- **Latent-hydraulische Stoffe** reagieren in geringem Umfang mit Wasser (die Hydratation ist jedoch wesentlich schwächer als bei Zement). Dazu zählen z.B. Hüttensand und kalkreiche Flugaschen.
- **Puzzolanische Stoffe** hydratisieren nicht selbständig, sondern benötigen eine Anregung, z.B. durch Portlandit. Puzzolanische Stoffe sind Flugaschen mit niedrigem Calciumgehalt, Mikrosilika und natürliche Stoffe wie z.B. Trass und Diatomeenerden.

Die puzzolanischen Klinkerersatz- und Zusatzstoffe enthalten einen hohen Anteil an reaktiven amorphen oder glasigen Silikaten. Diese können im Zementstein des Betons mit Portlandit zu Calciumsilikathydratphasen (C-S-H-Phasen) reagieren. Bei dieser Reaktion sinkt der pH-Wert der Porenlösung unter gleichzeitiger Reduktion des Gehalts an Portlandit. Silikatische Gläser enthalten oftmals einen höheren Anteil an Al_2O_3 (z.B. Hüttensand, Flugasche, vulkanische Gläser), das bei der Hydratationsreaktion in die C-S-H-Phasen mit eingebaut werden kann [10, 16, 19, 39].

Die Zemente mit Klinkerersatzstoffen als Zementhauptkomponente sind nach DIN-EN197-1 in vier Hauptgruppen unterteilt [40].

- CEM II Portlandkompositzement
- CEM III Hochofenzement
- CEM IV Puzzolanzement
- CEM V Kompositzemente

Diese klinkerärmeren Zemente können erfahrungsgemäß hervorragende Eigenschaften besitzen, wie höhere Festigkeiten, geringere Hydratationswärme, geringere Permeabilität und eine erhöhte Resistenz gegenüber chemischen Schädigungsmechanismen. So konnte Hill [41] in seinen Experimenten zeigen, dass eine Sulfatschädigung an Beton bei Verwendung von Kompositzementen deutlich weniger wahrscheinlich war, als in Betonen mit reinen Portlandzementen. In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei Einsatz von Flugasche [9, 11, 42], Hüttensand [10, 12] oder Mikrosilika [13, 14] der Verlauf einer AKR in Beton positiv beeinflusst werden kann. So konnte beispielsweise Schmidt [11] zeigen, dass der Einsatz der Flugasche die Gefahr einer auftretenden AKR deutlich reduziert und Untersuchungen von Schäfer und Meng [43] haben ergeben, dass bei einem Hüttensandanteil ≥ 30 M.-% praktisch keine AKR-Schäden mehr auftreten.

2.5.1 Flugasche

Flugaschen sind feinkörnige Verbrennungsrückstände, welche in Kohlekraftwerken in den Elektrofiltern zur Abgasreinigung abgeschieden werden. Sie entstehen bei Temperaturen von 800 °C bis 1700 °C und erstarren dabei überwiegend in glasiger Form. Geschieht das Erstarren noch im Flug, entstehen die typischen kugelförmigen amorphen Glaspartikel, die teilweise kristalline Anteile enthalten können. Den amorphen Glaspartikeln wird der Hauptanteil der puz-

zolanischen Reaktionsfähigkeit zugeschrieben. Ihre mineralogische Beschaffenheit und chemische Zusammensetzung ist abhängig von der Ausgangssubstanz. Die chemische Zusammensetzung entspricht der Zusammensetzung des in der Kohle enthaltenen nicht brennbaren anorganischen Anteils. Ihre Hauptbestandteile sind SiO_2 und Al_2O_3 und je nach Art der Kohle CaO .

In Deutschland kommen im wesentlichen zwei Typen von Flugasche vor: Braunkohlenflugaschen und Steinkohlenflugaschen. Sie sind je nachdem silikatisch-kalkhaltig oder aluminosilikatisch zusammengesetzt. In Deutschland wird im Beton zum größten Teil Steinkohlenflugasche verwendet. Sie muss nach der DIN EN 450-1 einen Anteil an reaktionsfähigem SiO_2 von mindestens 25 M.-%. und einen geringeren Anteil an reaktionsfähigem CaO von kleiner 10 M.-% besitzen. Sie werden als silikatische oder siliziumreiche Flugaschen bezeichnet. Zurzeit sind kalkreiche Flugaschen ($\text{CaO} > 10$ M.-%) in Deutschland, bis auf eine Ausnahme, noch nicht als Betonzusatzstoff zugelassen.

In zahlreichen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass der Steinkohlenflugasche eine hemmende Wirkung bezüglich einer AKR zugeschrieben werden kann [9, 11, 42, 44, 45]. Es erwies sich, dass es mit steigendem Austausch von Zement durch Steinkohlenflugasche, neben der Erniedrigung der OH^- -Ionenkonzentration in der Porenlösung aufgrund der puzzolanischen Reaktion [10, 44], auch zu einer Absenkung der Alkalikonzentration in der Porenlösung kam [10]. In Abbildung 10 ist der Einfluss der Flugasche auf die Alkalikonzentration und den pH-Wert der Porenlösung von Zementstein graphisch über die Zeit dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass in den flugaschehaltigen Zementsteinen K1-V1-20 (= Anteil von 20 % Flugasche) bis K1-V1-60 (= Anteil von 60 % Flugasche), abhängig vom Flugaschegehalt, ein tieferer pH-Wert im Zementstein vorliegt als im Referenzzementstein Z1 ohne Flugasche.

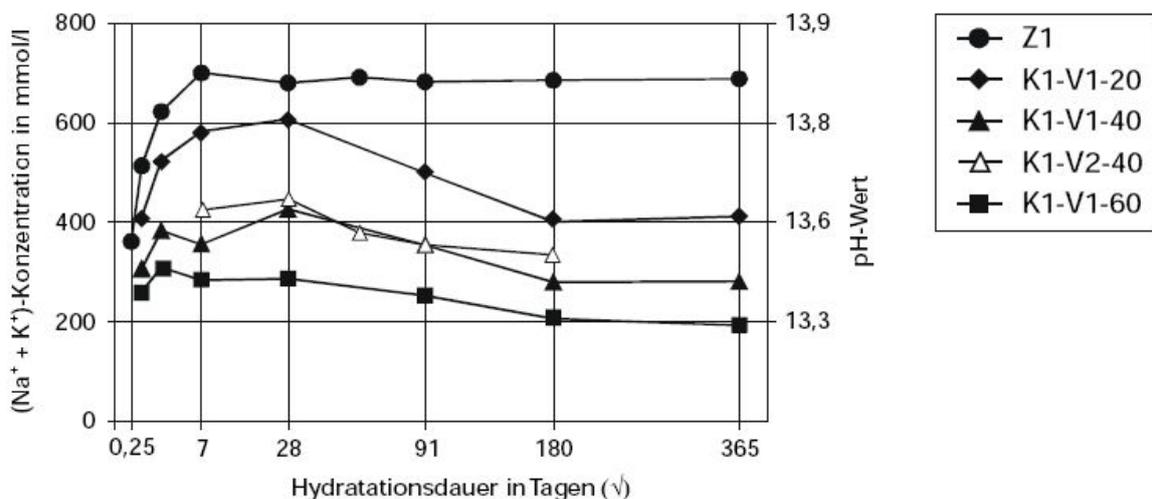


Abb. 10: Einfluss des Flugaschengehaltes von Zement auf den pH-Wert der Porenlösung. Aus [10].

2.5.2 Hüttensand

Hüttensand ist eine Schlacke, die bei der Produktion von Roheisen im Hochofen anfällt. Die abgetrennte ca. 1500 °C heiße Hochofenschlacke wird mit Wasser auf Temperaturen unter 100 °C abgeschreckt. Dieser Prozess wird Granulation genannt. Der im Granulationsprozess gewonnene Hüttensand liegt überwiegend in glasiger Form vor und besteht aus scharfkantigen Körnern mit einer Größe von bis zu einigen Millimetern. Der hohe Glasanteil ist verantwortlich für die Reaktionsfähigkeit des Hüttensandes. Bereiche der Zusammensetzung für Hüttensand

liegen bei 30-50 M.-% CaO, 0-20 M.-% MgO, 25-40 M.-% SiO₂ und 5-25 M.-% Al₂O₃ [46]. In den Arbeiten von Hester [47], Kwon [48], Schäfer [10] konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Hüttensand eine hemmende Wirkung auf eine AKR hat. Hüttensand reagiert auch ohne Zusatz fremder Stoffe mit Wasser und bildet Calciumsilikathydrate. In Gegenwart von Anregern wie Klinker, Sulfate oder Calciumhydroxid läuft diese Reaktion wesentlich schneller ab. Da der Anreger in erster Linie die Reaktion beschleunigt und sein CaO-Gehalt für die Bildung des Calciumsilikathydrat keine Rolle spielt, wird Hüttensand auch als latent hydraulischer Stoff bezeichnet.

2.5.3 Mikrosilika

Mikrosilika ist ein Nebenprodukt bei der Gewinnung von Silizium und Siliziumlegierungen durch die Reduzierung von Quarz im Lichtbogenofen. Bei diesem Prozess entsteht dampfförmiges Si, welches mit Sauerstoff zu SiO₂ oxidiert. Dabei entstehen kugelförmige Partikel mit einer Größe von 0,01 bis 0,5 µm, somit sind sie ca. 100-mal kleiner als Zementpartikel. Die chemische Zusammensetzung des Mikrosilika ist abhängig von dessen Ausgangsmaterialien und zeigt daher eine große Variation. Der SiO₂-Gehalt von Mikrosilika liegt zwischen 80-98 M.-%. Je nach verwendeter Legierung können noch geringe Mengen von Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO und CaO enthalten sein. Die puzzolanische Reaktivität ist abhängig vom Herstellungsprozess und von der chemischen Zusammensetzung. Aufgrund seiner extrem kleinen Korngröße und seiner extrem großen Oberfläche reagiert es sehr schnell. So ist aus der Literatur bekannt, dass Mikrosilika schon nach einer Hydrationsdauer von wenigen Tagen die Alkalikonzentration der Porenlösung senken kann. Maas [49] konnte bei Versuchen mit Mikrosilika nachweisen, dass die AKR-hemmende Wirkung von der Beschaffenheit und der Korngröße des Mikrosilika abhängig ist. Die Untersuchungen von Schäfer [10] ergaben, dass der Alkaligehalt und der pH-Wert bei mikrosilikahaltigen Zementen mit der Zeit wieder ansteigen. Der Anstieg der Alkalikonzentration ist umso höher, je geringer der Mikrosilikagehalt im Zement ist.

2.5.4 Trass

Bei Vulkanausbrüchen treten neben gasförmigen Produkten überwiegend feste pyroklastische Produkte wie Aschen, Lapilli und Bomben aus. Feste pyroklastische Auswurfprodukte werden unter dem Begriff Tephra zusammengefasst und entstehen bei sehr hochenergetischen, gasreichen Eruptionen. Die plötzliche Volumenzunahme von Gas, wenn es nicht mehr unter Druck in der Erdkruste steht, zerreißt das an die Erdoberfläche transportierte Magma regelrecht und schleudert Fragmente aus dem Krater heraus. Dabei werden die Fragmente in der Luft abhängig von ihrer Größe und Flugbahn, unterschiedlich ausgebildet und es entstehen Bomben (> 64 mm), Lapilli (2-64 mm) oder Aschen (< 2 mm). Als Tuffe werden Gesteine bezeichnet, die zu mehr als 75 % aus pyroklastischen Produkten aller Korngrößen bestehen [50]. Unverfestigte oder teilverfestigte Tuffe werden in einigen Ländern als **Trass** für die Zementindustrie abgebaut. Teilverfestigte Tuffe und Tuffe mit Lapilli oder Bomben werden zum Teil aufgemahlen (z.B. als Zumahlstoff bei der Klinkermahlung oder durch eine getrennte Mahlung).

Die chemische Zusammensetzung der Tuffe ist abhängig von ihrer magmatischen Entstehungsgeschichte. Da in den Versuchen ein Rheinischer Trass und zwei Trasse aus Italien verwendet wurden, wird nachfolgend nur auf den Unterschied der magmatischen Entstehungsgeschichte der beiden Trassstypen eingegangen.

Im Allgemeinen wird der Magmatismus folgendermaßen unterteilt [50] (Abb. 11):

1. Magmatismus in Extensionszonen (divergente Plattengrenzen)
 - 1a. Mittelozeanischer Rücken
 - 1b. Kontinentale Grabenbrüche
 - 1c. Back-Arc Basins („Randbecken“)
2. Magmatismus in Kollisionszonen (konvergente Plattengrenzen z. B. über Subduktionszonen)
 - 2a. Kontinentale Kollisionszonen, Gebirgsbildungen
 - 2b. Inselbögen
 - 2c. Aktive Kontinentalränder
3. Magmatismus ohne Zusammenhang zu großtektonischen Ereignissen
 - 3a. Ozeaninseln
 - 3b. Kontinentale Flussbasalte
 - 3c. Interkontinentale Magmatite

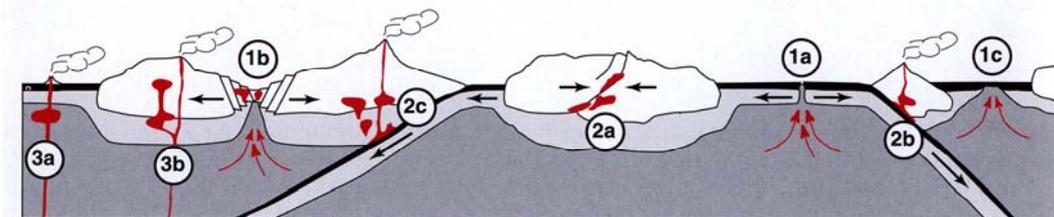


Abb. 11 Tektonische Zuordnung magmatischer Prozesse. Die Nummern beziehen sich auf die Nummerierung im Text. Aus [50].

Das Vulkangebiet des Rheinischen Trass kann sowohl zum Typ **1b** und **3c** gezählt werden. Dieser Typ entsteht durch passives Rifting oder durch eine Aufwölbung der Asthenosphäre. Dies geschieht häufig im Zusammenspiel mit einem Mantelplume, welcher die subkontinentale Lithosphäre ausdünnert. Dabei wird sie aufgeschmolzen oder zu den Seiten weggedrückt, was schließlich die Kruste zum Auseinanderbrechen bringt. Als Plumes bezeichnet man die aus dem unteren Mantel aufsteigenden Gesteinspartien mit oder ohne Schmelzanteile. Diese können durch festes Gestein aufsteigen, da aufgrund unterschiedlicher Temperaturen und Zusammensetzungen ein Dichteunterschied herrscht. Plumes bilden durch Druckentlastung primitive oder angereicherte Schmelzen. In Grabenbrüchen können sich die Schmelzen aus verschiedenen Quellen bilden, nämlich aus der subkontinentalen Lithosphäre, der Kruste, dem verarmten Mantel der oberen Asthenosphäre und dem angereicherten bzw. primitiven Mantel, der vom Plumes nach oben gebracht wurde. Dementsprechend weisen die Gesteine in den Grabenbrüchen eine verschiedene chemische Signatur aus.

Die Eifel liegt in der mitteleuropäischen känozoischen Vulkanprovinz, welche sich von der Auvergne in Frankreich über den Rheingraben, den Hegau, die Eifel, den Westerwald, die Hessische Senke und die Rhön in den Egergraben erstreckt [50].

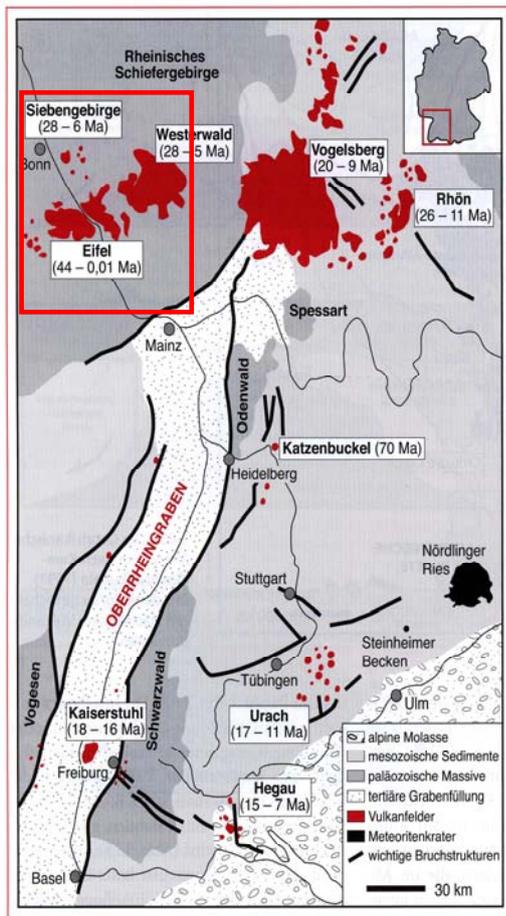


Abb. 12 Magmatismus im Oberrheingraben nach [50].

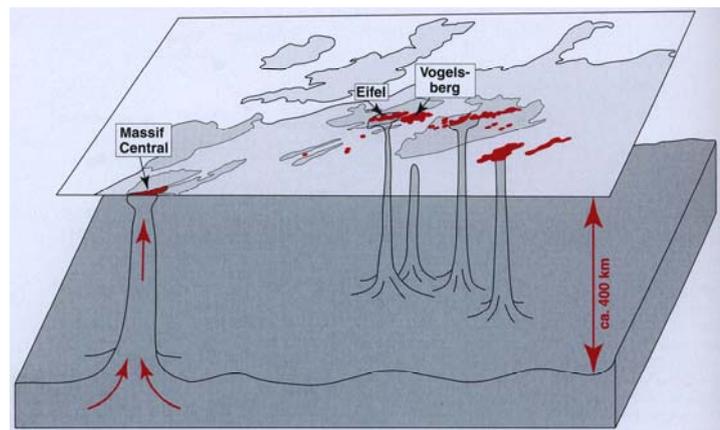


Abb. 13 Hypothetische Plumes unter Mitteleuropa. Aus [50].

Das Ablagerungsgebiet des Rheinischen Trass liegt im Neuwieder Becken in der Eifel. Die Eifel wiederum ist ein Teil des Rheingrabensystems (Abb. 12). In Folge der Kollision der Afrikanischen und Europäischen Platte im Tertiär kam es im Gebiet des heutigen Rheingrabens zu einer Dehnung der Kruste [51]. Nur ein kleiner Teil der Kruste, der Rheinische Schild, blieb weitgehend von der Dehnung verschont. Im Bereich des Neuwieder Beckens kam es im mittleren Tertiär zum Einbruch der Kruste, welche sich bis heute um bis zu 350 Meter senkte. Somit entstand eine Schwächezone in der Kruste, durch welche Magma eintreten konnte [52]. Neueste Forschungsarbeiten erklären den Vulkanismus im Oberrheingraben anhand von sehr kleinen Plumes mit geringen Durchmessern. Diese Plumes (Abb. 13) werden als kleine, nur über geologisch kleine Zeiträume aktive und vermutlich aus der Übergangszone im mittleren Erdmantel stammende Phänomene gedeutet. Die geförderten Zusammensetzungen sind extrem variabel und reichen von Phonolithen über Trachyte und Nephelinite bis zu Basalten. Dabei handelt es sich offenbar um kleinräumige Aufschmelzungen aus einem metasomatisch veränderten, flüidreichen Mantel, der durch tektonische Prozesse immer wieder unter Druckentlastung steht. Dadurch kommt es zu kleinen lokalen Aufschmelzungen.

Da im Gebiet der Eifel die Krustengesteine schon sehr kalt waren, konnten sich die aufsteigenden Schmelzen der Plumes bei der Abkühlung durch Wachsen und Ausscheiden von Kristallen chemisch besonders stark verändern. Aus den dunklen, eisen- und magnesiumhaltigen basaltischen Magmen sind durch Differentiation helle Aluminium-, Silizium-, Natrium-, Kalium- sowie wasser- und schwefelreiche Magmen entstanden, die Phonolitmagmen genannt werden.

Es wird ein Zusammenhang mit der alpinen Gebirgsfaltung vermutet, da es dabei gleichzeitig zu der beschriebenen Öffnung des Rheingrabens kam. Dies jedoch konnte noch nicht eindeutig bewiesen werden [50].

Der in der Arbeit verwendete Rheinische Trass stammte aus dem Gebiet von Rieden, westlich des Laacher Sees, und wurde dort aus Tuffsteinbrüchen abgebaut. Es ist ein weiches Gestein und kommt sowohl in feinkörniger wie auch in grobkörniger Form vor. Meist waren diese Gesteinsschichten in Kontakt mit dem Grundwasser. Dabei kam zur Bildung von Zeolithen wie Analcim, Phillipsit und Chabasit, welche durch früher gelockerte Gemenge von Bims und feinen Aschen zu einem leichten kompakten Gestein verfestigt wurden, die so genannten Wieberner und Ettringer Tuffsteine [52].

Die beiden italienischen Trasse stammen aus der Region der italienischen Vulkanfelder (Abb. 14). Die Geologie dieser Region ist sehr komplex und mit der Kollision der afrikanischen und europäischen Kontinentalplatten eng verknüpft, die vor 35 - 30 Mio. Jahren begann und noch bis heute andauert [51]. Da sich Afrika gegen Europa bewegte, kam es zur Subduktion des Piemont-Liguria-Ozeans und des adriatischen Mikrokontinents. Dabei wurde die ozeanische Platte des Piemont-Liguria Ozeans und der Adriatische Mikrokontinent in große Tiefen geschoben und wieder aufgeschmolzen. Gleichzeitig gab es eine Rotation im Gegenuhrzeigersinn von der Korsischen-Sardinischen-Platte gegen den Adriatischen Mikrokontinent [53]. Es entstand dabei der Vulkanbogen der sich über weite Teile von Italien erstreckt. Aufgrund dieser komplexen Geologie unterscheidet sich der Chemismus der einzelnen Vulkangebiete sehr stark (Abb. 14). Diese Gebiete sind Paradebeispiel für den quartären Vulkanismus und sind gekennzeichnet durch ultrapotassische (=kaliumreiche) Schmelzen. Sie können aber auch mit weniger kaliumreichen Schmelzen auftreten [54].

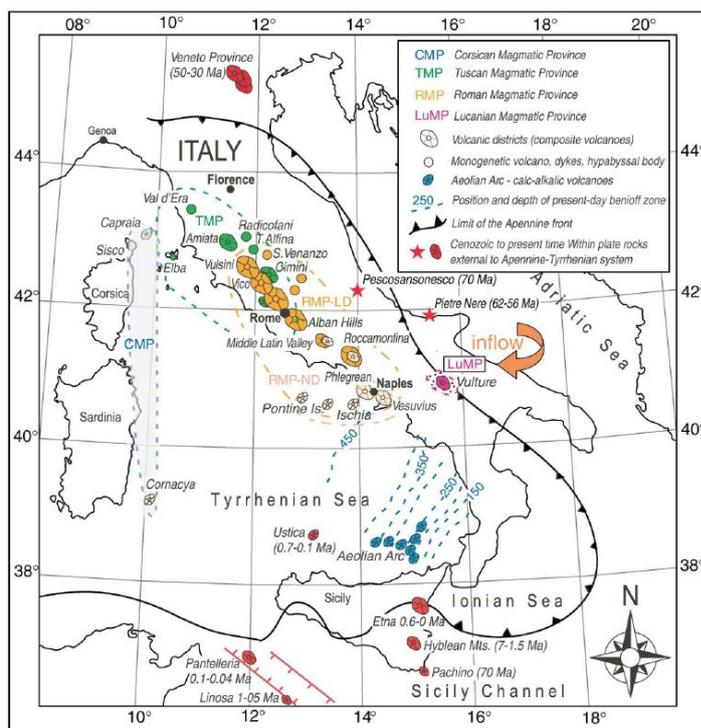


Abb. 14 Gebiet der Vulkanischen Felder in Italien. Aus [53].

Aufgrund ihrer geologischen Entstehungsgeschichte weisen die rheinischen und italienischen Trassvorkommen einen unterschiedlichen Chemismus auf. Der Trass aus den italienischen

Vorkommen wies nach Literaturangaben [55] deutlich höhere Kaliumgehalte auf als der Trass aus dem Vorkommen der Eifel [56] (Tab. 3).

Tab. 3 Zusammenstellung aus der Literatur: chemische Zusammensetzung verschiedener Trassproben aus dem Gebiet der Eifel und der Phelgräischen Felder. Angaben in M.%.

	Rheinischer Trass				Italienischer Trass (Phlegräische Felder)			
Autor	Liebig [56]		Schwiete & Ludiwig [57]	Ruckensteiner [58]	Avanzinelli [55]			
Bez.					95VS135	95VS131	97VS718b	UPFUC
Glühverl.	k. A	k. A	6,05	5,79	k. A	k. A	k. A	k. A
SiO₂	54,09	54,49	59,69	55,69	48,9	48,9	48,9	58,9
Al₂O₃	18,14	16,41	18,92	18,49	16,4	16,4	13,8	19,0
Fe₂O₃	4,98	4,97	1,80	5,00	9,21	9,59	7,84	4,16
MgO	1,28	1,60	1,61	1,82	4,37	4,49	7,52	1,73
CaO	2,59	4,21	3,50	4,33	8,95	9,65	12,4	3,14
Na₂O	3,65	0,97	4,71	1,59	2,69	2,49	1,89	2,61
K₂O	4,38	5,06	2,80	5,77	7,55	6,95	5,72	9,52
H₂O	8,23	11,50	k. A	k. A	k. A	k. A	k. A	k. A
CO₂	1,16	0,85	k. A	k. A	k. A	k. A	k. A	k. A
TiO₂	k. A	k. A	0,68	1,29	1,07	1,14	1,14	1,14
SO₃	k. A	k. A	Spuren	0,05	k. A	k. A	k. A	k. A

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass Trass einen hohen Anteil an Kieselsäure und an Aluminium besitzt. Diese liegen z.T. in reaktiver in Form in Gesteinsglas, Zeolithen und Tonmineralien vor oder sind an verhältnismäßig stabile kristalline Phasen gebunden (z.B. Quarz, Feldspäte, Foide, mafische Minerale). Zeolithe sind wasserhaltige Gerüstsilikate mit Al, Na und Ca als vorherrschende Kationen. Die Zeolithstruktur besteht aus einer regelmäßigen Anordnung von AlO⁴- und SiO⁴-Tetraedern, Hohlräumen und Kanälen. Dadurch haben sie eine hohe spezifische Oberfläche. Durch Aluminiumatome in Tetraederpositionen haben Zeolithe anionische Ladungen. An der inneren und äußeren Oberfläche befinden sich daher bei aluminiumhaltigen Zeolithen Kationen, die häufig in hydratisierter Form in der kanalartigen Gerüststruktur eingebaut sind und daher relativ leicht zugänglich und damit austauschbar sind. Austauschbare Kationen sind unter anderem Na⁺, K⁺, Ca²⁺ und Mg²⁺ (Abb. 15). Alkalien und Magnesium könnten in den Zeolithen deshalb in Wechselwirkung mit Porenlösung eines Zementsteins einfach und schnell gegen Calciumionen ausgetauscht werden, wobei Natrium und Kalium zum Gesamtkaligehalt der Porenlösung beitragen können.

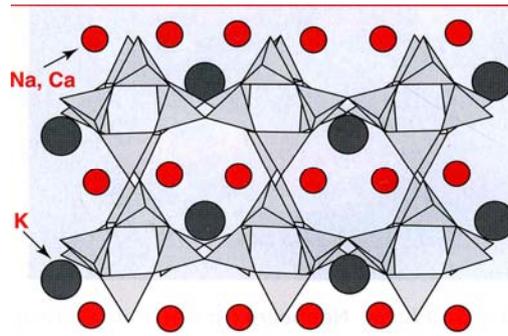


Abb. 15 Kristallstruktur des Zeoliths Philippsit. Alkalien besetzen die großen Hohlräume im SiO₄-Tetraedergerüst. Aus [50].

Es ist noch nicht eindeutig geklärt, ob Trass eine AKR-hemmende Wirkung zugeschrieben werden kann. So erwähnt beispielweise Massazza [7], dass natürliche Puzzolane AKR-hemmende Wirkung haben könnten, da in Italien keine AKR Schäden bekannt sind und sehr oft Trasszemente verwendet wurden. Es existieren aber in Deutschland Schleusenwerke aus Trasszementen aus den 1930er Jahren, die massive AKR Schäden aufweisen [6, 59]. Ekolu [8] konnte in seinen Laborexperimenten zeigen, dass vulkanische Asche eine AKR-hemmende Wirkung gegenüber einer AKR haben kann, während vulkanische Tuffe eine AKR induzieren kann. In seinen Laborexperimenten untersuchte er aber nicht die Ursache des unterschiedlichen Verhaltens.

2.6 Zusammensetzung und Hydratation des Portlandzements

Die Hauptbestandteile des Portlandzements sind sogenannte Klinkerphasen (Tab. 4). Die Klinkerphasen entstehen im Zuge des Brennvorgangs des Rohmehls, einer Mischung von Kalk- und Tonstein, im Drehrohrföfen der eine maximale Temperatur von 1450 °C erreicht. Das Zementssystem kann vereinfacht mit den vier chemischen Hauptkomponenten Calciumoxid (CaO), Siliziumoxid (SiO₂), Aluminiumoxid (Al₂O₃) und Eisenoxid (Fe₂O₃) beschrieben werden.

Tab. 4 Übersicht über die Klinkerphasen, die beim Brennen von Portlandzementrohmeilmischungen auftreten

Name	Summenformel	Abkürzung
Tricalciumsilikat (Alit)	3CaO·SiO ₂	C ₃ S
Dicalciumsilikat (Belit)	2CaO·SiO ₂	C ₂ S
Tricalciumaluminat	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A
Tetracalciumaluminatferrit	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Als Erstarrungsregler (s.u.) werden während des Mahlens der Klinker Calciumsulfate zugegeben, wobei sich in der Praxis ein Gemisch von Gips (CaSO₄·2H₂O) und Anhydrit (CaSO₄) etabliert hat. Beim Mahlen wird der Gips hierbei teilweise zu Anhydrit und Bassanit (CaSO₄·0.5H₂O) entwässert.

Bei der Zugabe von Wasser zu Zement kommt es zur chemischen Reaktion, welche als Hydratation bezeichnet wird. Aus den beiden Klinkerphasen Tricalcium- und Dicalciumsilikat entsteht das Hauptreaktionsprodukt die Calciumsilikathydrate (C-S-H-Phasen, Tab. 5). Die beiden Calciumsilikate sind chemisch ähnlich, die Hydratation des C₃S läuft jedoch schneller ab als diejenige des C₂S. Vor der eigentlichen Hydratation der Calciumsilikatklinker reagiert C₃A mit dem Sulfatträger zu Ettringit bzw. Trisulfat (Ca₆Al₂(SO₄)₃(OH)₁₂·26H₂O) und leitet das Erstarren des Zements ein. Im Zuge der weiteren Hydratation der Calciumsilikate und Calciumaluminat wird Ettringit dann zu Calciumaluminatmonosulfathydrat (Monosulfat) abgebaut. In Tabelle 5 sind die Hydratationsreaktion der Calciumsilikatklinker und in Tabelle 6 die Reaktionen der Aluminatphasen gegeben (nach Locher [60]).

Tab. 5 Übersicht über die Reaktionen der Klinker

Klinkerphase	Reaktionspartner	Hydratphase
C ₃ S	C ₃ S + (3-x+y) H	C _x SH _y + (3-x) CH
C ₂ S	C ₂ S + (2-x+y) H	C _x SH _y + (2-x) CH

C₃S und C₂S mit C = CaO, S = SiO₂, H = H₂O.

Tab. 6 Übersicht der Hydratationsreaktionen der Aluminatphasen

Klinkerphase	Reaktionspartner	Hydratphase
C ₃ A mit Calciumsulfat	C ₃ A + 3 CS' + 32 H C ₃ A + CS'H ₂ +10 H	C ₆ AS' ₃ H ₃₂ Ettringit C ₄ AS'H ₁₂ Monosulfat
C ₃ A ohne Calciumsulfat	C ₃ A + CH + 18 H C ₃ A + 6 H	C ₄ AH ₁₉ Calciumaluminathydrat C ₃ AH ₆ Hydrogranat
C ₄ AF mit Calciumsulfat	C ₄ AF + 3CS'H ₂ + 30H 2C ₄ AF+ C ₆ AS' ₃ H ₃₂ + 12H	C ₆ AS' ₃ + CH+ FH ₃ AFt 3 C ₄ AS'H ₁₂ + 2 CH + 2 FH ₃ AFm
C ₄ AF ohne Calciumsulfat	C ₄ AF + 2 CH+ 10 H	2C ₃ (A,F)H ₆ Hydrogranat

A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, S' = SO₃

2.7 Struktur und Eigenschaften der C-S-H-Phasen

2.7.1 Struktur der C-S-H-Phasen

Es existieren zwei Typmorphologien von C-S-H-Phasen [16-19, 46]. Der C-S-H Typ (I) liegt in Form von Einzelfasern und der C-S-H Typ (II) liegt in Form von Faserbündeln vor. Beide sind röntgenamorph, die Typ (I) Form kann aber strukturell durch das Mineral 1,4 nm Tobermorit (5CaO·6SiO₂·5H₂O) beschrieben werden, das eine sandwichartige Struktur aufweist mit einer Doppelschicht von [CaO₂]²⁻ und Ketten aus [SiO₄]⁴⁻ Tetraedern (Abb. 16). Die [SiO₄]⁴⁻ Tetraedern sind untereinander und mit der [CaO₂]²⁻ Doppelschicht über gemeinsame Sauerstoffatome verbunden. Von je drei [SiO₄]⁴⁻ Tetraedern ist allerdings ein Tetraeder ein sogenanntes

„Brückentetraeder“, da es nur mit den beiden benachbarten Tetraedern gemeinsame Sauerstoffatome besitzt. Diese sich wiederholende Anordnung wird als „Dreierketten“ bezeichnet.

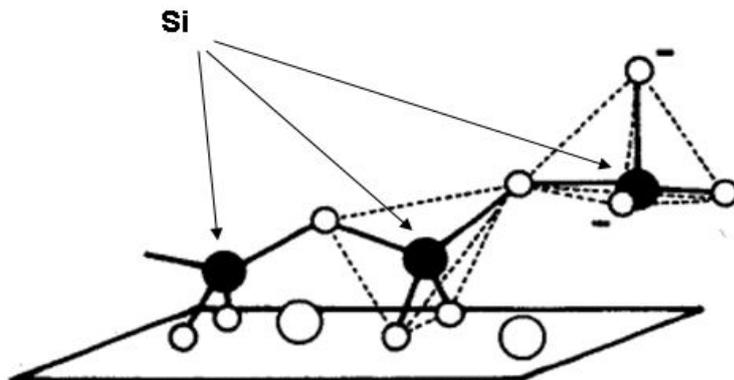


Abb. 16 Struktur der C-S-H-Phasen basiert auf dem Mineral Tobermorit. Aus [61].

2.7.2 Alkalibindungsverhalten der C-S-H-Phasen

Die Alkalibindung kann im Allgemeinen durch die Sorption an den basischen Silanolgruppen (Si-OH) beschrieben werden. Hong [20, 21] und Sade [62] beobachteten, dass die Alkalibindung abhängig ist vom Ca/Si-Verhältnis des Zementsteins. Er postulierte, wenn das Ca/Si-Verhältnis sinkt, dann steigt das Bindungsvermögen. Eine Erklärung für dieses Phänomen liefert das Strukturmodell des Tobermorits. Die Kettenlänge des Tobermorits wird als unendlich angenommen und zwei Brücken-Sauerstoffe sind nicht mit der $[CaO_2]^{2-}$ Schicht koordiniert. Daher ist die Oberfläche negativ geladen und es kann zu einem Ladungsausgleich durch Anbindung von positiv geladenen Alkaliionen kommen. Es ist bekannt, dass sich bei einem höheren Ca/Si-Verhältnis die Tetraederketten aufspalten und es zu einer Eliminierung der Brückentetraeder kommt.

2.7.3 Der Einfluss von Al^{3+} auf die Alkalibindung der C-S-H-Phasen

In der Literatur werden zwei verschiedene Hypothesen vertreten, die versuchen, den Einfluss von Puzzolanen oder latent hydraulischen Stoffen auf den Chemismus und das Alkalibindungsverhalten von C-S-H-Phasen im Zementstein zu erklären.

Hypothese 1: In den C-S-H-Phasen des Portlandzements kann nach kristallchemischen Gesetzen Silizium durch Aluminium substituiert werden, da die beiden Atome ähnliche Atomradien besitzen [20, 21]. Nach Richardson [19] wird dabei ein Si^{4+} am Brückentetraeder durch ein Al^{3+} ersetzt. Als Folge entsteht durch diese Substitution ein negatives Ladungsdefizit an den C-S-H-Phasen. Da die für die AKR verantwortlichen Alkalien Na und K positive einwertige Ladungen besitzen, werden diese zum Ladungsausgleich an den C-S-H-Phasen angebonden.

In den Versuchen von Hong [20, 21] stellte sich heraus, dass bei synthetisch hergestellten C-S-H-Phasen, bei welchen Si durch Al substituiert wurde, das Alkalibindungsvermögen höher war. Ein weiterer Mechanismus stellt die Sorption der Alkalien an den Silanolgruppen der C-S-H-Phasen dar, welche aber schwächer ausgeprägt ist.

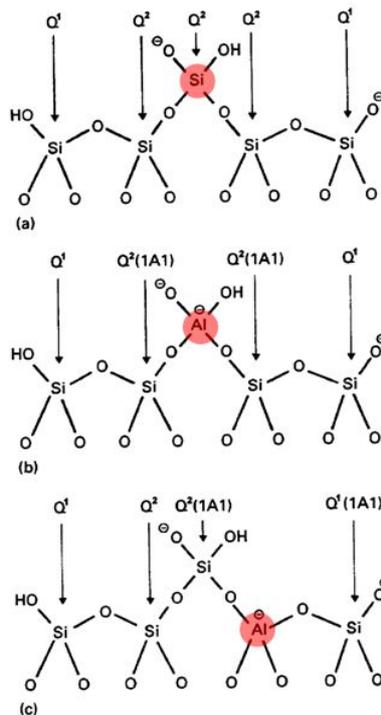
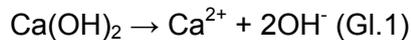


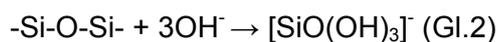
Abb. 17 Substitution von Silizium durch Aluminium in den C-S-H-Phasen. Aus [16].

Hypothese 2: Es wird davon ausgegangen, dass es bei der Verwendung von puzzolanischen Stoffen zu einer puzzolanischen Reaktion kommt. In der Porenlösung laufen folgende Reaktionen ab [63]:

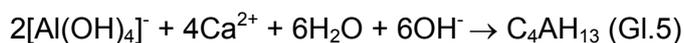
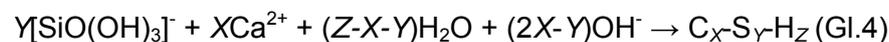
Hydrolyse von Portlandit in der Porenlösung (Gl.1)



Die OH- Ionen reagieren mit dem im Puzzolan gebundenen SiO_2 oder $[\text{Al}_2\text{O}-\text{SiO}_3]^{2-}$ und brechen anschließend die Bindungen zwischen dem Gitter und dem Sauerstoff auf (Gl.2 und Gl.3).



Die $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ und $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ gehen dabei in Lösung und reagieren mit den Ca^{2+} Ionen der Porenlösung. Es kommt zur Ausbildung von C-S-H-Phasen und Aluminathydratphasen (Gl. 4 und Gl.5).



Takemoto [64] beobachtete, dass gelöstes Monosilikat schneller diffundiert als gelöstes Aluminium und dass eine höhere Ca^{2+} -Konzentration benötigt wird, um die Calciumaluminathydratphasen zu bilden. Er zeigte, dass die hydratisierten Calciumaluminathydrate aus den Puzzolanen ausgefällt werden und die hydratisierten Calciumsilikate sich um die Puzzolane selbst bilden. Die Reaktionsprodukte, die in situ aus den puzzolanischen Stoffen entstanden sind, widerspiegeln ihre ursprüngliche Zusammensetzung, d.h. sie sind beispielsweise Al- und Si-reicher als die C-S-H-Phasen von Portlandzement.

Der Einfluss der Zusatzstoffe lässt sich durch mikrochemische Analysen an der Mikrosonde (EMPA) oder am Rasterelektronenmikroskop (REM) bestimmen. Dabei werden Punktmessun-

gen in den äußeren C-S-H-Phasen durchgeführt, da bei diesen der Einfluss der Zusatzstoffe am besten sichtbar ist. Da sich die Strukturen der C-S-H-Phasen in Bereichen von wenigen Nanometern abspielen und die elementanalytische Auflösung bei den EMPA- und REM-Verfahren maximal im Bereich von 2 µm liegt, kann nur eine semiquantitative Aussage über die Atomverhältnisse der C-S-H-Phasen getroffen werden [65]. Die gemessenen Si/Ca-Verhältnisse weisen hierbei eine große Streuung auf [16-19, 39, 46]. Der Grund dafür liegt in der teilweise inhomogenen feinen Verwachsung verschiedener Hydratationsprodukte (z.B. C-S-H mit AFm, AFt und Portlandit), die unterhalb der Analysenauflösung liegen und die erfassten Bereiche infolge dessen keine konstante Stöchiometrie haben. Aus diesen Erkenntnissen postulierte Scrivener [65] folgende Methode zur Bestimmung des Chemismus, „Do more less well“, d.h. um der statistischen Ungenauigkeit der Analysen Rechnung zu tragen, sollte man möglichst viele Punkte messen, um Trends in der Zusammensetzung des Zementsteins zu erfassen. In der Literatur findet man für die äußeren C-S-H-Phasen ein mittleres Si/Ca-Atomverhältnis in Portlandzementstein Werte von 0,48-0,58 und für das mittlere Al/Ca-Verhältnis einen Wert von 0,04-0,08 (Abb. 18).

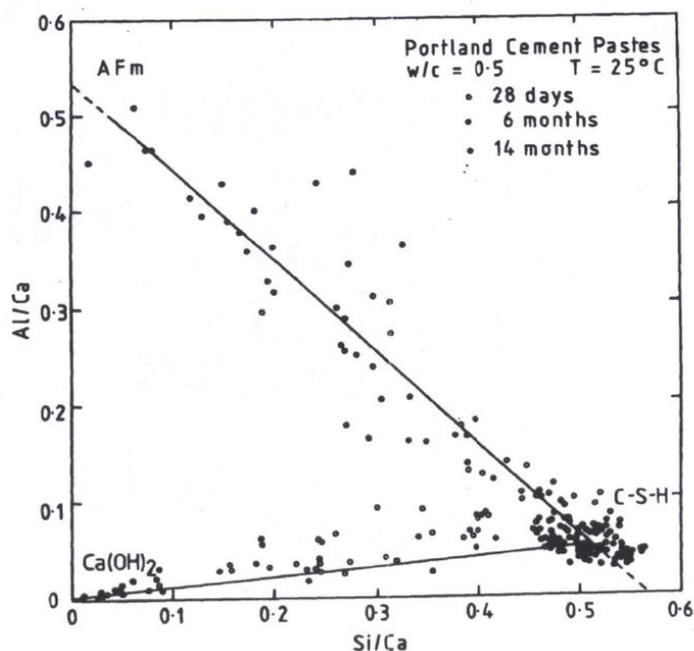


Abb. 18 Typische Al/Ca- und Si/Ca-Atomverhältnisse der C-S-H-Phasen von Portlandzement. Aus [46]

2.7.4 Der Einfluss von Flugasche

Aus der Literatur ist bekannt, dass es bei Einsatz von Flugasche zu einer Erhöhung des Al/Ca-Verhältnisses kommt. So ermittelte Schäfer [10] anhand von Proben mit einem Anteil von 40 M.-% Steinkohlenflugasche nach einer Hydrationszeit von 91 Tagen ein Al/Ca-Verhältnis von 0,1 und ein mittleres Ca/Si-Verhältnis von 0,65. Beim Vergleichen der Hydrationszeiten von 28 und 91 Tagen zeigte sich, dass sich die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse nur geringfügig erhöhten. Somit kann gefolgert werden, dass nach 28 Tagen nur noch geringe Änderungen im Chemismus der flugaschehaltigen C-S-H-Phasen zu erwarten sind. Andere Autoren, wie Rayment [66], bestimmten ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,58 für die C-S-H-Phasen. Taylor [46] ermittelte für Zement mit einem Flugascheanteil von 28 M.-% und einem Hydrationsalter von 91

Tagen ein mittleres Al/Ca-Verhältnis von 0,10 und ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,61. (Abb. 19).

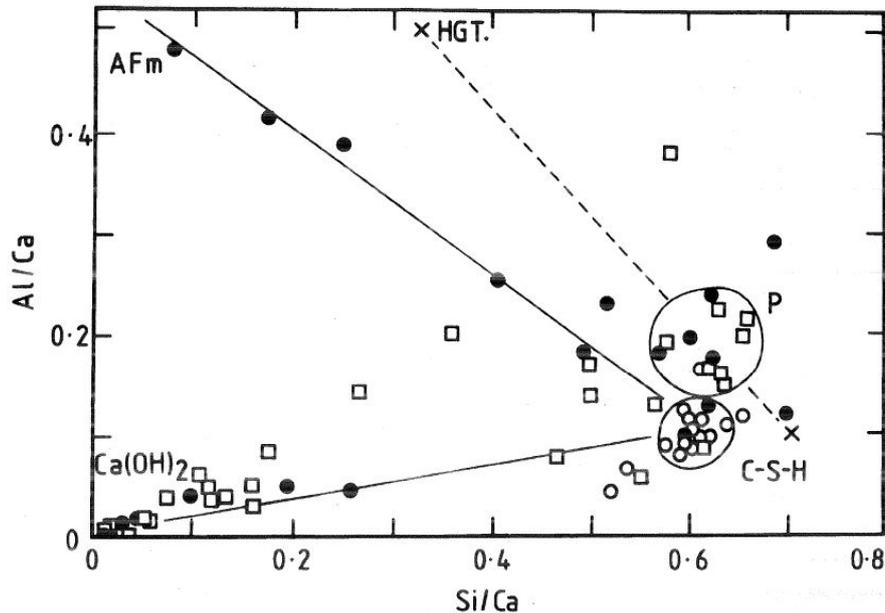


Abb. 19 Si/Ca- und Al/Ca-Atomverhältnisse eines flugaschehaltigen (28 M.-%) Zementsteins mit einem Hydrationsalter von 91 Tagen. Aus [46]

2.7.5 Der Einfluss von Hüttensand

Der Einsatz von Hüttensand führt, ähnlich wie der von Flugasche, zu einer Erhöhung des Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnis der C-S-H-Phasen [10, 16, 39, 46]. So wurden für 10 M.-% hüttensandhaltigen Zementstein ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,6 und ein mittleres Al/Ca-Verhältnis von 0,1 bestimmt [39]. Untersuchungen von Schäfer [10] an einem Zementstein mit 40 M.-% Hüttensand wiesen ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,56 und ein mittleres Al/Ca-Verhältnis von 0,09 auf. Taylor [46] wiederum ermittelte ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,62 und ein mittleres Al/Ca-Verhältnis von 0,1 an Zementstein mit 28 M.-% Hüttensand. Richardson [39] beobachtete ebenso, dass das Si/Ca-Verhältnis von der Menge des Hüttensandes abhängt. Für einen Hüttensandanteil von 50% konnte er ein mittleres Si/Ca-Verhältnis von 0,64 beobachten. Es zeigte sich außerdem, dass das Al/Ca-Verhältnis in den C-S-H-Phasen mit dem Si/Ca-Verhältnis anstieg. Diese Beobachtung deckt sich mit den zuvor angegebenen Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnissen. Schäfer [10] beobachtete, dass sich das Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnis über die Hydrationszeit zwischen 28 und 91 Tagen erhöhte.

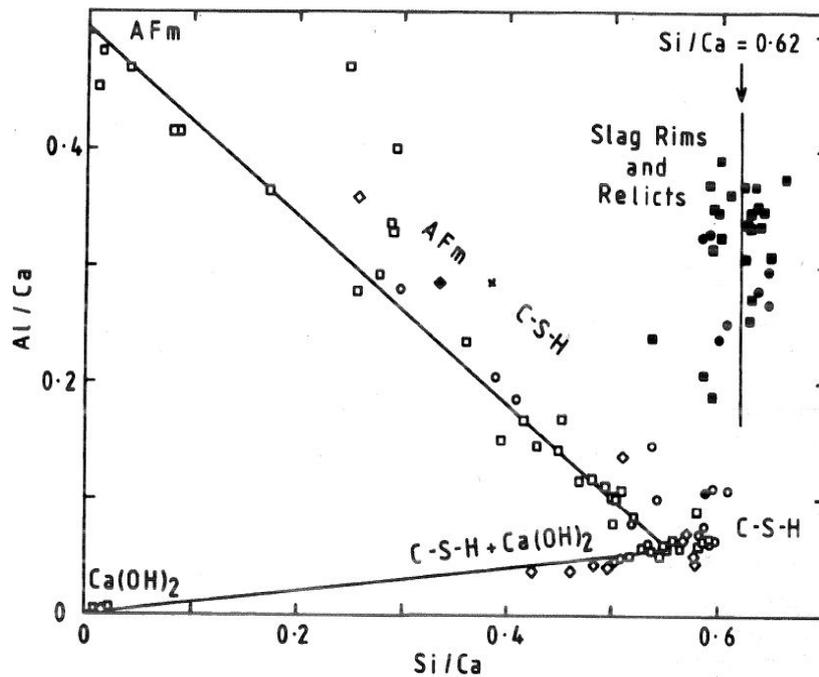


Abb. 20 Atomare Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse eines hüttensandhaltigen (40 M.-%) Zements mit einem Hydratationsalter von 14 Monaten. Aus [46].

2.7.6 Der Einfluss von Trass und natürlichen Puzzolanen

In der Literatur [7, 46, 67, 56, 68] ist dokumentiert, welche Silikathydratphasen und Aluminathydratphasen bei Einsatz von Trass und natürlichen Puzzolanen in zementgebundenen Systemen entstehen. Nach Massazza [7] können die natürlichen Puzzolane im zementgebundenen System zu C-S-H-Phasen und Aluminiumhydrate wie C_4AH_{13} reagieren. Das Si/Ca-Verhältnis der C-S-H-Phasen ist nach Massazza abhängig vom verwendeten Puzzolan und variiert daher stark. Liebig [68, 69] beschreibt, dass sich durch Anregung von $Ca(OH)_2$ mit Rheinischen Trasses folgende Reaktionsprodukte bilden: C-S-H-Phasen, C_4AH_{13} , und C_2ASH_8 (Stratlingit). Bezüglich des Einflusses von Trass auf die Mikrochemie der C-S-H-Phasen sind, soweit bekannt, keine Daten publiziert worden.

2.8 Der Einfluss von Puzzolanen und Hüttensand auf die Porenlösung

Im Allgemeinen führen reaktive Klinkerersatz- oder Zusatzstoffe zu einer Erniedrigung des pH-Wertes der Porenlösung, da diese mit Portlandit ($Ca(OH)_2$) reagieren. Somit wird dem Zementsteinsystem Portlandit entzogen und die $Ca(OH)_2$ Konzentration sinkt in der Porenlösung. Dadurch wird die Löslichkeit der reaktiven Bestandteile in den Gesteinskörnungen, wie die der amorphen Kieselsäure erniedrigt, welche für die AKR verantwortlich ist. Bei Portlandzement ist im Allgemeinen in den ersten Stunden ein hoher Anstieg des pH-Wertes der Porenlösung zu beobachten. Danach stellt sich der pH-Wert auf einem konstanten Niveau ein (siehe Abb. 10).

Der Einfluss von **Flugasche** wirkt sich signifikant auf den pH-Wert der Porenlösung aus. Untersuchungen von Shehata [44] ergaben, dass die Hydroxidionenkonzentration in der Porenlösung vom CaO-Gehalt der Flugasche abhängig ist. So wiesen Proben mit Flugasche mit hohem CaO-Gehalt eine höhere OH^- -Konzentration auf als die Referenzproben ohne Flugasche. Dagegen hatten Proben mit CaO-ärmer Flugasche eine tiefere OH^- -Konzentration in der Porenlösung als die Referenzproben. Schmidt [11] konnte anhand von NMR-Untersuchungen zeigen,

dass in der Nebelkammer bei 40 °C nach 180 Tagen 50 % der Flugasche reagiert hatte. Er schloss daraus, dass bei fortschreitendem Alter die Änderungen im Chemismus der Porenlösungen in den Proben der Flugasche zugeschrieben werden kann. Er konnte auch zeigen, dass die puzzolanische Reaktion der Flugasche sehr träge abläuft und somit die Konzentration von Alkalien in der Porenlösung beeinflusst. So stellte sich heraus, dass nach einem Jahr bei Betonen mit 20-30 % Flugasche nur eine geringfügig niedrigere OH⁻-Konzentration und keine Abnahme der Alkalikonzentration beobachtbar war. Nach 12 Monaten konnte er eine geringe Abnahme der Alkalikonzentration feststellen. Böhm [9] zeigte anhand von flugaschenhaltige Zementsteinen, dass nach einer Hydrationszeit von 180 Tagen eine Erniedrigung von 100 mmol/l in der OH⁻-Konzentration auftrat. Die größte Abnahme der Konzentration war zwischen der Hydrationszeit von 7 und 28 Tagen zu beobachten. Zwischen dem Hydrationsalter von 180 und 360 Tagen wurde nur noch eine geringere Abnahme der OH⁻-Konzentration festgestellt. Erst bei einer Hydrationszeit von mehr als 365 Tagen wurde eine Abnahme der OH⁻-Konzentration von 300 bis 400 mmol/l beobachtet. Die OH⁻-Konzentration war geringer als die der gleich alten Referenzproben ohne Flugasche, obwohl die Flugasche mit Alkalien angereichert war.

Canham [70] konnte in seinen Experimenten an Zementsteinproben zeigen, dass **Hüttensand** die Eigenschaft besitzt, die OH⁻-Konzentration der Porenlösung zu senken. Aber diese Eigenschaft ist nicht so stark ausgeprägt wie bei Flugasche. So war bei einer Hydrationszeit von 390 Tagen die OH⁻-Konzentration von hüttensandhaltigen Zementsteinproben im Gegensatz zu den flugaschenhaltige Proben höher als bei dem Referenzzementstein mit einem NA Zement. Er schloss daraus, dass der AKR-hemmende Effekt sehr wahrscheinlich auch im veränderten Chemismus der hüttensandhaltigen Zementsteine zu suchen ist. Dieser geringe Einfluss auf die OH⁻-Konzentration zeigte sich auch bei den Auslagerungsversuchen von Schmidt [11], Böhm [9] und Schäfer [10, 12]. Die Untersuchungen von Siebel [71] ergaben, dass sich die Alkalikonzentration der Porenlösung proportional zum Hüttensandanteil reduzieren kann. Wenn allerdings der Alkaligehalt des Hüttensands selbst hoch ist, kommt es zu einer Erhöhung des Alkaligehalts der Porenlösung. Untersuchungen von Bakker [72] zeigten, dass neben einer verminderten Alkalikonzentration in der Porenlösung auch die Ionendiffusion bei hüttensandhaltigen Zementen deutlich geringer ist als bei Portlandzement. Er begründete das damit, dass es bei den hüttensandhaltigen Zementen zur Bildung einer undurchlässigen Membran in den Poren des Zementsteins kommt, welche die Diffusion der Alkaliionen behindert.

In der Literatur existieren nur wenige Angaben über den Einfluss von **natürlichen Puzzolanen** auf den Chemismus der Porenlösung. Die Versuche von Mertens [73] mit natürlichen puzzolanhaltigen Zementsteinen zeigten, dass sich die pH-Werte über die Zeit erhöhten. Dieser Anstieg wird mit dem Kationenaustausch der Zeolithe erklärt. Liebig [68] konnte zeigen, dass es bei Trassen in gesättigter Ca(OH)₂-Lösung zu einer Auslaugung von Na⁺ und K⁺ kommt.

2.9 Temperatureinfluss

Untersuchungen von Schmidt [11, 74] an flugaschehaltigen Betonproben, die bei 20 °C, 40 °C, 60 °C ausgelagert wurden, ergaben, dass die Auslagerungstemperatur einen Einfluss auf den Chemismus der Porenlösung, die puzzolanische Reaktion der Zusatzstoffe und der Reaktionskinetik der AKR hat. Es zeigte sich bei den Untersuchungen, dass die allgemein verwendete Beziehung $[OH^-] \approx [Na^+] + [K^+]$ nur bei geringer Alkalität und bei Temperaturen bis 40 °C ihre Gültigkeit besitzt, da oberhalb von 40°C eine Verschiebung des OH⁻/SO₄⁻-Ionen-Verhältnisses zu Ungunsten der OH⁻-Ionen stattfindet. Dabei widerspiegelt das OH⁻/SO₄⁻-Ionen-Verhältnis die chemische und thermische Stabilität der Calciumsulfoaluminathydrate. Es zeigte sich, dass bei 60 °C die OH⁻-Konzentration tiefer war als bei 20 ° und 40 °C. Es ist bekannt, dass die SiO₂-

Löslichkeit mit Erhöhung der Temperatur steigt, doch durch gleichzeitige Erniedrigung der OH⁻-Konzentration wird der steigenden SiO₂-Löslichkeit entgegengewirkt. Somit kann es laut Schmidt [74] zu einer falschen Bewertung der AKR-hemmenden Wirkung puzzolanischer Stoffe oder Hüttensand kommen.

2.10 Prüfmethoden zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Im Allgemeinen werden zwei Typen von Laborprüfmethoden unterschieden. Bei der einen Methode werden Gesteinskörnungen auf ihre AKR-Anfälligkeit geprüft. Bei der anderen Methode werden fertige Betonrezepturen, wie sie später in der Praxis zum Einsatz kommen, auf ihre Neigung zur AKR-Schädigung untersucht (Performance-Prüfung).

Bei ersterer Prüfung werden Gesteinskörnungen mit festgelegter Sieblinie und mit speziellen Prüfzementen mit definiertem Na₂O_{aq} zu Mörtel- oder Betonprüfkörpern verarbeitet und unter feuchten Bedingungen bei erhöhter Temperatur gelagert. Manche Prüfungen erfordern eine Alkalizufuhr von außen oder das Zumischen von Alkalien bei der Prüfkörperherstellung. In der Regel werden während der Lagerung periodische Verformungsmessungen, durch Bestimmung der Probenkörperlänge, durchgeführt. Dabei wird eine maximale Dehnung definiert, welche nach einer bestimmten Auslagerungszeit nicht überschritten werden darf, wenn die Gesteinskörnung als AKR-unempfindlich eingestuft werden soll. Bei den Performanceprüfungen wird analog vorgegangen nur dass anstelle einer festgelegten Betonrezeptur die Originalrezeptur eingesetzt wird, die bei einem Bauvorhaben verwendet wird.

Für die Überprüfung von reaktiver Gesteinskörnung bezüglich AKR gibt es weltweit noch kein einheitliches Prüfverfahren. Allen Prüfprozeduren ist gemein, dass mindestens zwei verschiedene Prüfmethoden nötig sind, um beurteilen zu können, ob sich eine Gesteinskörnung als reaktiv erweist.

2.10.1 Prüfverfahren nach DAfStb

In Deutschland werden Gesteinskörnungen nach der **Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [22]** auf ihre AKR-Empfindlichkeit geprüft. Die Reaktivität der Gesteinskörnung wird dabei nach unterschiedlichen Verfahren ermittelt. Im **Teil 2** wird die Reaktivität von Opalsandstein und Flinten geprüft. Dies geschieht direkt an der zu prüfenden Gesteinskörnung, in dem der Gesteinskörnung mit der Fraktion 1 - 4 mm eine 4 %ige Natronlauge zugeben und anschließend der Masseverlust der Proben bestimmt wird. Der Masseverlust der Gesteinskörnung über 4 mm wird mit einer 10 %iger Natronlauge bestimmt. Die Reaktivität von Flinten kann vorab über deren Rohdichte abgeschätzt werden. Im **Teil 3** wird die Reaktivität von gebrochener alkaliempfindlicher Gesteinskörnung ermittelt. Als gebrochene alkaliempfindliche Gesteinskörnung werden gebrochene Grauwacke, gebrochener Quarzporphyr, gebrochene Kiese des Oberrheins, rezyklierte Gesteinskörnungen und alle nach Deutschland eingeführten gebrochenen Gesteinskörnungen bezeichnet. Es wird dabei nach dem in Abbildung 21 wiedergegebenen Flussdiagramm geprüft.

Die zu prüfende Gesteinskörnung wird hierbei zuerst einem **Mörtelschnelltest bei 80 °C** unterzogen. Falls dieser nicht bestanden wird, ist daran eine weitere Prüfung in der **Nebelkammer bei 40 °C** anzuschließen.

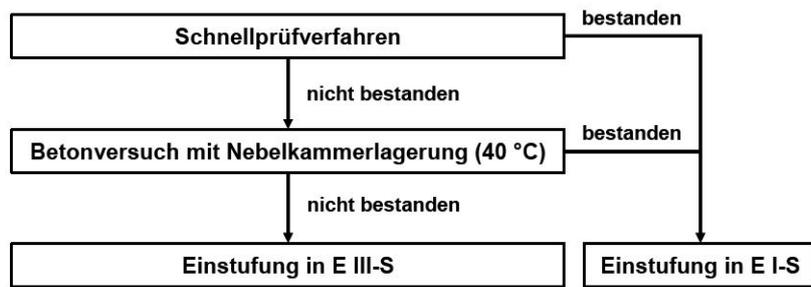


Abb. 21 Prüfschema des DAfStb für die Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung. Aus [22].

Für das **Schnellprüfverfahren** werden mit der zu prüfenden Gesteinskörnung drei Mörtelprismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, der Siebkornlinie 0/4 und einem Zement mit 1,3 M.-% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ hergestellt und bei 80 °C in 1 M NaOH-Lösung gelagert. Wenn die Dehnung nach 15 Tagen $\leq 1 \text{ mm/m}$ beträgt, ist die Gesteinskörnung als nicht reaktiv einzustufen. Falls die Dehnung nach 13 Tagen $\geq 1 \text{ mm/m}$ beträgt, muss die Gesteinskörnung einem Betonversuch bei **40 °C Nebelkammerlagerung** unterzogen werden. In diesem Versuch werden drei Balken mit den Abmessungen $100 \times 100 \times 500 \text{ mm}^3$ für Längendehnungsmessung und ein Würfel mit 300 mm Kantenlänge zur Rissbeobachtung hergestellt. Die Betonproben werden während 9 Monaten bei 100 % Luftfeuchtigkeit in der Nebelkammer gelagert. Weist der Probekörper nach einer Auslagerungszeit von 9 Monaten eine Dehnung $\geq 0.6 \text{ mm/m}$ inkl. Wärmedehnung und Feuchtigkeitsdehnung auf oder besitzt der Würfel Rissbreiten von $\geq 0.2 \text{ mm/m}$, wird die Gesteinskörnung hinsichtlich einer AKR als reaktiv eingestuft.

Alternativ kann an Stelle der Nebelkammerlagerung auch ein Betonversuch bei 60 °C über Wasser vorgenommen werden. Das Verfahren wurde in Frankreich entwickelt und ist dort unter der Norm NF P18-454 [75] bekannt. Um in Deutschland Erfahrungen mit diesem Prüfverfahren zu sammeln, wurde sie als Alternative zur 40 °C Nebelkammerlagerung in die bestehende Alkalirichtlinie aufgenommen. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Dehnung nach 5 Monaten $\leq 0.3 \text{ mm/m}$ beträgt.

2.10.2 NBRI Test Methode

Die Testmethode wurde von Oberholster und Davis [76] entwickelt. Mörtelproben werden hier mindestens 10 Tage in einer 1 M NaOH gelagert. Wenn die Dehnung nach 10 Tagen zwischen 1 und $2,5 \text{ mm/m}$ liegt, dann wird die Gesteinskörnung als reaktiv eingestuft. Beträgt die Dehnung nach 10 Tagen mehr als $2,5 \text{ mm/m}$, wird die Gesteinskörnung als stark reaktiv eingestuft.

Oberholster [76] beobachtete, dass diese Testmethode auch für die Untersuchung von Betonzusatzstoffen geeignet war. So war es möglich, die hemmende Wirkung der Zusatzstoffe Hütensand, Flugasche und Mikrosilika mit diesem Testverfahren zu demonstrieren. Das NBRI Testverfahren wurde mittlerweile in vielen Ländern übernommen und auf deren Bedürfnisse angepasst. So läuft es beispielsweise in den USA unter den Namen ASTM C1260 [77], in Kanada unter dem Namen CSA A23.2-25A und in Deutschland als Mörtelschnelltest im Teil 3 der Alkali-Richtlinie. Beim deutschen Mörtelschnelltest wurde das Zeitkriterium auf 14 Tage angehoben. Als Dehnungskriterium wurde $\geq 1 \text{ mm/m}$ gewählt.

2.10.3 AFNOR Testmethoden

In Frankreich und der Schweiz [26] wird die Reaktivität der alkaliempfindlichen Gesteinskörnung nach der französischen **AFNOR P18-594** [75] Norm getestet. Bei dieser Norm handelt es sich um einen Schnelltest, der fünf Tage dauert. Als Grenzwert wurde eine Dehnung von 1,1

mm/m festgelegt. Es wird dabei in potentiell reaktive und nicht reaktive Gesteinskörnung unterschieden. Dabei werden drei Mörtelprismen mit den Massen $10 \times 10 \times 40 \text{ mm}^3$, einer definierten Sieblinie von 0,16 – 0,63 mm und mit einem Zement von $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 1,5 \text{ M.-%}$ (NaOH) hergestellt. Es werden jeweils drei Serien mit folgenden Massenverhältnissen von Zement zu Gesteinskörnung hergestellt: 2, 5, 10. Anschließend werden die Mörtelprismen für 24 Stunden gelagert. Danach werden sie ausgeschalt und einer vierstündigen Dampfbehandlung unterzogen. Im Anschluss erfolgt eine sechsstündige Dampfbehandlung im alkalischen Milieu und im Autoklaven bei 150°C . Nach Abschluss der Behandlung werden die Dehnungen gemessen und als Mittelwert der Dehnung pro Massenverhältnis Zement/Gesteinskörnung angegeben.

Anschließend erfolgt die Beurteilung des Schnelltestes nach folgender Klassifizierung:

- nicht reaktiv (NR); Zement/Gesteinskörnung $\leq 1,1 \text{ mm/m}$.
- potentiell reaktiv (PR): Zement/Gesteinskörnung $\geq 1,1 \text{ mm/m}$.
- potentiell reaktiv mit Pessimum (PRP); ist der Mittelwert der Dehnung beim Massenverhältnis Zement/Gesteinskörnung von 2 oberhalb der Mittelwerte der Dehnung beim Massenverhältnis 5 oder 10 und ist die Dehnung $\geq 1,1 \%$.

Mit Hilfe der **AFNOR P18-456** [75] wird die Reaktivität von Gesteinskörnung im Beton untersucht. Es handelt sich dabei um ein Schnellprüfverfahren von einer Zeitdauer von 5 Monaten für Betone ohne Zusatzstoffe und 12 Monate für Betone mit Zusatzstoffen. Der Grenzwert für Betone mit Zusatzstoffen beträgt bei einer Auslagerungsdauer von 12 Monaten $\geq 0,3 \text{ mm/m}$. Sie wurde im Wesentlichen als alternatives Prüfverfahren zur 40°C Nebelkammerlagerung in den Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb übernommen. Es wurde aber auf die Prüfbedingung der Zemente mit Zusatzstoffen verzichtet.

2.10.4 ASTM-Prüfverfahren

In den Vereinigten Staaten werden für die Ermittlung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen verschiedene Prüfverfahren entwickelt und als ASTM Normen veröffentlicht.

ASTM C289 [78] untersucht mittels einer chemischen Kurzzeitprüfung die Alkaliempfindlichkeit von gebrochener Gesteinskörnung mit der Korngröße 0,15-0,30 mm bei 80°C in Natronlauge während 24 Stunden. Danach wird die Abnahme der Natriumkonzentration in der Natronlauge ermittelt.

Bei der Norm **ASTM C227** [79] handelt es sich um ein Kurzzeitprüfverfahren mit Prismen ($25 \times 25 \times 280,5 \text{ mm}^3$, Größtkorn 4,75 mm, Verhältnis Zement/Gesteinskörnung; 1:2,25), die bei 40°C über Wasser gelagert werden. Die Auslagerungszeit beträgt 12 Monate. Die erste Messung findet nach 14 Tagen statt, danach wird monatlich gemessen. Nach diesem Prüfverfahren gilt eine Gesteinskörnung als reaktiv, wenn sie nach drei Monaten eine Dehnung aufweist, die $\geq 0,5 \text{ mm/m}$ ist bzw. nach sechs Monaten $\geq 1 \text{ mm/m}$ ist.

In **ASTM C441** [80] wird der Einfluss von Zusatzstoffen getestet. Der Test ähnelt dem ASTM C227 Verfahren. Die reaktive Gesteinskörnung wird durch gebrochenes Pyrex-Glas substituiert und es werden 300 g Portlandzement mit einem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ -Gehalt von 0,95 % - 1,05 % und 100 g Zusatzstoff verwendet. Das Kriterium dieses Versuches stellt die Reduzierung des Dehnungsverhaltens zum Referenzprobekörper dar. Je geringer die Dehnung ist, desto größer ist die AKR-hemmende Wirkung des Zusatzstoffes.

ASTM C1260 [81] ist ein Schnellprüfverfahren, bei dem die Reaktivität einer Gesteinskörnung überprüft wird. Es werden drei Mörtelprismen mit der zu prüfenden Gesteinskörnung hergestellt. An den Zement werden bezüglich des $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ keine Anforderungen gestellt, da die Mör-

telprismen in einer 1N Natronlauge während 14 Tagen bei 80 °C gelagert werden. Das Kriterium dieser Prüfung liegt bei einer Dehnung ≥ 1 mm/m nach 14 Tagen.

Bei **ASTM C1293** [82] handelt es sich um einen Betontest. Dazu werden 3 Betonbalken mit den Abmessungen 75 x 75 x 400 mm³, einer Sieblinie 9,5/19 mm, einem Zement mit Na₂O_{aq} = 1,25 Masse-% und einem w/z-Wert von 0,45 hergestellt. Das Kriterium dieser Prüfung liegt bei einer Dehnung von ≥ 0.4 mm/m nach 12 Monaten.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Versuchskonzept

Ausgehend von der in Kapitel 1.3 aufgestellten Hypothese, dass Trass aufgrund seines hohen Al_2O_3 -Gehalts eine ähnliche AKR-hemmende Wirkung haben könnte wie Flugasche oder Hüttensand, aber die Rolle der Alkalien im Trass eine Unbekannte darstellt, wurde ein Versuchskonzept ausgearbeitet, das diese Hypothese überprüfen sollte. Dazu wurde in einem ersten Ansatz der Einfluss von Trass auf den Chemismus der C-S-H-Phasen untersucht. Dies wurde im Vergleich mit Flugasche und Hüttensand durchgeführt. In einem zweiten Ansatz sollte der Einfluss der Klinkerersatzstoffe unter Berücksichtigung der Alkaligehalte auf eine AKR untersucht werden. Im Nachfolgenden wird dieses Versuchskonzept im Detail beschrieben.

Das Versuchsprogramm wurde mit Probenkörpern durchgeführt, die alle dieselbe reaktive Gesteinskörnung enthielten. Die Proben bestanden sowohl aus Mörtel- als auch aus Betonserien. Die Mörtelserien wurden gewählt, da aufgrund ihrer geringeren Korngröße mit einem höheren Fortschritt und einer homogeneren Verteilung der AKR gerechnet werden konnte. Mörtelproben sind generell einfacher mittels optischen Methoden zu untersuchen, da deren Gefüge wesentlich homogener ist als dies bei Betonproben der Fall ist. Betonproben wurden zusätzlich hergestellt und ausgelagert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den gängigen Prüfverfahren zu ermöglichen und da bei den Betonen mit einer größeren Menge an Reaktionsprodukten gerechnet werden konnte als dies in den Mörtelserien erwartet wurde. Die Analyse der mikrochemischen Zusammensetzung der Reaktionsprodukte sollte die Herkunft der Alkalien klären. Darauf wird weiter unten nochmal eingegangen.

Zur Auslösung und Beschleunigung einer AKR wurden die Mörtel- und Betonproben in einer Nebelkammer bei 40 °C und 100 % r.F. ausgelagert. Um den Einfluss der Temperatur auf den Fortschritt der AKR und auf den Chemismus der C-S-H-Phasen zu untersuchen, wurden bei ausgewählten Betonserien eine Auslagerung bei 60 °C und 100 % r.F. und bei Zementsteinserien Auslagerungen bei 20 °, 40 ° und 60 °C und 100 % r.F. durchgeführt.

Die klinkerersatzstoffhaltigen Serien wurden dabei immer mit einer Serie verglichen, die nur Portlandzement enthielt und bei welcher bewusst eine AKR induziert wurde. Somit sollte es möglich sein, auf den Einfluss der Klinkerersatzstoffe auf eine mögliche AKR und auf den Chemismus der C-S-H-Phasen zu schließen. Da der Alkaligehalt des Zements ein wichtiger Faktor für das Auftreten einer AKR ist, sollte bei der Portlandzementserie und den klinkerersatzstoffhaltigen Serien jeweils ein Zement mit einem hohen Alkaligehalt verwendet werden. Bei den klinkerersatzstoffhaltigen Serien wurde der Zement jeweils durch 30 Masse-% des jeweiligen Stoffes ersetzt und dabei als eigene neue Zementsorte betrachtet.

Die ausgelagerten Probenserien wurden zum größten Teil mittels optischen und mikrochemischen Methoden nach 7, 28, 90, 150 und 360 d untersucht. Lediglich die Volumenänderung wurde über die Bestimmung der Längenänderung häufiger registriert. Abbildung 22 gibt die Messgrößen an, die im Rahmen der Arbeit bestimmt wurden.

Anhand der **Volumenänderung** der Probekörper kann der Fortschritt einer möglichen AKR ermittelt werden. Diese kann als Indikator für schädigende Reaktionen angesehen werden, die zu Treiberscheinungen führen. Bei einer AKR werden Treiberscheinungen und damit einhergehende Rissbildungen im Materialgefüge durch die stark quellenden Reaktionsprodukte in Form wasserhaltiger Alkalisilikate erzeugt (s. Kapitel 2.4). In der Praxis wird meist auf eine Bestimmung der Volumenänderung verzichtet und dafür eine Bestimmung der Längenänderung bevorzugt. In den Versuchen wurde daher zu genau festgelegten Zeitpunkten die Längenände-

rungen der Mörtel- und Betonserien bestimmt, um so auf einen möglichen Reaktionsfortschritt zu schließen.

Mit der Detektion von **Gefügeänderungen** ist es möglich, den zeitlichen Fortschritt der AKR und den Grad der Schädigung zu verfolgen. Für diese Untersuchungen wurden zu gegebenen Zeitpunkten Probekörper entnommen und von diesen wurden Dünnschliffe bzw. polierte Anschliffe hergestellt, die am Polarisationsmikroskop bzw. Rasterelektronenmikroskop auf Gefügeänderungen in Form von Rissen und Gelbildungen an den reaktiven Gesteinskörnungen untersucht wurden.

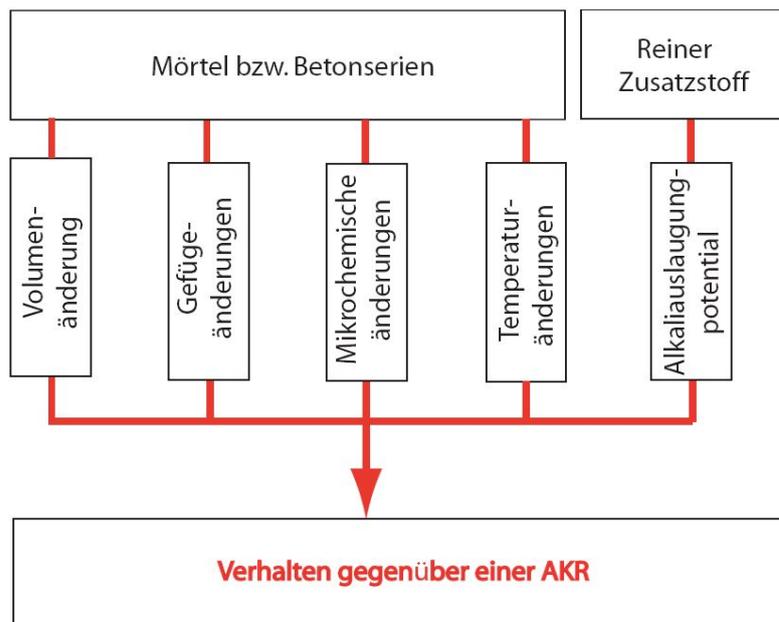


Abb. 22 Messgrößen, die im Verlauf dieser Studie bestimmt wurden.

Die Untersuchungen der **mikrochemischen Änderungen** hatten zum Ziel, den zeitlichen Einfluss der Zusatzstoffe auf den Chemismus der C-S-H-Phasen herauszufinden und auf die mögliche Neubildung von AKR-Reaktionsprodukten zu schließen. Diese Untersuchungen wurden an polierten Dünnschliffen und Anschliffen der Probeserien an einer Elektronenstrahlmikrosonde und an einem Rasterelektronenmikroskop mit definierten Probealtern durchgeführt.

Im Weiteren sollte der Einfluss der **Temperaturänderung** auf eine mögliche AKR, den Chemismus der C-S-H-Phasen und auf die Reaktivität der Zusatzstoffe untersucht werden. Um dieser Frage nachzugehen, wurden ausgewählte Betonprobekörper zusätzlich bei 60 °C in einem sogenannten AKR-Tester gelagert. Zusätzlich wurden Zementsteine mit reinem Portlandzement, sowie trass- und flugaschehaltigen Zementen vergleichend bei 20 °C, 40 °C und 60 °C gelagert.

Es wurde außerdem der Frage nachgegangen, wie hoch das **Alkaliauslaugungspotential** der Klinkerersatzstoffe war. Dabei wurde festgestellt, ob der einzelne Zusatzstoff in der Lage ist, Alkalien an eine übersättigte Calciumhydroxidlösung abzugeben und somit zu einer nicht gewollten Begünstigung der AKR beitragen könnte.

3.2 Probenkörperserien

Tabelle 7 gibt die die Probekörperserien, die im Untersuchungsprogramm verwendet wurden, wieder.

Tab. 7 Übersicht über die Probenserien

Probekörper ¹	Klinkerersatzstoff ²	Mit KOH aufdotiert ³	Auslagerung		
			40 °C 100 % r.F.	60 °C 100 % r.F.	20 °C 100 % r.F.
<i>Mörtelserien</i>					
M-NA	-	-	x		
M-K	-	X	x		
M-KF	Flugasche	X	x		
M-KH	Hüttensand	X	x		
M-KT1	Rheinischer Trass (fein)	X	x		
M-KT2	Italienischer Trass I (fein)	X	x		
M-KT3	Italienischer Trass II (grob)	X	x		
<i>Betonserien</i>					
B-NA	-	-	x		
B-K	-	X	x	x	
B-KF	Flugasche	X	x	x	
B-KT1	Rheinischer Trass (fein)	X	x	x	
B-KT2	Italienischer Trass I (fein)	X	x	x	
B-KT3	Italienischer Trass II (grob)	X	x	x	
<i>Zementsteinserien</i>					
CEM I	-	X	x	x	X
CEM I + FA	Flugasche	X	x	x	X
CEM I + T1	Rheinischer Trass (fein)	X		x	X
CEM I + T2	Italienischer Tass I (fein)	X	x	x	X
CEM I + T3	Italienischer Trass II (grob)	X	x	x	X

¹ Flusskies vom Oberrhein

² Austausch von 30 M-% des Zements durch Zusatzstoff (1:1)

³ Aufdotierung mit KOH auf $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1.2 \text{ M-\%}$

Als Gesteinskörnung wurde ein alkaliempfindlicher gebrochener Flusskies gewählt. Als Ausgangszement wurde ein CEM I 42,5 NA Zement mit einem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 0,54 \text{ M-\%}$ verwendet. Als Klinkerersatzstoffe wurden Flugasche, Hüttensand und Trasse von zwei verschiedenen Vorkommen benutzt. Es wurde jeweils 30 M.-% des reinen Portlandzements durch den jeweiligen Klinkerersatzstoff ausgetauscht. Der Austausch erfolgte im Verhältnis 1:1, d.h. unter Konstanthaltung des $w/(z+f)$ -Wertes. Der Portlandzement der Probekörper wurde mittels Zugabe von KOH im Anmachwasser auf das $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ von 1,2 M.-% dotiert. Kaliumhydroxid wurde gewählt, da deutsche Zemente Alkalien überwiegend in Form von K_2O enthalten. Da vulkanische Tuffe neben K_2O auch höhere Anteile an Na_2O enthalten (s. Tab. 3) sollte die Analyse des AKR-Reaktionsprodukts eine Herkunftsbestimmung der Alkalien erlauben.

Die Mörtelprismen wurden in der Nebelkammer bei 40°C und bei 100% rel. Luftfeuchtigkeit ausgelagert, um eine AKR zu induzieren. Die Betonprobekörper wurden sowohl bei 40°C in der Nebelkammer und bei 60°C in einem AKR Reaktor gelagert. Dabei sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Temperatur auf eine AKR hat. Zusätzlich wurden noch Zementleime hergestellt, um zu ergründen, wie sich der Temperatureinfluss auf den Chemismus der C-S-H-Phasen und auf das Alkalibindeverhalten auswirkt.

3.3 Auswahl der Gesteinskörnung

Zur Herstellung der Mörtel- und Betonserien wurde eine reaktive Gesteinskörnung aus dem Oberrheingebiet verwendet, da es sich hierbei um eine der problematischen, langsam reagierenden alkaliempfindlichen Gesteine handelt] Nach Fischer [84] ist bekannt, dass diese einen hohen Anteil an alpinem Aare- und Rheinmaterial (z.T. aus Molasse-Nagelfluh umgelagert) und untergeordnet Jurakalken und Schwarzwaldgesteinen besitzt. Laut Fischer [84] treten im Quartär des Oberrheingebiets am häufigsten verschiedenartige Quarzite auf, helle (alpine) und rötliche (schwarzwäldische) Granite, Gneise, Diorite, Quarzporphyre, alpine und schwarzwäldische Sandsteine (Flysch, Buntsandstein), Verrucano, Radiolarit, jurassische und alpine Kalke in den Hoch und Tiefterrassenschotter im Oberrheingraben. Eine der reaktiven Komponenten, die in den Flussschottern des Oberrheins häufig auftreten, ist der Kieselkalk (Abb. 23a). Dieser ist in der Literatur auch als alkaliempfindliches Gestein beschrieben [9, 85]. Tabelle 8 gibt die im Rahmen der Untersuchungen ermittelte petrographische Zusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnung wieder. Die Rohdichte der verwendeten Gesteinskörnung wurde mit 2620 kg/m³ ermittelt.

Tab. 8 Petrographie der verwendeten Gesteinskörnung aus dem Oberrheingebiet

Bestandteil	Gestein
<i>Reaktiv (potenziell)</i>	Verkieselter Kalk, Sandsteine (manche), Grauwacken, Stressquarze, Gneis, Radiolarit
<i>Nichtreaktiv</i>	Kalkstein (silikatfrei), Granit, übrige Gesteinsbruchstücke

Die Alkaliempfindlichkeit der verwendeten Gesteinskörnung wurde mit dem zuvor beschriebenen Schnelltest nach Teil 3 der Alkalirichtlinie des DAfStb [22] ermittelt. Das Ergebnis ist in Abbildung 23b wiedergeben. Das Kriterium bezüglich der AKR-Reaktivität wurde schon nach 7 Tagen überschritten. Die Gesteinskörnung war somit als potentiell AKR-reaktiv einzustufen. Nach 14 Tagen wies der Mittelwert der Mörtelprismen eine Dehnung von 1,69 mm/m auf (siehe Anhang Tabelle A1).

3.4 Auswahl und Charakterisierung des Zements und der Klinkerersatzstoffe

Als Zement wurde ein alkaliarmer Portlandzement CEM I 42,5 R NA der Firma Holcim (Deutschland) mit einem Na₂O_{aq} von 0,54 M.-% gewählt. In Tabelle 9 sind die Kennwerte des

Zements wiedergegeben. Dieser Zement wurde bei den Probekörpern außer den Referenzserien mit KOH auf ein $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = 1,2 \text{ M.-%}$ dotiert.

Als Klinkerersatzstoffe wurden eine Steinkohlenflugasche der Firma Steag AG, Hüttensandmehl der Firma Holcim (Deutschland), Rheinischer Trass der Firma Tubag und zwei Italienische Trasse der Firma TRASS s.r.l verwendet. Der Rheinische Trass und die beiden Italienischen Trasse unterschieden sich sehr stark in der Phasenzusammensetzung, spezifischen Oberfläche und Korngröße. Auch die beiden Italienischen Trasse wiesen Unterschiede in der spezifischen Oberfläche und Korngröße auf, waren jedoch stofflich nahezu identisch. Dies wurde bewusst so gewählt, um zu ergründen, welchen Einfluss die zuvor erwähnten Größen, spezifische Oberfläche und Korngröße, auf die Reaktivität der Trasse im zementgebundenen System und auf eine AKR haben. Die Werte sind in Tabelle 9 und im Anhang A1 wiedergegeben.

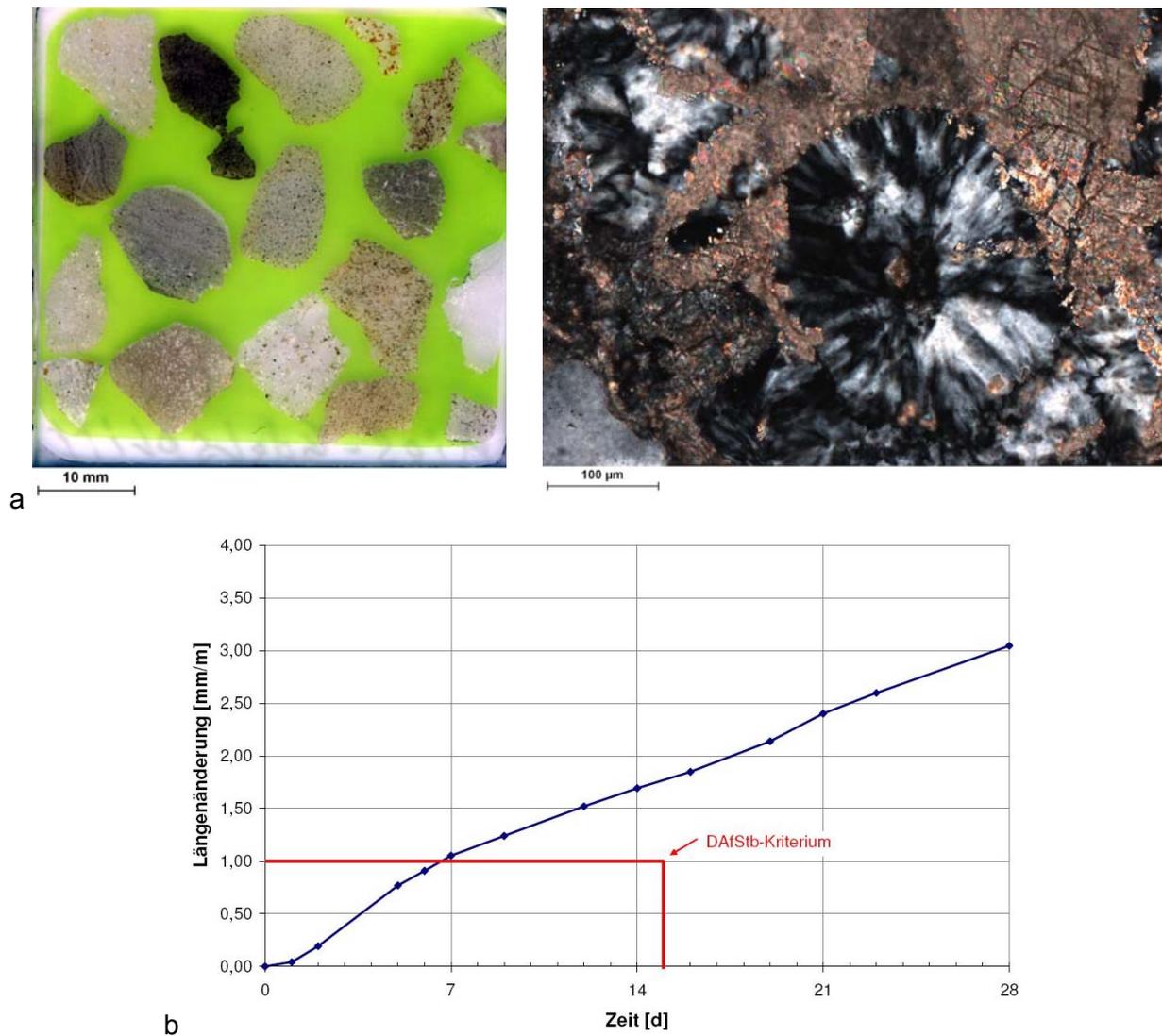


Abb. 23 a. Petrographie des Oberrheinmaterials mit Kieselkalken, Sandstein und metamorphen Gesteinen (links). Kieselkalk mit Chalcedon als SiO_2 -Komponente (rechts). b. Längendehnung des AKR-Schnelltestes des oberrheinischen Flusskieses über 28 Tage.

Tab. 9 Spezifische Daten des verwendeten Zementes und der Klinkerersatzstoffe

Klinkerersatzstoff	Na ₂ O _{äq} [M.-%]	Rohdichte [kg/m ³] ¹	Spez. Oberfläche [m ² /g] ²	Korngröße [µm] ³	Phasenzusammensetzung ⁴
CEM I 42.5R NA	0,54 Na ₂ O: 0,24 K ₂ O: 0,45	2800	0,358	22,12	C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF
Flugasche	1,94 Na ₂ O: 0,72 K ₂ O: 1,87	2220	1,68	28,09	Glas, Quarz, Hämatit
Hüttensand	0,73 Na ₂ O: 0,37 K ₂ O: 0,56	2820	1,49	11,23	Glas
Rheinischer Trass	6,10 Na ₂ O: 4,14 K ₂ O: 2,97	2520	21,30	24,07	Quarz, vulkanisches Glas, Analcim, Biotit/Ilit, Feldspat, Leucit, Smektit, Kaolinit, Phillipsit, Klinochlor, Chabasit
Italienischer Trass I (Micronizzata)	4,10 Na ₂ O: 1,29 K ₂ O: 4,28	2820	25,54	20,87	Augit, vulkanisches Glas, Feldspat, Hämatit, Calcit, Analcim, Quarz, Biotit/Ilit, Smektit, Kaolinit, Leucit, 7Å-Halloysit, 10Å-Halloysit, Montmorillonit
Italienischer Trass II (Sabbia Fine)	4,04 Na ₂ O: 1,05 K ₂ O: 4,54	2820	15,37	138,7	Augit, vulkanisches Glas, Feldspat, Hämatit, Calcit, Analcim, Quarz, Biotit/Ilit, Smektit, Kaolinit, Leucit, 7Å-Halloysit, 10Å-Halloysit, Montmorillonit

¹ nach EN 1936, ² mittels Gassorption (BET), ³ Median des Durchmessers, mittels Laser-Granulometrie, ⁴ mittels XRD (Hauptbestandteile in fett) (siehe Anhang A2)

3.5 Probenherstellung

In Tabelle 10 ist eine Übersicht über die Mischungszusammensetzung der Mörtel-, Beton- und Zementsteinserien für die Nebelkammer- und Reaktorversuche wiedergegeben.

Tab. 10 Übersicht der Mischungszusammensetzung und Auslagerungsbedingungen der verwendeten Probenserien

Serie	Mörtel	Beton	Zementstein
Gesteinskörnung (Herkunft)	0,125 – 4 mm (Oberrheinkies)	0 – 2 mm (Ottendorf-Okrilla, inert) 2 - 16 mm (Oberrheinkies)	-
Klinkerersatzstoffe (ersetzen zu 30 Masse-% Portlandzement)	- Hüttensand Flugasche Trass (3x)	- Flugasche Trass (3x)	- Flugasche Rheinischer Trass
w/z	0,47	0,50	0,50
Größe in [mm]	40 x 40 x 160	Balken: 75 x 75 x 280 Würfel: 20 x 20 x 20	-
Zementgehalt [kg/m ³]	781	400	-
Gehalt an Gesteinskörnung [kg/m ³]	1768	1750	-
Na ₂ O _{äq}	0,54/1,2	0,54/1,2	1,2
Temperatur	40 °C	40 °C, 60 °C	20 °C, 40 °C, 60 °C
Auslagerungszeit	7, 28, 90, 180 und 360 Tage	360 Tage (40 °C) 180 Tage (60 °C)	28 Tage

Die Mörtelprismen wurden in Anlehnung an Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb [22, 86] hergestellt. Außer der Referenzmörtelserie (Na₂O_{äq} = 0,54 M.-%) betrug das Na₂O_{äq} der Probekörper durch das Dotieren mit KOH 1,2 M.-%. Tabelle 7 listet die einzelnen Mörtelserien auf.

Die Probekörper wurden nach der Herstellung während 28 Tagen in einem Klimaraum bei 20 °C über Wasser gelagert, da die puzzolanische Reaktion der Zusatzstoffe erst zeitlich verzögert ihre Wirkung entfaltet. Nach 28 Tagen wurden die Probekörper einer Nullmessung unterzogen und in der Nebelkammer ausgelagert.

Die Betonprobekörperserien (Tab. 7) wurden in Anlehnung an den Teil 3 der Alkali-Richtlinie des DAfStb Betonbalken mit den Maßen 75 x 75 x 280 mm³ und Würfel mit den Maßen 200 x 200 x 200 mm³ für die Nebelkammerlagerung hergestellt (Tab. 11). Für die reaktive Gesteinskörnung wurde die Sieblinie 2/16 gewählt. Für die Sieblinie 0/2 wurde eine alkaliunempfindliche Gesteinskörnung aus Quarzkies von Ottenburg-Okrilla verwendet.

Um den Temperatureinfluss auf den Chemismus der C-S-H-Phasen im Detail zu untersuchen, wurden Zementleime mit Flugasche und den drei Trassen und einem w/(z+f)-Wert von 0,50 hergestellt. Die Proben wurden bei 20 °C, 40 °C und 60 °C und bei 100 % r.F. ausgelagert (Tab. 7).

Da der Gesamtalkaligehalt des Zements eine wichtige Größe für eine AKR darstellt und aus der Literatur bekannt ist, dass die Klinkerersatzstoffe/Zusatzstoffe Alkalien an die Porenlösungen abgeben können, wurde das Auslaugungsverhalten der verwendeten Flugasche, des Hüttensandes und der drei Trasse nach ASTM C311 [87] untersucht (siehe Tab. 11). Bei diesem Verfahren werden 5 g des jeweiligen Stoffs mit 2 g Calciumhydroxid gemischt und mit 10 ml destilliertem Wasser versetzt und in luftdichten 50 ml PE-Flaschen während 28 Tagen bei 40 °C gelagert. Der Gesamtalkaligehalt der Klinkerersatzstoffe wird jeweils vor und nach dem Versuch bestimmt. Die Differenz ergibt die Menge an ausgelaugten Alkalien. Es ist zu berücksichtigen, dass eine gesättigte Ca(OH)_2 -Lösung ein Zementsteinsystem nur ungenügend darstellt, da im Beton selbst nach 90 Tagen der Erhärtung auch bei höheren Puzzolangehalten noch pH-Werte von über 13 vorherrschen (vgl. Abb. 12) im Vergleich zu ca. pH 12,5 bei gesättigter Calciumhydroxidlösung.

Tab. 11 Übersicht über die verwendeten Proben für die Auslaugungsversuche nach ASTM C311.

Probserie ¹	Zusatzstoff
$HS + \text{Ca(OH)}_2$	Hüttensand
$FA + \text{Ca(OH)}_2$	Flugasche
$T1 + \text{Ca(OH)}_2$	Rheinischer Trass
$T2 + \text{Ca(OH)}_2$	Italienischer Tass I
$T3 + \text{Ca(OH)}_2$	Italienischer Trass II
¹ 5g Zusatzstoff + 2 g Ca(OH)_2	

3.6 Untersuchungsverfahren und Methoden

3.6.1 Dehnungsmessungen

An den Mörtelprismen wurden zu definierten Zeitpunkten 1, 7, 14, 21, 28, 56, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330 und 360 Tagen Dehnungsmessungen in Anlehnung an Teil 3 der Alkalirichtlinie des DAfStb an jeweils 3 Prismen durchgeführt. Dabei wurde die relative Längendehnung im Vergleich zur Nullmessung bestimmt. Die Nullmessung erfolgte nach einem Tag Auslagerungszeit in der Nebelkammer. Somit wurde der Effekt der Wärmedehnung eliminiert.

Die Längenänderungen der Betonproben der 40 °C Lagerung wurden analog zu den Mörtelprismen nach Teil 3 der Alkalirichtlinie bestimmt. An den Betonwürfeln wurden an den oben genannten Prüfterminen jeweils Sichtprüfungen durchgeführt, um eine mögliche Rissbildung feststellen zu können.

An den Betonserien der 60 °C Reaktorlagerungen wurden ebenfalls die Längenänderungen in Anlehnung an den 3. Teil der Alkali-Richtlinie gemessen. Allerdings wurde jeweils nur ein Betonprisma einer periodischen Längenmessung unterzogen. Die Messung erfolgte über eine Zeitdauer von 180 Tagen. Die Messungen erfolgten nach 28, 56, 84, 112, 140 und 180 Tagen.

3.6.2 Gefügeuntersuchungen und mikrochemische Untersuchungen

Für die Gefüge- und mikrochemischen Untersuchungen der Mörtelserien wurden die Probekörper nach den definierten Auslagerungszeiten (7, 28, 90, 180 und 360 Tagen) der Nebelkammer entnommen und für fünf Tage bei 40 °C und einem Druck von 20 mbar im Vakuum-Ofen ge-

trocknet. Anschließend wurden Dünnschliffe und Anschliffe nach Tränkung mit einem fluoreszierenden Harz angefertigt. Die Proben wurden wasserfrei und mit Petroleum geschliffen sowie mit Diamantschleifmittel der Körnung 9, 3, 1 und $\frac{1}{4}$ μm poliert.

Gefüge- und mikrochemische Untersuchungen an den Betonprüfkörpern wurden nach 360 d (40 °C Nebelkammerlagerung) bzw. nach 180 d (60 °C AKR-Tester) durchgeführt. Die Untersuchungen fanden an Dünn- und polierten Anschliffen statt, die analog den Präparaten der Mörtelserien hergestellt wurden. Von den Zementleimprobekserien, die jeweils bei drei verschiedenen Temperaturen (20° C, 40°C und 60°C) gelagert waren, wurden polierte Anschliffe angefertigt.

Die lichtmikroskopischen Gefügeuntersuchungen erfolgten an einem Polarisationsmikroskop der Firma Zeiss (Axioscop 40 Pol). Es wurden dabei die geschädigten reaktiven Gesteinskörnungen und die aus der AKR resultierenden Gefügeänderungen untersucht.

Die mikrochemischen Untersuchungen und die hoch aufgelösten Gefügeuntersuchungen wurden an einer Mikrosonde (15 KV, JEOL JXA 8200 Superprobe) und einem Rasterelektronenmikroskop (15 KV, LEO Gemini 1530 VP, EDX System von Oxford Instr.) durchgeführt. Bei den mikrochemischen Untersuchungen wurden unter anderem die Si/Ca-, Al/Ca-Verhältnisse als Atomprozente bestimmt und graphisch ausgewertet (Abb. 24). Für diese Messungen wurde die von Scrivener [65] beschriebene Methodik verwendet, in dem möglichst viele Punkte in den äußeren C-S-H-Phasen gemessen wurden. Messpunkte wurden möglichst weit von den Klinkern gewählt, um sicherzustellen, dass die äußere und nicht die innere C-S-H-Phasen erfasst wurden. Nichthydratisierte Phasen wurden über die Menge an Sauerstoff detektiert. Hydratisierte Phasen besitzen einen Sauerstoffanteil zwischen 60-80 Atom-%, nicht hydratisierte zwischen 30 und 50 Atom-% [10, 88, 89]. Es wurden daher nur Messpunkte berücksichtigt, die innerhalb des ersten Bereichs lagen. Pro Probe wurden ca. 150 Punkte gemessen.

Die Analysenergebnisse wurden in einem Diagramm als Si/Ca-Atomverhältnisse gegen Al/Ca-Verhältnisse geplottet (Abb. 25). Die Zusammensetzungen der Hydratphasen Monosulfat (AFm), Ettringit (AFt) und Portlandit (CH) wurden im Diagramm als Punkte eingetragen. Davon ausgehend, dass es sich bei den gemessenen Phasen um eine Mischung aus C-S-H, AFm, AFt sowie CH handelt, liegen Analysenergebnisse, die überwiegend aus C-S-H und einer der übrigen Phasen bestehen, auf einer Konode, die diese zwei Phasen verbinden. Die Zusammensetzung der C-S-H-Phasen lässt sich dann als Schnittpunkt von mindestens zwei Konoden konstruieren. Die Methode ist zwar nicht sehr genau, aber bei Vorliegen einer ausreichenden Anzahl an Analysenergebnissen lassen sich die Konoden und deren Schnittpunkt näherungsweise konstruieren. Faktoren welche das Ergebnis beeinflussen sind die schlecht definierte Zusammensetzung der C-S-H-Phasen, sowie Zählraten von Gesteinskörnungen und Klinkererersatzstoffe, die teilweise an der Oberfläche nicht erkennbar im Bereich des durch den Elektronenstrahl erzeugten Analysenvolumens liegen. In den Diagrammen der Atomverhältnisse ist deshalb die C-S-H-Phasenzusammensetzung jeweils durch eine Ellipse gekennzeichnet (Abb. 25). Dies ist die einzige Methode, die signifikante Ergebnisse zu systematischen Veränderungen der C-S-H-Phasen liefert.

Eine Bestimmung der Si/Ca- und Al/Ca-Atomverhältnisse erfolgte bei den Mörtel- und Zementsteinserien. An den Betonserien wurden die gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte mikrochemisch untersucht. Hier wurde das Hauptaugenmerk auf die Gehalte an Na, K, Ca, und Si in den AKR-Reaktionsprodukten der verschiedenen Proben gelegt.

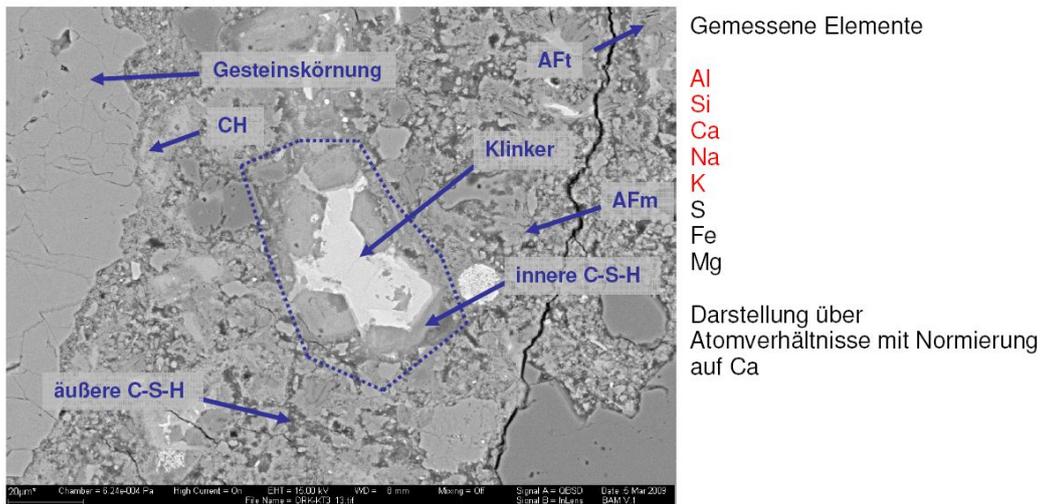


Abb. 24 REM Aufnahme eines polierten Anschliffes einer Mörtelprobe zur Ermittlung des Einflusses der Zusatzstoffe auf den Chemismus des C-S-H-Phasen.

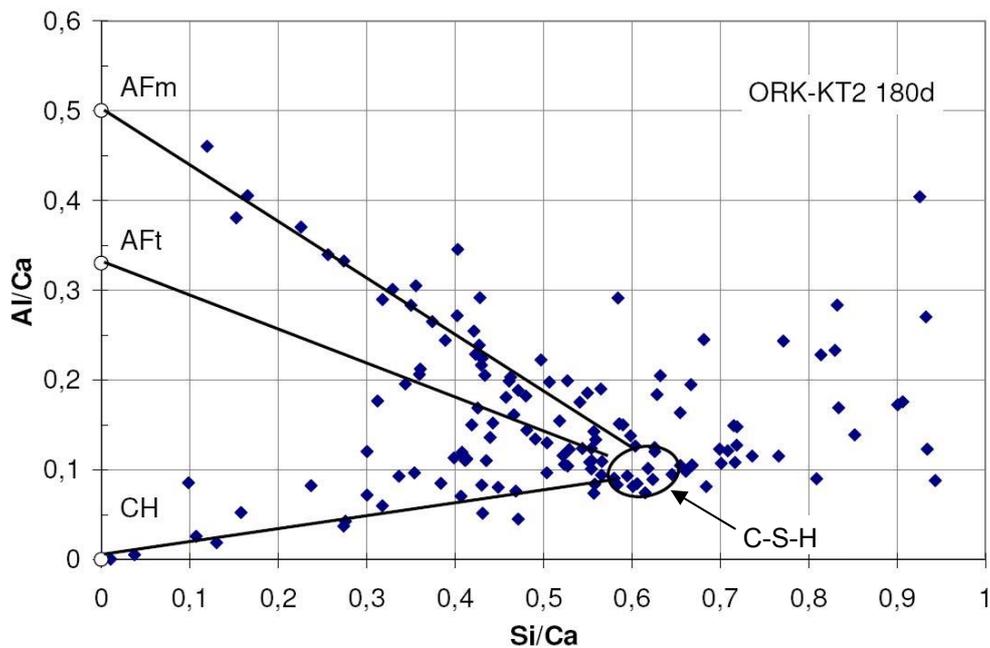


Abb. 25 Beispiel einer Darstellung der atomaren Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein eines Mörtelprismas. Es sind die Messergebnisse, die Zusammensetzung von CH, AFt und AFm, die Konoden der Phasenkoexistenzen sowie die ungefähren Elementverhältnisse in den C-S-H-Phasen in Form einer Ellipse wiedergegeben.

3.6.3 Bestimmung des Auslaugungspotentials der Zusatzstoffe nach ASTM C311

Der ursprüngliche Gehalt an Na_2O und K_2O von Hüttensand, Flugasche und den Trassen wurde mittels DIN EN196-2 [69] bestimmt. Nach 28-tägiger Lagerung bei 40°C wurde der Feststoff abfiltriert und verbleibendes Calciumhydroxid durch Auswaschen entfernt. Anschließend wurde erneut der Alkaligehalt der Feststoffe bestimmt. Die Konzentrationsdifferenz an Alkalien ($= \Delta\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$) zwischen dem ursprünglichen Gehalt und dem Gehalt nach dem Versuch entsprach der Alkalimenge, die aus dem Klinkerersatzstoff ausgelaugt wurde und in Lösung gehen konnte.

4 Ergebnisse

4.1 Mörtelseries bei 40°C Nebelkammerlagerung

4.1.1 Längenänderung (Abb. 26)

Die Nullserienprobenkörper (**M-NA**), die nicht zusätzlich mit KOH dotiert waren und nur mit alkaliarmen Zement hergestellt wurden, zeigten mit 0,02 mm/m nach 360 d wie erwartet keine Dehnung (siehe Anhang A3). Die Referenz-Mörtelserie mit dotiertem Portlandzement (**M-K**) wies nach 360 d nur die dritthöchste Dehnung mit 0,30 mm/m auf. Nach 28 d waren die Dehnungen mit 0,02 mm/m gering. Zwar konnte zwischen dem 28. bis 91. Tag ein Anstieg der Dehnung beobachtet werden, dieser flachte jedoch zwischen dem 91. und 180. Tag ab um anschließend wieder etwas anzusteigen.

Die flugaschehaltige (**M-KF**) und die hüttensandhaltige Mörtelserie (**M-KH**) wiesen nach 360 d mit 0,24 mm/m bzw. 0,26 mm/m wie erwartet eine geringere Dehnung als die Referenz Mörtelserie M-K auf. Die hüttensandhaltigen Serie (**M-KH**) zeigte in den ersten 28 Tagen der Auslagerungszeit mit 0,06 mm/m die höchste Dehnungsrate aller Mörtelseries. Danach waren nur noch geringe Dehnungsraten bis zum 91. Tag beobachtbar. Zwischen dem 91. und 120. Tag zeigte sich eine erneute Dehnung, die allerdings zwischen 120 bis 180 Tagen stoppte. Ab 180 bis 360 Tagen war jedoch wieder ein deutlicher Anstieg der Dehnungen beobachtbar. Die flugaschehaltige Serie (**M-KF**) wies nach der Auslagerungsdauer von 28 Tagen eine Dehnung von 0,02 mm/m auf. In der Zeit von 28 bis 180 Tagen war nur eine geringfügige Schwankung der Dehnung erfassbar. Nach der Auslagerungsdauer von 180 Tagen wurde wieder ein Anstieg der Längendehnung beobachtet, der sogar eine stärkere Steigung besaß als die hüttensandhaltige Serie.

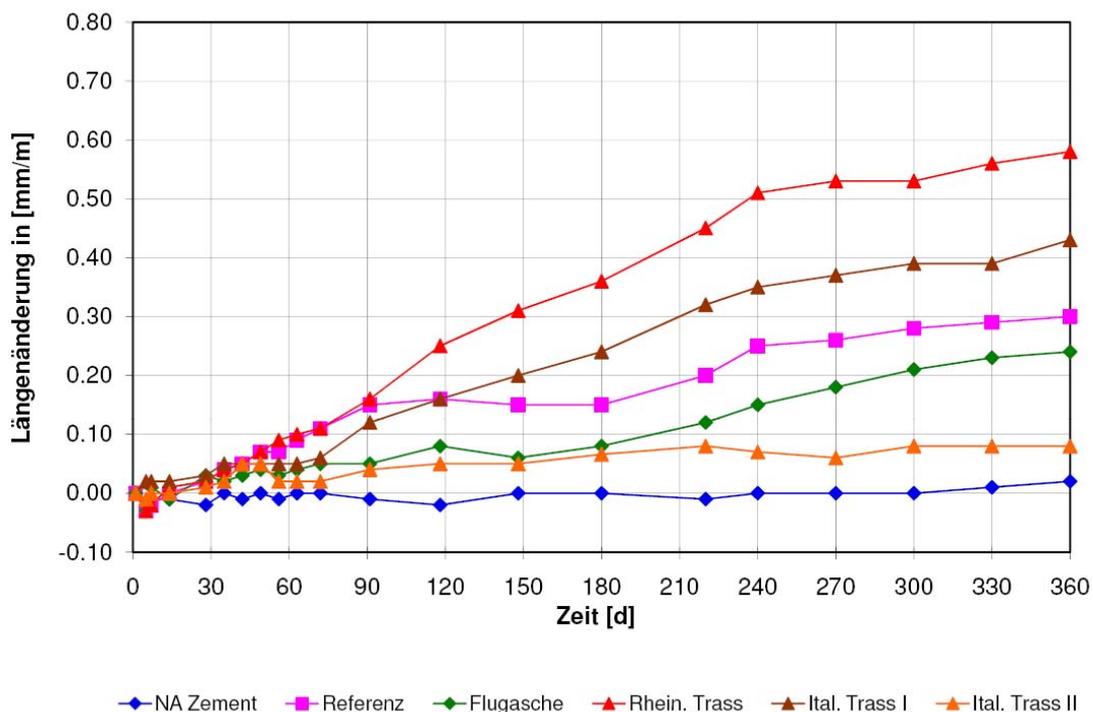


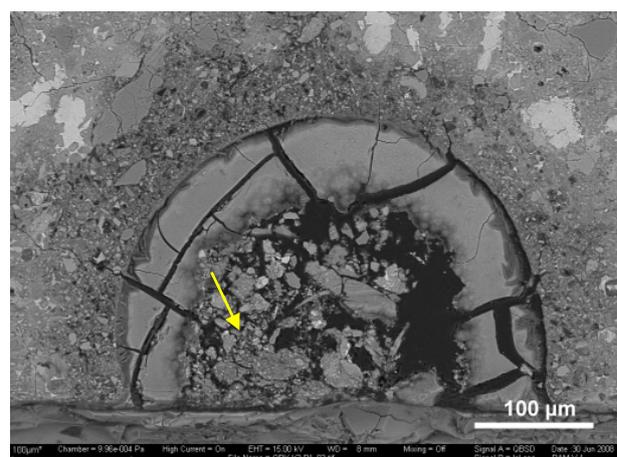
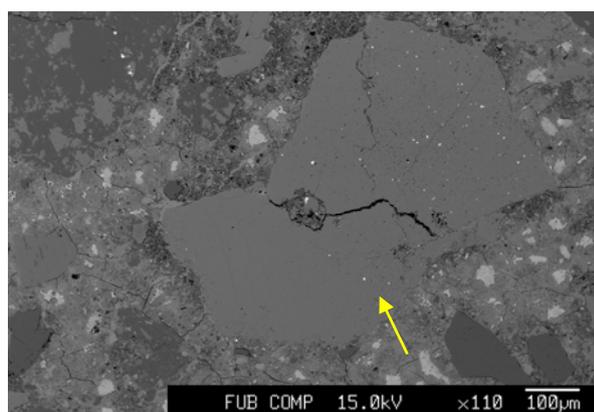
Abb. 26 Mittelwerte der Dehnungen aus jeweils drei Prismen der Mörtelseries.

Nach einer Auslagerungsdauer von 360 Tagen wies die Mörtelserie mit Rheinischem Trass (**M-KT1**) eine Dehnung von 0,58 mm/m auf gefolgt von der Serie mit Italienischem Trass I (**M-KT2**) mit 0,43 mm/m. (siehe Abb. 26). Die geringste Dehnung der Serien mit Klinkerersatzstoffen wies die Serie mit Italienischer Trass II (**M-KT3**) auf. Die Mörtelserie mit Rheinischem Trass (**M-KT1**) wies in den ersten 28 Tagen nur geringe Dehnungsraten von 0,06 mm/m auf. Nach einer Auslagerungsdauer von 60 Tagen war ein plötzlicher Anstieg der Dehnungsraten feststellbar, der bis zur Auslagerungszeit von 270 Tagen kontinuierlich anstieg. Danach konnte wieder eine weniger starke Dehnungsrate beobachtet werden. Die Mörtelserie mit dem Italienischen Trass I (**M-KT2**) wies nach 28 Tagen Auslagerungszeit eine Dehnung von 0,03 mm/m auf. In der Zeit vom 28. bis 72. Tag war kein Anstieg der Dehnung beobachtbar. In der Zeit vom 72. bis 270. Tag kam es zu einem Anstieg der Dehnungsrate. Vom 270. bis 330. Tag der Auslagerungszeit zeigte sich nur noch eine geringe Zunahme der Dehnung. In der Auslagerungszeit zwischen dem 330. und 360. Tag war wieder ein Anstieg der Dehnungsrate zu verzeichnen. Die Mörtelserie mit dem Italienischen Trass II (**M-KT3**) zeigte über die gesamte Auslagerungszeit die geringste Tendenz, Dehnung zu zeigen und besaß demzufolge nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen die geringste Dehnung aller zusatzstoffhaltigen Probenserien.

4.1.2 Gefügeuntersuchungen

Die Gefügeänderungen, die sich in den Mörtelprismen nach den verschiedenen Auslagerungszeiten ergaben, fielen entsprechend unterschiedlich aus. Praktisch alle Probenserien zeigten nach 28 Tagen noch keine Schädigungen. Erst nach 90 Tagen waren Rissbildungen zu erkennen (s.u.).

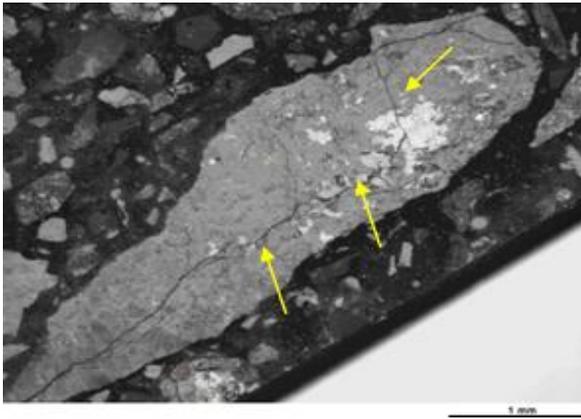
Die mit KOH dotierte Portlandzementmörtelserie (**M-K**) wies nach 90 Tagen erste Anzeichen einer AKR-Schädigung auf. Schäden traten vor allem in den Gesteinskörnungen des Kieselkalles in Form von feinen Rissen auf, die nur am Rasterelektronenmikroskop im Rückstreuemodus (BSE) deutlich zu erkennen waren. Größere Ansammlungen von Reaktionsprodukten wurden ausschließlich in den Luftporen beobachtet (Abb. 27). Nach einer Auslagerungszeit von 180 und 360 Tagen waren in den Proben, anhand der Dünn- und Anschliffe, deutlich ausgeprägte Risse in den reaktiven Gesteinskörnungen und im Zementstein zu erkennen (Abb. 28 und Abb. 29).



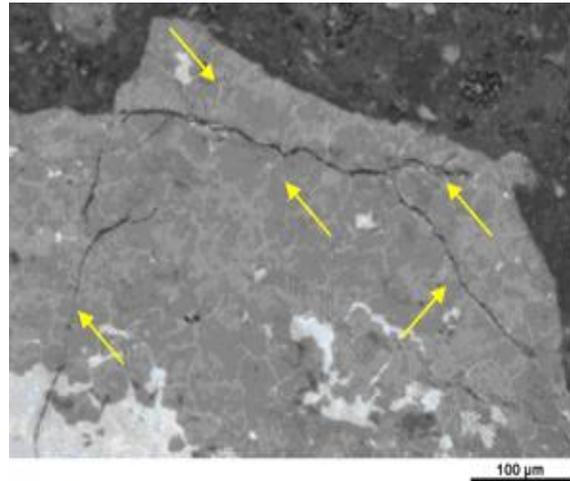
100µm

a) Risse in der reaktiven Gesteinskörnung nach 90 Tagen Auslagerungszeit b) AKR-Reaktionsprodukt in einer Luftpore.

Abb. 27 Mikroskopische Aufnahmen der Referenz Mörtelserie **M-K** nach einer Auslagerungszeit von 90 Tagen (polierter Anschliff, REM-BSE).



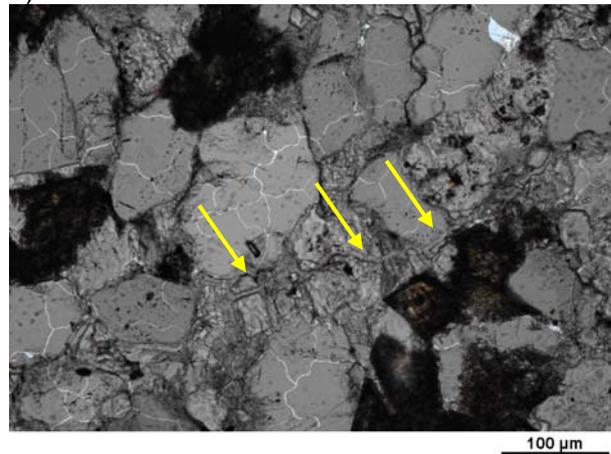
a) Verkieselter Kalk mit Rissystem



b) Detailaufnahme des Kieselkalks

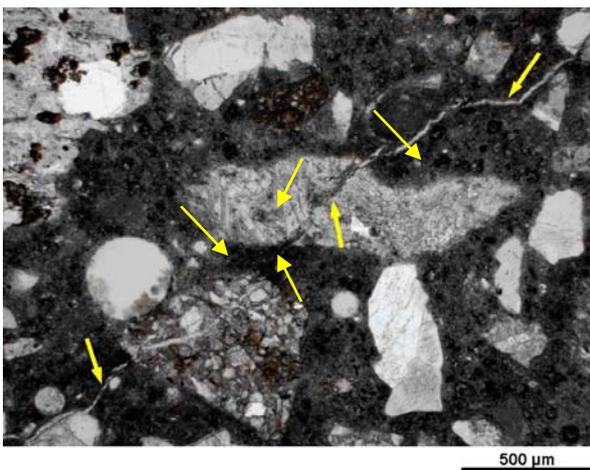


c) Quarzsandstein mit sehr feinem Rissystem

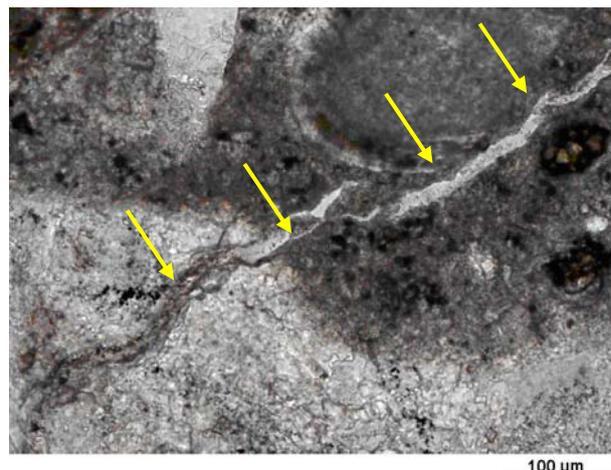


d) Detailaufnahme des vorherigen Bildes.

Abb. 28 Lichtmikroskopische Aufnahmen von gerissenen reaktiven Gesteinskörnungen der aufdotierten Portlandzement (**M-K**) Mörtelserien nach einer Auslagerungszeit von 180 Tagen (Dünnschliff, parallele Polfilter, Polarisationsmikroskop).



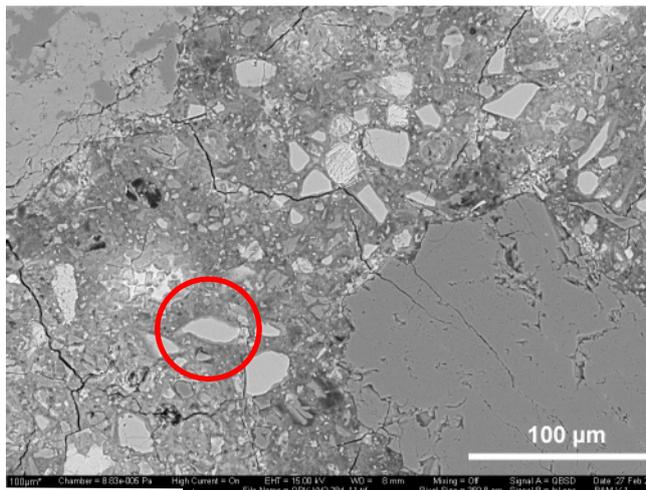
a) Rissystem, welches zwei reaktive Gesteinskörnungen und den Zementstein durchschlägt.



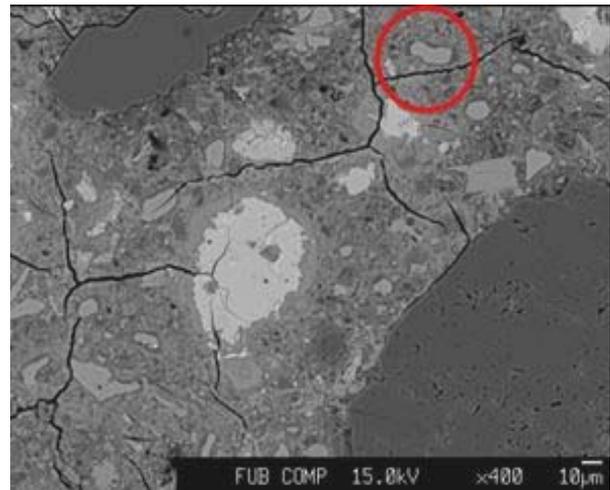
b) Detailbild von a). Erkennbarer Austritt des Risses von der reaktiven Gesteinskörnung in den Zementstein. An Grenze auch Propfenbildung erkennbar.

Abb. 29 Rissystem, dass sich über mehrere alkaliempfindliche Gesteinskörnungen erstreckt nach 360 Tagen der **M-K** Serie (Dünnschliff, parallele Polfilter, Polarisationsmikroskop).

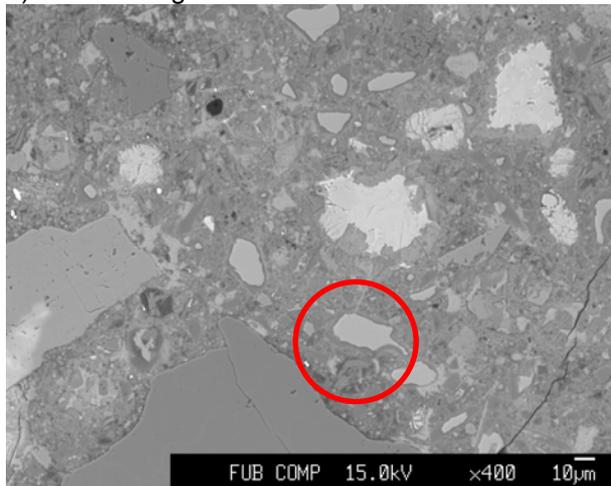
Die Mörtelserie mit Hüttensand (**M-KH**) zeigte selbst nach 360 Tagen nur vereinzelte Risse in der reaktiven Gesteinskörnung, die der AKR zugeschrieben werden könnten. Es wurde jedoch noch kein gelförmiges AKR-Reaktionsprodukt nachgewiesen. Beim Betrachten der Hüttensandpartikel in der Zementsteinmatrix über die 360 Tage war ein stetiger Reaktionsfortschritt der Hydratation der Hüttensandpartikel zu erkennen. Bei den Proben mit den Auslagerungsalters von 28 bis 180 Tagen zeigte sich ein schmaler Hydrationsaum entlang der Korngrenze. Nach 360 Tagen konnten vollständig hydratisierte Hüttensandpartikel beobachtet werden (Abb. 30).



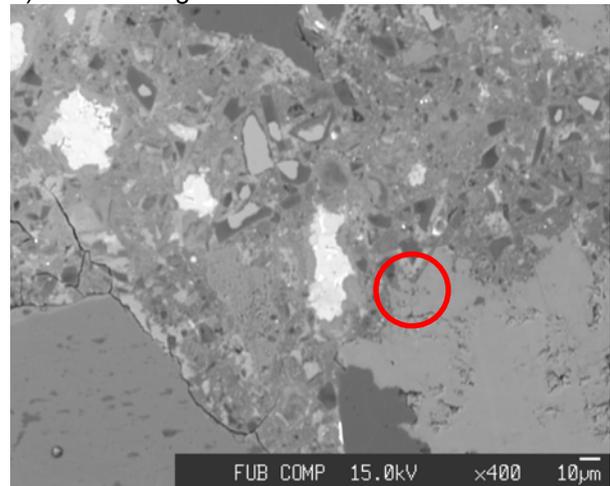
a) nach 28 Tagen



b) nach 90 Tagen



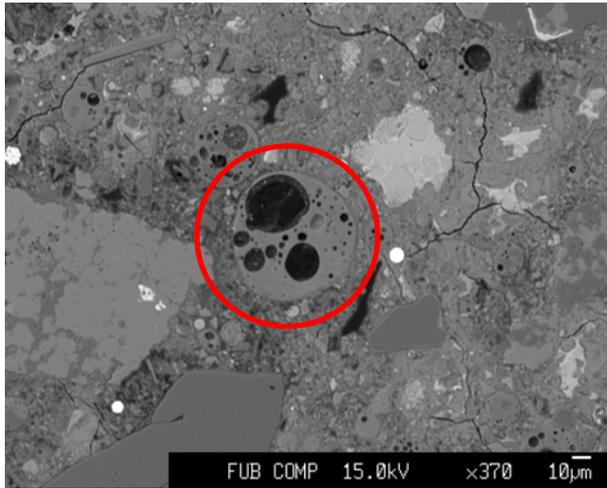
c) nach 180 Tagen



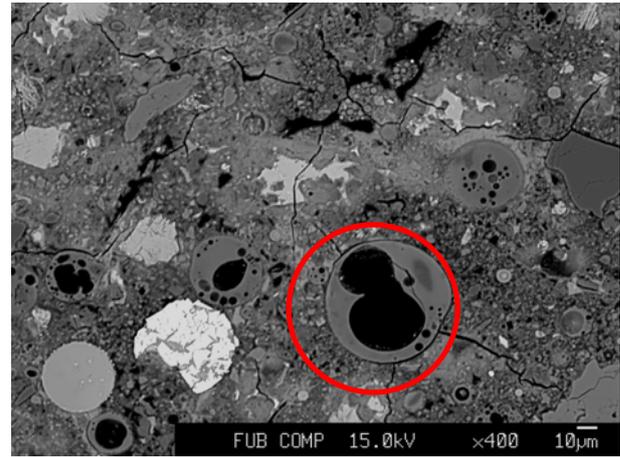
d) nach 360 Tagen

Abb. 30 Mikroskopische Aufnahmen der Hüttensandpartikel der **M-KH** Serie nach verschiedenen Auslagerungszeiten (polierter Anschliff, REM-BSE).

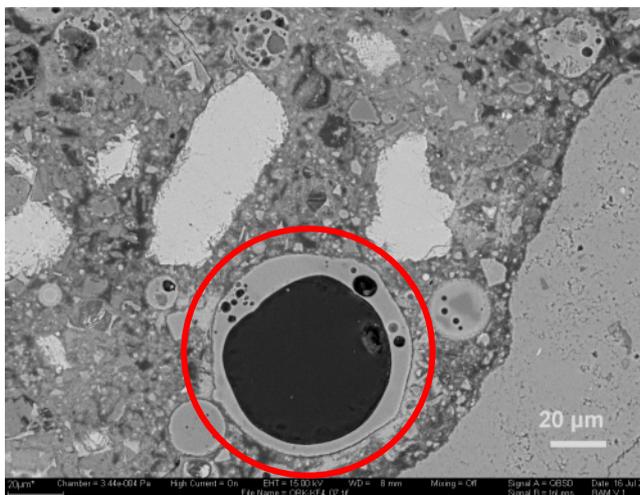
Die flugaschehaltige Serie **M-KF** zeigten zu keiner Zeit AKR-bedingte Schadensbilder in Form von Rissen oder Reaktionsprodukten. Größere Partikel von Flugasche zeigten über die gesamte Auslagerungszeit von 360 Tagen keine Anzeichen für eine Hydratation, wie es bei den vergleichbar großen Hüttensandpartikeln der Fall war (Abb. 31).



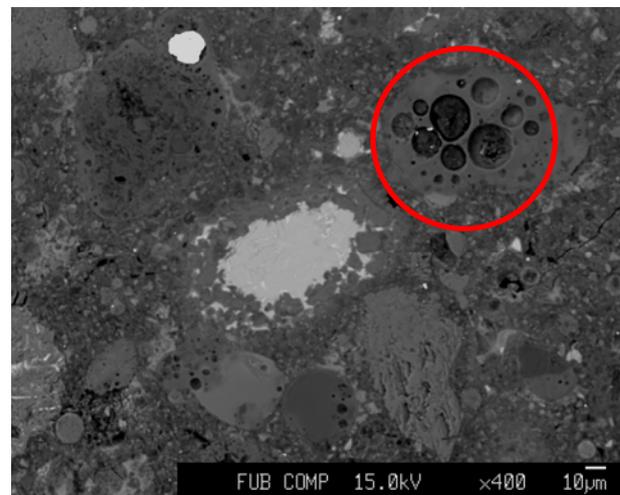
a) nach 28 Tagen



b) nach 90 Tagen



c) nach 180 Tagen



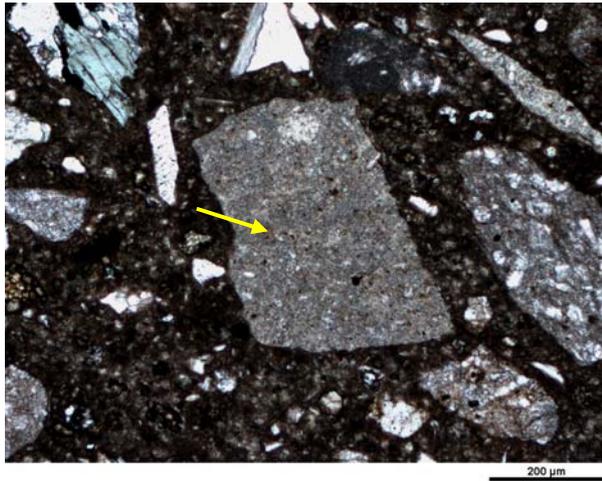
d) nach 360 Tagen

Abb. 31 Mikroskopische Aufnahmen der Flugaschepartikel (rot umrandet) der **M-KF** Serie nach einer Nebelkammer-Auslagerung von 28, 90, 180 und 360 Tagen (polierter Anschliff, REM-BSE).

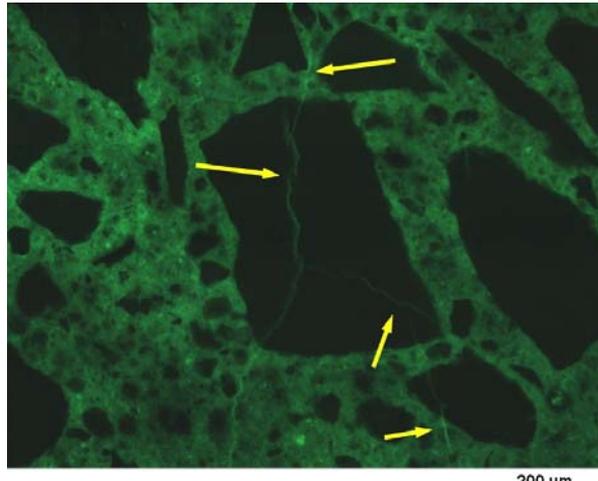
Bis zu einem Auslagerungsalter von 90 Tagen war bei der Mörtelserie mit dem Rheinischen Trass **M-KT1** beim Betrachten der Dünnschliffe keine durch eine AKR verursachte Rissbildung an den reaktiven Gesteinskörnungen erkennbar. Ab einem Auslagerungsalter von 180 Tagen waren Rissbildungen an den reaktiven Gesteinskörnungen zu beobachten, welche teilweise sehr fein ausgeprägt waren und erst bei der Betrachtung unter UV-Licht sichtbar wurden (Abb. 32).

Bei den Proben mit einem Auslagerungsalter von 360 Tagen war erkennbar, dass die Rissbreiten zugenommen hatten. Es war ebenso eine Intensivierung der Risse innerhalb einer Gesteinskörnung beobachtbar. Die Gesteinskörnungen wiesen teilweise ein verzweigtes Rissssystem auf, das sich über mehrere reaktive Gesteinskörnungen erstreckte (Abb. 33 und 34).

Vereinzelt war beobachtbar, dass Luftporen mit Reaktionsprodukten gefüllt waren. Damit verbunden waren häufig Risse sichtbar, die durch den Zementstein in Richtung der Luftporen liefen und in diese eindringen (Abb. 35). Diese Reaktionsprodukte füllten die Luftporen nur teilweise aus und befanden sich meist angrenzend zum Zementstein.

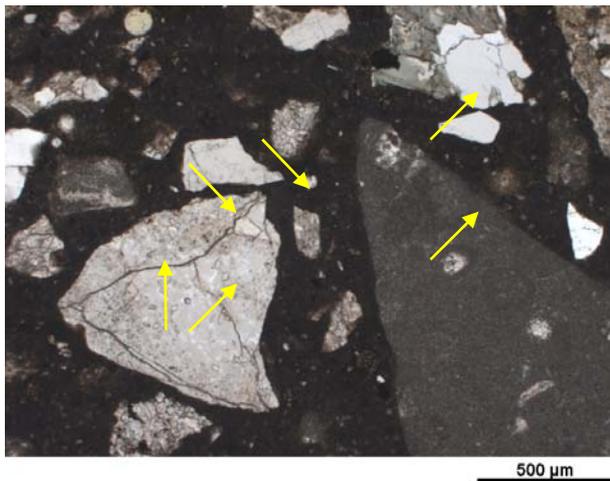


a) Feinkörniger Quarzsandstein mit feinem Riss (parallele Polfilter).

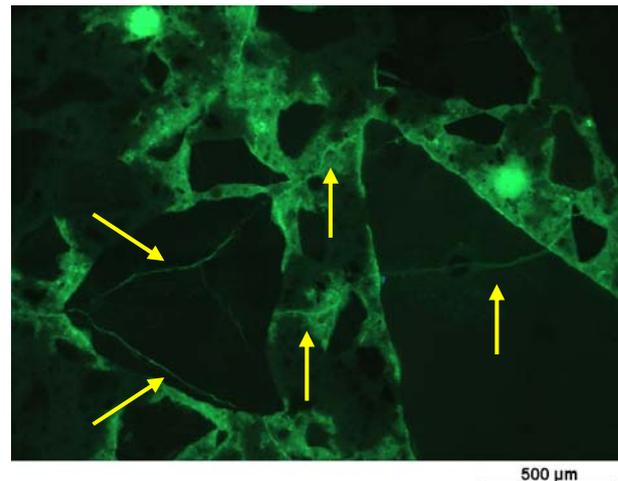


b) Dasselbe Korn wie in a) unter UV-Licht. Deutlich erkennbar, dass feine Rissystem, welches die Gesteinskörnung durchzieht und sich im Zementstein fortsetzt eindringt.

Abb. 32 Lichtmikroskopische Aufnahme der reaktiven Gesteinskörnung (Quarzsandstein) der Rheinisch trasshaltige Mörtelserie **M-KT1** Serie nach einer Auslagerungszeit von 180 Tagen (Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

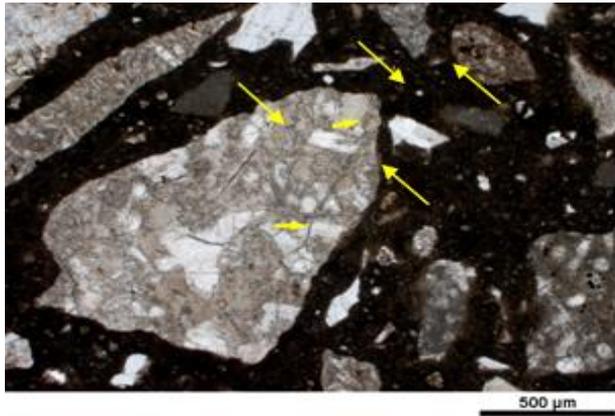


a) Verkieselter Kalk mit verzweigtem Rissssystem (parallele Polfilter).

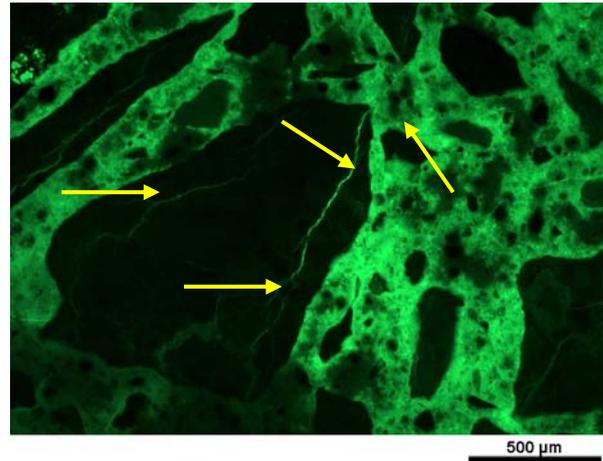


b) Dasselbe Korn wie in a) unter UV-Licht. Erkennbar, dass das Rissystem von der Gesteinskörnung aus in den Zementstein eindringt und weitere Gesteinskörnung durchzieht.

Abb. 33 Lichtmikroskopische Aufnahme einer gerissenen Gesteinskörnung (Kieselkalk) der **M-KT1** Serie nach einer Auslagerungsdauer von 360 Tagen (Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).



a) Verkieselter Kalk mit Rissbildung (parallele Polfilter).

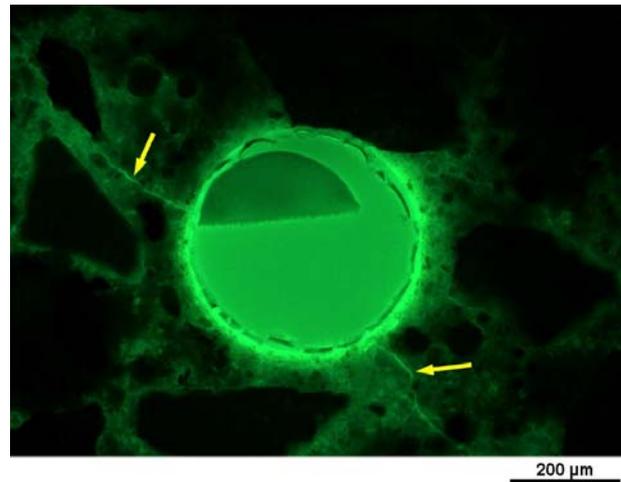


b) Dasselbe Korn wie in a) aber unter UV-Licht. Deutlich erkennbar ist das Rissystem in der Gesteinskörnung

Abb. 34 Lichtmikroskopische Aufnahme eines gerissenen Kieselkalks der **M-KT1** Serie nach der Auslagerungsdauer von 360 Tagen (Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).



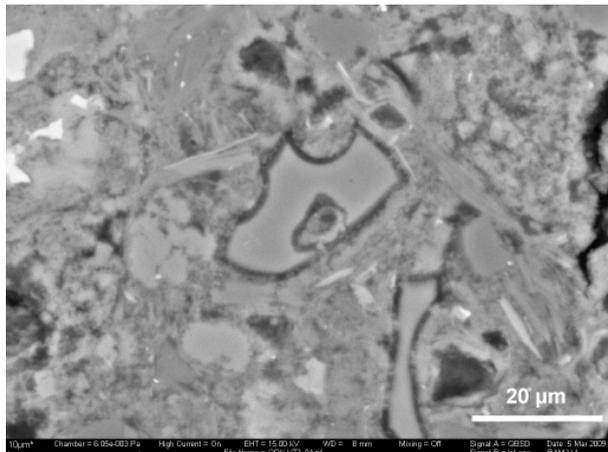
a) Luftpore mit AKR Reaktionsprodukten (parallele Polfilter).



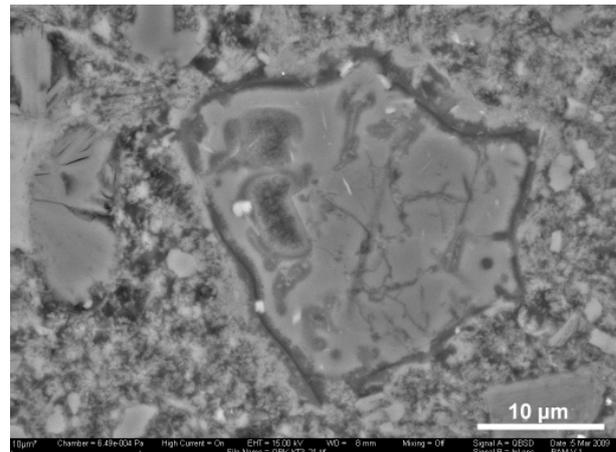
b) Dieselbe Pore wie in a) aber unter UV-Licht. Erkennbar ist ein Riss der vom Zementstein in die Pore läuft.

Abb. 35 Lichtmikroskopische Aufnahme einer mit Reaktionsprodukt gefüllter Luftpore der **M-KT1** Serie nach der Auslagerungsdauer von 360 Tagen (Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

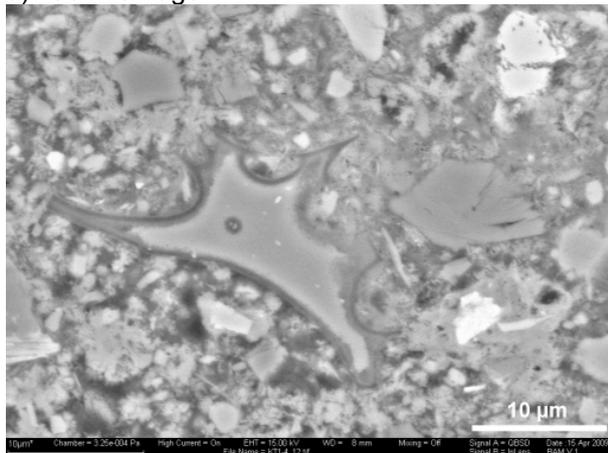
Beim Betrachten des vulkanischen Glasanteils des Rheinischen Trass war erkennbar, dass der Hydratationsgrad des Glases mit zunehmender Auslagerungszeit zunahm (Abb.36). So war nach 28 Tagen Auslagerungszeit nur ein feiner Hydratationssaum entlang der Korngrenze zu erkennen. Nach 90 Tagen waren erste Anlöseeffekte im Inneren des vulkanischen Glases zu beobachten. Es war ebenso eine Zunahme des Hydratationssaums entlang der Korngrenze sichtbar. Nach der Auslagerungszeit von 180 Tagen waren teilweise schon große Teile des vulkanischen Glases hydratisiert. Nach 360 Tagen zeigte sich, dass kleine Glaspartikel fast vollständig hydratisiert waren und nur noch ihre ursprüngliche Form als Relikt im Zementstein erkennbar war.



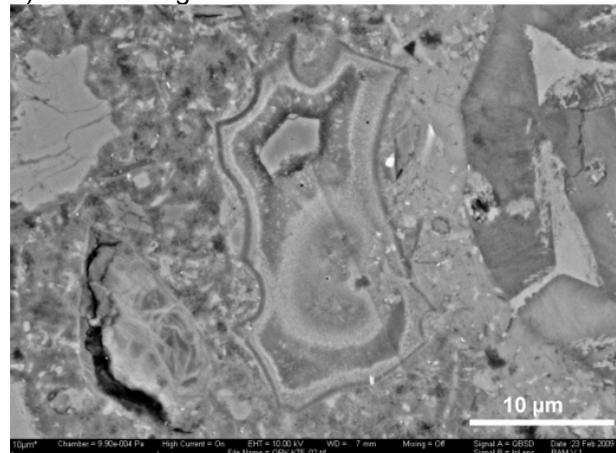
a) nach 28 Tagen



b) nach 90 Tagen



c) nach 180 Tagen

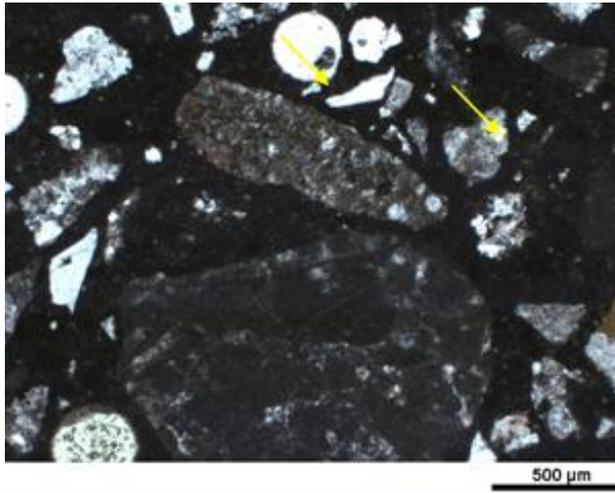


d) nach 360 Tagen

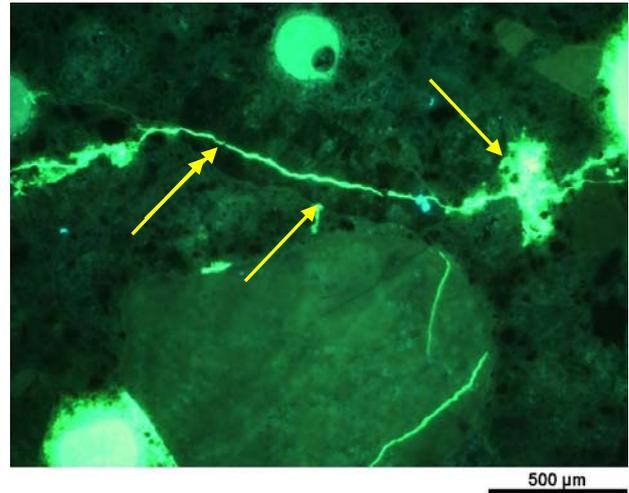
Abb. 36 Mikroskopische Aufnahmen von vulkanischen Gläsern des Rheinischen Trass (**M-KT1**, polierter Anschlag, REM-BSE).

Bei der Mörtelserie mit dem Italienischer Trass I (**M-KT2**) wurden erste AKR-bedingte Schäden wie Risse in den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen nach 180 Tagen detektiert (Abb. 37), deren Anzahl und Rissbreiten sich über 360 Tage deutlich erhöht hatte. Es waren hierbei, wie bei den Referenz Mörtelserien (M-K) und Rheinisch trasshaltigen Mörtelserien (M-KT1), Rissysteme zu beobachten, die sich über mehrere reaktive Gesteinskörnungen erstreckten.

Beim Betrachten der eher homogenen glasigen Komponenten des Italienischen Trass I zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den Gläsern des Rheinischen Trasses (Abb. 38). Es war eine Zunahme des Hydratationsgrades des vulkanischen Glases über die Auslagerungszeit von 360 Tagen feststellbar. Nach 28 Tagen waren diese im Gegensatz zu den Gläsern im Rheinischen Trass un- oder nur sehr schwach hydratisiert. Nach 90 Tagen Auslagerungszeit war ein deutlicher Hydratationsfortschritt zu beobachten. Ein Saum entlang des vulkanischen Glases mit Hydratphasen war deutlich wahrzunehmen, wobei die Gläser angelöst waren. In den Proben mit einem Auslagerungsalter von 180 Tagen waren schon stärker ausgebildete Reaktionssäume mit teilweise stark angelösten Gläsern zu erkennen. Die Proben mit einer Auslagerungszeit von 360 Tagen zeigten, wie beim Rheinischen Trass, teils vollständig hydratisierte Glaspartikel.

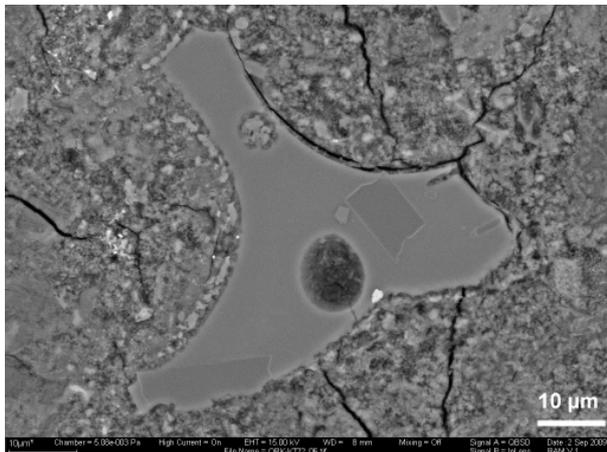


a) sehr fein gerissener Kieselkalk (parallele Polfilter).

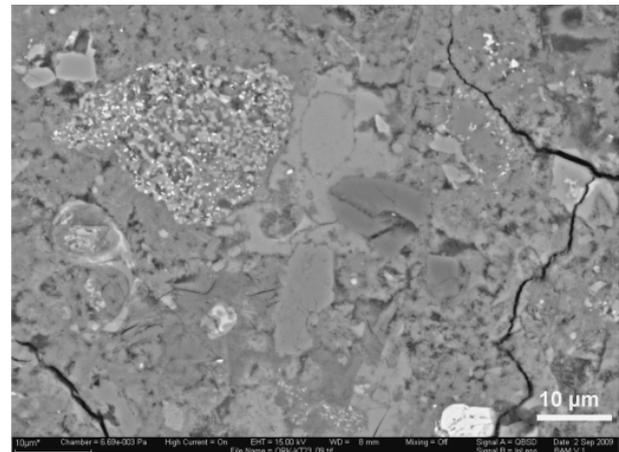


b) wie a) unter UV-Licht. Gut erkennbar ist ein Riss, der durch die Gesteinskörnung verläuft.

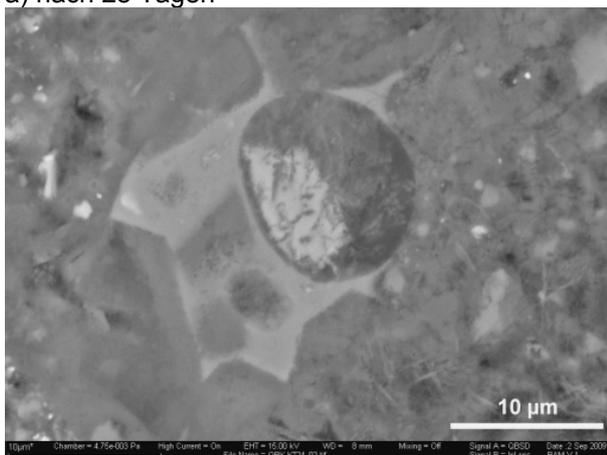
Abb. 37 Lichtmikroskopisches Bild der Mörtelserie mit dem Zusatzstoff Italienischen Trass I (M-KT2 Serie) nach 360 Tagen Auslagerungszeit (Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).



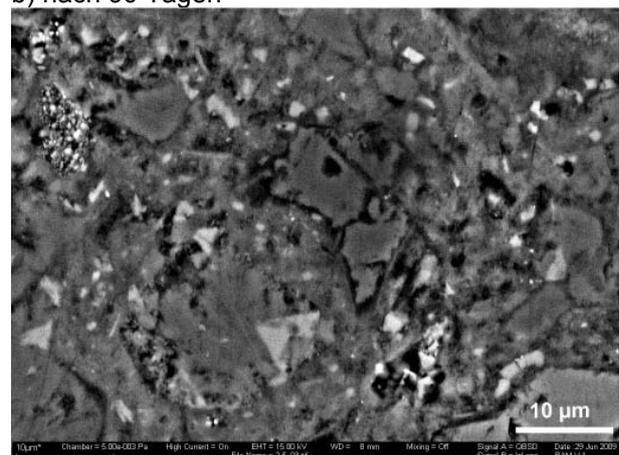
a) nach 28 Tagen



b) nach 90 Tagen



c) nach 180 Tagen

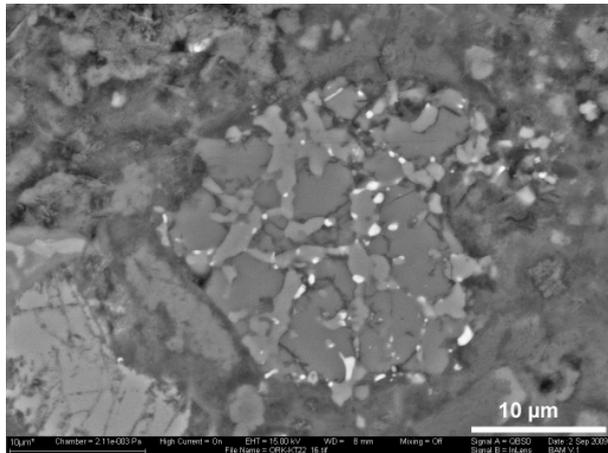


d) nach 360 Tagen

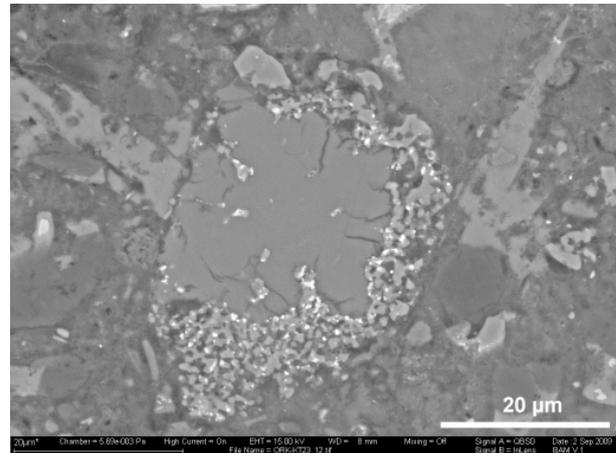
Abb. 38 Aufnahmen von vulkanischen Gläsern des Italienischen Trass I (M-KT2, polierter Anschliff, REM-BSE).

Auch weniger homogene Trasskomponenten, die aus einer Glasphase und kristallinen Anteilen bestanden, zeigten eine Zunahme der Hydratation in Abhängigkeit von der Auslagerungszeit

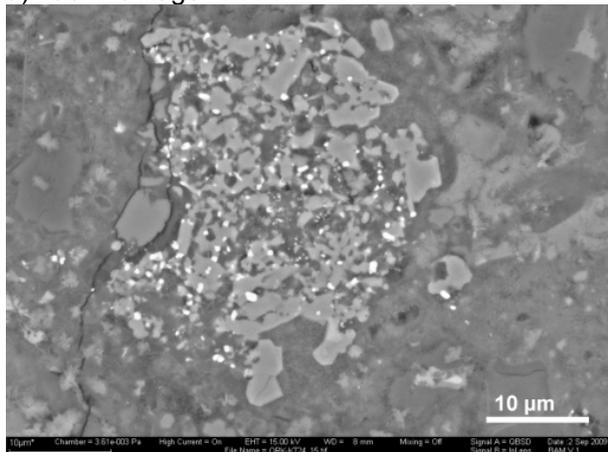
(Abb. 39). Nach 28 Tage Auslagerung war ein sehr feiner Hydratationssaum entlang der Korngrenzen zu erkennen. Nach 90 Tagen waren schon deutliche Auflösungserscheinungen in Form von breiteren Hydratationssäumen und im Inneren der Körner zu beobachten. Es zeigte sich bei Proben mit einem Auslagerungsalter von 180 Tagen, dass schon kleine Bereiche innerhalb der Fragmente angelöst waren; ebenso war ein weiterer Fortschritt des Hydratationssaumes entlang der Korngrenze zu beobachten. Nach 360 Tagen waren auch größere Bereiche innerhalb des Trasskorns hydratisiert.



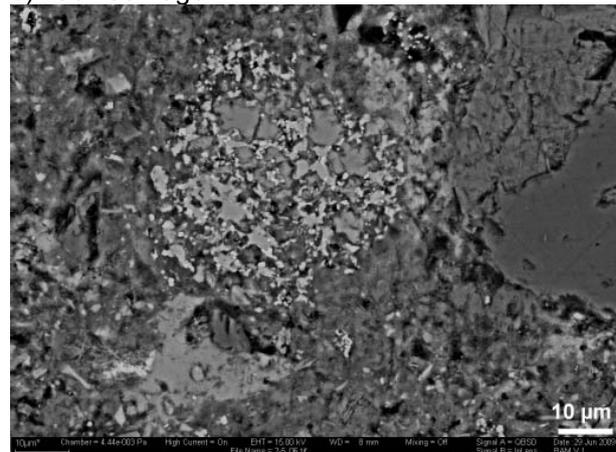
a) nach 28 Tagen



b) nach 90 Tagen



c) nach 180 Tagen



d) nach 360 Tagen

Abb. 39 Aufnahmen inhomogener Komponenten des Italienischen Trasses I (**M-KT2**, polierter Anschliff, REM-BSE).

Bei den Mörtelserien mit dem Italienischen Trass II (**M-KT3**) waren nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen an den reaktiven Gesteinskörnungen im Dünnschliff keine durch eine AKR induzierten Risse erkennbar. Es zeigte sich, dass anders als bei den M-KT2 (italienischer Trass I), die Trasskomponenten in Form von vulkanischem Glas keine ausgeprägten Reaktions Spuren aufwiesen. Dies zeigte sich wie erwartet, dass der Reaktionsumsatz des Italienischen Trasses II aufgrund seiner größeren mittleren Korngröße und der damit verbundenen kleineren spezifischen Oberfläche wesentlich geringer war als die des Italienischen Trasses, der die kleiner mittlere Korngröße aufwies.

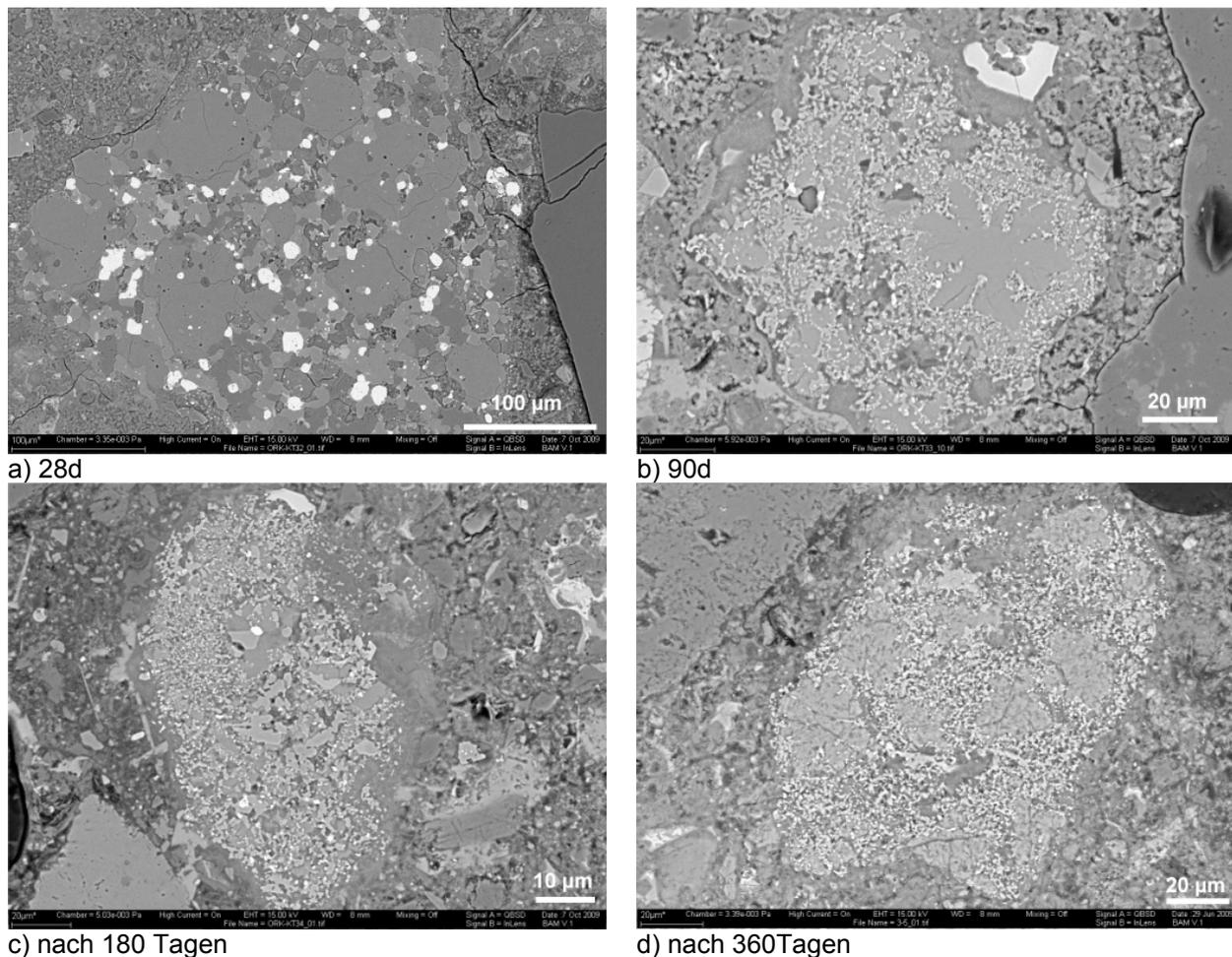


Abb. 40 Aufnahme der konglomeratartigen Bestandteile des Italienischen Trass II (**M-KT3**, polierter An-schliff, REM-BSE).



Abb. 41 Mörtelprisma der **M-K** Serie mit Rissen nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen.

Makroskopisch konnte bei lediglich zwei Mörtelserien deutliche Schäden infolge Rissbildung beobachtet werden. Die beiden Mörtelserien **M-K** und **M-KT1** wiesen nach 360 Tagen Auslagerungszeit äußere Anzeichen von AKR-Schädigung in Form von sehr feinen Rissen an der

Oberfläche der Probekörper auf (Abb. 41 und Abb. 42). Die anderen Mörtelseries zeigten dagegen nach einer Auslagerungszeit von 360 Tagen keine äußeren AKR-Schäden.

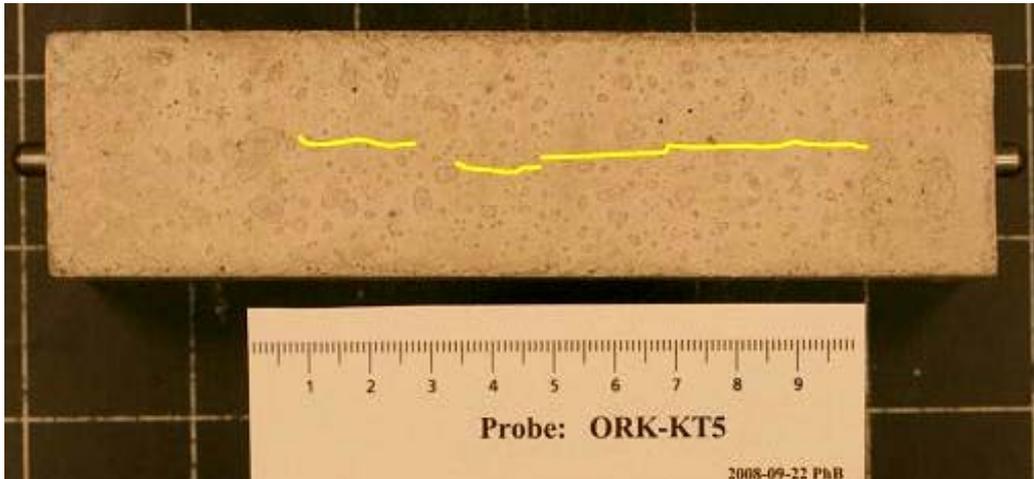


Abb. 42 Mörtelprisma der **M-KT1** Serie mit Rissen nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen.

4.1.3 Mikrochemische Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt wurden die mikrochemischen Daten gemäß der in Kapitel 3.6.2 erläuterten Methode in Form von Atomverhältnissen von Si/Ca gegen Al/Ca aufgetragen. Wenn deshalb im folgenden die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der Proben verschiedenen Alters einer Serie verglichen werden, handelt es sich um **die Atomverhältnisse der C-S-H-Phasen**. Die Untersuchung von Proben nach 7 Tagen Auslagerung erbrachte keine sichtbaren und messbaren Ergebnisse. Diese werden deshalb im folgenden nicht aufgeführt.

Es zeigte sich, dass sich die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der mit KOH dotierten Mörtelseries ohne Klinkerersatzstoffe **M-K** über die gesamte Auslagerungsdauer von 360 Tagen nur geringfügig veränderten. Die Lage der C-S-H-Phasen wurde nach der in Kapitel 3.6.2 beschriebenen Methode ermittelt und dargestellt (Abb. 43). Das mittlere Si/Ca-Verhältnis betrug nach 360 Tagen 0,5 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,055. Beim Vergleichen der Lage der C-S-H-Phasen in Abhängigkeit von der Zeit, war für die M-K Serie erkennbar, dass sich die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse über die Auslagerungsdauer von 360 Tagen nahezu konstant blieben (Abb. 44).

Bei den hüttensandhaltigen Mörtelseries **M-KH** wurde ein kontinuierlicher Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen über die gesamte Auslagerungszeit von 360 Tagen verzeichnet (Abb. 45 und 46). Nach 28 Tagen entsprach das Si/Ca-Verhältnis noch in etwa dem der M-K Serie. Das Al/Ca-Verhältnis jedoch lag schon über dem der dotierten Mörtelserie ohne Klinkerersatzstoffe. Nach einer Auslagerungsdauer über 90 Tagen waren ein leicht erhöhter Anstieg des Si/Ca-Verhältnisses und ein leicht erhöhter Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses feststellbar, der bis 180 d anhielt. Bei den Proben mit einer Auslagerungsdauer von 360 Tagen waren dagegen keine nennenswerten Änderungen der Atomverhältnisse verglichen mit den 180 Tage Werten mehr zu beobachten. Nach der Gesamtauslagerungsdauer von 360 Tagen betrug das mittlere Si/Ca-Verhältnis 0,58 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,09.

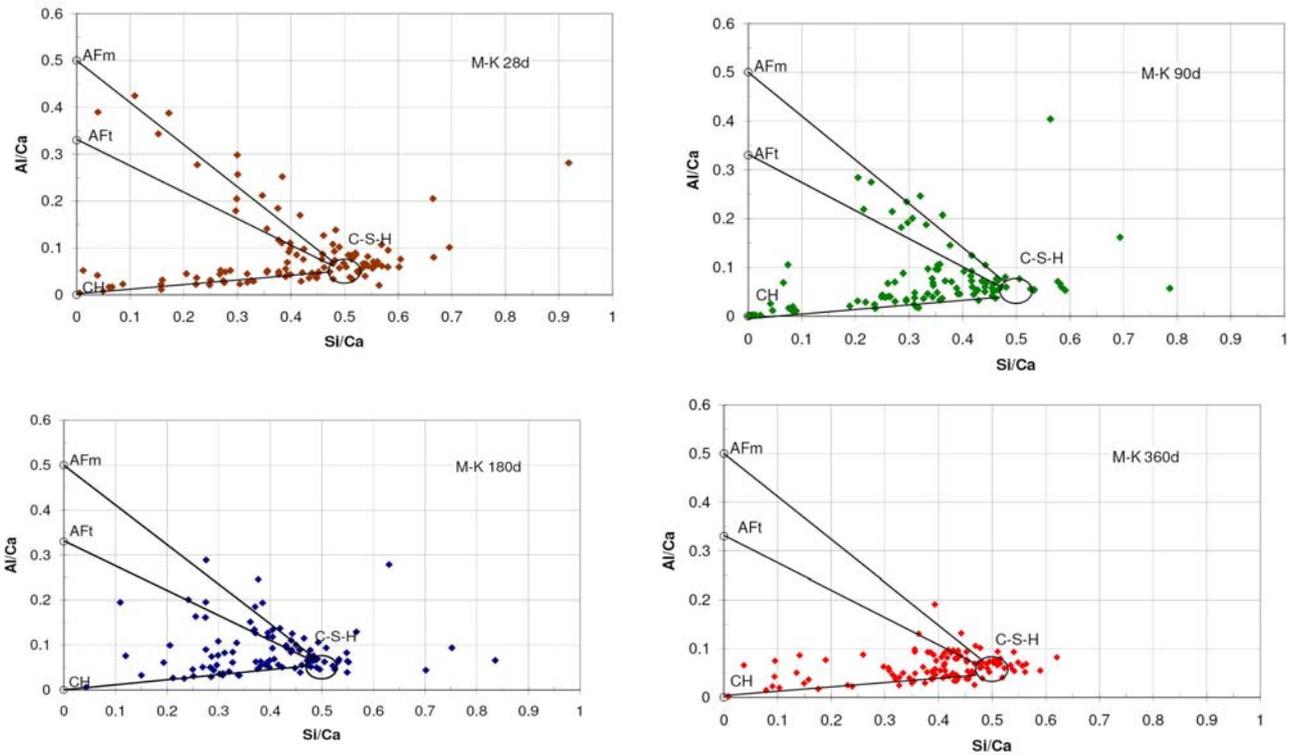


Abb. 43 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der aufdotierten Mörtelprämissenserie **M-K**.

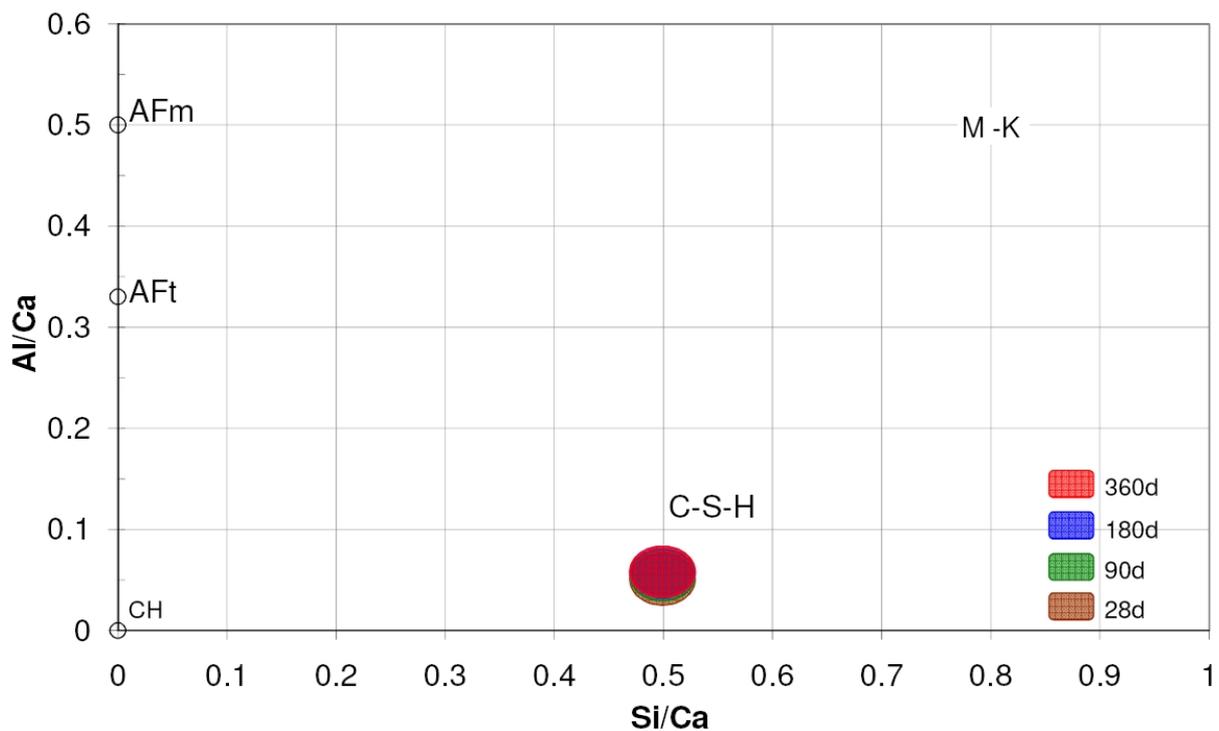


Abb. 44 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der aufdotierten Referenzmörtel **M-K** Serie.

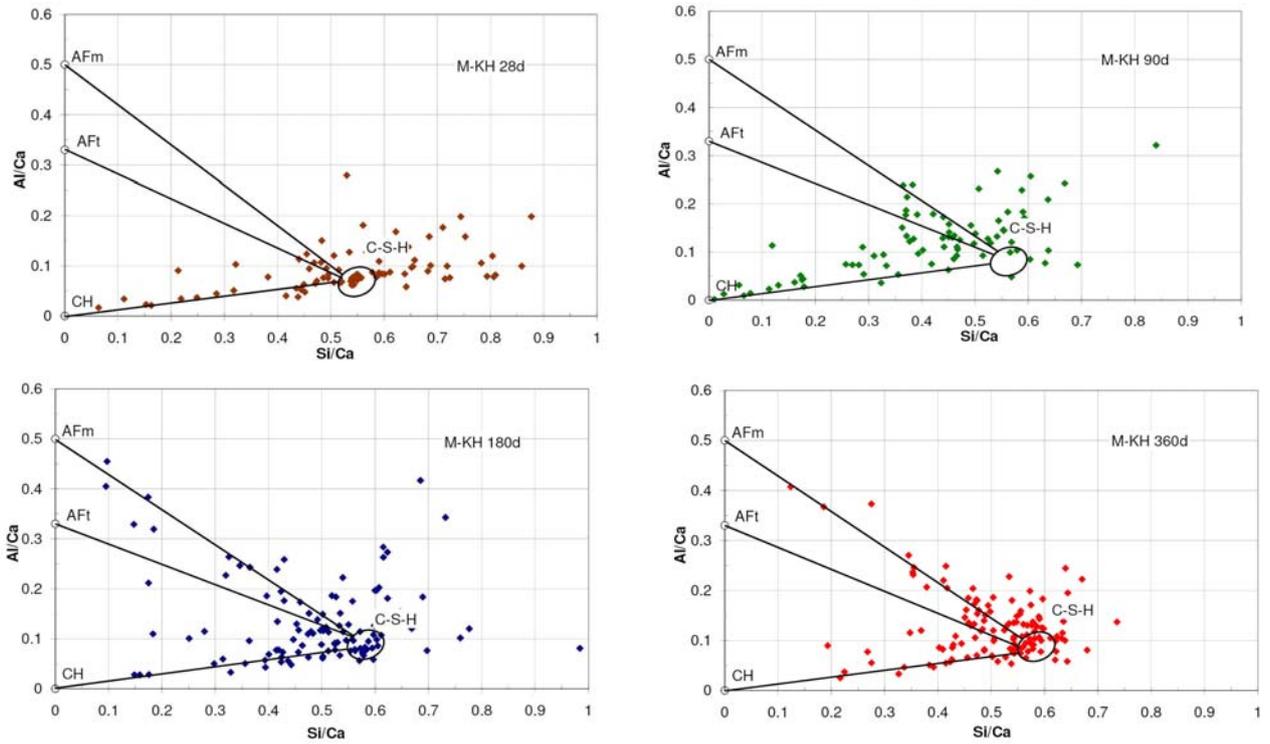


Abb. 45 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der hüttensandhaltigen Mörtelseries **M-KH** .

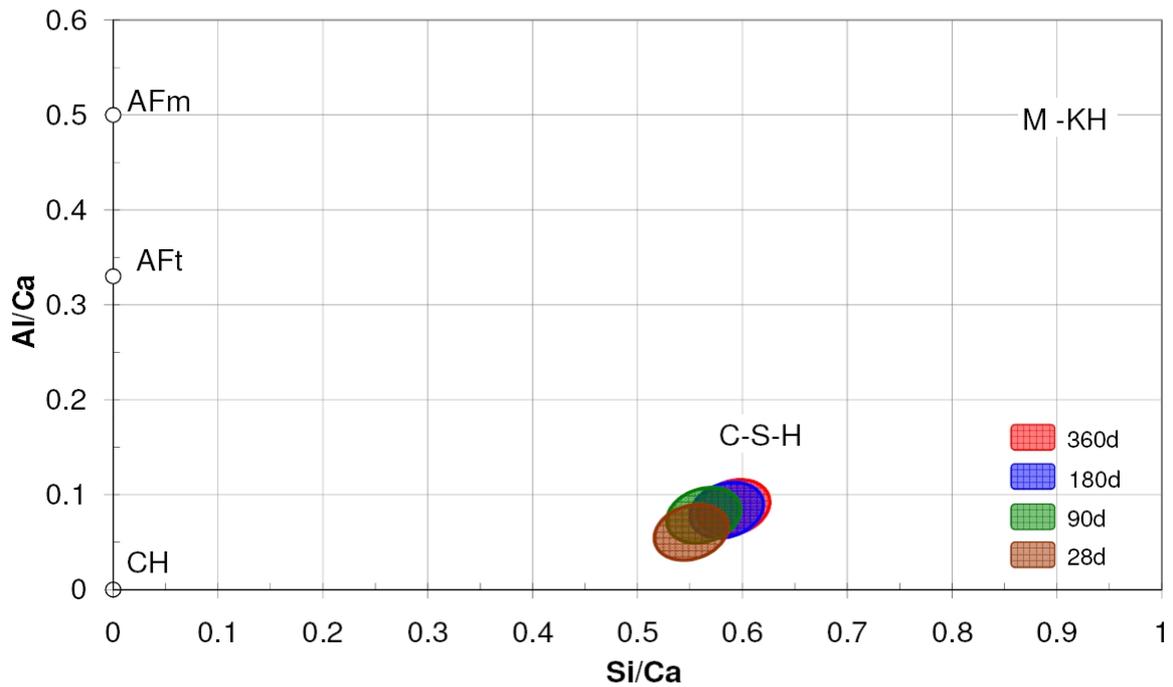


Abb. 46 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der hüttensandhaltigen Mörtelseries **M-KH** .

Die C-S-H-Phasenzusammensetzung der flugaschenhaltige Mörtelserie **M-KF** zeigte bereits nach 28 Tagen verhältnismäßig hohe Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse, wie sie von der hütten-sandhaltigen Serie erst nach etwa 180 d erreicht wurde (Abb. 47). Nach 28 d waren die Änderungen der Atomverhältnisse der flugaschenhaltigen Mörtelseries M-KF nur noch gering (Abb. 47 und 48). Am Ende der Auslagerung, nach 360 d, betrug das mittlere Si/Ca-Verhältnis der Serie 0,625 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,125. Im Vergleich zu der Serie mit dotiertem Referenzmörtelserie B-K) waren die Verhältnisse in den C-S-H-Phasen von M-KF bereits nach 28 Tagen wesentlich höher. Dass sich nach 28 Tagen an der C-S-H-Phasenzusammensetzung nicht mehr viel änderte korrelierte gut mit den Gefügeuntersuchungen an der Serie, anhand derer keine Veränderung im Reaktionsgefüge von größeren Flugaschepartikeln mehr beobachtet wurde. Anscheinend reagierte nach 28 Tagen bei 40 °C bereits ein Großteil der reaktiven Anteile der Flugasche, ohne bei weiterer Auslagerung weitere Änderungen in der Zementsteinchemie zu verursachen. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von [9], die ebenfalls nach 28 Tagen eine Abnahme der puzzolanischen Reaktion bei 40 °C (Nebelkammer) bei flugaschehaltigen Mörteln beobachtet haben.

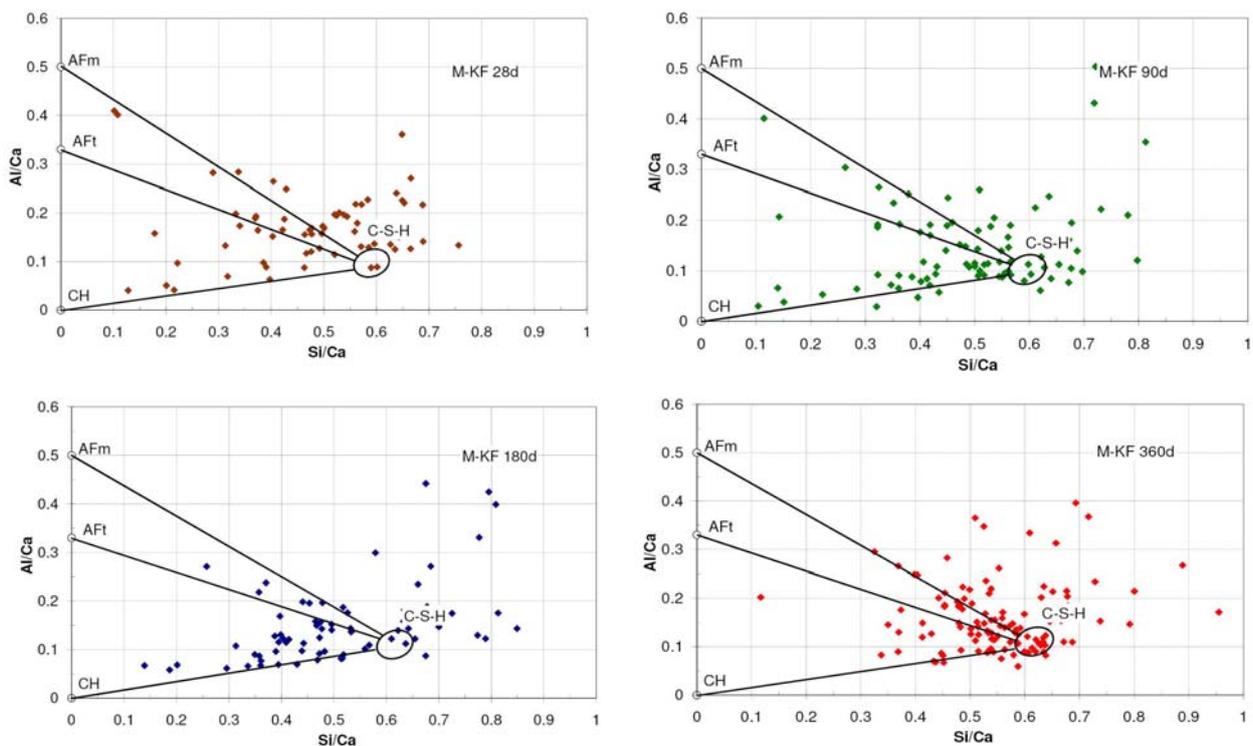


Abb. 47 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der flugaschenhaltigen Serie **M-KF**.

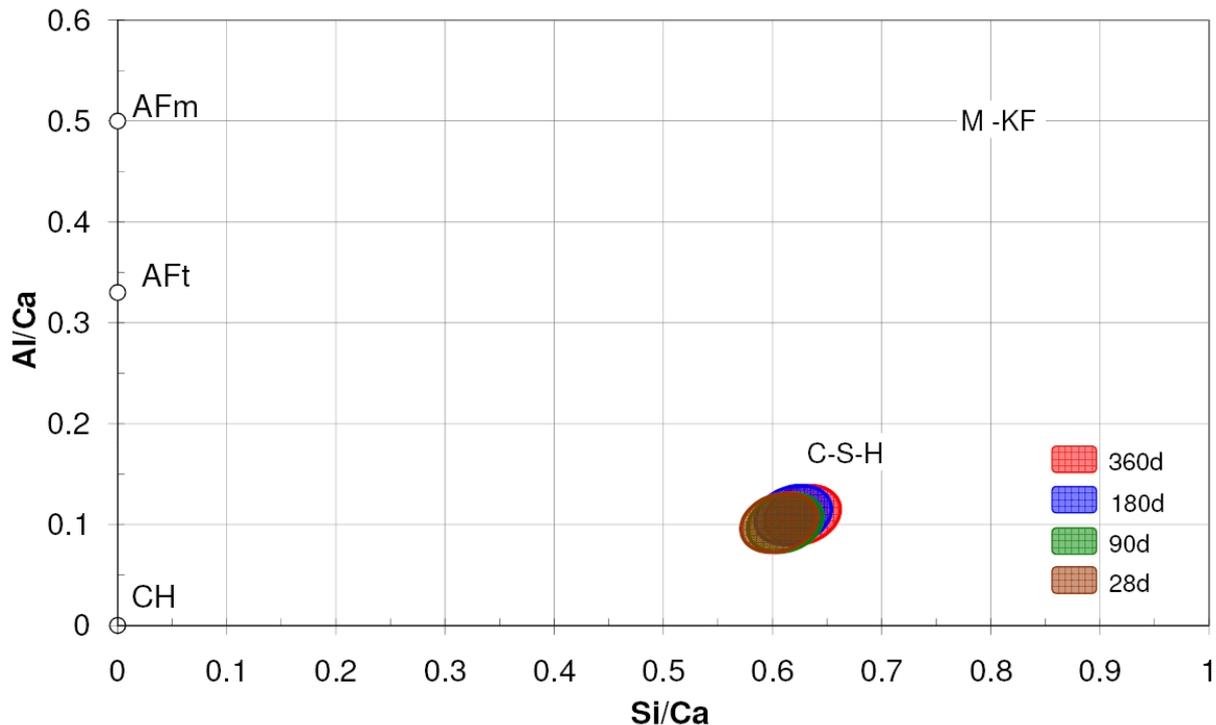


Abb. 48 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der flugaschenhaltigen Serie **M-KF** .

Bei den Mörtelseries mit dem Rheinischen Trass (**M-KT1**) entsprach nach der Auslagerungszeit von 28 Tagen das mittlere Si/Ca-Verhältnis der C-S-H-Phasen dem der aufdotierten Referenz –Mörtelserie (M-K) mit demselben Lagerungsalter (siehe Abb. 49). Es war aber, analog zu den hüttensand- und flugaschenhaltigen Serien gleichen Auslagerungsalters, ein im Vergleich zur M-K Mörtelserie höheres Al/Ca-Verhältnis der Hydratphasen feststellbar. Nach der Auslagerungszeit von 90 Tagen war sowohl ein deutlicher Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse zu verzeichnen. Der Anstieg der beiden Verhältnisse zeigte sich auch bei den Proben mit dem Auslagerungsalter von 180 und 360 Tagen, wobei der Anstieg nicht mehr so markant ausfiel. Nach 360 Tagen wiesen die C-S-H-Phasen Rheinisch trasshaltigen Mörtelserie M-KT1 die höchsten Atomverhältnisse aller untersuchten Serien auf. Diese betragen für das mittlere Si/Ca-Verhältnis 0,64 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,13. Beim Vergleichen der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der Mörtelseries mit dem Rheinischen Trass zeigte sich, dass es während der gesamten Auslagerungsdauer von 360 Tagen zu einem kontinuierlichen Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse kam (Abb. 50). Der stärkste Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses fiel dabei auf die Auslagerungszeit zwischen dem 28. und 90. Tag. Danach kam es nur noch zu einem leichten Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses der C-S-H-Phasen. Beim Si/Ca-Verhältnis war der stärkste Anstieg in der Auslagerungszeit zwischen dem 90. und 180. Tag zu beobachten. Der langsame Anstieg der Si/Ca- und der Al/Ca-Verhältnisse deutete darauf hin, dass der Rheinische Trass, ähnlich dem Hüttensand, über einen längeren Zeitraum im zementgebundenen System reagierte. Dies entsprach den Beobachtungen aus den mikroskopischen Gefügeuntersuchungen. Hier zeigte sich eine stetige Hydratation der Glaspartikel des Rheinischen Trasses über die gesamte Lagerungszeit der Serie (Abb. 35).

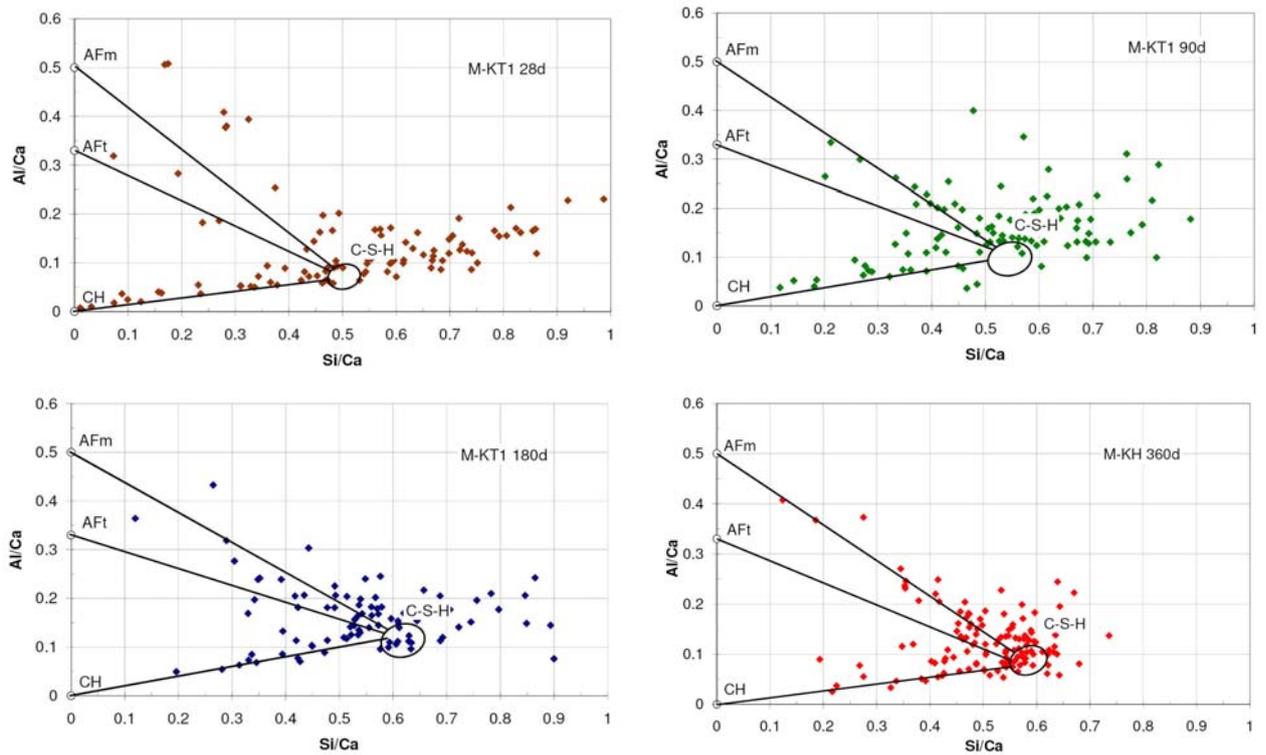


Abb. 49 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der Rheinisch trasshaltigen Mörtelserie **M-KT1** .

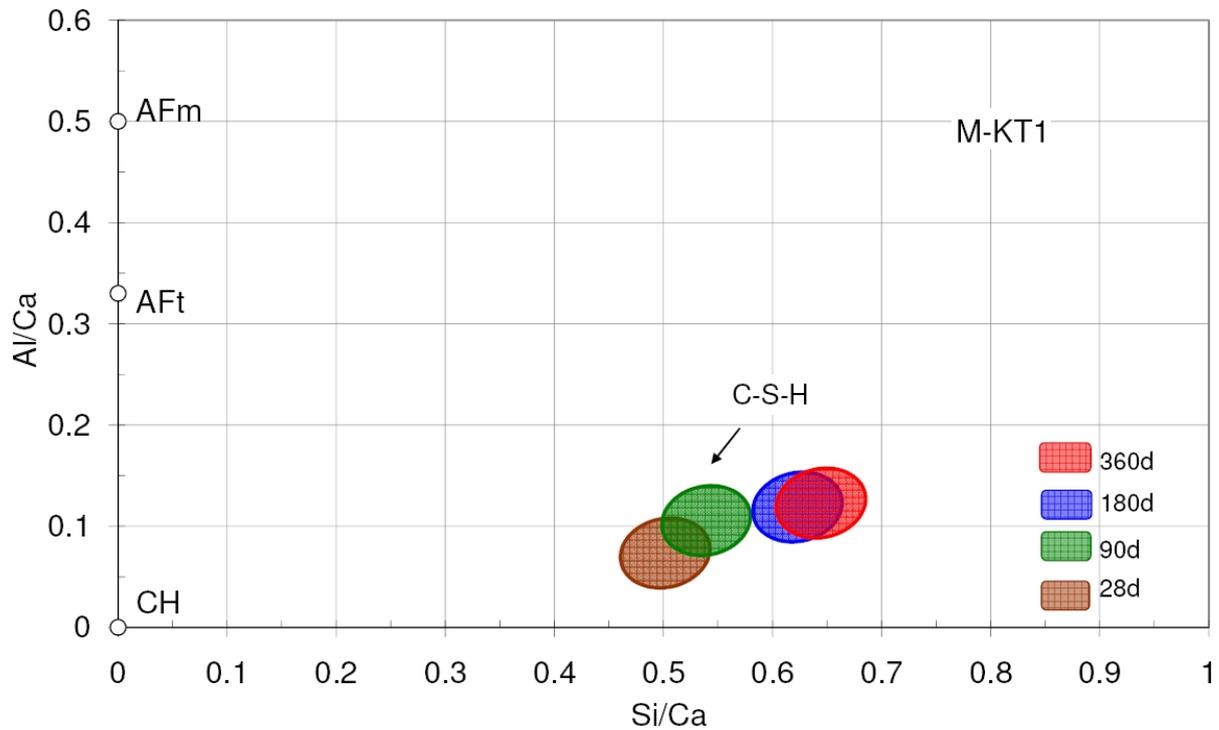


Abb. 50 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der Rheinisch trasshaltigen Serie **M-KT1** .

Die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der Mörtelseries mit dem Italienischen Trass I (**M-KT2**) zeigte über die Auslagerungszeit von 360 Tagen ein ähnliches Verhalten wie die der Mörtelserie mit Rheinischem Trass. Nach 28 Tagen entsprach das mittlere Si/Ca-Verhältnis der C-S-H-Phasen den Hydratphasen der aufdotierten Referenz Mörtelserie M-K, wies aber ein wesentlich höheres Al/Ca-Verhältnis auf, welches sogar über dem des Rheinischen Trasses lag. Nach 90 Tagen wiesen die Proben im Vergleich zur Rheinisch trasshaltigen Mörtelserie M-KT1 ein geringeres Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnis auf. Dieser Trend ließ sich auch bei den 180 und 360 Tage ausgelagerten Proben wiederfinden. Nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen wies die Serie ein höheres Si/Ca-Verhältnis als die flugaschehaltige Mörtelserie auf, aber ein geringeres Al/Ca-Verhältnis. Nach 360 Tagen betrug bei den C-S-H-Phasen das mittlere Si/Ca-Verhältnis 0,625 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,105.

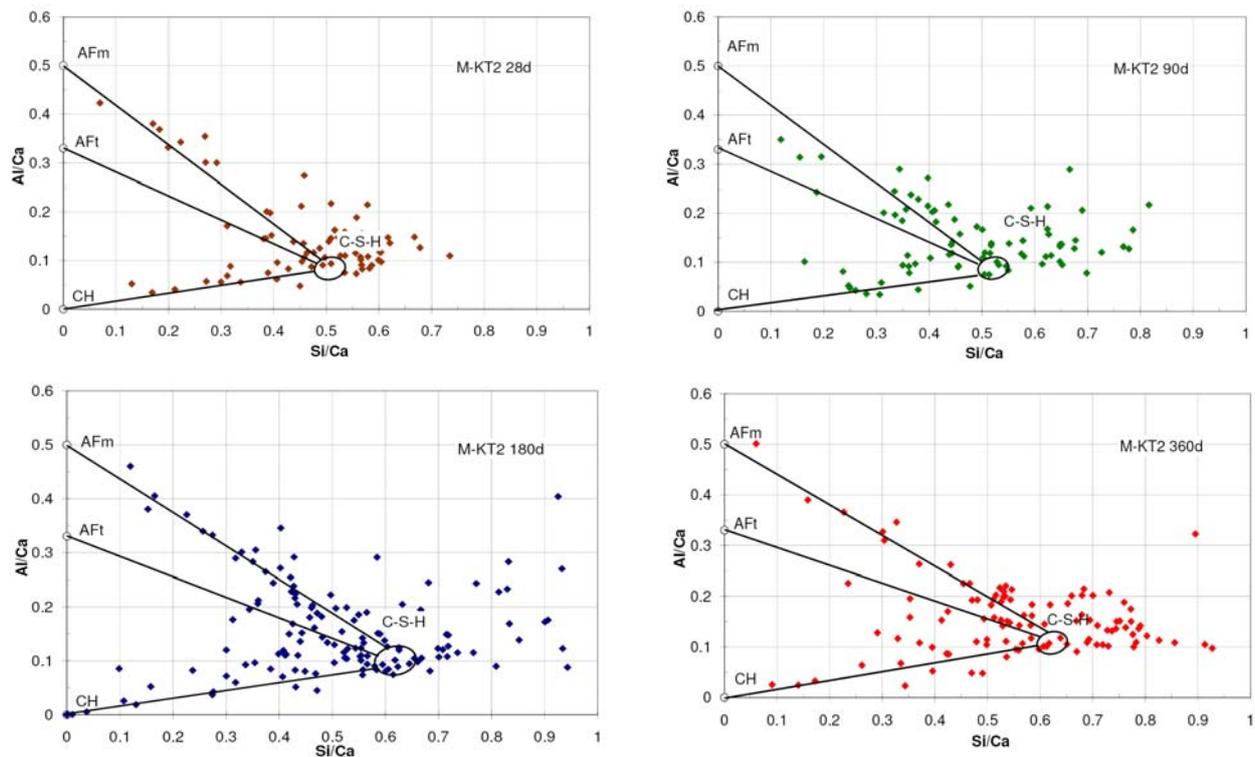


Abb. 51 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der Italienisch I trasshaltigen Mörtelserie **M-KT2** .

Beim zeitlichen Vergleich der C-S-H-Phasen stellte sich heraus, dass die Entwicklung des Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnis ähnlich wie die des Rheinischen Trasses verlief, d.h. es kam zu einem kontinuierlichen Anstieg des Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisses über die gesamte Auslagerungszeit (Abb. 52). Der stärkste Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses war wie bei der Rheinisch trasshaltigen Serie M-KT1 in der Auslagerungszeit zwischen dem 90. und 180. Tag zu beobachten. Zwischen der Auslagerungszeit vom 180. bis 360. Tag war der Anstieg des Al/Ca-Verhältnis höher als bei der Serie mit dem Rheinischen Trass. Der Gesamtanstieg des Al/Ca-Verhältnisses zwischen der Auslagerungszeit vom 28. und 360. Tag fiel dabei geringer aus als bei den Mörtelseries mit dem Rheinischen Trass. Der stärkste Anstieg des Si/Ca-Verhältnisses war wie bei der M-KT1 Serie in der Auslagerungszeit zwischen dem 90. und 180. Tag.

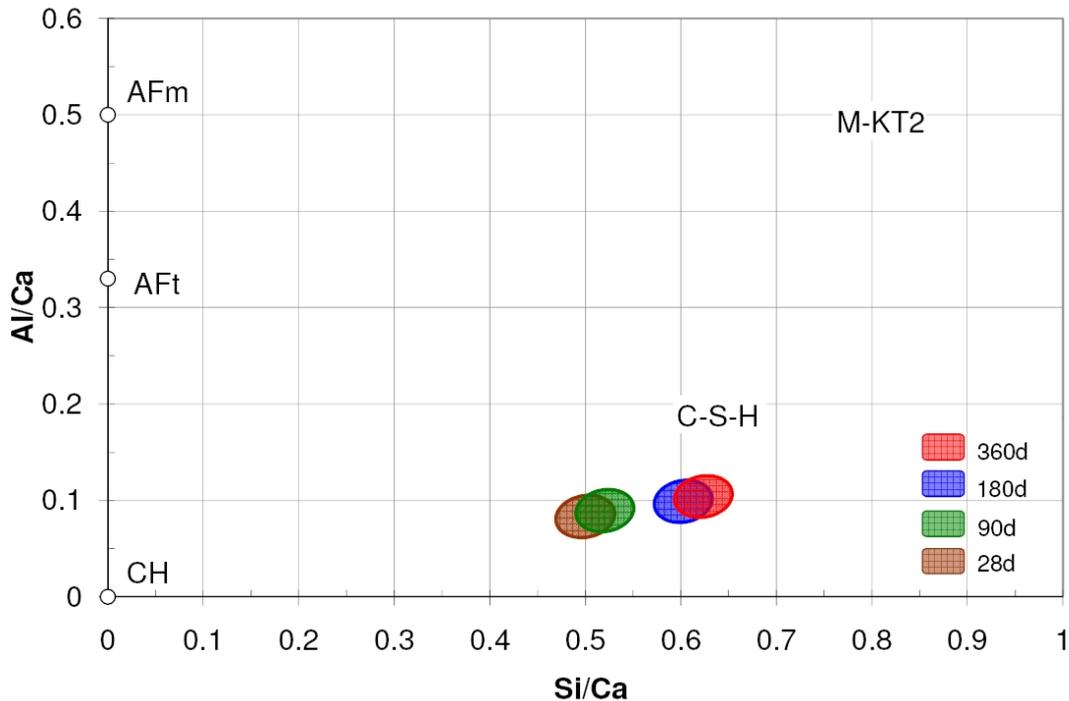


Abb. 52 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der Italienisch I trasshaltigen Mörtelseries **M-KT2** .

Bei den Mörtelseries mit dem Italienischen Trass II (**M-KT3**) als Zusatzstoff (Abb. 53) entsprachen nach der Auslagerungsdauer von 28 Tagen die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse dem der dotierten Referenz Mörtelserie M-K. Bei den Proben der 90 Tage Auslagerungszeit war ein Anstieg der Si/Ca- Verhältnisse und ein geringer Anstieg der Al/Ca-Verhältnisse feststellbar. Nach 180 Tagen war nur ein Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses beobachtbar. Bei der Auslagerungszeit von 360 Tagen kam es zu einem erneuten Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen. Die Proben der 360 Tage Auslagerung wiesen ein höheres Si/Ca-Verhältnis als die flugaschenhaltigen Mörtelseries auf, lagen aber tiefer als diejenigen der Series mit Rheinischem und Italienisch Trass I. Die Italienisch II trasshaltige Mörtelseries M-KT3 wiesen auch nach 360 Tagen die tiefsten Al/Ca-Verhältnisse aller Probeseries mit Klinkererersatzstoffen auf. Nach 360 Tagen betrug das mittlere Si/Ca-Verhältnis 0,55 und das mittlere Al/Ca-Verhältnis 0,08.

Die zeitliche Entwicklung Atomverhältnisse der C-S-H-Phasen der Mörtelserie mit Italienischem Trass II zeigte, dass es zu einem starken Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses in den ersten 180 Tagen der Auslagerungszeit kam (Abb. 54). In dieser Auslagerungszeit war der Anstieg des Si/Ca-Verhältnisses verglichen mit den Mörtelseries mit Rheinischem und Italienischem Trass I geringer. Zwischen dem 180. und 360. Tag der Auslagerungszeit war ein hoher Anstieg des Si/Ca-Verhältnisses zu verzeichnen. Bei den Al/Ca-Verhältnissen kam es nochmals zu einer Erhöhung. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die zeitliche Entwicklung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse ein anderes Verhalten zeigte als die der Mörtelseries mit Rheinischem und Italienischen Trass I. Diese beiden Series zeigten einen höheren Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse in den ersten 180 Tagen der Auslagerungszeit. Dies deutet darauf hin, dass Italienischer Trass II eine wesentlich geringere Reaktivität im Zementstein der Mörtelserie entfaltet.

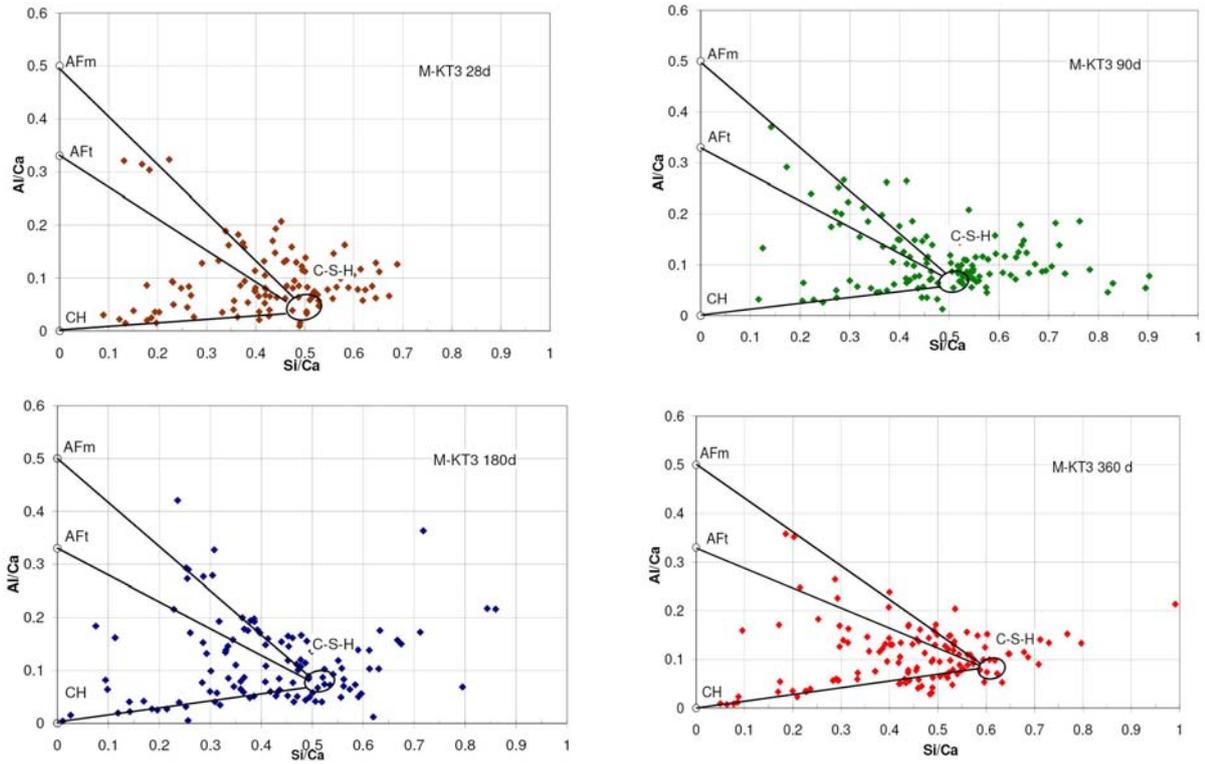


Abb. 53 Zeitlicher Verlauf nach 28, 90, 180 und 360 d der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der Italienisch II trasshaltigen Mörtelserie **M-KT3**.

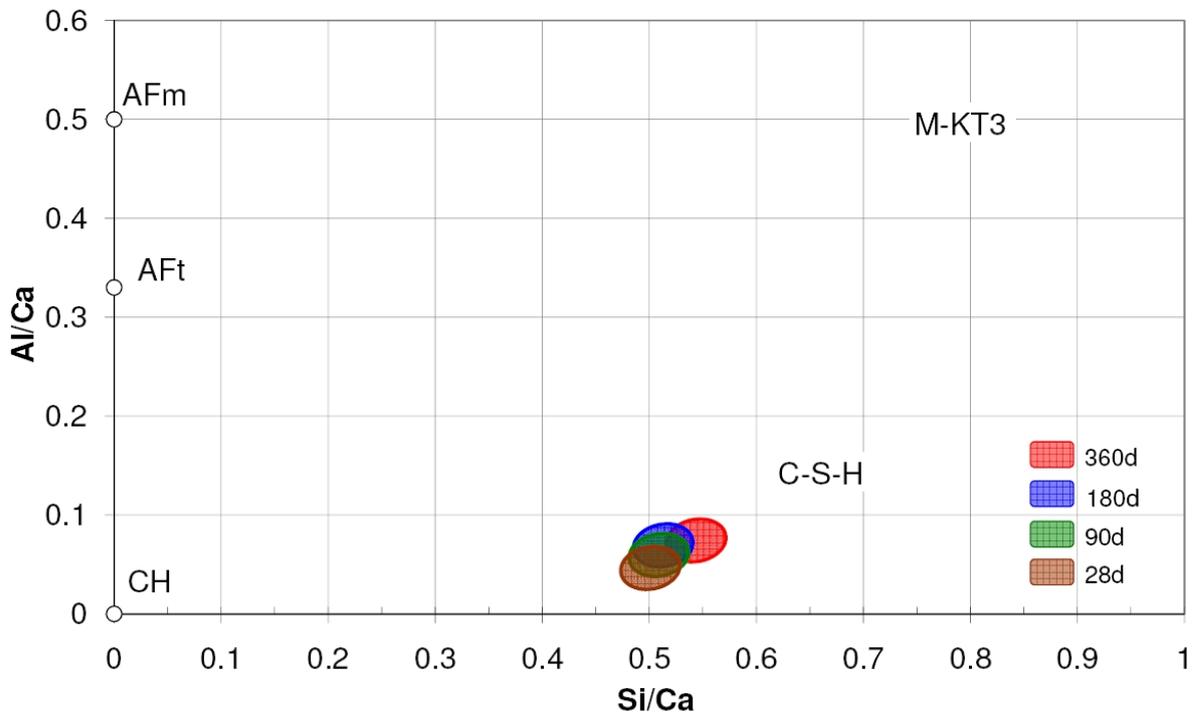
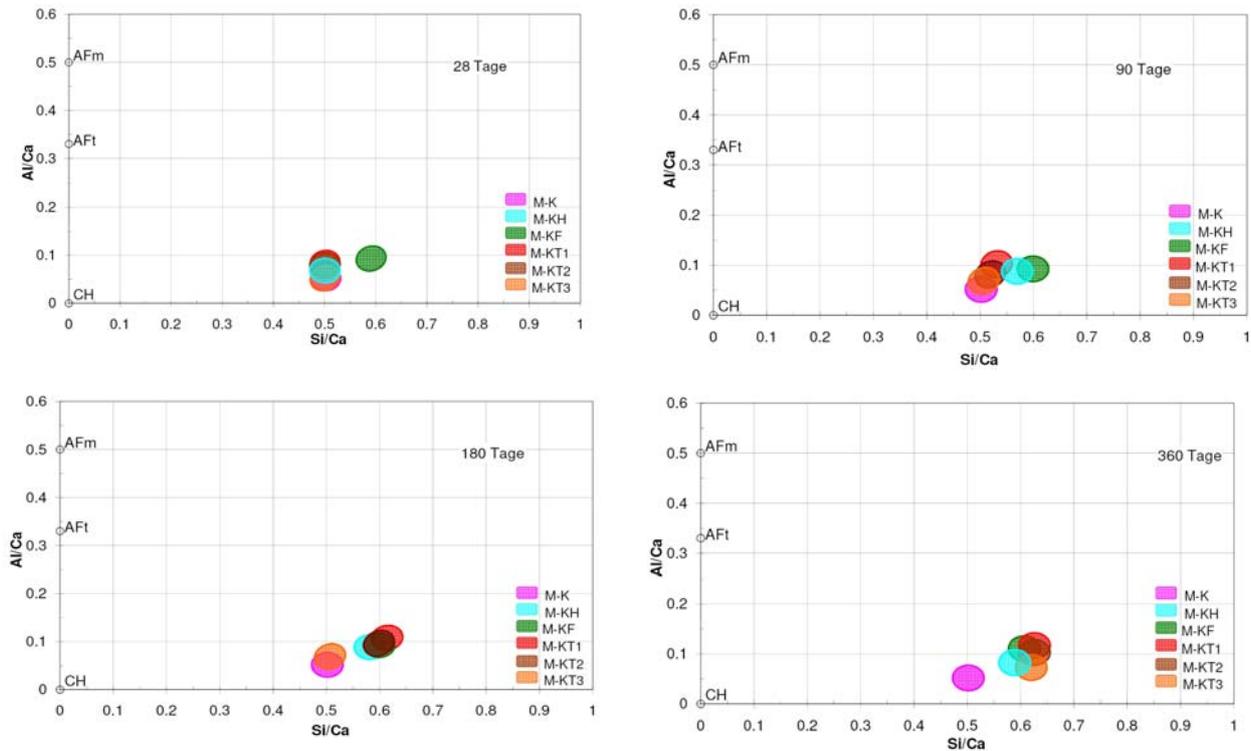


Abb. 54 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der Italienisch II trasshaltigen Mörtelserie **M-KT3**.

4.1.4 Zeitlicher Vergleich des Chemismus der C-S-H-Phasen in den einzelnen Mörtelseries

In der nachfolgenden Abbildung wurden die Elementverhältnisse von Si/Ca und Al/Ca der C-S-H-Phasen der einzelnen Serien mit demselben Auslagerungsalter (28, 90, 180 und 360 d) graphisch verglichen (Abb. 55). In Tabelle 12 wurden die Elementverhältnisse der C-S-H-Phasen der Serien mit Zementersatzstoffen mit der Serie verglichen, die nur aufdotierten Portlandzement enthielt.



M-K: Serie mit aufdotierten Portlandzement; M-KF: Serie mit Flugasche; M-KH: Serie mit Hüttensand; M-KT1: Serie mit Rheinischer Trass; M-KT2: Serie mit Italienischer Trass I; M-KT3: Serie mit Italienischer Trass II

Abb. 55 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen der verschiedenen Serien mit gleichem Auslagerungsalter.

Tab. 12 Relativer Vergleich der Elementverhältnisse der C-S-H-Phasen der Serien mit Zementersatzstoffen und der Serie, die nur Portlandzement enthielt.

	28 Tage		90 Tage		180 Tage		360 Tage	
	Si/Ca	Al/Ca	Si/Ca	Al/Ca	Si/Ca	Al/Ca	Si/Ca	Al/Ca
M-KH	≈	>	>+	>++	>++	>++	>++	>++
M-KF	>++	>++	>++	>++	>++	>++	>++	>++
M-KT1	≈	>+	>	>++	>++	>++	>++	>++
M-KT2	≈	>	>	>++	>++	>++	>++	>++
M-KT3	≈	≈	≈	>	≈	>	>	>
„≈“ = etwa gleich, „>“ = größer, „>+“ = viel größer, „>++“ = sehr viel größer								

Beim Betrachten der zeitlichen Gegenüberstellung der jeweiligen C-S-H-Phasen war bei den trasshaltigen Serien der Trend beobachtbar, dass bis zu einem Alter 28 Tagen das Si/Ca-Verhältnis demjenigen der Serie mit aufdotierten Portlandzement M-K entsprach und sich nur langsam mit zunehmender Auslagerungszeit erhöhte (Abb.55 und Tab.17). Nach 360 Tagen wiesen die trasshaltigen Proben ähnliche oder höhere Al/Ca-Verhältnisse als die flugaschehaltige Serie auf. Bei der flugaschehaltigen Probenserie zeigte sich, dass die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen bereits bei einem Auslagerungsalter von 28 Tagen hohe Werte erreichten, die im weiteren Verlauf der Lagerung sich nur noch unwesentlich veränderte. Die C-S-H-Phasen der Mörtelserie mit Italienisch Trass II (M-KT3) zeigten zwar einen schnellen Einbau von Aluminium (zu erkennen am Anstieg des Al/Ca-Verhältnisses nach 28 Tagen), der aber mit zunehmenden Auslagerungsalter anscheinend keine weitere Rolle mehr spielt. Dagegen erhöht sich das Si/Ca-Verhältnis im Vergleich zu den anderen trasshaltigen Serien nur unwesentlich.

4.2 Betonserien der 40 °C Lagerung

Zusätzlich zu den Mörtelserien wurden Betonproben mit Flugasche, Rheinischem Trass, Italienischem Trass I und Italienischem Trass II als Zementkomponente hergestellt, um zu sehen, ob die beiden Systeme Mörtel und Beton ein gleiches Verhalten aufweisen und somit miteinander vergleichbar sind. Zusätzlich wurde in den Betonserien Reaktionsprodukte mikrochemisch untersucht. Zwar wurde in den Mörtelserien ebenfalls Reaktionsprodukte beobachtet, deren Volumen war jedoch zu gering, um ohne Anregung der Umgebung mit dem Elektronenstrahl mikrochemisch analysiert zu werden.

4.2.1 Längenänderung

Im Gegensatz zu den Mörtelserien ergaben die Bestimmungen der Längenänderungen der Betonprismen ein überraschendes Ergebnis (siehe auch Anhang Tabelle 5). Von allen Serien erbrachte die Referenz- Betonserie mit KOH dotiertem Portlandzement (**B-K**) die höchsten Dehnungen mit 0,66 mm/m nach 360 d Auslagerung (Abb. 56). Die B-K Serie wurde von der Serie mit Rheinischem Trass (**B-KT1**) sowie der Serie mit Italienischem Trass I (**B-KT2**) mit Dehnungen von 0,45 mm/m bzw. 0,43 mm/m mit Abstand gefolgt. Von den Betonserien mit Klinkerersatzstoffen zeigte die flugaschenhaltige Serie (**B-KF**) und die Serie mit Italienischem Trass II (**B-KT3**) mit ca. 0,27 mm/m die geringsten Werte. Die Serie mit dem alkaliarmen Portlandzement-**B-NA** zeigte nach 360 Tagen wie erwartet mit 0,2 mm/m die geringste Dehnung. Zu beachten ist, dass die Längenänderungen in Abbildung 56 auch die Wärmedehnung der Betonprüfkörper berücksichtigt.

Der Verlauf der Dehnungskurve der aufdotierten Referenz-Betonserie **B-K** zeigte bis zu einem Auslagerungsalter von 180 Tagen eine starke Zunahme der Längenänderung. Danach war eine Abflachung der Dehnungskurve mit fortschreitender Auslagerungsdauer zu beobachten. Verglichen mit der korrespondierenden aufdotierten Referenz-Mörtelserie B-K wies die Betonserie ein höheres Dehnungsverhalten mit 0,65 mm/m (inkl. Wärmedehnung) bzw. 0,48 mm/m (ohne Wärmedehnung) auf.

Die flugaschenhaltige Betonserie **B-KF** zeigte in den ersten 60 Tagen der Auslagerungszeit ein nur sehr geringes Dehnungsverhalten. Ab ca. 60 Tagen war eine leichte, aber kontinuierliche Zunahme der Dehnung über die restliche Auslagerungszeit zu verzeichnen. Nach 360 Tagen betrug die Dehnung 0,27 mm/m (inkl. Wärmedehnung) und 0,09 mm/m (ohne Wärmedehnung). Im Vergleich zu der flugaschenhaltigen Mörtelserien M-KF zeigte die Betonserie unter der Berücksichtigung der Wärmedehnung eine geringere Dehnung.

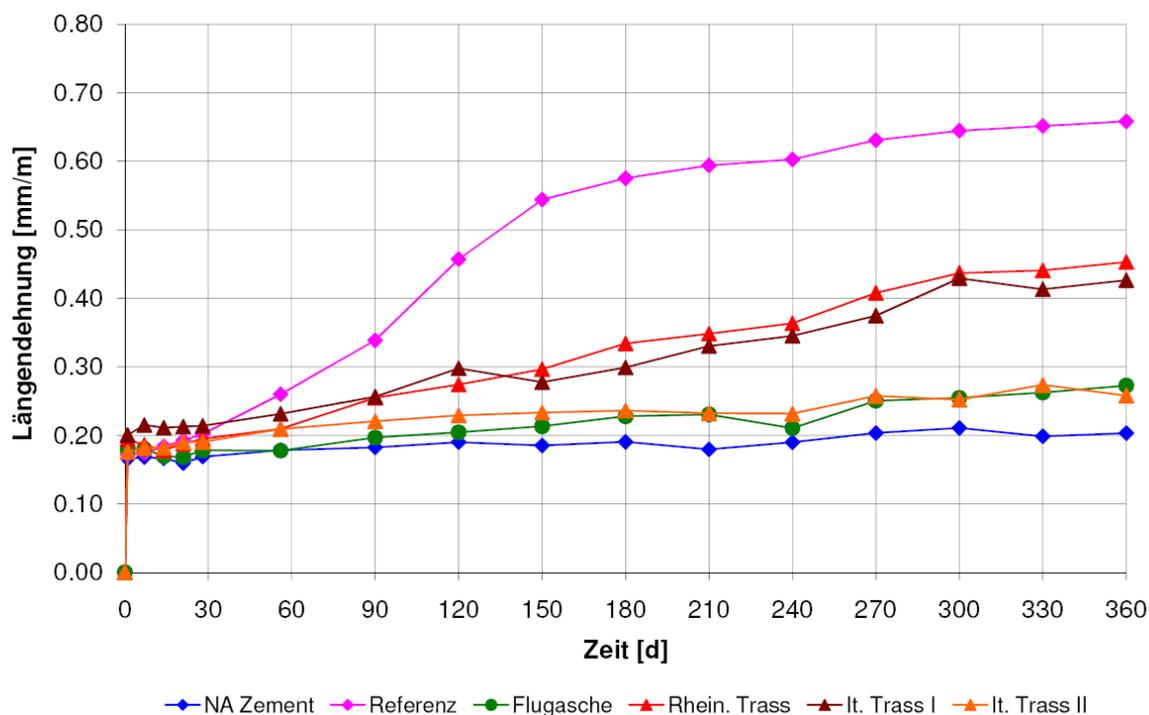


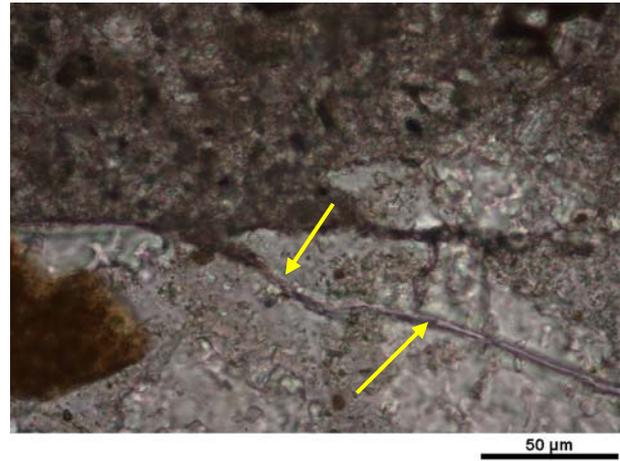
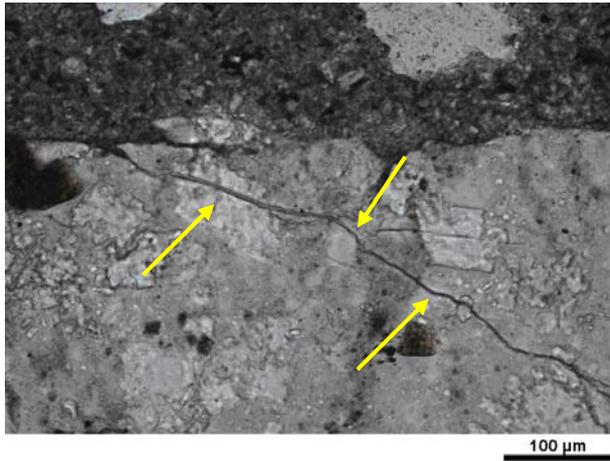
Abb. 56 Mittelwerte der Dehnungen der Betonserien bis zu einem Auslagerungsalter von 360 Tagen. Die Wärmedehnung ist im Diagramm mit berücksichtigt.

Die Betonserie mit Rheinischem Trass (**B-KT1**) wies nach 360 Tagen Auslagerungszeit die höchste Dehnung aller Betonserien auf, die Klinkerersatzstoffe enthielten. In den ersten 28 Tagen war keine Tendenz zur Dehnung beobachtbar (Abb. 56). Ab dem 28. Tag kam es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Dehnung bis zum Ende der Auslagerungszeit. Nach 360 Tagen wies die Dehnung einen Wert von 0,46 mm/m (mit Wärmedehnung) und 0,26 mm/m (ohne Wärmedehnung) auf. Im Vergleich zu den Mörtelserien mit gleicher Zementzusammensetzung (M-KT1) zeigte die Betonserie ein geringeres Dehnungsverhalten.

Die Betonserie mit der Zementkomponente Italienischer Trass I (**B-KT2**) wies nach 360 Tagen die dritthöchste Dehnung auf. In den ersten 28 Tagen der Auslagerungszeit war, wie bei der Serie Rheinisch trasshaltigen Serie B-KT1 keine Dehnung beobachtbar. Danach zeigte die Italienisch I trasshaltige Serie B-KT2 eine kontinuierliche Dehnung bis zum Auslagerungsalter von 360 Tagen, die nur wenig unter der Serie mit Rheinischem Trass lag. Nach 360 Tagen betrug die Dehnung 0,43 mm/m mit Wärmedehnung bzw. 0,21 mm/m ohne Wärmedehnung. Nach 360 Tagen wies die Betonserie mit Italienischem Trass II **B-KT3** die geringste Dehnung aller zementersatzstoffhaltigen Betonserien mit einer Dehnung von 0,26 mm/m (mit Wärmedehnung) bzw. 0,08 mm/m (ohne Wärmedehnung) auf.

4.2.2 Gefügeuntersuchungen

Analog zu den Mörtelserien wurden Dünnschliffe aus den Probenkörpern der 40°C Betonserien angefertigt. Die Serie **B-NA** mit dem alkaliarmen Zement zeigte im Dünnschliff wie erwartet nach der Gesamtauslagerungsdauer von 360 Tagen keine ARK-induzierte Schadensbilder an den reaktiven Gesteinskörnungen. Ebenso zeigten die flugaschehaltige Serie **B-KF** und Betonserie **B-KT3** mit Italienischem Trass II keine durch eine AKR verursachte Schädigung im Dünnschliff auf. Die mit aufdotierte Referenz- Betonserie **B-K** zeigte im Dünnschliff ein AKR-typisches Schadensbild. So waren Risse in alkaliempfindlichen Körnern zu beobachten (Abb. 57), die sich z.T. über mehrere Gesteinskörner erstreckten (Abb. 58).



a. Gerissener Quarzsandstein mit Riss, welcher in den Zementstein eindringt

b. Detailaufnahme des vorherigen Bildes. Erkennbar, dass der Riss mit Reaktionsprodukt gefüllt ist.

Abb. 57 Mikroaufnahme einer geschädigten Gesteinskörnung der aufdotierten Referenz-Betonserie **B-K** (parallele Polarisatoren, Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).



Abb. 58 Mikroaufnahme eines Rissystems im Zementstein der dotierten Referenz-Betonserie **B-K** nach 360 Tagen Auslagerungszeit (parallele Polarisatoren, Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

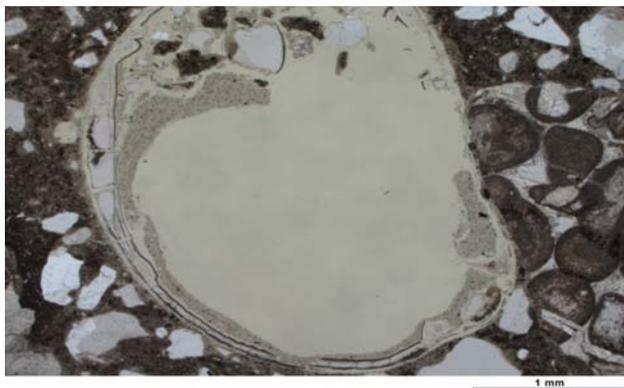


Abb. 59 Lichtmikroskopische Aufnahmen der in den Luftporen enthaltenen gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Referenz-Betonserie **B-K** nach 360 Tagen Auslagerungszeit (parallele Polarisatoren, Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

In den Luftporen und in den Rissen der Betonproben wurden die für AKR typischen Reaktionsprodukte beobachtet (Abb. 59 und Abb. 60). Die Reaktionsprodukte sammelten sich meist an den Rändern der Luftporen an. Sowohl im Dünnschliff als auch unter dem REM war innerhalb der Reaktionsprodukte oftmals eine Zonierung zu erkennen. Dabei wurden auch häufig Risse beobachtet, die von den Luftporen ausgingen. In einigen Luftporen wurde ein feinkristallines AKR-Reaktionsprodukt nachgewiesen. Die Kristallinität des Reaktionsprodukts machte sich durch ein anisotropes optisches Verhalten mit bräunlichen Interferenzfarben höherer Ordnung bemerkbar.

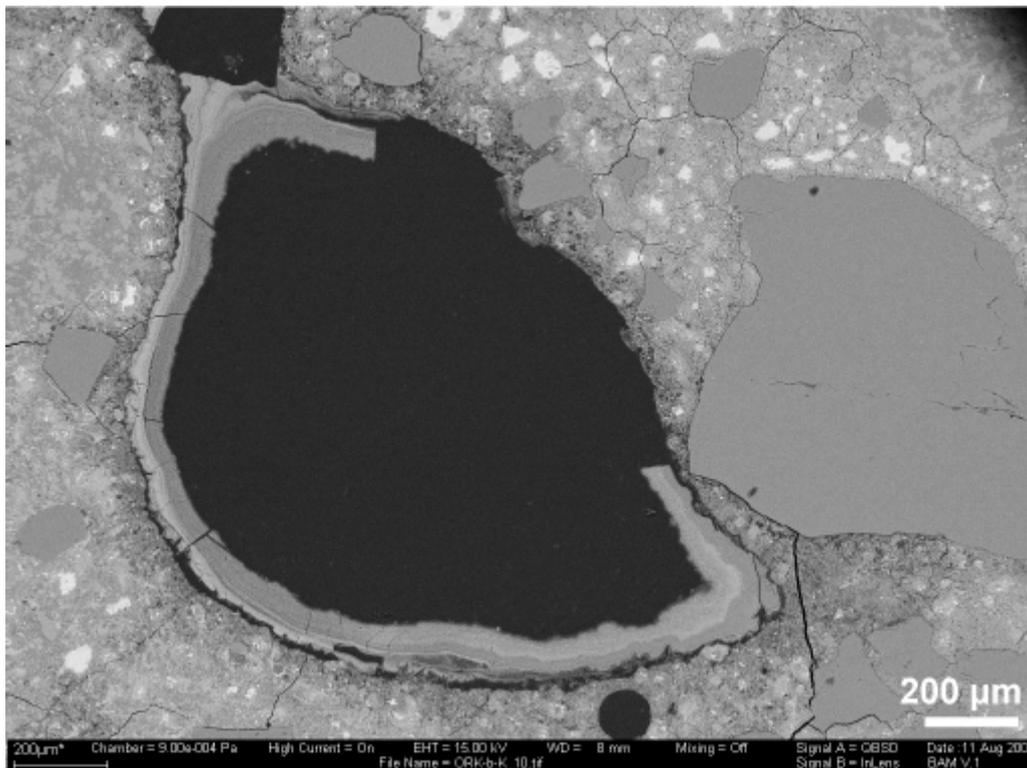


Abb. 60 Mikroaufnahme einer Luftpore mit gelförmigen Reaktionsprodukt der Referenz-Betonserie **B-K** nach 360 Tagen (polierter Anschlag, REM-BSE).

Ein qualitativ ähnliches Schadensbild wie bei der zuvor besprochenen Serie ergab sich bei der Betonserie **B-KT1** mit Rheinischem Trass als Zusatzstoff (Abb. 61-64). So waren an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen wiederum Risse zu beobachten, die durch die AKR induziert worden sind. Die Schäden waren jedoch nicht so stark ausgeprägt wie die der Serie Referenz Betonserie (B-K).

Die Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen der Betonserie mit dem Italienischen Trass I (**B-KT2**) zeigten nach 360 Tagen dasselbe Bild wie die Ergebnisse der Serie mit Rheinischem Trass (B-KT1). Die alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen wiesen durch die AKR induzierte Risse auf. Ebenso wurden Reaktionsprodukte in den Luftporen nachgewiesen (Abb. 65).

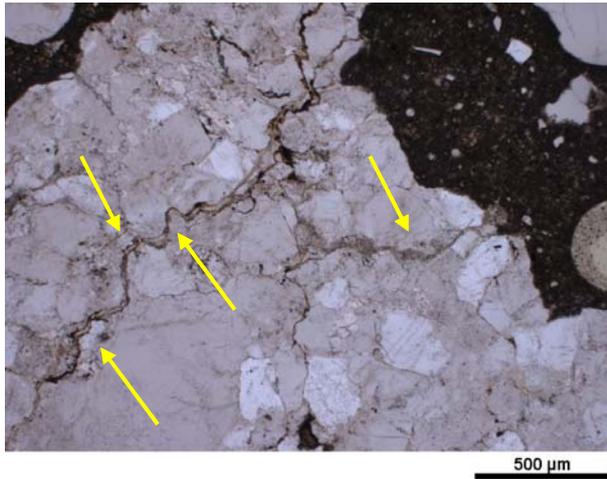


Abb. 61 Alkaliempfindliche Gesteinskörnung mit Rissen in der Serie **B-KT1** nach 360 Tagen (parallele Polar., Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

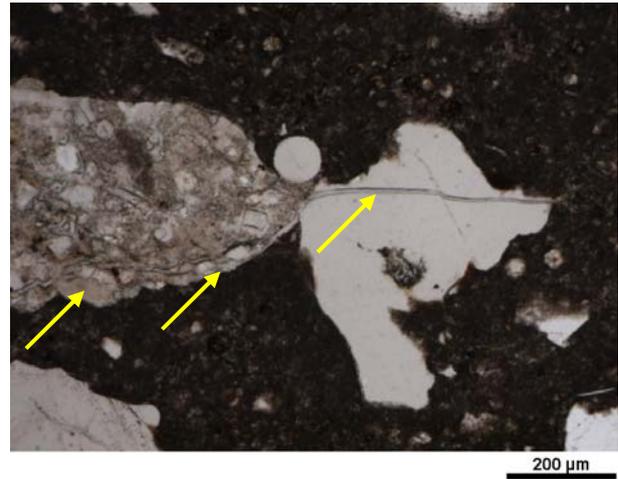


Abb. 62 Risse über mehrere Gesteinskörnungen der Serie **B-KT1** nach 360 Tagen (parallele Polar., Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

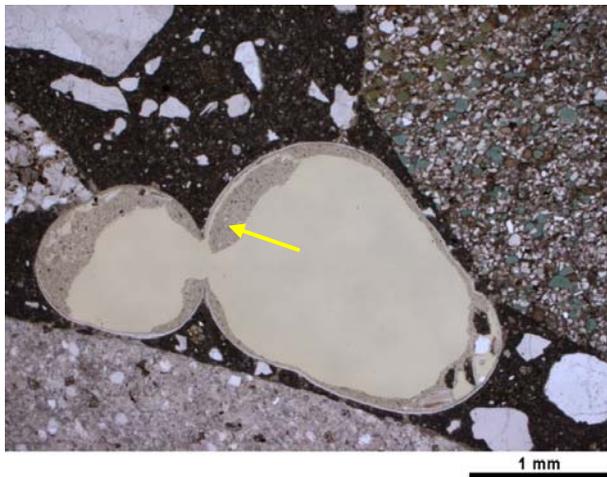


Abb. 63 AKR-Reaktionsprodukte in Luftporen der **B-KT1** Serie nach 360 Tagen (parallele Polarisatoren, Dünnschliff, Polarisationsmikroskop).

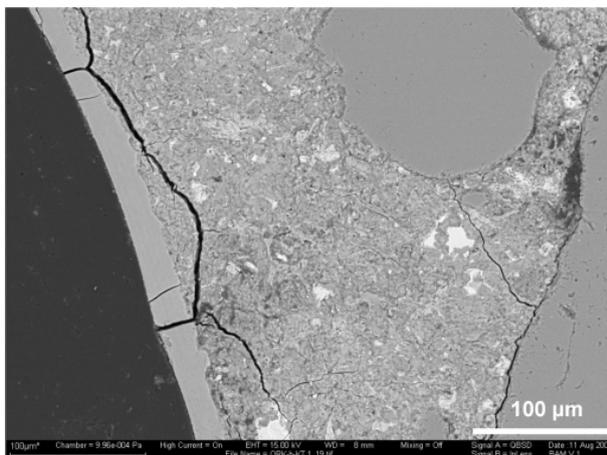
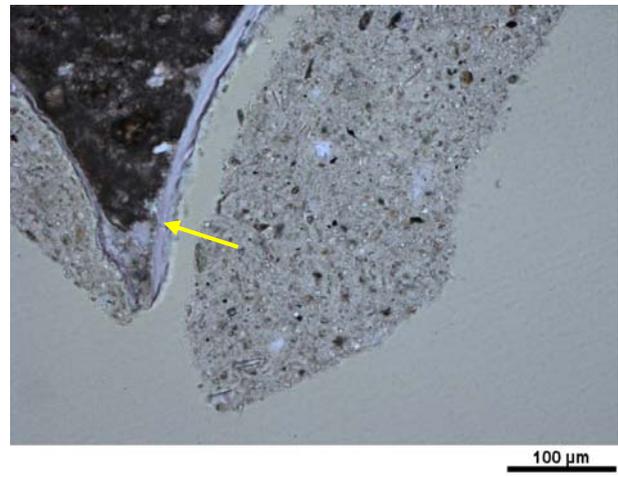


Abb. 64 Luftpore mit AKR-Reaktionsprodukten der **B-KT1** nach 360 Tagen Serie (polierter Anschliff, REM-BSE).

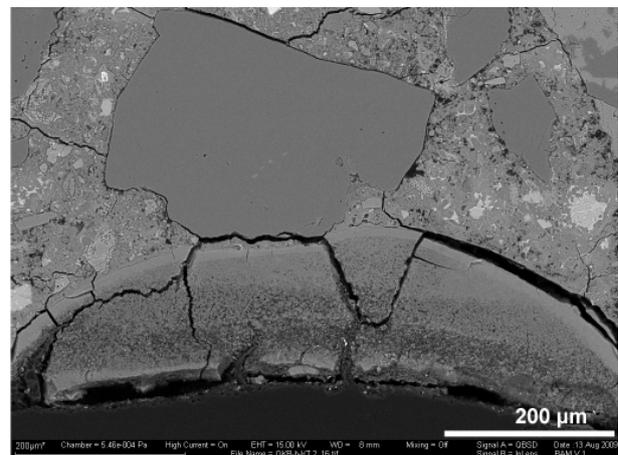


Abb. 65 Luftpore mit AKR-Reaktionsprodukten der Serie **B-KT2** nach 360 Tagen (polierter Anschliff, REM-BSE).

Die makroskopischen Veränderungen an den Probenkörpern am Ende der Versuche (nach 360 d) beschränkten sich bei den meisten Serien auf die messbare Verformungsänderung. Lediglich die aufdotierte Referenzserie mit reinem Portlandzement (B-K) zeigte eine deutlich wahrnehmbare Rissbildung sowohl in den Prismen als auch in den Betonwürfeln (Abb. 66 und Abb. 67). Die Risse am Würfel hatten ein netzartiges Erscheinungsbild und zeigten maximale Breiten zwischen 0,1 und 0,5 mm.



Abb. 66 Betonprisma der **B-K** Serie nach 360 Tagen Auslagerung mit dem durch AKR verursachten Rissystem (die Risse sind zur Verdeutlichung farbig nachgezeichnet).

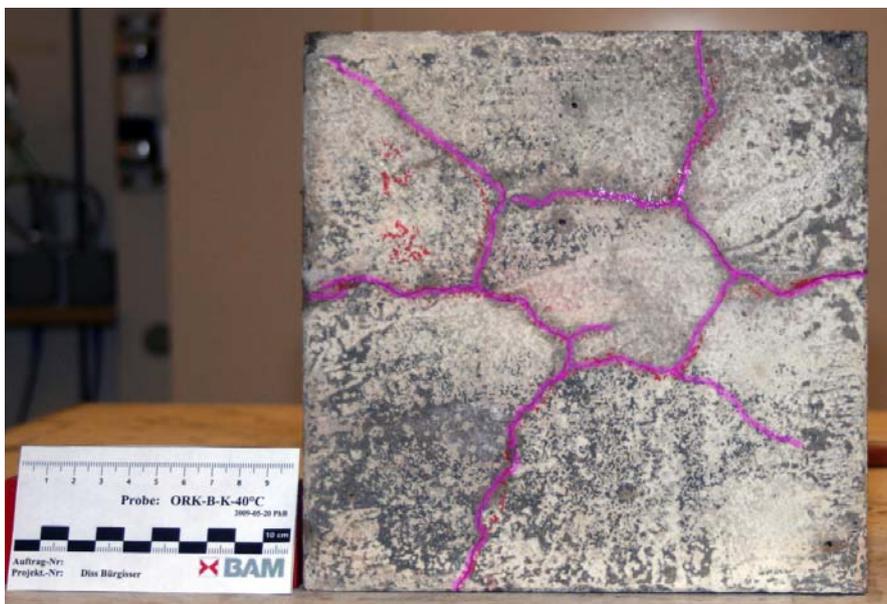


Abb. 67 Betonwürfel der Serie **B-K** nach 360 Tagen mit dem für eine AKR typischen netzförmigem Rissystem (die Risse sind zur Verdeutlichung farbig nachgezeichnet).

4.2.3 Charakterisierung der AKR-Reaktionsprodukte

Für die mikrochemische Analyse wurden die AKR-Reaktionsprodukte in den Luftporen der Betonserien B-K (aufdotierte Referenz-Betonserie), B-KT1 (Rheinisch trasshaltig) und B-KT2 (Italienisch I trasshaltig) herangezogen. Die Untersuchungen wurden am Rasterelektronenmikroskop im EDX-Modus durchgeführt. Da die Breiten der Risse, in denen sich Reaktionsprodukte gebildet hatten, meist nur geringe Weiten aufwiesen, wurden diese nicht analysiert. So hätte man bei der Messung, messtechnisch bedingt, die umliegende Gesteinskörnung mit angeregt, was zu einer Verfälschung des Analyseergebnisses geführt hätte. Gemessen wurden die Ca-, Si-, Na- und K-Konzentrationen und in M.-% der Oxide umgerechnet. Dargestellt wurden die Ergebnisse in Form von ternären Diagrammen, die auf 100 % und auf die folgenden Komponenten normiert waren: CaO, SiO₂ und (Na₂O+K₂O) (siehe Anhang A 7).

Die Ergebnisse der Analysen sind in den Abbildungen 68 bis 71 und in Tabelle 13 dargestellt. Es zeigte sich, dass die AKR-Reaktionsprodukte der beiden trasshaltigen Betonserien **B-KT1** und **B-KT2** höhere Anteile an Alkalien (Na₂O+K₂O) aufwiesen als die Reaktionsprodukte der aufdotierten Serie mit reinem Portlandzement (B-K). Ebenso war zu beobachten, dass der Anteil von CaO bei den trasshaltigen Betonserien in den Reaktionsprodukten geringer waren als bei denen der Referenz-Betonserie B-K Serie. Hingegen war der SiO₂-Anteil der Reaktionsprodukte der trasshaltigen Betonserien deutlich höher.

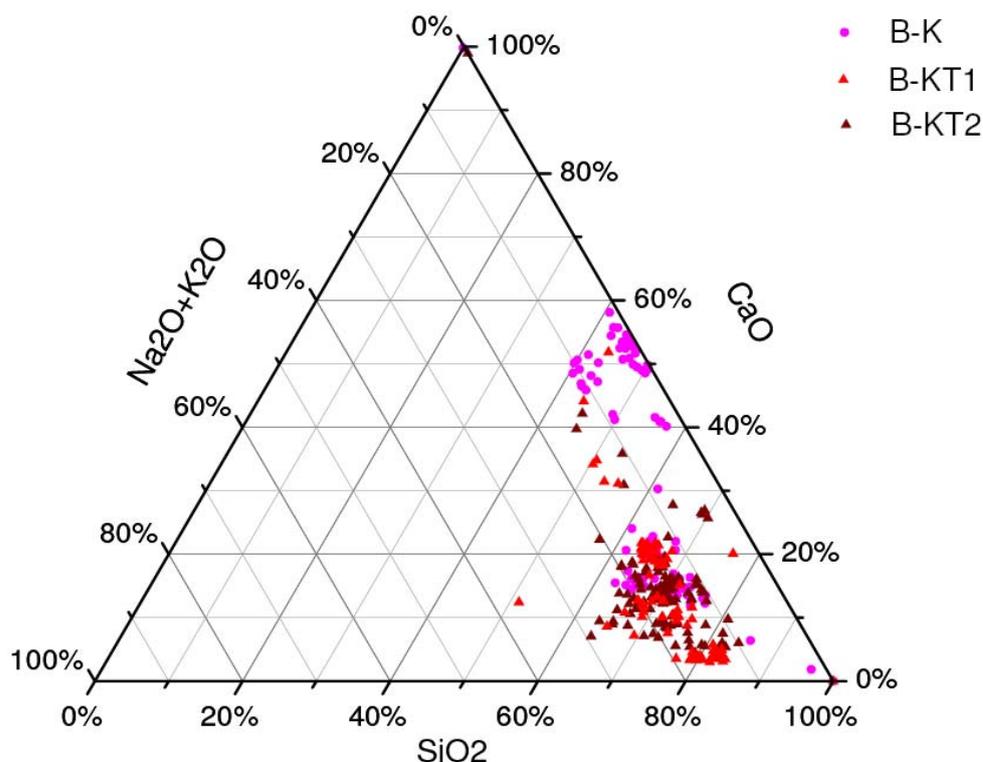


Abb. 68 Graphische Darstellung der Einzelanalysen des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O). Angaben in M.-%.

Tab. 13 Mittelwerte der chemischen Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$ in M.-%.

	B-K	B-KT1	B-KT2
SiO_2	54,0	70,6	69,4
CaO	38,2	13,8	14,9
$\text{Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$	7,8	15,6	15,7

In den Abbildungen 69 und 70 sowie den Tabellen 14 und 15 sind die Analyseergebnisse, in Form auf 100 % normalisierter ternären Daten und auf die einzelnen Alkalien bezogen, dargestellt. Es zeigte sich, dass die gelförmigen Reaktionsprodukte der trasshaltigen Serien B-KT1 und B-KT2 einen deutlich höheren Na_2O -Gehalt (Tab. 15) und einen höheren K_2O -Gehalt (Tab. 16) besaßen als die gelförmigen Reaktionsprodukte der Betonserie B-K. Außerdem wiesen die Reaktionsprodukte in den beiden trasshaltigen Betonserien signifikant höhere SiO_2 - und niedrige CaO -Gehalte auf als die Produkte der Referenz-Betonserie B-K .

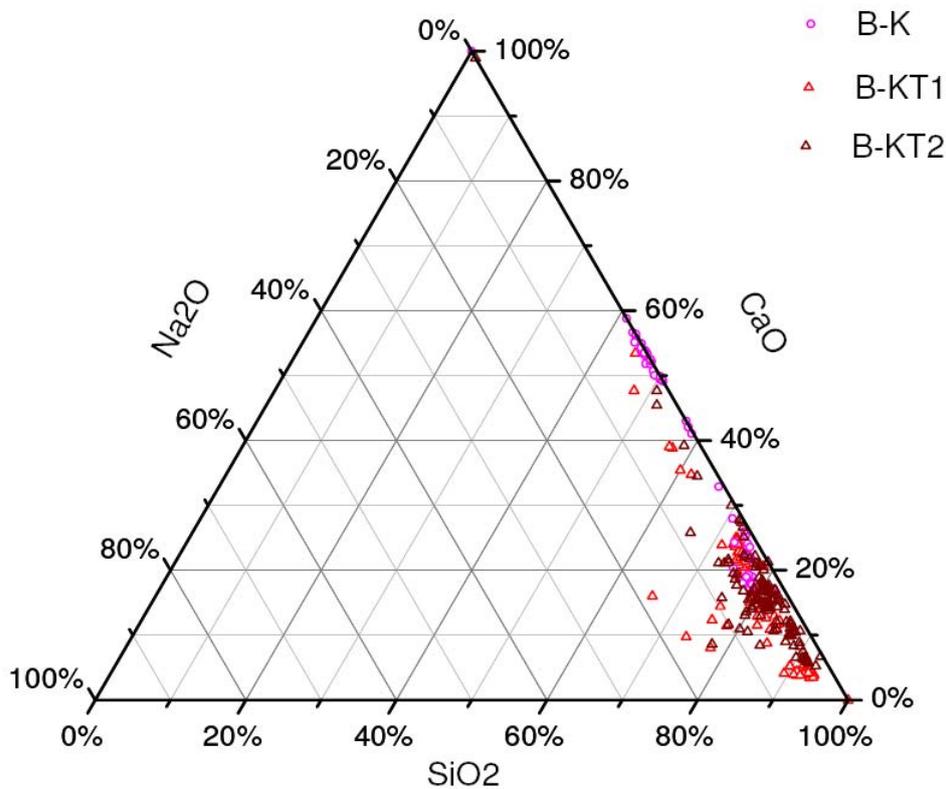


Abb. 69 Graphische Darstellung des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ (in M.-%).

Tab. 14 Mittelwerte der chemischen Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-Na}_2\text{O}$ in M.-%.

	B-K	B-KT1	B-KT2
SiO_2	58,88	80,32	79,54
CaO	39,85	15,32	14,70
Na_2O	1,27	4,36	3,06

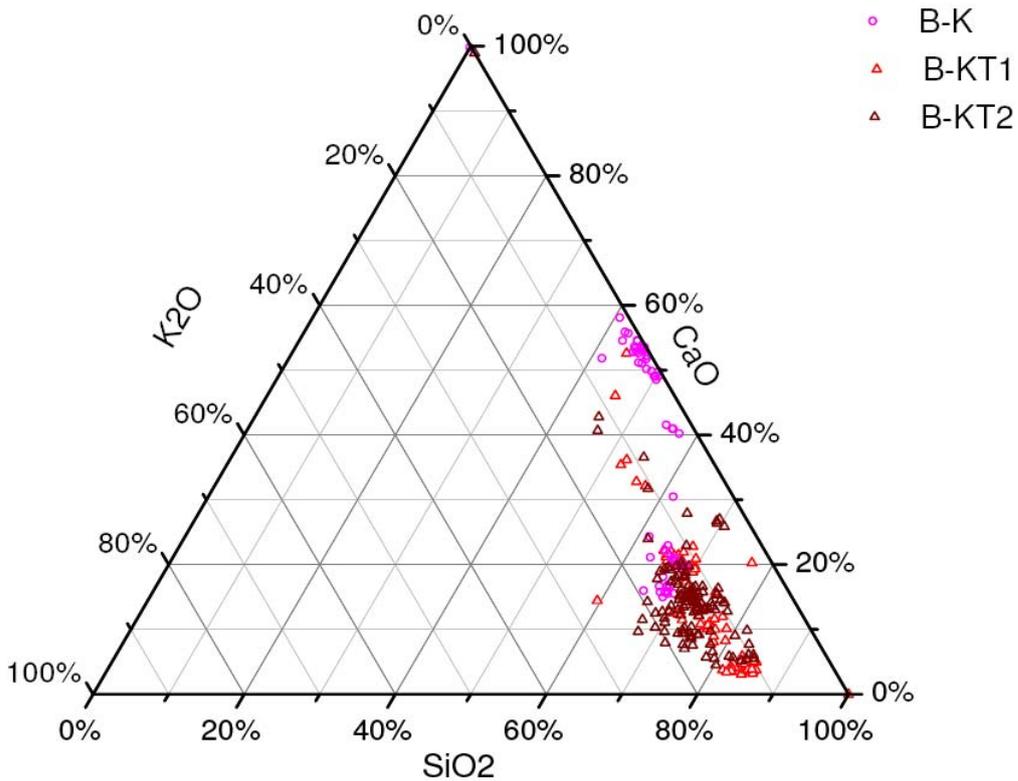


Abb. 70 Graphische Darstellung des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO+K}_2\text{O}$ in M.-%.

Tab. 15 Mittelwerte der chemischen Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-K}_2\text{O}$ in M.-%.

	B-K	B-KT1	B-KT2
SiO_2	54,73	73,47	74,42
CaO	38,43	14,26	15,18
K_2O	6,84	12,27	13,40

Des Weiteren zeigte sich beim Betrachten der gemessenen Konzentrationen von Na_2O und K_2O der Reaktionsprodukte (Abb. 71), dass die Na_2O -Gehalte der trasshaltigen Proben größer waren als diejenigen der Reaktionsprodukte der Betonserie ohne Klinkerersatzstoffe (B-K). Dies trifft auch für die B-KT2 mit Italienischem Trass I zu, dessen Na_2O -Gehalt deutlich geringer war als der des Rheinischen Trasses B-KT1 (vgl. Tab. 14).

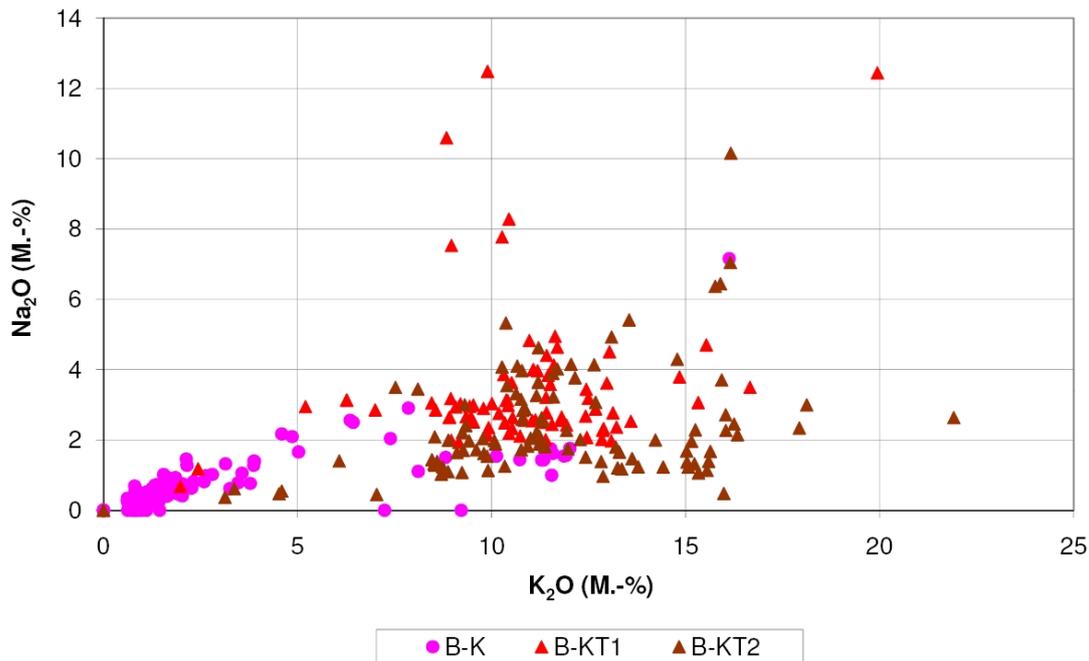


Abb. 71 Auftragung von K_2O über Na_2O der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der 40 °C Betonproben.

4.3 Betonserien der 60 °C Lagerung (Reaktorprüfung)

4.3.1 Längenänderung

Nach 180 Tagen Auslagerungsdauer wies der mit KOH dotierte Referenz-Betonprobekörper (**B-K-60**) mit 0,73 mm/m die höchste Dehnung auf, gefolgt vom Probekörper mit Rheinischem Trass (**B-KT1-60**) mit 0,52 mm/m, dem Probekörper **B-KT3-60** mit Italienischem Trass II mit 0,33 mm/m und dem Probekörper **B-KT2-60** mit Italienischem Trass I mit einer Dehnung von 0,29 mm/m (Abb. 72 und Anhang 7). Der flugaschehaltige Probekörper **B-KF-60** zeigte mit 0,15 mm/m nur eine geringe Tendenz zur Dehnung. Auffällig war, dass bei den Auslagerungsversuchen bei 60 °C die Serie mit dem Italienischen Trass II wesentlich größere Dehnwerte im Vergleich zu den Beton- und Mörtelseries, die bei 40 °C gelagert wurden, erbrachte. Die Italienisch II trasshaltige Probenserie **B-KT3-60** wies nach 180 Tagen Auslagerungszeit sogar eine Dehnung auf, welche größer war als die der Italienisch I trasshaltigen **B-KT2-60**.

Die aufdotierte Referenz-Serie mit reinem Portlandzement zeigte während der ersten 58 Tage eine hohe Dehnungsrate, die danach kontinuierlich abflachte. Das Dehnungsverhalten der Proben mit Rheinischem Trass (**B-KT1-60**) und der Serie mit dem Italienischen Trass I (**B-KT2-60**) wies einen kontinuierlichen Anstieg über die gesamte Auslagerungszeit auf. Letztere Serie zeigte in den ersten 50 Tagen eine Dehnung, die in etwa auf dem Niveau der Serie mit Rheinischem Trass lag, sich anschließend aber der Serie mit dem Italienischen Trass II **B-KT3** annäherte.

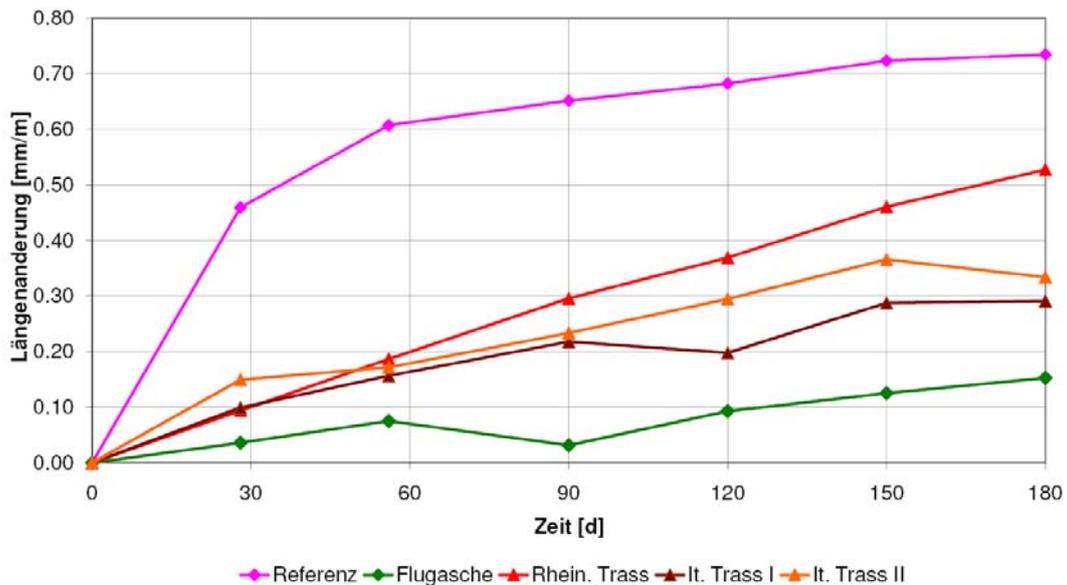


Abb. 72 Längenänderung der Betonprobenserien der 60 °C Lagerung.

4.3.2 Gefügeuntersuchungen

Nach der Auslagerungszeit von 180 Tagen waren in den mikroskopischen Präparaten der aufdotierten Referenz Betonprobenserie **B-K-60**, der Rheinisch trasshaltigen **B-KT1-60** und der Italienisch I trasshaltigen **B-KT2-60** Serien die gleichen durch die AKR hervorgerufenen Schadensbilder wie bei den entsprechenden Probekörpern der 40 °C Nebelkammerlagerung zu beobachten. Die alkaliempfindlichen Komponenten der Gesteinskörnung wiesen Risse auf. Es waren wiederum Rissysteme erkennbar, die sich über mehrere Gesteinskörnungen durch den Zementstein fortsetzten. Im Gegensatz zu der 40 °C Nebelkammerlagerung zeigten die Proben mit Italienischem Trass II (**B-KT3-60**) an den reaktiven Komponenten der Gesteinskörnungen typische durch AKR hervorgerufene Schadensbilder in Form von Rissen und Luftporen mit Reaktionsprodukten (Abb. 73 und 74).

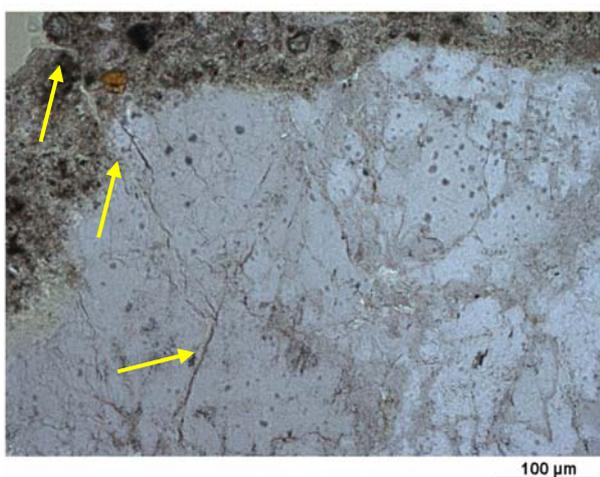


Abb. 73 Riss in Kieselkalk, der sich über den Zementstein bis zu einer Luftpore fortsetzt der Italienisch II trasshaltigen Probenserie (**B-KT3-60**) nach 180 Tagen. Dünnschliff, Polarisationsmikroskop.



Abb. 74 Luftpore mit Reaktionsprodukten an Zementstein/Luftpore der Italienisch II trasshaltigen Serie **B-KT3-60**.

4.3.3 Charakterisierung der Reaktionsprodukte

Beim Betrachten des Chemismus (siehe Anhang 8) der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Proben, die bei 60 °C gelagert wurden, ist zu erkennen, dass diese im Vergleich zu den 40 °C Serien eine größere Variabilität in der chemischen Zusammensetzung aufwiesen. Die dabei größte chemische Variabilität zeigten Proben der Serie **B-KT3-60** mit Italienischem Trass II gefolgt von **B-KT2-60** (Italienischer Trass I) und **B-K-60** (aufdotierte Referenz Probeserie) (Tab. 16 und Abb. 75). Die Probeserie mit dem Rheinischen Trass **B-KT1-60** wies die geringste Variabilität in der chemischen Zusammensetzung auf. Die Produkte der trasshaltigen Serien **B-KT1-60** und **B-KT2-60** besaßen einen ähnlichen Chemismus, der sich jedoch signifikant von der ebenfalls trasshaltigen Probeserie **B-KT3-60** unterschied.

Tab. 16 Chemische Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$ in M.-%

	B-K-60	B-KT1-60	B-KT2-60	B-KT3-60
SiO_2	59,38	64,20	66,33	58,50
CaO	30,79	22,94	23,26	36,97
$\text{Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$	9,84	12,86	10,41	4,53

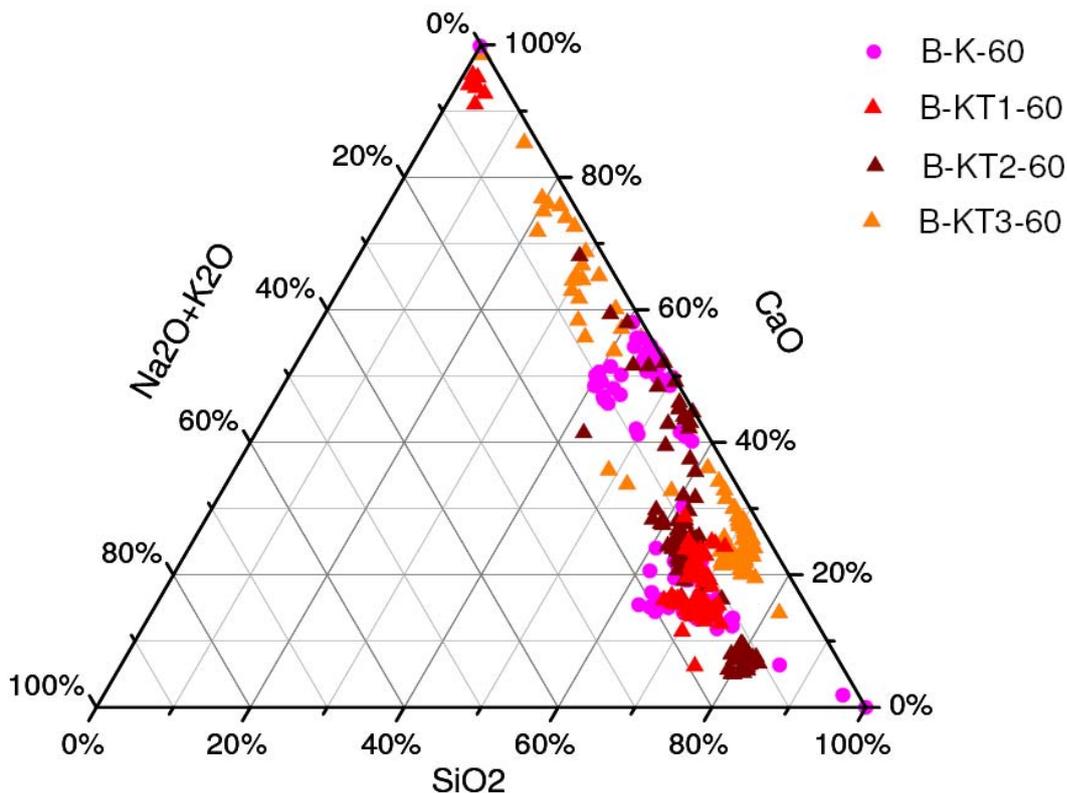


Abb. 75 Graphische Darstellung des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$ in M.-%.

Trotz der starken Streuung im Chemismus der AKR-Reaktionsprodukte der verschiedenen Serien, zeigten die Serien **B-KT3-60** und **B-K-60** eine tendenzielle Ähnlichkeit in der Zusammensetzung der Produkte (Abb. 76 bis 78 und Tab. 16). Dies zeigte sich in ähnlichen SiO_2 - und CaO -Gehalten. Die Serie **B-K-60** besaß jedoch etwas höhere Kaliumgehalte.

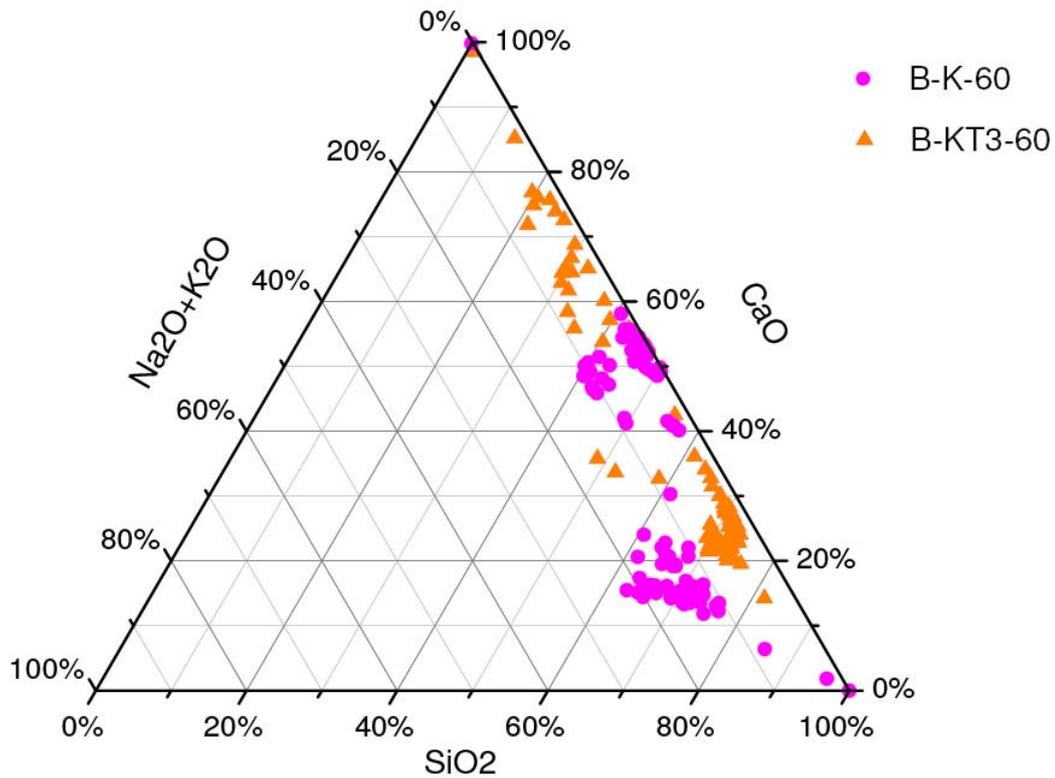


Abb. 76 Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO_2 - CaO - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ in M.-%.

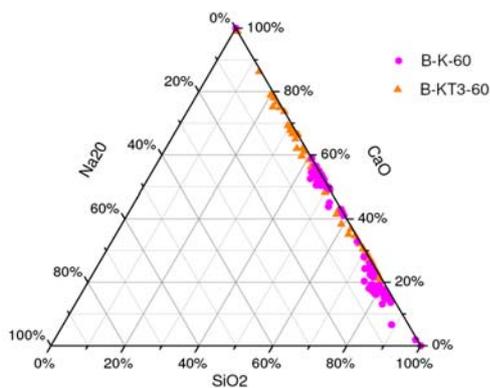


Abb. 77 Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO_2 - CaO - Na_2O in M.-%.

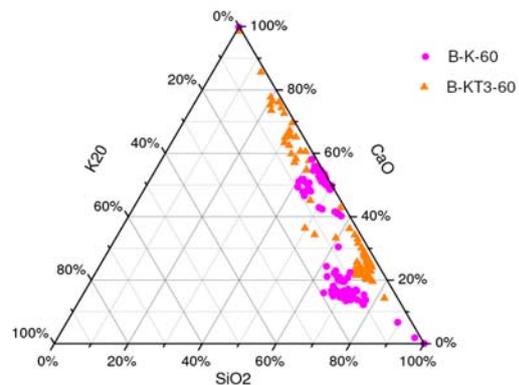


Abb. 78 Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO_2 - CaO - K_2O in M-e-%.

4.3.4 Vergleich des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der 40 °C und 60 °C Lagerung

Beim Vergleichen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Betonserie ohne Zusatzstoffe **B-K** und **B-K-60**, die bei 40 °C und 60 °C gelagert worden sind, war zu beobachten, dass die Gele die bei der 60 °C Lagerung entstanden waren, eine größere chemische Variabilität besaßen (Tab 18 und Abb. 79). Sie waren reicher an Alkalien und SiO₂ und ärmer an CaO.

Die mikrochemischen Untersuchungen ergaben im Weiteren, dass die unterschiedliche Lagerungstemperatur keinen wesentlichen Einfluss auf das Na₂O/K₂O-Verhältnis des AKR-Gels hatte, was in Abbildung 80 an der annähernd konstanten Steigung der Messpunkte für beide Auslagerungstemperaturen dokumentiert ist.

Tab. 17 Chemische Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O) in M.-%.

	B-K	B-K-60
SiO ₂	54,73	59,38
CaO	38,43	30,79
Na ₂ O+K ₂ O	6,84	9,84

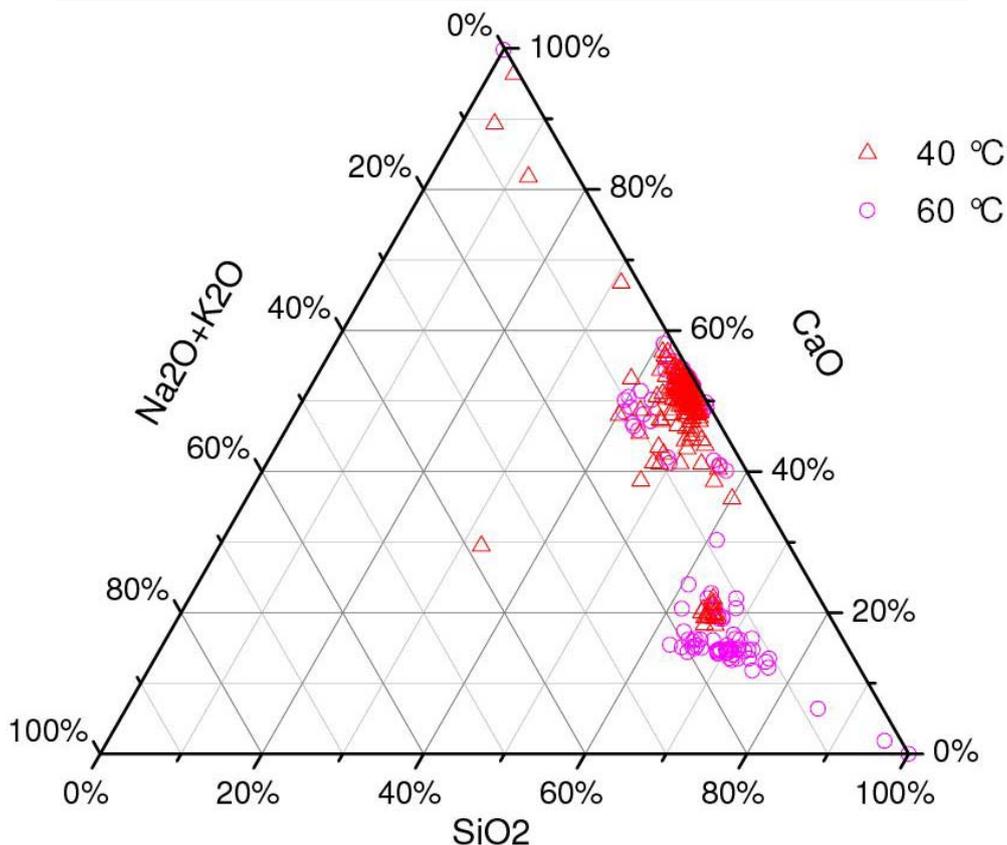


Abb. 79 Vergleich des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O) der Probe ohne Zusatzstoffe **B-K** und **B-K-60** bei der Auslagerungstemperatur von 40 °C und 60 °C. in M.-%.

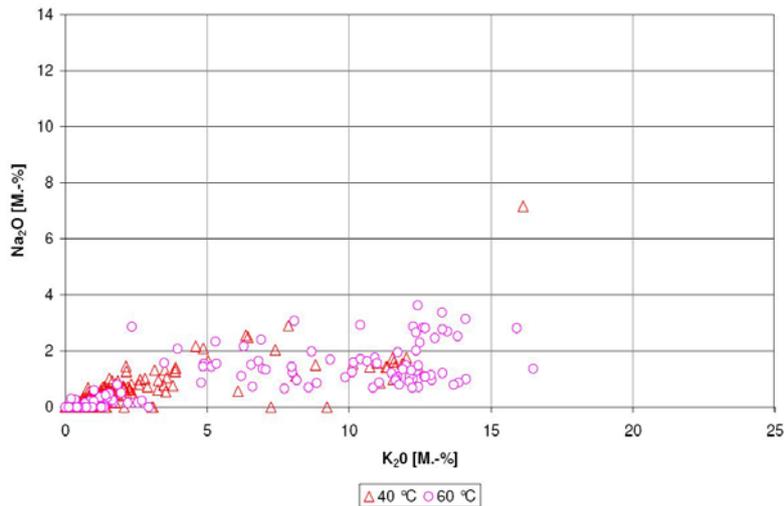


Abb. 80 Vergleich der K₂O- und Na₂O-Verhältnisse der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Betonproben B-K und B-K-60 Serie bei 40 °C und 60 °C Auslagerungstemperatur in M.-%.

Beim Betrachten der beiden gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Probeserien **B-KT1** und **B-KT1-60** zeigte es sich, dass die Gele der 60 °C Lagerung einen höheren CaO-Anteil besaßen (Tab. 18 und Abb. 81). Der SiO₂- und der Alkaligehalt hingegen war tiefer als bei den Gelen, die bei der 40 °C Lagerung als AKR Reaktionsprodukt entstanden sind.

Die mikrochemischen Untersuchungen ergaben im Weiteren, dass die unterschiedliche Lagerungstemperatur keinen Einfluss auf das Na₂O/K₂O-Verhältnis des gelförmigen AKR Reaktionsprodukts hatte (Abb. 82).

Die AKR Gele der Betonserien mit dem Italienischen Trass I (**B-KT2** und **B-KT2-60**) zeigten dasselbe Verhalten wie die gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Betonserien mit Rheinischem Trass. Es war feststellbar, dass die Gele, die bei 60 °C gebildet wurden, tiefere SiO₂- und Alkaligehalte und höhere CaO-Gehalte aufwiesen (Abb. 83 und Tab. 19).

Die unterschiedlichen Lagerungstemperaturen besaßen hierbei einen wesentlichen Einfluss auf den Gehalt an K₂O im Reaktionsprodukt. Bei der 60 °C Lagerung wurden deutlich geringere K₂O-Gehalte bestimmt als bei der 40 °C Lagerung (Abb. 84). Dies könnte darin begründet liegen, dass bei 60 °C die Porenlösung eine höhere Löslichkeit für Kalium besitzt als bei 40 °C. Niedrigere Kaliumgehalte in den Reaktionsprodukten wurden zuvor auch in den Proben ermittelt, die Italienischen Trass II enthielten (Abb. 76).

Tab. 18 Chemische Zusammensetzung der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$ in M.-%.

	B-KT1	B-KT1-60
SiO_2	70,61	64,20
CaO	13,75	22,94
$\text{Na}_2\text{O+K}_2\text{O}$	15,64	12,86

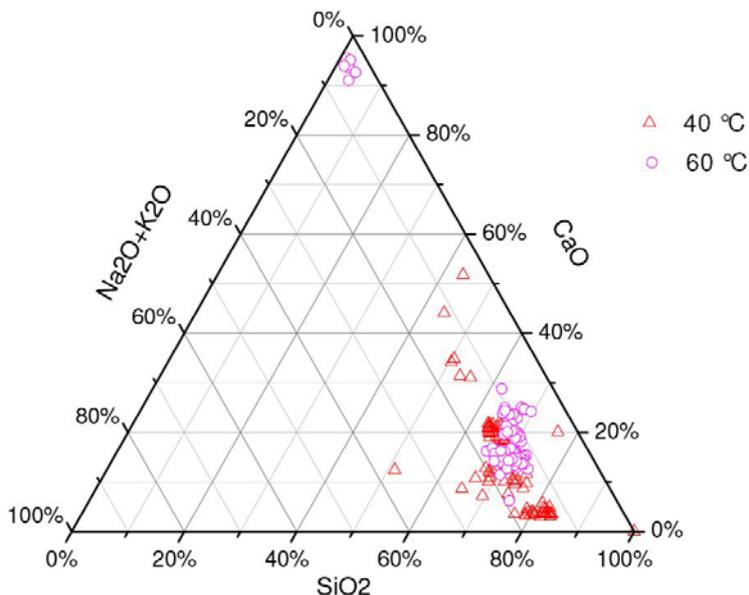


Abb. 81 Vergleich des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System $\text{SiO}_2\text{-CaO-(Na}_2\text{O+K}_2\text{O)}$ der Probe mit Rheinischen Trass als Zusatzstoff (B-KT1 und B-KT1-60) bei der Auslagerungstemperatur von 40 °C und 60 °C in M.-%.

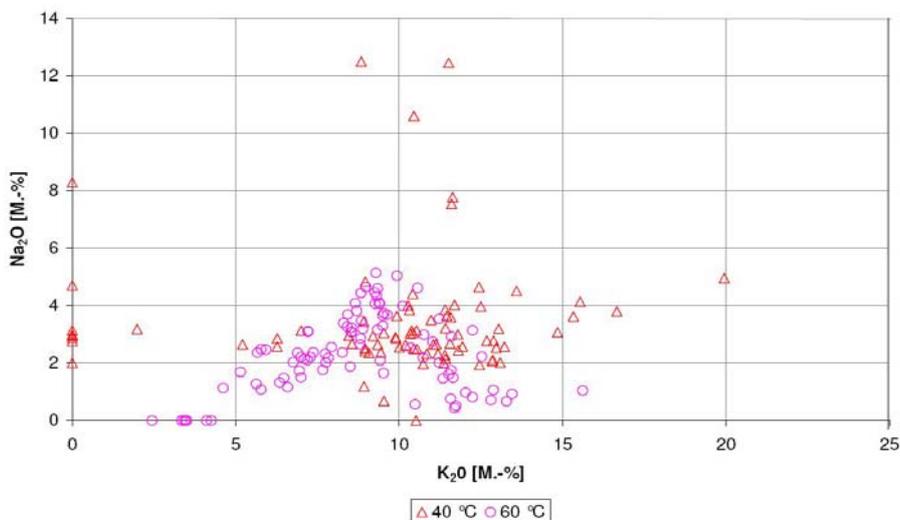


Abb. 82 Vergleich der K_2O - und Na_2O -Verhältnisse der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Betonproben **B-KT1** und **B-KT1-60** Serie in M.-%.

Tab. 19 Chemische Zusammensetzungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O) in M.-%.

	B-KT2	B-KT2-60
SiO ₂	69,40	66,33
CaO	14,88	23,26
Na ₂ O+K ₂ O	15,72	10,41

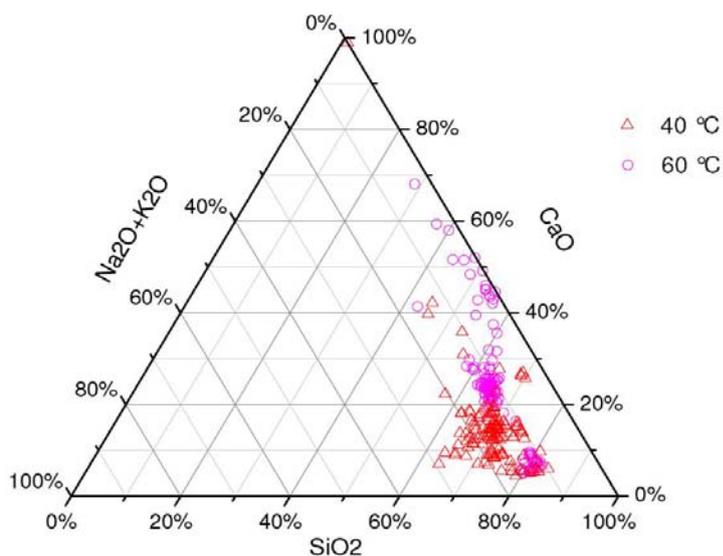


Abb. 83 Vergleich des Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte im ternären System SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O) der Probe mit Italienischen Trass I als Zusatzstoff (B-KT2 und B-KT2-60) bei der Auslagerungstemperatur von 40 °C und 60 °C in M.-%.

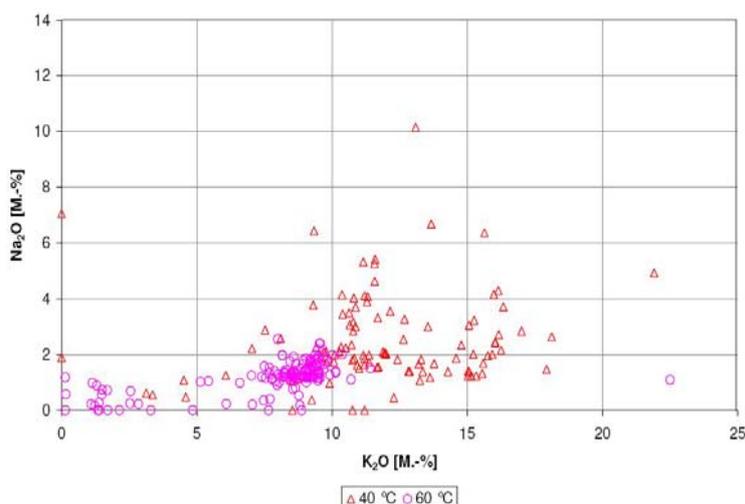


Abb. 84 Vergleich der K₂O- und Na₂O-Verhältnisse der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Betonproben B-KT2 und B-KT2-60 Serie in M.-%.

4.3.5 Bestimmung der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der bei 60 °C gelagerten Betonserien

An polierten Anschliffen der **B-K-60**, **B-KT1-60**, **B-KT2-60** und **B-KT3-60** Serien wurde analog zu der 40 °C Lagerungen der Mörtelprismen nach 180 d die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse des Zementstein mikroanalytisch bestimmt und graphisch wiedergegeben (Abb. 85 und 86). Die 180 d Auslagerungszeit der Betonserien erzeugte bei 60 °C ähnliche Atomverhältnisse der C-S-H-Phasen wie eine Auslagerung bei 40 °C über 360 d in den Mörtelserien (vgl. Abb. 55 mit 86). Dies zeigt einen starken Einfluss der Auslagerungstemperatur beim Reaktionsumsatz der verschiedenen Trasse.

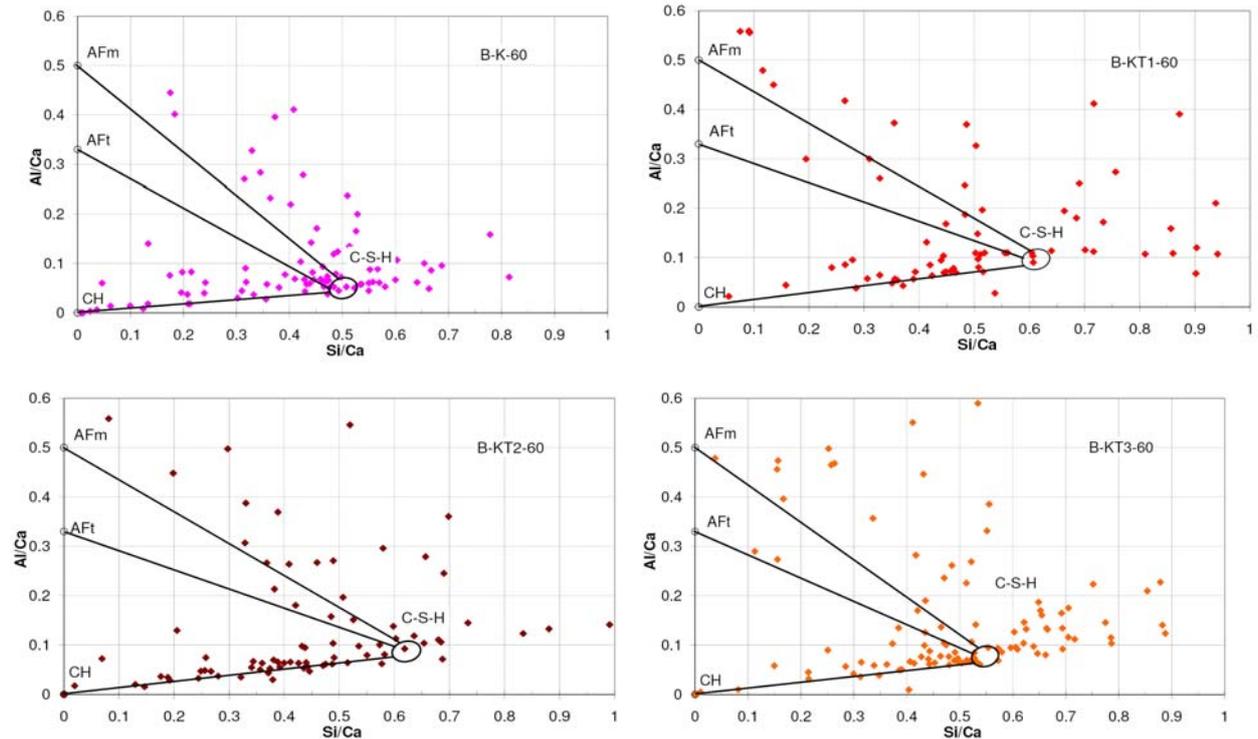


Abb. 85 Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse im Zementstein der Betonserie der 60 °C AKR-Reaktor Lagerung nach 180 Tagen.

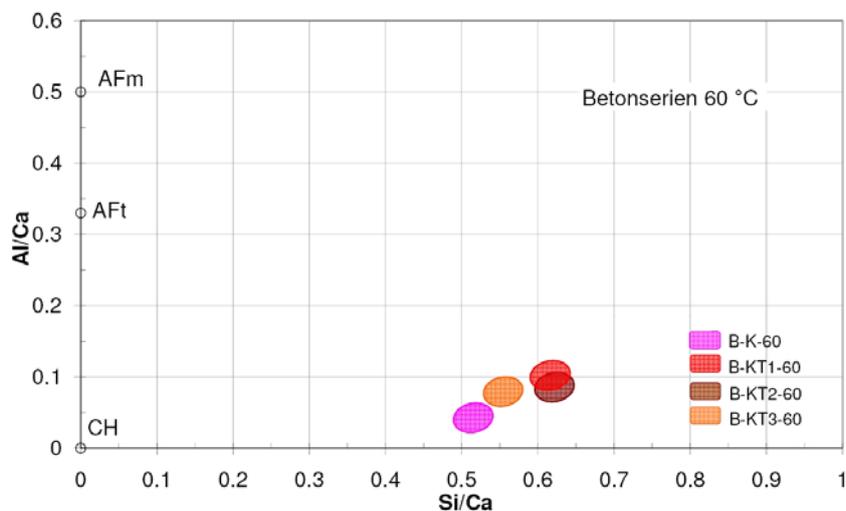


Abb. 86 Zusammenfassung der Si/Ca- und Al/Ca-Atomverhältnisse.

4.4 Der Temperatureinfluss auf den Chemismus der C-S-H-Phasen in Zementsteinen mit Klinkerersatzstoffen

Ausgehend vom Temperatureinfluss auf die Reaktivität der Klinkerersatzstoffe im Zementsystem wurden Untersuchungen an Zementsteinen bei drei verschiedenen Temperaturen durchgeführt: 20 °, 40 ° und 60 °C. Die Versuche wurden exemplarisch an Zementsteinen durchgeführt, die jeweils die Steinkohlenflugasche und den Rheinischen Trass enthielten. Die Zusammensetzung der Zementsteine ist in Tabelle 11 wiedergegeben. Die Probenherstellung und Nachbehandlung erfolgte analog zu den Mörtel- und Betonserien. Bestimmt wurden die Elementverhältnisse von Si/Ca und Al/Ca mittels Mikrosonde. Die eigentliche Auslagerung bei den unterschiedlichen Temperaturen erfolgte über 28 Tage.

Die Abbildungen 87 und 88 geben jeweils die Ergebnisse der Analysen in Elementverhältnissen wieder. Sie zeigen bei beiden Zementsteinen einen kontinuierlichen Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen bei entsprechender Temperaturerhöhung. Die Ergebnisse zeigen auch hier, dass die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf die Reaktivität der Puzzolane und damit auch auf die Zusammensetzung der C-S-H-Phasen hat.

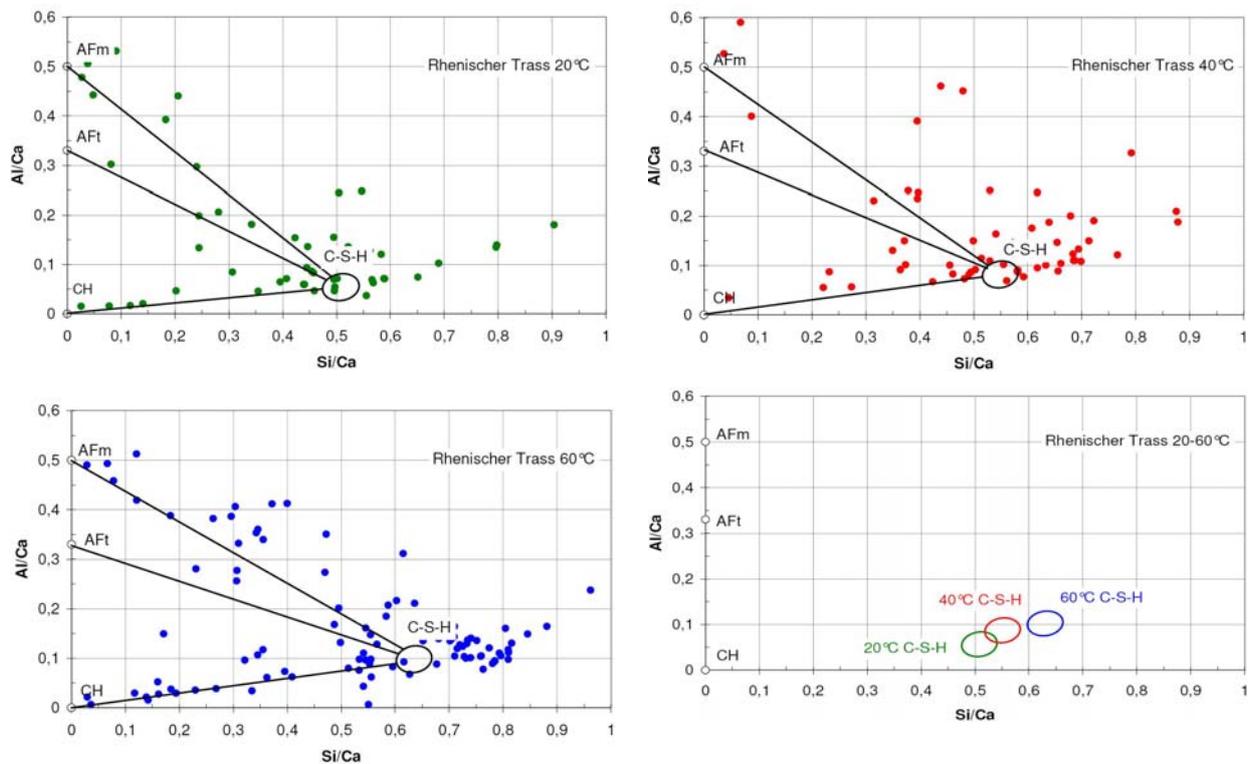


Abb. 87 Der Chemismus der C-S-H-Phasenzusammensetzung von Zementsteinproben mit Rheinischem Trass bei den drei verschiedenen Auslagerungstemperaturen.

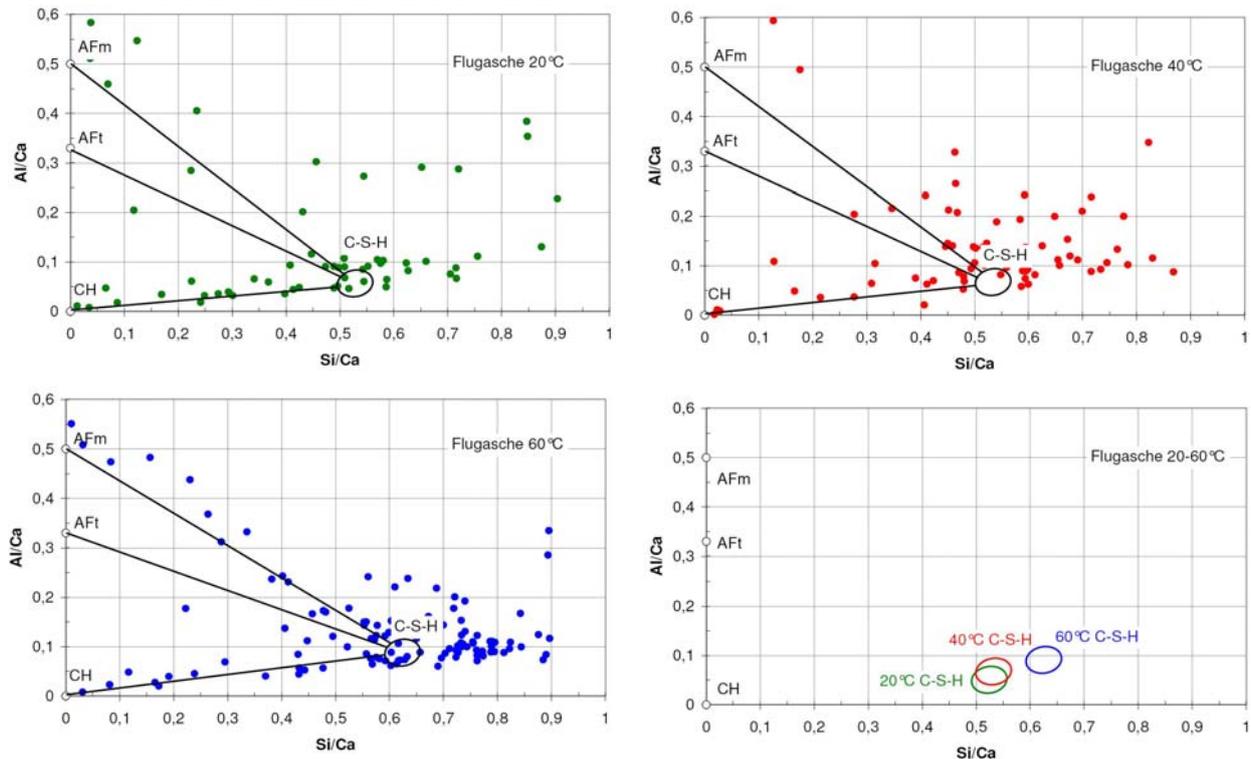


Abb. 88 Der Chemismus der C-S-H-Phasenzusammensetzung von Zementsteinproben mit Flugasche bei den drei verschiedenen Auslagerungstemperaturen.

4.5 Bestimmung des Auslaugungspotentials der Zusatzstoffe nach ASTM C311

Die Auslaugungsversuche nach der ASTM C311 Norm ist in Abbildung 89 dargestellt. Die Diagramme stellen das $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ bzw. die Na_2O sowie K_2O -Gehalte der Klinkerersatzstoffe dar. Die obere Kante eines Balkens repräsentiert die Gehalte **vor**, die untere Kante eines Balkens die Gehalte **nach der Auslaugung**. Die Länge der Balken ist die Differenz der Gehalte vor und nach dem Versuch und repräsentiert die aus den Klinkerersatzstoffen ausgelaugte Alkalimenge.

Der Rheinische Trass zeigte nach einer Auslagerungszeit von 28 Tagen das größte Auslaugungspotential mit rund 4,5 M.-% $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$. Gefolgt wurde dieser von den beiden Italienischen Trassen I und II. Die Flugasche und der Hüttensand zeigten eine deutlich geringere Anfangsmenge an Alkalien und gaben während des Versuchs auch deutlich weniger Alkalien an die Lösung ab. Abbildung 89 zeigt auch die Auslaugung der einzelnen Alkalien (Na_2O und K_2O). Der Rheinische Trass gab hierbei überwiegend Natrium an die Lösung ab. Die beiden Italienischen Trasse gaben dagegen etwas mehr Kalium ab.

Es fanden zusätzlich noch Auslagerungen über 90 und 180 Tage statt. Doch ab einer Auslagerungsdauer von über 28 Tagen waren bei allen Klinkerersatzstoffen nur noch geringe Konzentrationsabnahmen festzustellen. Dies beruhte vermutlich auf der vollständigen Reaktion der Puzzolane in der Calciumhydroxidlösung.

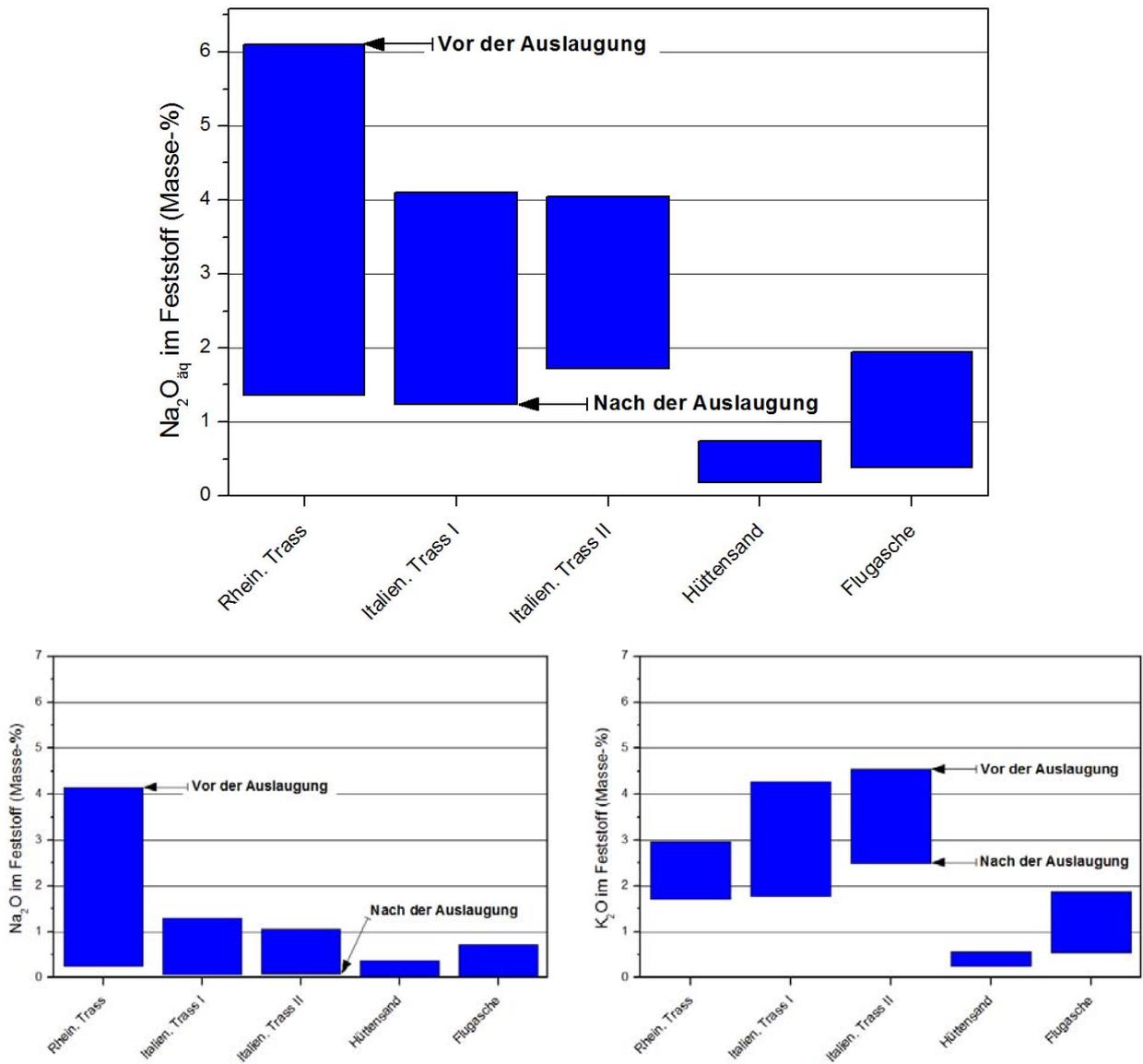


Abb. 89 Auslaugungspotential der verwendeten Klinkerersatzstoffe nach ASTM C311. Gezeigt sind das $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ (oberes Bild), sowie die Gehalte an Na_2O und K_2O der Feststoffe (darunterliegende Bildreihe) jeweils vor und nach dem Auslaugungsversuch. Die Länge der Balken entsprechen den Alkalimengen, die an die Porenlösung abgegeben wurden. (siehe auch Anhang A 9)

5 Diskussion der Ergebnisse der einzelnen Serien und Schlussfolgerungen

5.1 Einfluss der Alkalidotierung und der Auslagerungsart bei den Serien mit reinem Portlandzement: M-K, B-K und B-K-60

Die Mörtelprobenserien **M-K** und die Betonprobenserien **B-K** sowie **B-K-60** zeigten ein unterschiedliches Dehnungsverhalten. Die Mörtelserie zeigte nach 360 Tagen nur die dritthöchste Dehnung, während die beiden Betonserien jeweils die höchsten Dehnungen innerhalb der Versuchsreihen aufwiesen. Ein Grund für dieses Dehnungsverhalten kann in der unterschiedlichen Sieblinie der Mörtel- und Betonserie gesehen werden. Es ist bekannt, dass die feinen Sandfraktionen zu einer Pufferung der Alkalien führen können ($< 0,6$ mm in [90]). Diese Beobachtungen bestätigen auch neue Forschungsarbeiten [91, 92], die sich mit dem Einfluss der Mehlkornfraktion ($< 0,125$ mm) auf eine AKR befassen haben. Es stellte sich dabei heraus, dass mit Hilfe der Mehlkornfraktion einer alkaliempfindlichen Gesteinskörnung eine AKR deutlich abgeschwächt werden kann. In den Mörtelproben ist generell mit einem höheren Anteil an Feinfraktion zu rechnen als bei den Betonproben, mit der Folge der geringeren Dehnung bei den Mörteln mit reinem Portlandzement. Eine weitere Ursache könnte im unterschiedlichen Auslaugungsverhalten und in den Lagerungsbedingungen der Probenkörper liegen. Diese Beobachtungen stimmen mit denjenigen von Rogers [93] überein, bei welchen Mörtel- und Betonprobekörper in unterschiedlichen Behältern in der Nebelkammer lagerten und dabei eine Auslaugung an Alkalien über die Auslagerungszeit gemessen wurde. So beobachtete er, dass die Betonprobekörper, die direkt in der Nebelkammer gelagert waren, eine größere Auslaugung und eine geringere Dehnung aufwiesen als die, die in geschlossenen Boxen aufbewahrt wurden. Allerdings sollte sich der Auslaugungseffekt auch bei den anderen Serien einstellen. Dies wurde jedoch nicht beobachtet.

An den Gefügeuntersuchungen im Dünnschliff und an polierten Anschliffen konnten nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen an der aufdotierten Referenz-Mörtelserie (**M-K**) und der Referenz-Betonserie (**B-K**) die für eine AKR typischen Schadensbilder in Form von Rissen an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und Rissystemen, die sich durch die alkaliempfindliche Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix fortsetzten, beobachtet werden. Zusätzlich waren in den Luftporen der Referenz-Betonserie **B-K** AKR-Reaktionsprodukte vorhanden. Die Referenz-Betonserie zeigte nach der 60 °C Lagerung (**B-K-60**) bei den Gefügeuntersuchungen dasselbe Schadensbild wie die **B-K** Serie.

Die mikrochemischen Untersuchungen an polierten Anschliffen der aufdotierten Referenz-Mörtelserie **M-K** nach 28, 90, 180 und 360 Tagen ergaben, dass die Si/Ca-Verhältnisse des Zementsteins über die gesamte Auslagerungszeit konstant blieben. Bei den Al/Ca-Verhältnissen waren über die gesamte Auslagerungszeit nur sehr geringe Erhöhungen zu verzeichnen. Dies bedeutet, dass die Hydratation des Zementes schon nach 28 Tagen nahezu abgeschlossen war. Dies deckt sich auch mit den Versuchen von Taylor [46] und Schäfer [10], die beide über eine Auslagerungsdauer von 14 bzw. 12 Monaten nur geringfügige Veränderungen der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse des Zementsteins nachwiesen.

Bei der mikrochemischen Charakterisierung der AKR-Reaktionsprodukte der beiden Betonserien zeigte sich, dass die bei 40 °C gebildeten Reaktionsprodukte höhere CaO-Gehalte und tiefere SiO₂- und Alkaligehalte als das bei 60 °C gebildete Reaktionsprodukt besaßen. Die Gele, die bei 60 °C gebildet wurden, wiesen höhere Na₂O/K₂O-Verhältnisse auf. Diese Tatsache kann damit begründet werden, dass die Gele bei der 60 °C Lagerung schneller alterten als bei

der 40 °C Lagerung. Dies deckte sich auch mit den Beobachtungen von Thaulow [35], welcher beobachtete, dass ältere gelförmige AKR-Reaktionsprodukte reicher an CaO und ärmer an SiO₂ waren.

5.2 Der Einfluss von Hüttensand: Serie M-KH

Die hüttensandhaltige Mörtelserie **M-KH** wies nach 360 Tagen die dritthöchste Dehnung aller zusatzstoffhaltigen Mörtelprimen auf. Jedoch waren auch nach der Auslagerungszeit von 360 Tagen bei den Gefügeuntersuchungen an den Dünnschliffen und den polierten Anschliffen keine durch AKR induzierten Risse an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und im Zementstein zu erkennen.

Die Gefügeuntersuchungen an den polierten Anschliffen der 28, 90, 180 und 360 Tagen zeigten eine kontinuierliche Zunahme der Hydratation der Hüttensandpartikel. Nach 360 Tagen Auslagerungszeit waren teilweise vollständig hydratisierte Hüttensandpartikel zu erkennen, d.h. nur noch ihre ursprüngliche Korngrenze mit dem Zementstein war zu sehen. Diese kontinuierliche Hydratation der Gläser deckt sich auch mit den Beobachtungen der mikrochemischen Untersuchungen der zeitlichen Entwicklung der C-S-H-Phasen.

Die elementchemischen Untersuchungen des Zementsteins zeigten, dass es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen über die gesamte Auslagerungsdauer kam. Es war zu beobachten, dass nach 28 Tagen der Chemismus der C-S-H-Phasen noch demjenigen der aufdotierten Referenz-Mörtelserie (M-K) entsprach, erst danach kam es zur Erhöhung der beiden Verhältnisse. Diese Beobachtungen decken sich mit denjenigen von Schäfer [10] und Taylor [46]. Nach der Auslagerungszeit von 180 Tagen, war eine Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit zu erkennen, da sich die beiden Verhältnisse nur noch wenig erhöhten. Dies deutet daraufhin, dass die latent-hydraulische Reaktion erst nach der Lagerungszeit von 28 Tagen maßgebliche Bedeutung erhält und sich wieder zwischen dem 180. und 360. Tag der Auslagerungszeit verlangsamt.

Die Auslaugungsversuche nach ASTM C311 zeigten, dass der Hüttensand mit $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 0,74$ M-% den geringsten Alkaligehalt und mit $\Delta\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 0,55$ M-% die geringste Auslaugung von Alkalien aller verwendeten Klinkerersatzstoffe aufwies.

Dieses geringe Auslaugungspotential und die Fähigkeit Al in die C-S-H-Phasen einzubauen, kann als Erklärung genommen werden, weshalb trotz Dehnung der Mörtelseries, welche geringfügig kleiner war als diejenige der aufdotierten Referenzmörtelserie (M-K), keine AKR Schäden in den Mörtelproben zu verzeichnen waren.

5.3 Der Einfluss von Flugasche: Serien M-KF, B-KF und B-KF-60

Die Mörtelserie **M-KF** und die beiden Betonserien **B-KF** und **KF-60** zeigten ähnlich wie die Mörtel- und Betonserien ohne Zusatzstoffe ein unterschiedliches Dehnungsverhalten und bestätigt damit die in Kapitel 5.1 dargelegte Interpretation. Die **M-KF** Serie wies in den ersten 180 Tagen der Auslagerung nur geringe Dehnungsraten auf, danach kam es zu einem Anstieg der Dehnung. Dieser Trend war bei der Betonserie **B-KF**, der 40 °C Lagerung und der Betonserie **B-KF-60** der 60 °C Lagerung nicht zu erkennen. Der Unterschied im Dehnungsverhalten kann auch hier wieder der unterschiedlichen Feinsandzusammensetzung der Mörtelseries (alkaliempfindliches Material mit Pufferwirkung) und der Betonseries (inertes Material) zu geschrieben werden.

Trotz der Dehnungen, die bei der Mörtelserie **B-KF** zu beobachten war, wurde in den Dünnschliffen und polierten Anschliffen der Proben mit einer Auslagerungszeit von 360 Tagen an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und im Zementstein keine durch AKR induzierten Risse oder Reaktionsprodukte beobachtet. Auch in den Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen der Betonserien **B-KF** und **B-KF-60** waren wie bei den Mörtelserien keine Anzeichen für eine AKR-Schädigung in Form von Rissen an den reaktiven Gesteinskörnungen und Reaktionsproduktbildungen in den Luftporen zu beobachten. Die Gefügeuntersuchungen an polierten Anschliffen der Mörtelserie **B-KF** über die gesamte Auslagerungszeit zeigte, dass an den Flugaschepartikeln ein im Vergleich zu den Hüttensandpartikeln der M-KH Serie geringerer Hydrationsfortschritt stattfand.

Die mikrochemischen Untersuchungen des Chemismus der C-S-H-Phasen spiegeln den zuvor beschriebenen Trend des Hydrationsfortschrittes wieder. Bereits nach der Auslagerungszeit von 28 Tagen wiesen die C-S-H-Phasen der flugaschehaltigen Mörtelserie höhere Al/Ca-Verhältnisse als die der aufdotierten Referenz Mörtelserie M-K und der hüttensandhaltigen Serie M-KH auf. Diese beiden Verhältnisse erhöhten sich bis zur Auslagerungsdauer von 360 Tagen nicht mehr signifikant (im Gegensatz zu denjenigen der hüttensandhaltigen Mörtelserie). Der schwache Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse kann damit begründet werden, dass ein Großteil der Flugasche unter den erhöhten Umgebungstemperaturen bereits nach 28 Tagen puzzolanisch reagiert hatte. Die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse bei Zementstein mit Flugasche erhöhten sich nach 28 Tagen nur noch gering, was sich mit den Beobachtungen von Schäfer [10], Taylor [46] und Rayment [94] deckt. Die Auslagerungsversuche von flugaschehaltigen Zementsteinen bei 20 °C, 40 °C und 60°C ergaben, dass die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen stark von der Temperatur abhängig sind. Die mikrochemischen Untersuchungen ergaben, dass die beiden Verhältnisse mit Erhöhung der Temperaturen zu höheren Werten verschoben werden. Ursache ist die Erhöhung der puzzolanischen Reaktionsgeschwindigkeit von Flugasche mit steigender Temperatur.

Der Auslaugungsversuch mit Flugasche nach ASTM C311 zeigte einen deutlich höheren Alkaligehalt ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 1,94 \text{ M.-%}$) und eine deutlich höhere Auslaugung ($\Delta\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}} = 1,56 \text{ M.-%}$) als bei Hüttensand (lag aber im Vergleich zu den Trassen noch bei deutlich niedrigeren Werten). Korreliert man diese geringe Auslaugung mit den Gefügeuntersuchungen den Probekörpern der Mörtel- und Betonserien, in welchen keine durch AKR induzierten Schadensbilder nachweisbar waren, kann gefolgert werden, dass es trotz des vorhandenen Alkaligehalts zu keinem wesentlichen zusätzlichen Alkali Eintrag durch die Flugasche ins System kam.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die AKR-hemmende Wirkung der Flugasche dem tiefen initialen $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$, und dem Al-Einbau in die C-S-H-Phasen zugeschrieben werden kann. Durch den Al-Einbau wird die Alkalisorptionsfähigkeit der C-S-H-Phasen erhöht. Dadurch sinkt der Alkaligehalt der Porenlösung und in der Folge sinkt das Risiko für eine AKR.

5.4 Der Einfluss verschiedener Trasse

5.4.1 Rheinischer Trass: Serien M-KT1, B-KT1 und KT1-60

Die Mörtelserie **M-KT1**, sowie Betonserien **B-KT1** und **B-KT1-60** mit dem Rheinischen Trass als Zusatzstoff zeigten ein unterschiedliches Dehnungsverhalten. Die Mörtelserie M-KT1 zeigte nach 360 Tagen die höchste Dehnung aller Mörtelserien, während die beiden Betonserien **B-KT1** und **B-KT1-60** jeweils nur die zweithöchste Dehnung aufwiesen. Die beiden Probereihen **M-KT1** und **B-KT1**, welche bei 40 °C gelagert wurden, zeigten erst nach einer Auslagerungsdauer von 28 Tagen eine Dehnung. Die Mörtelserie **M-KT1** zeigte danach eine kontinuier-

liche starke Dehnung, während die Betonserie eine weniger starke Dehnung aufwies. Das Dehnungsverhalten der Betonserie **B-KT1-60**, die bei 60°C gelagert wurde, kann als linear beschrieben werden. Aus messtechnischen Gründen kann leider keine Aussage darüber gemacht werden, wie das Dehnungsverhalten in den ersten 28 Tagen der Auslagerung war.

In den Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und polierten Anschliffen der Mörtelserie **M-KT1** zeigten sich nach 180 Tagen Auslagerungszeit erste Risse an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. Ebenso waren Rissystemen beobachtbar, welche sich über den Zementstein und über mehrere alkaliempfindliche Gesteinskörnungen erstreckten. Die Betonprobereihen **B-KT1** wiesen nach 360 Tagen und **B-KT1-60** nach 180 Tagen im Dünnschliff und polierten Anschliffen die identischen Schadensbilder wie in den Mörtelserie **M-KT1** auf. Im Gegensatz zu den Mörtelserien waren bei den beiden Betonserien AKR-Reaktionsprodukte in Form von Gel in den Luftporen beobachtbar. Die Gefügeuntersuchungen zeigten im Weiteren, dass die vulkanischen Gläser des Rheinischen Trasses, wie die Hüttensandgläser, mit fortschreitender Auslagerungszeit einer deutlich erkennbaren, sukzessiven Hydratation unterlagen.

Die Beobachtung der Hydratation der vulkanischen Gläser korrelierte mit den mikrochemischen Untersuchungen, die einen kontinuierlichen Anstieg der Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen im Zementstein über die gesamte Auslagerungszeit zeigten. Nach 28 Tagen entsprachen die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse noch in etwa denjenigen der aufdotierten Referenz-Mörtelserie M-K. Danach war ein kontinuierlicher Anstieg (= rasche Hydratationsgeschwindigkeit) der beiden Verhältnisse bis zu einer Auslagerungsdauer von 180 Tagen beobachtbar. Anschließend war eine Abnahme der Hydratationsgeschwindigkeit erkennbar, da der Anstieg der Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse geringer ausfiel als die der vorhergehenden Auslagerungsperiode. Dies könnte damit begründet werden, dass die teilweise aluminiumhaltigen Zeolithe im zementgebundenen System schneller reagieren als die vulkanischen Gläser [73, 95, 96] und somit zu Beginn vor allem der Aluminiumeinbau in die C-S-H-Phasen vorherrschend ist. Nach 360 Tagen waren sogar höhere Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse als bei der flugaschehaltigen Mörtelserie M-KF zu verzeichnen.

Die mikrochemischen Untersuchungen der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte ergaben, dass die Gele der Betonserien **B-KT1** und **B-KT1-60** höhere SiO₂- und Alkaligehalte (Na₂O + K₂O) und tiefere CaO-Gehalte als die Gele der Serie aufdotierte Referenz Betonserie B-K aufwiesen. Eine sehr wahrscheinliche Erklärung für die höheren SiO₂- und Alkaligehalte besteht darin, dass die alkalihaltigen vulkanischen Gläser wesentlich zur Erhöhung des Gesamtalkaligehalts in der Porenlösung und somit auch zur Bildung alkalireicher Reaktionsprodukte beitrugen. Dies wird durch den Auslaugungsversuch nach ASTM C311 bestätigt. Hier zeigte der Rheinische Trass den höchsten Alkaligehalt mit Na₂O_{aq} = 6,10 M.-% und mit ΔNa₂O_{aq} = 4,73 M.-% das höchste Auslaugungspotential aller verwendeten Zusatzstoffe, wobei Na₂O bevorzugt ausgelaut wurde. Korreliert man die Gefügeuntersuchungen der Mörtel- und Betonprobekörper kann gefolgert werden, dass es beim Einsatz von Rheinischem Trass zu einem zusätzlichen Eintrag von Alkalien, besonders von Natrium, in das System kam. Ein Teil des in den Gläsern vorhandenen reaktiven Siliziums wurde möglicherweise nicht nur zur Bildung von C-S-H-Phasen verbraucht, sondern könnte auch zur Bildung der gelförmigen Reaktionsprodukte beigetragen haben, was deren Siliziumgehalt erhöhte. Die niedrigeren Calciumgehalte in den Reaktionsprodukten sind letztendlich dem Umstand geschuldet, dass durch die puzzolanische Reaktion von Trass die Porenlösung generell ärmer an Calcium ist als in Zementsteinen mit reinem Portlandzement. Dadurch stünde auch weniger Calcium zum Einbau in die Reaktionsprodukte zur Verfügung.

Die Untersuchungen zeigten, dass auch die Temperatur (40 °C und 60 °C) einen Einfluss auf den Chemismus der Reaktionsprodukte hatte. So waren die Produkte der 60 °C Lagerung (**B-KT1-60**) reicher an CaO und ärmer an SiO₂. Davon ausgehend, dass die Temperatur einen

Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit, auf das Ionenaustauschvermögen und somit auch auf das Alterungsverhalten der Reaktionsprodukte hat, deckt sich dies mit den Aussagen von Thaulow [35], dass ältere Gele reicher an CaO und ärmer an SiO₂ sind.

Das unterschiedliche Dehnungsverhalten der Mörtelserie M-KT1 im Vergleich zur Referenz Mörtelserie ohne Zusatzstoffe M-K und der Rheinisch trasshaltigen Betonserien B-KT1 und B-KT1-60 im Vergleich der Referenz Betonserien ohne Zusatzstoffe B-K und B-K-60 kann folgendermaßen begründet werden: Nach Locher [90] ist bekannt, dass der Feinkornanteil die Alkalien puffert. Da aber bei der Mörtelserie M-KT1 durch die Auslaugung des Rheinischen Trasses noch mehr Alkalien ins System eingebracht werden, ist dieser Pufferungseffekt nicht so groß wie bei der Referenz Mörtelserie mit reinem Portlandzement (M-K) und es stehen mehr Alkalien für die alkaliempfindliche Gesteinskörnung zu Verfügung. Die Auslaugung der Alkalien aus dem Rheinischen Trass ist bei den Mörtelserien größer als der alkalibindende Effekt des Al-Einbau in die C-S-H-Phasen. Daher zeigte die Mörtelserie höhere Expansionen als die Betonserien verglichen mit den jeweiligen Dehnungen der Serien mit reinem Portlandzement.

Zusammenfassend lässt sich für die Serien mit dem Rheinischen Trass als Zusatzstoff schlussfolgern, dass er analog zur Flugasche die Eigenschaft besitzt, Al in die C-S-H-Phasen einzubauen. Dies konnte anhand der kontinuierlichen Erhöhung des Al/Ca-Verhältnisses über die gesamte Auslagerungszeit gezeigt werden. Demzufolge könnte man annehmen, dass der Einsatz von Rheinischen Trass analog zur Flugasche sich AKR-hemmend auswirken würde. Doch die Dehnungsmessungen an den Mörtelserien und Betonserien zeigten, dass es zu Dehnungen kam, welche im Falle der Mörtelserie über denen der dotierten Serie mit reinem Portlandzement lagen und zu entsprechenden Gefügeschädigungen führten. Der zusätzliche Eintrag von Alkalien aus dem Rheinischen Trass hat deshalb dem positiven Effekt der Alkalibindung an C-S-H-Phasen entgegen gewirkt und die AKR in den Proben eher gefördert.

5.4.2 Italienischer Trass

5.4.3 Der Einfluss von Italienischem Trass I: Serien M-KT2, B-KT2 und B-KT2-60

Die Mörtelserie **M-KT2** und die beiden Betonserien **B-KT2** sowie **B-KT2-60** zeigten ein analoges Dehnungsverhalten zu den Serien mit Rheinischem Trass. Die Mörtelserie **M-KT2** wies nach 360 Tagen die zweithöchste Dehnung auf, während bei den beiden Betonserien **B-KT2** und **B-KT2-60** eine geringere Dehnung im Vergleich zu den aufdotierten Referenz Betonserien B-K und B-K-60 erkennbar war. Die Dehnungen der beiden Betonserien mit Italienischem Trass I waren geringer als diejenigen mit Rheinischem Trass (B-KT1).

Bei den Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und polierten Anschliffen der Mörtelserien **M-KT2** waren wie bei den Proben der Rheinisch-Trasshaltigen Probeserien nach 180 Tagen an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und im Zementstein durch AKR induzierte Risse erkennbar. Das gleiche Schadensbild zeigte sich auch an den Dünnschliffen und polierten Anschliffen der beiden Betonserien **B-KT2** und **B-KT2-60**. In den Luftporen der beiden Betonserien lagerte sich wiederum AKR-Reaktionsprodukt in Form von Gel an. Die Gefügeuntersuchungen an den Komponenten des Italienischen Trasses I zeigten, dass die vulkanischen Gläser, wie die des Rheinischen Trasses, über die Auslagerungszeit von 360 Tagen einem kontinuierlichen Hydratationsfortschritt unterlagen. So waren nach 360 Tagen wiederum Relikte von vollständig hydratisierten vulkanischen Gläsern zu erkennen. Es stellte sich bei den Gefügeuntersuchungen heraus, dass auch die Gesteinsfragmente des Italienischen Trasses I z.T. eine Hydratation zeigten. Dieser Hydratationsfortschritt der Komponenten deckte sich wiederum mit dem kontinuierlichen Anstieg der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse des Zementsteins über die Auslagerungsdauer von 360 Tagen.

Die mikrochemischen Untersuchungen der AKR-Reaktionsprodukte der Betonproben **B-KT2** und **B-KT2-60** ergaben, dass die Gele einen ähnlichen Chemismus besaßen, wie die Produkte der Betonserien mit Rheinischem Trass. Ein Unterschied bestand jedoch darin, dass die Reaktionsprodukte in den Serien mit Italienischen Trass I reicher an K_2O und ärmer an Na_2O waren, als diejenigen der Serie mit Rheinischem Trass. Entsprechend zeigten die Auslaugungsversuche am reinen Klinkerersatzstoff entsprechend hohe Alkaligehalte mit $Na_2O_{aq} = 4,0$ M.-% und mit einem Auslaugungsvermögen von $\Delta Na_2O_{aq} = 2,77$ M.-%. Die anderen zuvor für den Rheinischen Trass getroffenen Aussagen gelten auch für den Italienischen Trass I.

5.4.4 Der Einfluss von Italienischem Trass II: Serien **M-KT3**, **B-KT3** und **B-KT3-60**

Die beiden italienischen Trasse unterschieden sich im Wesentlichen nur in der Korngröße: Trass II ist deutlich gröber als übliche Klinkerersatzstoffe (und müsste eigentlich eher als Feinsand bezeichnet werden). Ziel der vergleichenden Untersuchungen war es, den Korngrößen einfluss deutlich herauszuarbeiten.

Die Serien mit Italienischem Trass II zeigten in der Dehnung eine starke Abhängigkeit von der Temperatur. Während die bei 40 °C gelagerte Mörtelserie **M-KT3** und die Betonserie **B-KT3** über die gesamte Auslagerungszeit von 360 Tagen eine nur geringe Tendenz zur Dehnungen zeigten, wies die bei 60 °C gelagerte Betonserie **B-KT3-60** nach der Auslagerungszeit von 180 Tagen eine Dehnung auf, die über derjenigen der **B-KT2-60** Serie lag. Die geringen Dehnungsraten von **M-KT3** und **B-KT3** korrelierten gut mit den Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und polierten Anschliffen der beiden Serien. Mikroskopisch konnten keinerlei AKR-Schadensbilder beobachtet werden. Die mikrochemischen Untersuchungen des Zementsteins zeigten an, dass es nur zu einer mäßigen Reaktion des Trasses im Zementstein kam. Die Si/Ca-Verhältnisse in den C-S-H-Phasen waren am geringsten von allen Proben mit Klinkerersatzstoffen, während das Al/Ca-Verhältnis in etwa dem der hüttensandhaltigen Serie entsprach. Trotzdem zeigten die bei 40 °C gelagerten Mörtel- und Betonproben eine nur geringe Dehnung, während die bei 60 °C gelagerten Betonproben (**B-KT3-60**) sogar etwas höhere Dehnbeträge aufwiesen als die Serie ORK-B-KT2. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der 40 °C Auslagerung zum einen durch die Verwendung des Puzzolans der Alkaligehalt insgesamt verdünnt wurde, zum anderen möglicherweise ein Teil der Alkalien in der Porenlösung an den nichtreagierten Trasspartikeln adsorbiert wurde und somit die AKR-Gelbildung hemmte. Bei der Auslagerung bei 60 °C könnte es zu einer Abgabe sorbierter Alkalien an die Porenlösung gekommen sein und zu einer verstärkten Reaktion reaktiver Trasskomponenten, was letztendlich eine AKR in den Proben förderte.

Die Reaktionsprodukte der Serie **B-KT3-60** wiesen einen anderen Chemismus auf, als die Produkte in den Betonserien mit den beiden anderen Trassen. Grundsätzlich waren die Alkaligehalte geringer, dafür die Calciumgehalte wesentlich höher, ähnlich denjenigen der Serie mit reinem Portlandzement. Dies deutet eher auf die oben ausgeführte Vermutung einer Freisetzung von an Trasspartikeln sorbierten Alkalien in die Porenlösung aufgrund der höheren Temperatur hin. Wie die Untersuchung der C-S-H-Phasenzusammensetzung der 60 °C gelagerten Betonproben zeigten, haben sich im Vergleich zu der bei 40 °C gelagerten Mörtelserie **M-KT3** die Elementverhältnisse nur unwesentlich verändert, was eine erhöhte Reaktivität von Italienischem Trass II bei 60 °C in der Betonserie eher unwahrscheinlich macht. Und dies trifft zu obwohl der Italienische Trass II beim Auslaugungsversuch ein ähnlich hohes potentielles Alkaliauslaugungsvermögen aufwies wie der Italienische Trass I.

Der Hauptunterschied in den beiden Italienischen Trassen liegt weniger in der stofflichen Zusammensetzung als mehr in der Partikelgrößenverteilung. Wie in Tabelle 10 aufgeführt, war die spezifische Oberfläche des Italienischen Trasses II wesentlich geringer als die des Italienischen Trasses I. Gleichzeitig lagen die Partikelgrößen bei wesentlich höheren Werten als die-

jenige des anderen Trasses. Dies wurde auch mikroskopisch am REM durch Untersuchung der reinen Trasse bestätigt. Was die REM-Untersuchungen weiterhin zeigten, war das innere Gefüge der Italienischen Trasse. Beide Varietäten waren sehr inhomogen und zeigten einen hohen Anteil an Multiphasenagglomerationen und Glaspartikel mit Alterationssaum, die vermutlich dadurch entstand, dass das Glas postmagmatisch in Tonminerale bzw. Zeolithe umgewandelt wurden (Abb. 90). Diese Beobachtungen deuten mit den anderen Ergebnissen darauf hin, dass der grobkörnigere Italienische Trass II zwar eine geringere Reaktivität im Zementstein besitzt, aber aufgrund der nichtreagierten Trasspartikel dennoch eher in der Lage ist Alkalien aus der Porenlösung (z.B. an den noch vorhandenen Tonmineralen und Zeolithen) zu adsorbieren und somit einer AKR entgegenzuwirken. Erst bei weiterer Temperaturerhöhung bei der Prüfung bei 60 °C kommt es zur Freisetzung der Alkalien in die Porenlösung, z.T. durch Desorption und sicherlich auch z.T. durch die Auflösung weiterer Tonmineral- und Zeolithphasen.

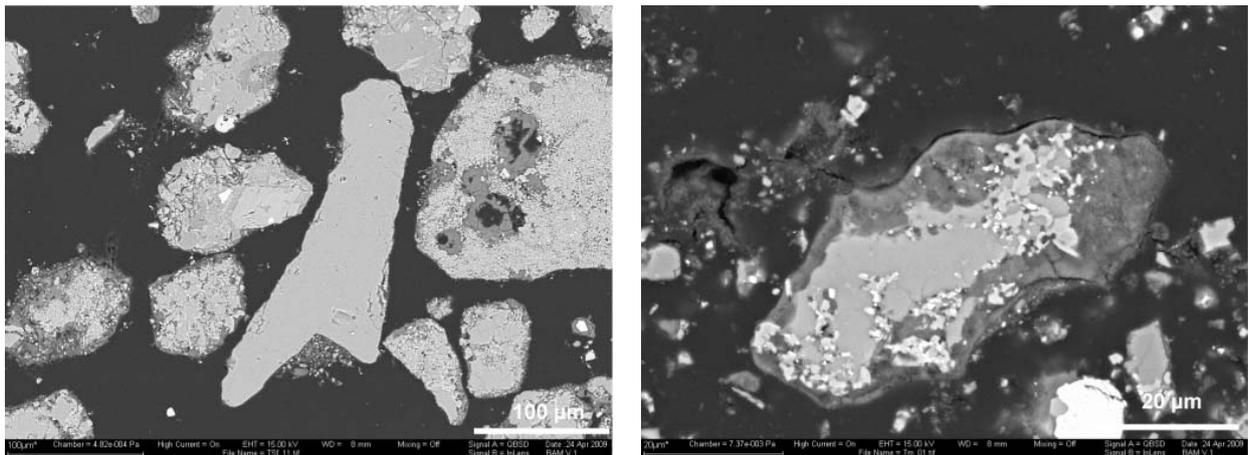


Abb. 90 Italienischer Trass II: Sehr inhomogene Partikel (links) und teilweise alterierter und in Tonmineral/Zeolithen umgewandelter Glaspartikel (rechts). Polierter Anschliff, REM-BSE.

5.5 Schlussfolgerungen

Wie die Ergebnisse eindeutig zeigten, wurde die zu Anfangs erstellte Arbeitshypothese (s. Kap. 1.3) in folgenden Punkten bestätigt:

- Der Einsatz natürlicher vulkanischer Puzzolane führt maßgeblich zu einer Änderung der C-S-H-Phasenchemie, wie dies auch durch den Einsatz industrieller Puzzolane bzw. latent-hydraulischer Stoffe bekannt ist. Da vulkanische Gläser und reaktive Phasen (z.B. Tonminerale und Zeolithe) in den meisten Fällen einen recht hohen Aluminiumgehalt aufweisen (i.d.R. > 10 Masse-%), kann dies zu einem Aluminiumeinbau und einer entsprechenden Erhöhung des Si/Ca-Verhältnisses in den C-S-H-Phasen führen und eine mögliche Alkalibindung an den C-S-H-Phasen ermöglichen. Ein daraus resultierender reduzierter Alkaligehalt in der Porenlösung eines Zementsteins würde damit auch das Risiko einer AKR senken.
- Demgegenüber steht der in den natürlichen Puzzolanen vulkanischen Ursprungs vorhandene z.T. hohe Alkaligehalt. Dieser ist zum einen an Mineralphasen gebunden, die selbst unter alkalischen Bedingungen als verhältnismäßig stabil gelten (z.B. Feldspäte, Foide, Augit). Zum anderen ist er jedoch an Glasphasen und weniger stabile Mineralphasen (z.B. Tonminerale, Zeolithe) gebunden, die in alkalischer Umgebung leicht angelöst werden können. Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass es tatsächlich zu einer Erhöhung der Alkaligehalte in den Reaktionsprodukten in den Betonserien mit reaktivem Trass kommen kann war, was

auf einen zusätzlichen Alkalieintrag aus den Trassen hindeutet. Besonders deutlich konnte dies anhand des Natriumgehalts in den Reaktionsprodukten der Betone mit Rheinischem und Italienischem Trass I dokumentiert werden. Hier war eine deutliche Erhöhung der Natriumgehalte in den jeweiligen Reaktionsprodukten zu verzeichnen, im Gegensatz zu denjenigen der Betonserie mit reinem Portlandzement.

Generell kommen auch die Gesteinskörnungen als Alkalilieferanten in Betracht. Da bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion die Körner teilweise angelöst werden, kommt es bei alkalihaltiger Gesteinskörnung zu einem entsprechenden zusätzlichen Eintrag von Natrium und/oder Kalium in die Porenlösung. Besonders vulkanische Gesteine mit höherem Glasanteil in der Gesteinsmatrix oder Sedimente mit entsprechenden Anteilen an alkalihaltigen Tonmineralen sind hier von Bedeutung. Es ist außerdem noch nicht abschließend geklärt, wie reaktiv vermeintlich in alkalischer Umgebung „stabile“ alkalihaltige Mineralphasen, wie Feldspäte oder Glimmer, nicht doch reagieren und Alkalien freisetzen können. Bei den beschriebenen Versuchen wurde jedoch immer die gleiche Gesteinskörnung verwendet, so dass dieser Effekt keine signifikante Rolle spielt.

Die Versuchsergebnisse zeigten auch einen erheblichen Einfluss der physikalischen Parameter der Klinkerersatzstoffe, wie Partikelgrößenverteilung und spezifische Oberfläche, auf deren Reaktivität im Zementstein und deren Einfluss auf eine AKR. Obwohl die beiden Italienischen Trasse die gleiche stoffliche Zusammensetzung aufwiesen zeigten sie aufgrund der unterschiedlichen physikalischen Kenngrößen ein absolut unterschiedliches Verhalten in den Versuchen. Hinzu kommt, dass beide Puzzolane in übersättigter Ca(OH)_2 -Lösung ungefähr das gleiche Alkaliauslaugungspotential besaßen (ASTM-Versuch). Dies zeigt, dass unter Umständen die Klinkerersatzstoffe im Zementstein sich anders verhalten als in einem Überschuss an Lösung.

Weiterhin zeigten die Versuche mit den Mörtel- und Betonserien mit dem grobkörnigen Italienischem Trass II, dass die Auslagerungstemperatur eine entscheidende Rolle bezüglich des Alkalihaushalts der Porenlösung und der Wirkung des Puzzolans auf eine AKR spielt. Dass bei den Versuchen bei 40 °C keine Dehnung, bei 60 °C jedoch eine Dehnung festgestellt wurde, zeigt dass eine Betonperformanceprüfung, die bei 60 °C durchgeführt würde, im Fall von grobkörnigen Puzzolanen wie dem Italienischem Trass II unter Umständen ein falsches Ergebnis liefert.

Die Ergebnisse zeigten, dass natürliche Puzzolane vulkanischen Ursprungs durchaus durch eine Alkalifreisetzung zu einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion beitragen können. Die Reaktivität der einzelnen im Trass enthaltenen Mineralphasen hat darauf einen entscheidenden Einfluss. Weiterhin ist bei natürlichen Puzzolanen die eigene Alkalibindfähigkeit zu hinterfragen, wenn wegen geringerer Reaktivität im Zementstein verhältnismäßig viele Puzzolankomponenten noch intakt vorliegen. Dies könnte auch Konsequenzen für die langfristige Dauerhaftigkeit eines Betons besitzen, da nicht sicher abgeschätzt werden kann, inwieweit ein weniger reaktives Puzzolan über Jahrzehnte nicht doch reagiert und die eventuell gebundenen, sowie die eigenen Alkalien an die Porenlösung abgibt und somit bedeutend zu einer AKR beiträgt.

6 Zusammenfassung und Ausblicke

6.1 Zusammenfassung

Die Referenz Mörtel- und Betonserien (M-K, B-K und B-K-60) zeigten, wie erwartet, nach dem Ende der Auslagerungszeit eine durch die AKR hervorgerufene Gefügeschädigung in Form von Rissen an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen. Es traten außerdem gelförmige Reaktionsprodukte in den Luftporen auf. Die Mörtelprismen und Betonserien zeigten dabei ein unterschiedliches Dehnungsverhalten, das mit dem Pufferungseffekt der Feinfraktion der Mörtelprismen erklärt werden kann [65]. Die mikrochemischen Untersuchungen ergaben, dass die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse über die gesamte Auslagerungsdauer nahezu konstant blieben.

Die hüttensandhaltige Mörtelserie (M-KH) erwies sich wie erwartet als AKR-hemmend. So konnten in den Gefügeuntersuchungen keine durch eine AKR induzierten Risse an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und in dem Zementstein beobachtet werden. Die Gefügeuntersuchungen ergaben, dass die Hüttensandgläser nach 360 Tagen teilweise vollständig hydratisiert waren. Die AKR-hemmende Wirkung konnte einer Absenkung des pH-Werts und dem Al-Einbau in den C-S-H-Phasen zugeschrieben werden. Die mikrochemischen Untersuchungen ergaben, dass es über die Auslagerungszeit von 360 Tagen zu einem Anstieg der Al/Ca-Verhältnisse gekommen ist. Dieser Einbau führte zu einer Bindung der Alkalien an den C-S-H-Phasen und somit zu einer Erniedrigung des Alkalireservoirs im System. Im Weiteren wies der Hüttensand von allen Zusatzstoffen das geringste initiale $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ auf und zeigte im Auslaugungstest die geringste Auslaugung. Somit kam es zu keinem wesentlichen Eintrag von Alkalien in die Porenlösung.

Die Auslagerungsversuche der flugaschehaltigen Mörtelserien (M-KF) ergaben, dass keine durch AKR hervorgerufenen Schäden in den Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und polierten Anschliffen zu finden waren. Im Weiteren zeigten die Gefügeuntersuchungen an den Flugaschepartikeln, dass keine Zunahme des Hydratationssaumes wie bei den Hüttensandgläsern zu erkennen war. Jedoch lagen nach den ersten 28 Tagen der Auslagerungszeit die Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse über denjenigen der Referenzserie und der hüttensandhaltigen Serie. Dies korreliert mit den mikrochemischen Untersuchungen, die zeigten, dass der Anstieg der Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse über die gesamte Auslagerungsdauer gering war. Dies bedeutet, dass die Flugasche schon von Beginn an reagierte und somit ein Al-Einbau in die C-S-H-Phasen stattfand, was zu einer Adsorption von Alkalien führte. Bei den Auslaugungsversuchen wies die Flugasche das zweitgeringste initiale $\text{Na}_2\text{O}_{\text{aq}}$ und Auslaugung aller Zusatzstoffe auf. Somit erhöht die Flugasche das Alkalireservoir nur geringfügig.

Die trasshaltigen Probeserien bestätigten teilweise die Arbeitshypothese, dass das natürliche Puzzolan Trass die C-S-H-Phasenchemie in ähnlicher Weise beeinflusst wie Flugasche. Die mikrochemischen Untersuchungen der trasshaltigen Proben ergaben, dass es zu einer starken Erhöhung des Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisses in den Hydratphasen über die gesamte Auslagerungszeit von 360 Tagen und dabei zu einem Al-Einbau in den C-S-H-Phasen kam. Doch die Auslaugungsversuche ergaben, dass alle Trasse einen hohen initialen Alkaligehalt ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) besitzen und auch in der Lage sind, diese an die Porenlösungen abzugeben. Diese Tatsache deckte sich mit den Beobachtungen der Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen und Anschliffen der Rheinisch-trasshaltigen und Italienisch I trasshaltigen Mörtelprismen- und Betonserien. Diese wiesen nach 360 Tagen Auslagerungszeit die typischen AKR Schäden in Form von Rissen an den alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und in der Zementsteinmatrix auf. Die Probeserien mit dem Italienischen Trass II als Zusatzstoff zeigten bei den 40 °C Versuchen im Vergleich zu den anderen trasshaltigen Serien keine Tendenz zur Dehnung. Dies deckte sich

mit den Gefügeuntersuchungen, bei welchen keine durch eine AKR induzierte Schädigung und AKR-Reaktionsproduktbildung zu erkennen waren.

Das unterschiedliche Dehnungsverhalten der Italienischen Trasse kann damit begründet werden, dass diese trotz gleicher mineralogischer Zusammensetzung unterschiedliche Korngrößenverteilung besitzen. Der Italienische Trass II wies eine größere Korngröße und eine kleinere spezifische Oberfläche als der Italienische Trass I auf. Der italienische Trass I besaß deshalb eine größere spezifische Oberfläche und folglich auch eine höhere Reaktivität. Der Unterschied in der Reaktivität spiegelte sich auch in den unterschiedlichen Al/Ca-Verhältnissen nach 360 Tagen wieder. Die Serie mit dem Italienischen Trass I wies deutlich höhere Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse auf als die Serie mit dem Italienischen Trass II.

Die mikrochemischen Untersuchungen aller trasshaltigen Serien zeigten übereinstimmend, dass im Vergleich zur Flugasche die Si/Ca- und Al/Ca- Verhältnisse nach den ersten 28 Tagen Auslagerung geringer waren und eher den Verhältnissen der Referenzserie ohne Klinkererersatzstoffe entsprachen. Danach war bei allen trasshaltigen Serien ein langsames Ansteigen der Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse bis zu 360 Tagen im Vergleich zur Flugasche beobachtbar. Dies bedeutet, dass Trass im Vergleich zur Flugasche nur langsam im zementgebundenen System reagiert. Diese Beobachtungen wurden durch die Gefügeuntersuchungen an den polierten Anschliffen der Rheinischen und Italienisch-I-trasshaltigen Proben bestätigt, bei welchen die vulkanischen Gläser eine kontinuierliche Hydratation zeigten und teils nach 360 Tagen vollständig aufgelöst waren. Bei den Rheinisch und Italienisch-I-trasshaltigen Serien zeigte sich, dass die Änderungen der Si/Ca-Verhältnisse im Vergleich zu den Änderungen der Al/Ca-Verhältnisse während der ersten 180 Tage geringer waren. Dies könnte damit begründet werden, dass die ebenfalls aluminiumhaltigen Zeolithe schneller reagieren als die vulkanischen Glaskomponenten.

Die gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der Rheinischen und der Italienisch-I-haltigen Betonproben wiesen im Vergleich zur Referenzserie höhere SiO₂- und Alkaligehalte und tiefere CaO-Gehalte auf. Die höheren Alkaligehalte deckten sich mit den Auslaugungsversuchen, bei welchen sich zeigte, dass die untersuchten Trasse die höchste initialen Na₂O-Äquivalente besaßen und die höchsten Alkaliauslaugungspotential zeigten.

Bei den 60 °C Auslagerungsversuchen zeigte sich, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Si/Ca- und Al/Ca-Verhältnisse der C-S-H-Phasen und den Chemismus der gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte hatte. So waren im Vergleich zur Auslagerung bei 40 °C an Zementsteinen mit den Zusatzstoffen Flugasche und Rheinischer Trass höhere Al/Ca- und Si/Ca-Verhältnisse feststellbar. Die gelförmigen AKR-Reaktionsprodukte der 60 °C Lagerung wiesen tiefere Alkalien- und SiO₂-Gehalte auf, hatten aber höhere CaO-Gehalte.

6.2 Ausblick

Die Wirkung natürlicher Puzzolane bezüglich einer AKR kann im Allgemeinen und bei denjenigen vulkanischen Ursprungs im Besonderen, nur schwer vorausgesagt werden. Dies ist in der teilweise komplexen stofflichen Zusammensetzung und der Abhängigkeit von der Korngröße der Materialien begründet. Eine Bestimmung des wirksamen Alkaligehalts für diese Stoffgruppe im Zementssystem scheint, aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens, nicht generell möglich zu sein. In den Regelwerken, wie der Alkalirichtlinie des DAfStb, sind Hinweise zu Flugasche (Alkaligehalt der Flugasche muss nicht angerechnet werden) und Höchstmengen für den **wirksamen Alkaligehalt** anderer Betonzusatzstoffe (600 g/m³) angegeben. Wie es am Beispiel der beiden Italienischen Trasse I und II jedoch deutlich geworden ist, können natürliche Puzzolane bei gleicher stofflicher Zusammensetzung (auch bei ungefähr gleichem Natriumäquivalent)

korngrößenbedingt ein unterschiedliches Verhalten aufweisen. Auslaugungsprüfungen an den reinen Klinkerersatzstoffen in Kontakt mit einer Calciumhydroxidlösung im Überschuss (z.B. nach ASTM C311) erbringen daher ebenfalls nicht immer sichere Erkenntnisse bezüglich des Verhaltens eines Puzzolans im Zementstein mit nur einer begrenzten Menge an Porenlösung.

Zum jetzigen Zeitpunkt wäre es deshalb eher sinnvoll, dass jedes natürliche Puzzolan ab einem bestimmten Gesamtalkaligehalt (z.B. > 1,5 Masse-%) einer Performance-Prüfung unterzogen wird, um zu testen ob dessen Einsatz in einem Beton eine AKR hemmen oder begünstigen kann. Da gezeigt wurde, dass eine Prüfung bei 60 °C zu unrealistischen Ergebnissen führen kann, ist deshalb eine Performance-Prüfung bei 40 °C, trotz der längeren Auslagerungsdauer, vorzuziehen. Zukünftige Entwicklungen sollten darauf abzielen ein geeignetes Schnellprüfverfahren zu entwickeln, welches eine realistische Beurteilung des Verhaltens eines natürlichen Puzzolans im Beton erlaubt.

Noch nicht abschließend differenziert werden konnte, welche Rolle die einzelnen Bestandteile von Trass im zementgebundenen System gegenüber einer möglichen AKR spielen (z.B. vulkanisches Glas und Tonminerale aber auch eher stabile Minerale wie Foide und Feldspäte). Ebenso ist ungeklärt wie die einzelnen Bestandteile im Zementssystem reagieren und welche Hydratphasen sie bilden können. Daher sollten zukünftige Arbeiten der Frage nachgehen, welche Rolle die einzelnen Bestandteile in Bezug auf das Verhalten im zementgebundenen System spielen.

7 Literatur

- [1] Stark, J., Wicht, B., *Dauerhaftigkeit von Beton*. 2001, Basel, Switzerland: Birkhäuser Verlag. 340.
- [2] Holcim, *Betonpraxis - Der Weg zu dauerhaften Beton*. 2. Auflage 2009 ed. 2009: Holcim (Deutschland) AG.
- [3] DIN EN 206-1, *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, in *Europäische Norm*. 2001, Beuth Verlag: Berlin.
- [4] Merz, C., Hunkeler, F. und Griesser, A., *Schäden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, 2006. **599**: p. 150.
- [5] Seyfarth, K., Giebson, C. and Stark, J., *AKR-Performance-Prüfung für Fahrbahndecken aus Beton: Erfahrungen aus Labor und Praxis im Vergleich*, in *17. Internationale Baustofftagung 23.-26. Sept. 2009* 2009, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar.
- [6] Müller, U., Bürgisser, P., Weise, F. and Meng, B., *The natural pozzolana Rhenish Trass and its effects on ASR in concrete*, in *6th. International Conference on Concrete Under Severe Conditions, Environment and Loading (CONSEC'10)*. In Press. 2010: Merida, Yucatan, Mexico.
- [7] Massazza, F., *Pozzolanic cements*. Cement and Concrete Composites, 1993. **15**(4): p. 185-214.
- [8] Ekolu, S.O., Hooton, R.D. and Thomas, M.D.A., *Studies on Ugandan volcanic ash and tuff*, in *Advances in Engineering and Technology*. 2006, Mwakali, J.A. Taban-Wani, G.: Entebbe, Uganda.
- [9] Böhm, M., Baetzner, S., *The effect of the alkalinity of the pore solution on asr*. *13th ICAAR Trondheim*. 2008. Trondheim Norway: Broekmans, Maarten. A.T.M., Wigum, Borge Johannes
- [10] Schäfer, E., *Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins; Dissertation*. 2004.
- [11] Schmidt, K., et al., *prevention of asr with supplementary cementitious materials - long term pore solution investigation*. in *13th ICAAR Trondheim 2008*. 2008. Trondheim Norway: Broekmans, Maarten. A.T.M. Wigum, Borge, J.
- [12] Schäfer, E., *Alkalität der Porenlösung - Alkalibindung durch Zementbestandteile*. *41. DAfStb Forschungskolloquium*. 2002. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e. V.
- [13] Gudmundsson, G., Olafsson, H., *Alkali-silica reactions and silica fume: 20 years of experience in Iceland*. Cement and Concrete Research, 1999. **29**(8): p. 1289-1297.
- [14] Gudmundsson, G., Olafsson, H., *Silica fume to enhance concrete quality, icelandic experience concerning alkali-silica reactions*. in *Durability of exposed concrete containing secondary cementitious materials*. 2001. Hirtshals, Denmark: The Nordic Concrete Federation.
- [15] Mackenzie, F.T., *Quartz: synthesis at earth-surface conditions*. Science, 1971. **173**: p. 533-535.
- [16] Richardson, I.G., *The nature of the hydration products in hardened cement pastes*. Cement and Concrete Composites, 2000. **22**(2): p. 97-113.
- [17] Richardson, I.G., *The calcium silicate hydrates*. Cement and Concrete Research, 2008. **38**(2): p. 137-158.

- [18] Richardson, I.G., *The nature of C-S-H in hardened cements*. Cement and Concrete Research, 1999. **29**(8): p. 1131-1147.
- [19] Richardson, I.G., *Tobermorite/jennite- and tobermorite/calcium hydroxide-based models for the structure of C-S-H: applicability to hardened pastes of tricalcium silicate, [beta]-dicalcium silicate, Portland cement, and blends of Portland cement with blast-furnace slag, metakaolin, or silica fume*. Cement and Concrete Research, 2004. **34**(9): p. 1733-1777.
- [20] Hong, S.-Y., *Alkali binding in cement pastes Part I. The C-S-H phase*. Cement & Concrete Research, 1999. **29**: p. 1893-1903.
- [21] Hong, S.-Y., *Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels Part II. Role of alumina*. Cement & Concrete Research, 2002. **32**: p. 1101-1111.
- [22] DAfStb, *DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie); Teil 1-3*, D.A.f. Stahlbeton-DAfStb DIN Deutsches Institut für Normierung e.V, Editors. 2007.
- [23] Stanton, T.E., *Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*. Proceedings American Society of civil engineers, 1940: p. 1781-1811.
- [24] Locher, F.W., Sprung, S., *Ursache und Wirkung der Alkalienreaktion Teil II*. Betontechnische Berichte, 1973. **8/73**: p. 349-353.
- [25] Locher, F.W., Sprung, S., *Ursache und Wirkung der Alkalienreaktion Teil I*. Betontechnische Berichte, 1973. **8/73**: p. 303-306.
- [26] Verband der Schweizerischen Zementindustrie, *Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz: Stand des Wissens, Neue experimentelle Erkenntnisse, Empfehlungen für Neubauten; Ausgabe November 2005*. 2005: Bern 2005.
- [27] Ben Hana, M., *Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by semimange analysis*. EFPL-Diss, 2006.
- [28] Dent Glasser, L.S., *The chemistry of "alkali-aggregate" reaction*. Cement and Concrete Research, 1981. **11**: p. 1-9.
- [29] Locher, F.W., *Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton*. Zement-Kalk-Gips, 1975. **28**: p. 162-169.
- [30] Sprung, S., Sylla, H-M., *Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen*. ZKG International, 1998. **51**(6): p. 334-346.
- [31] Chatterji, S., *Some fundamental Aspect of Alkali-Silica Reaction*. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Proceedings 11th International Conference Québec, 2000: p. 21-29.
- [32] Chatterji, S., *Mechanisms of alkali-silica reaction and expansion. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction*. 1989. Kyoto, Japan: Elsevier Applied Science.
- [33] Diamond, S., *Chemistry and other characteristics of ASR gels, 11th international Conference on Alkali-Aggregate Reaction, pp.31-40*. 2000.
- [34] Thomas, M.D., *Microstructural studies of alkali-silica reaction in fly ash concrete*. Fuel and Energy Abstracts, 1996. **37**(3): p. 187.
- [35] Thaulow, N., Jakobsen, H.J., and Clark, B., *Composition of alkali silica gel and ettringite in concrete railroad ties: sem-edx and x-ray diffraction analysis*. Cement & Concrete Research, 1996. **26**(2): p. 309-318.
- [36] Helmuth, R., Stark, D., *Alkali-silica reactivity mechanisms*. Mater Sci Concr, 1992. **3**: p. 131-208.
- [37] Powers, T.C., *An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction: Part 1 - The Chemical Reactions and Mechanisms of Expansion*. Journal of American Ceramic Institute, 1955. **26**: p. 497-516.

- [38] Powers, T.C., *An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction: Part 2: A Hypothesis Concerning Safe and unsafe Reactions with Reactive Silica in Concrete*. Journal of American Concrete Institute, 1955. **26**: p. 785-811.
- [39] Richardson, I.G., Cabrera, J.G., *The nature of C-S-H in model slag-cements*. Cement and Concrete Composites, 2000. **22**(4): p. 259-266.
- [40] DIN EN 197-1, *Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*, in *Deutsche Norm*. 2001, Beuth Verlag: Berlin.
- [41] Hill, S., *Zur direkten Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit präkambrischer Grauwacken aus der Lausitz anhand deren Kieselsäure- und Aluminiumlöseverhalten*, in *Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung*. 2004, Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus: Cottbus, Germany. p. 154.
- [42] Schmidt, K., *AKR in Beton mit Zusatzstoffen - Einfluss der Porenlösungszusammensetzung auf die Schädigung*. 2006. 16. ibausil, Tagungsband, Weimar: p. 2-0443 - 20542.
- [43] Schäfer, E., Meng, B., *Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion*.
- [44] Shehata, M.H., Thomas, M.D.A., *The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction*. Cement and Concrete Research, 2000. **30**(7): p. 1063-1072.
- [45] Shehata, M.H., Thomas, M.D.A., *Use of ternary blends containing silica fume and fly ash to suppress expansion due to alkali-silica reaction in concrete*. Cement and Concrete Research, 2002. **32**(3): p. 341-349.
- [46] Taylor, H.F.W., *Cement Chemistry*. [2nd ed]. 1997: Amer. Society of Civil Engineers. 480 p.
- [47] Hester, D., McNally, C., and Richardson, M., *A study of the influence of slag alkali level on the alkali-silica reactivity of slag concrete*. Construction and Building Materials, 2005. **19**(9): p. 661-665.
- [48] Kwon, Y.-J., *A study on the alkali-aggregate reaction in high-strength concrete with particular respect to the ground granulated blast-furnace slag effect*. Cement and Concrete Research, 2005. **35**(7): p. 1305-1313.
- [49] Maas, Andrew, J, Ideker, J. H., and Juenger, M.C.G., *Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume*. Cement and Concrete Research, 2006, **37**(2): p.166-174.
- [50] Markl, G., *Minerale und Gesteine Mineralogie- Petrologie-Geochemie*. 2008: Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg. 596 S.
- [51] Pfiffner, A.O., *Geologie der Alpen*. Vol. 1. Auflage . 2009, Bern: Haupt Verlag, 359 S.
- [52] Schmincke, H.-U., *Vulkane der Eifel Aufbau, Entstehung und heutige Bedeutung*. 2009, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 160 S.
- [53] Avanzinelli, R., et al., *Potassic and ultrapotassic magmatism in the circum-Tyrrhenian region: Significance of carbonated pelitic vs. pelitic sediment recycling at destructive plate margins*. Lithos, 2009. **113**(1-2): p. 213-227.
- [54] Wilson, M., *Igneous Petrogenesis*. 1989, London (UK): HarperCollinsAcademic. 466.
- [55] Avanzinelli, R., et al., *Constraints on the Genesis of Potassium-rich Italian Volcanic Rocks from U/Th Disequilibrium*. Journal of Petrology, 2008. **49**(2): p. 195-223.
- [56] Liebig, E., Althaus, E., *Pozzolanic Activity of Volcanic Tuff and Suevite: Effects of Calcination*. Cement and Concrete Research, 1998. **28**(4): p. 567-575.
- [57] Schwiete, H.E., Ludwig, U., *Die Bindung des freien Kalks und die bei der Trass Kalk-Reaktion entstehenden Neubildungen* 1961: Lölz und Opladen (Westdeutscher Verlag).

- [58] Ruckensteiner, G., Schwiete, H.E., Ludwig, U., *Über das Verhalten von Bayrischem und Rheinischem Trass in hydraulischen Bindemitteln*. 1972: Opladen (Westdeutscher Verlag).
- [59] Reschke, T., *Untersuchung und Instandsetzung von Wasserbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind*. Beton, 2004. **2004**(1): p. 14-21.
- [60] Locher, *Zement; Grundlagen der Herstellung und Verwendung*. Ausgabe 2000 ed. 2000, Düsseldorf.
- [61] Van Damme, H., *Colloidal chemo-mechanics of cement hydrates and smectite clays: cohesion vs. swelling*, in *Encyclopaedia of Surface and Colloid Science*, P. Somasundaran and A. Hubbart, Editors. 2002, Marcel Decker, Inc.: New York. p. 1087-1103.
- [62] Stade, H., *On the reaction of C-S-H (di, Poly) with alkali hydroxides*. Cement and Concrete Research, 1989. **19**: p. 802-810.
- [63] Shi, C., Day, R.L., *Pozzolanic reaction in the presence of chemical activators: Part II -- Reaction products and mechanism*. Cement and Concrete Research, 2000. **30**(4): p. 607-613.
- [64] Takemoto, K., H. Uchikawa. H., *Hydration of pozzolanic Cement. 7th International Congress on the Chemistry of Cement*. 1980. Paris.
- [65] Scrivener, K.L., *Backscattered electron imaging of cementitious microstructures: understanding and quantification*. Cement and Concrete Composites - Special Issue: Scanning electron microscopy of cements and concretes, 2004. **26**(8): p. 935-945.
- [66] Rayment, D.L., Lachowski, E.E., *The analysis of OPC pastes: A comparison between analytical electron microscopy and electron probe microanalysis*. Cement and Concrete Research, 1984. **14**(1): p. 43-48.
- [67] Ludwig, U., Schwiete, H.E., *Kalkbindung und Neubildung bei den Trass-Kalk-Reaktionen*. Zement-Kalk-Gips, 1963. **10/1963**: p. 421-431.
- [68] Liebig, K., *Gebrannte Tonminerale und Trassmehle als pozzolanische Komponenten in Kalkmörteln*, Fakultät für Bio- und Geowissenschaften der Universität Karlsruhe. 1997. p. 110.
- [69] Liebig, E., Althaus, E., *Kaolinite and montmorillonite as pozzolanic components in lime mortars - untreated and after thermal activation*. ZKG international, 1997. **50**(5): p. 282-290.
- [70] Canham, I., Page, C.L. and Nixon, P.J., *Aspects of the pore solution chemistry of blended cements related to the control of alkali silica reaction*. Cement and Concrete Research, 1987. **17**(5): p. 839-844.
- [71] Siebel, E., Bokern, J., and Sylla, H-M., *Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil (Teil 1)*. Beton, Verlag Bau + Technik, 2001. **12**: p. 693.
- [72] Bakker, R., *Über die Ursache des erhöhten Widerstands von Beton mit Hochofenzement gegen die Alkali-Kieselsäurereaktion und den Sulfatangriff*, Technische Hochschule. 1980: Aachen.
- [73] Mertens, G., et al., *Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity*. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(3): p. 233-240.
- [74] Schmidt, K., et al., *AKR-Performance-Prüfung von flugaschenhaltigen Beton-Einfluss der Temperatur auf die Porenlösung und Möglichkeiten zur zielsicheren Bewertung 17. Internationale Baustofftagung 23.-26. Sept. 2009*, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Weimar.

- [75] AFNOR, *AFNOR P18-454 (2004) Béton: Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali- réaction (essai de performance)*, ed. P. Association Française de Normalisation, France. 2004.
- [76] Oberholster, R.E., *An accelerated method for testing the potential alkali reaction of siliceous aggregates*. Cement and Concrete Research, 1986. **16**: p. 181-189.
- [77] ASTM C1260-05, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*, in *ASTM standards*. 2005, American Society for Testing and Materials.
- [78] 289-02:, A.C., *ASTM C 289-02: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Chemical Method)*. The American Society for Testing and Materials (Hrsg.): Annual book of ASTM standards, 2003. Volume 04.02 Concrete and Aggregates West Conshohocken p. 167-173.
- [79] 227-97a:, A.C., *ASTM C 227-97a: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method)*. The American Society for Testing and Materials (Hrsg.): Annual book of ASTM standards, 2003. Volume 04.02 Concrete and Aggregates West Conshohocken p. 140-144.
- [80] 441-97:, A.C., *ASTM C 441-97: Standard test method for effectiveness of mineral admixtures or groundblast-furnace slag in preventing excessive expansion of concrete due to the Alkali-Silica reaction*. The American Society for Testing and Materials (Hrsg.): Annual book of ASTM standards., 2003. Volume 04.02 Concrete and Aggregates West Conshohocken: p. 237-239.
- [81] 1260-01, A.C., *ASTM C 1260-01: Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates. (Mortar-Bar Method)*. The American Society for Testing and Materials (Hrsg.): Annual book of ASTM standards., 2003. Volume 04.02 Concrete and Aggregates West Conshohocken: p. 681-685.
- [82] 1293-01:, A.C., *ASTM C 1293-01: Standard Test Method for Concrete Aggregates by Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction*. The American Society for Testing and Materials Annual book of ASTM standards., 2003. Volume 04.02 Concrete and Aggregates West Conshohocken: p. 686-691.
- [83] Wigum, B.J., *Alkali-Aggregate Reaction in Concrete; Properties, Classification and Testing of Norwegian Cataclastic Rocks*, in *The Norwegian Institute of Technology Department of Geology and Mineral Resources Engineering*. 1995, University of Trondheim: Trondheim. p. 226.
- [84] Fischer, H., Hauber, L., und O. Wittmann, O., *Geologischer Atlas der Schweiz 1:25000; 1047 Basel (Atlas Blatt)*, ed. S.G. Kommission und B.f. Landestopographie. 1971.
- [85] Öttl, C., *Die schädigende Alkalireaktion von gebrochener Oberrhein-Gesteinskörnung im Beton, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften*. 2004, Universität Stuttgart: Stuttgart. p. 122.
- [86] *DAfStb-Richtlinie - Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton*. 2001, Beuth Verlag: Berlin.
- [87] ASTM, *ASTM C311-Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolanas for Use in Portland-Cement Concrete*. ASTM International Annual Book of ASTM Standard, Section 4 Construction, 2003. 04.02 Concrete and Aggregates.
- [88] Gollop, R.S., Taylor, H.F.W., *Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack. I. Ordinary portland cement paste*. Cement and Concrete Research, 1992. **22**: p. 1027-1038.
- [89] Rayment, D.L., Majumdar, A.J., *The composition of the C-S-H phases in Portland cement pastes*. Cement and Concrete Research, 1982. **12**: p. 753-764.

- [90] Locher, F.W., S. Sprung, S., *Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion*. Beton-technische Berichte, 1973..
- [91] Cyr, M., Rivard, P., and Labrecque, F., *Reduction of ASR-expansion using powders ground from various sources of reactive aggregates*. Cement and Concrete Composites, 2009. **31**(7): p. 438-446.
- [92] Multon, S., Sellier, A., and Cyr, M., *Chemo-mechanical modelling for prediction of alkali silica reaction (ASR) expansion*. Cement and Concrete Research, 2009. **39**(6): p. 490-500.
- [93] Rogers, C.A., Hooton, R.D., *Leaching of alkalis in alkali-aggregate reaction testing*. 8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction. 1989. Kyoto, Japan: Elsevier Applied Science.
- [94] Rayment, P.L., *The effect of pulverised-fuel ash on the c/s molar ratio and alkali content of calcium silicate hydrates in cement*. Cement and Concrete Research, 1982. **12**(2): p. 133-140.
- [95] Poon, C.S., et al., *A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes*. Construction and Building Materials, 1999. **13**(8): p. 427-432.
- [96] Perraki, T., Kakali, G., and Kontoleon, F., *The effect of natural zeolites on the early hydration of Portland cement*. Microporous and Mesoporous Materials, 2003. **61**(1-3): p. 205-212.

8 Anhang

Tabelle A1 Längenänderung Mörtelschnelltest nach der Alkalirichtlinie des DAfStb Teil 3 [86]

	Tage	1	5	7	14	28	35	42	49	56	63	72
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹										
NA-Zement		0.00	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00
Referenz		0.00	-0.03	-0.02	0	0.02	0.04	0.05	0.07	0.07	0.09	0.11
Flugasche		0.00	-0.03	0.01	-0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
Hüttensand		0.00	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12
Rhein. Trass		0.00	0.00	-0.02	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.11	0.11
Ital. Trass I		0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Ital. Trass II		0.00	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02

	Tage	91	118	148	180	220	240	270	300	330	360
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹									
NA-Zement		-0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Referenz		0.15	0.16	0.15	0.15	0.20	0.25	0.26	0.28	0.29	0.30
Flugasche		0.05	0.08	0.06	0.08	0.12	0.15	0.18	0.21	0.23	0.24
Hüttensand		0.12	0.15	0.14	0.14	0.16	0.21	0.23	0.25	0.25	0.26
Rhein. Trass		0.16	0.25	0.31	0.36	0.42	0.51	0.52	0.53	0.56	0.58
Ital. Trass I		0.12	0.16	0.2	0.24	0.32	0.35	0.37	0.39	0.39	0.43
Ital. Trass II		0.04	0.05	0.05	0.066	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08

¹ Mittelwert aus 3 Messungen

Abbildungen B Korngrößenverteilung der Zusatzstoffe

B1.1 Korngrößenverteilung Zement CEM I 42,5 R NA

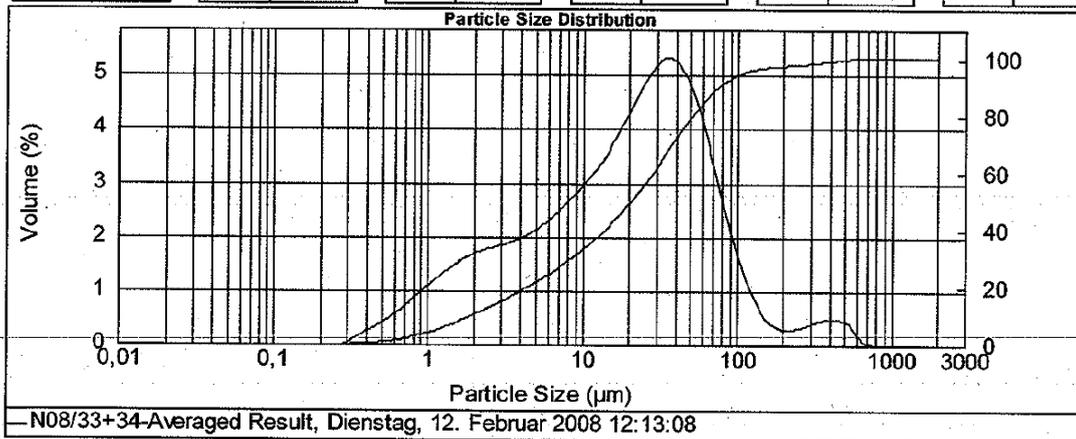
d(0.1): 1,928 µm

d(0.5): 20,869 µm

d(0.9): 77,547 µm

D(0,97) : 176,52 µm

Size (µm)	Vol Under %										
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	4,68	11,482	35,60	120,226	95,45	1258,925	100,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	5,61	13,183	38,51	138,038	96,23	1445,440	100,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	7,05	15,136	41,65	158,489	96,73	1659,587	100,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,650	8,42	17,378	46,05	181,970	97,07	1905,461	100,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	9,97	19,953	48,74	208,930	97,33	2187,762	100,00
0,020	0,00	0,209	0,00	2,188	11,40	22,909	52,73	239,883	97,58	2511,886	100,00
0,023	0,00	0,240	0,00	2,512	12,98	26,303	57,03	275,423	97,86	2884,032	100,00
0,026	0,00	0,275	0,00	2,894	14,61	30,200	61,59	316,228	98,19	3311,311	100,00
0,030	0,00	0,316	0,01	3,311	16,23	34,674	66,33	363,078	98,58	3801,894	100,00
0,035	0,00	0,363	0,14	3,802	18,00	39,811	71,12	416,869	99,00	4365,158	100,00
0,040	0,00	0,417	0,33	4,365	19,79	45,709	75,81	478,630	99,42	5011,872	100,00
0,046	0,00	0,479	0,61	5,012	21,65	52,481	80,21	549,541	99,79	5754,399	100,00
0,052	0,00	0,550	0,99	5,754	23,61	60,256	84,19	630,957	99,96	6605,934	100,00
0,060	0,00	0,631	1,48	6,607	25,71	69,183	87,62	724,436	100,00	7585,776	100,00
0,069	0,00	0,724	2,08	7,596	27,94	79,433	90,45	831,764	100,00	8709,636	100,00
0,079	0,00	0,832	2,82	8,710	30,33	91,201	92,66	954,933	100,00	10000,000	100,00
0,091	0,00	0,955	3,68	10,000	32,87	104,713	94,30	1006,478	100,00		



Anhang B 1.2 Korngrößenverteilung Flugasche

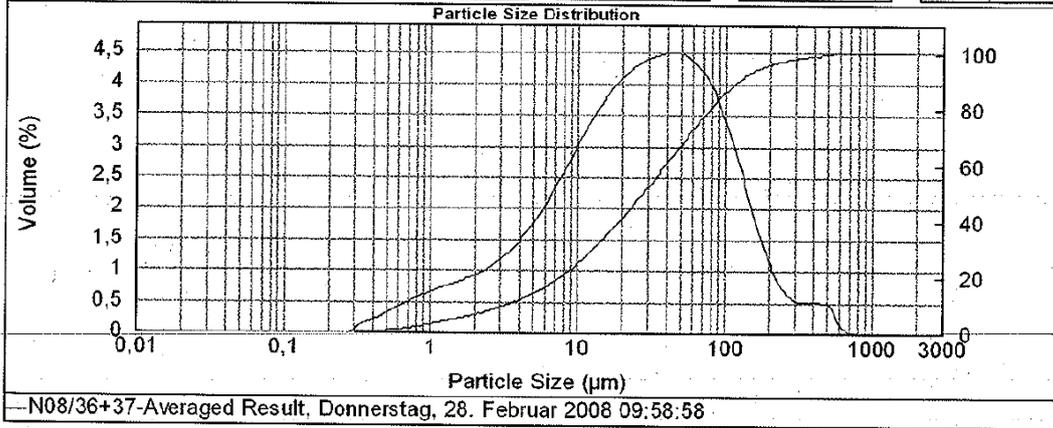
d(0.1): 3,374 µm

d(0.5): 28,084 µm

d(0.9): 125,154 µm

D(0,97) : 242,49 µm

Size (µm)	Vol Under %										
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	3,21	11,482	27,21	120,226	89,27	1259,925	100,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	3,85	13,183	30,25	138,038	91,63	1445,440	100,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	4,55	15,136	33,51	158,489	93,55	1659,587	100,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,660	5,28	17,378	36,95	181,970	95,04	1905,461	100,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	6,06	19,953	40,56	208,930	96,14	2187,762	100,00
0,020	0,00	0,209	0,00	2,188	6,89	22,909	44,30	238,883	96,95	2511,886	100,00
0,023	0,00	0,240	0,00	2,512	7,79	26,303	48,15	275,423	97,54	2884,032	100,00
0,026	0,00	0,275	0,00	2,884	8,77	30,200	52,07	316,228	98,03	3311,311	100,00
0,030	0,00	0,316	0,01	3,311	9,84	34,674	56,06	363,078	98,47	3801,894	100,00
0,036	0,00	0,363	0,13	3,802	11,04	39,811	60,09	416,869	98,82	4365,158	100,00
0,040	0,00	0,417	0,30	4,365	12,37	45,709	64,15	478,630	99,36	5011,872	100,00
0,046	0,00	0,479	0,52	5,012	13,86	52,481	68,19	548,541	99,78	5754,399	100,00
0,052	0,00	0,550	0,82	5,754	15,53	60,256	72,19	630,957	99,66	6606,934	100,00
0,060	0,00	0,631	1,17	6,607	17,41	69,183	76,09	724,436	100,00	7585,776	100,00
0,069	0,00	0,724	1,58	7,586	19,50	79,433	79,82	831,764	100,00	8709,636	100,00
0,079	0,00	0,832	2,07	8,710	21,83	91,201	83,30	954,933	100,00	10000,000	100,00
0,091	0,00	0,955	2,61	10,000	24,40	104,713	86,48	1090,476	100,00		



B1.3 Korngrößenverteilung Hüttensand

d(0.1): 1,773 μm

d(0.5): 11,226 μm

d(0.9): 32,103 μm

D(0,97) : 46,14 μm

Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %	Size (μm)	Vol Under %
0.010	0,00	0.105	0,00	1.095	5,78	11.482	50,86	120.226	100,00	1258,925	100,00
0.011	0,00	0.120	0,00	1.259	6,87	13.183	56,33	138.038	100,00	1445,440	100,00
0.013	0,00	0.138	0,00	1.445	8,06	15.136	62,04	158.489	100,00	1659,587	100,00
0.015	0,00	0.158	0,00	1.660	9,35	17.378	67,84	181.970	100,00	1905,461	100,00
0.017	0,00	0.182	0,00	1.905	10,75	19.953	73,55	208.930	100,00	2187,762	100,00
0.020	0,00	0.209	0,00	2.188	12,29	22.909	78,88	239.883	100,00	2511,896	100,00
0.023	0,00	0.240	0,00	2.512	14,00	26.303	83,95	275.423	100,00	2894,032	100,00
0.026	0,00	0.275	0,03	2.884	15,90	30.200	88,30	316.228	100,00	3311,311	100,00
0.030	0,00	0.316	0,17	3.311	18,02	34.674	91,93	363.078	100,00	3801,894	100,00
0.035	0,00	0.363	0,40	3.802	20,38	39.811	94,78	416.869	100,00	4365,158	100,00
0.040	0,00	0.417	0,73	4.365	23,00	45.709	96,88	478.630	100,00	5011,872	100,00
0.046	0,00	0.479	1,16	5.012	25,90	52.481	98,32	549.541	100,00	5754,399	100,00
0.052	0,00	0.550	1,68	5.754	29,11	60.266	99,22	630.957	100,00	6606,934	100,00
0.060	0,00	0.631	2,31	6.607	32,68	69.183	99,70	724.436	100,00	7585,776	100,00
0.069	0,00	0.724	3,04	7.586	36,82	79.433	99,92	831.754	100,00	8709,636	100,00
0.079	0,00	0.832	3,86	8.710	40,98	91.201	99,99	954.993	100,00	10000,000	100,00
0.091	0,00	0.955	4,77	10.000	45,72	104.713	100,00	1096.478	100,00		

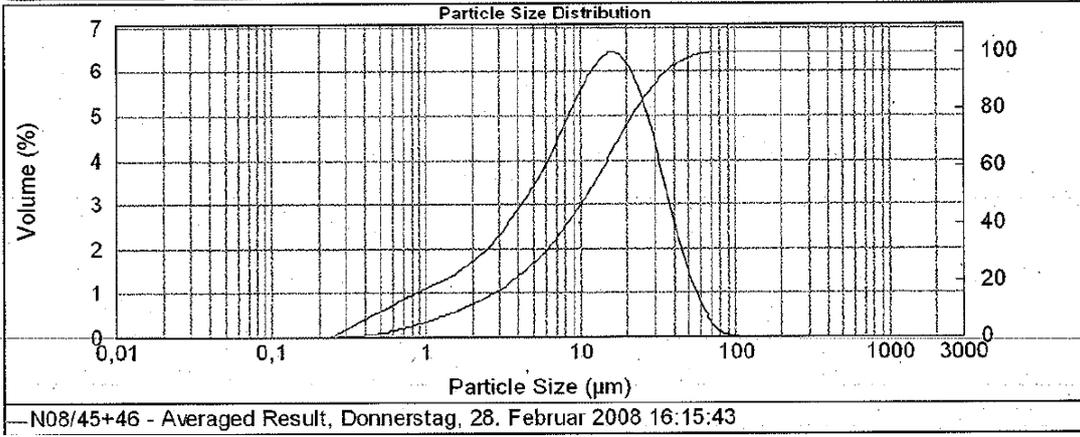


Bild B 1.4 Korngrößenverteilung Rheinischer Trass

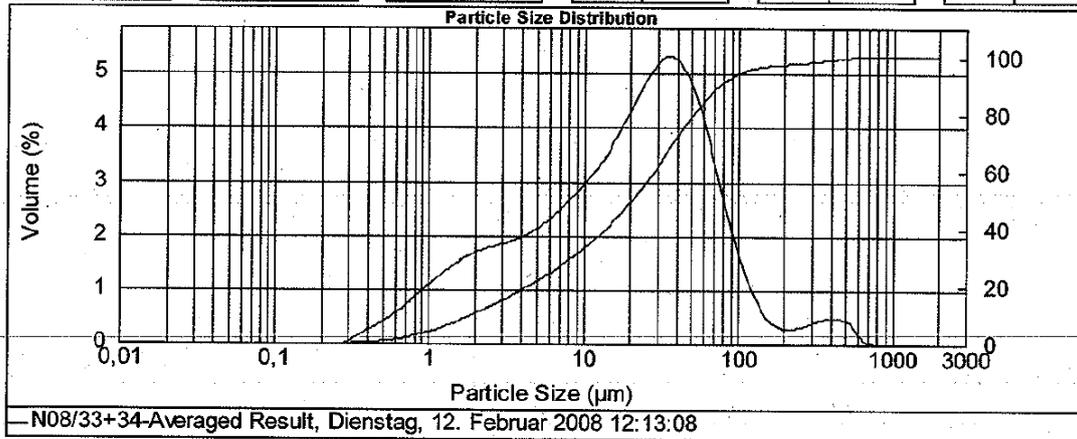
d(0.1): 1,928 µm

d(0.5): 20,869 µm

d(0.9): 77,547 µm

D(0,97) : 176,52 µm

Size (µm)	Vol Under %										
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	4,68	11,462	35,60	120,226	95,45	1258,925	100,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	5,61	13,183	38,51	138,038	96,23	1445,440	100,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	7,06	15,136	41,65	158,489	96,73	1659,587	100,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,660	8,42	17,378	45,05	181,970	97,07	1905,461	100,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	9,87	19,953	48,74	208,930	97,33	2187,762	100,00
0,020	0,00	0,209	0,00	2,188	11,40	22,909	52,73	239,883	97,58	2511,886	100,00
0,023	0,00	0,240	0,00	2,512	12,98	26,303	57,03	275,423	97,86	2864,032	100,00
0,025	0,00	0,275	0,00	2,894	14,61	30,200	61,59	316,228	98,19	3311,311	100,00
0,030	0,00	0,316	0,01	3,311	16,29	34,674	66,33	363,078	98,58	3801,894	100,00
0,035	0,00	0,363	0,14	3,802	18,00	39,811	71,12	416,869	99,00	4365,158	100,00
0,040	0,00	0,417	0,33	4,365	19,79	45,709	75,81	478,630	99,42	5011,872	100,00
0,045	0,00	0,479	0,61	5,012	21,65	52,481	80,21	549,541	99,79	5754,399	100,00
0,052	0,00	0,550	0,99	5,754	23,61	60,256	84,19	630,957	99,96	6605,934	100,00
0,060	0,00	0,631	1,48	6,607	25,71	69,183	87,62	724,436	100,00	7585,776	100,00
0,069	0,00	0,724	2,08	7,586	27,94	79,433	90,45	831,764	100,00	8709,636	100,00
0,079	0,00	0,832	2,82	8,710	30,38	91,201	92,66	954,993	100,00	10000,000	100,00
0,091	0,00	0,965	3,68	10,000	32,87	104,713	94,30	1096,478	100,00		



B1.5 Korngrößenverteilung Italienischer Trass I

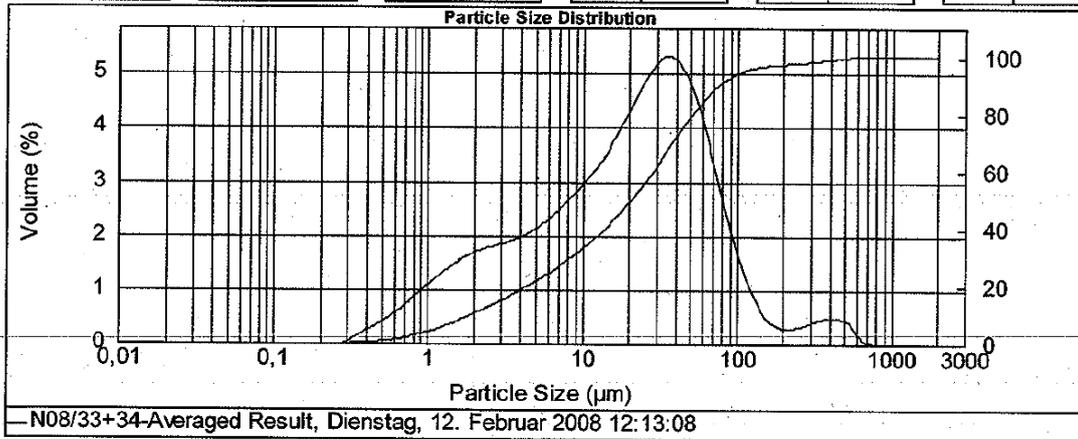
d(0.1): 1,928 µm

d(0.5): 20,869 µm

d(0.9): 77,547 µm

D(0,97) : 176,52 µm

Size (µm)	Vol Under %										
0,010	0,00	0,105	0,00	1,096	4,68	11,462	35,60	120,226	95,45	1258,925	100,00
0,011	0,00	0,120	0,00	1,259	5,61	13,183	38,51	138,038	96,23	1445,440	100,00
0,013	0,00	0,138	0,00	1,445	7,06	15,136	41,65	158,489	96,73	1659,587	100,00
0,015	0,00	0,158	0,00	1,660	8,42	17,378	45,05	181,970	97,07	1905,461	100,00
0,017	0,00	0,182	0,00	1,905	9,87	19,953	48,74	208,930	97,33	2187,762	100,00
0,020	0,00	0,209	0,00	2,188	11,40	22,909	52,73	239,883	97,58	2511,886	100,00
0,023	0,00	0,240	0,00	2,512	12,98	26,303	57,03	275,423	97,86	2884,032	100,00
0,025	0,00	0,275	0,00	2,894	14,61	30,200	61,59	316,228	98,19	3311,311	100,00
0,030	0,00	0,316	0,01	3,311	16,28	34,674	66,33	363,078	98,58	3801,894	100,00
0,035	0,00	0,363	0,14	3,802	18,00	39,811	71,12	416,869	99,00	4365,158	100,00
0,040	0,00	0,417	0,33	4,365	19,79	45,709	75,81	478,630	99,42	5011,872	100,00
0,045	0,00	0,479	0,61	5,012	21,65	52,481	80,21	549,541	99,79	5754,399	100,00
0,052	0,00	0,550	0,99	5,754	23,61	60,256	84,19	630,957	99,96	6605,934	100,00
0,060	0,00	0,631	1,48	6,607	25,71	69,183	87,62	724,436	100,00	7585,776	100,00
0,069	0,00	0,724	2,08	7,586	27,94	79,433	90,45	831,764	100,00	8709,636	100,00
0,079	0,00	0,832	2,82	8,710	30,38	91,201	92,66	954,993	100,00	10000,000	100,00
0,091	0,00	0,965	3,68	10,000	32,87	104,713	94,30	1096,478	100,00		



B1.6 Korngrößenverteilung Italienerischer Trass II

d(0.1): 13,991 µm

d(0.5): 138,7... µm

d(0.9): 447,051 µm

D(0,97) : 643,30 µm

Size (µm)	Vol Under %										
0,010	0,00	1,096	0,00	11,482	9,42	120,226	43,72	1258,925	100,00		
0,011	0,00	1,120	0,00	13,163	9,63	138,038	49,78	1445,440	100,00		
0,013	0,00	1,138	0,00	15,136	10,22	158,489	55,72	1659,587	100,00		
0,015	0,00	1,158	0,00	17,378	10,57	181,970	61,40	1905,461	100,00		
0,017	0,00	1,182	0,00	19,953	10,88	208,890	66,75	2187,762	100,00		
0,020	0,00	1,209	0,00	22,909	11,16	239,883	71,72	2511,886	100,00		
0,023	0,00	1,240	0,00	26,303	11,42	275,423	76,34	2884,032	100,00		
0,026	0,00	1,275	0,00	30,200	11,76	316,228	80,64	3311,311	100,00		
0,030	0,00	1,316	0,00	34,674	12,26	363,078	84,62	3801,894	100,00		
0,035	0,00	1,363	0,00	39,811	13,08	416,869	88,29	4365,158	100,00		
0,040	0,00	1,417	0,01	45,709	14,38	478,630	91,57	5011,872	100,00		
0,046	0,00	1,479	0,04	52,481	16,33	549,541	94,41	5754,399	100,00		
0,052	0,00	1,550	0,12	60,256	19,05	630,957	96,72	6606,934	100,00		
0,060	0,00	1,631	0,27	69,183	22,62	724,436	98,42	7585,776	100,00		
0,069	0,00	1,724	0,47	79,433	27,00	831,764	99,52	8709,636	100,00		
0,079	0,00	1,832	0,73	91,201	32,10	954,893	99,96	10000,000	100,00		
0,091	0,00	1,955	1,03	104,713	37,75	1096,478	100,00				

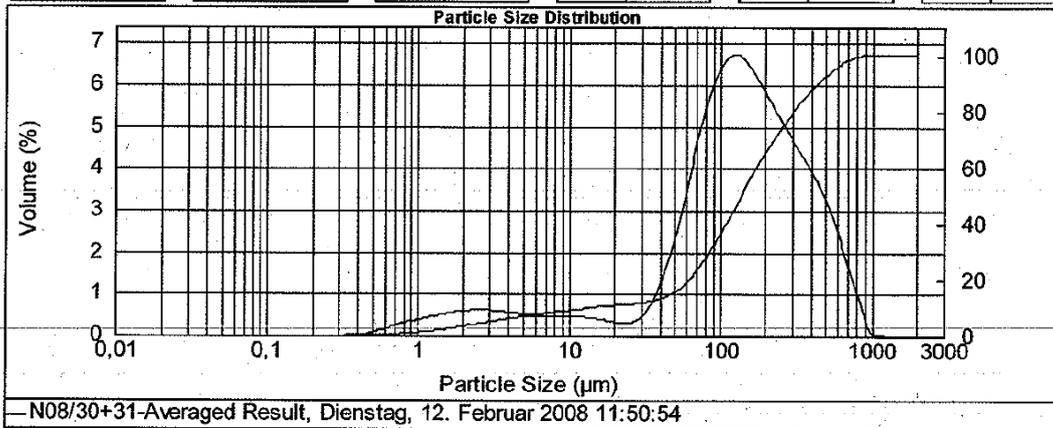


Tabelle A2 Röntgendiffraktometrie der verwendeten puzzolanischen Zusatzstoffen Rheinischer Trass, italienischer Trass I und Italienischer Trass II

	Rheinischer Trass	Italienischer Trass I	Italienischer Trass II
Phase	Ergebnis der relativen Menge ¹		
Quarz	+++	+	+
Plagioklas (Albit-Anorthit)	+	+	+
Alkalifeldspat Orthoklas, Microklin, Sanidin)	+	++	++
Muskovit			
Biotit	++	+	±
Kaolinit	+	±	±
Smectit (Montmorillonit)	+	+	±
Calcit	+	++	++
Hämatit		++	++
Zeolith (Chabasit, Phillipsit)	+		
Analcin	+++	++	++
Leucit	+	+	+
Augit	±	+++	+++
Vulkanisches Glas	+++	+++	+++
¹ ermittelt mittels Röntgendiffraktometrie			
+++ = hoch	++ = moderat	+ = niedrig	± = Spuren

Tabelle A3 Längenänderung der Mörtelprismen [86]

	Tage	1	5	7	14	28	35	42	49	56	63	72
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹										
NA-Zement		0.00	-0.03	-0.01	-0.01	-0.02	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.00
Referenz		0.00	-0.03	-0.02	0	0.02	0.04	0.05	0.07	0.07	0.09	0.11
Flugasche		0.00	-0.03	0.01	-0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
Hüttensand		0.00	0.02	0.03	0.05	0.06	0.09	0.09	0.10	0.09	0.11	0.12
Rhein. Trass		0.00	0.00	-0.02	0.00	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.11	0.11
Ital. Trass I		0.00	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Ital. Trass II		0.00	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.05	0.05	0.02	0.02	0.02

	Tage	91	118	148	180	220	240	270	300	330	360
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹									
NA-Zement		-0.01	-0.02	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Referenz		0.15	0.16	0.15	0.15	0.20	0.25	0.26	0.28	0.29	0.30
Flugasche		0.05	0.08	0.06	0.08	0.12	0.15	0.18	0.21	0.23	0.24
Hüttensand		0.12	0.15	0.14	0.14	0.16	0.21	0.23	0.25	0.25	0.26
Rhein. Trass		0.16	0.25	0.31	0.36	0.42	0.51	0.52	0.53	0.56	0.58
Ital. Trass I		0.12	0.16	0.2	0.24	0.32	0.35	0.37	0.39	0.39	0.43
Ital. Trass II		0.04	0.05	0.05	0.066	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.08

¹ Mittelwert aus 3 Messungen

Tabelle A4 Frischbetoneigenschaften

Frischbetoneigenschaften				
Probe	Ausbreitmass [mm]	Rohdichte [kg/dm ³]	Luftgehalt in Vol.-%	w/z-Wert
Referenz	40	2409	1.3	0.45
Flugasche	40	2400	2.3	0.45
Rhein. Trass	38	2344	3.2	0.45
Ital. Trass I	39	2342	3.0	0.45
Ital. Trass II	37	2378	2.2	0.45

A5 Tabelle der Längenänderung 40°C Betonserien nach [86]

	Tage	1	7	14	21	28	56	90	120
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹							
NA-Zement		0.1658	0.1681	0.1663	0.1594	0.1688	0.1783	0.1823	0.1900
Referenz		0.1719	0.1742	0.1840	0.1925	0.2019	0.2598	0.3386	0.4569
Flugasche		0.1794	0.1800	0.1693	0.1683	0.1781	0.1775	0.1967	0.2044
Rhein. Trass		0.1944	0.1858	0.1781	0.1875	0.1948	0.2094	0.2548	0.2740
Ital. Trass I		0.2004	0.2150	0.2110	0.2125	0.2138	0.2313	0.2563	0.2977
Ital. Trass II		0.1758	0.1815	0.1819	0.1902	0.1904	0.2090	0.2204	0.2290
	Tage	150	180	210	240	270	300	330	360
Probe		Längenänderung [mm/m] ¹							
NA-Zement		0.1850	0.1904	0.1794	0.1898	0.2033	0.2106	0.1985	0.2031
Referenz		0.5439	0.5750	0.5938	0.6025	0.6306	0.6444	0.6513	0.6581
Flugasche		0.2131	0.2277	0.2304	0.2105	0.2503	0.2546	0.2623	0.2725
Rhein. Trass		0.2965	0.3340	0.3481	0.3633	0.4075	0.4367	0.4406	0.4529
Ital. Trass I		0.2775	0.2988	0.3302	0.3452	0.3744	0.4292	0.4131	0.4263
Ital. Trass II		0.2333	0.2360	0.2321	0.2315	0.2575	0.2519	0.2735	0.2579

¹Mittelwert aus 3 Messungen

Tabelle A6 Chemismus der AKR-Gele der 40°C Versuche

Tabelle A 6.1 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der Betonreferenzserie

normiert auf SiO₂-CaO-(Na₂O+K₂O) bzw. SiO₂-CaO-Na₂O bzw. SiO₂-CaO-K₂O

(Angaben in M.-%)								
SiO ₂ CaO Na ₂ O + K ₂ O			SiO ₂ CaO Na ₂ O			SiO ₂ CaO K ₂ O		
0.00	19.20	13.86	76.18	21.85	1.97	68.13	19.54	12.34
45.53	51.07	3.40	46.68	52.35	0.97	45.97	51.56	2.47
45.22	51.45	3.33	46.43	52.83	0.74	45.55	51.83	2.62
46.68	51.18	2.14	47.45	52.03	0.52	46.92	51.45	1.63
45.98	51.78	2.24	46.81	52.72	0.48	46.19	52.03	1.78
44.53	51.88	3.58	45.73	53.28	0.99	44.97	52.39	2.64
47.83	49.47	2.71	48.68	50.35	0.96	48.29	49.94	1.77
46.98	50.17	2.85	47.98	51.24	0.78	47.34	50.56	2.10
47.54	49.22	3.24	48.72	50.45	0.83	47.93	49.63	2.44
45.61	47.33	7.06	48.11	49.93	1.97	46.48	48.23	5.29
50.89	45.74	3.37	52.33	47.04	0.63	51.20	46.02	2.78
52.99	43.74	3.27	54.47	44.97	0.56	53.28	43.99	2.74
52.16	44.48	3.36	53.24	45.40	1.36	52.86	45.08	2.06
47.81	41.22	10.97	52.30	45.10	2.60	48.97	42.22	8.81
49.51	47.02	3.47	50.85	48.30	0.85	49.92	47.41	2.67
45.69	52.12	2.19	46.46	53.00	0.54	45.93	52.40	1.67
41.07	56.96	1.97	41.56	57.64	0.80	41.40	57.42	1.19
50.56	47.15	2.29	51.52	48.05	0.43	50.77	47.35	1.88
46.44	50.05	3.51	47.55	51.25	1.20	46.99	50.65	2.37
51.22	41.12	7.66	54.27	43.58	2.15	52.28	41.97	5.75
47.53	38.69	13.78	52.85	43.02	4.14	49.37	40.19	10.45
48.24	50.12	1.64	49.05	50.95	0.00	48.24	50.12	1.64
50.59	45.14	4.26	52.29	46.66	1.05	51.11	45.61	3.28
44.02	45.42	10.55	47.65	49.16	3.20	45.36	46.80	7.83
47.33	43.50	9.17	50.47	46.39	3.14	48.77	44.82	6.41
48.44	42.51	9.05	51.71	45.38	2.91	49.80	43.70	6.50
48.66	47.82	3.52	49.85	48.99	1.15	49.22	48.37	2.42
48.12	49.11	2.78	49.10	50.11	0.79	48.49	49.49	2.02
47.78	49.97	2.26	48.53	50.75	0.73	48.12	50.33	1.55
48.77	49.32	1.91	49.39	49.96	0.65	49.08	49.64	1.27
48.32	49.44	2.24	49.11	50.25	0.64	48.62	49.75	1.63
49.86	48.18	1.97	50.61	48.91	0.48	50.09	48.41	1.50
47.21	50.85	1.94	47.81	51.50	0.69	47.53	51.20	1.26
48.88	49.18	1.94	49.68	49.98	0.34	49.05	49.34	1.61
48.20	50.42	1.38	48.72	50.96	0.33	48.35	50.58	1.06
49.78	48.45	1.77	50.46	49.11	0.43	49.99	48.65	1.36
49.49	48.51	2.00	50.18	49.19	0.63	49.80	48.81	1.39
46.40	52.46	1.14	46.77	52.88	0.35	46.56	52.65	0.79
48.11	50.20	1.68	48.74	50.86	0.40	48.30	50.40	1.29
48.19	48.91	2.89	49.28	50.01	0.70	48.53	49.25	2.22
47.91	49.62	2.46	48.82	50.56	0.62	48.21	49.92	1.87
46.89	50.66	2.46	47.72	51.56	0.72	47.22	51.02	1.76
43.52	54.54	1.94	44.30	55.52	0.19	43.60	54.64	1.76
44.41	54.43	1.16	44.81	54.92	0.28	44.53	54.58	0.89
43.66	54.68	1.66	44.31	55.49	0.19	43.75	54.78	1.47

Fortsetzung Tabelle A6.1 Referenz

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
46.81	52.09	1.09	47.33	52.67	0.00	46.81	52.09	1.09
46.89	50.17	2.94	47.90	51.25	0.85	47.29	50.59	2.12
46.42	51.05	2.52	47.28	52.00	0.73	46.76	51.42	1.82
47.80	50.18	2.02	48.63	51.05	0.33	47.95	50.34	1.71
47.27	49.80	2.94	48.26	50.84	0.90	47.69	50.24	2.07
46.38	51.84	1.77	47.03	52.57	0.40	46.57	52.05	1.39
47.07	49.29	3.65	48.38	50.66	0.96	47.51	49.75	2.73
47.00	50.46	2.55	47.81	51.33	0.85	47.39	50.88	1.72
12.09	81.77	6.13	12.88	87.12	0.00	12.09	81.77	6.13
4.14	89.30	6.56	4.43	95.57	0.00	4.14	89.30	6.56
48.26	50.21	1.53	48.79	50.77	0.44	48.47	50.43	1.10
49.76	48.05	2.18	50.66	48.92	0.43	49.97	48.26	1.77
48.51	49.36	2.13	49.36	50.23	0.41	48.71	49.56	1.73
45.88	47.14	6.98	48.42	49.75	1.83	46.69	47.97	5.34
48.65	48.25	3.10	49.88	49.46	0.66	48.97	48.56	2.47
32.43	29.45	38.11	44.06	40.02	15.92	36.74	33.36	29.90
50.15	44.36	5.49	52.51	46.44	1.05	50.66	44.81	4.53
51.00	43.22	5.77	53.16	45.06	1.78	51.89	43.98	4.14
50.74	44.57	4.69	52.55	46.16	1.29	51.38	45.13	3.48
48.16	46.54	5.30	50.22	48.52	1.26	48.75	47.11	4.14
40.20	47.97	11.83	43.90	52.39	3.71	41.61	49.66	8.73
42.51	48.63	8.86	46.10	52.74	1.15	42.96	49.15	7.88
48.16	48.22	3.62	49.51	49.57	0.92	48.60	48.65	2.75
46.66	48.02	5.33	48.84	50.27	0.89	47.05	48.43	4.52
47.90	49.95	2.15	48.71	50.79	0.50	48.14	50.20	1.66
46.92	52.08	1.00	47.40	52.60	0.00	46.92	52.08	1.00
49.09	49.49	1.42	49.60	50.01	0.39	49.28	49.68	1.04
46.54	52.08	1.38	47.19	52.81	0.00	46.54	52.08	1.38
47.80	50.24	1.96	48.61	51.08	0.31	47.95	50.39	1.66
47.66	49.91	2.42	48.61	50.91	0.48	47.89	50.15	1.96
48.99	48.72	2.29	49.97	49.69	0.34	49.16	48.88	1.96
46.74	50.86	2.40	47.66	51.86	0.48	46.96	51.10	1.94
48.27	49.22	2.51	49.12	50.08	0.80	48.66	49.61	1.74
49.45	47.55	3.00	50.59	48.65	0.76	49.82	47.91	2.28
49.94	46.22	3.85	51.48	47.65	0.87	50.36	46.61	3.03
56.66	38.60	4.74	58.71	40.01	1.28	57.37	39.09	3.55
48.66	41.09	10.25	52.72	44.52	2.76	49.93	42.16	7.91
49.44	46.14	4.42	51.08	47.68	1.24	50.04	46.70	3.26
44.77	54.10	1.14	45.28	54.72	0.00	44.77	54.10	1.14
45.60	53.06	1.34	46.22	53.78	0.00	45.60	53.06	1.34
45.40	51.74	2.87	46.36	52.83	0.81	45.76	52.15	2.09
45.51	52.33	2.15	46.23	53.15	0.62	45.79	52.66	1.55
44.83	52.33	2.84	45.76	53.43	0.81	45.18	52.75	2.06
44.85	53.17	1.98	45.33	53.74	0.92	45.27	53.66	1.07
48.82	50.06	1.13	49.37	50.63	0.00	48.82	50.06	1.13
47.17	50.72	2.10	48.07	51.69	0.24	47.29	50.84	1.87
48.01	49.90	2.08	48.76	50.68	0.56	48.28	50.18	1.54
46.34	48.77	4.89	48.16	50.69	1.16	46.86	49.32	3.82
44.20	53.89	1.91	44.85	54.69	0.46	44.40	54.14	1.46
44.06	54.57	1.37	44.67	55.33	0.00	44.06	54.57	1.37
47.55	51.26	1.19	47.99	51.75	0.26	47.67	51.40	0.94
46.29	52.96	0.75	46.64	53.36	0.00	46.29	52.96	0.75

Fortsetzung Tabelle A 6.1 Referenz										
SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O		SiO ₂	CaO	Na ₂ O		SiO ₂	CaO	K ₂ O
44.81	53.18	2.01		45.45	53.94	0.62		45.08	53.50	1.41
44.90	53.28	1.82		45.42	53.89	0.69		45.21	53.65	1.15
45.42	53.62	0.96		45.86	54.14	0.00		45.42	53.62	0.96
45.25	53.30	1.45		45.80	53.95	0.25		45.36	53.43	1.21
45.63	51.98	2.39		46.44	52.90	0.66		45.92	52.32	1.76
45.56	53.59	0.85		45.95	54.05	0.00		45.56	53.59	0.85
45.92	52.77	1.31		46.31	53.22	0.47		46.14	53.02	0.85
45.48	51.64	2.88		46.35	52.64	1.01		45.93	52.16	1.90
44.48	53.77	1.75		45.09	54.51	0.41		44.66	53.99	1.35
46.52	52.33	1.15		46.92	52.79	0.29		46.65	52.48	0.86
44.05	51.09	4.86		45.36	52.61	2.03		44.94	52.12	2.94
44.95	50.37	4.69		46.31	51.90	1.80		45.74	51.26	2.99
47.24	50.27	2.49		48.11	51.20	0.69		47.56	50.61	1.83
44.89	52.48	2.63		45.75	53.48	0.76		45.23	52.88	1.89
43.54	50.64	5.82		45.76	53.21	1.03		43.97	51.14	4.89
45.81	50.21	3.97		47.23	51.77	1.00		46.26	50.71	3.04
44.87	53.52	1.62		45.45	54.21	0.34		45.02	53.70	1.29
44.38	54.48	1.14		44.89	55.11	0.00		44.38	54.48	1.14
65.08	21.14	13.78		74.54	24.21	1.25		65.80	21.37	12.82
64.83	22.02	13.15		73.03	24.81	2.16		66.10	22.45	11.45
64.39	20.02	15.59		74.69	23.22	2.09		65.57	20.38	14.04
65.09	19.33	15.58		75.50	22.43	2.08		66.28	19.69	14.04
65.59	18.32	16.09		76.30	21.31	2.39		66.96	18.71	14.33
66.51	19.17	14.31		76.12	21.94	1.94		67.66	19.50	12.83
66.00	19.87	14.13		75.47	22.72	1.81		67.07	20.19	12.74
67.01	18.20	14.79		77.00	20.92	2.08		68.24	18.54	13.22
66.47	19.61	13.92		75.60	22.31	2.09		67.71	19.98	12.31
65.54	19.59	14.88		75.51	22.57	1.92		66.65	19.92	13.43
65.33	19.29	15.38		75.39	22.27	2.34		66.68	19.69	13.63
65.97	19.72	14.31		75.60	22.60	1.81		67.03	20.04	12.93
65.23	21.25	13.51		74.58	24.30	1.12		65.88	21.46	12.66
64.39	20.47	15.15		74.54	23.69	1.77		65.39	20.78	13.83
46.96	51.85	1.19		47.52	52.48	0.00		46.96	51.85	1.19
53.83	41.10	5.06		56.30	42.99	0.72		54.20	41.39	4.41
56.28	40.35	3.36		57.97	41.57	0.46		56.53	40.53	2.93
46.71	52.73	0.56		46.97	53.03	0.00		46.71	52.73	0.56
46.57	53.06	0.37		46.74	53.26	0.00		46.57	53.06	0.37
48.21	50.87	0.92		48.52	51.20	0.27		48.34	51.01	0.66
31.05	66.75	2.20		31.75	68.25	0.00		31.05	66.75	2.20
47.99	51.34	0.67		48.31	51.69	0.00		47.99	51.34	0.67
60.09	36.14	3.77		62.44	37.56	0.00		60.09	36.14	3.77
47.42	52.03	0.55		47.68	52.32	0.00		47.42	52.03	0.55
44.33	48.68	6.99		46.70	51.28	2.02		45.20	49.63	5.17
46.44	51.14	2.41		47.27	52.06	0.67		46.75	51.48	1.76
41.67	56.39	1.94		42.30	57.25	0.45		41.85	56.64	1.50
41.74	56.89	1.38		42.16	57.46	0.39		41.90	57.11	1.00
39.10	53.17	7.73		42.08	57.21	0.71		39.36	53.52	7.11
43.25	53.49	3.26		44.44	54.97	0.59		43.50	53.80	2.70

Tabelle A 6.2 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der Serie mit dem Zusatzstoff Rheinischen Trass

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

(Angaben in M.-%)								
$\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$			$\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$			$\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$		
SiO_2	CaO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	SiO_2	CaO	Na_2O	SiO_2	CaO	K_2O
80.46	3.57	15.97	80.46	3.57	15.97	83.75	3.72	12.54
79.84	3.32	16.84	79.84	3.32	16.84	83.37	3.47	13.16
80.55	3.35	16.10	80.55	3.35	16.10	84.24	3.50	12.26
80.06	3.92	16.02	80.06	3.92	16.02	82.98	4.06	12.96
81.79	3.00	15.21	81.79	3.00	15.21	84.30	3.09	12.61
79.78	3.92	16.30	79.78	3.92	16.30	82.26	4.04	13.70
82.33	3.53	14.14	82.33	3.53	14.14	85.08	3.65	11.27
83.67	3.44	12.89	83.67	3.44	12.89	85.64	3.52	10.84
69.54	13.23	17.22	69.54	13.23	17.22	73.05	13.90	13.05
81.67	3.63	14.70	81.67	3.63	14.70	84.54	3.76	11.71
81.92	3.74	14.35	81.92	3.74	14.35	84.74	3.87	11.40
81.88	4.57	13.55	81.88	4.57	13.55	83.93	4.69	11.38
80.85	5.73	13.42	80.85	5.73	13.42	82.98	5.88	11.14
81.37	4.77	13.86	81.37	4.77	13.86	85.31	5.00	9.69
71.68	15.14	13.18	71.68	15.14	13.18	74.53	15.74	9.74
65.06	21.78	13.16	65.06	21.78	13.16	68.04	22.78	9.18
43.67	51.82	4.50	43.67	51.82	4.50	44.32	52.60	3.08
55.32	31.14	13.54	55.32	31.14	13.54	57.08	32.14	10.78
44.15	44.10	11.74	44.15	44.10	11.74	46.11	46.06	7.83
53.29	31.45	15.26	53.29	31.45	15.26	55.53	32.78	11.69
50.39	34.19	15.42	50.39	34.19	15.42	52.18	35.40	12.42
100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
50.59	34.81	14.60	50.59	34.81	14.60	52.56	36.16	11.27
83.30	3.74	12.96	83.30	3.74	12.96	85.42	3.83	10.75
83.17	3.61	13.22	83.17	3.61	13.22	85.95	3.73	10.32
82.44	3.57	14.00	82.44	3.57	14.00	85.40	3.69	10.91
83.51	3.09	13.40	83.51	3.09	13.40	85.74	3.18	11.09
82.45	3.66	13.89	82.45	3.66	13.89	84.80	3.76	11.43
82.86	3.74	13.40	82.86	3.74	13.40	85.29	3.85	10.85
78.63	4.59	16.78	78.63	4.59	16.78	82.30	4.80	12.90
67.19	12.78	20.03	67.19	12.78	20.03	73.53	13.99	12.48
73.79	7.61	18.60	73.79	7.61	18.60	78.12	8.06	13.82
51.23	12.43	36.34	51.23	12.43	36.34	59.54	14.44	26.01
79.28	3.85	16.87	79.28	3.85	16.87	82.58	4.01	13.41
78.91	3.44	17.65	78.91	3.44	17.65	82.67	3.60	13.73
76.97	3.53	19.50	76.97	3.53	19.50	81.48	3.74	14.78
78.99	3.29	17.72	78.99	3.29	17.72	82.15	3.42	14.44
82.50	4.90	12.60	82.50	4.90	12.60	84.94	5.05	10.01
75.07	11.62	13.31	75.07	11.62	13.31	77.35	11.98	10.67
76.00	9.76	14.24	76.00	9.76	14.24	78.81	10.12	11.07
65.07	8.60	26.33	65.07	8.60	26.33	76.27	10.08	13.65
69.44	7.19	23.37	69.44	7.19	23.37	79.58	8.24	12.18
69.09	10.10	20.81	69.09	10.10	20.81	76.09	11.13	12.79
63.62	21.07	15.31	63.62	21.07	15.31	65.31	21.63	13.06
65.64	21.42	12.94	65.64	21.42	12.94	67.23	21.94	10.84
64.85	20.02	15.14	64.85	20.02	15.14	66.67	20.58	12.76
65.99	20.18	13.84	65.99	20.18	13.84	67.61	20.67	11.72

Fortsetzung Tabelle A 6.2

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
75.85	8.75	15.40	75.85	8.75	15.40	77.68	8.96	13.36
73.35	11.16	15.48	73.35	11.16	15.48	76.45	11.63	11.91
74.05	10.15	15.80	74.05	10.15	15.80	76.50	10.49	13.01
66.81	16.65	16.54	66.81	16.65	16.54	69.78	17.38	12.84
73.09	10.53	16.37	73.09	10.53	16.37	75.02	10.81	14.17
70.67	12.65	16.68	70.67	12.65	16.68	73.34	13.13	13.53
69.15	12.51	18.34	69.15	12.51	18.34	71.33	12.90	15.76
68.45	11.83	19.72	68.45	11.83	19.72	71.31	12.32	16.36
68.10	12.15	19.75	68.10	12.15	19.75	70.52	12.58	16.90
71.88	10.07	18.05	71.88	10.07	18.05	76.08	10.66	13.27
66.38	10.81	22.81	66.38	10.81	22.81	74.10	12.07	13.84
74.03	9.56	16.40	74.03	9.56	16.40	77.36	9.99	12.64
68.85	10.92	20.22	68.85	10.92	20.22	72.25	11.46	16.29
67.85	18.37	13.78	67.85	18.37	13.78	69.95	18.94	11.11
67.05	18.53	14.42	67.05	18.53	14.42	68.91	19.04	12.04
67.66	18.24	14.10	67.66	18.24	14.10	69.96	18.86	11.18
67.90	19.22	12.88	67.90	19.22	12.88	69.78	19.75	10.47
67.48	18.61	13.91	67.48	18.61	13.91	70.03	19.32	10.65
76.40	20.09	3.52	76.40	20.09	3.52	77.09	20.27	2.64
66.40	18.88	14.72	66.40	18.88	14.72	68.82	19.57	11.61
64.39	19.85	15.76	64.39	19.85	15.76	66.26	20.42	13.32
64.09	20.08	15.83	64.09	20.08	15.83	65.67	20.57	13.76
65.93	19.18	14.89	65.93	19.18	14.89	68.36	19.89	11.75
67.97	20.46	11.57	67.97	20.46	11.57	69.37	20.88	9.75
63.79	21.07	15.14	63.79	21.07	15.14	65.19	21.54	13.27
63.16	21.76	15.08	63.16	21.76	15.08	64.48	22.22	13.31
63.41	21.71	14.89	63.41	21.71	14.89	64.67	22.14	13.19
65.25	21.03	13.72	65.25	21.03	13.72	66.75	21.52	11.73
63.74	20.68	15.59	63.74	20.68	15.59	65.27	21.17	13.56
64.09	21.57	14.35	64.09	21.57	14.35	65.49	22.04	12.46
64.77	19.06	16.18	64.77	19.06	16.18	66.68	19.62	13.70
65.22	20.01	14.77	65.22	20.01	14.77	66.94	20.54	12.52
63.57	20.94	15.48	63.57	20.94	15.48	65.43	21.56	13.01
64.38	20.80	14.82	64.38	20.80	14.82	66.23	21.39	12.38

Tabelle A 6.3 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der Betonserie mit dem Zusatzstoff Italienscher Trass I

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

Angaben in M.-%)								
SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
80.46	3.57	15.97	91.49	4.06	4.45	91.49	4.06	4.45
63.61	9.46	26.93	78.28	11.65	10.07	78.28	11.65	10.07
66.49	13.00	20.51	79.05	15.46	5.49	79.05	15.46	5.49
65.15	11.19	23.66	82.39	14.15	3.45	82.39	14.15	3.45
74.19	9.00	16.81	87.46	10.61	1.93	87.46	10.61	1.93
73.03	10.25	16.72	86.29	12.11	1.60	86.29	12.11	1.60
74.39	9.05	16.56	87.46	10.64	1.90	87.46	10.64	1.90
71.98	9.71	18.31	86.52	11.67	1.81	86.52	11.67	1.81
71.81	10.06	18.13	85.79	12.02	2.19	85.79	12.02	2.19
69.93	12.86	17.21	83.05	15.27	1.68	83.05	15.27	1.68
72.08	9.15	18.77	86.79	11.02	2.19	86.79	11.02	2.19
67.81	8.76	23.43	81.39	10.51	8.09	81.39	10.51	8.09
73.33	8.35	18.33	87.53	9.96	2.51	87.53	9.96	2.51
72.51	9.29	18.20	87.17	11.17	1.65	87.17	11.17	1.65
73.63	8.76	17.60	87.80	10.45	1.76	87.80	10.45	1.76
53.54	35.83	10.63	58.60	39.21	2.18	58.60	39.21	2.18
44.94	42.18	12.87	50.77	47.66	1.57	50.77	47.66	1.57
72.89	6.86	20.25	88.61	8.34	3.05	88.61	8.34	3.05
78.33	8.81	12.87	87.25	9.81	2.94	87.25	9.81	2.94
65.64	8.96	25.41	80.13	10.93	8.94	80.13	10.93	8.94
67.63	19.37	13.00	76.00	21.77	2.23	76.00	21.77	2.23
70.92	16.31	12.78	79.49	18.28	2.23	79.49	18.28	2.23
71.57	15.50	12.92	80.59	17.46	1.96	80.59	17.46	1.96
69.98	15.43	14.59	80.02	17.64	2.34	80.02	17.64	2.34
69.87	16.05	14.08	79.53	18.27	2.21	79.53	18.27	2.21
70.29	15.32	14.39	80.25	17.49	2.25	80.25	17.49	2.25
66.19	19.79	14.01	74.97	22.42	2.61	74.97	22.42	2.61
67.96	17.96	14.09	77.48	20.48	2.04	77.48	20.48	2.04
65.80	19.30	14.91	75.25	22.07	2.68	75.25	22.07	2.68
68.02	18.52	13.46	77.30	21.05	1.66	77.30	21.05	1.66
70.06	16.28	13.66	79.36	18.43	2.21	79.36	18.43	2.21
73.42	13.89	12.70	82.40	15.59	2.02	82.40	15.59	2.02
74.37	12.79	12.84	83.47	14.35	2.19	83.47	14.35	2.19
69.00	16.49	14.51	78.78	18.83	2.38	78.78	18.83	2.38
70.88	12.26	16.86	82.11	14.20	3.70	82.11	14.20	3.70
66.75	14.46	18.79	77.68	16.82	5.50	77.68	16.82	5.50
62.24	18.20	19.56	72.25	21.12	6.63	72.25	21.12	6.63
66.17	15.33	18.50	76.37	17.69	5.93	76.37	17.69	5.93
70.04	13.68	16.28	80.13	15.65	4.22	80.13	15.65	4.22
57.22	22.31	20.46	66.17	25.80	8.03	66.17	25.80	8.03
63.42	18.73	17.85	73.28	21.64	5.09	73.28	21.64	5.09
72.17	12.47	15.36	82.52	14.26	3.22	82.52	14.26	3.22
65.97	17.16	16.87	75.04	19.51	5.45	75.04	19.51	5.45
45.38	39.72	14.91	51.89	45.42	2.68	51.89	45.42	2.68
65.61	16.11	18.28	75.72	18.60	5.68	75.72	18.60	5.68

Fortsetzung Tabelle A 6.3

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
71.48	12.87	15.65	80.03	14.41	5.56	80.03	14.41	5.56
71.55	12.63	15.82	81.78	14.44	3.78	81.78	14.44	3.78
70.64	13.50	15.86	80.27	15.34	4.40	80.27	15.34	4.40
64.88	16.59	18.53	75.57	19.32	5.11	75.57	19.32	5.11
69.21	13.77	17.02	79.27	15.77	4.96	79.27	15.77	4.96
70.70	12.35	16.94	80.24	14.02	5.74	80.24	14.02	5.74
72.25	12.92	14.83	82.07	14.67	3.26	82.07	14.67	3.26
69.93	13.87	16.19	79.94	15.86	4.20	79.94	15.86	4.20
65.82	17.79	16.39	78.72	21.28	0.00	78.72	21.28	0.00
84.16	6.03	9.80	93.01	6.67	0.32	93.01	6.67	0.32
62.31	18.00	19.69	73.00	21.09	5.92	73.00	21.09	5.92
75.26	13.99	10.74	82.98	15.43	1.59	82.98	15.43	1.59
73.47	16.07	10.45	80.68	17.65	1.67	80.68	17.65	1.67
73.95	15.31	10.74	81.77	16.93	1.30	81.77	16.93	1.30
76.55	12.61	10.84	84.58	13.94	1.48	84.58	13.94	1.48
80.88	9.74	9.39	88.31	10.63	1.05	88.31	10.63	1.05
74.33	12.99	12.68	84.27	14.73	1.00	84.27	14.73	1.00
73.77	15.12	11.12	81.57	16.72	1.71	81.57	16.72	1.71
75.52	13.92	10.56	83.15	15.33	1.52	83.15	15.33	1.52
74.94	14.41	10.65	82.83	15.93	1.24	82.83	15.93	1.24
79.91	5.50	14.59	90.98	6.26	2.75	90.98	6.26	2.75
81.94	5.29	12.77	91.62	5.91	2.47	91.62	5.91	2.47
79.33	5.71	14.96	90.74	6.53	2.73	90.74	6.53	2.73
81.97	5.99	12.04	91.04	6.65	2.31	91.04	6.65	2.31
82.74	5.38	11.87	91.47	5.95	2.58	91.47	5.95	2.58
1.07	98.93	0.00	1.07	98.93	0.00	1.07	98.93	0.00
81.48	5.06	13.46	91.90	5.71	2.39	91.90	5.71	2.39
81.30	7.51	11.18	89.48	8.27	2.25	89.48	8.27	2.25
67.33	17.86	14.81	77.96	20.68	1.37	77.96	20.68	1.37
69.56	15.58	14.86	79.74	17.86	2.40	79.74	17.86	2.40
64.40	27.76	7.84	69.53	29.97	0.51	69.53	29.97	0.51
56.19	30.93	12.88	62.71	34.52	2.77	62.71	34.52	2.77
69.15	26.90	3.95	71.68	27.89	0.43	71.68	27.89	0.43
70.59	14.78	14.64	81.02	16.96	2.02	81.02	16.96	2.02
70.72	14.35	14.93	81.18	16.47	2.34	81.18	16.47	2.34
71.05	14.61	14.34	81.24	16.70	2.06	81.24	16.70	2.06
70.16	15.13	14.71	80.29	17.31	2.40	80.29	17.31	2.40
68.87	26.55	4.58	71.81	27.68	0.51	71.81	27.68	0.51
69.18	26.24	4.58	72.17	27.38	0.45	72.17	27.38	0.45
66.32	22.68	11.00	73.57	25.16	1.27	73.57	25.16	1.27
67.41	19.55	13.04	76.56	22.20	1.23	76.56	22.20	1.23
69.56	14.45	15.99	81.79	16.99	1.22	81.79	16.99	1.22
67.60	18.14	14.27	77.82	20.88	1.29	77.82	20.88	1.29
68.13	12.47	19.40	81.96	15.00	3.04	81.96	15.00	3.04
74.13	9.39	16.48	85.10	10.78	4.12	85.10	10.78	4.12
70.82	7.09	22.09	84.10	8.41	7.49	84.10	8.41	7.49
67.72	11.39	20.89	82.51	13.88	3.61	82.51	13.88	3.61
65.52	9.40	25.08	84.41	12.12	3.47	84.41	12.12	3.47
67.62	11.53	20.86	79.69	13.59	6.72	79.69	13.59	6.72
63.68	7.06	29.25	77.63	8.61	13.76	77.63	8.61	13.76
70.98	15.23	13.79	80.60	17.29	2.11	80.60	17.29	2.11
69.53	13.91	16.56	80.85	16.17	2.98	80.85	16.17	2.98

Fortsetzung Tabelle A 6.3								
SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
64.14	13.81	22.06	79.05	17.02	3.94	79.05	17.02	3.94
66.28	12.17	21.55	81.55	14.97	3.48	81.55	14.97	3.48
67.36	12.46	20.18	81.98	15.16	2.86	81.98	15.16	2.86
67.22	10.62	22.15	81.95	12.95	5.10	81.95	12.95	5.10
72.98	8.54	18.48	87.09	10.19	2.72	87.09	10.19	2.72
70.04	13.21	16.74	82.15	15.50	2.35	82.15	15.50	2.35
76.49	7.62	15.89	89.08	8.87	2.05	89.08	8.87	2.05
77.25	6.40	16.35	90.28	7.48	2.24	90.28	7.48	2.24
65.32	13.64	21.04	75.37	15.74	8.89	75.37	15.74	8.89
69.53	11.36	19.11	79.80	13.03	7.16	79.80	13.03	7.16
71.54	9.01	19.45	84.78	10.68	4.54	84.78	10.68	4.54
71.92	7.41	20.67	87.21	8.98	3.81	87.21	8.98	3.81
75.89	5.54	18.57	89.80	6.56	3.64	89.80	6.56	3.64
79.05	4.46	16.49	93.07	5.25	1.68	93.07	5.25	1.68
77.86	5.41	16.73	91.28	6.35	2.38	91.28	6.35	2.38
68.82	13.22	17.96	80.00	15.37	4.63	80.00	15.37	4.63
71.18	12.43	16.39	82.00	14.32	3.68	82.00	14.32	3.68
69.18	14.93	15.88	80.02	17.27	2.71	80.02	17.27	2.71
69.42	14.50	16.08	80.48	16.81	2.71	80.48	16.81	2.71
69.21	14.66	16.13	80.17	16.99	2.84	80.17	16.99	2.84

A 7 Tabelle der Längenänderung der Betonprismen der 60°C Performance Prüfung nach [86]

	Tage	0	28	56	90	120	150	180
Probe		Längenänderung [mm/m]						
NA-Zement		0.0000	0.0358	0.0748	0.0311	0.0927	0.1250	0.1525
Referenz		0.0000	0.4593	0.6073	0.6515	0.6823	0.7234	0.7345
Rhein. Trass		0.0000	0.0936	0.1864	0.2954	0.3689	0.4604	0.5274
Ital. Trass I		0.0000	0.0990	0.1562	0.2177	0.1976	0.2875	0.2911
Ital. Trass II		0.0000	0.1493	0.1715	0.2332	0.2946	0.3656	0.3337

Tabellen A8 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der 60°C Performance-Prüfung

Tabelle A 8.1 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der 60° Performance-Prüfung Referenzbetonserie

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

(Angaben in M.-%)								
SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
70.26	14.76	14.97	81.57	17.14	1.29	71.06	14.93	14.02
71.07	13.57	15.36	82.56	15.77	1.68	72.11	13.77	14.12
72.82	14.73	12.45	82.47	16.69	0.85	73.37	14.85	11.78
72.12	13.51	14.37	82.70	15.49	1.81	73.28	13.73	12.99
69.87	15.36	14.78	80.91	17.79	1.30	70.66	15.53	13.81
69.24	14.83	15.92	81.12	17.38	1.51	70.15	15.03	14.83
69.09	14.51	16.40	81.58	17.14	1.28	69.85	14.67	15.48
70.45	14.35	15.20	81.88	16.68	1.43	71.33	14.53	14.14
70.18	14.74	15.08	81.42	17.10	1.48	71.09	14.93	13.98
72.42	14.54	13.04	82.08	16.48	1.44	73.35	14.73	11.92
70.02	14.77	15.21	81.55	17.21	1.24	70.77	14.93	14.29
72.46	16.33	11.21	80.25	18.08	1.67	73.57	16.58	9.85
68.98	14.67	16.35	80.92	17.21	1.87	70.10	14.91	15.00
69.22	14.29	16.49	79.43	16.39	4.17	71.84	14.83	13.34
71.39	14.73	13.87	81.91	16.90	1.18	72.14	14.89	12.98
71.25	14.04	14.71	82.19	16.20	1.62	72.26	14.24	13.50
70.34	14.26	15.39	81.94	16.61	1.45	71.23	14.44	14.33
70.43	16.31	13.26	77.91	18.04	4.05	73.11	16.93	9.96
70.46	14.67	14.86	81.68	17.01	1.31	71.27	14.84	13.89
69.38	14.74	15.89	81.40	17.30	1.30	70.15	14.90	14.94
67.76	16.12	16.12	77.93	18.54	3.53	69.90	16.63	13.47
70.58	14.94	14.48	81.77	17.31	0.92	71.14	15.06	13.80
70.75	14.63	14.62	81.97	16.95	1.09	71.42	14.77	13.81
69.27	14.23	16.50	81.25	16.69	2.07	70.51	14.48	15.01
69.19	14.71	16.10	81.16	17.26	1.58	70.14	14.91	14.95
71.46	14.98	13.56	80.91	16.96	2.13	72.84	15.27	11.90
71.48	13.30	15.22	83.41	15.52	1.06	72.13	13.42	14.44
73.49	13.53	12.98	82.55	15.20	2.25	74.99	13.81	11.20
69.90	16.90	13.20	79.20	19.15	1.65	70.93	17.15	11.92
100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
85.61	6.39	8.00	88.80	6.63	4.57	89.55	6.68	3.76
75.99	13.49	10.52	83.30	14.79	1.91	77.33	13.73	8.94
49.82	41.19	8.99	53.11	43.90	2.99	51.26	42.38	6.36
74.76	11.82	13.42	83.04	13.13	3.83	77.43	12.24	10.32
66.94	19.20	13.86	76.18	21.85	1.97	68.13	19.54	12.34
67.41	19.17	13.42	76.25	21.68	2.07	68.66	19.53	11.81
67.25	19.42	13.33	75.93	21.93	2.14	68.55	19.80	11.65
65.73	20.69	13.58	74.86	23.56	1.58	66.66	20.98	12.36
65.09	21.04	13.87	74.59	24.11	1.30	65.84	21.28	12.88
65.54	20.53	13.93	75.18	23.55	1.26	66.27	20.76	12.97
65.43	19.50	15.08	75.13	22.39	2.48	66.87	19.93	13.20
66.56	19.64	13.80	75.59	22.31	2.10	67.81	20.01	12.18
64.38	15.11	20.51	76.97	18.06	4.97	67.18	15.76	17.06
65.34	16.00	18.66	77.09	18.87	4.04	67.66	16.56	15.78

Fortsetzung Tabelle A 8.1

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
64.20	22.78	13.02	73.23	25.98	0.80	64.66	22.94	12.41
60.75	24.03	15.23	70.68	27.96	1.36	61.47	24.31	14.22
56.22	40.90	2.88	57.77	42.03	0.20	56.33	40.98	2.70
56.09	40.88	3.03	57.74	42.08	0.19	56.19	40.95	2.86
57.37	40.12	2.51	58.70	41.05	0.24	57.51	40.22	2.28
49.87	48.88	1.26	50.37	49.37	0.26	49.99	49.00	1.01
45.90	53.49	0.61	46.18	53.82	0.00	45.90	53.49	0.61
46.14	53.03	0.83	46.53	53.47	0.00	46.14	53.03	0.83
45.88	53.54	0.58	46.15	53.85	0.00	45.88	53.54	0.58
46.45	53.00	0.55	46.71	53.29	0.00	46.45	53.00	0.55
44.80	54.52	0.68	45.11	54.89	0.00	44.80	54.52	0.68
45.62	53.43	0.96	45.98	53.85	0.16	45.69	53.51	0.80
46.68	52.62	0.70	46.86	52.83	0.32	46.82	52.79	0.39
55.11	41.56	3.34	57.01	42.99	0.00	55.11	41.56	3.34
44.86	52.49	2.65	45.82	53.62	0.56	45.10	52.78	2.12
46.18	50.70	3.12	47.21	51.82	0.97	46.63	51.18	2.19
45.07	53.26	1.68	45.74	54.05	0.21	45.16	53.37	1.47
42.38	55.73	1.89	43.08	56.65	0.27	42.49	55.88	1.63
46.97	50.87	2.16	47.83	51.80	0.37	47.14	51.06	1.80
45.34	52.74	1.92	46.11	53.63	0.25	45.45	52.87	1.68
42.73	54.43	2.84	43.88	55.89	0.23	42.83	54.55	2.62
45.68	52.41	1.91	46.36	53.19	0.44	45.88	52.64	1.48
49.61	48.98	1.41	50.20	49.56	0.24	49.73	49.09	1.17
50.27	48.55	1.18	50.87	49.13	0.00	50.27	48.55	1.18
44.75	54.59	0.65	45.05	54.95	0.00	44.75	54.59	0.65
44.71	53.45	1.84	45.38	54.25	0.36	44.87	53.64	1.49
47.95	49.91	2.14	48.75	50.74	0.52	48.20	50.16	1.64
41.14	51.44	7.42	44.08	55.12	0.79	41.45	51.82	6.73
48.70	49.50	1.81	49.25	50.06	0.68	49.03	49.84	1.14
46.10	53.38	0.52	46.20	53.49	0.31	46.24	53.54	0.21
50.42	49.18	0.39	50.62	49.38	0.00	50.42	49.18	0.39
43.03	55.68	1.30	43.59	56.41	0.00	43.03	55.68	1.30
49.99	49.80	0.20	50.10	49.90	0.00	49.99	49.80	0.20
40.67	58.11	1.22	41.17	58.83	0.00	40.67	58.11	1.22
47.36	51.69	0.94	47.82	52.18	0.00	47.36	51.69	0.94
47.22	52.17	0.61	47.51	52.49	0.00	47.22	52.17	0.61
47.24	52.25	0.51	47.48	52.52	0.00	47.24	52.25	0.51
43.16	48.13	8.71	46.21	51.54	2.25	44.09	49.17	6.75
43.14	50.17	6.68	45.73	53.17	1.10	43.60	50.70	5.70
44.52	47.18	8.30	47.61	50.45	1.94	45.34	48.05	6.61
41.09	49.12	9.79	43.90	52.49	3.60	42.52	50.84	6.64
66.17	16.20	17.64	77.74	19.03	3.23	68.03	16.65	15.31
64.66	16.16	19.18	77.18	19.28	3.54	66.64	16.65	16.71
62.77	15.46	21.78	77.01	18.97	4.02	64.89	15.98	19.13
61.66	20.59	17.76	72.77	24.29	2.94	63.24	21.11	15.65
66.12	15.37	18.51	78.31	18.20	3.49	68.13	15.83	16.04
65.64	15.20	19.16	78.10	18.08	3.82	67.82	15.70	16.48
65.44	14.41	20.15	78.34	17.26	4.40	67.93	14.96	17.10
66.86	15.02	18.11	78.49	17.64	3.87	69.14	15.54	15.32
63.53	17.34	19.13	74.57	20.35	5.08	66.40	18.12	15.48
66.07	15.00	18.94	78.34	17.78	3.88	68.30	15.50	16.19

Fortsetzung Tabelle A 8.1

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
42.41	46.89	10.70	46.41	51.30	2.29	43.32	47.89	8.79
40.51	48.51	10.98	44.66	53.48	1.86	41.20	49.34	9.46
43.61	45.85	10.54	47.89	50.35	1.76	44.32	46.60	9.08
40.07	50.61	9.32	43.17	54.52	2.32	40.95	51.72	7.33
42.78	46.43	10.79	46.50	50.46	3.04	44.01	47.76	8.22
68.34	20.63	11.03	76.09	22.97	0.93	68.92	20.81	10.28
67.66	22.03	10.31	74.08	24.12	1.81	68.80	22.40	8.81
76.54	12.23	11.23	85.08	13.60	1.32	77.46	12.38	10.16
96.12	1.82	2.05	97.67	1.85	0.48	96.58	1.83	1.59
75.81	13.03	11.15	84.38	14.51	1.11	76.58	13.17	10.26
73.30	14.78	11.92	79.90	16.11	3.98	76.08	15.34	8.58
71.12	16.13	12.75	79.35	18.00	2.65	72.85	16.52	10.63
0.00	99.78	0.22	0.00	100.00	0.00	0.00	99.78	0.22
65.47	16.30	18.23	77.01	19.18	3.81	67.66	16.85	15.49

Tabelle A 8.2 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der 60°C Performance-Prüfung Betonserie mit dem Zusatzstoff Rheinischer Trass

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

(Angaben in M.-%)								
SiO_2	CaO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	SiO_2	CaO	Na_2O	SiO_2	CaO	K_2O
2.57	93.52	3.91	2.67	97.33	0.00	2.57	93.52	3.91
2.28	94.07	3.65	2.36	97.64	0.00	2.28	94.07	3.65
1.18	95.46	3.36	1.22	98.78	0.00	1.18	95.46	3.36
3.72	91.02	5.26	3.93	96.07	0.00	3.72	91.02	5.26
2.04	95.07	2.89	2.10	97.90	0.00	2.04	95.07	2.89
1.46	93.94	4.60	1.53	98.47	0.00	1.46	93.94	4.60
4.13	92.67	3.19	4.27	95.73	0.00	4.13	92.67	3.19
69.60	14.71	15.69	81.76	17.28	0.97	70.18	14.83	14.99
71.41	14.50	14.08	82.29	16.71	1.00	72.04	14.63	13.33
70.54	14.60	14.86	81.25	16.82	1.94	71.75	14.85	13.40
68.30	15.52	16.18	78.40	17.81	3.79	70.63	16.05	13.32
70.41	11.48	18.11	84.81	13.83	1.36	71.21	11.61	17.17
73.11	15.44	11.45	79.48	16.78	3.74	75.71	15.99	8.30
69.82	15.35	14.84	78.20	17.19	4.61	72.81	16.01	11.18
71.37	14.17	14.46	82.56	16.39	1.05	72.02	14.30	13.68
71.90	14.44	13.66	80.51	16.17	3.32	74.10	14.88	11.02
69.25	14.70	16.05	81.74	17.35	0.90	69.79	14.81	15.40
70.59	14.95	14.46	79.31	16.80	3.89	73.12	15.49	11.39
69.91	14.08	16.01	80.16	16.14	3.69	72.24	14.55	13.21
71.08	13.97	14.94	79.96	15.72	4.32	73.92	14.53	11.55
72.12	13.59	14.29	83.57	15.74	0.69	72.55	13.67	13.78
70.52	13.79	15.69	81.65	15.97	2.38	72.00	14.08	13.92
71.06	13.87	15.07	82.01	16.00	1.99	72.31	14.11	13.58
74.83	12.63	12.55	82.02	13.84	4.14	77.76	13.13	9.11
70.91	16.14	12.95	77.99	17.75	4.27	73.77	16.79	9.44
74.68	6.22	19.09	88.76	7.40	3.85	77.18	6.43	16.39
70.96	14.04	15.00	82.39	16.30	1.30	71.77	14.20	14.03
72.81	15.20	11.99	82.15	17.15	0.69	73.26	15.30	11.45
73.02	14.52	12.46	82.99	16.50	0.51	73.35	14.58	12.07
70.01	16.58	13.41	77.91	18.45	3.65	72.39	17.14	10.47
70.82	18.20	10.97	77.43	19.90	2.67	72.60	18.66	8.74
70.93	15.82	13.24	78.98	17.62	3.40	73.17	16.32	10.51
72.34	14.86	12.80	80.82	16.60	2.58	74.05	15.21	10.74
70.70	15.83	13.47	78.48	17.57	3.95	73.31	16.42	10.28
67.01	19.63	13.36	75.62	22.15	2.22	68.36	20.03	11.62
69.65	16.77	13.59	77.37	18.63	4.00	72.25	17.40	10.36
70.81	14.61	14.58	81.84	16.88	1.28	71.61	14.77	13.62
70.75	14.38	14.88	79.29	16.11	4.60	73.78	14.99	11.23
67.46	25.06	7.48	71.85	26.69	1.47	68.40	25.41	6.19
68.08	24.71	7.20	72.49	26.31	1.20	68.86	25.00	6.14
67.01	22.72	10.27	73.20	24.82	1.98	68.25	23.14	8.62
67.54	22.92	9.53	73.33	24.89	1.79	68.67	23.31	8.02
67.75	22.90	9.36	73.60	24.87	1.53	68.71	23.22	8.07
69.06	15.05	15.89	79.82	17.39	2.80	70.78	15.42	13.81
70.99	12.74	16.26	81.62	14.65	3.73	73.37	13.17	13.46
70.50	14.33	15.17	78.82	16.02	5.17	73.92	15.02	11.06
67.99	14.20	17.81	80.11	16.73	3.16	69.87	14.59	15.54

Fortsetzung Tabelle A 8.2

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
66.68	23.69	9.63	72.35	25.71	1.94	67.89	24.12	7.98
64.51	24.96	10.53	70.44	27.26	2.30	65.90	25.50	8.61
62.08	28.79	9.14	66.66	30.91	2.43	63.51	29.45	7.04
69.57	24.26	6.18	73.20	25.53	1.28	70.42	24.56	5.03
67.51	21.57	10.92	73.62	23.52	2.86	69.33	22.15	8.52
69.57	19.79	10.63	75.76	21.55	2.69	71.33	20.30	8.37
69.59	19.18	11.23	76.40	21.05	2.54	71.24	19.63	9.13
69.01	19.51	11.48	75.81	21.44	2.75	70.78	20.01	9.21
70.08	19.22	10.70	76.41	20.95	2.64	71.82	19.69	8.49
69.40	19.54	11.06	75.83	21.35	2.81	71.24	20.06	8.71
69.40	18.94	11.66	76.01	20.74	3.25	71.53	19.52	8.96
68.40	20.47	11.13	74.24	22.22	3.54	70.71	21.16	8.13
66.01	23.61	10.38	71.23	25.47	3.29	68.09	24.35	7.56
68.12	20.30	11.58	74.78	22.29	2.94	69.99	20.86	9.15
66.68	21.22	12.11	73.40	23.35	3.24	68.70	21.86	9.44
67.42	20.08	12.50	74.46	22.18	3.36	69.53	20.72	9.75
64.70	23.88	11.43	71.38	26.34	2.28	66.07	24.38	9.55
64.80	24.42	10.77	70.66	26.63	2.71	66.45	25.05	8.50
72.64	12.98	14.38	81.02	14.47	4.51	75.70	13.52	10.78
73.52	13.70	12.78	80.98	15.09	3.93	76.24	14.21	9.55
73.04	13.77	13.19	80.89	15.25	3.86	75.67	14.27	10.06
72.06	13.36	14.58	80.23	14.88	4.89	75.36	13.98	10.66
73.22	13.67	13.10	80.92	15.11	3.97	75.95	14.18	9.86
71.75	14.76	13.50	79.18	16.29	4.53	74.82	15.39	9.79
69.79	15.15	15.06	77.95	16.92	5.13	73.15	15.88	10.97
71.98	14.13	13.88	79.95	15.70	4.35	74.92	14.71	10.38
70.27	14.35	15.38	82.08	16.76	1.15	70.97	14.49	14.54
67.52	16.27	16.20	76.10	18.34	5.56	71.02	17.12	11.86
67.84	16.38	15.78	75.99	18.35	5.66	71.45	17.26	11.29
67.36	16.40	16.24	75.53	18.39	6.08	71.22	17.34	11.44
67.10	16.24	16.67	75.61	18.29	6.10	70.94	17.16	11.90
66.36	16.19	17.45	74.76	18.24	7.00	70.76	17.26	11.98
67.36	15.57	17.07	76.75	17.75	5.50	70.78	16.36	12.86
66.95	15.78	17.27	76.10	17.94	5.97	70.66	16.65	12.69
67.23	15.97	16.80	75.94	18.03	6.02	71.02	16.86	12.11
65.64	16.22	18.14	74.62	18.44	6.94	69.90	17.28	12.82
66.37	16.84	16.79	74.63	18.94	6.44	70.40	17.86	11.74
67.34	15.71	16.95	75.98	17.72	6.30	71.33	16.64	12.04
69.41	13.99	16.60	81.24	16.38	2.38	70.85	14.29	14.87
71.01	14.61	14.38	79.09	16.27	4.64	74.10	15.25	10.65
68.96	16.07	14.97	77.65	18.09	4.26	71.67	16.70	11.63

Tabelle A 8.3 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der 60°C Performance-Prüfung Betonserie mit dem Zusatzstoff Italienischer Trass I

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

(Angaben in M.-%)								
SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
70.26	14.76	14.97	81.57	17.14	1.29	71.06	14.93	14.02
65.92	23.05	11.03	72.95	25.51	1.55	66.86	23.38	9.77
67.35	20.71	11.95	75.25	23.14	1.62	68.34	21.01	10.65
66.24	21.78	11.97	73.96	24.32	1.71	67.28	22.12	10.60
65.76	21.95	12.29	73.88	24.66	1.46	66.63	22.24	11.14
63.69	23.59	12.72	71.63	26.53	1.84	64.75	23.99	11.26
66.87	19.10	14.03	76.03	21.72	2.25	68.22	19.49	12.29
67.69	16.70	15.61	78.35	19.33	2.32	69.08	17.04	13.89
64.30	23.63	12.07	71.78	26.38	1.84	65.38	24.02	10.60
66.21	21.07	12.73	74.55	23.72	1.73	67.24	21.39	11.37
63.44	25.80	10.76	70.01	28.47	1.52	64.33	26.16	9.51
63.03	25.74	11.23	69.96	28.56	1.48	63.88	26.08	10.03
62.19	26.76	11.05	68.74	29.57	1.68	63.15	27.17	9.68
62.85	25.65	11.50	69.89	28.53	1.59	63.76	26.03	10.21
64.51	25.72	9.77	70.37	28.06	1.57	65.45	26.10	8.45
65.50	22.71	11.79	72.95	25.29	1.77	66.55	23.07	10.37
64.02	24.46	11.51	71.06	27.16	1.78	65.07	24.86	10.07
66.35	22.42	11.23	73.59	24.86	1.54	67.29	22.73	9.98
67.58	21.16	11.26	74.88	23.45	1.67	68.61	21.49	9.91
65.22	23.06	11.73	72.64	25.68	1.68	66.21	23.41	10.38
65.72	21.34	12.94	74.17	24.08	1.76	66.76	21.67	11.57
64.74	21.97	13.29	73.30	24.88	1.82	65.79	22.33	11.88
64.94	23.08	11.99	72.61	25.80	1.58	65.87	23.41	10.72
63.99	24.08	11.93	71.58	26.94	1.47	64.84	24.40	10.76
64.39	24.16	11.45	71.64	26.88	1.48	65.25	24.49	10.26
64.31	25.54	10.15	70.86	28.14	1.00	64.89	25.77	9.33
66.11	21.45	12.44	74.16	24.06	1.78	67.17	21.80	11.03
65.81	23.35	10.84	72.60	25.75	1.64	66.81	23.70	9.49
64.95	23.76	11.28	72.22	26.42	1.36	65.76	24.06	10.19
66.28	21.31	12.41	74.48	23.94	1.58	67.23	21.61	11.16
63.88	23.97	12.15	71.38	26.78	1.84	64.95	24.37	10.68
64.17	24.27	11.56	71.24	26.95	1.81	65.23	24.67	10.10
69.93	18.21	11.85	77.76	20.25	1.99	71.21	18.54	10.25
64.32	22.49	13.19	72.34	25.29	2.37	65.70	22.98	11.32
67.71	20.33	11.97	74.87	22.48	2.65	69.37	20.83	9.81
62.97	23.95	13.08	70.91	26.97	2.12	64.18	24.41	11.41
63.40	24.40	12.20	70.82	27.26	1.92	64.51	24.83	10.66
65.90	21.09	13.00	74.21	23.75	2.04	67.12	21.48	11.40
62.68	24.84	12.48	70.25	27.84	1.91	63.76	25.27	10.96
66.64	22.74	10.62	72.94	24.89	2.17	67.99	23.20	8.81
63.66	23.82	12.53	71.32	26.68	2.00	64.81	24.25	10.94
63.97	24.15	11.88	71.41	26.96	1.63	64.91	24.51	10.58
62.09	24.35	13.56	69.83	27.39	2.79	63.67	24.97	11.36
62.48	24.63	12.89	70.25	27.70	2.05	63.64	25.09	11.27

Fortsetzung Tabelle A 8.3

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
65.61	22.09	12.30	73.45	24.73	1.82	66.70	22.46	10.85
65.13	22.62	12.25	72.90	25.32	1.77	66.18	22.99	10.84
66.81	20.53	12.66	74.77	22.98	2.25	68.17	20.95	10.87
65.26	20.71	14.03	73.79	23.42	2.79	66.91	21.23	11.86
78.50	8.03	13.46	88.50	9.06	2.45	80.25	8.21	11.54
79.25	7.21	13.53	89.38	8.14	2.49	81.04	7.38	11.58
81.19	5.76	13.05	91.18	6.47	2.36	82.93	5.88	11.18
81.79	5.64	12.57	91.59	6.31	2.10	83.36	5.74	10.90
81.45	5.98	12.57	91.21	6.69	2.09	83.00	6.09	10.91
81.21	5.70	13.09	91.23	6.40	2.37	82.96	5.82	11.22
80.86	5.82	13.31	90.83	6.54	2.63	82.80	5.96	11.24
81.48	5.81	12.70	90.95	6.49	2.56	83.40	5.95	10.65
79.30	5.69	15.01	90.55	6.49	2.95	81.41	5.84	12.75
79.98	5.08	14.94	90.95	5.77	3.28	82.35	5.23	12.42
80.34	5.03	14.64	91.01	5.70	3.30	82.74	5.18	12.08
80.95	5.45	13.60	91.26	6.15	2.59	82.86	5.58	11.56
81.16	5.44	13.40	91.45	6.13	2.42	82.94	5.56	11.50
81.16	5.59	13.25	91.46	6.30	2.24	82.80	5.70	11.49
81.49	5.19	13.33	91.74	5.84	2.42	83.28	5.30	11.42
81.67	6.43	11.90	90.74	7.14	2.12	83.26	6.55	10.19
79.37	9.03	11.60	88.50	10.06	1.44	80.41	9.14	10.44
79.15	9.56	11.29	87.87	10.62	1.52	80.24	9.70	10.06
79.50	8.88	11.62	88.35	9.87	1.77	80.79	9.03	10.18
78.98	9.59	11.43	87.77	10.66	1.57	80.11	9.73	10.16
79.70	9.04	11.26	88.65	10.06	1.29	80.64	9.15	10.21
80.03	8.48	11.49	89.14	9.45	1.41	81.06	8.59	10.35
79.14	9.02	11.84	88.45	10.08	1.47	80.19	9.14	10.67
80.68	7.57	11.74	89.75	8.43	1.83	82.03	7.70	10.27
81.08	7.53	11.39	90.19	8.37	1.43	82.14	7.63	10.23
81.05	7.68	11.26	90.00	8.53	1.47	82.14	7.79	10.07
80.25	8.06	11.69	89.53	8.99	1.49	81.33	8.17	10.50
80.97	7.80	11.23	89.78	8.65	1.57	82.13	7.91	9.96
81.44	7.41	11.15	90.17	8.21	1.63	82.65	7.52	9.82
73.11	16.34	10.55	80.46	17.98	1.56	74.16	16.58	9.27
82.11	6.83	11.05	90.86	7.56	1.58	83.31	6.93	9.76
81.98	7.55	10.47	90.30	8.32	1.38	83.02	7.65	9.33
82.77	6.64	10.59	91.26	7.32	1.42	83.85	6.72	9.42
81.52	6.13	12.35	91.44	6.87	1.68	82.77	6.22	11.01
81.61	7.46	10.92	90.05	8.23	1.72	82.91	7.58	9.51
64.34	24.92	10.73	71.17	27.57	1.25	65.08	25.21	9.71
63.66	25.57	10.77	70.41	28.28	1.31	64.42	25.87	9.70
65.17	25.34	9.48	70.86	27.55	1.58	66.14	25.72	8.15
62.02	31.63	6.35	65.78	33.55	0.67	62.41	31.83	5.76
65.30	25.38	9.32	71.16	27.66	1.19	66.02	25.66	8.32
54.84	43.49	1.68	55.77	44.23	0.00	54.84	43.49	1.68
55.71	42.95	1.34	56.46	43.54	0.00	55.71	42.95	1.34
60.07	35.55	4.38	62.64	37.07	0.29	60.24	35.65	4.11
62.87	24.02	13.11	70.74	27.03	2.23	64.14	24.51	11.35
64.89	22.83	12.29	72.55	25.53	1.92	66.02	23.23	10.75
64.13	23.48	12.39	71.83	26.30	1.88	65.22	23.88	10.90
59.52	28.22	12.26	66.22	31.40	2.38	60.82	28.84	10.34

Fortsetzung Tabelle A 8.3

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
62.16	29.63	8.21	67.08	31.97	0.95	62.72	29.89	7.39
54.43	43.89	1.68	55.23	44.53	0.24	54.56	43.99	1.45
55.98	42.11	1.91	56.96	42.85	0.19	56.09	42.19	1.73
52.78	45.98	1.24	53.44	46.56	0.00	52.78	45.98	1.24
53.20	45.20	1.60	53.94	45.83	0.23	53.32	45.31	1.37
53.27	44.98	1.75	54.10	45.69	0.21	53.37	45.07	1.55
65.43	25.77	8.80	70.97	27.95	1.08	66.09	26.03	7.88
64.16	24.69	11.15	71.18	27.39	1.44	65.00	25.01	9.99
62.36	28.27	9.37	68.37	31.00	0.64	62.72	28.44	8.84
62.70	27.68	9.62	68.67	30.32	1.01	63.29	27.94	8.77
64.58	24.40	11.02	71.60	27.05	1.35	65.37	24.70	9.92
64.62	24.31	11.07	71.68	26.96	1.36	65.43	24.61	9.97
42.64	41.40	15.95	50.50	49.03	0.47	42.81	41.56	15.62
64.98	23.72	11.30	72.14	26.33	1.53	65.89	24.05	10.06
55.23	44.56	0.21	55.35	44.65	0.00	55.23	44.56	0.21
50.65	49.17	0.18	50.74	49.26	0.00	50.65	49.17	0.18
47.80	52.01	0.18	47.89	52.11	0.00	47.80	52.01	0.18
37.10	59.39	3.51	38.32	61.34	0.35	37.23	59.59	3.19
48.74	48.41	2.85	49.98	49.64	0.38	48.93	48.59	2.48
52.93	42.80	4.28	55.10	44.55	0.35	53.11	42.94	3.95
28.75	68.10	3.15	29.36	69.55	1.09	29.06	68.84	2.10
58.43	37.46	4.11	60.38	38.72	0.91	58.94	37.79	3.26
46.05	51.52	2.43	47.19	52.81	0.00	46.05	51.52	2.43
43.98	51.61	4.42	45.75	53.69	0.56	44.21	51.88	3.90
40.01	58.01	1.98	40.82	59.18	0.00	40.01	58.01	1.98
61.45	28.08	10.47	67.66	30.92	1.42	62.25	28.45	9.30
54.23	39.50	6.28	57.56	41.93	0.51	54.49	39.69	5.82
60.33	31.94	7.73	64.52	34.16	1.32	61.08	32.34	6.58
57.86	29.80	12.34	64.16	33.04	2.80	59.36	30.57	10.07
58.10	28.38	13.52	64.72	31.62	3.67	60.07	29.35	10.58
59.49	27.77	12.75	66.29	30.95	2.76	61.00	28.47	10.53

Tabelle A 8.4 Chemische Zusammensetzung der AKR-Gele der 60°C Performance-Prüfung Betonserie mit dem Zusatzstoff Italienischer Trass II

normiert (auf $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ bzw. $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{K}_2\text{O}$)

(Angaben in M.-%)								
SiO_2	CaO	$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	SiO_2	CaO	Na_2O	SiO_2	CaO	K_2O
70.26	14.76	14.97	81.57	17.14	1.29	71.06	14.93	14.02
73.18	22.27	4.55	76.39	23.24	0.37	73.44	22.34	4.21
72.63	22.83	4.54	75.83	23.83	0.34	72.87	22.90	4.23
81.64	14.24	4.12	84.65	14.76	0.58	82.10	14.32	3.58
71.40	25.29	3.31	73.48	26.02	0.50	71.75	25.41	2.84
70.59	21.64	7.78	76.24	23.37	0.38	70.84	21.71	7.45
70.98	21.72	7.30	76.07	23.28	0.65	71.41	21.85	6.74
71.09	22.24	6.67	75.81	23.72	0.47	71.40	22.34	6.26
70.32	21.88	7.80	76.00	23.65	0.35	70.55	21.95	7.50
70.65	21.41	7.94	76.37	23.14	0.49	70.98	21.51	7.52
70.29	22.73	6.98	75.19	24.32	0.50	70.62	22.84	6.54
69.30	23.56	7.14	74.42	25.30	0.28	69.48	23.62	6.90
71.02	22.34	6.64	75.72	23.82	0.46	71.33	22.44	6.23
72.69	21.53	5.78	76.93	22.78	0.29	72.89	21.58	5.52
70.43	22.59	6.98	75.33	24.16	0.50	70.76	22.70	6.54
70.73	23.52	5.74	74.83	24.89	0.29	70.92	23.59	5.49
70.30	22.68	7.02	75.20	24.26	0.54	70.66	22.79	6.55
68.80	25.64	5.57	72.61	27.06	0.33	69.02	25.72	5.27
69.80	24.42	5.78	73.57	25.74	0.68	70.26	24.58	5.16
74.09	20.19	5.71	77.93	21.24	0.83	74.68	20.36	4.96
73.30	20.81	5.89	77.26	21.93	0.81	73.87	20.97	5.17
73.52	23.25	3.22	75.80	23.97	0.23	73.69	23.30	3.01
72.20	24.23	3.57	74.58	25.03	0.39	72.47	24.32	3.21
72.29	23.14	4.57	75.33	24.11	0.56	72.68	23.26	4.05
72.65	22.91	4.45	75.64	23.85	0.51	73.00	23.02	3.98
72.12	23.57	4.32	75.11	24.55	0.34	72.36	23.65	4.00
73.93	22.77	3.29	76.25	23.49	0.26	74.12	22.83	3.05
73.60	22.83	3.58	75.87	23.53	0.59	74.02	22.96	3.02
73.86	20.13	6.02	78.08	21.28	0.64	74.31	20.25	5.44
73.25	20.93	5.83	77.33	22.09	0.58	73.65	21.04	5.31
73.41	21.05	5.54	77.30	22.17	0.53	73.78	21.16	5.06
71.66	22.77	5.58	75.57	24.01	0.42	71.95	22.86	5.20
70.84	23.39	5.77	74.81	24.70	0.48	71.16	23.50	5.34
73.79	20.16	6.05	78.12	21.34	0.54	74.17	20.26	5.57
75.88	19.52	4.60	79.12	20.35	0.53	76.27	19.62	4.12
72.00	21.89	6.11	76.19	23.16	0.65	72.45	22.02	5.53
74.37	20.49	5.14	77.72	21.41	0.86	74.99	20.66	4.35
73.38	21.87	4.75	76.63	22.83	0.54	73.76	21.98	4.26
72.97	22.23	4.80	76.09	23.18	0.72	73.48	22.38	4.14
72.96	22.24	4.81	76.28	23.25	0.48	73.29	22.34	4.37
69.40	28.18	2.43	70.89	28.78	0.33	69.62	28.27	2.11
71.07	26.56	2.37	72.58	27.13	0.29	71.27	26.64	2.09
71.11	26.77	2.12	72.41	27.26	0.33	71.34	26.86	1.80
71.17	26.86	1.97	72.60	27.40	0.00	71.17	26.86	1.97
69.89	28.36	1.75	71.14	28.86	0.00	69.89	28.36	1.75
61.44	36.09	2.47	62.69	36.83	0.49	61.73	36.27	2.00

Fortsetzung Tabelle A 8.4

SiO ₂	CaO	Na ₂ O + K ₂ O	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	K ₂ O
63.85	34.13	2.02	64.91	34.69	0.40	64.10	34.26	1.63
69.89	27.38	2.73	71.55	28.03	0.42	70.18	27.49	2.33
69.77	27.88	2.35	71.26	28.48	0.26	69.94	27.95	2.10
72.49	25.38	2.13	73.89	25.87	0.24	72.67	25.44	1.89
71.13	26.25	2.62	72.78	26.86	0.36	71.38	26.35	2.27
66.08	31.50	2.42	67.41	32.13	0.46	66.38	31.64	1.98
67.91	30.07	2.01	69.11	30.60	0.29	68.11	30.16	1.74
67.79	30.04	2.17	69.11	30.62	0.27	67.97	30.12	1.91
68.93	28.83	2.24	70.20	29.36	0.44	69.23	28.95	1.82
65.27	32.80	1.94	66.25	33.29	0.46	65.56	32.95	1.49
69.74	27.75	2.51	71.17	28.32	0.50	70.08	27.89	2.03
69.98	27.95	2.07	71.27	28.46	0.27	70.17	28.02	1.81
70.66	27.00	2.34	72.08	27.54	0.38	70.93	27.10	1.97
73.53	24.03	2.44	75.04	24.52	0.43	73.84	24.13	2.02
72.24	25.47	2.29	73.93	26.07	0.00	72.24	25.47	2.29
72.54	25.26	2.21	73.91	25.73	0.35	72.79	25.34	1.87
45.95	44.44	9.61	50.00	48.36	1.63	46.65	45.12	8.23
48.72	35.78	15.50	56.49	41.49	2.03	49.58	36.42	14.00
52.14	33.68	14.18	59.36	38.35	2.29	53.21	34.37	12.42
58.43	32.67	8.90	62.89	35.16	1.95	59.50	33.27	7.22
31.90	61.70	6.40	33.63	65.06	1.31	32.30	62.48	5.22
30.35	62.90	6.75	32.29	66.94	0.76	30.57	63.36	6.08
32.79	65.12	2.09	33.49	66.51	0.00	32.79	65.12	2.09
29.70	64.42	5.89	31.29	67.87	0.84	29.93	64.94	5.13
20.71	76.01	3.29	21.29	78.15	0.55	20.82	76.42	2.76
35.91	57.84	6.25	37.99	61.20	0.81	36.19	58.29	5.52
19.49	76.89	3.62	20.00	78.91	1.09	19.70	77.71	2.59
29.22	68.77	2.01	29.45	69.30	1.26	29.59	69.64	0.77
22.47	75.65	1.87	22.75	76.59	0.66	22.62	76.15	1.23
42.89	55.78	1.33	43.29	56.31	0.40	43.06	56.00	0.94
24.09	73.91	2.00	24.42	74.93	0.65	24.24	74.39	1.37
25.89	72.54	1.57	26.30	73.70	0.00	25.89	72.54	1.57
37.45	60.11	2.44	38.12	61.19	0.69	37.70	60.52	1.78
45.63	51.74	2.63	46.63	52.87	0.50	45.86	52.00	2.15
20.66	74.89	4.44	21.51	77.97	0.51	20.77	75.27	3.97
55.63	42.49	1.89	56.36	43.05	0.58	55.95	42.73	1.32
35.95	60.15	3.90	37.11	62.07	0.82	36.24	60.63	3.13
39.69	57.17	3.14	40.58	58.45	0.97	40.07	57.71	2.22
13.02	85.20	1.78	13.19	86.30	0.51	13.09	85.62	1.29
30.93	64.52	4.55	31.96	66.68	1.36	31.34	65.38	3.28
29.77	65.15	5.08	30.95	67.74	1.32	30.15	65.99	3.87
35.60	55.86	8.54	38.01	59.65	2.34	36.40	57.11	6.49
29.77	66.75	3.48	30.61	68.62	0.77	30.00	67.26	2.75
33.42	58.41	8.16	35.50	62.04	2.46	34.22	59.80	5.98
21.44	71.84	6.73	22.43	75.16	2.42	21.94	73.54	4.52
40.40	53.77	5.83	42.22	56.20	1.58	41.02	54.60	4.38

Tabelle A 9 Ergebnisse der Auslaugungsversuche nach ASTM C311 [87]

Zusatzstoff	Tage	0 d vor Auslaugung			28 d nach Auslaugung		
		Na ₂ O _{aq} [M.-%]	Na ₂ O [M.-%]	K ₂ O [M.-%]	Na ₂ O _{aq} [M.-%]	Na ₂ O [M.-%]	K ₂ O [M.-%]
Rhein. Trass		6.10	4.15	2.97	1.36	0.24	1.70
Ital. Trass I		4.10	1.29	4.28	1.72	0.08	2.50
Ital. Trass II		4.04	1.05	4.28	1.24	0.07	1.78
Hüttensand		0.74	0.37	0.56	0.18	0.02	0.24
Flugasche		1.95	0.72	1.87	0.38	0.03	0.54

Die Alkaligehalte wurden an den festen Phasen mittels AAS bestimmt.

9 Lebenslauf

Lebenslauf

Philip Gregor Bürgisser, geboren am 1.10.1974 in Basel

Beruflicher Werdegang

Oktober 2006 – Februar 2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe VII.1 für Baustoffe an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin
April 2007 – April 2011	Doktorand am Fachbereich für Geologische Wissenschaften der Freien Universität Berlin
Februar 2006 – Juni 2006	Geologe in einem Ingenieurbüro, Basel

Schulische Ausbildung

April 2001 – Oktober 2005	Universität Basel, Erdwissenschaften, Abschluss Diplom
Oktober 1997- April 2001	Universität Basel, Chemie, 1. Vordiplom
August 1991 – September 1997	Minerva Schulen Basel, Gymnasium, Eidgen. Matur Typus C
April 1987 – Juni 1991	Minerva Schulen Basel, Realschule