

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung
- Fachgebiet Gesteinshüttenkunde -

Verwendung von Steinkohlenflugasche zur Vermeidung
einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion im Beton

Karl Schmidt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr. h.c. Jochen Stark,
Bauhaus-Universität Weimar

Die Dissertation wurde am 29.04.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
am 13.07.2009 angenommen.



Karl Schmidt sen., ohne Titel, 1967,
Schmiedeeisen, Höhe 52 cm

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	8
2	STAND DES WISSENS	10
2.1	Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) und Lösungsansätze gegen AKR-Schäden im Beton.....	10
2.1.1	Voraussetzungen für AKR-Schäden	10
2.1.2	Mechanismus der Betonschädigung	11
2.1.3	Eigenschaften des Alkali-Kieselsäure Gels	12
2.1.4	Lösungsansätze zur Vermeidung von AKR-Schäden	15
2.2	Charakteristische Eigenschaften der Flugasche im Hinblick auf eine AKR	17
2.2.1	Entstehung	17
2.2.2	Korngrößenverteilung und Kornform.....	17
2.2.3	Mineralogische und chemische Zusammensetzung.....	17
2.3	Puzzolanische Reaktion der Flugasche.....	18
2.3.1	Chemische Reaktion	18
2.3.2	Löslichkeit des Flugascheglasses	19
2.3.3	Reaktionsgeschwindigkeit	19
2.3.4	Alkalibindung	20
2.4	AKR-Wirksamkeit der Flugasche.....	22
2.5	Betone mit Flugasche - Langzeitverhalten und Beispiele aus der Praxis.....	23
2.6	Berücksichtigung von Flugasche in Regelwerken.....	24
2.6.1	National.....	24
2.6.2	International.....	24
3	ZIELE DER ARBEIT	26
4	BETONE BZW. ZEMENTSTEINE UND DEREN AUSGANGSSTOFFE.....	29
4.1	Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen.....	29
4.2	Betone mit Duranglas als künstliche Gesteinskörnung	31
4.3	Zementstein.....	32
4.4	Nomenklatur	33
4.5	Herstellung und Lagerung	34
5	UNTERSUCHUNGSMETHODEN	35

6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	36
6.1	Porenlösung	36
6.1.1	Validierung des Porenlösungsauspressversuchs.....	37
6.1.2	Zusammensetzung der Porenlösung von Zementstein mit reinem Portlandzement.....	42
6.1.3	Zusammensetzung der Porenlösung von Zementstein mit Portlandzement und Flugasche	49
6.1.4	Porenlösung in Betonen mit Grauwacke als reaktiver Gesteinskörnung.....	56
6.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Porenlösungsuntersuchungen	66
6.2	Betonversuche mit Duranglas	67
6.2.1	Einfluss des Duranglasgehaltes auf die Dehnung.....	67
6.2.2	Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf das Dehnungsverhalten	67
6.2.3	Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf die Porenlösungszusammen- setzung	71
6.2.4	Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure Reaktion der Duranglasbetone.....	74
6.2.5	Korrelation der Alkalität mit dem Dehnungsverhalten.....	77
6.2.6	Vergleich der Biegezugfestigkeit und der Porosität mit dem Dehnungsverhalten.....	80
6.2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse für Beton mit Duranglas.....	84
6.3	Betonversuche mit natürlichen Gesteinskörnungen	85
6.3.1	Validierung des Betonversuchs unter beschleunigenden Bedingungen	85
6.3.2	Einfluss der Rezeptur von Normalbetonen mit Portlandzement auf eine schädigende AKR.....	91
6.3.3	Einfluss der Betonzusatzstoffe auf eine schädigende AKR.....	93
6.3.4	Einfluss der Flugaschemenge und -art auf eine schädigende AKR.....	94
6.3.5	AKR in selbstverdichtenden Betonen.....	100
6.3.6	Zusammenfassung der Ergebnisse für natürliche Gesteinskörnungen	102
6.4	Zusammenhang Porenlösung und Betonverhalten	103
6.4.1	Grauwacke	103
6.4.2	Splitt/Kies Oberrhein	106
6.4.3	Gemeinsame Berücksichtigung der (Na ⁺ +K ⁺)-Konzentration und der vorhandenen Gesamtalkalimenge aus Portlandzement	107
6.4.4	Zusammenfassung der Korrelation zwischen Porenlösung und Betonschaden.....	109
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	110
8	ANERKENNUNG.....	112

LITERATUR.....	113
NORMEN UND RICHTLINIEN.....	119
ANHANG 1: CHARAKTERISIERUNG DER AUSGANGSSTOFFE.....	121
1 ZEMENTE UND BETONZUSATZSTOFFE (FLUGASCHE UND KALKSTEIN- MEHL).....	121
2 GESTEINSKÖRNUNGEN	124
2.1 Alkalireaktivität	124
2.2 Porosität	125
2.3 Petrographische Charakterisierung.....	126
2.4 Petrographie.....	128
2.4.1 Grauwacke	128
2.4.2 Splitt / Kies Oberrhein	132
2.5 Röntgenbeugungsanalyse.....	145
2.6 Chemische Zusammensetzung.....	146
ANHANG 2: KENNWERTE DER BETONE	147
1 CHARAKTERISTISCHE KENNWERTE ZUR BETONZUSAMMENSETZUNG	147
2 FRISCH- UND FESTBETONEIGENSCHAFTEN DER BETONE	148
ANHANG 3: UNTERSUCHUNGSMETHODEN	150
1 FRISCH- UND FESTBETONPRÜFUNGEN.....	150
1.1 Frischbetoneigenschaften.....	150
1.2 Festbetoneigenschaften.....	150
2 PRÜFUNG AUF ALKALI-KIESELSÄURE REAKTION	150
2.1 Prüfung der potentiellen Alkalireaktivität der Gesteinskörnungen (Magdeburger Schnelltest).....	150
2.2 Prüfung in der 40°C Nebelkammer, in 20°C / 100 % r.F. und im Freilager	150
2.3 Prüfung der Betone mit Duranglas bei 20 / 40°C über Wasser	151
3 MINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN.....	151

3.1	Durchlichtmikroskopische Untersuchungen.....	151
3.2	Röntgenbeugung mit Rietveld-Analyse.....	152
4	CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN	152
5	PHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN	152
5.1	Dichte.....	152
5.2	Korngrößenverteilung.....	152
5.3	Porengrößenverteilung.....	153
6	ZUSAMMENSETZUNG DER PORENLÖSUNG	154
6.1	Probekörper, Lagerung und Prüftermine	154
6.2	Auspressverfahren	154
6.3	Analyse der Porenlösung	156
7	OPTISCHE MIKROSKOPIE AM BETON	156
ANHANG 4: DEHNUNG BZW. RISSBILDUNG DER BETONE		157
1	PRÜFUNG MIT DER 40°C NEBELKAMMER	157
1.1	Normalbetone.....	157
1.1.1	Normalbetone mit Grauwacke als reaktive Gesteinskörnung.....	157
1.1.2	Normalbetone mit Splitt bzw. Kies Oberrhein	160
1.2	Selbstverdichtende Betone.....	162
2	PRÜFUNG MIT DEM BETONVERSUCH BEI 60°C ÜBER WASSER.....	163
3	PRÜFUNG VON BETONEN MIT DURANGLAS BEI 40 BZW. 20°C ÜBER WASSER.....	164
ANHANG 5: PORENLÖSUNG.....		168
1	CHEM. ZUSAMMENSETZUNG DER PORENLÖSUNG DER BETONE.....	168
1.1	Normalbetone mit Grauwacke	168
1.2	Normalbetone mit Splitt bzw. Kies Oberrhein	175
1.3	Selbstverdichtende Betone mit Grauwacke bzw. Splitt Oberrhein.....	179
1.4	Normalbeton mit calcitischem Kies.....	179

1.5	Normalbeton mit Duranglas.....	180
2	CHEM. ZUSAMMENSETZUNG DER PORENLÖSUNG DER ZEMENTSTEINE	182

1 Einleitung

Inwieweit eine schädigende Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) im Beton durch den Einsatz von Flugasche zielsicher vermieden werden kann wird seit langem kontrovers diskutiert. So ist in einigen internationalen Normen und Richtlinien die Verwendung von Flugasche zu diesem Zweck bereits seit vielen Jahren zulässig [CSA 06, CUR 02]. In manchen Veröffentlichungen wird der Flugasche dagegen sogar ein AKR-verstärkender Effekt zu geschrieben [Thom 96]. Zur Beurteilung der Ergebnisse aus der Literatur bedarf es aber einer differenzierten Betrachtung. So sind offensichtlich neben der Feinheit vor allem ein niedriger Gehalt an Calciumoxid und Alkalien, Natrium bzw. Kalium, die entscheidenden Faktoren für eine hohe Effizienz von Flugasche bei der Vermeidung einer AKR [Star 02]. Steinkohlenflugaschen, die als Betonzusatzstoff den Anforderungen der DIN EN 450-1 entsprechen, sind in ihrem Gehalt an reaktionsfähigem Calciumoxid auf ≤ 10 M.-% und im Gesamtgehalt an Alkalien auf ≤ 5 M.-% begrenzt. Die Feinheit ist durch einen Rückstand von maximal 40 M.-% auf dem 0,045 mm Sieb gekennzeichnet. Diese Grenzwerte entsprechen den Kriterien wonach Flugaschen, z.B. in Nordamerika, als wirksam hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton eingestuft werden können.

In Deutschland ist die Verwendung alkalireaktiver Gesteinskörnungen bislang nur in Kombination mit NA-Zementen erlaubt. Dabei handelt es sich um Portlandzemente oder Hochofenzemente mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt. Dass die Verwendung von flugaschehaltigen Bindemitteln bisher in Deutschland nicht als weitere Möglichkeit eine Schadreaktion zu vermeiden in Betracht gezogen wird, liegt daran, dass die Leistungsfähigkeit der Flugasche mit den in Deutschland verfügbaren Betonausgangsstoffen bisher noch nicht systematisch untersucht wurde.

Die Gründe für die hohe Wirksamkeit der Flugasche werden sowohl auf einen „passiven“ als auch auf einen „aktiven“ Effekt zurückgeführt. Der „passive“ Effekt beruht auf einer Verringerung des Alkaligehalts aus Portlandzementklinker im Beton und damit einer Verdünnung der Alkalikonzentration in der Porenlösung bei Austausch von Portlandzementklinker durch Flugasche. Der „aktive“ Effekt wird zum einen mit der Erhöhung der Gefügedichtigkeit in der Zementsteinmatrix und damit einer Verlangsamung des Transports von Alkalien bzw. Wasser zum Reaktionsort und zum anderen mit der chemischen Bindung von Alkalien in die puzzolanischen Reaktionsprodukte der Flugasche erklärt.

Diese Gründe werden in der Regel für die gegenüber anderen Betonzusatzstoffen hohe Wirksamkeit der Flugasche angegeben. Zu nennen ist dabei z.B. das Kalksteinmehl oder auch der latent hydraulische Hüttsand, der zwar zusätzlich zu einer Verdichtung des Gefüges führt, der sich aber ebenso wie das inerte Kalksteinmehl nur verdünnend auf die Alkalität der Porenlösung auswirkt [VDZ 03].

Die Mechanismen der Flugaschewirkung lassen sich dementsprechend zusammenfassen:

- Verringerung des Anteils wirksamer Alkalien entsprechend der Zementaustauschrate (Verdünnung, passiv)
- Chemische Bindung von Alkalien in die Reaktionsprodukte der Flugasche (aktiv)
- Reduzierung der Ionendiffusion (Transport, aktiv)

Die vorliegende Arbeit ist aus den Ergebnissen mehrerer Forschungsvorhaben, die in den letzten Jahren am cbm, Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München, bearbeitet wurden, erstellt worden [Hein 06, Hein 08a und Hein 08b]. Die Ergebnisse gelten für Betone mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen.

Es wurden Betonversuche in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie Teil 3 [DAfStB 07] mit einem Schwerpunkt auf flugaschehaltigen Bindemittelkombinationen durchgeführt, da bisher allein die Ergebnisse aus Betonversuchen den Nachweis ermöglichen, ob eine Rezeptur mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung eine schädigende AKR ausbildet oder nicht. Damit eine evtl. Schädigung der Betone differenzierter eingestuft werden kann, wurde zusätzlich mit Hilfe von Lichtmikroskopie an Dünnschliffen das mikrostrukturelle Schadensbild der Betone dokumentiert.

Um die Fähigkeit der Flugaschen zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion optimal ausnützen zu können, ist es notwendig ihre Wirkungsweise im Beton zu verstehen. Dazu erfolgte, über vergleichende Betonversuche hinausgehend, eine systematische Analyse der Zusammensetzung der Porenlösung der Betone und stichpunktartig die Erfassung der Porengrößenverteilung in den Betonen. Damit kann der Einfluss der verschiedenen Bindemittelkombinationen auf den chemischen Angriff auf die Gesteinskörnungen und auf die Transporteigenschaften des Betons zumindest qualitativ erfasst werden. Dies ermöglicht es, die aus den Betonversuchen erhaltenen Ergebnisse, Dehnung am Balken und Rissbildung am Würfel, zu interpretieren.

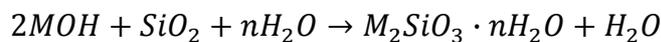
Die folgenden Untersuchungsergebnisse zeigen, dass bei Verwendung von Flugaschen entsprechend DIN EN 450 kein AKR-wirksamer Alkalieintrag in den Beton stattfindet. Es konnte nachgewiesen werden, dass bei ausreichenden Flugaschegehalten im Bindemittel eine schädigende AKR in Betonen mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen vermieden werden kann.

2 Stand des Wissens

2.1 Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) und Lösungsansätze gegen AKR-Schäden im Beton

2.1.1 Voraussetzungen für AKR-Schäden

Eine Alkali-Kieselsäure Reaktion (AKR) findet in jedem Beton mit Gesteinskörnungen mit reaktiver Kieselsäure statt. Bei der chemischen Reaktion der reaktiven Kieselsäure (SiO_2) aus dem Gestein mit den in der Porenlösung des Betons gelösten Alkalien Natrium (Na^+) und Kalium (K^+) entsteht dann ein so genanntes Alkali-Kieselsäure-Gel, siehe Formel 1 und Abbildung 1, links.



M : Na^+ oder K^+

Formel 1: Reaktionsschema der Alkali-Kieselsäure Reaktion

Diese Reaktion führt per se nicht zu einer Schädigung des Betons. Durch das Anätzen der Oberflächen der Gesteinskörner kann sogar ein verbesserter Verbund zwischen Gesteinskorn und Matrix entstehen [Spru 98]. Kritisch wird es erst dann, wenn das Alkali-Kieselsäure-Gel in ausreichender Menge entsteht und dabei unter Volumenzunahme Wasser aufnimmt. Dabei werden im Beton so genannte Quellspannungen aufgebaut. Bei Überschreiten der Gefügefestigkeit des Betons kommt es dann zu einer Rissbildung (Abbildung 1, rechts), die erhebliche Schäden an Betonbauwerken verursachen kann, siehe Abbildung 2.

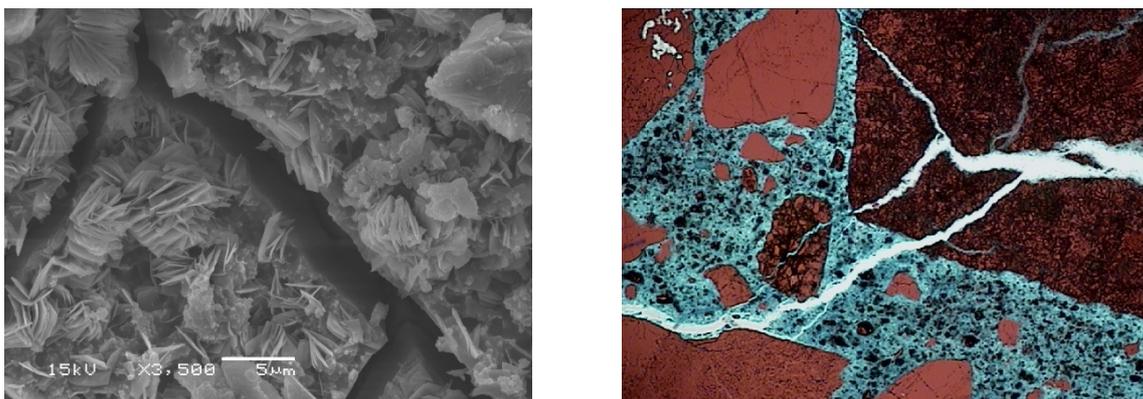


Abbildung 1: Mikroskopische Erscheinung der AKR; links: amorphes AKR-Gel mit kristallinen Aufwachsungen unter dem REM, Bruchstück; rechts: gesprengtes Gesteinskorn mit Ausbreitung der Risse in das Betongefüge unter dem Lichtmikroskop, Dünnschliff, Bildbreite = 2,5 mm, Kombination von UV - und Durchlicht.



Abbildung 2: Wasserauffangbecken im Olympiastadion von Montreal, Kanada, 2007.

2.1.2 Mechanismus der Betonschädigung

Die Vorgänge, die im Laufe der Alkali-Kieselsäure Reaktion zur Schädigung des Betongefüges führen, werden nach Sprung und Sylla folgendermaßen beschrieben, [Spru 98]:

Ausgehend von der Oberfläche des reaktiven Gesteinskorns bilden die Alkalien aus der Porenlösung des Betons mit dem aus dem Gesteinskorn gelösten Silizium ein quellfähiges Alkali-Kieselsäure Gel, das bei Austausch der Alkali-Ionen durch Calcium-Ionen in nicht-quellfähige Alkali-Calcium-Silikat-Hydrate umgewandelt wird. Dieser erste Reaktionsraum dient im weiteren Verlauf der AKR als semi-permeable Membran, durch die zwar Alkalien und Wasser weiter zum Reaktionsort eindringen, das im Weiteren entstehende Alkali-Kieselsäure Gel aber nicht herausgelangen kann. Die Wasseraufnahme durch das Alkali-Kieselsäure Gel führt zum Aufbau von Quellspannungen, die, bei Überschreiten der Zugfestigkeit der Gesteinskörnung und/oder der Betonmatrix, zu einer Schädigung des Betongefüges führen, siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: Schematischer Schadensmechanismus der Alkali-Kieselsäure Reaktion im Beton [Spru 98]

In der Literatur finden sich u. a. in [Powe 55, Dent 79 und Chat 88] weitere Erklärungsansätze. Dabei werden aber in der Regel immer zwei grundlegende Annahmen getroffen, wie die Alkali-Kieselsäure Reaktion zu einer Schädigung des Betons führt:

- (a): Druckaufbau durch Quellen des Alkali-Kieselsäure Gels bei Wasseraufnahme und/oder
- (b): Aufbau eines osmotischen Drucks durch die Bildung einer semipermeablen Membran zwischen Alkali-Kieselsäure Gel und umgebender Matrix.

Diese Annahmen schließen sich aber nicht gegenseitig aus, ebenso wie beim Schadensmechanismus nach Sprung und Sylla ist eher von einer Kombination dieser beiden Mechanismen auszugehen.

In Versuchen zur Ermittlung der durch eine Alkali-Kieselsäure Reaktion erreichbaren Druckspannungen wurden auf das Quellen des Gels zurückzuführende Spannungen von über 10 N/mm² [Mans 08] und auf osmotische Vorgänge zurückzuführende Spannungen von über 14 N/mm² [Pike 58] gemessen.

2.1.3 Eigenschaften des Alkali-Kieselsäure Gels

Chemische Zusammensetzung

Alkali-Kieselsäure Gele aus geschädigten Betonen weisen eine große Bandbreite möglicher chemischer Zusammensetzungen auf. Dass selbst die Zusammensetzung verschiedener Gele desselben Betons stark variiert, wird Alterungseffekten und dem Abstand des Gels vom reaktiven Gesteinskorn bzw. der Zementsteinmatrix zugeschrieben. Dabei werden die Gele

mit zunehmendem Alter und zunehmender Nähe zur Zementsteinmatrix calciumreicher, aus [Mans 08].

Die von Freyburg und Berninger aus mehr als 100 Analysen erhaltene mittlere Zusammensetzung von Alkali-Kieselsäure Gelen geschädigter Betone ist in Tabelle 1 aufgelistet [Frey 03]. Die mögliche Spannbreite der Gelzusammensetzung zeigen die in [Hou 04] zusammengestellten molaren Verhältnisse von $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / \text{SiO}_2 = 0,05 \dots 0,60$ und von $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 = 0,0 \dots 0,20$.

Tabelle 1: mittlere Zusammensetzung von Alkali-Kieselsäure Gelen aus mehr als 100 Analysen an geschädigten Betonen [Frey 03]

Oxide [M.-%]	Mittlere Gelzusammensetzung
SiO ₂	56,9
CaO	27,8
K ₂ O	11,6
Na ₂ O	4,3

Struktur

Die Struktur der Reaktionsprodukte einer Alkali-Kieselsäure Reaktion (vereinfachend Alkali-Kieselsäure Gel bezeichnet) wird oftmals vereinfachend als gelartig, amorph angenommen. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass der strukturelle Aufbau weit komplexer ist. Die von ²⁹Si-MAS-NMR Untersuchungen gestützte Annahme von Wieker, dass die Struktur von Alkali-Kieselsäure Gelen mit der Struktur des Schichtsilikates Kanemit vergleichbar ist, wird von Hou weitgehend bestätigt [Wiek 00, Hou 05]. Allerdings ergeben die sowohl an künstlichen Gelen als auch an Gelen von Praxisbetonen durchgeführten NMR-Untersuchungen von Hou ein differenzierteres Bild. Es wird gefolgert, dass neben den kanemitähnlichen Schichtstrukturen auch drei-dimensional vernetzte und geringer polymerisierte Bereiche im Gel vorliegen.

Aufbau von Quelldrücken

Der Quellvorgang der Alkali-Kieselsäure Gele kann vereinfacht in Abhängigkeit von der Struktur erklärt werden. (a) Gele besitzen eine große innere Oberfläche, bei Wasserzufuhr hat die Anlagerung von Wassermolekülen an diese Oberfläche ein Quellen des Gels zur Folge. (b) Bei Schichtsilikaten wird das Wasser, wie bei Tonmineralen, zwischen die einzelnen Schichten eingelagert, dies führt somit zu einem Quellen senkrecht zu den Silikatschichten.

Untersuchungen von Mansfeld [Mans 08] an künstlich hergestellten Alkali-Kieselsäure Gelen zeigen, dass die Quellfähigkeit des Alkali-Kieselsäure Gels und die Stärke des dabei aufgebauten Quelldrucks stark von der chemischen Zusammensetzung des Alkali-Kieselsäure Gels abhängen. Dabei nimmt die Wasseraufnahmefähigkeit des Gels mit steigenden Alkali-

gehalten zu, wobei ein Einfluss des Natrium/Kalium-Verhältnis im Gel nicht erkennbar ist. Der Aufbau von Quellschwindungen ist allerdings von der Viskosität des Gels abhängig. Bei hohen Wassergehalten nimmt die Viskosität des Gels ab, dies kann bis zur Auflösung des Gels führen. Dabei neigen nach Wieker kaliumreiche Gele eher zur Auflösung als natriumreiche Gele [Wiek 00]. Für die Viskosität des Gels ist der Calcium-Gehalt ein entscheidender Faktor. Der quellfähige Bereich wird mit rd. 5 bis 30 % Calciumanteil im Gel angegeben. Ohne Calcium bauen die Gele keine Quelldrücke auf und zu hohe Gehalte führen zur Bildung nicht quellfähiger C-S-H-Phasen. Auch das Alkali/Silika-Verhältnis wirkt sich auf das Quellverhalten der Gele aus. Gele mit hohen Gehalten an Kieselsäure quellen nicht. Mansfeld hat den Bereich der Zusammensetzung quellfähiger Gele (orange hinterlegt) in einem $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{-CaO-SiO}_2$ Dreistoffdiagramm zusammengestellt, siehe Abbildung 4. Dass die Zusammensetzung der aus Schadensfällen gewonnenen Gele (schwarz) oftmals ausserhalb des quellfähigen Bereiches liegt wird auf eine im Laufe der Zeit stattfindende Alterung der Gele bzw. Veränderung der Zusammensetzung je nach den vorliegenden Umgebungsbedingungen erklärt.

Die Abhängigkeit des Quellverhaltens von der chemischen Zusammensetzung der Gele ist nach Mansfeld auch ein Grund für die Wirkung von AKR-vermeidenden Betonzusatzstoffen, wie Flugasche oder Silikastaub. Bei Verwendung dieser Betonzusatzstoffe wird der Portlanditgehalt im Zementstein gesenkt, so dass nur wenig Calcium für den Einbau in den Gelen zur Verfügung steht, zusätzlich wird das Alkali / Kieselsäure-Verhältnis der Gele stark in Richtung Kieselsäure verschoben. Dies führt zur Bildung nicht-quellfähiger Gele.

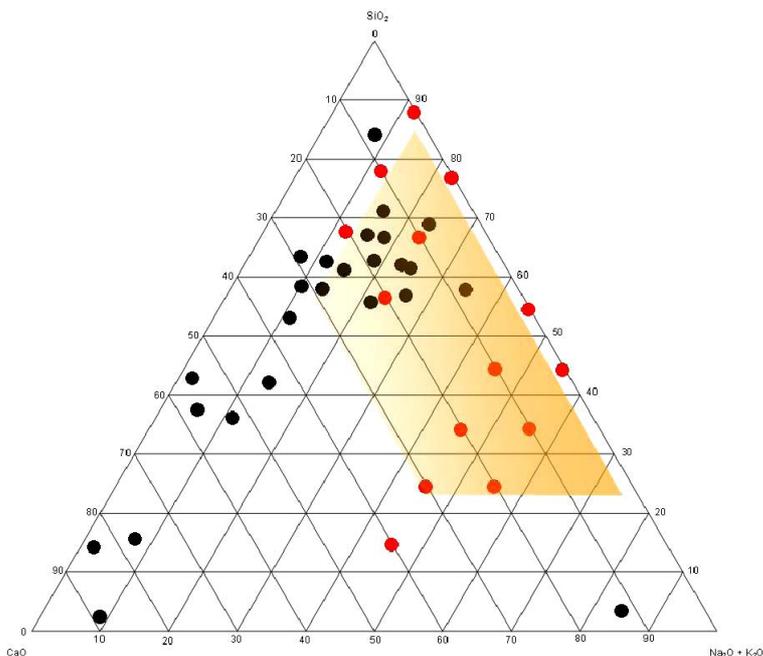


Abbildung 4: Bereich quellfähiger Alkali-Kieselsäure Gele (orange hinterlegt); schwarz: Zusammensetzung von Gelen aus Schadensfällen; rot: künstlich hergestellte Gele [Mans 08]

2.1.4 Lösungsansätze zur Vermeidung von AKR-Schäden

Wie unter Punkt 2.1.1 beschrieben, sind drei Grundvoraussetzungen für eine schädigende AKR nötig:

- (a): alkaliempfindliche Kieselsäure (Gesteinskörnung),
- (b): ausreichende Feuchtigkeit und
- (c): hoher Alkaligehalt bzw. pH-Wert in der Porenlösung.

Auf Grundlage der Kenntnis dieser drei Grundvoraussetzungen werden verschiedene Lösungsansätze zur Vermeidung von AKR-Schäden verfolgt. In der Alkalirichtlinie des DAfStB [DAfStB 07] sind in Abhängigkeit von der Alkaliempfindlichkeit des Gesteins und der Expositionsklasse des Bauteils Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR zusammengestellt, Maßnahmenschema siehe Abbildung 5. Neben dem Austausch der reaktiven Gesteinskörnung und dem Fernhalten von Feuchtigkeit ist vor allem eine Begrenzung des Alkaligehaltes im Beton vorgesehen. Dies wird durch die Begrenzung des Zementgehaltes und die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zemente) erreicht.

Weitere mögliche Maßnahmen wie die Verwendung von Steinkohlenflugasche oder Silikastaub im Bindemittel oder der Einsatz von Lithiumsalzen im Anmachwasser oder als Imprägnierung sind darin nicht vorgesehen. Ein Überblick über diese weiteren, in der Literatur diskutierten Maßnahmen, ist z.B. in [Hein 08] zusammengestellt.

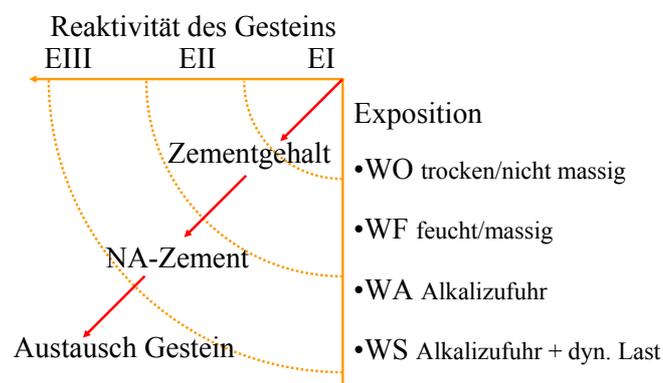


Abbildung 5: Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR im Beton, entsprechend der Beurteilung des AKR-Risikos, Schema nach [Hunk 06].

Ebenso wie in der Alkali-Richtlinie des DAfStB wird in fast allen Regelwerken der wirksame Alkaligehalt in der Betonmischung in Abhängigkeit von der Reaktivität der Gesteinskörnung begrenzt. Nach RILEM [RILEM 05] wird dabei der Alkaligehalt auf kleiner 3,5 bzw. kleiner

2,5 kg/m³ bei mittlerer bzw. hoher Reaktivität der Gesteinskörnung festgelegt, ähnliche Werte finden sich in kanadischen, englischen und französischen Regelwerken [CSA 06, CSR 99, LCPC 94]. Die in den Betonausgangsstoffen vorhandenen Alkalien sind zum Teil schwer bzw. nicht löslich und stehen somit nur teilweise im Beton für eine AKR zur Verfügung. Deshalb ist zwischen dem rechnerischen Gesamtalkaligehalt und dem für eine AKR wirksamen Alkaligehalt im Beton zu unterscheiden. Die Ermittlung der wirksamen Alkalien über die Erstellung von Alkalibilanzen wird in den Regelwerken unterschiedlich beschrieben. Allgemein wird davon ausgegangen, dass aus der Gesteinskörnung nur äußerst geringe Mengen Alkalien freigesetzt werden und im Anmachwasser so gut wie keine Alkalien vorhanden sind [Beru 02]. Die Alkalien aus Portlandzement werden dagegen zu 100 % AKR-wirksam angenommen. Vereinfachend bedeutet dies häufig eine Begrenzung des Zementgehaltes bzw. des Alkaligehaltes im Portlandzement (NA-Zemente). Eine weitere Möglichkeit der Verringerung des Alkaligehaltes im Beton ist der Zementaustausch durch Betonzusatzstoffe mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt. Bei der Anrechnung der Alkalien aus Betonzusatzstoffen gibt es allerdings äußerst unterschiedliche Ansätze. So wird in Frankreich der wirksame Alkaligehalt von Hüttensand bzw. Puzzolanen pauschal mit dem Faktor 0,5 bzw. 0,17 (~ 1/6) vom Gesamtalkaligehalt angerechnet, während in England eine weitergehende Abstufung der Anrechnungsfaktoren in Abhängigkeit von der Dosierung erfolgt.

2.2 Charakteristische Eigenschaften der Flugasche im Hinblick auf eine AKR

Durch phänomenologische Versuche am Beton kann nur eine vergleichende Aussage zur Vermeidung von AKR Schäden bei unterschiedlicher Menge oder Art der Flugasche im Bindemittel getroffen werden. Die Mechanismen, die dafür verantwortlich sind, bleiben aber weiterhin unklar. Daher ist es notwendig die chemischen, mineralogischen und physikalischen Eigenschaften der Flugasche zu charakterisieren und die Auswirkung der puzzolanischen Reaktion auf die Hydratationsphasen und die damit verbundenen Effekte bezüglich der Porenlösung und des chemischen Gesamtsystems, aber auch bezüglich der Transporteigenschaften im Beton zu verstehen.

2.2.1 Entstehung

Als ein fossiler Brennstoff besteht die Steinkohle aus dem heizwertreichen organischen Anteil (Kohlenstoff) und einem Anteil von 5 bis 35 M.-% durch Aufbereitung nicht abtrennbarer Begleitminerale. Die Kohlen aus verschiedenen Lagerstätten werden häufig gemischt und staubfein (80 M.-% der Kohlepartikel sind $< 90 \mu\text{m}$) aufgemahlen; schließlich werden sie in Sekundenfrist bei einer Temperatur von 1100–1300°C (Trockenfeuerung) verbrannt. Aus dem bei der Verbrennung entstehenden Rauchgasstrom wird die Flugasche gewonnen. Bei der schnellen Abkühlgeschwindigkeit des Rauchgases und der hohen Viskosität der Schmelzen ist die Bildung von Kristallen gehemmt, so dass es hauptsächlich zur Bildung von Glas in feiner kugelförmiger Partikelform kommt. Diese Glasmatrix reagiert puzzolanisch und ist somit maßgebend für die Wirkungsweise der Flugasche, nach [Sybe 93].

2.2.2 Korngrößenverteilung und Kornform

Mit 1 bis 100 μm weisen Flugaschen Korngrößen in einer ähnlichen Größenordnung wie Zemente auf. Die Flugaschen haben im Vergleich zu den Zementen aber entweder deutlich höhere oder zumindest gleiche Kornanteile $< 10 \mu\text{m}$, wobei die ideal kugelig geformten Partikel in den feinen Korngrößen angereichert vorliegen [Sybe 93].

2.2.3 Mineralogische und chemische Zusammensetzung

Als kristalline Phasen sind vor allem Mullit, Quarz und Eisenoxide vorhanden, siehe Tabelle 2. Im Vergleich zum kalkreichen Portlandzement besteht (Steinkohlen-) Flugasche vorwiegend aus den drei chemischen Hauptkomponenten Kieselsäure (SiO_2), Tonerde (Al_2O_3) und Eisenoxid (Fe_2O_3) [Lutz 04]. Neben einem Anteil von rund 84–90 M.-% dieser sogenannten Netzwerkbildner finden sich rund 10–16 M.-% Na_2O , K_2O , CaO und MgO , sog. Netzwerkwandler, in der Flugasche. Das Verhältnis von Netzwerkbildnern und –wandlern beeinflusst maßgebend die Löslichkeit und damit die Reaktionsgeschwindigkeit des Flugascheglases; je höher der Netzwerkwandleranteil, umso stärker ist die Depolymerisation des Netzwerks und umso leichter löslich ist das Glas [Sybe 93].

Tabelle 2: Mineralphasen in silikatischen Flugaschen [Lutz 04]

Mineralphasen	Anteil in M.-%
Glas	60 – 83
Mullit	4 – 25
Quarz	4 – 18
Hämatit	0,5 – 2
Magnetit	1 – 7
Flugkoks	0,5 - 5

In Tabelle 3 ist die chemische Zusammensetzung der Flugasche im Vergleich zu Hüttensand und Portlandzement zusammengestellt. Dabei liegt die Summe von SiO₂ und Al₂O₃ bei rund 2/3 der Gesamtanteile; wobei das Verhältnis von SiO₂ zu Al₂O₃ rund 2:1 beträgt. Eine Auswertung der Gesamtalkaligehalte aller Flugaschen für Beton nach DIN EN 450 und nach bauaufsichtlicher Zulassung aus deutschen Kraftwerken im Zeitraum von 1995 bis 2005 zeigt, dass ein Alkaliäquivalent von 4,0 M.-% von nur 3% der Flugaschen überschritten wird. Dabei wird ein mittlerer Alkaligehalt von 2,62 M.-% erreicht [DAfStB 07].

Tabelle 3: Chem. Zusammensetzung von Flugasche, Hüttensand und Portlandzement

Komponenten [M.-%]	silikatische Flugasche ¹⁾	Hüttensand ²⁾	Portlandzement ³⁾
SiO ₂	36 ... 56	30 ... 39	19 ... 23
Al ₂ O ₃	22 ... 35	9 ... 18	3 ... 7
Fe ₂ O ₃	4 ... 19	0,1 ... 1	1,4 ... 4
CaO	1 ... 12	33 ... 48	61 ... 67
MgO	0,8 ... 4,8	2 ... 13	0,6 ... 3
K ₂ O	1,5 ... 6	0,4 ... 1,3	n.v.
Na ₂ O	0,1 ... 3,5	0,2 ... 1,2	n.v.
SO ₃	0,1 ... 2	0 ... 0,2	1,5 ... 4
Na ₂ O _e ⁴⁾	2,62 ⁵⁾	n.v.	0,3 ... 1,5

1) Werte aus der Überwachung von 1997 bis 2004, (Glühverlust: 0,5 ... 5 M.-%), Prüfung gemäß DIN EN 450-1, [Lutz 04]

2) Durchschnittliche Bereichsgrenzen für granulierten Hochofenschlacken aus Westeuropa aus [Loch 00]

3) Werte Glühverlustfrei aus [Keil 71]

4) Alkaliäquivalent: Na₂O + 0,658 K₂O [M.-%]

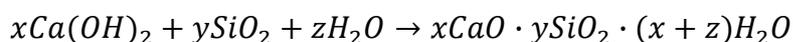
5) Mittelwert aus [DAfStB 07]

n.v.: nicht vorhanden

2.3 Puzzolanische Reaktion der Flugasche

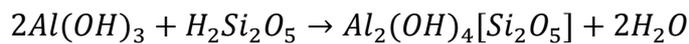
2.3.1 Chemische Reaktion

Bei der puzzolanischen Reaktion der Flugasche reagiert hauptsächlich das aus dem Flugascheglas gelöste Siliziumoxid (SiO₂) mit dem Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) aus der Hydratation des Portlandzementklinkers zu Calciumsilikathydrat (C-S-H-Phasen), siehe Formel 2 nach [Helm 87] aus [Härd 95].



Formel 2: puzzolanische Reaktion der Flugasche

Das ebenfalls aus dem Flugascheglas gelöste Aluminiumoxid (Al_2O_3) reagiert mit Siliziumoxid (SiO_2) und/oder Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zu Calciumaluminathydrat (CAH-Phasen) und/oder Calciumaluminatsilikathydrat (C-A-S-H-Phasen). Zusätzlich ist auch eine Kondensation von Aluminium und Silizium zu Alumosilikathydrat möglich, siehe Formel 3 [Holl 07].



Formel 3: Bildung von Alumosilikathydrat

2.3.2 Löslichkeit des Flugascheglases

Die Löslichkeit des Flugascheglases hängt, außer von den Eigenschaften der Flugasche selber, vor allem vom pH-Wert und der Temperatur ab, nach [Fraa 90] aus [Sybe 93]. In Zementstein werden in der Regel pH-Werte größer 13 bis 14 ($[\text{OH}^-] = 100$ bis 1000 mmol/l) erreicht. In diesem Bereich ändert sich die Löslichkeit des Flugascheglases besonders stark, wobei die Löslichkeit bei pH-Werten zwischen 13,3 und 13,4 überproportional ansteigt. Aber auch die Zusammensetzung der Porenlösung spielt eine Rolle. So ergibt sich bei Lagerung in Natronlauge eine stärkere Löslichkeit als bei Lagerung in Kalilauge [Fraa 90, Hütt 00]. Auch die Lagerungstemperatur wirkt sich auf die Löslichkeit aus. Ein Temperaturunterschied von 20°C bewirkt eine Veränderung um rd. das 10-fache [Fraa 90].

2.3.3 Reaktionsgeschwindigkeit

Anfänglich wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Flugasche von der Löslichkeit des Flugascheglases im alkalischen Milieu der Porenlösung des Zementsteins bestimmt. Im weiteren Hydratationsablauf werden das Zementsteingefüge und die Hülle der Reaktionsprodukte um die Flugaschekörner dichter. Dies führt dazu, dass mit höherem Alter die Diffusion der an der puzzolanischen Reaktion beteiligten Ionen für die Reaktionsgeschwindigkeit maßgebend wird. Die Folge ist das Verlangsamen der puzzolanischen Reaktion. Der Übergang von einer löslichkeitsgesteuerten zu einer diffusionsgesteuerten puzzolanischen Reaktion ist fließend. Der Zeitraum für den Übergang wird bei einer Lagerungstemperatur von 20°C mit rd. 180 bis 365 Tagen und bei 40°C mit rd. 28 Tagen angegeben [Sybe 93, Härd 95]. Wobei sich die Temperatur auf die diffusionsgesteuerten Prozesse weniger auswirkt, als auf die lösungsgesteuerten.

Von Härdtl werden in einem bei 20°C gelagerten Zementstein aus Portlandzement mit einem Flugaschegehalt von ca. 25 M.-% nach 28, 90, 180 und 365 Tagen für die Flugasche Reaktionsgrade von rd. 15, 25, 30 und 40-50 M.-% angegeben, nach [Dalz 86, Moha 81] in [Härd 95]. Nach Sybertz beträgt der bei 20°C reagierte Anteil in Flugaschen üblicher Feinheit nach 28 Tagen rd. 5 bis 15 M.-% und nach 180 Tagen rd. 30 bis 40 M.-%. Aufgrund der geringeren Korndurchmesser wirkt sich eine erhöhte Feinheit stark auf den Reaktionsgrad

aus. Gegenüber den Flugaschen üblicher Feinheit betragen die Reaktionsgrade bei einer sehr feinen Flugasche (95% Kornanteil < 5µm) nach 28 Tagen rd. 24 M.-% und nach 180 Tagen rd. 53 M.-% [Sybe 93].

2.3.4 Alkalibindung

Die beim Hydratationsprozess entstehenden Polykieselsäuren können die in der Porenlösung vorhandenen Metallionen, z.B. Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Na^+ , K^+ , aufnehmen. Dies geschieht sowohl durch das Brechen der Sauerstoffbrücken ($\equiv Si-O-Si \equiv$) als auch durch die Substitution von Si^{4+} durch Al^{3+} , siehe [Mine 08]. Bei der Substitution von Silizium durch Aluminium muss der Ladungsausgleich allerdings durch zusätzliche positive Ionen geschaffen werden.

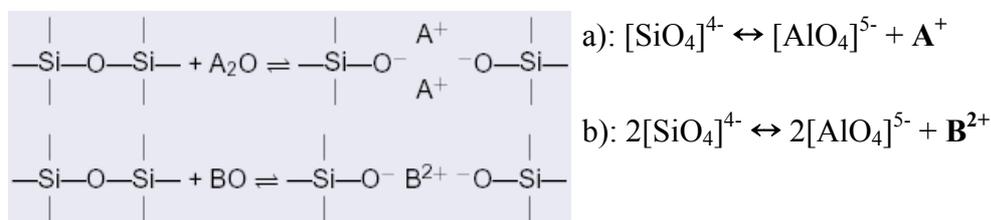


Abbildung 6: Alkaliionenaufnahme in Polykieselsäuren; $A=Na^+$, K^+ ; $B=Mg^{2+}$, Ca^{2+} ; links: aufbrechen der Sauerstoffbrücken ($\equiv Si-O-Si \equiv$) durch Alkaliionen; rechts: a) und b): Si^{4+} -Substitution durch Al^{3+} zusammen mit ein- oder zweiwertigen Ionen.

Bei der Hydratation von Portlandzement wird vor allem das Calcium eingebaut, wodurch calciumreiche C-S-H-Phasen entstehen. Das C/S-Verhältnis liegt dabei im Bereich zwischen 1,5 und 2,1, nach [Tayl 85, Bone 94] aus [Schä 04]. Untersuchungen von Schäfer ergaben für Zementsteine mit 20, 40 bzw. 80 M.-% Hüttensand ein C/S-Verhältnis von rd. 2,1, 1,9 bzw. 1,5. In Zementsteinen mit 20, 40 und 60 M.-% Flugasche wird ein weit geringeres C/S-Verhältnis erreicht. Unabhängig von den hier untersuchten Flugaschegehalten stellt sich in den C-S-H-Phasen ein C/S-Verhältnis von rd. 0,9 ein [Schä 04].

In welchen Mengen Natrium und Kalium in die Hydratphasen eingebaut werden hängt vom C/S-Verhältnis der C-S-H-Phasen und von dem Anteil an Aluminium (C-A-S-H-Phasen) ab. Eine Verringerung des C/S-Verhältnisses führt zu einer höheren negativen Oberflächenladung und somit zu einer verstärkten Tendenz Alkalien als Ladungsausgleich einzubauen. Von Hong und Schäfer wurden Versuche zur Alkalibindungskapazität von C-S-H-Phasen durchgeführt [Hong 99, Schä 04]. Dabei wurde die Alkalibindung von synthetisch hergestellten C-S-H-Phasen mit C/S-Verhältnissen von 0,85, 1,2 und 1,5 bzw. 0,85, 1,2, 1,5 und 1,8 in Kali- und Natronlaugen mit Konzentrationen von bis zu 1000 mmol/l untersucht. Die Ergebnisse belegen, dass die Alkalibindung mit abnehmendem C/S-Verhältnis steigt, wobei

die Aufnahme von Alkalien mit steigender Alkalikonzentration in der Lösung zunimmt. Bei einer Ausgangskonzentration von rd. 1000 mmol/l ergibt sich eine ungefähr doppelt so hohe Alkaliaufnahme in C-S-H-Phasen mit einem C/S-Verhältnis von 0,85 und 1,2 gegenüber C-S-H-Phasen mit einem C/S-Verhältnis von rd. 1,5 bis 1,8. Dabei wird zwischen der Aufnahme von Natrium und Kalium kein Unterschied festgestellt, siehe Abbildung 7.

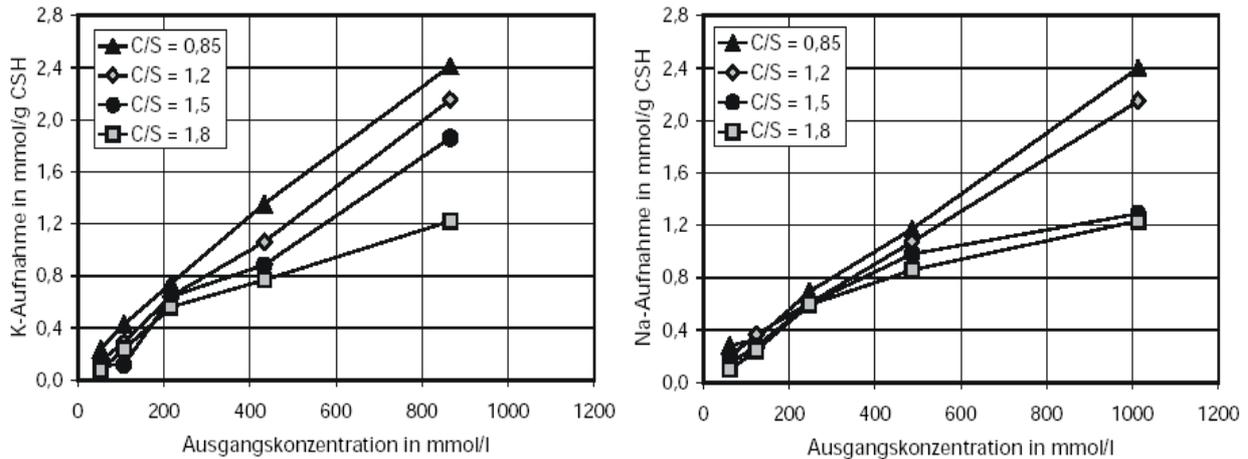


Abbildung 7: Kalium- (links) und Natriumaufnahme (rechts) in C-S-H- Phasen mit C/S-Verhältnissen von 0,85, 1,2, 1,5 und 1,8 [Schä 04].

Von Hong wurde die Alkalibindungs Kapazität von C-S-H- und C-A-S-H-Phasen mit C/S-Verhältnissen von jeweils 0,85, 1,2 und 1,5 untersucht [Hong 02]. Im Vergleich zu den C-S-H-Phasen werden bei gleichem C/S-Verhältnis rd. doppelt so viele Alkalien in die C-A-S-H-Phasen eingebaut. Trotzdem kann die Substitution von Silizium durch Aluminium die weit geringere Alkalibindungs Kapazität von C-S-H-Phasen mit hohem C/S-Verhältnis nicht ausgleichen. So beträgt die Alkalibindungs Kapazität von C-A-S-H-Phasen mit C/S = 0,85 rd. das 6-fache (~2,2 mmol/g) gegenüber C-A-S-H-Phasen mit einem C/S-Verhältnis von 1,5 (~0,35 mmol/g), siehe Abbildung 8.

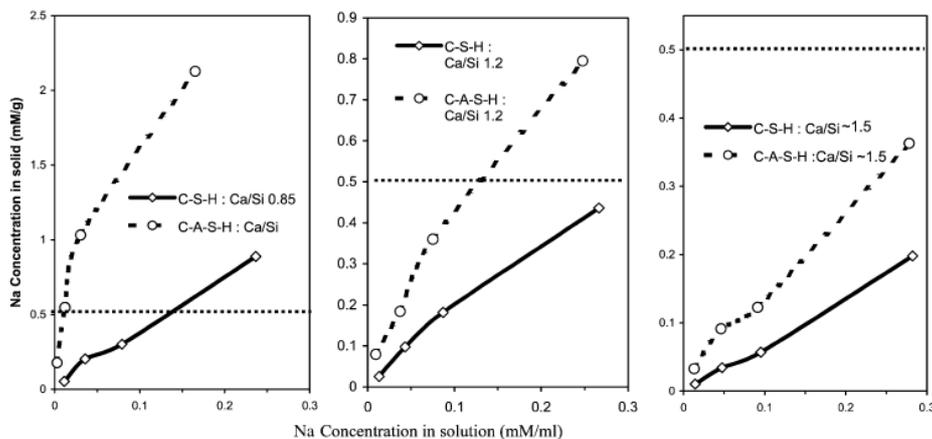


Abbildung 8: Vergleich der Alkalibindung zwischen C-S-H- und C-A-S-H-Phasen mit Si/Al=16,2 (C/S=0,85), 14,1 (C/S=1,2) und 13,3 (C/S=1,5) [Hong 02]

2.4 AKR-Wirksamkeit der Flugasche

Die AKR-Wirksamkeit von Flugaschen wird von ihren chemischen und physikalischen Eigenschaften bestimmt. Es wird davon ausgegangen, dass sich vor allem der Alkali- und der Calciumgehalt, aber auch die Feinheit auf die Effektivität von Flugasche auswirken.

Als wichtigste Voraussetzung für die „AKR-Wirksamkeit“ von Betonzusatzstoffen ist zu fordern, dass kein AKR-wirksamer Eintrag von Alkalien in den Beton stattfindet. Das bedeutet aber durchaus, dass der Betonzusatzstoff nennenswerte Alkaligehalte aufweisen darf, wie z.B. die Flugasche, bei der nach DIN EN 450 Alkaligehalte von bis zu 5 M.-% erlaubt sind [DIN 450-1]. Allerdings dürfen diese Alkalien nicht zu einer schädigenden AKR beitragen. Damit wurde bereits bei Hüttensanden mit Alkaligehalten von rd. 1 M.-% argumentiert [Sieb 01].

Es ist allerdings davon auszugehen, dass Flugaschen mit extrem hohen Alkaligehalten (z.B. > 8 M.-%), vor allem in Kombination mit Zementen mit niedrigem Alkaligehalt, erheblich zu der Alkalität im Beton beitragen und damit sogar zu einer Verstärkung der AKR führen können [Diam 81, Star 02]. Dagegen konnte gezeigt werden, dass von Flugaschen mit niedrigem bis moderatem Alkaligehalt (< 4 M.-%) kein signifikanter Eintrag von Alkalien in den Beton erfolgt, mit zunehmendem Hydratationsalter sogar eine weitergehende Einbindung von Alkalien in die Produkte der puzzolanischen Reaktion stattfindet und auch die Langzeitstabilität der Alkalibindung gegeben ist. Der Einbau von Alkalien in die Hydratationsprodukte wird mit einem niedrigen C/S-Verhältnis der entstehenden C-S-H-Phasen und der zusätzlichen Bildung von C-A-S-H-Phasen erklärt [Schä 04, Bram 04].

Von Flugaschen mit CaO-Gehalten > 8 M.-% werden sehr viel höhere Mengen im Beton nötig, um eine schädigende AKR zu vermeiden, als von silikatischen Flugaschen mit CaO-Gehalten kleiner 8 M.-% [Star 02]. Dies wird vor allem auf eine Erhöhung des C/S-Verhältnisses der Reaktionsprodukte und somit einer geringeren Einbindekapazität von Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion zurückgeführt. So ist der CaO Gehalt von Flugaschen in US-amerikanischen Richtlinien für Straßenbauwerke generell auf kleiner 10 M.-% begrenzt [Malv 02].

Ein weiterer Punkt ist die Feinheit der Flugaschen. Es gibt Hinweise, dass sich eine hohe Feinheit positiv auf die AKR-Wirksamkeit der Flugaschen auswirkt. Dies wird allgemein auf den schnelleren Umsatz der Flugasche und damit einer schnelleren Einbindung von Alkalien und eine stärkere Verdichtung des Zementsteins zurückgeführt. Ein allgemein gültiger Zusammenhang konnte aber bislang noch nicht festgestellt werden [Hoop 04]. Mit der zusätzlichen Verdichtung des Betongefüges als Ursache für den erhöhten Widerstand gegen AKR wurde bereits bei Betonen mit Hüttensand argumentiert [Bakk 80, Sieb 01].

2.5 Betone mit Flugasche - Langzeitverhalten und Beispiele aus der Praxis

Die Leistungsfähigkeit von Betonen mit Flugasche wird am Besten über das Verhalten am Bauwerk oder zumindest über die Freilagerung von Probekörpern bewertet. Die Kenntnis über das Praxisverhalten kann dazu dienen descriptive Vorschriften in Regelwerken und Grenzwerte bei der Performance-Prüfung zu untermauern [Thom 06].

Flugasche wird seit langem in Betonbauwerken als Teil des Bindemittels eingesetzt. Bisher sind noch keine AKR Schadensfälle bekannt geworden, bei denen Flugasche in ausreichenden Mengen als Betonzusatzstoff eingesetzt wurde. Allerdings erweist es sich auch als schwierig, Schäden an Betonbauwerken, die zum Teil mehrere Jahrzehnte alt sind, genau einer Schadensursache zuzuordnen. Zum einen ist es oftmals nicht mehr möglich vollständige Informationen über die Zusammensetzung der Betonausgangsstoffe - Bindemittel und Gesteinskörnung - zu erhalten, zum anderen ist es so gut wie unmöglich, die Beiträge verschiedener Mechanismen zur Betonschädigung, wie Alkalireaktion, Frost oder Schwinden, voneinander zu trennen. So wurden in Kanada, für den systematischen Nachweis der Wirksamkeit von Flugasche, an ausgelagerten Probekörpern Langzeitstudien mit einer bisherigen Laufzeit von 10 bis 20 Jahren durchgeführt [Four 04]. Die dabei erhaltenen Ergebnisse belegen die Leistungsfähigkeit von Betonen mit Flugasche auch über lange Zeiträume.

Die, u. a. von Hobbs [Hobb 94] aufgeführten Beispiele einer schädigenden Alkalireaktion an Betonbauwerken mit Flugasche im Bindemittel, die „McPherson Test Road“ in den USA bzw. der „Hanshin Expressway“ in Japan lassen sich nach Thomas [Thom 96] bei genauerer Betrachtung auf ein Trocknungsschwinden des Betons, bzw. auf nicht ausreichende Flugaschegehalte (18 %) mit gleichzeitig hohen Alkaligehalten von rd. 8 kg pro m³ Beton zurückführen.

Dagegen können von Thomas [Thom 96] mehrere Beispiele von Wasser- und Straßenbauwerken mit reaktiven Gesteinskörnungen aufgeführt werden, in denen durch die Verwendung von Flugasche in einer Größenordnung zwischen 20 und 30 % vom Bindemittel eine schädigende Alkalireaktion im Beton verhindert werden konnte. Einen direkten Vergleich liefert der Fall von zwei mit Grauwacke hergestellten Staustufen in Wales, U. K. Trotz Verwendung eines Portlandzementes mit einem Alkaliäquivalent von 0,62 M.-% und einem Gesamtalkaligehalt von 2,36 kg/m³ Beton trat bei einer der Staumauern nach rd. 30 Jahren ein eindeutig auf eine Alkalireaktion zurückzuführendes Schadensbild auf. Dagegen konnte in der zweiten Staumauer durch den Austausch von 25 % des Portlandzementes (Na₂O_e = 0,65 M.-%) mit Flugasche (Na₂O_e = 3,88 M.-%) eine schädigende Alkalireaktion im Beton verhindert werden.

Als weiteres Beispiel kann der „Lower Notch“ Damm in Ontario, Kanada, aufgeführt werden, in dem auch eine als alkalireaktiv bekannte Grauwacke verwendet wurde. Bei einem Austausch des Portlandzementes ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,96 \text{ M.-%}$) durch 20 bzw. 25 M.-% Flugasche gibt es seit über 30 Jahren keine Anzeichen für eine schädigende Alkalireaktion im Beton. Würde der Damm heute gebaut werden, so würde die kanadische Anwendungsregel CAN/CSA-A23.2-27A [CSA 06] ebenfalls einen Mindestgehalt von 25% Flugasche fordern. Dieses Beispiel belegt somit die Richtigkeit der in der Norm festgelegten Anforderungen [Thom 06].

2.6 Berücksichtigung von Flugasche in Regelwerken

2.6.1 National

Nach Alkali Richtlinie Teil 1 [DAfStB 07] wird Flugasche als puzzolanischer Betonzusatzstoff definiert, dessen Beitrag zum wirksamen Alkaligehalt im Beton vernachlässigt werden darf. Dabei ist die Verwendung von Flugasche unter Beachtung der Festlegungen in DIN EN 450-1 [DIN 450-1] gemeint. Diese Flugaschen sind unter anderem in ihrem Calcium- und Alkaligehalt begrenzt und Grenzwerte bezüglich der Feinheit müssen eingehalten werden, siehe Tabelle 4. Eine AKR vermeidende Wirkung der Flugasche wird in der Alkali Richtlinie bislang allerdings noch nicht berücksichtigt.

Tabelle 4: Anforderungen an Flugasche nach DIN EN 450-1

CaO	Na_2O_e	$R > 45\mu\text{m}$
[M.-%]		
≤ 10	≤ 5	≤ 40

2.6.2 International

In Kanada sind in der Anwendungsregel A23.2-27A der Canadian Standards Association (CSA) vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton vorgesehen [CSA 06]. Im Rahmen dieser Anwendungsregel werden die zu ergreifenden Maßnahmen sehr differenziert aufgelistet, sowohl auf Seiten der Ausgangsstoffe als auch unter Berücksichtigung der Bauwerksanforderungen. Es wird u. a. die Möglichkeit gegeben, Portlandzement durch Flugasche zu ersetzen. Die auszutauschenden Mengen bewegen sich dabei in der Größenordnung zwischen 15 und 35 M. % vom Zement. Die Austauschraten sind von der chemischen Zusammensetzung der Flugasche, der Reaktivität des Gesteins und der Art bzw. der Expositionsklasse des Bauwerks abhängig. Das Alkaliäquivalent des verwendeten Zements darf 1,0 M.-% nicht überschreiten, siehe Tabelle 5.

Ähnlich wie in Kanada erlauben niederländische und britische Richtlinien den Austausch von Zement durch Flugasche zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion [CUR 02, CSR 99]. In den Niederlanden ist die Verwendung von Flugasche sowohl als Zementhauptbestandteil in Portlandflugaschezement CEM II/B-V als NA-Zement als auch im

Bindemittel als Betonzusatzstoff möglich. Dabei werden Flugaschegehalte von mindestens 25 M.-% vom Zement vorgeschrieben.

Tabelle 5: Use of Supplementary Cementing Materials (SCM) for Counteracting Alkali Silica Reaction (Auszug) [CSA 06].

Type of SCM	Total alkali content of SCM % Na ₂ O equivalent	Chemical composition requirement (% oxides)	Cement replacement level (% by mass)		
			Prevention level W ¹⁾	Prevention level X ¹⁾	Prevention level Y and Z ¹⁾
Fly Ash	< 3,0	CaO < 8%	≥ 15	≥ 20	≥ 25
		CaO = 8 - 20%	≥ 20	≥ 25	≥ 30
		CaO > 20%	²⁾	²⁾	²⁾
	3,0-4,5	CaO < 8%	≥ 20	≥ 25	≥ 30
		CaO = 8 - 20%	≥ 25	≥ 30	≥ 35
		CaO > 20%	²⁾	²⁾	²⁾
> 4,5	²⁾	²⁾	²⁾	²⁾	

- 1) In Abhängigkeit der Reaktivität der Gesteinskörnung (mäßig bis stark reaktiv), der Abmessungen der Bauteile (nicht massiv bis massiv), der Umweltbedingungen (trocken bis feucht) und der Lebensdauer des Bauwerks (< 5 bis > 50 Jahre)
- 2) Nachweis der alkalireaktionsvermeidenden Wirkung der Flugasche erforderlich

3 Ziele der Arbeit

Der Kern der Arbeiten besteht darin, anhand von Betonversuchen in der 40°C-Nebelkammer zu klären, unter welchen Randbedingungen Betone mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen mit flugaschehaltigem Bindemittel hergestellt werden können, ohne dass eine schädigende Alkali-Kieselsäure Reaktion auftritt. Die Leistungsfähigkeit der puzzolanischen Flugasche wird dabei mit Kalksteinmehl als inertem Betonzusatzstoff und Hüttensand als latent hydraulischem Bindemittel verglichen. Die aus der 40°C-Nebelkammer gewonnenen Erkenntnisse werden zukünftig mittels Langzeituntersuchungen an freigelagerten Probekörpern validiert. Die Ergebnisse aus der Freilagerung sind aufgrund des derzeitigen Probenalters von bis zu 4 Jahren jedoch noch nicht ausreichend auswertbar und somit nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Durch die Beobachtung von Dehnungen und Rissbildungen an Betonprobekörpern ist allerdings nur eine vergleichende Aussage über die Effektivität verschiedener Bindemittelzusammensetzung möglich. Strenggenommen gelten die daraus erhaltenen Ergebnisse auch nur für die dabei untersuchten Betonkombinationen mit den darin verwendeten Gesteinskörnungen und Bindemitteln. Für eine allgemeine Übertragbarkeit ist somit aber auch ein tiefergehendes Verständnis der Mechanismen nötig, die die Wirksamkeit, besser gesagt AKR-Wirksamkeit, von Flugasche begründen. Als wichtigste Eigenschaft von Flugasche kann in diesem Zusammenhang die Absenkung der Alkalität der Porenlösung im Beton angesehen werden. Über die Alkalität wird der lösende Angriff auf die Silikatmodifikationen des Gesteins und die Alkali-Kieselsäure Gel-Bildung gesteuert. Daher wurde parallel zu den Betonversuchen die Porenlösung des Betons ausgepresst und chemisch analysiert. Es wurde aber nicht nur der Alkalihaushalt sondern die Porenlösungszusammensetzung allgemein auf mögliche AKR-relevante Einflüsse untersucht. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass das Betonverhalten in der 40°C-Nebelkammer systematisch mit den chemischen Vorgängen im Beton korreliert werden kann.

Allerdings können dabei Effekte der Gesteinskörnung und der Bindemittelkombination nicht mehr eindeutig voneinander getrennt werden. Der Einfluss verschiedener Bindemittelbestandteile, insbesondere der Flugasche, auf die Porenlösungszusammensetzung von Zementstein war in den letzten Jahren, gerade auch in Deutschland, Thema intensiver Forschungsarbeit [Bram 04, Schä 04, Baet 07-1]. Für die Interpretation der Ergebnisse zur Porenlösungszusammensetzung von Beton kann somit auf diese Arbeiten zurückgegriffen werden. Ergänzend wurden aber auch noch einige eigene Untersuchungen zur Porenlösungszusammensetzung von Zementstein durchgeführt. Diese hatten zum Ziel (a) das Verhalten der eigenen Ausgangsstoffe mit den Ergebnissen aus der Literatur vergleichen zu können und (b) weitere Fragen, die sich im Laufe dieser Arbeit ergeben haben, zu beleuchten.

Der Schwerpunkt der Arbeit zu den Gründen für die AKR-vermeidende Wirkung von Flugasche liegt auf Porenlösungsuntersuchungen an Beton mit natürlichen, langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen. Durch die Verwendung von Flugasche werden aber auch die Transporteigenschaften und die mechanischen Eigenschaften von Beton in erheblichem Maße beeinflusst [Härd 95]. Mit den, in dieser Arbeit, durchgeführten Versuchen an Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung konnten diese Fragen nicht behandelt werden. In einer weiteren Versuchsreihe wurden daher Betone mit Duranglas als künstliche, schnell reagierende, dichte Gesteinskörnung hergestellt, wobei dieselben Zemente und Betonzusatzstoffe verwendet wurden wie bei den Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung. An den Betonen mit Duranglas erfolgte ein Vergleich des Dehnungsverhaltens mit der Porenlösungszusammensetzung, der Porosität und der Festigkeit. Damit sollte die Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen herausgearbeitet werden. Es wurde auch der Frage nachgegangen, inwieweit durch die Erhöhung der Lagerungstemperatur von 20 auf 40°C die Ergebnisse von Betonversuchen mit dichten Gesteinskörnungen beeinflusst werden.

Ein generelles Problem bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Bindemittelkombinationen – dies betrifft nicht nur Flugasche! – hinsichtlich einer schädigenden AKR im Beton ist die Validität der verwendeten Prüfverfahren. Es stellt sich die Frage inwieweit aus beschleunigten Prüfverfahren - erhöhte Temperatur und Feuchtigkeit – erhaltene Ergebnisse das Praxisverhalten der untersuchten Betone widerspiegeln. So finden sich in der Literatur immer wieder Berichte, dass flugaschehaltige Betone bei Lagerung in der Nebelkammer (40°C/100 % r.F.) nach den Kriterien von Teil 3 der Alkali-Richtlinie eine schädigende AKR unterdrückten, allerdings bei der Lagerung im Freien zeitlich verzögert Schäden auftraten, z.B. [Sieb 00]. Diese Berichte müssen aber sehr differenziert bezüglich der verwendeten Ausgangsstoffe und des genauen Prüfverfahrens betrachtet werden. Deshalb erfolgt in dieser Arbeit vor der Präsentation der eigentlichen Ergebnisse jeweils eine kritische Diskussion des dafür verwendeten Prüfverfahrens. Auch wenn die hier verwendeten Prüfverfahren damit nicht letztumfassend behandelt werden können, so sollte dieses Vorgehen doch eine gute Einschätzung der Ergebnisse ermöglichen.

Die in dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise ist in Abbildung 9 schematisch dargestellt.

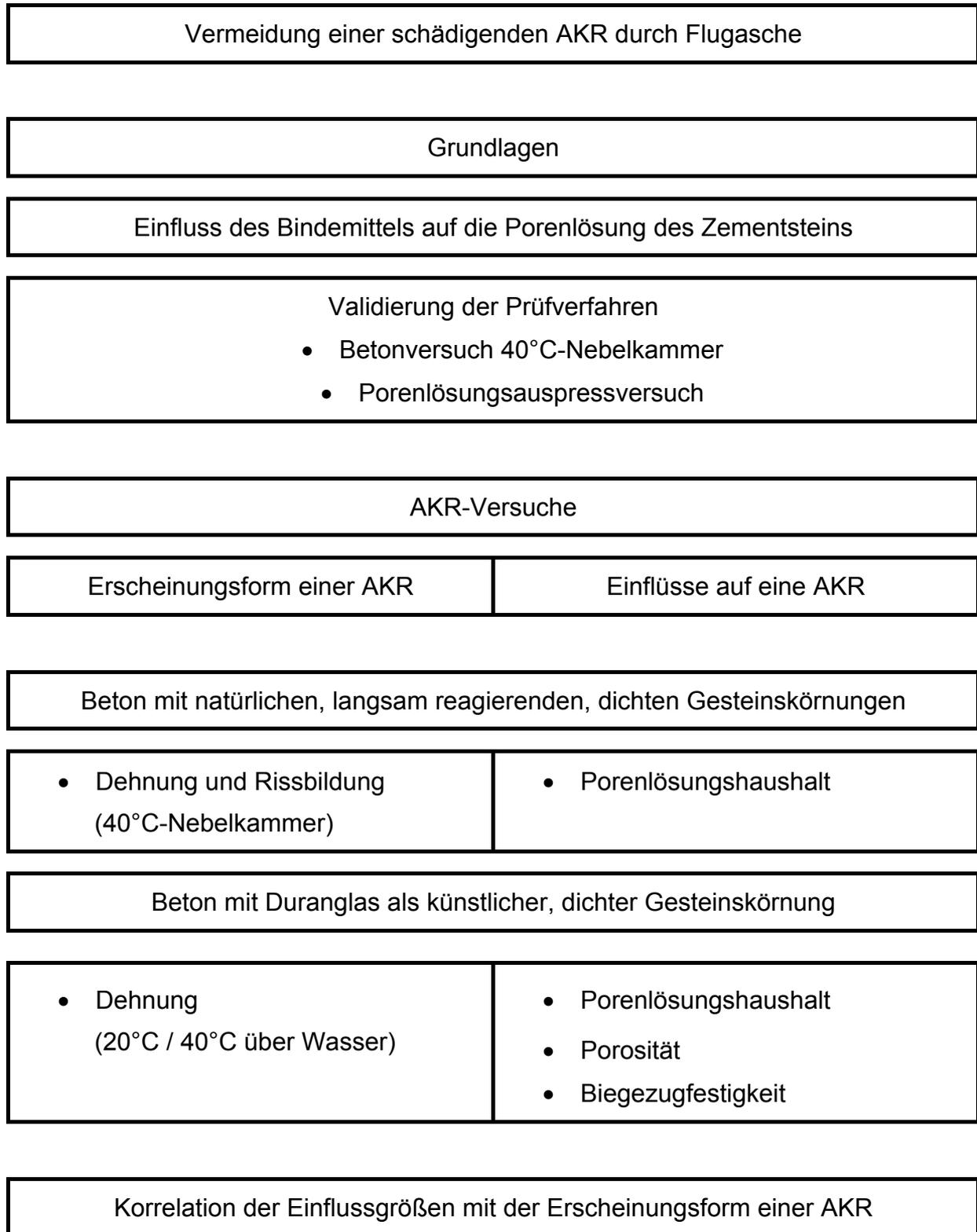


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Vorgehensweise

4 Betone bzw. Zementsteine und deren Ausgangsstoffe

4.1 Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen

Es wurden Normalbetone (B) und selbstverdichtende Betone (SVB) mit präkambrischer Grauwacke und Splitt bzw. Kies des Oberrheins in der groben Gesteinskörnung (2/16 mm) hergestellt. Der Splitt und der Kies des Oberrheins stammen aus demselben Lieferwerk. Neben dem Zement wurden der Betonzusatzstoff und die reaktive Gesteinskörnung variiert. Als inerter Prüfsand (0/2 mm) wurde quarzitischer Natursand verwendet. Die Portlandzemente CEM I (K) weisen Alkaligehalte zwischen 0,6 und 1,2 M.-% auf. Die Zemente mit Hüttensand, CEM II/A-S, CEM III/A und CEM III/B, stammen aus demselben Werk wie der Portlandzement K1 mit einem Na_2O_e von 1,2 M.-% und sind mit 13, 42 und 72 M.-% Hüttensand (S) hergestellt, siehe Tabelle 6. Die Flugaschen (F) decken die Bandbreite der in Deutschland üblichen Steinkohleflugasche-Qualitäten hinsichtlich Feinheit und Alkaligehalt ab. Das verwendete Kalksteinmehl (KSM) dient als inerter Betonzusatzstoff (BZS), siehe Tabelle 7. Zur Herstellung der selbstverdichtenden Betone wurde ein Fließmittel auf Polycarboxylatether-Basis mit einer Dichte von $1,07 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Mit einem Na_2O_e von 0,69 M.-% ist das Fließmittel für Beton mit alkaliempfindlicher Gesteinskörnung geeignet.

Für die Normalbetone wurde von der Flugasche F1 eine andere Charge (F1a) als für die selbstverdichtenden Betone (F1b) verwendet. Allerdings unterscheiden sich diese Chargen nur geringfügig, so dass im Weiteren zur Vereinfachung für beide Chargen der Begriff „F1“ verwendet wird. Die weiteren Angaben zur chemischen und mineralogischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften der Zemente, der Betonzusatzstoffe und der Gesteinskörnungen können dem Anhang 1 entnommen werden.

Die Normalbetone wurden mit 400 bzw. 500 kg Bindemittel, mit w/b-Werten von 0,45 und 0,5 und der Sieblinie A16/B16, entsprechend üblichen Rezepturen bei AKR- Betonprüfungen, hergestellt. Ergänzend wurden selbstverdichtende Betone einer praxisgerechten Zusammensetzung mit 600 kg/m^3 Bindemittel und einem w/b-Wert von 0,28 untersucht, siehe Tabelle 8 und Tabelle 9. Es erfolgte ein massebezogener Austausch des Zementes durch die Betonzusatzstoffe bei konstantem w/b-Wert (Anrechenbarkeitswert $k_{\text{BZS}} = 1$). Ausgehend von den Rezepturen mit reinem Zement wurde das Verhältnis $\text{Masse}_{\text{Leim}} / \text{Masse}_{\text{reaktive Gesteinskörnung}}$ konstant gehalten. Dies erfolgte über die Veränderung des Anteils an inertem Quarzsand 0/2 mm.

Im Rahmen der Validierung der Prüfverfahren, vgl. Punkt 6.1.1 und 6.3.1, werden zum Vergleich mit den hier untersuchten Betonen Ergebnisse von Betonen mit calcitischem Kies als inerte Gesteinskörnung (EI) und mit Kies mit Opalsandstein/Flint als poröse, schnell

reagierende Gesteinskörnung (OF) gezeigt. Diese Betone wurden mit Rezepturen entsprechend den Betonen B1 hergestellt, mit dem Unterschied, dass die Betone OF mit der Sieblinie B16/C16 und mit 25 M.-% Kies mit Opalsandstein/Flint in der Fraktion 2/8 mm hergestellt wurden, vgl. Tabelle 8.

Eine Zusammenstellung weiterer charakteristischer Kennwerte der Betonrezepturen und deren Frisch- und Festbetoneigenschaften ist in Anhang 2 aufgeführt.

Tabelle 6: Festigkeitsklasse und Alkaliäquivalente der Zemente

Zement :	K1	K2	K3	K4	K1 13% S	K1 42% S	K1 72% S
	CEM I 32,5 R				CEM II/A 32,5 R	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 32,5 N
Na ₂ O _e ¹⁾ [M.-%]	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78

1) Na₂O_e = 0,658 K₂O + Na₂O [M.-%]

Tabelle 7: Kennwerte der Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl KSM und Flugasche F

Beton-zusatzstoff	Feinheit ¹⁾ [M.-% > 45 µm]	Na ₂ O _e [M.-%]	Aktivitätsindex ²⁾ 28d / 90d [%]	Glasgehalt ³⁾ [M.-%]
KSM	43,7	0,21	68 / 62	--
F1a ⁴⁾	21,4	3,61	84 / 98	80
F1b ⁴⁾	20,4	3,22	83 / 91	75
F2 ⁵⁾	1,0	3,75	91 / 114	85
F3	18,1	1,09	81 / 104	67

- 1) Luftstrahlsiebung
- 2) Aktivitätsindex nach DIN EN 450 3.5
- 3) Quantifizierung des Glasgehaltes der Flugaschen erfolgte röntgenografisch mit der Rietveldmethode
- 4) Charge der Flugasche F1 für (a) die Normalbetone bzw. (b) die selbstverdichtenden Betone
- 5) gesichtete Flugasche mit einem Größtkorn < 50 µm

Tabelle 8: Normalbetone (B) mit Grauwacke bzw. Splitt oder Kies Oberrhein

Bestandteile	B1	B2	B2a	B3	B4	B5	B6	B7	B8
Zement	K1	K1	K1	K2	K3	K4	K1 13%S	K1 42%S	K1 72%S
b = z + bzs [kg/m ³]	500	400	400	400	400	400	400	400	400
w/b-Wert	0,5	0,45	0,5	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
reaktives Gestein	70 M.-% von der Gesteinskörnung; Fraktion 2/16 mm; Sieblinie A16/B16								
Betonzusatzstoff / Gesteinskörnung	Betonzusatzstoff in M.-% vom Bindemittel								
ohne / Grauwacke	x	x	x	x	x	x	x	x	x
ohne / Splitt Oberrhein	x	x	--	--	--	--	--	--	--
ohne / Kies Oberrhein	x	x	--	--	--	--	--	--	--
F1 / Grauwacke	20/25/30/35	10/20/25/30/35	30	30	30	30	30	--	--
F1 / Splitt Oberrhein	20/25/30	20/25/30/35	--	--	--	--	--	--	--
F1 / Kies Oberrhein	20/30	20/30	--	--	--	--	--	--	--
F2 / Grauwacke	--	10/20/25/30	--	--	--	--	--	--	--
F2 / Splitt Oberrhein	--	20/25/30	--	--	--	--	--	--	--
F3 / Grauwacke	--	20/25/30	--	--	--	--	--	--	--
F3 / Splitt Oberrhein	--	20/25/30	--	--	--	--	--	--	--
KSM / Grauwacke	--	20/30	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle 9: Selbstverdichtende Betone (SVB) mit Grauwacke bzw. Splitt Oberrhein

Bestandteile [kg/m ³]	SVB1	SVB2	SVB3
Zement	K1	K1 / K4	K1
	600	320	320
Flugasche F1	--	280	--
Kalksteinmehl	--	--	280
Wasser	168	168	168
Sand (0-2mm)	605	525	575
Grobkorn (2-16mm)	1060	1060	1060
Mehlkorn	600	600	600
w/p-Wert	0,28	0,28	0,28
Fließmittel [M.-% v.K.]	2,7	2,7 / 1,9	2,7

4.2 Betone mit Duranglas als künstliche Gesteinskörnung

Es wurden Betone (D) mit natrium-borosilikatischem Glas, Markenbezeichnung „Duran“, als künstliche, schnell reagierende, dichte Gesteinskörnung hergestellt. Dabei wurden 500 kg Bindemittel, w/b-Werte von 0,5 und 0,4 und die Sieblinie A8/B8 verwendet. Das Duranglas wurde in der Fraktion 2/8 mm, entsprechend 45 M.-% der Gesteinskörnung, eingesetzt. Es erfolgte ein massebezogener Austausch des Zementes durch die Betonzusatzstoffe bei konstantem w/b Wert ($k_{BZS} = 1$). Ausgehend von den Rezepturen mit reinem Zement wurde das Verhältnis $Masse_{Leim} / Masse_{Duranglas}$ konstant gehalten. Dies erfolgte über die Veränderung des Anteils an inertem Quarzsand 0/2 mm, siehe Tabelle 11.

Es wurden dieselben Zemente und Betonzusatzstoffe wie für die Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen verwendet, siehe Tabelle 6 und Tabelle 7. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Duranglases sind in Tabelle 10 und Anhang 1 aufgeführt.

Tabelle 10: Chemische Zusammensetzung des Duranglases

Oxide ¹⁾ [M.-%]	Duranglas
CaO	0,1
SiO ₂	81,1
Al ₂ O ₃	2,6
Fe ₂ O ₃	0,2
Na ₂ O	3,68
K ₂ O	0,48
Na ₂ O _e ²⁾	4,00
Na/K [mol/mol]	11,65
GV ³⁾ [M.-%]	1,5

1) bezogen auf die bei 105°C getrocknete Probe

2) $Na_2O_e = 0,658 K_2O + Na_2O$ [M.-%]

3) Glühverlust

Tabelle 11: Betone mit Duranglas

Bestandteile		D1	D1a	D2	D3	D4	D5
Zement		K1	K1/K4 ¹⁾	K4	K1 13%S	K1 42%S	K1 72%S
b = z + bzs [kg/m ³]		500	500	500	500	500	500
w/b-Wert		0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Duranglas		586 kg/m ³ ; Fraktion 2/8 mm; Sieblinie A8/B8					
Beton-zusatzstoff	Temp. ²⁾ [°C]	Betonzusatzstoff in M.-% vom Bindemittel					
F1	40	15/20/25/30/35 /40	--	--	--	--	--
	20	15/20/30/40	--	--	--	--	--
F2	40	15/20/30/40	--	--	--	--	--
	20	15/20/30/40	--	--	--	--	--
F3	40	15/20/25/30/35 /40	--	--	--	--	--
	20	15/20/30/40	--	--	--	--	--
KSM	40	15/20/25/30/35 /40	--	--	--	--	--
	20	15/20/30/40	--	--	--	--	--

- 1) Mischung aus K1 und K4 im Verhältnis K1/K4 = 1/0,64 mit einem Gesamtalkaliäquivalent von 1,0 M.-%
- 2) Lagerungstemperatur der Probekörper zur Ermittlung des Dehnungsverhaltens der Betone

4.3 Zementstein

Mit den Portlandzementklinkern K1 und K4 wurden entsprechend der Betone Zementsteine mit w/b = 0,45 und 0,5 hergestellt. Zum Teil erfolgte ein Austausch des Portlandzements durch 20 bis 30 M.-% der Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl und Flugasche. Diese Mischungen wurden durch Zementsteine mit den weiteren Portlandzementklinkern K5, K6 und K7 mit Alkaliäquivalenten von 0,59, 1,07 und 1,21 M.-% ergänzt, siehe Tabelle 12. An diesen Zementsteinen erfolgte eine Variation der w/b-Werte zwischen 0,3 und 0,5 und ein Portlandzementaustausch durch die Flugasche F1 und F2 zwischen 5 und 30 M.-%. Um weitere Alkaliäquivalentwerte zu erreichen, als durch die Portlandzemente vorgegeben, wurden die Portlandzemente bei Zielwerten zwischen 0,6 und 1,2 M.-% miteinander gemischt. Höhere Alkaliäquivalente, als im Portlandzement K7 natürlich vorhanden, wurden durch Zugabe von NaOH ins Anmachwasser erreicht.

Tabelle 12: Festigkeitsklasse und chemische Zusammensetzung (in M.-%) der zusätzlichen Zemente für die Zementsteinuntersuchungen

Zement	K5	K6	K7
Bezeichnung	CEM I 32,5 R		
Glühverlust ¹⁾	2,30	2,80	3,10
SiO ₂	22,3	19,5	18,9
Al ₂ O ₃	5,04	4,21	4,21
Fe ₂ O ₃	2,94	2,52	3,78
CaO	62,4	63,9	61,7
MgO	0,98	1,69	1,69
SO ₃ ¹⁾	2,95	2,56	2,60
K ₂ O ²⁾	0,53	1,35	1,58
Na ₂ O ²⁾	0,24	0,18	0,17
Na ₂ O _e ³⁾	0,59	1,07	1,21
Na/K [mol/mol]	0,29	0,48	0,33

- 1) nach DIN EN 196-2; 2) nach DIN EN 196-21
- 3) Na₂O_e = 0,658 K₂O + Na₂O [M.-%]

4.4 Nomenklatur

Normalbeton

Es werden die Art der reaktiven Gesteinskörnung, die Betonrezeptur und die Art und der Gehalt des Betonzusatzstoffes im Bindemittel angegeben.

Bezeichnungsbeispiel:

GW B2 / 30F2

Gesteinskörnung **Grauwacke**, Normalbeton der Rezeptur **2** und **30** M.-% Flugasche **F2** im Bindemittel.

Selbstverdichtender Beton

Es werden die Art der reaktiven Gesteinskörnung und die Rezeptur des selbstverdichtenden Betons angegeben.

Bezeichnungsbeispiel:

SoR SVB1

Gesteinskörnung Splitt **Oberrhein** im selbstverdichtenden **Beton** der Rezeptur **1**.

Beton mit Duranglas

Es werden die Betonrezeptur und die Art und der Gehalt des Betonzusatzstoffes im Bindemittel angegeben.

Bezeichnungsbeispiel:

D1 / 30F2

Beton mit **Duranglas** der Rezeptur **1** und **30** M.-% Flugasche **F2** im Bindemittel.

Zementstein

Bei den Zementsteinen erfolgt eine Angabe des verwendeten Klinkers, bzw. des im Portlandzement eingestellten Alkaliäquivalentes, des w/b-Wertes und der Art und des Gehalts an Betonzusatzstoff.

Bezeichnungsbeispiel:

K1 / 0,45 / 30F2

Zementstein mit Portlandzement **K1**, einem w/b-Wert von **0,45** und **30** M.-% Flugasche **F2**.

4.5 Herstellung und Lagerung

Herstellung

Bei der Herstellung der Betone und Zementsteine wurde auf eine gute Durchmischung der Ausgangsstoffe geachtet.

Die Probekörper der Normalbetone und Zementsteine wurden auf einem Rütteltisch verdichtet. Die Rüttelfrequenz und die Rütteldauer wurden entsprechend der Frischbeton- bzw. Leimkonsistenz eingestellt. Der selbstverdichtende Beton wurde über eine 1 m lange Schüttrinne über einen Winkel von rund 30° in die Schalungen eingebracht, dadurch wurde die Entlüftung des Betons gewährleistet. Diese Probekörper wurden zur Verdichtung nicht mehr gerüttelt.

Lagerung

Nach der Herstellung wurden die Betonprobekörper bis zum Ausschalen 24 Stunden in eine 20°C Feuchtkammer gestellt. Die Zementsteinproben für die Porenlösungsauspressversuche wurden bis zum Alter von 24 Stunden bei 20°C Raumtemperatur in einen Probenwender gestellt. Durch die Rotation bis zur Erhärtung wurde das Sedimentieren der Leime verhindert.

Danach wurden die Probekörper je nach vorgesehener Prüfmethode folgenderweise gelagert:

- a) Lagerung in der Nebelkammer bei 40°C und rund 100% r.F. oder bei 40°C bzw. 20°C über Wasser.
- b) Außenlagerung unter normalen Witterungsbedingungen. Die Probekörper für die Außenlagerung wurden nach dem Ausschalen bis zum Alter von 28 Tagen bei Raumklima und in Plastikfolie eingeschlagen gelagert. Damit wurden schädigende klimatische Einflüsse, wie Austrocknung oder Frost, auf die Entwicklung des jungen Betons vermieden.
- c) Die Proben für die Porenlösungsauspressversuche wurden konservierend in Plastikflaschen, d. h. ohne Austausch mit der Umgebungsfeuchte, bei der jeweiligen Prüftemperatur (20, 40 oder 60°C) gelagert.

5 Untersuchungsmethoden

Die Betonprüfungen wurden mit dem 40°C-Nebelkammerverfahren [DAfStB 07] durchgeführt. Dabei wird das Dehnungs- und Rissbildungsverhalten der Betone an Balken - 500/100/100 mm³ - und an Würfeln - 300/300/300 mm³ - unter beschleunigenden Bedingungen geprüft. Für eine zukünftige Verifizierung der aus der 40°C-Nebelkammer-Lagerung gewonnenen Erkenntnisse werden zusätzliche Würfel in der Außenlagerung langfristig der freien Bewitterung ausgesetzt. Die Betone mit Duranglas als künstlicher Gesteinskörnung wurden in Plastikbehältern bei 20 bzw. 40°C über Wasser gelagert. Parallel dazu wurde von Beton- und Zementsteinproben die Porenlösung ausgepresst und chemisch analysiert. Diese Proben wurden bis zum Prüftermin in PE-Flaschen gelagert, um einen Stoffaustausch mit der Umgebung zu verhindern. Die PE-Flaschen wurden bei 20°C, 40°C und teilweise 60°C gelagert. Die Porengrößenverteilung der Betone wurde mittels Quecksilber-Druck Porosimetrie bestimmt. Es wurden Dünnschliffe für Lichtmikroskopie unter Normal- und UV-Licht hergestellt.

Eine ausführliche Beschreibung der wichtigsten Untersuchungsmethoden incl. der Probenvorbereitung ist in Anhang 3 nachzulesen. Die Angaben zu weiteren Methoden sind direkt bei den dazugehörigen Ergebnissen zu finden.

6 Ergebnisse und Diskussion

Auf der letzten Seite dieser Arbeit befindet sich ein Merkblatt mit einem Überblick der wichtigsten Kenngrößen der Ausgangsstoffe und Betone. Dies soll dazu dienen sich beim Lesen der Ergebnisse einfacher zurechtzufinden.

6.1 Porenlösung

Die Porenlösungsuntersuchungen stellen einen zentralen Teil der Arbeit dar. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der direkten Betrachtung des Porenlösungshaushaltes von Betonen mit reaktiven Gesteinskörnungen und verschiedenen Bindemittelkombinationen. Dabei wird neben dem (a) allgemeinen Einfluss der Betonzusatzstoffe und (b) der Gesteinskörnungen auch (c) der zeitliche Verlauf der Zusammensetzung der Porenlösung der Betone ab einem Alter von 28 Tagen bis zu rund 3 Jahren untersucht.

Eine detaillierte Auflistung der Porenlösungszusammensetzungen von Betonen und Zementsteinen kann dem Anhang 5 entnommen werden.

Bei den Porenlösungsuntersuchungen, die an Betonproben durchgeführt wurden, ist es schwierig die Ergebnisse getrennt auf eine Veränderung der Bindemittelzusammensetzung - Zementart, Flugascheart, Flugaschegehalt - oder auf die Gesteinskörnung zurückzuführen. Von Seiten des Bindemittels ist dabei vor allem das unterschiedliche Alkaliäquivalent der Zemente und der Einfluss der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen und unterschiedlichen Feinheiten der Flugaschen F1, F2 und F3 auf deren puzzolanische Reaktion, die im eigentlichen Sinne auch eine Alkalireaktion darstellt, zu berücksichtigen, vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7. Aber auch die unterschiedliche Reaktivität der Gesteinskörnungen macht einen direkten Vergleich der Ergebnisse schwer. So ist bei der Grauwacke von einer langsamen, langanhaltenden Alkalireaktion mit relativ geringem Alkaliverbrauch, dagegen bei dem Duranglas von einer sehr schnellen Alkalireaktion mit hohem Alkaliverbrauch auszugehen.

Für die Interpretation der Porenlösungsergebnisse bezüglich der aus den Betonversuchen erhaltenen Ergebnisse – Dehnung und Rissbildung - ist auch das Wissen um rein chemische Gleichgewichtseffekte bei einem Vergleich unterschiedlicher Lagerungstemperaturen nötig.

Die in PE-Flaschen konservierend gelagerten Proben für die Porenlösungsversuche simulieren das Verhalten von Betonen bei denen kein Austausch mit der Umgebungsfeuchte – Austrocknung oder Durchfeuchtung – stattfindet. Aufgrund der in den Betonversuchen zur Beschleunigung der AKR eingestellten hohen Luftfeuchten (~ 100% r.F.) ist aber davon auszugehen, dass die Porenlösung in den Probekörpern der Betonversuche immer einer

gewissen Auslaugung zumindest aber einer Verdünnung durch Feuchteaufnahme unterliegt. Dies muss bei einem Vergleich der Ergebnisse berücksichtigt werden.

6.1.1 Validierung des Porenlösungsauspressversuchs

Analyseverfahren

Für alle Porenlösungsuntersuchungen am Beton bei denen die Sulfatkonzentration mitgemessen wurde, wurde zur Plausibilitätsprüfung aus den Na^+ -, K^+ -, SO_4^- - und OH^- -Konzentrationen die ladungsäquivalente Ionenbilanz berechnet. In Abbildung 10 (links) sind die Ergebnisse für die Porenlösungen der Betone mit den natürlichen Gesteinskörnungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit dem Analyseverfahren gute Ergebnisse erzielt wurden.

Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Zusammensetzung der Porenlösung

Die im Allgemeinen verwendete Beziehung $[\text{OH}^-] \approx [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$ ist als grobe Näherung nur bei niedriger Alkalität der Porenlösung und bei niedrigen Temperaturen bis 40°C zulässig. Dies setzt voraus, dass in der Porenlösung von Zementsteinen höheren Alters so gut wie nur Alkalihydroxide gelöst sind und andere Ionen, wie Chlorid, Calcium, Aluminium, Silizium oder Sulfat, nur eine untergeordnete Rolle spielen. Bei höherer Alkalität der Porenlösung und höheren Temperaturen findet aber eine Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnisses zu ungunsten der OH^- -Ionen statt [Herr 92]. Dabei spiegelt das $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnis die chemische und thermische Stabilität von Calciumsulfoaluminathydraten, zum Beispiel Ettringit, wieder. Die Verminderung der OH^- -Konzentration wirkt sich wiederum auf die durch den pH-Wert bestimmte Löslichkeit der silikatischen Bestandteile der Gesteinskörnungen aus [Bern 06].

Dass dieses Phänomen überproportional stark bei 60°C ausgeprägt ist, geht aus Abbildung 10 (rechts) hervor. Wie in der Literatur beschrieben, zeigt sich, dass sowohl mit zunehmender Alkalität als auch mit zunehmender Temperatur eine Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnisses zu ungunsten der OH^- -Ionen stattfindet. Offensichtlich üben weder das Alter, noch die Art der Gesteinskörnung oder der Flugaschegehalt der Betone einen Einfluss darauf aus. Vielmehr kann davon ausgegangen werden, dass die Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnisses tatsächlich primär auf die Alkalität und den Temperatureinfluss bzw. die Veränderung von Gleichgewichtsverhältnissen zwischen der Porenlösung und der festen Phase und nicht auf eine Beschleunigung der Alkalireaktion - weder der Gesteinskörnung noch der Flugasche - zurückzuführen ist. Dies belegt auch das Beispiel der Betone GW B5 mit Zement K4 mit einem niedrigen Alkaliäquivalent von 0,65 M.-% und GW B2 mit Zement K1 mit einem hohen Alkaliäquivalent von 1,21 M.-%, vgl. Tabelle 13. Der Beton GW B5 mit niedriger Ausgangsalkalität weist bei 20°C und 40°C mit 0,98 ein ausgeglichenes

$\text{OH}^-/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ -Ionen Verhältnis auf. Erst bei 60°C kommt es zu einer starken Verschiebung dieses Verhältnisses hin zu 0,68, was eine verstärkte Lösung von Sulfationen bedeutet. Bei Beton GW B2 mit hoher Ausgangsalkalität findet bei erhöhter Lagerungstemperatur ein, auf AKR zurückzuführender, gegenüber Beton GW B5 stärkerer Verbrauch an Alkalien statt. Dennoch stellen sich bei entsprechender Lagerungstemperatur ähnliche $\text{OH}^-/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ -Ionen Verhältnisse wie in den anderen GW B2 Betonen mit 10 bis 30 M.-% Flugasche F1 ein. Ausgehend von einem $\text{OH}^-/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ -Ionen Verhältnis von 0,85 bei 20°C und 0,77 bei 40°C findet bei 60°C der Ladungsausgleich nur noch zu rund 50 % durch OH^- -Ionen statt.

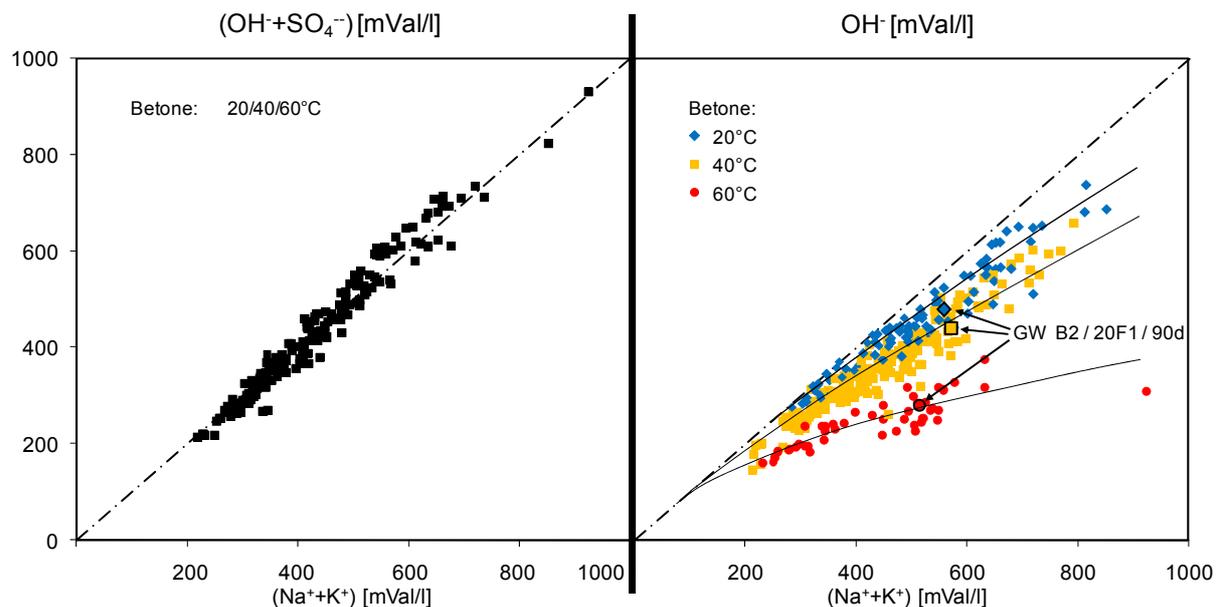


Abbildung 10: Äquivalentkonzentration der Anionen OH^- und SO_4^{2-} aufgetragen gegen die Äquivalentkonzentration der Kationen Na^+ und K^+ (links); Einfluss der Temperatur auf den OH^- - und (Na^++K^+) -Haushalt der Porenlösung (rechts); Betone mit natürlichen Gesteinskörnungen im Alter zwischen 28 Tagen und 4 Jahren.

Welche Auswirkungen dieses Phänomen auf eine AKR haben kann, wird an dem Beispiel des Betons GW B2 / 20F1 deutlich. Hier finden sich unabhängig von der Lagerungstemperatur in etwa ähnliche Alkaliegehalte in der Porenlösung. Dagegen verringert sich die OH^- -Konzentration bezogen auf 479 mmol/l bei 20°C mit 441 mmol/l bei 40°C um rund 10 % und mit 280 mmol/l bei 60°C um rund 40 %. Dies entspricht pH-Werten von 13,68, 13,64 und 13,45 bei 20°C , 40°C und 60°C . Dies ist aber ein pH-Wert Bereich in dem die Löslichkeit von SiO_2 exponentiell sinkt [Bern 06], so dass ein großer Einfluss auf eine AKR zu erwarten ist. Damit könnte auch erklärt werden, warum nach rund 24 Monaten Lagerung bei 40°C mit Auftreten einer erhöhten Dehnung von rund 0,4 mm/m eine Schädigung des Betons GW B2 / 20F1 aufgetreten ist und bei 60°C innerhalb von 18 Monaten nicht, vgl. Abbildung A4 - 2 mit Abbildung A4 - 14. Dass an dem Beton GW B2 / 20F1 in der Freilagerung im Alter von rund 4 Jahren noch keine Schädigung aufgetreten ist kann mit der langsamen

Reaktion der Grauwacke erklärt werden. In höherem Alter ist an diesem Beton somit aber noch eine Schädigung zu erwarten.

Tabelle 13: Einfluss der Temperatur auf das $\text{OH}^-/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ -Verhältnis.

Temp.	20°C			40°C			60°C		
	GW B2; K1; b = 400 kg/m ³ ; w/b = 0,45; Alter = 90 Tage								
F1 [M.-%]	OH [mmol/l]	Na+K [mmol/l]	OH/ (Na+K)	OH [mmol/l]	Na+K [mmol/l]	OH/ (Na+K)	OH [mmol/l]	Na+K [mmol/l]	OH/ (Na+K)
0	682	813	0,84	599	771	0,78	275	538	0,51
10	649	720	0,90	483	621	0,78	270	548	0,49
20	479	559	0,86	441	572	0,77	280	514	0,55
30	442	516	0,86	363	488	0,74	252	486	0,52
	Mittelwert		0,86	0,77			0,52		
	GW B5; K4; b = 400 kg/m ³ ; w/b = 0,45; Alter = 90 Tage								
0	324	331	0,98	312	319	0,98	191	281	0,68

Diese Ergebnisse zeigen, dass bei erhöhter Lagerungstemperatur zwei gegenläufige Effekte miteinander konkurrieren: zum einen wird die Reaktionsgeschwindigkeit der AKR - in der Gesteinskörnung ebenso wie in puzzolanischen Zusatzstoffen - beschleunigt, andererseits wird diese aufgrund der Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnisses und der exponentiell vom pH-Wert abhängigen Löslichkeit von SiO_2 -Modifikationen wieder verlangsamt. Dies bedeutet, dass es bei hohen Lagerungstemperaturen vor allem für Betone mit mittlerer Basizität der Porenlösung zu einer falschen Bewertung kommen kann.

In welchem Maße sich das Abkühlen der Proben während des Zeitraumes zwischen der Entnahme aus dem Prüfklima und dem Auspressen der Porenlösung auf die $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Verhältnisse auswirkt wurde nicht untersucht. Nach Abkühlen der Proben ist langfristig aber mit einer Rückverschiebung der chemischen Gleichgewichte zu rechnen [Herr 92].

Einfluss der Gesteinsart

Die Art und der Anteil reaktiven Silikates bestimmen das Verhalten einer Gesteinskörnung in der alkalischen Porenlösung des Betons. Mit zunehmender Kristallinität nimmt die Löslichkeit von SiO_2 -Modifikationen ab. Nach [Bern 06] nimmt die Löslichkeit von amorphem Opal erst ab einem pH-Wert von 13,0 ($[\text{OH}^-] \sim 100 \text{ mmol/l}$) deutlich zu. Bereits bei geringer Zunahme der Kristallinität, wie sie in Flinten oder Chalzedon (kryptokristallin) zu finden ist, zeigt sich ein Anstieg der Löslichkeit erst ab pH-Werten von über 13,5 ($[\text{OH}^-] \sim 300 \text{ mmol/l}$). Bei reinem Quarz (Bergkristall) findet auch bei einem pH-Wert von 14,0 ($[\text{OH}^-] \sim 1000 \text{ mmol/l}$) so gut wie keine Lösung des Siliziums mehr statt.

In natürlichen Gesteinskörnungen liegen in der Regel verschiedene SiO_2 -Modifikationen vor. In Betonversuchen – Messung von Dehnung/Rissbildung - kann mit unterschiedlich alkalireichen Portlandzementen für eine bestimmte Gesteinskörnung die sogenannte Grenzalkalität ermittelt werden, unterhalb derer im Beton keine schädigende Alkalireaktion

mehr auftritt. Eine, für beliebige Gesteinskörnungen, allgemein gültige Annahme der Grenzalkalität erscheint aus oben genannten Gründen wenig sinnvoll. Allgemeine Richtwerte aus der Literatur bewegen sich demnach auch in einem pH-Wert Bereich zwischen 13,3 und 13,7 ($[\text{OH}^-] \sim 200$ bis 500 mmol/l), unterhalb derer es zu keiner schädigenden AKR mehr kommt [Thau 92, Star 01]. In [Baet 07-2] wurde für verschiedene deutsche Gesteinskörnungen die Grenzalkalität bestimmt, siehe Tabelle 14, wobei mit einem pH-Wert von 13,6 für das Duranglas und den Opalsandstein die untere Grenze noch nicht erreicht wurde.

Tabelle 14: Grenzalkalität verschiedener deutscher Gesteinskörnungen [Baet 07-2] bei Prüfung in Betonen mit $z = 600 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,43$; Temperatur: 40°C

Gesteinsart	pH-Wert	$[\text{OH}^-]$ mmol/l
Duranglas	< 13,6	< 400
Opalsandstein	< 13,6	< 400
3 verschiedene Grauwacken	$\sim 13,6$	~ 400
Quarzporphyr	13,6-13,7	400-500
Splitt Oberrhein	13,6-13,7	400-500
Rheinkies Düsseldorf	13,8	$\sim 600-650$ (630)

Aus den Untersuchungen von [Baet 07-2] geht aber auch hervor, dass neben der Alkalität der Porenlösung auch der für eine Alkalireaktion zur Verfügung stehende Alkaligehalt im Beton eine wichtige Rolle spielt, das heißt, dass die ermittelten Grenzalkalitäten im engeren Sinne nur für die dabei verwendete Betonrezeptur gültig sind.

Bei der Reaktion der SiO_2 -Modifikationen in der Gesteinskörnung mit der alkalischen Porenlösung im Beton werden Alkalien in das entstehende Alkali-Silika Gel eingebunden. Dabei wird die im Beton verfügbare Alkalität verringert [Thau 92]. In Abhängigkeit von der Reaktivität und der Menge an Silikaten führt dies zu einer Absenkung der Alkalität in der Porenlösung. Bei Gesteinskörnungen mit hohen Gehalten an reaktiven SiO_2 -Modifikationen kann das bedeuten, dass bei geringen Zementgehalten der Alkalivorrat verbraucht wird, bevor das volle Reaktionspotential der Gesteinskörnung ausgenutzt wird. Dieses Verhalten, auch als Pessimumeffekt bezeichnet [Hobb 88], ist vor allem für Gesteinsarten mit hohen Anteilen amorpher Silikate typisch, z.B. Opalsandstein/Flint oder Duranglas. Bei langsam reagierenden Gesteinsarten können dagegen bereits geringe Mengen Alkalien ausreichen, um zu einer starken Schädigung des Betons zu führen, allerdings werden hier oft hohe Hydroxilkonzentrationen zum Lösen der SiO_2 -Modifikationen benötigt.

Aus diesen Überlegungen heraus wird deutlich, dass die Aufstellung von allgemein gültigen Kriterien bezüglich der Verwendung von Bindemittelkombinationen als NA-Zemente problematisch ist, da streng genommen neben der Alkalität der Porenlösung auch der „Alkalibedarf“ der Gesteinskörnungen eine Rolle spielt.

Im Laufe der AKR können aber auch im Gestein vorhandene Alkalien gelöst werden. Gerade von feldspatreichen natürlichen Gesteinskörnungen können Alkalien in der Größenordnung von 0,1 bis 0,2 M.-% v.GK. in die Porenlösung eingetragen werden [Beru 02]. Dies kann bei Gesteinsarten mit sehr hohem Alkaligehalt, wie z.B. Duranglas (~ 4 M.-% Na₂O), dazu führen, dass auch bei Verwendung von Portlandzementen mit niedrigem Alkaligehalt erhebliche Dehnungen am Beton auftreten [Stru 89].

In Abbildung 11 ist der Einfluss der in dieser Arbeit verwendeten Gesteinskörnungen auf die Alkalität im Beton B1 und B1 / 30F1 dargestellt. Als Vergleich werden die Konzentrationen im reinen Zementstein herangezogen. Inwieweit ein Eintrag an Alkalien durch die Gesteine stattgefunden hat, kann aus diesen Ergebnisse nicht abgeleitet werden.

In Abhängigkeit von der Gesteinsart sind große Unterschiede zu erkennen. So wird die Alkalität im Beton B1 von der Grauwacke mit weniger als 10 % am geringsten abgesenkt. Das Material aus dem Oberrhein führt dagegen zu einer weit höheren Absenkung von bis zu 25 %. Dies unabhängig davon, ob die Gesteinskörnung als Splitt oder als natürlich gerunderter Kies eingesetzt wird. Dass von der als inert betrachteten Gesteinskörnung EI aus calcitischem Kies mit rd. 15 % eine so starke Absenkung erreicht wird, ist auf den ersten Blick nicht zu verstehen. Zumindest eine teilweise Erklärung der Ergebnisse kann die Röntgenbeugungsanalyse liefern, siehe Tabelle A1 - 11. Das Material aus dem Oberrhein weist gegenüber der Grauwacke mit rd. 65 gegenüber 30 % einen weit höheren quarzitären Anteil auf. Auch in dem als fast rein calcitisch angenommenen Kies ist mit rd. 20 % ein überraschend hoher quarzitischer Anteil zu finden. Dies bedeutet aber auch, dass eine verhältnismäßig starke Absenkung der Alkalität in der Porenlösung nicht zwingend eine Schädigung des Betons bedeutet. Von der Gesteinskörnung EI zum Beispiel ist keine auf AKR zurückzuführende Schädigung von Bauwerken bekannt, auch wurde bei der Prüfung in der 40°C-Nebelkammer keine auf Alkalireaktion zurückzuführende Dehnung oder Rissbildung festgestellt (ohne Abbildung).

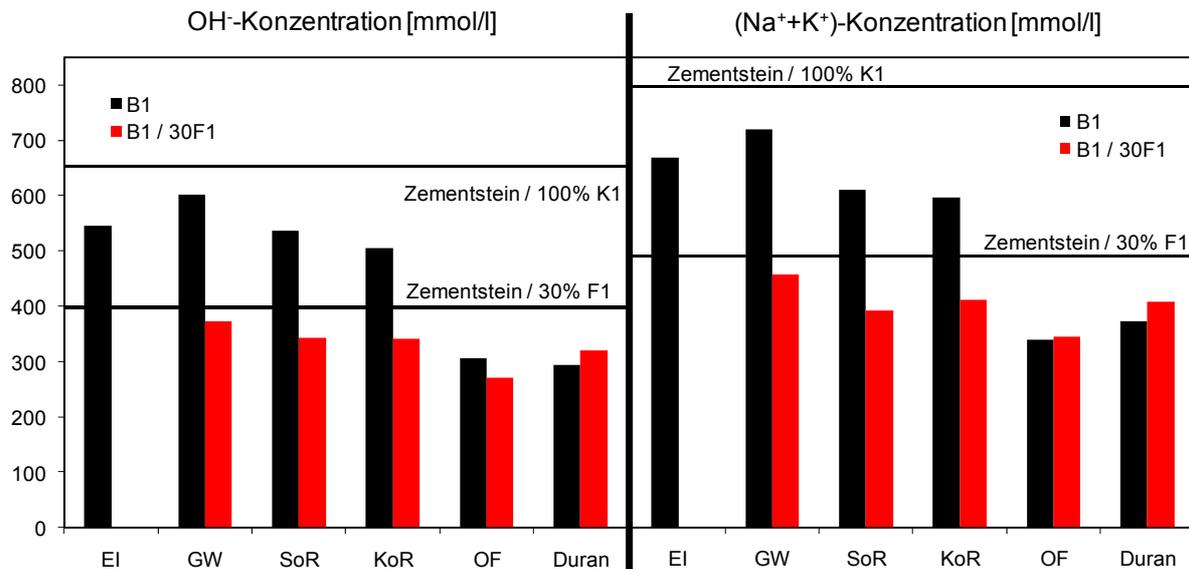


Abbildung 11: Einfluss der Gesteinsart auf die (OH⁻)- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration der Porenlösung des Betons B1 mit $b = 500\text{kg/m}^3$ und $w/b = 0,5$; 90d / 40°C.

Die Verwendung der stark reaktiven Gesteinskörnungen Opalsandstein/Flint und Duranglas führen mit rund 50 % zur stärksten Absenkung der Konzentrationen.

In den Betonen mit 30 M.-% Flugasche F1 wird im Verhältnis zur Ausgangskonzentration im Zementstein die Verringerung der Alkalität durch die Gesteinskörnungen jeweils in etwa halbiert. Dies dürfte auf (a) die Verringerung der Ausgangskonzentration und (b) Verlangsamung des Ionentransportes durch das dichtere Gefüge des flugaschehaltigen Betons zurückzuführen sein.

Eine Aussage bezüglich der Auswirkung von Betonzusatzstoffen auf die Porenlösungszusammensetzung (Eintrag, Verdünnung oder Einbindung) erscheint aufgrund des verhältnismäßig geringen Alkaliverbrauchs in den Betonen mit Grauwacke, zumindest bis zum Lagerungsalter von 90 Tagen, zulässig. Bei den stark reaktiven Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint oder Duranglas ist eine solche Betrachtung nicht mehr sinnvoll. Im Extremfall führt hier die langsamere Reaktion in den Betonen mit Flugasche zu einer Erhöhung der Porenlösungskonzentration gegenüber den Betonen mit reinem Portlandzement.

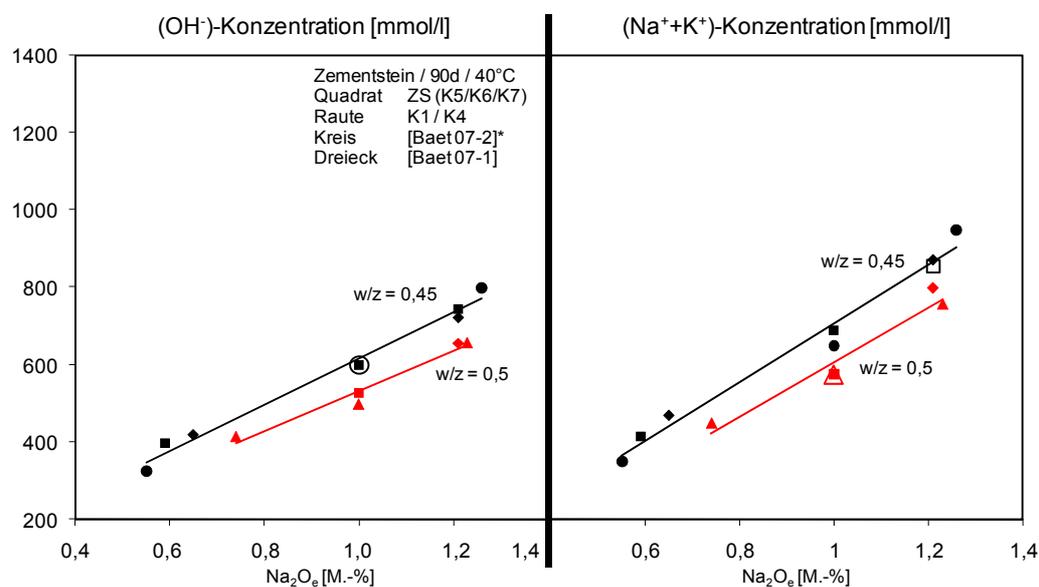
6.1.2 Zusammensetzung der Porenlösung von Zementstein mit reinem Portlandzement

Einfluss des Alkaliäquivalents (Na₂O_e) des Portlandzements

Wird im Zementstein der w/z-Wert konstant gehalten, so führt die Verwendung von Portlandzementen mit unterschiedlichen Alkaligehalten zu einer Veränderung der (OH⁻)- und (Na⁺+K⁺)-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Alkaliäquivalent der Portlandzemente. In

Abbildung 12 sind ergänzend zu den eigenen Ergebnissen Werte aus [Baet 07-1] und [Baet 07-2] mit aufgeführt. Diese Werte fügen sich gut in die eigenen Ergebnisse ein.

Im Bereich der in Deutschland üblichen Portlandzementalkaligehalte (rd. 0,6 bis 1,2 M.-%) zeigt sich für einen gegebenen w/z-Wert ein linearer Zusammenhang zwischen der (OH⁻)- bzw. (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung und dem Alkaliäquivalent des Portlandzementes. Von einem linearen Zusammenhang wird auch in der Literatur berichtet, wobei auch diese Angaben immer nur für einen bestimmten w/z-Wert gültig sind, siehe [Herr 92] und [Diam 89].



*) Werte aus Abbildungen herausgemessen

Abbildung 12: Einfluss des Alkaliäquivalents von Portlandzement auf die OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration der Porenlösung von Zementstein bei Einhaltung eines konstanten w/z-Wertes.

Einfluss des w/z-Wertes im Zementstein

In Abbildung 13 ist der Einfluss des w/z-Wertes auf die Zusammensetzung der OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung von Zementstein dargestellt. Das Alkaliäquivalent von 1,0 M.-% in dem dafür verwendeten Portlandzement wurde durch Abmischen der Portlandzemente K5 und K6 eingestellt. Über den Bereich der w/z-Werte von 0,3 bis 0,5 ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Veränderung des w/z-Wertes und der OH⁻-Konzentration zu erkennen. Eine Verringerung des w/z-Wertes führt zu einer Erhöhung der OH⁻-Konzentration. Zwischen 7 und 90 Tagen Hydratationsalter findet keine bedeutsame Veränderung der Werte mehr statt. Die Verringerung der Lagerungstemperatur von 40 auf 20°C bewirkt allgemein eine Erhöhung der OH⁻-Konzentration. Wie bereits unter Punkt 6.1.1 beschrieben, ist dies auf die Verschiebung des OH⁻/SO₄²⁻-Ionen Verhältnisses bei höheren

Temperaturen zurückzuführen. Dies ist bei niedrigeren Konzentrationen weniger ausgeprägt als bei höheren. Bezogen auf die Werte bei 40°C führt dies bei OH⁻-Konzentrationen von 500 bzw. 800 mmol/l zu einer Erhöhung von rd. 15 bzw. 20 % bei 20°C, siehe Abbildung 13 (links).

Im Gegensatz zur OH⁻-Konzentration stellen sich unabhängig von der Temperatur ähnliche (Na⁺+K⁺)-Konzentrationen in der Porenlösung ein. Für die (Na⁺+K⁺)-Konzentration ist kein eindeutig linearer Zusammenhang mit der Veränderung des w/z-Wertes mehr zu erkennen. Hier ist für w/z-Werte kleiner 0,4 von einer verstärkten Aufkonzentration der Porenlösung auszugehen. Diesem Effekt scheint bei der OH⁻-Konzentration eine verstärkte Lösung von SO₄²⁻-Ionen entgegenzuwirken vgl. Abbildung 13 (links und rechts).

Für eine grobe Abschätzung der (OH⁻)- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in Abhängigkeit des w/z-Wertes im Zementstein scheint die Annahme eines linearen Zusammenhangs zumindest im w/z-Wert-Bereich zwischen 0,4 und 0,5 zulässig. Bei einer Extrapolation der Ergebnisse hin zu höheren Wassergehalten stößt diese Annahme allerdings schnell an ihre Grenzen. So würde man damit bereits bei w/z-Werten zwischen 0,8 und 1,0 negative Werte erhalten.

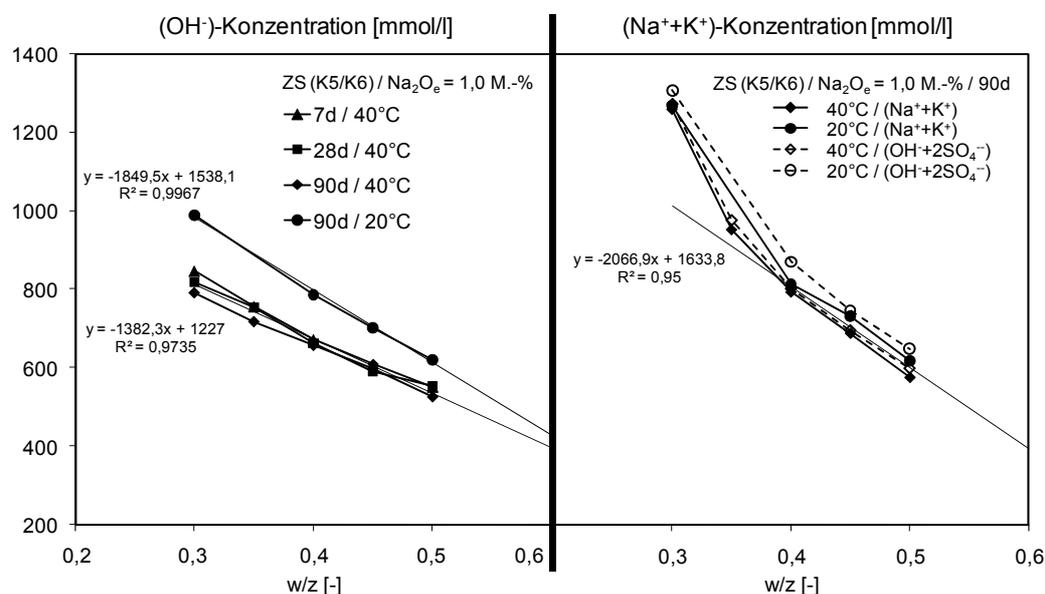


Abbildung 13: Einfluss des w/z-Werts, des Hydratationsalters und der Temperatur auf die OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung von Zementstein.

Abschätzung der $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung von Zementstein mit Portlandzement

Allgemein:

Die Ergebnisse zum Einfluss des Alkaligehalts im Portlandzement und des w/z-Wertes im Zementstein auf die OH^- - und $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentration belegen, dass ein direkter Zusammenhang zwischen der Menge lösbarer Alkalien und der im Zementstein verfügbaren freien Wassermenge besteht. Mit anderen Worten, je mehr Wasser für eine gegebene Alkalimenge zur Verfügung steht, desto mehr wird die Konzentration in der Porenlösung verringert. Aus den Versuchen, bei denen der Alkaligehalt im Portlandzement bei Einhaltung eines konstanten w/z-Wertes variiert wird, ergibt sich ein linearer Zusammenhang bei der Auftragung der OH^- - und $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentration über den Alkaligehalt. Die Ergebnisse gelten allerdings immer nur für den dabei verwendeten w/z-Wert. Verändert man den w/z-Wert bei konstantem Alkaligehalt, führt die Auftragung über den w/z-Wert allerdings zu keiner befriedigenden Lösung, da nicht ersichtlich ist, nach welcher Gesetzmäßigkeit sich die $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentrationen verändern. Im Gegensatz zu den $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentrationen ist für die (OH^-) -Konzentration allerdings noch die Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^-$ -Ionen Verhältnisses in Abhängigkeit von der Temperatur und vom Alkaligehalt zu berücksichtigen. Somit kann auch nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die oben genannten Zusammenhänge alleine gültig sind. Daher wird eine weitere Anpassung nur für die Alkalien durchgeführt.

Vorgehensweise:

Um das Verhalten der $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung von Zementsteinen (ZS) höheren Alters (> 28 Tage) abzuschätzen, kann man näherungsweise die Annahme treffen, dass die Hydratation des Portlandzements (Z) weitgehend abgeschlossen ist. Somit verändern sich auch nicht mehr die Menge der gelösten Alkalien und das im Zementstein vorliegende freie Wasser.

Damit werden die $(\text{Na}^+\text{+K}^+)$ -Konzentrationen ($\text{mmol}_{\text{Ionen}}/\text{l}_{\text{Wasser}}$) in der Porenlösung des Zementsteins vom (1) Verhältnis der Menge an Portlandzement (g) bezogen auf den Wassergehalt (l) im Zementstein, ausgedrückt als z/w-Wert ($\text{g}_{\text{Portlandzement}}/\text{g}(\text{l})_{\text{Wasser}}$) und vom (2) Alkaligehalt aus Portlandzement entsprechend dem Portlandzementgehalt im Zementstein ($\text{g}_{\text{Portlandzement}}/\text{g}_{\text{Zementstein}}$) bestimmt. Weiter veranschaulicht werden kann dies durch die Auftragung des Verhältnisses z/w (Formel 5) gegen den aus dem w/z-Wert berechneten Portlandzementanteil im Zementstein Z_{ZS} (Formel 4) in einer Art Normkurve, siehe Abbildung 14.

$$Z_{ZS} = \frac{1}{1 + \frac{w}{z}} \quad [-]$$

Formel 4: Massebezogener Anteil des Portlandzements (Z_{ZS}) im Zementstein.

$$\frac{z}{w} = \frac{Z_{ZS}}{1 - Z_{ZS}} \quad [-]$$

Formel 5: Massebezogenes Verhältnis von Portlandzement zu Wasser (z/w-Wert) im Zementstein.

$$\frac{w}{z} = \frac{w/b}{1 - \frac{BZS}{100}} \quad [-]$$

BZS: Anteil des Betonzusatzstoffes im Bindemittel in M.-%

Formel 6: Umrechnung des w/b-Wertes in den w/z-Wert bei massebezogenem Austausch des Portlandzementes durch Betonzusatzstoffe (BZS).

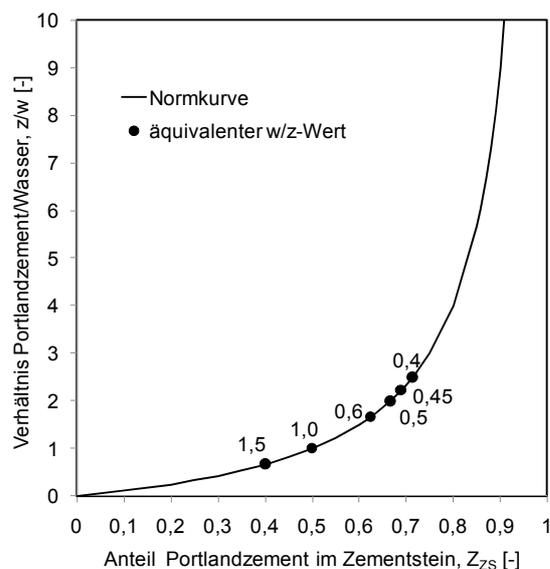


Abbildung 14: Allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Anteil des Portlandzements im Zementstein und dem Verhältnis Portlandzement/Wasser (z/w-Wert).

Das bedeutet, dass sich bei einer Veränderung des Portlandzementanteils Z_{ZS} im Zementstein die $(Na^+ + K^+)$ -Konzentrationen in der selben Weise wie das Verhältnisses zwischen Portlandzement und Wasser (z/w-Wert) verändern. Dies würde auch erklären, warum im Bereich niedriger w/z-Werte, etwa ab 0,4, bereits eine relativ geringe Absenkung des w/z-Wertes eine so starke Erhöhung der $(Na^+ + K^+)$ -Konzentrationen bewirkt, vgl. Abbildung 13 (rechts). Da bei kleineren w/z-Werten als 0,4 aufgrund Wassermangels keine vollständige Hydratation des Portlandzements mehr stattfinden kann, sondern größere Anteile unhydratisiert bleiben, ist aber auch davon auszugehen, dass der hier gewählte Ansatz bei w/z-Werten kleiner 0,4 immer ungenauer wird. Der Vorteil ist allerdings, dass bei sehr viel

höheren w/z-Werten bzw. niedrigeren Portlandzementanteilen weiterhin eine genaue Aussage getroffen werden kann.

Zusätzlich ermöglicht die Loslösung vom w/z-Wert als Bezugsgröße es auch, die Porenlösungszusammensetzung von Zementsteinen mit Betonzusatzstoffen abzuschätzen. Dazu wird ausgehend vom w/b-Wert und vom massebezogenen Anteil des Betonzusatzstoffes im Bindemittel der tatsächlich im Zementstein vorliegende w/z-Wert und damit wiederum der Portlandzementanteil Z_{ZS} bestimmt, siehe Formel 4 und Formel 6. Dies ist natürlich nur unter der Voraussetzung sinnvoll, dass sich der Betonzusatzstoff rein inert (Verdünnung) verhält. Eine Abweichung der Messergebnisse von dieser Berechnung bedeutet folglich einen Eintrag oder eine Bindung von Alkalien durch den Betonzusatzstoff.

Durch diese Vorgehensweise kann alleine in Abhängigkeit vom Alkaliäquivalent des verwendeten Portlandzementes, über eine einfache Multiplikation der in Abbildung 14 dargestellten Normkurve, die $(Na^+ + K^+)$ -Konzentration in Zementsteinen mit beliebigem w/z-Wert abgeschätzt werden. Der für ein Alkaliäquivalent gültige Multiplikationsfaktor NK_A wird Anhand einer gemessenen $(Na^+ + K^+)$ -Konzentration ermittelt, siehe Formel 7.

$$NK_A = \frac{[Na^+ + K^+]_{gem}}{(z/w)} \quad [\text{mmol/l}]$$

Formel 7: Multiplikationsfaktor (NK_A) der Normkurve für ein bestimmtes Alkaliäquivalent des Portlandzementes; ermittelt über die, bei einem w/z-Wert $\geq 0,4$ gemessene, $(Na^+ + K^+)$ -Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins.

In Tabelle 15 wurden die Multiplikationsfaktoren NK_A für Portlandzemente mit Alkaliäquivalenten von 1,21, 1,0 und 0,65 M.-% bestimmt. Dafür wurden die in Zementsteinen mit unterschiedlichen w/z-Werten und unterschiedlichen Gehalten an Betonzusatzstoffen gemessenen $(Na^+ + K^+)$ -Konzentrationen verwendet. Dass für die Ermittlung des Multiplikationsfaktors NK_A auch Zementsteine mit Betonzusatzstoffen verwendet werden, ist allerdings nur zulässig, da davon ausgegangen werden kann, dass die hier verwendeten Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl und Hüttensand rein verdünnend wirken. Die Ergebnisse aus den Porenlösungsuntersuchungen an Betonen mit Grauwacke lassen diese Annahme zu, siehe Abbildung 21.

Wie erwartet, weichen die rechnerischen Ergebnisse der $(Na^+ + K^+)$ -Konzentrationen bei w/z-Werten kleiner 0,4 immer stärker von den gemessenen ab, daher wurden für die Bestimmung der mittleren Multiplikationsfaktoren auch nur die Multiplikationsfaktoren für w/z-Werte $\geq 0,4$ berücksichtigt, vgl. Werte für Portlandzement mit $Na_2O_e = 1,0$ M.-% in Tabelle 15. Bei w/z-Werten $\geq 0,4$, ergeben sich für einen bestimmten Portlandzement unabhängig von der Zusammensetzung des Zementsteins und der Temperatur in etwa

dieselben Multiplikationsfaktoren. Alleine dies belegt, dass der gewählte Ansatz richtig ist. Zusätzlich ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Veränderung des Multiplikationsfaktors und dem Alkaliäquivalent des Portlandzementes. Die Abweichung der gemessenen ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentrationen von den rechnerisch ermittelten liegt unter 10 %.

Überprüfung der Vorgehensweise:

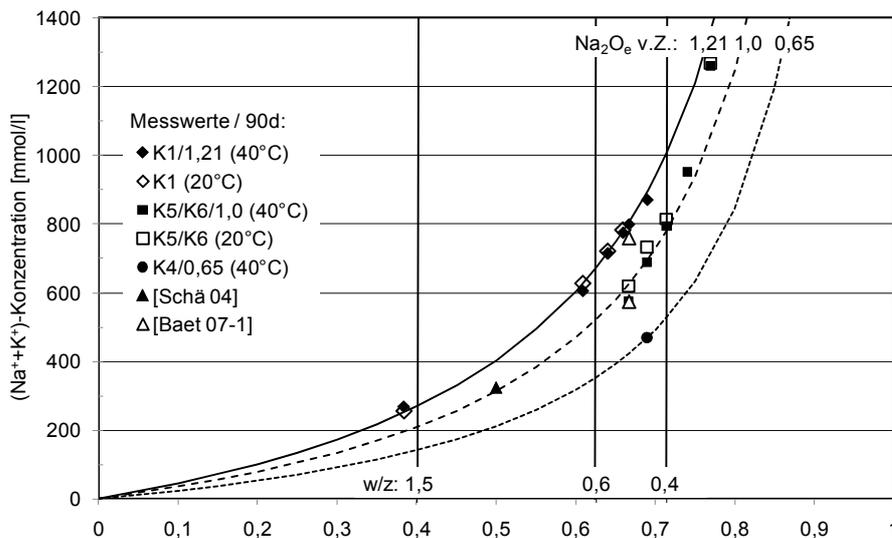
Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 graphisch dargestellt. Die eigenen Ergebnisse konnten mit einigen Werten aus der Literatur ergänzt werden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der rechnerischen Abschätzung. Eine weitere Validierung dieses Ansatzes muss aber noch über eine größere Datenbasis erfolgen. So dürften sich eine unterschiedliche Mahlfeinheit und eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung der Zemente auf die Löslichkeit der Alkalien auswirken, so dass der Multiplikationsfaktor für jeden Portlandzement einzeln ermittelt werden sollte, um eine optimale Abschätzung der ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentrationen zu erhalten.

Tabelle 15: Ermittlung des Multiplikationsfaktors NK_A aus Messwerten und Angaben zur Abweichung der gerechneten ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentrationen von den gemessenen.

Zementstein	BZS [M.-% v.B.]	w/z	Z_{ZS}	z/w	[$\text{Na}^+ + \text{K}^+$] 90d/40°C	[$\text{Na}^+ + \text{K}^+$] 90d/20°C	NK_A 40°C	NK_A 20°C	[$\text{Na}^+ + \text{K}^+$] gerechnet
Portlandzement mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,21$ M.-%									
K1	--	0,45	0,690	2,222	870	--	392	--	898
K1	--	0,5	0,667	2,000	799	--	400	--	808
K1 / 13S	13 ¹⁾	--	0,659	1,933	775	783	401	405	781
K1 20KSM	20 ¹⁾	--	0,640	1,778	715	721	402	406	718
K1 30KSM	30 ¹⁾	--	0,609	1,556	605	628	389	403	628
K1 / 72S	72 ¹⁾	--	0,384	0,622	268	257	431	412	251
Mittelwert NK_A (1,21) für 40°C und 20°C:							404		
Mittlere Abweichung gerechnet/gemessen:									2 %
Maximale Abweichung gerechnet/gemessen:									6 %
Portlandzement mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,0$ M.-%									
K5/K6	--	0,3	0,769	3,333	1259	1269	378	381	1044
K5/K6	--	0,35	0,741	2,857	952	--	333	--	895
K5/K6	--	0,4	0,714	2,500	793	814	317	326	783
K5/K6	--	0,45	0,690	2,222	688	732	310	330	696
K5/K6	--	0,5	0,667	2,000	576	618	288	309	626
Mittelwert NK_A (1,0) für 40°C und 20°C:							313 ²⁾		
Mittlere Abweichung gerechnet/gemessen:									4 % ²⁾
Maximale Abweichung gerechnet/gemessen:									9 % ²⁾
Portlandzement mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,65$ M.-%									
K4	--	0,45	0,690	2,222	469	--	211	--	--

1) w/b = 0,45

2) Werte erst ab w/z >= 0,4 berücksichtigt



[Schä 04]: Zementstein mit $w/b = 0,5$; Na_2O_e Portlandzement = 0,99 M.-%; 50% Kalksteinmehl im Bindemittel; 56d/20°C

[Baet 07-1]: Zementstein mit $w/b = 0,5$; Na_2O_e Portlandzement = 1,00 bzw. 1,23 M.-%; 90d/40°C

Abbildung 15: Abschätzung der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins für 20 und 40°C.

6.1.3 Zusammensetzung der Porenlösung von Zementstein mit Portlandzement und Flugasche

Zum Einfluss der Flugasche auf die Zusammensetzung der Porenlösung im reinen Zementstein finden sich viele, sehr umfassende Arbeiten in der Literatur, u.a. [Baet 07-1, Bram 04, Schä 04]. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche am Zementstein haben stichpunktartigen Charakter. Sie wurden durchgeführt, um die Eigenheiten der Flugaschen F1, F2 und F3 zu beschreiben. Dies soll bei der Interpretation der Ergebnisse zur Porenlösungszusammensetzung der Betone helfen, die verschiedenen Auswirkungen des Bindemittels bzw. der Gesteinskörnung zu differenzieren.

OH⁻- bzw. $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration

In Abbildung 16 ist der Einfluss der Art und der Menge an Flugasche auf die OH⁻- und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins in Abhängigkeit vom Alkaliäquivalent des Portlandzements dargestellt. Ausgehend von den Zementsteinen mit reinem Portlandzement ist die theoretische Verdünnung entsprechend der massebezogenen Austauschrate des Zementes durch Betonzusatzstoff aufgetragen. Werte die oberhalb, auf oder unterhalb dieser Linie liegen können als Freisetzung, Verdünnung oder Alkalibindung interpretiert werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die OH⁻-Konzentration diskutiert, die Schlussfolgerungen gelten aber ebenso für die $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration.

Im Vergleich zur Flugasche F1 mit mittlerer Feinheit und hohem Alkaligehalt nimmt die Wirksamkeit der Flugaschen mit zunehmender Feinheit (F2) und abnehmendem Alkaligehalt (F3) zu, wobei in diesem Fall durch einen niedrigen Alkaligehalt gegenüber der Feinheit eine stärkere Wirkung erzielt wird. Dass bei gleichen Reaktionszeiten (90d/40°C) in der feinen Flugasche F2 gegenüber der Flugasche F1 größere Mengen Alkalien in die Reaktionsprodukte der puzzolanischen Reaktion eingebaut werden, kann mit einem höheren Reaktionsgrad der Flugasche F2 erklärt werden.

Die Alkalibindekapazität wird auch durch den Anteil der Flugasche im Bindemittel beeinflusst. So wird die Alkalität der Porenlösung im Zementstein mit Portlandzement K5/K6 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1,0 \text{ M.-%}$) erst ab rd. 20% Flugasche in den Bereich einer Verdünnung bzw. Einbindung abgesenkt. Geringe Flugaschegehalte von 5 bis 10% führen dagegen zu einem Eintrag von Alkalien in die Porenlösung. Dies könnte damit zusammenhängen, dass bei geringen Mengen an Flugasche das C/S-Verhältnis der Hydratphasen noch nicht genügend abgesenkt werden kann, so dass die Alkalibindekapazität der Hydratationsprodukte nicht ausreicht die Alkalien aus der Flugasche vollständig aufzunehmen.

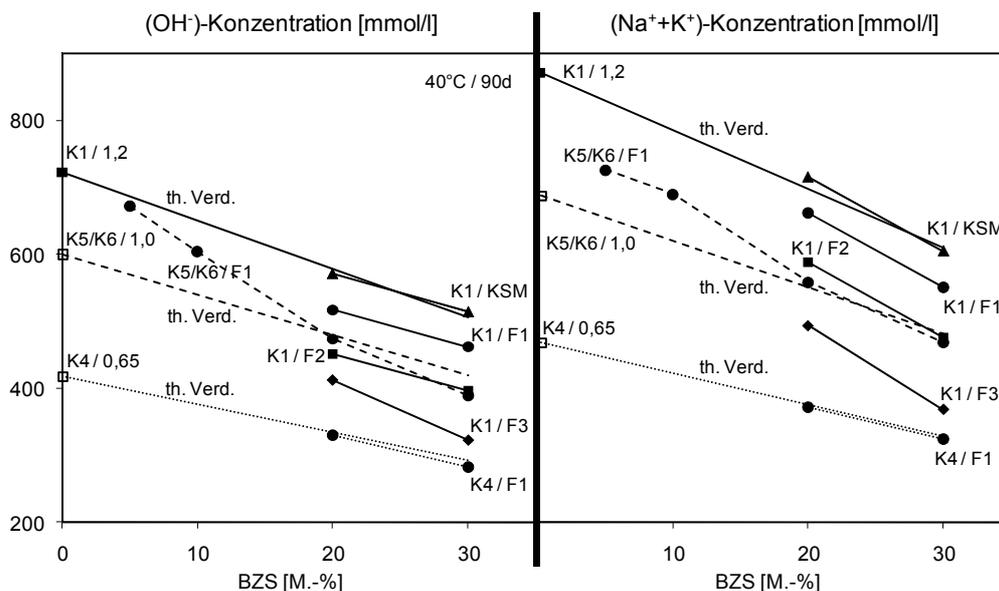


Abbildung 16: Einfluss der Art und der Menge an Flugasche und des Alkaliäquivalents des Portlandzements auf die OH^- - und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration der Porenlösung von Zementstein.

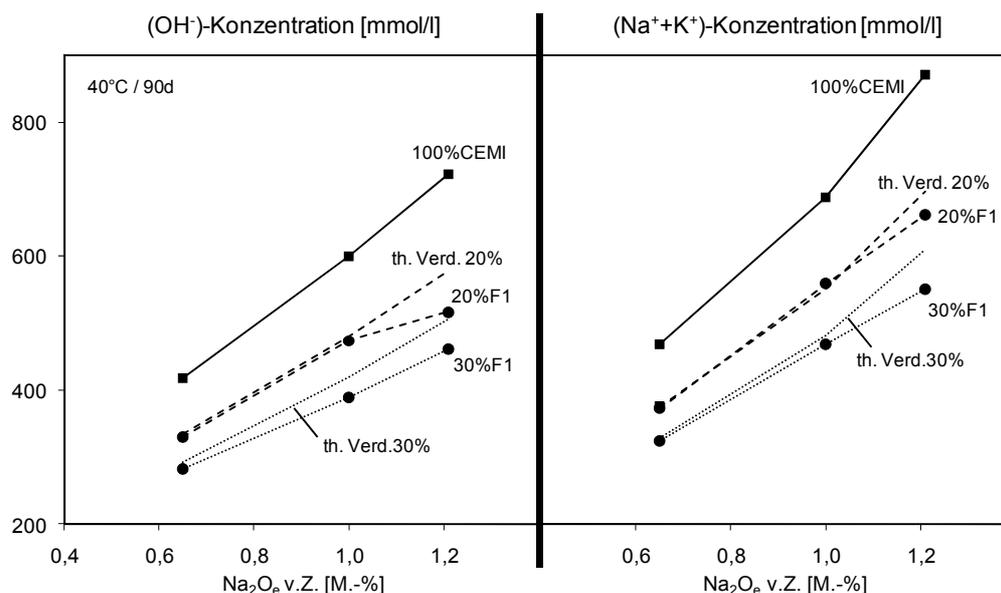


Abbildung 17: Einfluss des Alkaliäquivalents des Portlandzements auf die Wirksamkeit der Flugasche bezüglich der OH^- - und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung von Zementstein.

Auch das Alkaliäquivalent der Portlandzemente wirkt sich auf die Wirksamkeit der Flugasche aus. Dieser Effekt wird auch noch einmal in Abbildung 17 verdeutlicht. Ein höheres Alkaliäquivalent im Portlandzement führt zu einer verstärkten Wirksamkeit der Flugasche bezüglich der Verringerung der Alkalität in der Porenlösung. Wobei zumindest ab Flugaschegehalten von 20% auch bei Portlandzementen mit niedrigem Alkaligehalt immerhin noch mit einer Absenkung der Alkalität in den Bereich einer Verdünnung zu rechnen ist, so dass auch bei solchen Bindemittelkombinationen von einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt ausgegangen werden kann. Begründet werden kann dieses Verhalten mit einer verstärkten Aktivierung der Flugasche in Zementsteinen mit erhöhter Grundalkalität. Dies führt ebenso wie eine zunehmende Feinheit zu einem verstärkten Umsatz der Flugasche, dabei entstehen mehr Hydratationsprodukte die in der Lage sind Alkalien einzubinden.

Die Fähigkeit aluminiumreicher Flugaschen die Bindung beträchtlicher Mengen an Alkalien zu bewirken, wird neben der Verringerung des C/S-Verhältnisses in den C-S-H-Phasen der zusätzlichen Bildung von C-A-S-H-Phasen zugeschrieben [Tayl 85]. Wenn in den Silikathydraten Silizium durch Aluminium substituiert wird, liefern die Kationen Na^+ und K^+ den nötigen Ladungsausgleich [Hong 02]. Eine verstärkte Bildung von C-A-S-H-Phasen in Zementstein mit Flugasche F1 konnte durch NMR-Untersuchungen bestätigt werden. An ausgewählten Zementsteinen wurden durch ^{29}Si -MAS-NMR die Hydratationsgrade sowie die mittleren Kettenlängen und die Si/Al-Verhältnisse der C-S-H-Phasen bestimmt (Messbedingungen und Auswertung siehe [Buch 05] bzw. [Hilb 03]).

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der NMR-Untersuchungen an verschiedenen Zementsteinen aufgeführt. Nach einer Lagerungsdauer von 180 Tagen bei 40°C wurde an der Flugasche F1 bzw. am Hüttensand ein Reaktionsgrad von ca. 50 bzw. 75% festgestellt. Im Vergleich zum Zementstein aus 100% Portlandzement werden durch den Austausch von Portlandzement durch Flugasche F1 oder Hüttensand C-S-H-Phasen mit größeren Kettenlängen und niedrigerem Si/Al-Verhältnis gebildet. Dass trotz des verstärkten Aluminiumeinbaus in die C-S-H-Phasen keine über eine Verdünnung hinausgehende Absenkung der (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit Hüttensand festgestellt wird, kann auf das weiterhin hohe C/S-Verhältnis in den C-S-H-Phasen aus Hüttensand zurückgeführt werden, siehe Punkt 2.3.4 und Abbildung 21.

Tabelle 16: Hydratationsgrad des Zementsteins, mittlere Kettenlänge (KL) und Si/Al-Verhältnis der C-S-H Phasen aus NMR-Untersuchungen.

Zementstein	Hydratationsgrad ¹⁾				KL	Si/Al
	gesamt	K1	F1	S		
	mol % Si	mol % Si	mol % Si	mol % Si		
K1	92	92	-	-	4,6	14,0
K1 + 30% F1	64	74	54	-	8,2	6,3
K1 + 72% S	74	77	-	73	7,4	5,7

1) Hydratationsgrad bezogen auf reagiertes Silizium des gesamten Zementsteins bzw. des einzelnen Bestandteils

Aluminiumkonzentration

Die Flugaschen wirken sich nicht nur auf den Alkalien- sondern auch auf den Aluminiumhaushalt der Porenlösung aus, Abbildung 18 und Abbildung 19. Im Vergleich zu den Zementsteinen mit reinem Portlandzement K1 führt ein steigender Anteil der Flugaschen F1 und F2 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 25 \text{ M.-%}$) zu einer stetigen Erhöhung der Aluminiumkonzentration in der Porenlösung bis rd. dem 4-fachen bei 30% Flugasche im Bindemittel. Im Gegensatz dazu werden im Zementstein mit Hüttensand ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 10 \text{ M.-%}$) weiterhin niedrige Aluminiumkonzentrationen im Bereich derjenigen des Zementsteins mit Portlandzement gemessen. Dieses Ergebnis ist etwas überraschend, da der Aluminiumgehalt zumindest im Bindemittel mit 30% Flugasche bzw. 72% Hüttensand in etwa in derselben Größenordnung liegt.

Es konnte nicht geklärt werden, warum die Flugasche F3 so wenig Aluminium in die Porenlösung einbringt, obwohl die Aluminiumgehalte der Flugaschen F1, F2 und F3 mit rd. 25 M.-% ähnlich sind. Dies könnte mit dem (1) geringen Glasgehalt (67 M.-%) bzw. (2) dem niedrigen Alkaligehalt der Flugasche F3 (1,1 M.-%) zusammenhängen, vgl. rd. 80 M.-% bzw. rd. 3,6 M.-% in den Flugaschen F2 und F3. Der höhere Hydratationsgrad der feinen Flugasche F2 führt zu gleichen Zeitpunkten zu einem höheren Aluminiueintrag in die Porenlösung als durch die Flugasche F1.

Ein höheres Alkaliäquivalent im Portlandzement führt nicht nur zu einer verstärkten Alkalibindekapazität sondern auch zu einem erhöhten Eintrag von Aluminium in die Porenlösung, siehe Abbildung 18 (rechts). Auch hier ist als Grund eine verstärkte Aktivierung der Flugasche in Zementsteinen mit erhöhter Grundalkalität zu nennen. Dies führt ebenso wie eine höhere Feinheit der Flugasche F2 zu einem verstärkten Umsatz der Flugaschen, wodurch mehr Aluminium in die Porenlösung abgegeben wird.

Der Vergleich der Aluminiumkonzentration nach 90 und 365 Tagen zeigt, dass der Aluminiumhaushalt in der Porenlösung des Zementsteins mit Flugasche über die Zeit reaktiv stabil bleibt. Auf keinen Fall ist im Laufe der Zeit mit einer Absenkung der Aluminiumkonzentration zu rechnen, eher ein leichter Anstieg, siehe Abbildung 19.

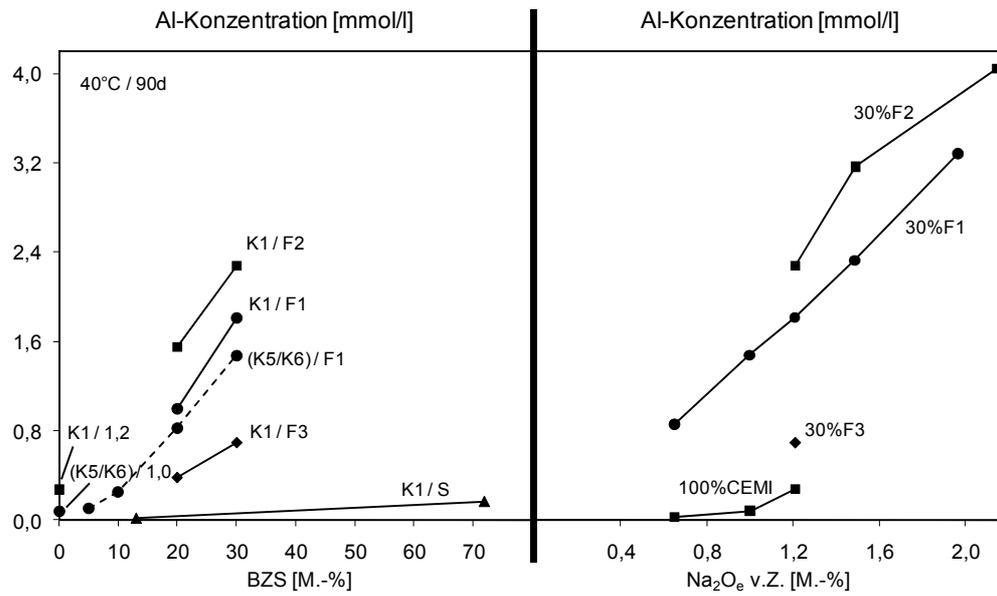


Abbildung 18: Einfluss der Art und der Menge an Flugasche bzw. Hüttensand und des Alkaliäquivalents des Portlandzements auf die Aluminiumkonzentration in der Porenlösung des Zementsteins.

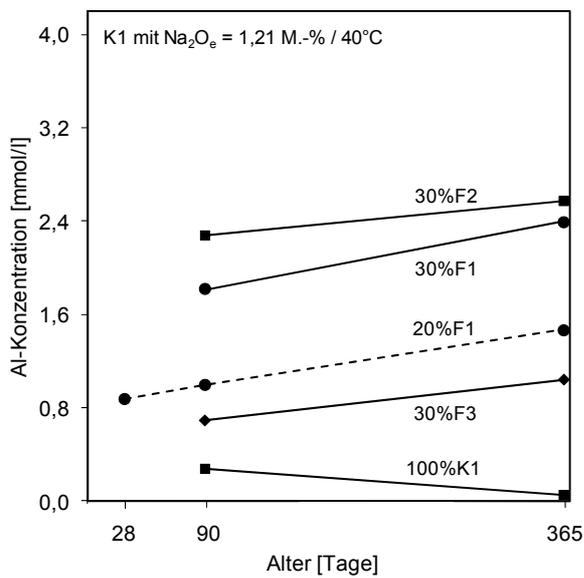


Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung der Aluminiumkonzentration in der Porenlösung von Zementsteinen mit Flugasche.

Siliziumkonzentration

Werden die Siliziumkonzentrationen betrachtet, so sind im Vergleich zur Aluminiumkonzentration weit weniger ausgeprägte Tendenzen zu erkennen, vgl. Abbildung 18 mit Abbildung 20. Die Siliziumkonzentration bewegt sich für alle Bindemittelkombinationen auf einem niedrigen Niveau von rd. 1,0 mmol/l.

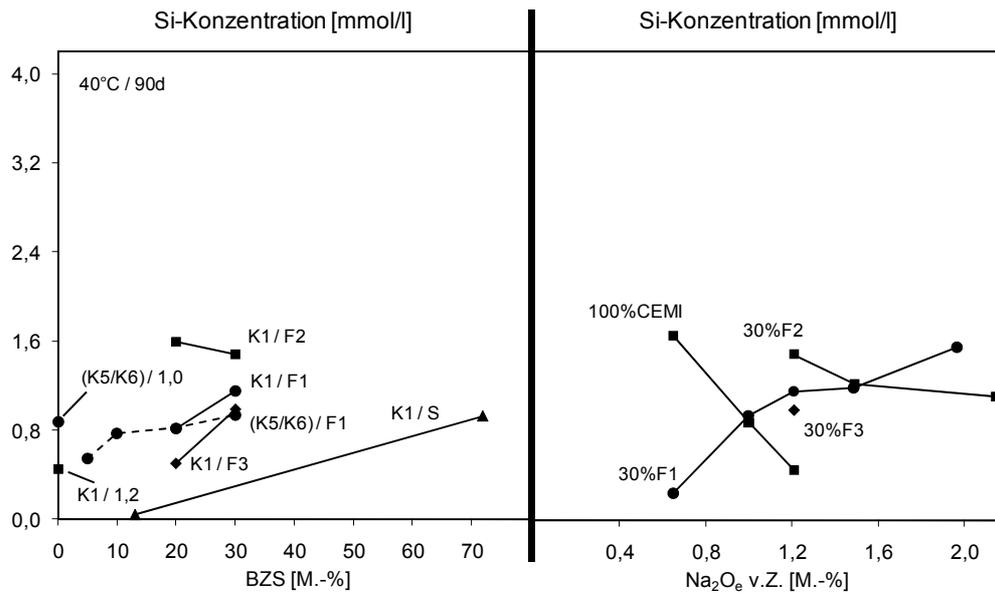


Abbildung 20: Einfluss der Art und der Menge an Flugasche bzw. Hüttensand und des Alkaliäquivalents des Portlandzements auf die Silizium-Konzentration in der Porenlösung des Zementsteins.

6.1.4 Porenlösung in Betonen mit Grauwacke als reaktiver Gesteinskörnung

Ein entscheidender Punkt für die Wirksamkeit eines Betonzusatzstoffes hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden AKR ist sein Einfluss auf die Porenlösungszusammensetzung, im Speziellen auf den pH-Wert und die Alkalikonzentration der Porenlösung. Die Stärke des chemischen Angriffs auf die silikatischen Bestandteile einer Gesteinskörnung hängt von der Höhe des pH-Wertes bzw. der OH^- -Konzentration der Porenlösung ab. Erst bei einer ausreichend hohen OH^- -Konzentration wird SiO_2 gelöst, das zusammen mit den Alkalien Natrium und Kalium quellfähige Alkalisilikate, allgemein als AKR-Gel bezeichnet, bildet.

(OH^-)- bzw. ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration

Unter Punkt 6.1.1, Abbildung 11, wurde festgestellt, dass die Porenlösungszusammensetzung der Betone bereits in jungem Alter durch die Alkali-Kieselsäure Reaktion der Grauwacke beeinflusst wird. Da der Einfluss der Grauwacke aber verhältnismäßig gering ist, erscheint es zulässig die Wirkungsweise der verschiedenen Betonzusatzstoffe im Alter von 90 Tagen zu vergleichen.

In Abbildung 21 ist der Einfluss der Art und der Menge an Betonzusatzstoffen auf die Gesamtalkali- ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) und OH^- -Konzentration in der Porenlösung des Betons dargestellt. Beispielhaft werden hier die Ergebnisse der Betone B2 mit 400 kg Bindemittel, einem w/b-Wert von 0,45 und mit Grauwacke als reaktiver Gesteinskörnung im Alter von 90 Tagen, gelagert bei 40°C , gezeigt. Ausgehend vom Beton B2 mit reinem Portlandzement K1 entspricht die gestrichelte Linie den berechneten Werten für eine theoretische Verdünnung entsprechend der Austauschrate des Zementes durch Betonzusatzstoff. Werte die oberhalb, auf oder unterhalb dieser Linie liegen können als Freisetzung, Verdünnung oder Alkalibindung interpretiert werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse für die OH^- -Konzentration diskutiert, die Schlussfolgerungen gelten aber ebenso für die ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration.

Es bestätigt sich, dass zwei Faktoren für die OH^- -Konzentration maßgeblich sind:

- die ausgetauschte Menge an Portlandzementklinker im Sinne einer einfachen Verdünnung der wirksamen Alkalien, die die OH^- -Konzentration steuern und
- die Einbindung von Alkalien in spezifische Reaktionsprodukte.

Bei dem hier verwendeten Hüttensand und ebenso beim Kalksteinmehl führt die ausgetauschte Menge an Zementklinker zu einer proportionalen Absenkung der OH^- -Konzentration mit Werten die in etwa einer Verdünnung der Alkalität aus dem Zementklinker entsprechen. Nur bei den Flugaschen ist über die Verdünnung hinaus eine

signifikante Abnahme der OH⁻-Konzentration festzustellen. Dies kann damit begründet werden, dass Flugaschen Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion einbauen.

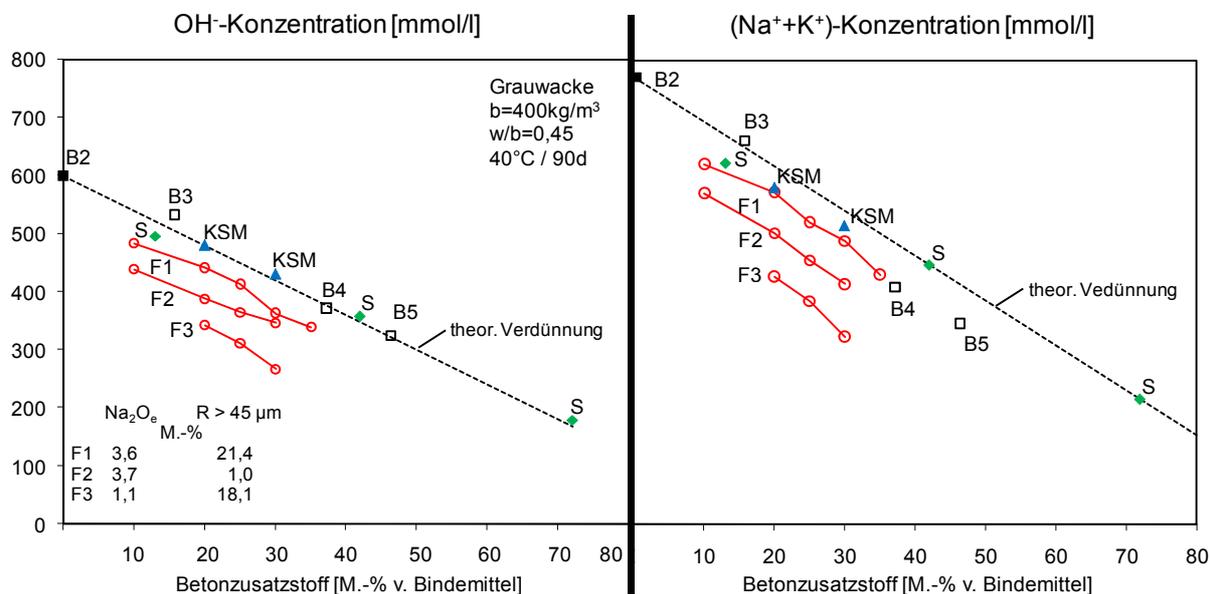


Abbildung 21: Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung, 90d/40°C.

Die Feinheit und der Alkaligehalt der Flugaschen wirken sich signifikant auf ihre Effektivität aus. Bei ähnlichen Alkaliäquivalenten der Flugaschen F1 und F2 von rd. 3,6 M.-% bewirkt die höhere Feinheit der Flugasche F2 eine verstärkte Absenkung der OH⁻-Konzentration im Alter von 90 Tagen. Dies ist offenbar auf eine mit der höheren Feinheit verbundene, schnellere puzzolanische Reaktion der Flugasche F2 zurückzuführen. Die mit der alkaliarmen Flugasche F3 (Na₂O_e = 1,1 M.-%) hergestellten Betone haben die deutlich geringste OH⁻-Konzentration in der Porenlösung. Da die Feinheit der Flugasche F3 mit rd. 18 M.-% > 45 μm im Bereich der Flugasche F1 liegt, wird deutlich, dass zumindest bei den hier gewählten Versuchsbedingungen der Alkaligehalt der Flugasche gegenüber der Feinheit den dominierenden Einfluss auf die Zusammensetzung der Porenlösung hat.

Aluminiumkonzentration

Wie bereits unter Punkt 6.1.3 festgestellt, wird durch die Flugaschen nicht nur die Alkalität, sondern auch der Aluminiumhaushalt der Porenlösung beeinflusst, vgl. Abbildung 18 (links) und Abbildung 22. Verglichen mit dem Beton B2 mit 100 % Portlandzement K1 wird durch die Verwendung von Flugasche (Al₂O₃ ~ 25 M.-%) die Aluminiumkonzentration in der Porenlösung des Betons um bis zu 4-fach erhöht. Mit rd. 1,8 mmol/l werden in dem Beton B2 / 30F1 nach 90d/40°C ähnliche Werte erreicht wie in der Porenlösung des Zementsteins K1 / 30F1. Die Verwendung von Hüttensand (Al₂O₃ ~ 10 M.-%) oder Kalksteinmehl führt

gegenüber 100 % Portlandzement zu einer weiteren Verringerung der Aluminiumkonzentration im Beton.

Der Vergleich mit den Ergebnissen aus Zementsteinen gibt keinen Hinweis darauf, dass nach 90d/40°C durch die ebenfalls aluminiumreiche Grauwacke ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 15 \text{ M.-%}$) nennenswerte Mengen an Aluminium in die Porenlösung eingebracht werden.

Wenn über die bei der puzzolanischen Reaktion der Flugasche entstehenden C-A-S-H-Phasen hinaus (vgl. Punkt 6.1.3, Tabelle 16) noch Aluminium in die Porenlösung abgegeben werden kann, könnte dies bedeuten, dass mit den bei der Alkalireaktion entstehenden Silanol-Gruppen nicht quellfähige Alumosilikate gebildet werden und somit eine schädigende AKR verhindert werden kann. Mit diesem Effekt wurde bereits bei der Beurteilung von Grauwacken argumentiert, bei denen durch den Angriff der OH-Ionen sowohl Silizium als auch Aluminium gelöst wird [Hüng 07]. Dasselbe könnte auch über ein zusätzliches Aluminiumangebot durch Flugaschen erreicht werden. In welchen Mengen dies geschieht, und in welchem Maße sich der hier beobachtete Aluminiueintrag auf eine schädigende Alkalireaktion im Beton auswirkt, kann aber über die hier erfolgte Messung der Konzentrationen nicht bestimmt werden.

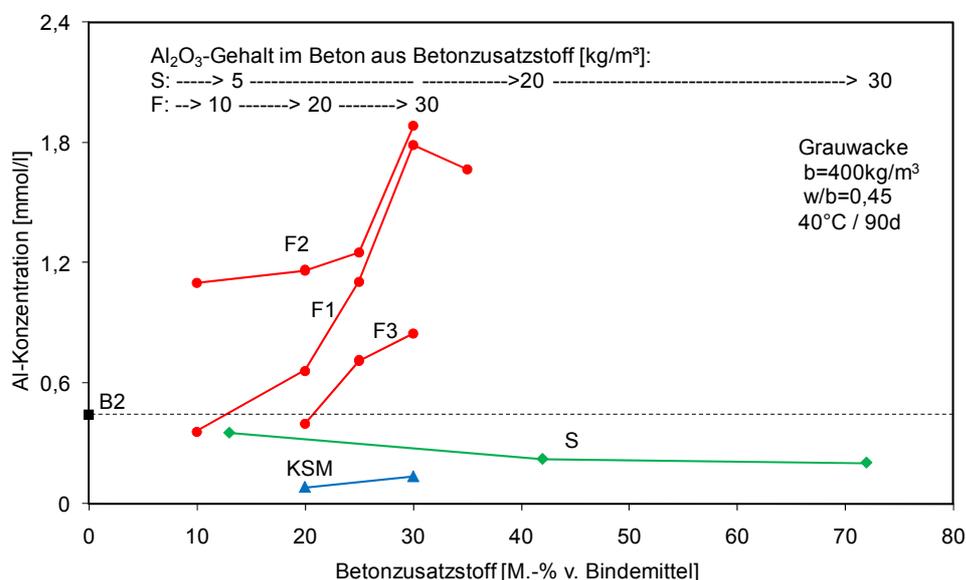


Abbildung 22: Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Aluminium-Konzentration in der Porenlösung des Betons und theoretische Aluminiumgehalte im Bindemittel aus Hüttensand bzw. Flugasche.

Langzeitverhalten der Porenlösung

Prinzipiell wird die Porenlösungszusammensetzung im Beton immer gleichzeitig von den chemischen Reaktionen des Bindemittels (Hydratation) und/oder der Gesteinskörnung (AKR) beeinflusst. Allerdings kann angenommen werden, dass in Betonen mit reinem Portlandzement oder mit Hüttensand im Bindemittel die Hydratationsvorgänge nach 90 Tagen bei 40°C praktisch beendet sind. Daher wird zu späteren Zeitpunkten in diesen Betonen hauptsächlich die langsamere AKR der Gesteinskörnungen zu beobachten sein. Die ebenfalls langsame puzzolanische Reaktion der Flugasche führt allerdings auch später noch zu einem Verbrauch von Alkalien. Dies erschwert es in höherem Alter zwischen den Reaktionen der Gesteinskörnung und der Flugasche zu unterscheiden. Eine NMR-Untersuchung an dem Zementstein K1 / 30F1 hat für die Flugasche F1 allerdings einen Reaktionsgrad von rd. 50 % nach 180 Tagen bei 40°C ergeben, vgl. Tabelle 16. Diese Annahmen lassen es als zulässig erscheinen, allgemein Änderungen in der Porenlösungszusammensetzung von Betonen höheren Alters, auch in Betonen mit Flugasche, hauptsächlich einer Alkalireaktion der Gesteinskörnung zuzuordnen.

OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration:

Unabhängig vom Alkaligehalt oder der Ausgangskonzentration ist in den Grauwacke-Betonen, mit reinem Portlandzement oder Kalksteinmehl bzw. Hüttensand im Bindemittel, im Laufe der Zeit eine Verringerung der OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration zu beobachten, siehe Abbildung 23. Dieser Effekt ist auf die Alkalireaktion der Grauwacke zurückzuführen. Es ist nicht möglich einen generellen Zusammenhang zwischen einer schädigenden Alkalireaktion im Beton und einem bestimmten Verbrauch von OH⁻- oder (Na⁺+K⁺)-Ionen herzustellen. So ist in den Betonen B4 mit 100% Portlandzement K3 (Na₂O_e = 0,76 M.-%) oder B7 mit 42% Hüttensand trotz des relativ hohen Alkaliverbrauchs nach 36 Monaten keine schädigende Alkalireaktion zu erkennen, vgl. Abbildung 23 (links und rechts) mit Abbildung 48 und Abbildung 50. Zudem konnte an frischen Bruchflächen des Betons B7 mit 42% Hüttensand makroskopisch keine Gelbildung festgestellt werden, wohingegen in den Verdichtungsporen des Betons B6 mit 13% Hüttensand in großer Menge Gelablagerungen zu finden waren. Dies belegt, dass der Verbrauch von Alkalien nicht allgemein im Verhältnis zu der gebildeten Gelmenge und dem Schädigungsgrad des Betons steht.

Allerdings ist die Verbrauchsrate der Alkalien umso geringer, je niedriger die Ausgangskonzentration ist, siehe Abbildung 23 (links und rechts). Dabei sind zwei Reaktionsphasen vorstellbar.

Am Anfang erfolgt eine schnelle Reaktion zwischen reaktiven Bestandteilen auf der Oberfläche der Gesteinskörner, wodurch die OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentrationen schnell

verringert werden. Wie für kinetikgesteuerte Reaktionen zu erwarten ist, führen niedrigere Ausgangskonzentrationen zu einer geringeren Verbrauchsrate. Ein zusätzlicher Faktor ist dabei der Transport von Ionen aus der Zementsteinmatrix zur Oberfläche der Gesteinskörner. Bei unterschiedlichen Ausgangskonzentrationen sind in den Betonen B2 bis B5 mit 100% Portlandzement und im Beton B6 mit 13% Hüttensand verhältnismäßig ähnliche Transporteigenschaften zu erwarten. Im Gegensatz dazu ist der schnelle Abfall der OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentrationen im Beton B2 mit 20% Kalksteinmehl bei gleichfalls verringerter Ausgangskonzentration auf einen verstärkten Ionentransport zurückzuführen. Diese Schlussfolgerung kann aufgrund der, gegenüber den Betonen mit 100% Portlandzement, stark erhöhten Kapillarporosität des Betons mit Kalksteinmehl gezogen werden, vgl. Punkt 6.2.6.

Im Anschluss an die Reaktion der Gesteinsoberfläche müssen die Ionen tiefer in das Gestein selbst diffundieren. Dieser Prozeß wird durch die Transporteigenschaften des Gesteins gesteuert. Angaben zur Porosität der hier verwendeten Gesteinsarten und Kennwerte zu den Transporteigenschaften einiger Gesteinsarten generell [Jens 93] sind in Anhang 2, Punkt 2.2 aufgeführt. Offensichtlich führt der Transportvorgang ins Gestein in Kombination mit der Verringerung der Konzentrationsgradienten zu einer Verlangsamung des Alkaliverbrauchs.

Es sollte hervorgehoben werden, dass das oben beschriebene Verhalten nicht generell in den Betonen mit Flugasche zu finden ist, zumindest nicht bei Verwendung von Grauwacke und Flugasche F1, vgl. Abbildung 23 mit Abbildung 24.

Es gibt etliche Nachweise, dass Flugaschen mit moderaten Alkali- und Calciumgehalten (entsprechend [DIN 450-1] bis zu 5 M.-% bzw. 10 M.-%) zu keiner signifikanten Freisetzung von Alkalien in die Porenlösung führen, ja im Gegenteil eine weitergehende Einbindung von Alkalien in die Reaktionsprodukte stattfindet [Schä 04, Bram 04], siehe auch Punkt 6.1.4. Dennoch ist in den Grauwacke-Betonen B1 und B2 mit 20 bis 30% Flugasche F1 bis zum Alter von einem Jahr nur ein relativ geringer Verbrauch von OH⁻ und quasi keine Verringerung, zum Teil sogar eine Erhöhung der (Na⁺+K⁺)-Konzentration zu erkennen, siehe Abbildung 24. Auf den ersten Blick könnte dies als eine Freisetzung von Alkalien während des ersten Jahres interpretiert werden. Allerdings hätte eine Freisetzung der Alkalien dann auch zu einer gleichzeitigen Erhöhung der OH⁻-Konzentration führen müssen.

Bei der Verwendung von Flugasche F1 ist nur im Beton B2 mit 10% der Flugasche F1 ein ähnliches Verhalten, d.h. ein ähnlich hoher Verbrauch von Alkalien, wie in den Betonen B3 mit reinem Portlandzement K2 (Na₂O_e = 1,02 M.-%) oder B6 mit 13% Hüttensand festzustellen. Dies dürfte an dem geringen Gehalt an Flugasche F1 liegen. Dass in den Grauwacke-Betonen mit Flugasche F3 bzw. bei Verwendung von Flugasche F1 in den Betonen mit Splitt Oberrhein dennoch eine Absenkung der (Na⁺+K⁺)-Konzentrationen beobachtet wird, ist auf die sehr hohe Alkalibindungs Kapazität der Flugasche F3 und auf den

verstärkten Verbrauch von Alkalien bei der AKR des Materials aus dem Oberrhein zurückzuführen, siehe Abbildung 24 und Abbildung 25.

Nach einer Verringerung der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in den Grauwacke-Betonen mit 20 bis 30% Flugasche F1 während der ersten 90 Tage scheint die Alkalireaktion bis 12 Monate quasi stillzustehen, Abbildung 24 (rechts). Dabei muss darauf hingewiesen werden, dass die verschiedenen Betone über einen Zeitraum von 2 Jahren hergestellt wurden, so dass die Lagerung und das Auspressen der Porenlösung zu unterschiedlichen Zeiten stattgefunden hat. Daher kann die in den Betonen auftretende Reaktionspause als reproduzierbar betrachtet werden. Nach 12 Monaten findet wieder eine langsame Verringerung der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentrationen, ähnlich wie in den Betonen mit 100% Portlandzement, statt. Diese Abnahme der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration fällt mit der Dehnungszunahme der Betone mit 20 und 25% Flugasche im Bindemittel zusammen, vgl. Abbildung 24 mit Abbildung 51.

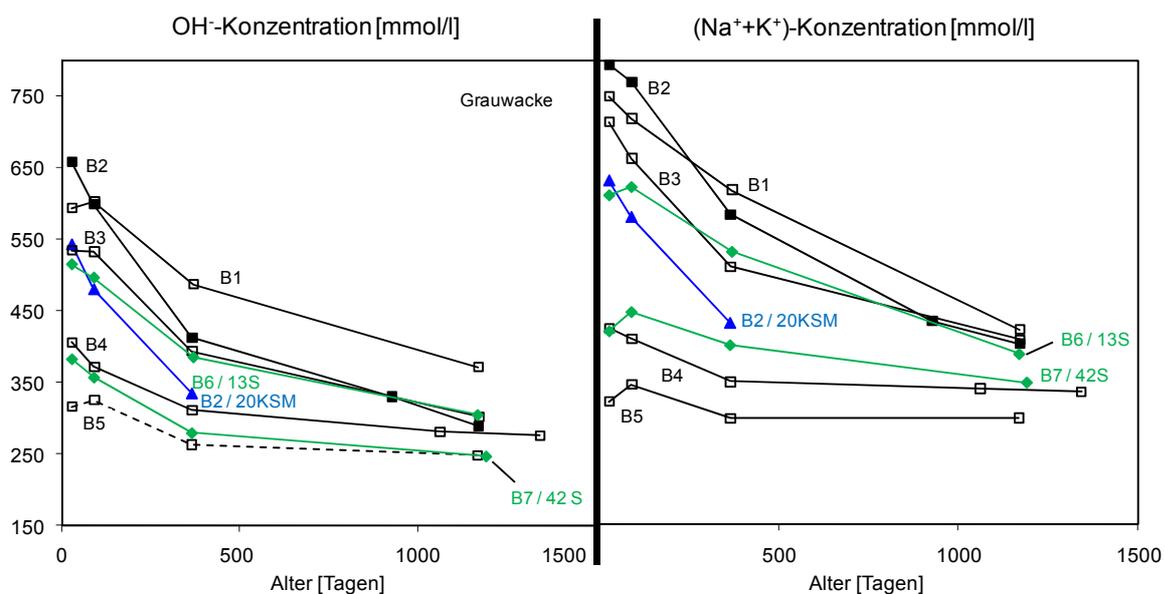


Abbildung 23: Zeitliche Entwicklung der OH^- - und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit reinem Portlandzement und/oder Kalksteinmehl bzw. Hüttensand im Bindemittel; Grauwacke; 40°C .

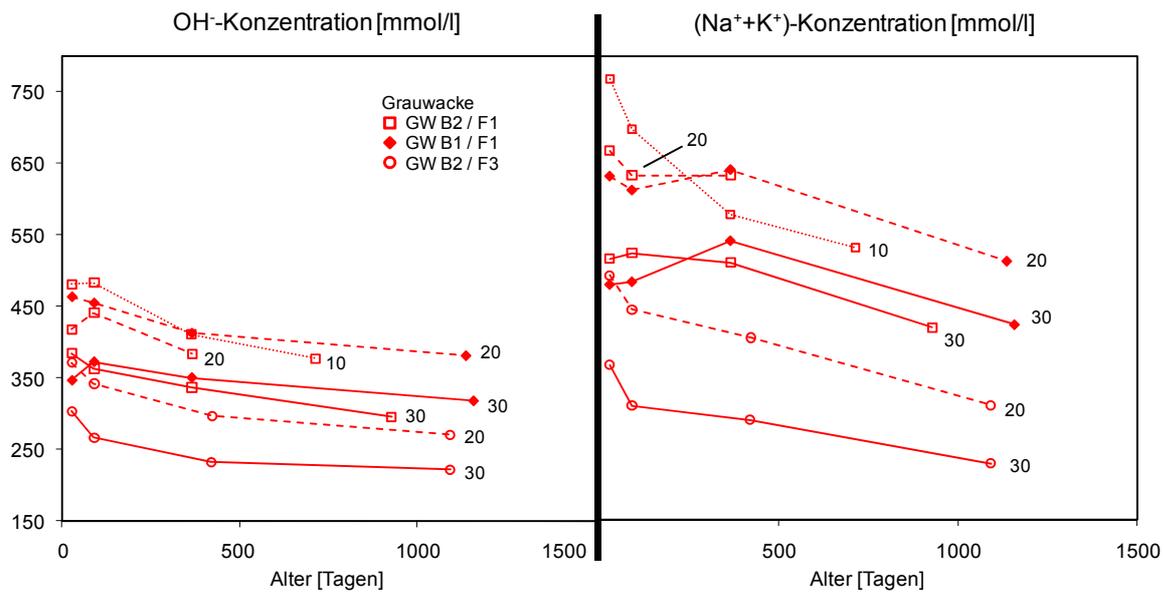


Abbildung 24: Zeitliche Entwicklung der OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit Flugasche im Bindemittel; Grauwacke; 40°C.

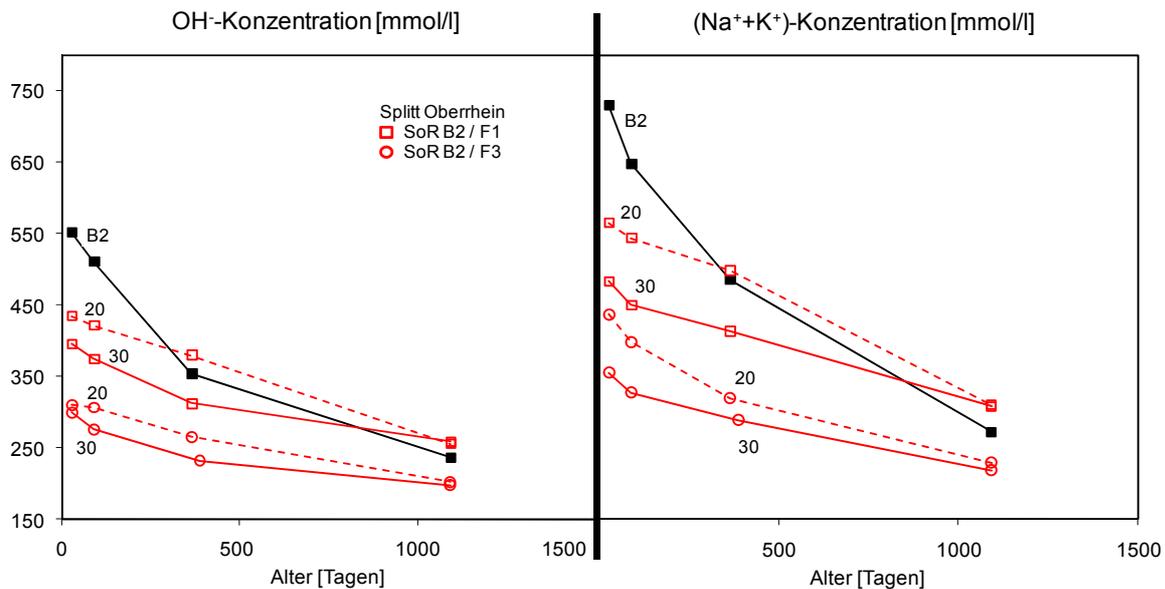


Abbildung 25: Zeitliche Entwicklung der OH⁻- und (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit Flugasche im Bindemittel; Splitt Oberrhein; 40°C.

Aluminium- und Siliziumkonzentration:

In den Betonen mit Flugasche fällt die schnelle Absenkung der Alkalikonzentration innerhalb der ersten 90 Tage mit einer deutlichen Verringerung der Aluminiumkonzentration in der Porenlösung zusammen, vgl. Abbildung 24 und Abbildung 25 mit Abbildung 26 und Abbildung 28. Da die Aluminiumkonzentration in den Zementsteinen über diesen Zeitraum hinaus konstant bleibt bzw. tendenziell zunimmt bedeutet dies die Bildung von Alumo-

silikathydraten aus dem bei der Alkalireaktion des Gesteins gelösten Siliziums und dem durch die Flugasche in die Porenlösung eingebrachten Aluminium, vgl. Abbildung 19. Dabei sind zwei Reaktionen möglich. Die Anlagerung von Aluminium an die Oberfläche der Silikate und/oder die Bildung von Alumosilikathydraten in der Porenlösung. Die Anlagerung des Aluminiums an die Oberfläche der Silikate kann die weitere Lösung von Silizium zwar nicht stoppen, verlangsamt diese aber zumindest [Labr 91, Weid 03]. Dieses Argument wurde bereits verwendet, um einen Selbstinhibierungseffekt von quarzitischem Sandstein oder Grauwacke bei der Lösung von Silizium im alkalischen Milieu zu erklären. Dabei ist es nötig, dass die Gesteine in der Lage sind ausreichende Mengen an Aluminium in die alkalische Lösung einzubringen [Labr 91, Hüng 07]. Offensichtlich kann das dafür benötigte Aluminium aber auch durch die Flugasche bereitgestellt werden. Allerdings kann diese Schlussfolgerung aufgrund des geringen Aluminiumeintrags nicht für die Flugasche F3 gelten.

Ebenso wie der Alkaliverbrauch bedeutet ein Anstieg der Siliziumkonzentration in der Porenlösung nicht unbedingt den Beginn einer schädigenden Alkalireaktion im Beton, vgl. Abbildung 27 mit Abbildung 50. Obwohl in stark geschädigten Betonen die Alkalireaktion von einer Freisetzung großer Mengen Siliziums in die Porenlösung begleitet wird (40 bis 80 mmol/l), ist keine direkte Grenz-Siliziumkonzentration, ab der es zu einer Schädigung des Betons kommt, festzustellen. Dagegen können in Abbildung 27 und Abbildung 28, in einem Bereich zwischen 10 und 30 mmol/l, sowohl geschädigte, als auch ungeschädigte Betone gefunden werden, vgl. Betone B6 mit 13% Hüttensand, B1 bzw. B2 mit 10 bis 30% Flugasche F1 und B3 mit Portlandzement K2 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1,02 \text{ M.-%}$).

Es ist auffällig, dass sich bis zu einem Alter von mindestens 12 Monaten die Aluminium- (1 bis 2 mmol/l) und Siliziumkonzentrationen (2 bis 10 mmol/l) in Betonen mit Flugasche F1 in der Regel in derselben Größenordnung bewegen, vgl. Abbildung 26 mit Abbildung 27 und siehe Abbildung 28. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass das Aluminium aus der Flugasche und das Silizium aus der Gesteinskörnung stammt. Ein größerer Flugascheanteil im Bindemittel führt dabei zu einer generell höheren Aluminiumkonzentration, die auch über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann.

In Abbildung 29 ist die Aluminiumkonzentration in Abhängigkeit der Siliziumkonzentration aufgetragen. Dabei wurden die Ergebnisse aller Betone mit Grauwacke und Splitt Oberrhein in einem Alter zwischen 28 Tagen und 4 Jahren verwendet. Es wird deutlich, dass eine hohe Siliziumkonzentration immer mit einer niedrigen Aluminiumkonzentration zusammenfällt. D.h. es kommt nicht vor, dass sowohl hohe Aluminium- als auch hohe Siliziumkonzentrationen gleichzeitig in der Porenlösung vorliegen. Auch wenn dies keinen direkten Beweis darstellt, so kann es trotzdem als Hinweis für einen inhibierenden Effekt des Aluminiums aus der Flugasche bezüglich der Lösung von Silizium aus der Gesteinskörnung gewertet werden. Unterstützt wird diese Vermutung durch das Verhalten der Grauwacke-Betone mit Flugasche

F1, in denen die OH-Konzentration über längere Zeit Werte um 400 mmol/l erreichte, Schäden am Beton aber erst in höherem Alter beobachtet werden konnten, vgl. Abbildung 24 mit Abbildung 51. Es wird angenommen, dass eine Konkurrenzsituation zwischen der Freisetzung des Aluminiums und dem Verbrauch von Aluminium durch die Bildung von Alumosilikathydraten mit dem Silizium der Gesteinskörnung besteht. Wenn der Aluminiumnachschub durch die Flugasche nicht mehr aufrecht erhalten werden kann, wird in verstärktem Maße schädigendes (quellfähiges) Alkali-Silika Gel gebildet.

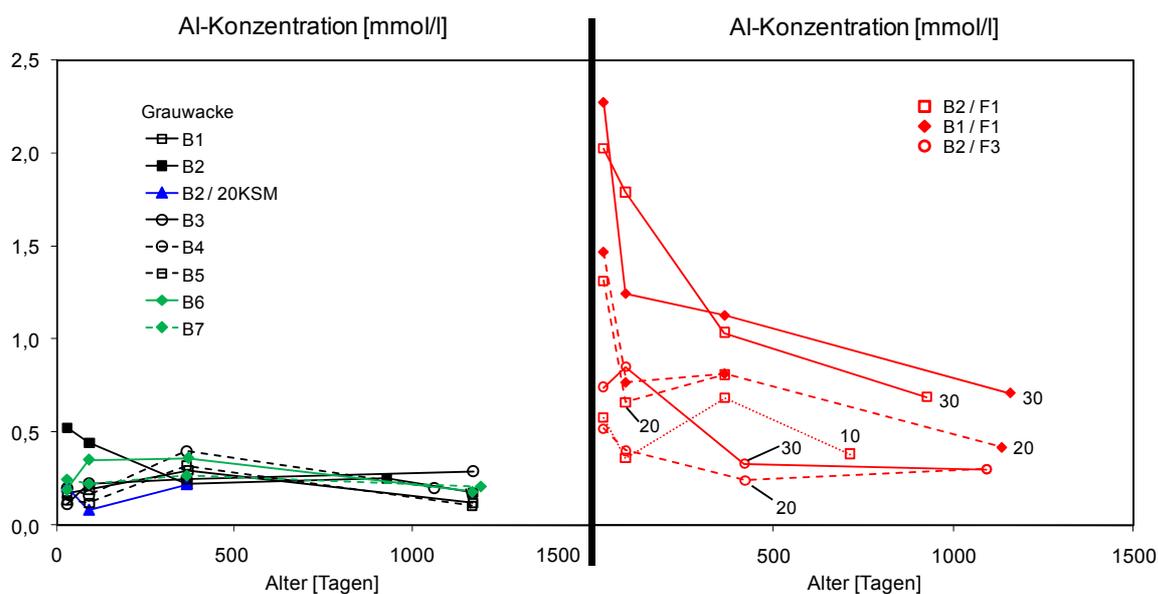


Abbildung 26: Zeitliche Entwicklung der Aluminiumkonzentration in der Porenlösung von Betonen mit Portlandzement, Kalksteinmehl oder Hüttensand (links) bzw. Flugasche im Bindemittel (rechts), Grauwacke; 40°C.

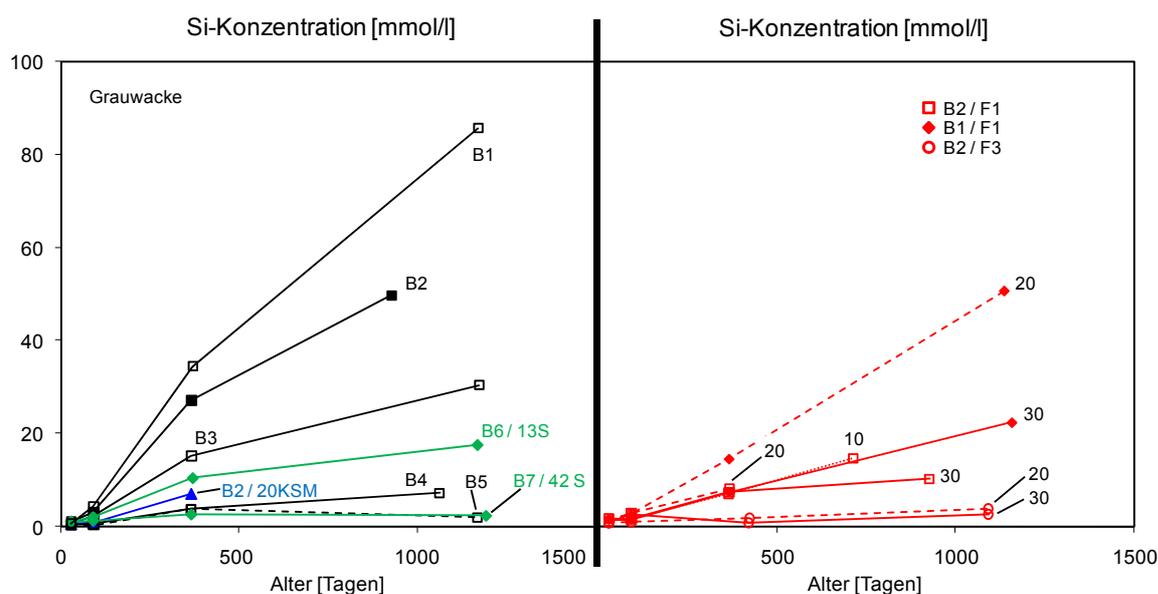


Abbildung 27: Zeitliche Entwicklung der Siliziumkonzentration in der Porenlösung von Betonen mit Portlandzement, Kalksteinmehl oder Hüttensand (links) bzw. Flugasche im Bindemittel (rechts), Grauwacke; 40°C.

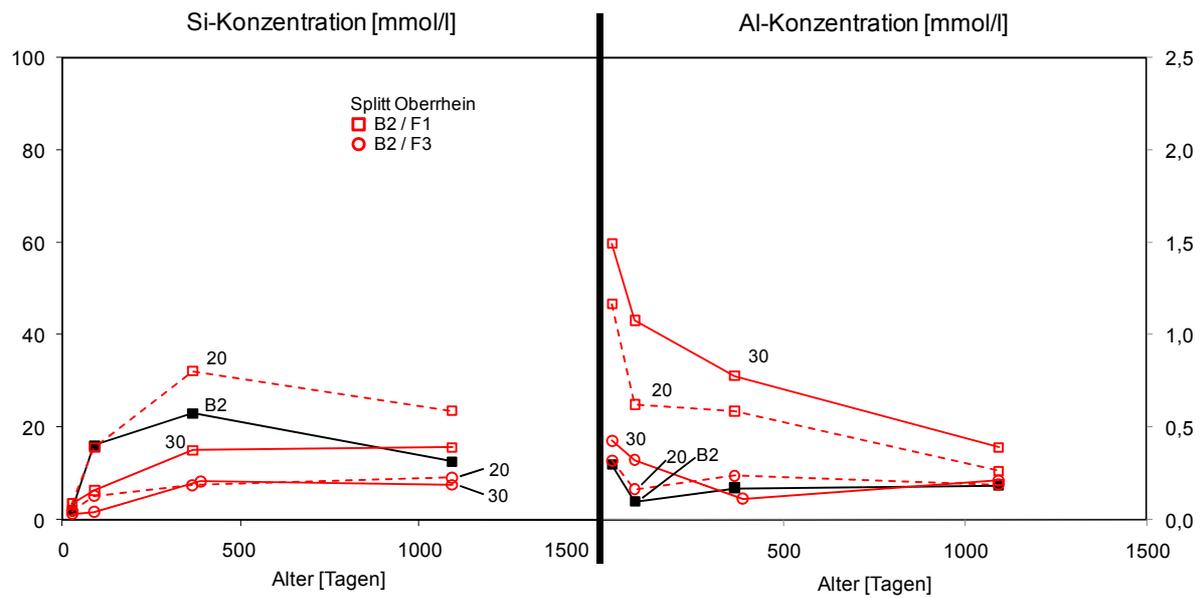


Abbildung 28: Zeitliche Entwicklung der Silizium- und Aluminium-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit Flugasche im Bindemittel, Splitt Oberrhein; 40°C.

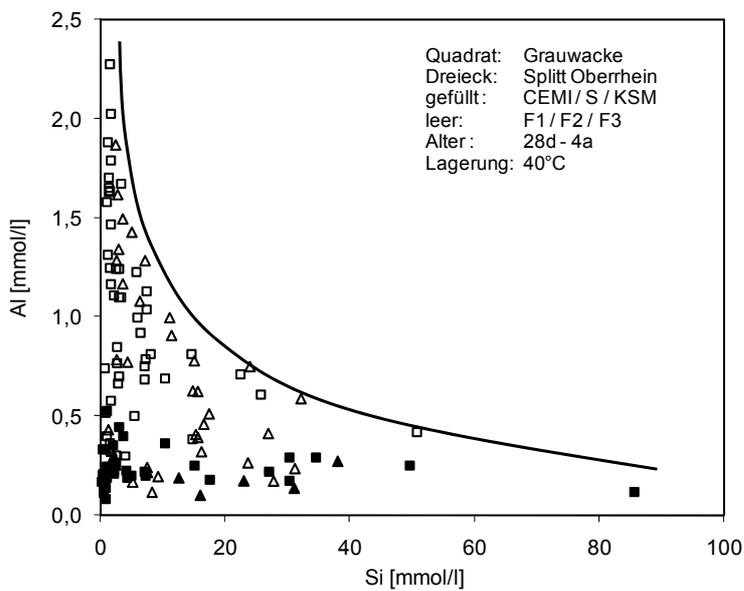


Abbildung 29: Aluminium-Konzentration bezogen auf die Silizium-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit Grauwacke oder Splitt Oberrhein.

6.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zu den Porenlösungsuntersuchungen

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Porenlösungszusammensetzung in Zementsteinen und Betonen mit Grauwacke bzw. Splitt/Kies Oberrhein als reaktiver Gesteinskörnung zusammengefasst:

- Eine erhöhte Lagerungstemperatur bzw. Alkalität bewirken eine Verschiebung des $\text{OH}^-/\text{SO}_4^{2-}$ -Ionen Verhältnisses zu Ungunsten der OH^- -Ionen. Dies kann vor allem ab 60°C zu erheblichen Unterschieden zwischen der (Na^++K^+) - und OH^- -Konzentration in der Porenlösung führen, siehe Punkt 6.1.1.
- In Zementsteinen mit reinem Portlandzement oder mit inerten Betonzusatzstoffen kann die (Na^++K^+) -Konzentration in der Porenlösung über das Verhältnis Portlandzement zu Wasser allgemein abgeschätzt werden, wenn für den dabei verwendeten Portlandzement ein Messwert zur Anpassung der Normkurve vorhanden ist. Dies gilt allerdings nur für Zementsteine höheren Alters ($\sim 28\text{d}$) und für w/z -Werte größer 0,4, siehe Punkt 6.1.2.
- Flugasche nach [DIN 450-1] führt im Allgemeinen zu einer Absenkung der (Na^++K^+) - und OH^- -Konzentration in der Porenlösung über eine reine Verdünnung hinaus. Dabei wirken sich ein höheres Alkaliäquivalent des Portlandzementes bzw. eine größere Austauschrate, eine höhere Feinheit und ein niedriges Alkaliäquivalent der Flugasche verstärkend aus, siehe Punkt 6.1.3 und Punkt 6.1.4.
- Bei Verwendung von Flugasche wird zusätzlich zur Einbindung von Alkalien Aluminium in die Porenlösung abgegeben. Durch die Bildung nicht-quellfähiger Alumosilikathydrate kann sich dies auf eine schädigende AKR im Beton mindernd auswirken, siehe Punkt 6.1.3 und Punkt 6.1.4.
- Über den Verbrauch von Alkalien aus oder den Eintrag von Silizium in die Porenlösung kann bei der Alkalireaktion der Gesteinskörnung nicht allgemein auf eine Schädigung des Betons geschlossen werden, siehe Punkt 6.1.4.
- In Betonen mit Flugasche im Bindemittel kommt es trotz relativ hoher (Na^++K^+) - und OH^- -Konzentrationen in der Porenlösung nicht oder bei unzureichender Dosierung erst sehr spät zu einer äußeren Schädigung des Betons. Dies kann auf eine Verlangsamung des Ionentransportes durch die Ausbildung eines dichten Gefüges oder auf einen inhibierenden bzw. verzögernden Effekt durch die Bildung nicht-quellfähiger Alumosilikathydrate zurückgeführt werden, siehe Punkt 6.1.4.

6.2 Betonversuche mit Duranglas

6.2.1 Einfluss des Duranglasgehaltes auf die Dehnung

In Abhängigkeit vom wirksamen Alkaligehalt im Beton und von der Korngröße des Duranglases ist das Phänomen eines Dehnungsmaximums möglich. Das heißt, dass bei über- oder unterschreiten des dazugehörigen „pessimalen“ Duranglasgehaltes wieder geringere Dehnungen erreicht werden. Bei Verwendung von Duranglas als reaktivem Standardmaterial kann dies bedeuten, dass bei der Variation betontechnologischer Maßnahmen eine allein auf dieses Pessimumsverhalten zurückzuführende Dehnungsänderung auftritt [Spru 97, Spru 98]. Mit dem in dieser Arbeit in der Fraktion 2/8 mm verwendeten Duranglas zeigt sich kein Dehnungspessimum. Mit zunehmendem Duranglasgehalt werden höhere Dehnungen erreicht, wobei ab Gehalten von rund 20 M.-% Duranglas in der Gesteinskörnung die Dehnungen nur mehr gering zunehmen. Für die weiteren Arbeiten wurden 45 M.-% Duranglas, entsprechend 568 kg pro m³ Beton, gewählt. Mit diesem Duranglasgehalt wird ein relativ stabiles Dehnungsverhalten der Betone erreicht.

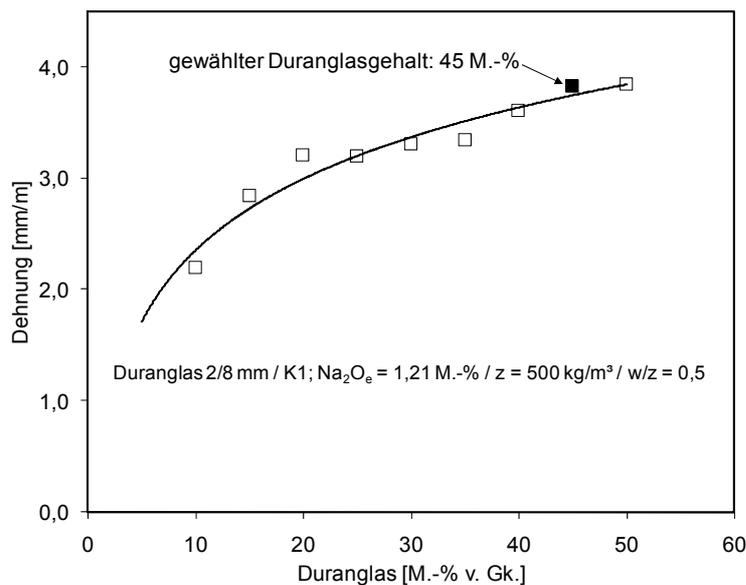


Abbildung 30: Dehnungsverhalten des Betons in Abhängigkeit des Anteils an Duranglas in der Gesteinskörnung; Lagerung: 40°C über Wasser; Alter: 148 Tage.

6.2.2 Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf das Dehnungsverhalten

In Abbildung 31 ist der Dehnungsverlauf von Duranglasbetonen mit den Portlandzementen K1 und K4, mit w/z-Werten von 0,4 und 0,5 und mit 15 bis 40 M.-% Flugasche F1 bzw. Kalksteinmehl im Bindemittel dargestellt. Die Ergebnisse sind in die Lagerung bei 40°C (links) und bei 20°C (rechts) unterteilt.

Das Duranglas zeigt eine relativ geringe Sensitivität bezüglich einer Verringerung des Alkaliäquivalentes im Portlandzement. So führt eine Verringerung des Alkaligehaltes im Beton D2 ($\text{Na}_2\text{O}_e \text{ K4} = 0,65 \text{ M.-%}$) mit 3,25 kg Alkalien pro m^3 um rund 54 M.-% gegenüber dem Beton D1 ($\text{Na}_2\text{O}_e \text{ K1} = 1,21 \text{ M.-%}$) mit 6,05 kg Alkalien pro m^3 weiterhin zu hohen Enddehnungen mit einer Verringerung um nur rund 25 % bei 3,0 mm/m bezogen auf 4,0 mm/m. Daraus lässt sich schließen, dass in dem Beton D2 mit NA-Zement die Grenzkalkalität des Duranglases noch nicht erreicht ist.

Im Gegensatz zum NA-Portlandzement K4 führt ein Austausch des alkalireichen Portlandzements K1 durch 15 M.-% der Flugasche F1 bereits zu einer erheblichen Verringerung der Dehnungen. Dabei wird bereits eine Enddehnung im Bereich des NA-Zementes K4 erreicht. Durch die Flugasche F1 werden die Dehnungen in etwa proportional zur Austauschrate verringert. Die Verringerung proportional zur Austauschrate ist auch bei den Betonen mit Hüttensand zu beobachten, wobei am Beton D5 mit 72 M.-% Hüttensand keine Dehnungen aus einer Alkali-Kieselsäure Reaktion mehr auftreten, siehe Abbildung A4 - 20 im Anhang 4. Ganz anders die Betone mit Kalksteinmehl: hier führt der Austausch des Portlandzementes K1 zu einer signifikanten Verstärkung der Dehnungen, vor allem bei der 20°C Lagerung.

Auch eine Verringerung des w/z-Wertes von 0,5 auf 0,4 im Beton D1a (Na_2O_e aus Klinker = 1,0 M.-%) führt im Vergleich zum Beton D1 zu einer erheblichen Reduktion der Enddehnung um rd. 40 %.

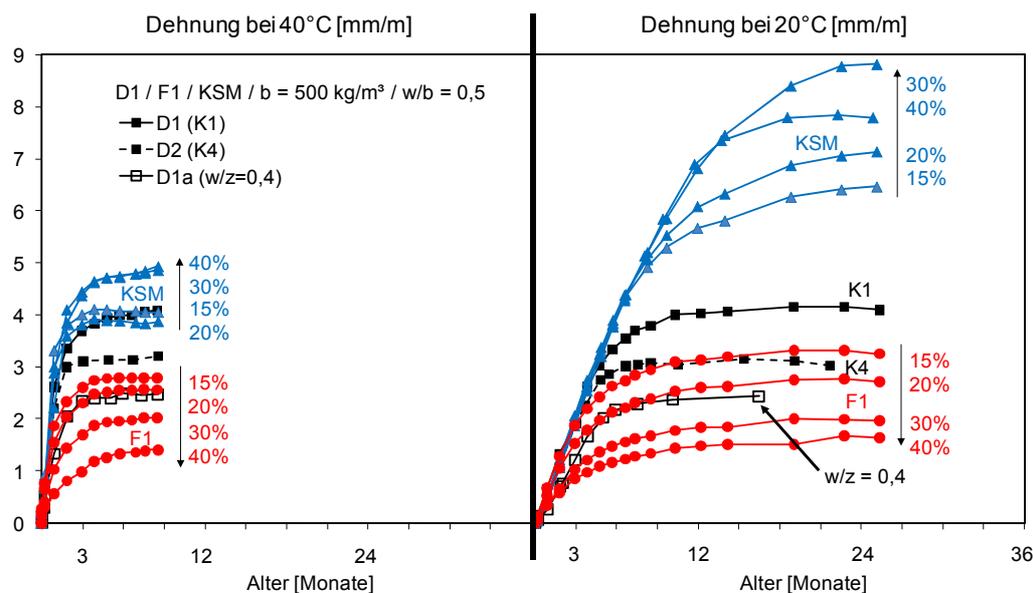


Abbildung 31: Einfluss des Bindemittels auf die Dehnung der Duranglasbetone bei 40°C (links) bzw. bei 20°C (rechts) über Wasser.

Erwartungsgemäß führt die Erhöhung der Lagerungstemperatur von 20 auf 40°C zu einer Beschleunigung der AKR bedingten Dehnungen. So werden bei 40°C die Enddehnungen bereits nach rd. 6 bis 9 Monaten gegenüber rd. 12 bis 24 Monaten bei 20°C erreicht. Für die Beurteilung einer Veränderung der Bindemittelzusammensetzung ergeben sich aus den unterschiedlichen Lagerungstemperaturen aber keine Unterschiede, vgl. Abbildung 31, links und rechts. Dabei werden für die Betone mit Portlandzement, Hüttensand oder Flugasche bei beiden Temperaturen ähnliche Enddehnungen erreicht, nur in den Betonen mit Kalksteinmehl führt die Lagerung bei 20°C fast zu einer Verdopplung der Enddehnungen, siehe Abbildung 32.

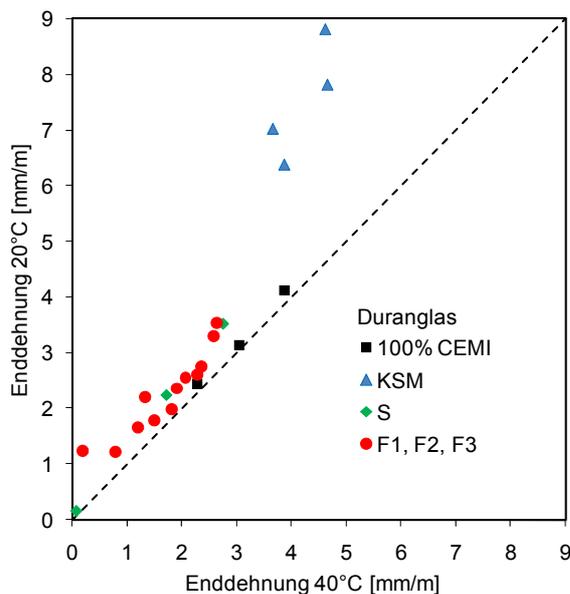


Abbildung 32: Vergleich der Enddehnungen nach Lagerung in 40 bzw. 20°C über Wasser (Werte für 40°C um 0,2 mm/m Temperaturdehnung korrigiert).

Bei der Lagerung in 40°C ist eine zeitliche Beschleunigung der Dehnungsentwicklung gegenüber 20°C zu erkennen. Die Zunahme der Dehnungen ist bei 40°C bis zum Alter von 28 Tagen und bei 20°C bis zum Alter von 90 Tagen in etwa linear. Werden die Dehnungsgeschwindigkeiten (m) im Bereich des linearen Dehnungsanstieges verglichen, so wird unabhängig von der Bindemittelzusammensetzung durch die Erhöhung der Lagerungstemperatur von 20 auf 40°C eine Beschleunigung um das 5- bis 6-fache erreicht, siehe Abbildung 33. Der Beton D5 mit 72 % Hüttensand (S) weicht als einziger davon ab. Dies ist aber damit zu begründen, dass bei dieser Bindemittelzusammensetzung keine AKR-bedingten Dehnungen mehr auftreten, weder bei 20°C noch bei 40°C, siehe Abbildung 32 und Abbildung A4 - 20. Hier wurde offensichtlich die Grenzzalkalität für die Duranglasreaktion erreicht.

In Abbildung 34 ist der Einfluss der Betonrezeptur auf die Dehnungsgeschwindigkeiten dargestellt. Die Betone D1 (K1) und D2 (K2) mit reinem Portlandzement weisen trotz des unterschiedlichen Alkaligehaltes ähnliche Dehnungsgeschwindigkeiten auf (D2 entsprechend

einer Verringerung des Alkaligehaltes um 54 % aufgetragen). Bezogen auf den Beton D1 mit 100 % Portlandzement K1 bewirkt der Austausch durch Flugasche oder Hüttensand eine in etwa proportionale Abnahme der Dehnungsgeschwindigkeiten. Dagegen sind an den Betonen mit Kalksteinmehl (15-40 M.-%) tendenziell höhere Dehnungsgeschwindigkeiten festzustellen. Der w/z-Wert von 0,4 führt zu einer erheblichen Verringerung der Dehnungsgeschwindigkeit in den Bereich der Betone mit 15 bis 20 % Flugasche.

Diese Tendenzen sind unabhängig von der Lagerungstemperatur zu erkennen, allerdings ergibt sich für 40°C eine größere Spreizung der Ergebnisse, vgl. Abbildung 34 links und rechts.

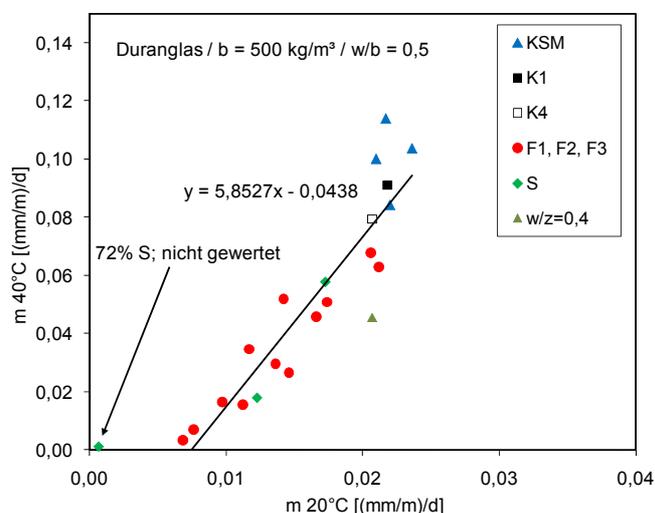


Abbildung 33: Vergleich der Dehnungsgeschwindigkeit m der Duranglasbetone bei Lagerung in 40 bzw. 20°C über Wasser.

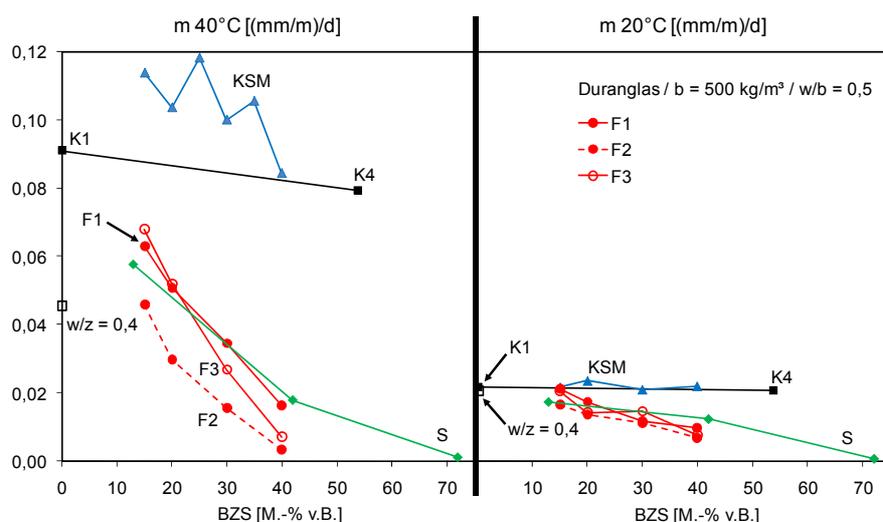


Abbildung 34: Einfluss der Art und Menge des Betonzusatzstoffes auf die Dehnungsgeschwindigkeit m der Duranglasbetone bei Lagerung in 40 bzw. 20°C über Wasser.

Anmerkungen zu den Ergebnissen der Dehnungsversuche

Aus dem Dehnungsverhalten der Duranglasbetone mit unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung ergeben sich einige Punkte, die bei einer weitergehenden Auswertung der Ergebnisse zu bedenken sind:

- Das Duranglas reagiert relativ unempfindlich auf eine Veränderung des Alkaligehalts im Bindemittel.
- Eine Veränderung der Gefügefestigkeit und/oder der Transporteigenschaften wirken sich verhältnismäßig stark auf das Dehnungsverhalten aus.

Dies steht im Gegensatz zu dem Verhalten natürlicher Gesteinskörnungen, bei denen davon ausgegangen werden kann, dass die Alkalität der bestimmende Faktor für den Verlauf und die Ausbildung von AKR-Schäden ist. Allerdings eröffnet sich aus dem Verhalten der Duranglasbetone auch die Möglichkeit, die Auswirkung der Transporteigenschaften und/oder der Festigkeiten auf eine schädigende AKR näher zu betrachten.

6.2.3 Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf die Porenlösungszusammensetzung

In Abbildung 35 ist die $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung der Duranglasbetone nach 28 bzw. 90 Tagen Lagerung bei 20°C (links) bzw. 40°C (rechts) dargestellt. Wird davon ausgegangen, dass durch eine Temperaturerhöhung keine weiteren Effekte als eine einfache Beschleunigung der chemischen Reaktionen auftreten, so lassen die Ergebnisse den Schluss zu, dass 28 Tage Lagerung in 40°C in etwa denselben Effekt haben wie 90 Tage Lagerung in 20°C. Dies würde eine Beschleunigung um das rd. 3-fache bedeuten.

Im Gegensatz zum Beton D1 mit 100 % Portlandzement K1 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1,21 \text{ M.-%}$) ist im Beton D1 mit 20 bis 40 % Flugasche F1 im Laufe der Reaktionsdauer bei 40°C nur eine relativ geringe Abnahme der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration zu beobachten. Bei einer, zumindest durch den Austausch von Portlandzement bedingten, geringeren Ausgangskonzentration, geht dies soweit, dass nach 90 Tagen/40°C in den flugaschehaltigen Betonen z.T. höhere $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentrationen vorliegen als in dem Beton D1 mit 100 % Portlandzement K1. Dies bedeutet aber offensichtlich nicht eine Freisetzung von Alkalien aus der Flugasche, sondern einen hohen Umsatz von Alkalien bei der AKR des Duranglases in dem Beton ohne Flugasche, siehe Abbildung 35. Bedingt durch dieselben Austauschgrade (20-40 %) liegen nach 28 Tagen/20°C in den Betonen mit Kalksteinmehl in etwa dieselben $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentrationen vor wie in den Betonen mit Flugasche F1. Allerdings sinken diese, ebenso wie im Beton mit 100 % Portlandzement K1, im Laufe der Zeit schneller ab. Im Beton D2 mit 100 % Portlandzement K4 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 0,65 \text{ M.-%}$) finden nur geringe Veränderungen in der

($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration statt. Vergleicht man diese Ergebnisse mit dem Dehnungsverhalten der Betone, so ist festzustellen, dass aus dem, sich in der Porenlösungszusammensetzung widerspiegelnden, Alkaliverbrauch keine Rückschlüsse auf das äußere Erscheinungsbild einer AKR möglich sind, vgl. Abbildung 31 und Abbildung 35.

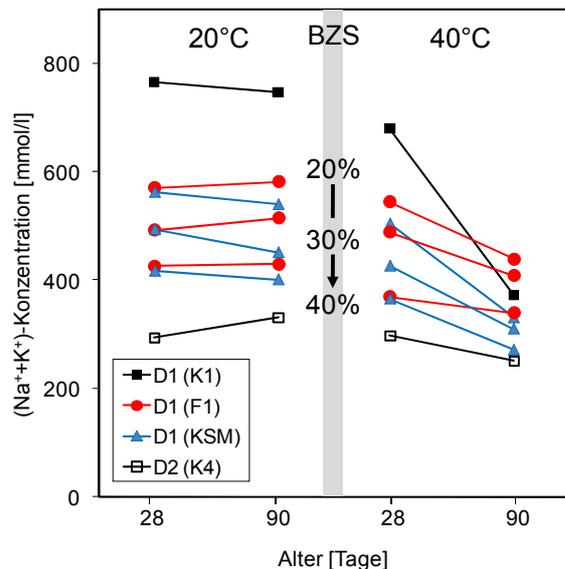


Abbildung 35: Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf die ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration in der Porenlösung der Betone mit Duranglas nach 28 und 90 Tagen.

In Abbildung 36 ist die Alkalikonzentration in der Porenlösung getrennt für Natrium (links) und Kalium (rechts) dargestellt. Entsprechend dem geringeren Natriumgehalt in den Portlandzementen ist gegenüber dem Kalium allgemein auch weniger Natrium in der Porenlösung zu finden, vgl. Tabelle A1 - 1.

Das in Abbildung 35 festgestellte Verhalten der Gesamtalkalikonkonzentration ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) wird maßgeblich durch das Kalium bestimmt, siehe Abbildung 36 (rechts). Gegenüber der K^+ -Konzentration bleibt die Na^+ -Konzentration in den Betonen eher konstant oder nimmt sogar zu. Dass die Na^+ -Konzentration trotz des erheblichen Gesamtalkaliverbrauchs konstant gehalten wird, könnte auf einen Eintrag durch das natriumreiche Duranglas (~4 M.-%) zurückzuführen sein. Ob und in welchem Maße dies stattfindet kann im Rahmen der hier erhaltenen Ergebnisse aber nicht geklärt werden.

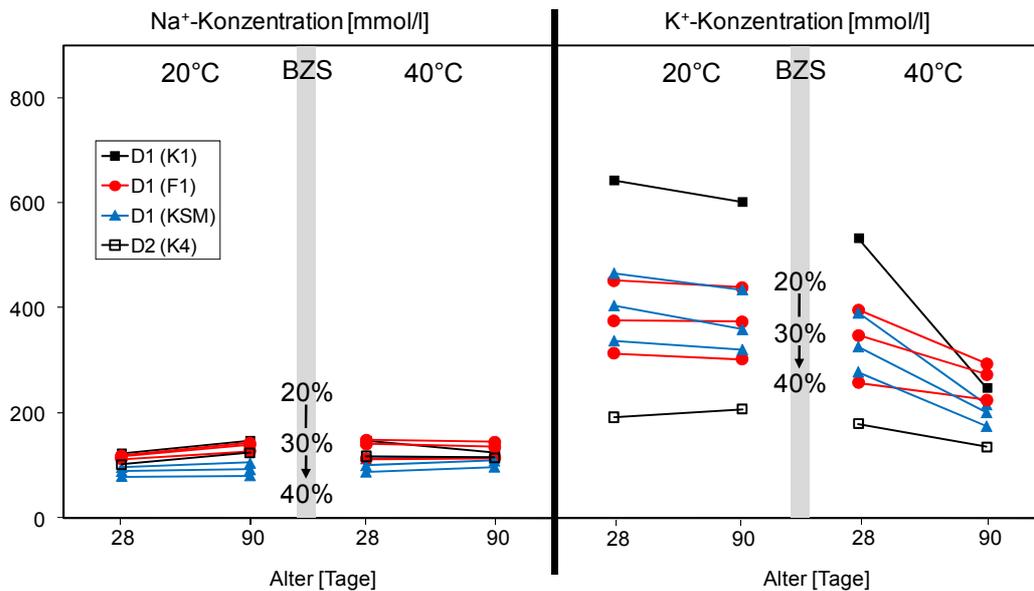


Abbildung 36: Einfluss des Bindemittels und der Temperatur auf die Natrium- bzw. Kaliumkonzentration in der Porenlösung der Betone mit Duranglas nach 28 und 90 Tagen.

Anmerkungen zu den Ergebnissen der Porenlösungszusammensetzung

Bei Betrachtung der Ergebnisse zur Porenlösungszusammensetzung und bei einem ersten Vergleich mit den Ergebnissen zum Dehnungsverhalten der Duranglasbetone sind folgende Punkte festzuhalten.

- Bei der Alkali-Kieselsäure Reaktion des Duranglases können große Mengen an Alkalien verbraucht werden. Somit sind Rückschlüsse bezüglich des Einflusses der Betonzusatzstoffe auf den Alkalihaushalt der Porenlösung in Betonen mit Duranglas nicht sinnvoll.
- Bei der Alkalireaktion des Duranglases wird vor allem Kalium verbraucht. Die Ergebnisse lassen zumindest die Vermutung zu, dass das äußerst natriumreiche Duranglas Natrium in die Porenlösung einträgt. Dadurch könnte auch bei Bindemitteln mit niedrigem Ausgangsalkaligehalt eine Art autogener Alkalireaktion des Duranglases stattfinden. Das Duranglas ist somit nur bedingt als reaktives Standardmaterial bei AKR-Untersuchungen geeignet.
- Im Vergleich zum Beton D1 mit Portlandzement K1 treten im Beton D2 mit Portlandzement K4 trotz des erheblich geringeren Verbrauchs von Alkalien weiterhin hohe Dehnungen auf. Dafür gibt es mindestens zwei mögliche Erklärungen; (1) das Duranglas setzt erhebliche Mengen Alkalien frei und hat dadurch eine Art autogener Alkalireaktion in Gang gehalten, (2) der geringe Verbrauch reicht bereits aus um die Probekörper signifikant zu schädigen; dies würde bedeuten, dass aus dem Verbrauch

an Alkalien keine Rückschlüsse auf das Ausmaß einer schädigenden AKR gezogen werden können.

- Im Vergleich zum Beton D2 mit dem NA-Zement K4 liegt in den Betonen D1 mit Flugasche F1 eine relativ hohe Ausgangsalkalikonkonzentration vor und über die Zeit findet auch ein stärkerer Verbrauch an Alkalien statt. Dass dennoch bereits bei relativ geringen Flugaschegehalten eine weit stärkere Verringerung der Dehnungen erreicht wird, kann somit nicht durch die Porenlösungszusammensetzung erklärt werden. Hier müssen sich verstärkt andere Faktoren, wie die Veränderung der Transporteigenschaften und/oder der Gefügefestigkeit auf das äußere Erscheinungsbild einer AKR auswirken.

6.2.4 Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure Reaktion der Duranglasbetone

Über einen einfachen Vergleich der absoluten Veränderung der $(Na^+ + K^+)$ -Konzentration in der Porenlösung der Duranglasbetone kann nicht gefolgert werden, ob und in welchem Maße sich die unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen auf die Alkalireaktion des Duranglases auswirken. Dies liegt daran, dass sich (1) durch den Austausch von Portlandzement die Ausgangskonzentrationen ändern und (2) auch eine große Änderung der Alkalität in der Porenlösung ein weiterhin ausgeprägtes Dehnungsverhalten bewirkt. Daher erscheint es sinnvoll die zeitliche Bindung der Alkalien bezogen auf die jeweilige Ausgangskonzentration in der Porenlösung des Bindemittels zu beziehen. Daraus kann gefolgert werden inwieweit sich die Bindemittelzusammensetzung auf die Reaktionsgeschwindigkeit auswirkt, wobei diese Art der Vorgehensweise immer eine gemeinsame Betrachtung der Alkalireaktionen der Gesteinskörnung und des Bindemittels darstellt.

Die Reaktionsgeschwindigkeit wird definiert als Bindung von Alkalien in kg/m^3 Beton bis zum Alter von 28 Tagen bei $40^\circ C$ bzw. bis zum Alter von 90 Tagen bei $20^\circ C$. Die theoretische Ausgangskonzentration im Bindemittel dient dabei als Bezugspunkt, siehe Formel 8.

$$K = \Delta N / (\Delta t \cdot c(Na^+ + K^+)_0) \quad [(kg/m^3)/(d \cdot mmol/l)]$$

K: Reaktionsgeschwindigkeit $[(kg/m^3)/(d \cdot mmol/l)]$

ΔN : Alkalibindung $[kg/m^3]$

Δt : Reaktionszeit in Tagen $[d]$

$c(Na^+ + K^+)_0$: Ausgangskonzentration $[mmol/l]$

Formel 8: Geschwindigkeit der Alkali-Kieselsäure Reaktionen in Duranglasbetonen.

Zur Durchführung dieser Berechnung sind einige vereinfachende Annahmen zu treffen:

- Als Ausgangskonzentration wird die theoretische Porenlösungszusammensetzung ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) der jeweiligen Zementsteine ohne Berücksichtigung des Einflusses der Betonzusatzstoffe (einfache Verdünnung) angenommen, siehe Tabelle 17. Die ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentrationen können dabei als die Werte angesehen werden, denen das Duranglas im Beton maximal, ohne Einfluss der Alkali-Kieselsäure Reaktion der Gesteinskörnung und/oder der Betonzusatzstoffe, ausgesetzt wäre.
- Aus der Veränderung der Porenlösungskonzentration kann nicht direkt auf die gebundene Alkalimenge geschlossen werden. Daher wird angenommen, dass die Ausgangskonzentration in der Porenlösung mit dem aus Portlandzement gelösten Anteil von Alkalien gleichzusetzen ist, wobei 70% der rechnerisch im Portlandzement vorhandenen Alkalien als gelöst angenommen werden [Schä 04]. Verringert sich die Porenlösungskonzentration über die Zeit, so wird im selben Verhältnis die Alkalimenge verringert.
- Eine Veränderung des Anteils der gelösten Alkalien aus Portlandzement und eine Veränderung des freien Wassers bei Fortschreiten der Hydratation werden nicht berücksichtigt.

In Abbildung 37 ist die Reaktionsgeschwindigkeit der Alkalibindung in den Duranglasbetonen bis zum Alter von 28 Tagen bei Lagerung in 40°C (links) und bis zum Alter von 90 Tagen bei 20°C (rechts) dargestellt. Es wurde untersucht, inwieweit sich die Art und die Menge an Betonzusatzstoffen auf die Reaktionsgeschwindigkeit der Duranglasbetone auswirken. Aufgrund der verschiedenen Annahmen und Vereinfachungen bei der Berechnung der Reaktionsgeschwindigkeit ist eine quantitative Bewertung der Ergebnisse fraglich, dennoch erscheint ein qualitativer Vergleich sinnvoll.

Eine Lagerungstemperatur zwischen 20 auf 40°C hat keinen signifikanten Einfluss auf die Tendenz der Ergebnisse.

Im Beton D1 mit Portlandzement K1 bewirkt der Austausch durch 15 bis 40 M.-% inertes Kalksteinmehl eine tendenzielle Beschleunigung der Alkalireaktionen. Dies bedeutet, dass sich nicht die Verringerung der ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentrationen von 800 auf bis zu rd. 500 mmol/l, vgl. Tabelle 17, sondern eine Erhöhung der Durchlässigkeit des Zementsteins auf die Reaktionsgeschwindigkeit des Duranglases auswirken.

Bei der Verwendung von Flugasche im Bindemittel nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit in den Betonen in der Reihenfolge F1, F2 und F3 zu. Dies ist auf eine Kombination der Alkalibindung durch die Alkalireaktion des Duranglases und einer Alkalibindung in die Reaktionsprodukte der puzzolanischen Flugaschen zurückzuführen. Die Reihung deckt sich mit der in Abbildung 21 festgestellten Zunahme der Alkalibindekapazität der Flugaschen bei erhöhter Feinheit (F2) und abnehmendem Alkaligehalt (F3). Im Gegensatz zu den Betonen mit Flugasche F1 oder F2 ist in den Betonen mit Flugasche F3 mit zunehmendem Flugaschegehalt im Bindemittel eine Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit im Beton festzustellen. Dies zeigt, dass der niedrige Alkaligehalt der Flugasche F3 ($\text{Na}_2\text{O}_e = 1,09 \text{ M.-%}$) mit zunehmendem Anteil im Bindemittel eine verstärkte Einbindung von Alkalien in die Produkte der puzzolanischen Reaktion bewirkt.

Mit zunehmendem Hüttensandgehalt (S) im Bindemittel nimmt die Reaktionsgeschwindigkeit ab. Dies ist auf eine Erhöhung der Gefügedichtigkeit und somit einem erhöhten Diffusionswiderstand des Zementsteins zurückzuführen. Im Beton mit 72% Hüttensand ist eine gegenüber den anderen Betonen weit geringere Reaktionsgeschwindigkeit zu erkennen, offensichtlich ist hier aufgrund der geringen Ausgangsalkalikonzentration von rd. 200 mmol/l, vgl. Tabelle 17, die Löslichkeit des Duranglases stark herabgesetzt bzw. die Grenzalkalität des Duranglases erreicht.

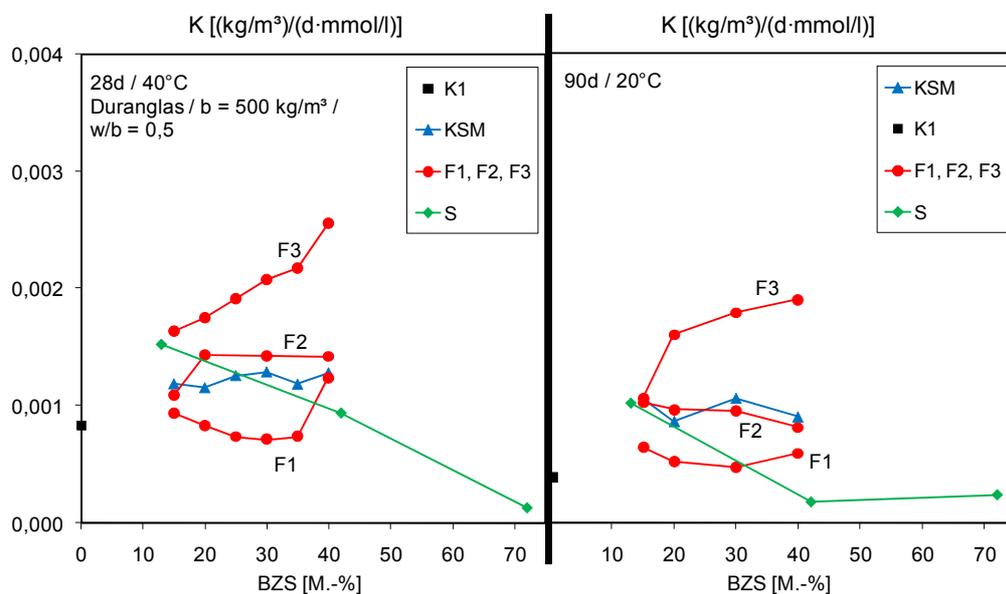


Abbildung 37: Reaktionsgeschwindigkeit K von Duranglasbetonen mit unterschiedlichen Betonzusatzstoffen bei 40°C (links) und 20°C (rechts).

In Abbildung 38 werden die am Beton ermittelten Werte der Reaktionsgeschwindigkeit für 28 Tage Lagerung bei 40°C den Werten für 90 Tage Lagerung bei 20°C gegenübergestellt. Wie bereits unter Punkt 6.2.3 ausgeführt, zeigt sich, dass eine Erhöhung der Lagerungstemperatur von 20°C auf 40°C die chemischen Reaktionen in den Duranglasbetonen um das 3-fache beschleunigt.

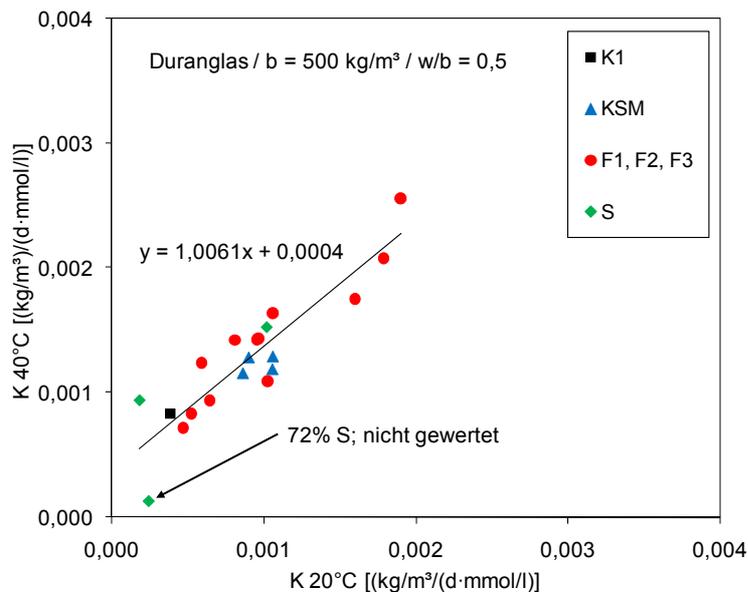


Abbildung 38: Vergleich der Reaktionsgeschwindigkeit K bei 40 bzw. 20°C.

6.2.5 Korrelation der Alkalität mit dem Dehnungsverhalten

In Abbildung 39 und Abbildung 40 werden die Enddehnung ε_e und die Dehnungsgeschwindigkeit m der Duranglasbetone mit der theoretischen Porenlösungszusammensetzung der dazugehörigen Zementsteine ohne Berücksichtigung des Einflusses der Betonzusatzstoffe (Annahme einer einfachen Verdünnung) korreliert. Die $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentrationen können dabei als die Werte angesehen werden, denen das Duranglas im Beton maximal, ohne Einfluss der Alkali-Kieselsäure Reaktion, ausgesetzt wäre. Die Werte der theoretischen $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentrationen sind in Tabelle 17 aufgeführt, die Berechnung erfolgte über den in Punkt 6.1.2 aufgestellten Ansatz.

Tabelle 17: Theoretische ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration in der Porenlösung von Zementstein höheren Alters nach Abbildung 15, gültig für 20 und 40°C.

Zementstein aus K1 mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,21 \text{ M.-%}$										
w/b	0,5									
BZS [M.-%]	0	13	15	20	25	30	35	40	42	72
Na+K [mmol/l]	808	703	687	646	606	566	525	485	469	226
Zementstein aus K1/K4 mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,0 \text{ M.-%}$										
w/b	0,4									
BZS [M.-%]	0	13	15	20	25	30	35	40	42	72
Na+K [mmol/l]	783	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Zementstein aus K4 mit $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,65 \text{ M.-%}$										
w/b	0,5									
BZS [M.-%]	0	13	15	20	25	30	35	40	42	72
Na+K [mmol/l]	422	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Im Vergleich zum Beton D1 mit 100 % Portlandzement K1 wird durch die Verwendung des NA-Zementes K4 im Beton D2 trotz der erheblichen Verringerung der Alkalität um rd. 50 % nur eine geringfügige Verringerung der Enddehnung um rd. 25 % erzielt. Mit zunehmendem Austausch des Portlandzementes K1 durch die Betonzusatzstoffe Flugasche F1, F2 und F3 und Hüttsand S ist eine Abnahme der Enddehnungen zu erkennen. Die Verwendung von Kalksteinmehl führt ebenso wie die anderen Betonzusatzstoffe zu einer Verringerung der Ausgangskonzentrationen ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$). Allerdings stellen sich hier mit höheren Gehalten an Kalksteinmehl tendenziell eher höhere Dehnungen ein.

Im Beton D1a mit einem w/z-Wert von 0,4 wurde über die Verringerung des Alkaligehaltes im Portlandzement eine dem Beton D1 ($w/z = 0,5$) zumindest ähnliche ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration von rd. 780 gegenüber rd. 810 mmol/l eingestellt. Dass in dem Beton D1a eine derart signifikante Verringerung der Enddehnung eintritt, kann daher nur auf die Veränderung des w/z-Wertes von 0,5 auf 0,4 zurückgeführt werden.

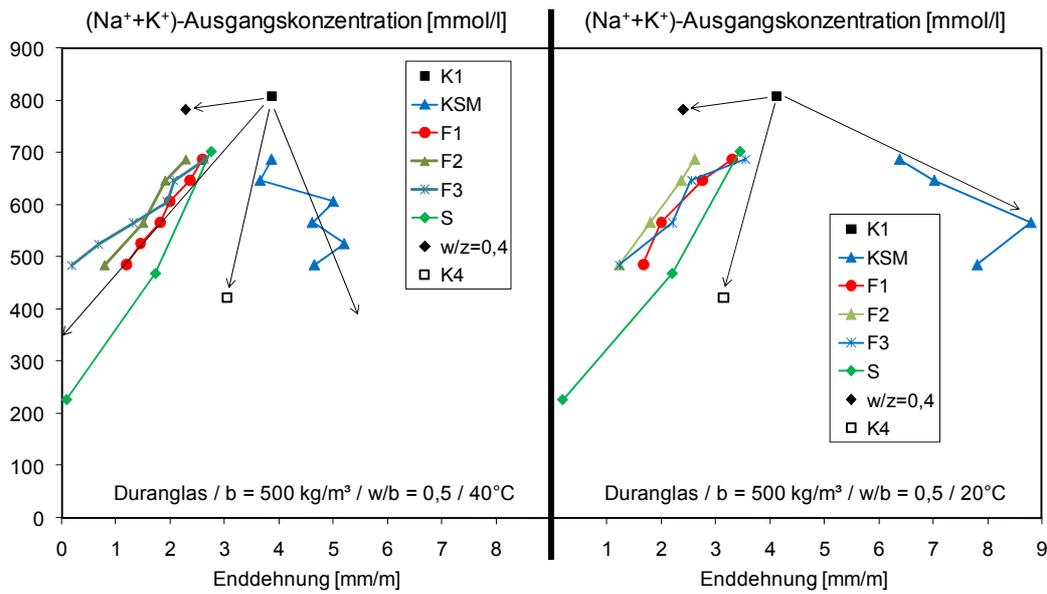


Abbildung 39: Korrelation der maximal in der Porenlösung vorhandenen (Na^+K^+) -Konzentration mit der Enddehnung der Betone bei 40 und $20^\circ C$.

Die oben ausgeführten Erläuterungen gelten sowohl für $40^\circ C$ als auch für $20^\circ C$. Sie lassen sich tendenziell auf die Korrelation der Alkalität mit der Dehnungsgeschwindigkeit m übertragen, mit dem Unterschied, dass hier bei $20^\circ C$ eine weit geringere Differenzierbarkeit erreicht wird, siehe Abbildung 40.

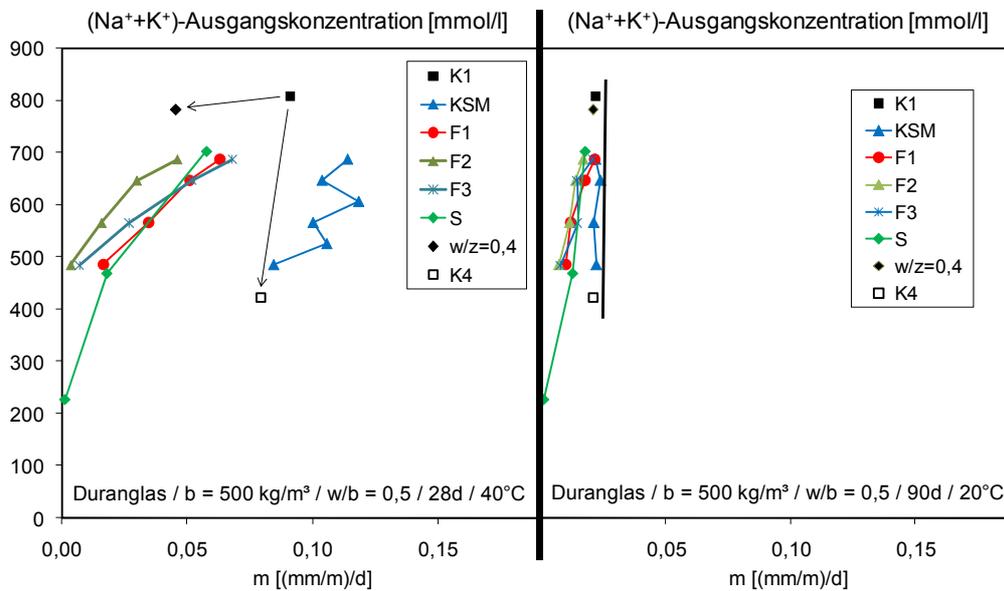


Abbildung 40: Korrelation der maximal in der Porenlösung vorhandenen (Na^+K^+) -Konzentration mit der Dehnungsgeschwindigkeit m der Betone bei 40 und $20^\circ C$.

Anmerkungen zum Vergleich des Dehnungsverhaltens mit der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung

Die Ergebnisse belegen, dass, für das hier verwendete Duranglas, kein strenger Zusammenhang zwischen der Alkalität in der Porenlösung und dem äußeren Erscheinungsbild der AKR vorliegt. Vielmehr wird durch betontechnologische Maßnahmen, die zu einer Verringerung bzw. einer Erhöhung der Transporteigenschaften und/oder Gefügefestigkeiten im Beton führen, eine Minderung bzw. eine Verstärkung des äußeren Schadensbildes einer Alkalireaktion erreicht.

6.2.6 Vergleich der Biegezugfestigkeit und der Porosität mit dem Dehnungsverhalten

Die Ergebnisse zur Porenlösungszusammensetzung alleine können das Dehnungsverhalten der Duranglasbetone nicht befriedigend erklären. Deshalb wurde in einem weiteren Schritt der Frage nachgegangen, inwieweit das Dehnungsverhalten durch die Transporteigenschaft und/oder die Gefügefestigkeit der Betone beeinflusst wird.

Von den Betonrezepturen D1 mit 15 und 30% Flugasche F1 bzw. Kalksteinmehl, D1a, und D2, D4 und D5 mit 13, 42 und 72% Hüttensand wurden Prismen $160/40/40 \text{ mm}^3$ zur Ermittlung der Biegezug-/Druckfestigkeit in Anlehnung an [DIN 196-1] hergestellt. Aus zusätzlichen Prismen wurden Proben für die Bestimmung der Porosität mittels Quecksilber-Druck Porosimetrie gewonnen. Die Probekörper wurden entsprechend den Probekörpern für die Dehnungsversuche bei 20 bzw. 40°C über Wasser gelagert. Die dafür hergestellten Betone haben dieselbe Zusammensetzung wie die entsprechenden Betone mit Duranglas, nur mit dem Unterschied, dass hier inerte Diabas Splitt anstatt reaktiven Duranglases in der Gesteinskörnung verwendet wurde. Dies hatte zum Ziel, dass die Ergebnisse zur Festigkeit und Porosität von einer schädigenden Alkalireaktion unbeeinflusst bleiben.

Zwischen der Porosität und der Festigkeit des Zementsteins bzw. Betons besteht ein direkter Zusammenhang [Loch 00]. Daher kann nicht unterschieden werden, ob eine Veränderung des Dehnungsverhaltens auf die Transporteigenschaft oder auf die Festigkeit der Betone zurückzuführen ist. Allerdings dürfte davon auszugehen sein, dass immer eine Kombination von beidem zutrifft.

Biegezugfestigkeit

Durch das Quellen des AKR-Gels bei Wasseraufnahme bauen sich Zugspannungen im Betongefüge auf. Dies führt anfänglich zu elastischen Dehnungen, wird die Zugfestigkeit überschritten kommt es zu einer äußerlich sichtbaren Rissbildung bzw. Schädigung des Betons. Durch das Aufbringen einer externen Last oder auch durch die Verwendung von Bewehrungsstahl kann eine Dehnung und Rissbildung vermindert oder sogar ganz verhindert

werden. Die zum Überdrücken der AKR-bedingten Quelldrücke benötigten Spannungen werden dabei in der Regel im Bereich von 2-3 N/mm² angegeben [Lenz 81, Wier 94]. Nach Hobbs [Hobb 88] dagegen werden durch die AKR aber auch Quellspannungen von 5 bis 14 N/mm² erreicht.

Wenn die Möglichkeit besteht Dehnungen aus AKR durch das Aufbringen externer Spannungen zu verringern, bedeutet dies aber auch, dass die Gefügefestigkeit des Betons selbst, entsprechend einem „inneren Widerstand“, einen Einfluss auf die Dehnungen hat. Für die Aufnahme der Quellspannungen ist dabei naturgemäß weniger die Druck- als die Zugfestigkeit des Gefüges von Interesse.

In Abbildung 41 bzw. Abbildung 42 erfolgt eine Korrelation der Biegezugfestigkeit mit der aus den Dehnungsversuchen erhaltenen Enddehnung bzw. Dehnungsgeschwindigkeit der Duranglasbetone. Unabhängig von der Betonrezeptur ist mit abnehmender Biegezugfestigkeit eine Zunahme der Enddehnung bzw. der Dehnungsgeschwindigkeit festzustellen.

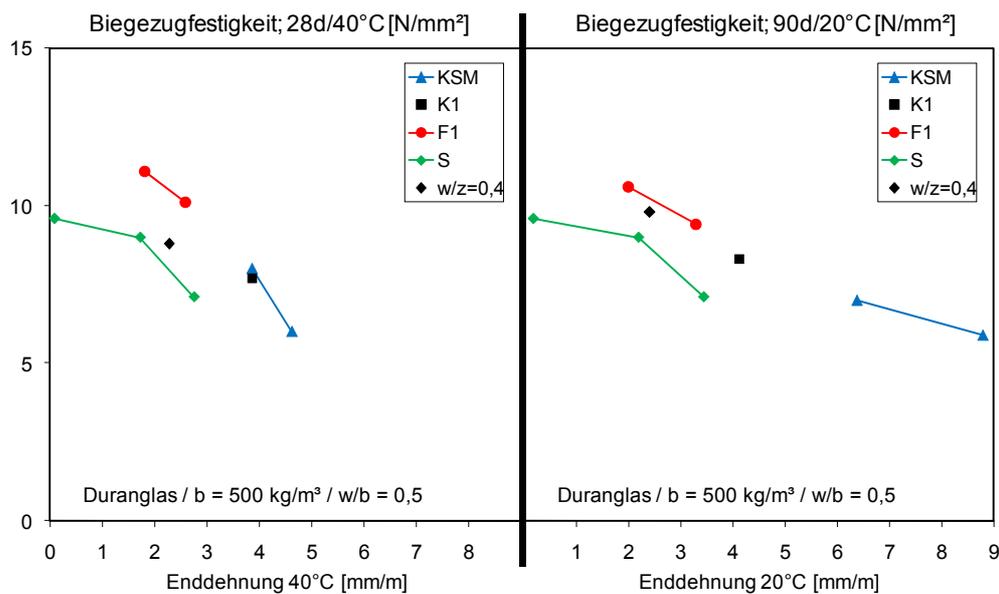


Abbildung 41: Korrelation der Biegezugfestigkeit nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/20°C (rechts) mit der Enddehnung der Betone bei 40 bzw. 20°C.

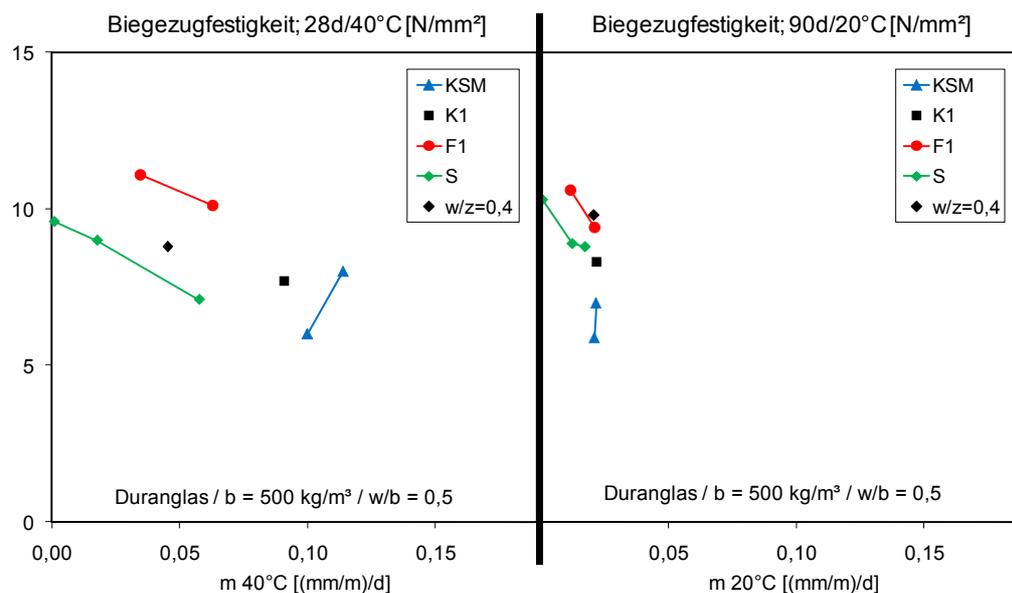


Abbildung 42: Korrelation der Biegezugfestigkeit nach 28d/40°C (links) und 90d/20°C (rechts) mit der Dehnungsgeschwindigkeit m der Betone bei 40 und 20°C.

Porosität

Da der Diffusionsstrom von Ionen ungefähr proportional zur Kapillarporosität des Betons ist, wird als Kennwert für die Transporteigenschaften der an den Betonen mittels Quecksilber-Druck Porosimetrie ermittelte Porenbereich zwischen 40 nm und 1 μm in Prozent von der Gesamtporosität verwendet. Mit der Wahl dieses Porenbereiches wird ein Großteil der für den Transport maßgeblichen Kapillarporen abgedeckt. Im Vergleich zu dem Beton D1 mit 100% Portlandzement führt der Austausch durch 15 bzw. 30% Kalksteinmehl zu einem rd. 35% erhöhten Diffusionsstrom. Im Gegensatz dazu wird die Transportleistung durch 13% Hüttensand bzw. 15% Flugasche F1 bereits um rd. 20% und durch 30% Flugasche F1 sogar um rd. 40% verringert. Offensichtlich führt eine Verringerung des Diffusionsstroms zu einer Verlangsamung des Ionennachschubs und somit zu einer Verknappung der für eine Alkalireaktion des Duranglases benötigten OH^- - und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Ionen am Reaktionsort.

In Abbildung 43 wird die Porosität der Dehnungsgeschwindigkeit bzw. Enddehnung der Betone nach 28d/40°C gegenübergestellt. Es ist ein guter Zusammenhang festzustellen. Eine höhere Transportleistung in den Betonen führt zu höheren Enddehnungen und Dehnungsgeschwindigkeiten in den Dehnungsversuchen.

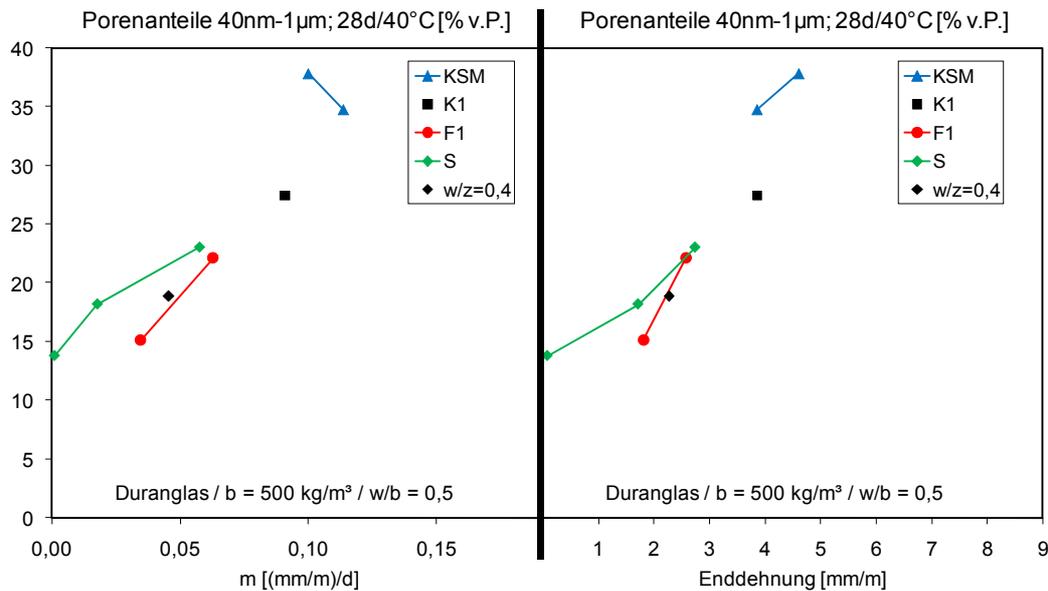


Abbildung 43: Korrelation des Porenanteils zwischen 40 nm und 1 µm in % von der Gesamtporosität (P) nach 28d/40°C mit der Dehnungsgeschwindigkeit m bzw. Enddehnung bei 40°C.

Anmerkungen zur Korrelation des Dehnungsverhaltens mit der Biegezugfestigkeit und der Porosität

Unabhängig von der Betonrezeptur, führt eine erhöhte Biegezugfestigkeit zu einer Verringerung und eine erhöhte Porosität zu einer Verstärkung der Enddehnung und der Dehnungsgeschwindigkeit in den Duranglasbetonen. Wie bereits erwähnt ist eine Differenzierung dieser Einflussgrößen, alleine schon wegen der direkten Abhängigkeit der Festigkeit von der Porosität, nicht möglich. Allerdings stellt sich der Zusammenhang zwischen Porosität und Dehnungsverhalten schärfer dar.

Im Gegensatz zur Korrelation mit der maximalen ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)-Konzentration in der Porenlösung lassen sich hier auch der Beton D1a mit einem w/z-Wert von 0,4 und die Betone D1 mit Kalksteinmehl in die Korrelationen eingliedern, vgl. Abbildung 39 und Abbildung 43. Daher erscheint es zulässig die Porosität der Betone und die damit bedingte Auswirkung auf die Transporteigenschaften und Gefügefestigkeiten als maßgeblichen Faktor bei der Entwicklung des äußeren Schadensbildes einer AKR in Betonen mit Duranglas zu bezeichnen. Die Gründe dafür, dass in natürlichen dichten Gesteinskörnungen offensichtlich die Porenlösungszusammensetzung den maßgeblichen Faktor darstellt, dürften in der weit geringeren Alkaliempfindlichkeit dieser Gesteinsarten und der damit verbundenen höheren Grenzalkalität zu suchen sein. Dennoch ist davon auszugehen, dass auch hier zumindest der zeitliche Verlauf und das äußere Erscheinungsbild einer AKR von den Transporteigenschaften und der Gefügefestigkeit beeinflusst werden.

6.2.7 Zusammenfassung der Ergebnisse für Beton mit Duranglas

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen an Betonen mit Duranglas als reaktiver Gesteinskörnung zusammengefasst:

- Die Prüfung bei 40°C führt zur gleichen Bewertung der Betonrezepturen wie die Prüfung bei 20°C, siehe Punkt 6.2.2.
- Eine Erhöhung der Lagerungstemperatur von 20°C auf 40°C beschleunigt die chemischen Reaktionen in den Duranglasbetonen in etwa um das 3-fache, siehe Punkt 6.2.3 und Punkt 6.2.4.
- Das Duranglas reagiert relativ unempfindlich auf eine Veränderung der Alkalität von Porenlösungen, die im Rahmen der Alkaligehalte deutscher Portlandzemente erreicht werden. Die Grenzalikalität des Duranglases liegt bei rd. 200 mmol/l (pH ~ 13,3), siehe Punkt 6.2.4 und Punkt 6.2.5.
- Eine höhere Porosität und somit höhere Transportleistung im Zementstein führt zu einer Beschleunigung der Alkalibindung durch Reaktionsprodukte des Duranglases, siehe Punkt 6.2.4.
- Aufgrund der geringen Empfindlichkeit gegenüber einer Veränderung der Alkalität in der Porenlösung ist Duranglas nur bedingt für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Betonzusatzstoffen geeignet.
- Im Gegensatz zur Alkalität wirken sich die Transporteigenschaften und/oder die Gefügefestigkeit maßgebend auf das Dehnungsverhalten der Duranglasbetone aus, siehe Punkt 6.2.6.

6.3 Betonversuche mit natürlichen Gesteinskörnungen

6.3.1 Validierung des Betonversuchs unter beschleunigenden Bedingungen

Bewertung der Ergebnisse aus der 40°C-Nebelkammer

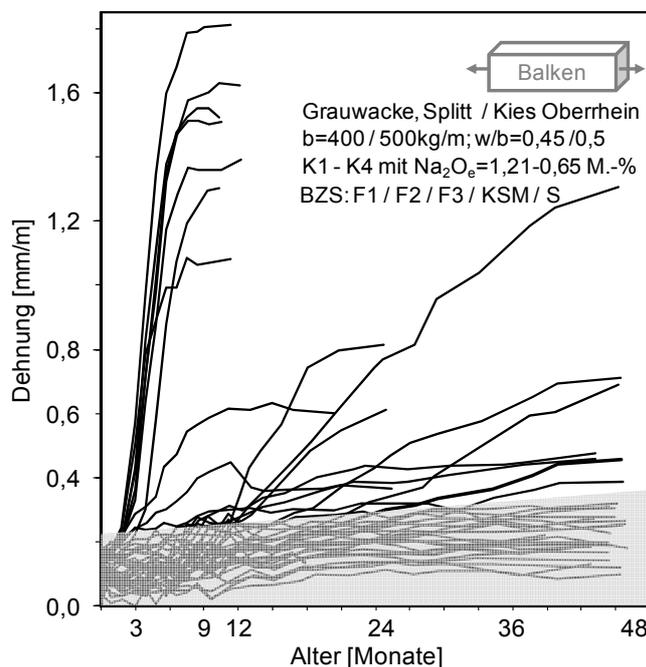
Die Bewertung von in der 40°C-Nebelkammer geprüften Betonen mit Flugasche ist innerhalb der in der Alkali-Richtlinie vorgegebenen Zeitgrenze von 9 Monaten ohne weiteres nicht möglich, da das 40°C-Nebelkammerverfahren mit seinen Beurteilungskriterien - Dehnung am Balken $\leq 0,6$ mm/m bzw. Rissbreite am Würfel $\leq 0,2$ mm nach 9 Monaten Lagerungsdauer - ursprünglich für die Einstufung der Reaktivität dichter Gesteinskörnungen mit Hilfe einer festgelegten Betonrezeptur entwickelt wurde. Dieses Verfahren ist daher nicht per se für die Beurteilung einer bestimmten Betonrezeptur im Sinne einer Performance-Prüfung hinsichtlich der Gefahr des Auftretens einer schädigenden Alkalireaktion geeignet. Bei frei gewählten Betonrezepturen bzw. Bindemittelkombinationen ist die Übertragbarkeit der Bewertungskriterien zu hinterfragen. So wird bei der ursprünglich definierten Lagerungsdauer von 9 Monaten unter Umständen nur eine Verzögerung, nicht aber die endgültige Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion beobachtet [Sieb 00, Sieb 07]. Dies gilt für Bindemittelkombinationen unabhängig von der Art des Betonzusatzstoffes, wie zum Beispiel Flugasche, Hüttensand oder Kalksteinmehl.

Auch an Betonen bei denen davon auszugehen ist, dass darin keine schädigende AKR stattfindet oder dass die Dehnungen aus AKR abgeschlossen sind, wird über die Prüfdauer oftmals ein langsamer, kontinuierlicher Dehnungsanstieg gemessen. Die Gründe hierfür sind nicht genau geklärt, man kann aber annehmen, dass es sich dabei (1) um stetige Feuchtedehnungen und (2) um eine sehr langsam ablaufende, nicht schädigende Alkali-Kieselsäure Reaktion handelt [Cyr 02].

Zur Berücksichtigung dieser Probleme wurden die Normalbetone bis zum Alter von rund 48 Monaten und die selbstverdichtenden Betone bis zum Alter von rund 36 Monaten in der 40°C-Nebelkammer gelagert. Eine eindeutige Entscheidung, ab wann eine Bindemittelkombination eine schädigende Alkalireaktion im Beton vermeidet, ist problematisch und erforderte neben der Dehnungsmessung und Rissdetektion weitere analytische Maßnahmen. So wurde eine mögliche, wenn auch äußerlich vielleicht nicht signifikant aufgetretene Gefügeschädigung der Betone an Dünnschliffen lichtmikroskopisch beurteilt. Werden die Dehnungsverläufe aller Normalbetone miteinander verglichen, so erscheint es damit zulässig einen Bereich zu definieren, in dessen Grenzen davon ausgegangen werden kann, dass keine schädigenden Alkalireaktionen stattfinden, siehe Abbildung 44. In den Abbildungen ist dieser Bereich mit einer grauen Schattierung gekennzeichnet. Eine schnellere Dehnungsgeschwindigkeit bzw. höhere Dehnwerte der Balken und/oder der Beginn einer Rissbildung am Würfel werden somit in dieser Arbeit als Schädigung definiert. Dies bedeutet weit

schärfere Anforderungen als in der Alkali-Richtlinie gefordert, in der mit den vorgegebenen Grenzwerten eine Schädigung des Betons in geringem Maße zugelassen wird.

Diese umfassende Vorgehensweise sollte eine auf der sicheren Seite liegende Beurteilung der Betone nach Lagerung in der 40°C-Nebelkammer ermöglichen. Die Ergebnisse aus der 40°C-Nebelkammerlagerung müssen wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung aber auch noch durch Ergebnisse aus einer parallel durchgeführten Aussenlagerung von Betonwürfeln verifiziert werden. Die Ergebnisse dazu liegen aber noch nicht vor und sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.



grauer Bereich: nicht auf eine schädigende AKR zurückzuführende Dehnung

Abbildung 44: Dehnungsverhalten der Normalbetone mit Grauwacke, Splitt bzw. Kies Oberrhein; 40°C-Nebelkammer.

Auslaugung der Probekörper in der 40°C-Nebelkammer

Von den Lagerungsbedingungen haben neben der Temperatur vor allem Änderungen in der Feuchtigkeit und/oder eine durch Auslaugung bedingte Verringerung des Alkaligehalts in den Probekörpern einen starken Einfluss auf die Ergebnisse aus der 40°C-Nebelkammer [Nix 08].

In der für diese Arbeit verwendeten 40°C-Nebelkammer wurde die Feuchtigkeit durch das Einsprühen eines Wassernebels eingestellt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich über den gesamten Lagerungsraum ein gleichmäßig verteilter feiner Nebel ausbilden konnte. Eine Übersättigung der Luft ließ sich mit dieser Methode nicht vermeiden, so dass in gewissen Mengen ein Niederschlag des Wassers auf den Probekörpern auftrat. Leider wurde eine Auslaugung der Probekörper am Anfang der Arbeiten nicht berücksichtigt, so dass dazu erst bei Auslagerung der Dehnbalken (10/10/50 cm³) nach rd. 4 Jahren in der 40°C-Nebelkammer Untersuchungen durchgeführt wurden.

Zur Ermittlung der Auslaugung wurde aus Teilstücken der Dehnbalken die Porenlösung ausgepresst, siehe Abbildung 45. Über einen Vergleich mit der Porenlösung von in PE-Flaschen gelagerten Betonen konnte dann die Auslaugung quantifiziert werden. Da zu diesem Zeitpunkt nur noch von wenigen Betonen eine in PE-Flaschen konservierend gelagerte Probe vorhanden war (nicht ausgelaugte Betone), konnten die Untersuchungen nur stichpunktartig durchgeführt werden.

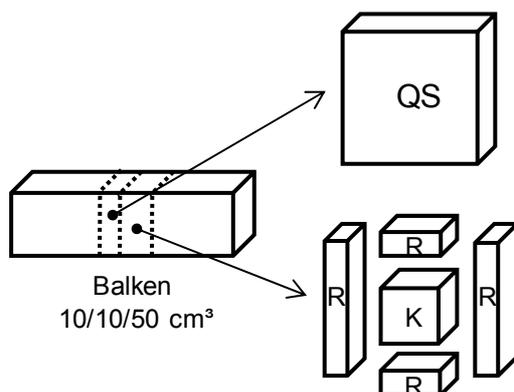


Abbildung 45: Teilstücke aus den Dehnbalken für die Porenlösungsauspressversuche; QS: Querschnitt; R: Rand; K: Kern

Die Probenpräparation an den Dehnbalken wurde folgendermaßen durchgeführt: Um Randeffekte an den Balkenenden zu vermeiden, wurden aus dem mittleren Drittel der Balken Scheiben mit einer Dicke von rd. 3 cm herausgeschnitten (10/10/3 cm³), diese wurden zerkleinert und von dem gesamten Probenmaterial die Porenlösung ausgepresst. Dadurch erhält man die, über den Querschnitt (QS) des Balkens, gemittelte Porenlösungszusammensetzung im Beton. An einem Beton wurde zusätzlich das Tiefenprofil der Auslaugung

ermittelt. Dazu wurde eine Scheibe ($10/10/8 \text{ cm}^3$) in den Rand- und Kernbereich unterteilt, wobei die Randstücke (R) bis rd. 2 cm Tiefe reichen und der Kern (K) einen Querschnitt von rd. $6/6 \text{ cm}^2$ aufweist, siehe Abbildung 45. Vereinfachend wird für die Rand-, Querschnitts- bzw. Kernprobe eine vom Rand ausgehende mittlere Tiefe von 1, 2,5 bzw. 3,5 cm angenommen.

In Abbildung 46 ist die, über den Querschnitt der Dehnbalken gemittelte OH^- -Konzentration im Verhältnis zu den nicht ausgelaugten Proben angegeben. Für die $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration ergeben sich dieselben Tendenzen (ohne Abbildung). Es ist zu erkennen, dass in den Betonen B2 bzw. B4, B5 und B6 mit 25 bzw. 30 % Flugasche F1 noch rd. 60 bis 65 % der Hydroxidionen vorhanden sind, im Beton B4 mit 100 % Portlandzement K3 dagegen nur noch rd. 30 %, siehe Abbildung 46 (links). Dies bedeutet eine weitgehende Auslaugung der Betone nach 4 Jahren (48 Monaten) Lagerung in der 40°C -Nebelkammer. Die weit geringere Auslaugung der Betone mit Flugasche im Bindemittel ist offensichtlich auf ein dichteres Betongefüge zurückzuführen, wodurch der Transport der Alkali- und Hydroxidionen erheblich verlangsamt wurde.

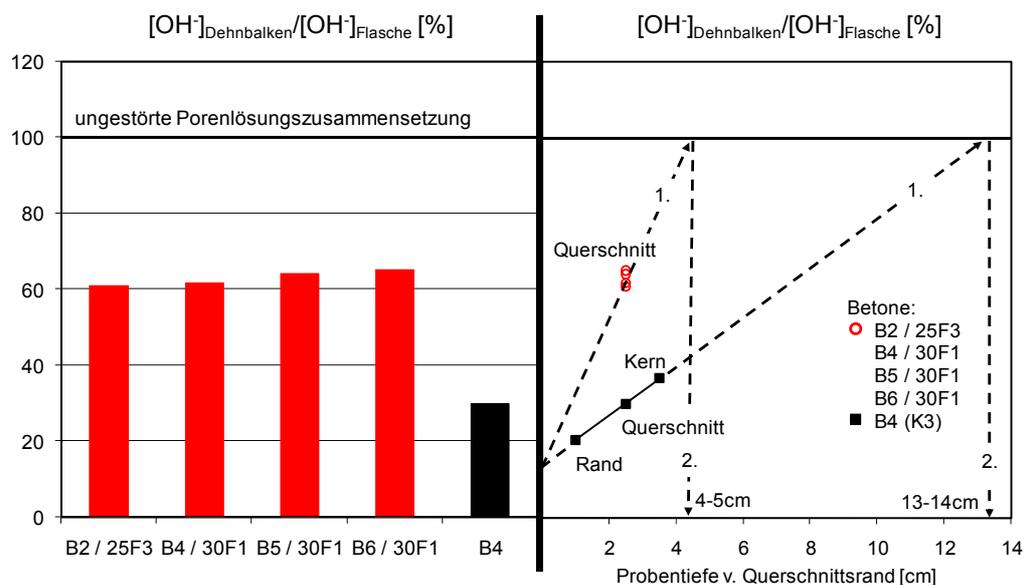


Abbildung 46: Auslaugungseffekte in den Dehnbalken – $10/10/50 \text{ cm}^3$ - nach rund 4 Jahren Lagerung in der 40°C Nebelkammer; Betone mit Grauwacke; links: mittlere OH^- -Konzentration im Querschnitt der Dehnbalken bezogen auf nicht ausgelaugte Proben; rechts: Abschätzung der Probtiefe ab welcher eine von Auslaugungsprozessen weitgehend ungestörte Porenlösung vorliegen würde.

Eine grobe Abschätzung, ab welcher Probtiefe mit einer von Auslaugungsprozessen weitgehend ungestörten Porenlösungszusammensetzung zu rechnen ist zeigt Abbildung 46 (rechts). Wird ein linearer Zusammenhang zwischen Probtiefe und Auslaugung angenommen, so ergibt sich für die Betone mit 30 % Flugasche F1 eine Mindestprobtiefe

von rd. 4-5 cm, dagegen für den Beton mit reinem Portlandzement von rd. 13-14 cm. Dies bedeutet, dass gerade die Probekörpergeometrie einen entscheidenden Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Betonen mit unterschiedlich dichtem Gefüge (w/z-Wert, Bindemittelkombination) hat. Da in poröseren Betonen schneller eine Verringerung der Alkalität der Porenlösung stattfindet, kann bei langen Lagerungsdauern die Leistungsfähigkeit von porösen Betonen gegenüber dichten Betonen überschätzt werden.

Da die Versuche erst nach 48 Monaten Lagerungsdauer durchgeführt wurden, erfolgt eine Abschätzung des zeitlichen Verlaufs der Auslaugung in den Balken – 10/10/50 cm³ - über das Wurzel-Zeit Gesetz, siehe Formel 9. Aufgrund der über die Lagerungszeit gleichmäßigen Befeuchtung der Proben kann von Diffusion als maßgeblichem Transportprozess ausgegangen werden. Bei Verwendung des Wurzel-Zeit Gesetzes erfolgt eine Anpassung über die materialspezifische Konstante a . Diese hängt von den Transporteigenschaften des Betons ab. Über die Kenntnis der Transporteigenschaften kann somit auch für Betone, an denen keine Auspressversuche durchgeführt wurden, das Auslaugungsverhalten abgeschätzt werden. In Abbildung 47 wurde der zeitliche Verlauf der Auslaugung für die Betone B2, B2 / 30F1 und B2 / 30KSM abgeschätzt. Damit wird in etwa die Bandbreite des Auslaugungsverhaltens von den in dieser Arbeit verwendeten Normalbetonen erfasst. Als Kennwert für die Transporteigenschaften wird der an den Betonen mittels Quecksilber-Druck Porosimetrie ermittelte Porenbereich zwischen 40 nm und 1 µm in Vol.-% von der Gesamtporosität verwendet. Mit der Wahl dieses Porenbereiches wird ein Großteil der für den Transport maßgeblichen Kapillarporen abgedeckt. Da von den für die Auslaugungsversuche verwendeten Betonen B4 bzw. B4, B5 und B6 mit 30 % F1 keine Daten zur Porosität vorhanden sind, wurden die Daten der Betone B2 und B2 / 30F1 verwendet. Bei ansonsten gleichen Randbedingungen – $b = 400 \text{ kg/m}^3$, w/b-Wert = 0,45, 30 % F1 – ist kein wesentlicher Einfluss auf die Transporteigenschaften und somit das Auslaugungsverhalten des Betons aus Verwendung eines anderen Klinkers zu erwarten. Die Kennwerte zur Porosität und zur materialspezifischen Konstante a sind in Tabelle 18 angegeben.

$$A = a \cdot \sqrt{t}$$

A : Auslaugung in %

a : materialspezifische Konstante

t : Lagerungsdauer

Formel 9: Wurzel-Zeit Gesetz

Tabelle 18: Kennwerte zur Porosität und zur materialspezifischen Konstante a von Normalbetonen mit $w/b = 0,45$.

Betone mit	Auslaugung 48 Monate [%]	a	a_{BZS}/a_K	$P_{90d/40^\circ C}$ 40nm-1 μ m [Vol.-%]	P_{BZS}/P_K
30%F1	35 ^{1a)}	5,1 ²⁾	0,505	11,1 ⁴⁾	0,493
100% K	70 ^{1b)}	10,1 ²⁾	1	22,5 ⁴⁾	1
30% KSM	n.v.	13,5 ³⁾	n.v.	30,1 ⁴⁾	1,338

BZS: Betonzusatzstoff

1a) mittlere Auslaugung der Betone B4, B5 und B6 mit 30 % F1

1b) mittlere Auslaugung des Betons B4

2) berechnet aus der Auslaugung der Betone B4, B5 und B6 mit 30 % F1 bzw B4 nach 48 Monaten in der 40°C-Nebelkammer

3) gerechnet: $a = (P_{KSM}/P_K) \cdot a_{Klinker} = 1,338 \cdot 10,1 = 13,5$

4) Anteil der Poren zwischen 40nm-1 μ m Durchmesser in den Betonen B2 / 30F1, B2 und B2 / 30KSM nach 90d/40°C

Wie in Abbildung 47 zu erkennen ist, wirkt sich die Bindemittelzusammensetzung stark auf die Auslaugung der Probekörper aus. Bezogen auf den Beton mit reinem Portlandzement führt die Verwendung von 30 % Flugasche F1 bzw. 30 % Kalksteinmehl zu einer Halbierung bzw. zu einer rd. 30-prozentigen Verstärkung der Auslaugung. Nach 90 Tagen werden dabei Werte von rd. 9, 18 und 23 % und nach einem Jahr von rd. 18, 35 und 47 % in der Reihenfolge 30 %F1, 100 % K und 30 % KSM erreicht. Die Ergebnisse für den Beton mit 100 % Portlandzement decken sich gut mit Angaben aus der Literatur, nach denen bei Verwendung des 38°C-Betonversuchs nach [ASTM C1293], bei ähnlicher Rezeptur ($z = 420 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,42-0,45$) und Probekörperdimension (75/75/300 mm²), eine Auslaugung von 20 bzw. 35 % nach 90 Tagen bzw. einem Jahr ermittelt wurde [Thom 06].

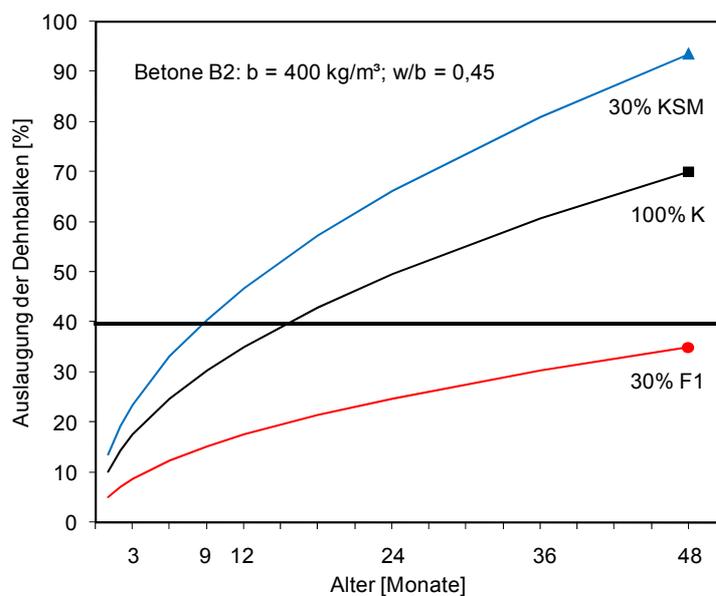


Abbildung 47: Abschätzung des zeitlichen Verlaufs der Auslaugung von Dehnbalken aus Betonen mit unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung über das Wurzel-Zeit Gesetz; 40°C-Nebelkammer.

Aufgrund der schnellen Reaktion von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen bei Verwendung der Standardrezeptur sind somit keine ungewöhnlichen Effekte zu erwarten. Problematisch wird es bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit beliebiger Betonrezepturen.

Mit Erreichen eines Auslaugungsgrades von rd. 40 % liegen in dem Beton B2 / 30KSM bereits nach 9 Monaten nur noch Alkaligehalte (rd. 2 kg/m³) in der Größenordnung eines NA-Zementes vor. Somit ist rein auslaugungsbedingt in diesen Balken auch bei längerer Lagerungsdauer keine Dehnung mehr zu erwarten. Im Beton B2 / 30F1 dagegen wird dieser Zustand erst nach rd. 4 Jahren erreicht.

6.3.2 Einfluss der Rezeptur von Normalbetonen mit Portlandzement auf eine schädigende AKR

Die Grauwacke reagiert relativ unempfindlich auf eine Veränderung der Rezeptur von Normalbetonen mit Portlandzement, siehe Abbildung 48. Eine mäßige Veränderung des Alkaliäquivalentes im Portlandzement von 1,02 gegenüber 1,21 M.-%, des w/z-Wertes von 0,5 gegenüber 0,45 und eine Erhöhung des Zementgehaltes auf 500 gegenüber 400 kg/m³ wirken sich nur gering auf den zeitlichen Verlauf und die Größenordnung der Dehnung und Rissbildung am Beton aus (vgl. Betone B1, B2, B2a und B3). Tendenziell stellt sich bei gleichen Zementgehalten durch eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,45 auf 0,5 eine etwas geringere Enddehnung und Rissbreite ein (vgl. Betone B2 und B2a) und eine Verringerung des Alkaligehaltes von 4,8 auf 4,1 kg/m³ führt im Beton B3 gegenüber dem Beton B2 zu einer etwas geringeren Rissbildung am Würfel. Bei einer weiteren Absenkung des Alkaliäquivalentes im Portlandzement auf 0,76 bzw. 0,65 M.-% (Betone B4 und B5) kann keine schädigende Alkalireaktion mehr festgestellt werden.

Mit den hier verwendeten Portlandzementen kann durch die Verringerung des Alkaligehaltes aber keine ausgeprägte, kontinuierliche Verringerung der Dehnungen und Rissweiten oder Verlangsamung der Dehnungsrate festgestellt werden, sondern es erfolgt ein eher abrupter Übergang zwischen Schädigung und Schadensfreiheit der Betone.

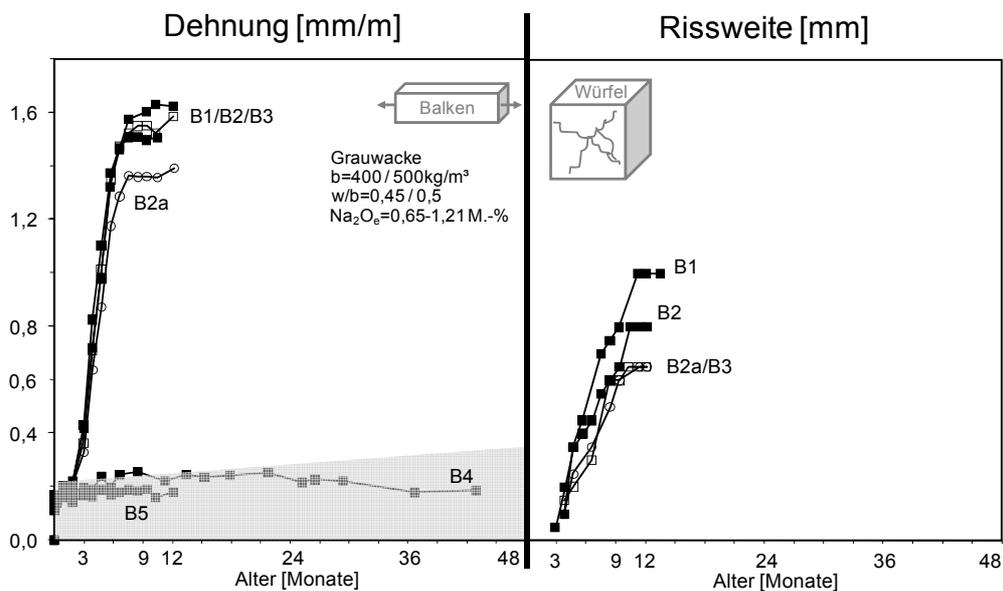


Abbildung 48: Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) von Normalbetonen mit Grauwacke; 40°C-Nebelkammer.

Im Gegensatz zur Grauwacke reagieren die Gesteinskörnungen aus dem Oberrhein empfindlicher auf eine Veränderung des Alkaligehaltes im Beton. Für den Kies aus dem Oberrhein bedeutet dies im Extremfall, dass er bei Prüfung mit der Betonrezeptur B2, entsprechend Alkali-Richtlinie Teil 3 [DAfStb 07], als unbedenklich eingestuft werden kann, wogegen die Verwendung im Beton B1 mit einem sehr hohen Alkaligehalt von rd. $6,0\text{ kg/m}^3$ doch zu einer signifikanten Dehnung und Rissbildung an den Probekörpern führt, siehe Abbildung 49.

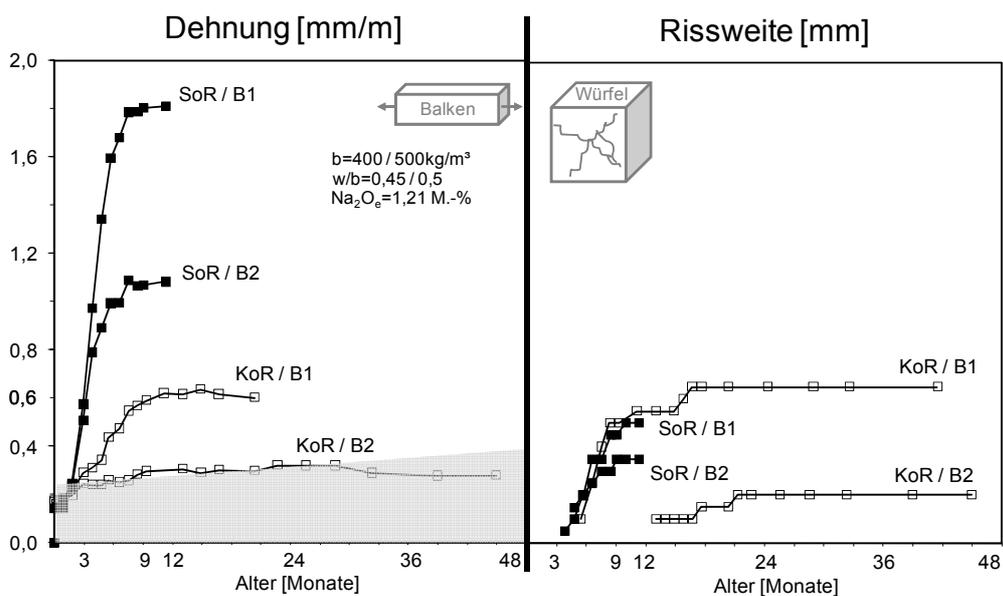


Abbildung 49: Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) von Normalbetonen mit Splitt bzw. Kies Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

6.3.3 Einfluss der Betonzusatzstoffe auf eine schädigende AKR

Ein zu geringer Austausch von Portlandzement durch die Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl, Hüttensand oder Flugasche führt zwar zu einer Verzögerung, eine schädigende Alkali-Kieselsäure Reaktion wird aber nicht endgültig vermieden. Dies ist gut an den Betonen mit Grauwacke zu erkennen, siehe Abbildung 50. Bereits der Austausch von Portlandzementklinker durch nur 13 % Hüttensand (B6) führt gegenüber dem Beton B2 mit reinem Portlandzement zu einer Verzögerung des Dehnungsbeginns um rd. 2 Monate bei einer mäßigen Verringerung der Enddehnungen um rd. 0,2 mm/m. Dass die nach rd. 3 Monaten beginnende Balkendehnung des Betons B2 / 20KSM mit einer Enddehnung von nur noch etwa 0,5 mm/m weitgehend unterdrückt wird, ist offensichtlich auf die Auslaugungsempfindlichkeit der Betone mit Kalksteinmehl zurückzuführen, vgl. Abbildung 47. Allerdings setzt ab einem Alter von rd. 6 Monaten eine starke Rissbildung am Würfel ein, die maximale Rissbreiten von 1,2 mm erreicht (B2 / 20KSM). Somit können diese Betone noch innerhalb einer 9-monatigen Lagerung, entsprechend der Alkali-Richtlinie, als empfindlich hinsichtlich einer schädigenden Alkalireaktion eingestuft werden.

Ein einfaches Festhalten an der Beurteilung im Alter von 9 Monaten hätte aber zu einer Fehleinschätzung der Leistungsfähigkeit anderer Bindemittelkombinationen geführt. So ist an den Betonen B2 mit 10 bzw. 20 % Flugasche F1 erst zwischen 9 und 15 Monaten ein Dehnungsanstieg, der signifikant über die Grunddehnung anderer Betone hinausgeht, zu beobachten. Trotz der relativ hohen Balkendehnungen zwischen 0,6 und 0,8 mm/m treten bei diesen Betonen nur sehr geringe Rissbreiten zwischen 0,05 und 0,1 mm auf. Auffällig ist, dass durch den Austausch von 10 % Portlandzementklinker K1 durch Flugasche F1 eine weit stärkere Verzögerung des Dehnungsbeginns als durch 13 % Hüttensand im Beton B6 (ebenso Portlandzement K1) erreicht wird. Aber nicht nur an den Betonen mit Flugasche tritt eine solche Verzögerung auf. So setzt auch im Beton B2 mit 30 % Kalksteinmehl erst nach rd. 12 Monaten eine Rissbildung am Würfel ein. Dabei werden immerhin Rissbreiten von bis zu 1,1 mm erreicht. Wie bereits für den Beton B2 / 20KSM ist auch hier der Grund für das Fehlen der Dehnung am Balken in einer verstärkten Auslaugung zu suchen.

Ebenso wie bei den Betonen B7 und B8 mit 42 und 72 % Hüttensand im Bindemittel wird mit 30 % Flugasche F1 im Beton B2 eine schädigende Alkalireaktion vermieden, siehe Abbildung 50. Die Schadensfreiheit des Betons B7 ist darauf zurückzuführen, dass der darin verwendete Hochofenzement K1 42% S mit einem Alkaliäquivalent von 1,00 M.-% bereits in etwa den Anforderungen an einen Hochofenzement CEM III/A-NA mit einem maximal zulässigen Alkaliäquivalent von 0,95 M.-% nach [DIN 1164-10] entspricht, siehe auch [Sieb 01].

Die unterschiedliche Auswirkung der Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl, Hüttensand und Flugasche auf die Dehnungsentwicklung und Rissbildung im Beton erschwert einen direkten

Vergleich der Leistungsfähigkeit dieser Betonzusatzstoffe. Somit können keine allgemeingültigen Bewertungskriterien, wie Enddehnung, Dehnungszunahme oder Rissbreiten, aufgestellt werden, sondern es muss eine Beurteilung unter Berücksichtigung der für jeden Betonzusatzstoff charakteristischen Schadensbilder erfolgen.

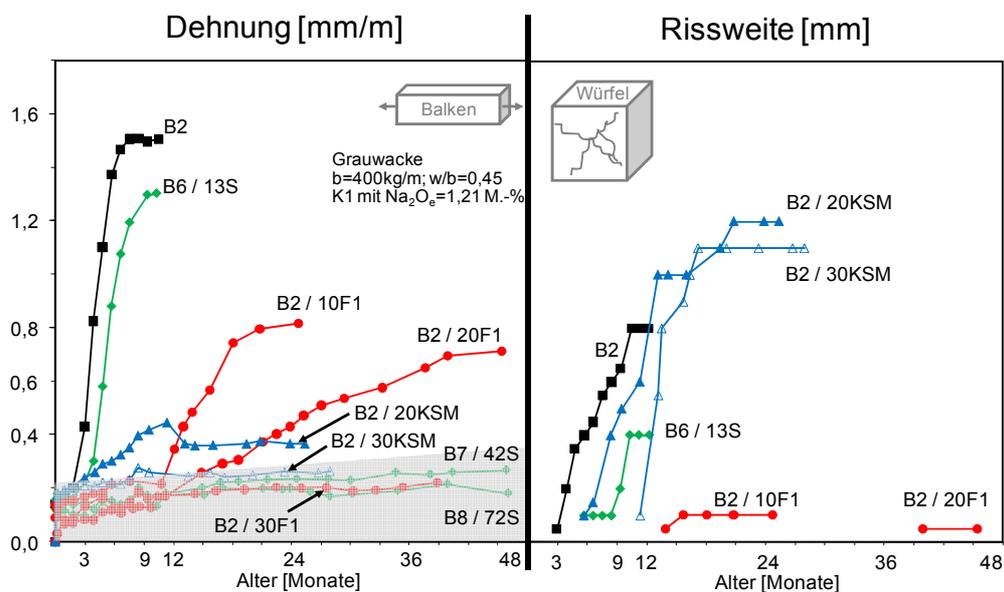


Abbildung 50: Vergleich der Betonzusatzstoffe; Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) von Normalbetonen mit Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

6.3.4 Einfluss der Flugaschemenge und -art auf eine schädigende AKR

In Abbildung 51 ist die Dehnungsentwicklung und Rissbildung der Betone B1 und B2 mit unterschiedlichen Gehalten an Flugasche F1 zusammengestellt. Von den Betonen B1 und B2 mit Portlandzementgehalten von 500 und 400 kg/m³ wurden 20-35 und 10-35 % durch Flugasche F1 ausgetauscht. Bei unzureichenden Austauschraten ist eine über den als ungeschädigt angenommenen Bereich hinausgehende Dehnung nach rund 9 bis 24 Monaten zu erkennen. Am Beton B2 wird ab 30 % Flugasche F1 eine Alkalireaktion sicher verhindert, am Beton B1 erst ab 35 %. Der Beton B1 / 30F1 weist eine langsame, aber kontinuierliche Dehnungszunahme auf. Erst nach rund 3 Jahren überschreitet dieser Beton den als unkritisch angenommenen Bereich knapp. Unter dem Lichtmikroskop konnte im Alter von 24 Monaten noch keine Gefügeschädigung festgestellt werden. Auf der sicheren Seite liegend wird dieser Beton, nach den in dieser Arbeit definierten Kriterien, dennoch als geschädigt eingestuft.

Bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten wird durch den massebezogenen Zementaustausch bei gleichen Austauschraten zwar dasselbe Verhältnis Betonzusatzstoff zu Portlandzement eingestellt, allerdings führt dieser Ansatz zu unterschiedlichen Alkaligehalten aus Portlandzement. Darin könnte auch ein Grund für das unterschiedliche Dehnungsverhalten der Betone B1 und B2 bei gleichem Zementaustausch zu finden sein. So werden durch 20 %

Flugasche F1 im Beton B2 mit rd. 3,4 kg/m³ gegenüber dem Beton B1 mit 4,2 kg/m³ Alkalien sowohl die Dehnungszunahme als auch die Enddehnungen deutlich verringert. Damit ist sicherlich auch die unterschiedliche Mindestaustauschrate bis zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion in den Betonen B1 und B2 zu begründen.

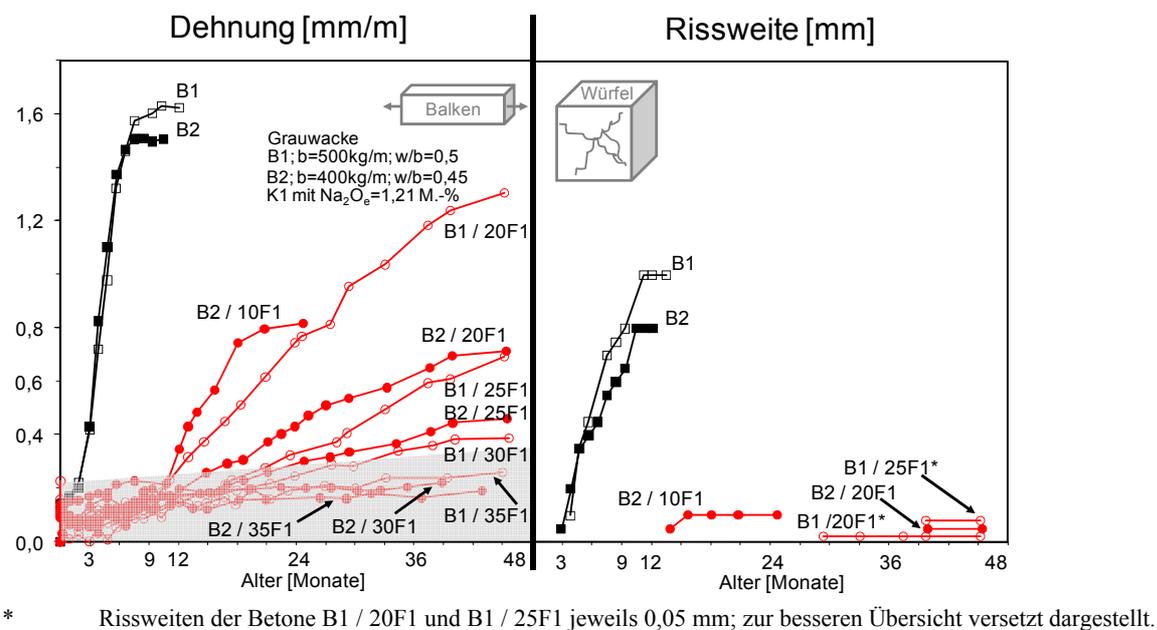


Abbildung 51: Vergleich der Normalbetone B1 und B2 mit Flugasche F1; Dehnung (links) und Rissbildung (rechts); Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

Aber nicht nur zwischen der Austauschrate sondern auch zwischen dem Alkaligehalt aus Portlandzement und einer schädigenden Alkalireaktion kann kein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Dies wird aus Abbildung 52 ersichtlich. Darin wurde die Dehnungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Alkaligehaltes der Betone aufgetragen. Die Dehnungsgeschwindigkeit in (mm/m)/Monat wurde aus dem linear verlaufenden Bereich der Dehnungskurven ermittelt. In den Betonen B1, B2 und B3 mit reinem Portlandzement stellt sich trotz stark unterschiedlicher Alkaligehalte zwischen 6,1 und 4,1 kg/m³ eine fast identische Dehnungsgeschwindigkeit von rd. 0,3 (mm/m)/Monat ein. Bereits durch 10 % Flugasche F1 im Beton B2 erfolgt eine starke Absenkung der Dehnungsgeschwindigkeit auf rd. 0,06 (mm/m)/Monat bei weiterhin 4,4 kg/m³ Alkalien. Auch ein Vergleich der flugaschehaltigen Betone B2 / 20F1 und B1 / 25F1 mit ähnlichen Dehnungsgeschwindigkeiten von rd. 0,02 (mm/m)/Monat ergibt bei Alkaligehalten von rd. 3,9 und 4,5 kg/m³ kein einheitliches Bild.

Daher ist davon auszugehen, dass sich in den flugaschehaltigen Betonen neben der reinen Verdünnung des Alkaligehaltes aus Portlandzement weitere Effekte auf das Dehnungsverhalten auswirken müssen. Dabei sind vor allem Effekte der Zusammensetzung der Porenlösung, wie eine über die Verdünnung hinausgehende Absenkung der Alkalität, zu

betrachten (s. Punkt 6.1). Da eine Veränderung von Dehnungsgeschwindigkeiten im allgemeinen auf transportgesteuerte Vorgänge schließen lässt, vgl. auch Punkt 6.2.6, ist aber auch davon auszugehen, dass sich eine Verdichtung des Betongefüges durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche zumindest verlangsamend auf den Verlauf der Alkalireaktionen in den Betonen mit Grauwacke auswirkt.

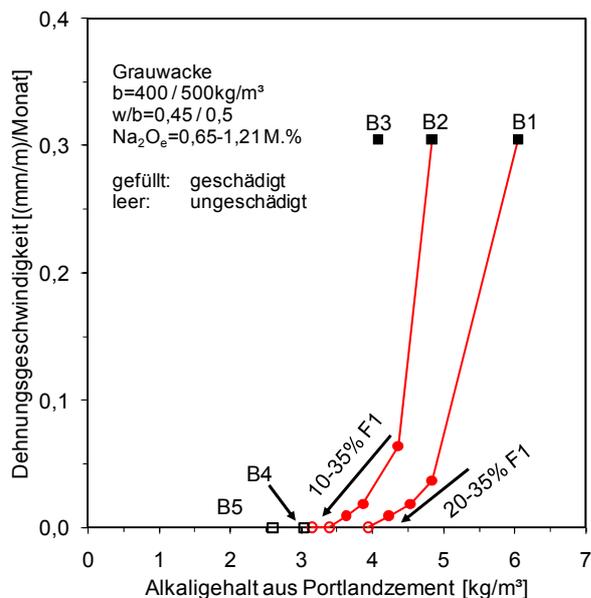


Abbildung 52: Abhängigkeit der Dehnungsgeschwindigkeit der Betone B1 und B2 mit Flugasche F1 vom Alkaligehalt aus Portlandzement; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer.

Ebenso wie bei der Verwendung von Grauwacke ist mit Splitt Oberrhein nach 9 bis 12 Monaten ein, wenn auch weit geringerer, Dehnungsanstieg an den Balken der Betone B1 mit 20 und 25 % Flugasche F1 zu erkennen. Im Gegensatz zur Grauwacke ist im Beton B2 allerdings eine Austauschrate von 20 % Flugasche F1 bereits ausreichend um eine schädigende Alkalireaktion des Splittes aus dem Oberrhein zu vermeiden. Da im Beton B1 gegenüber dem Beton B2 mit 500 gegenüber 400 kg Bindemittel ein sehr viel höherer Alkaligehalt vorliegt, decken sich diese Ergebnisse mit der Feststellung, dass der Splitt Oberrhein gegenüber der Grauwacke sensibler auf eine Veränderung des Alkaligehaltes reagiert, siehe Abbildung 49 und Abbildung 53.

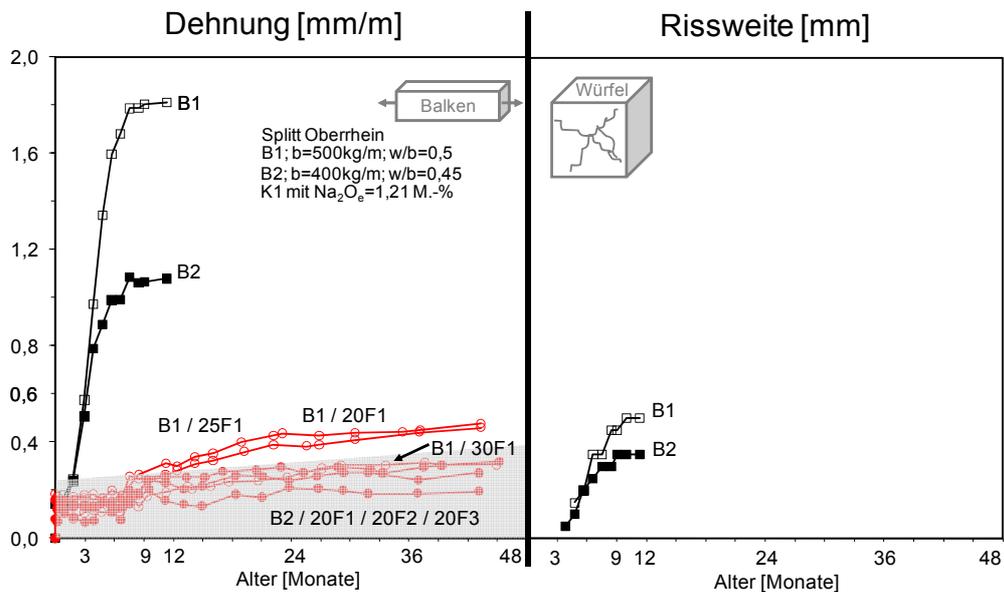


Abbildung 53: Vergleich der Normalbetone B1 und B2 mit Flugaschen F1, F2 bzw. F3; Dehnung (links) und Rissbildung (rechts); Splitt Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

Unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung ist an den Betonen B2, die mit 20 % der Flugaschen F2 bzw. F3 hergestellt wurden, auch nach einer Lagerungsdauer von knapp 48 Monaten keine schädigende Alkalireaktion zu erkennen, siehe Abbildung 53 und Abbildung 54. Die Verwendung von 10 % Flugasche F2 im Beton B2 mit Grauwacke führt gegenüber dem Beton B2 mit 10 % Flugasche F1 zu einer weiteren Verlangsamung der Betonschädigung. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zum Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Porenlösungszusammensetzung, siehe Punkt 6.1. Die höhere Feinheit der Flugasche F2 bzw. der niedrigere Alkaligehalt der Flugasche F3 bewirken im Vergleich zur Flugasche F1 eine stärkere Absenkung der Alkalität der Porenlösung. Auch ist von einer stärkeren Verdichtung des Porengefüges bei der Verwendung der sehr feinen Flugasche F2 auszugehen. Somit sind die Flugaschen F2 und F3 auch als effektiver hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton einzustufen als die Flugasche F1.

Die Feststellung, dass sich ein niedriger Alkaligehalt und eine hohe Feinheit positiv auf die AKR-Wirksamkeit von Flugasche auswirken, ist auch in verschiedenen Literaturstellen zu finden [Beru 95, Thom 96, Four 01]. Wobei sich für den Alkaligehalt offensichtlich ein deutlicherer Zusammenhang findet als für die Feinheit [Hoop 04].

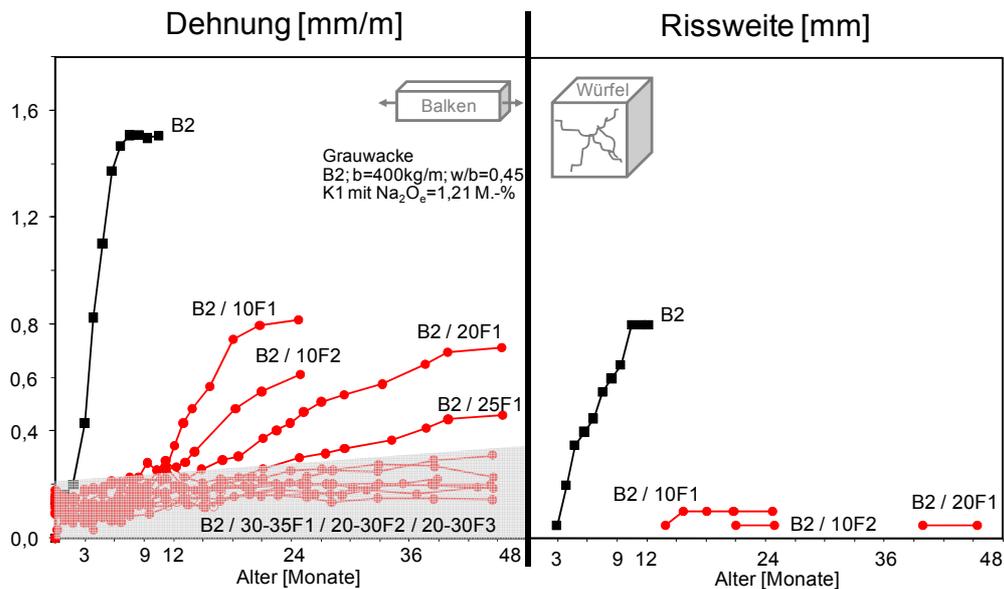
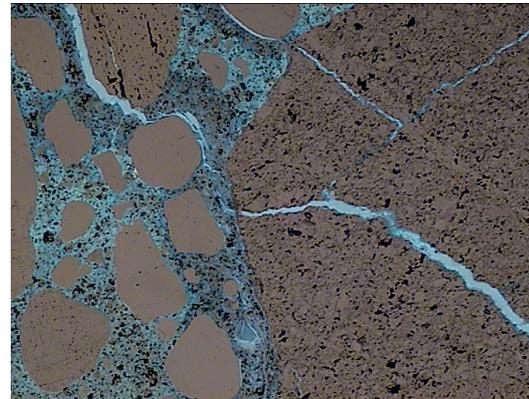
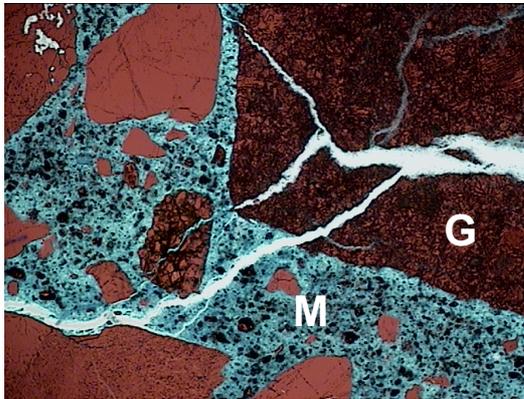


Abbildung 54: Vergleich der Flugaschen F1, F2 und F3; Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) von Normalbetonen; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer.

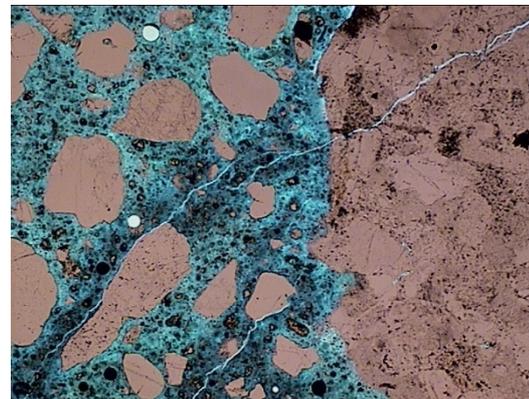
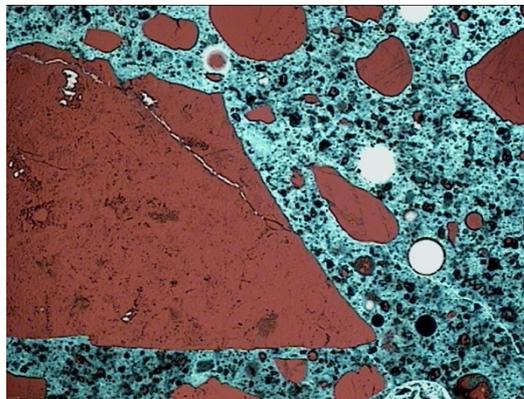
Die anhand des Dehnungsverhaltens und der Rissbildung in der 40°C-Nebelkammer vorgenommene Beurteilung, ob in den Betonen eine schädigende Alkalireaktion stattgefunden hat oder nicht, wird von Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen untermauert. Durch 20 % Flugasche F1 wird eine Schädigung der Betone B2 bzw. B1 mit Grauwacke bzw. Splitt Oberrhein gegenüber den Betonen mit reinem Portlandzement K1 zwar bereits deutlich vermindert, es findet aber immer noch eine durchgreifende Schädigung des Gefüges statt. Es bestätigt sich, dass der Austausch von 30 M.-% Portlandzement durch Flugasche F1 eine Schädigung dieser Betone gänzlich verhindert, siehe Abbildung 55.

Splitt Oberrhein, Beton B1
b = 500kg; w/b = 0,5

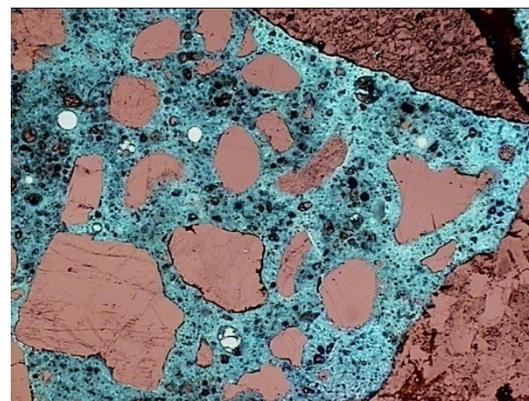
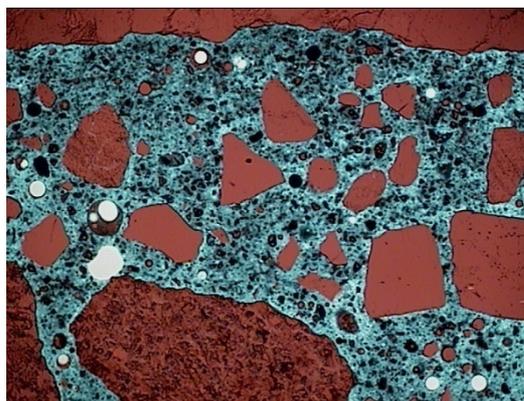
Grauwacke, Beton B2
b = 400kg; w/b = 0,45



100% Portlandzement K1; starke Schädigung des Betongefüges



20% Flugasche F1; feines Rissbild im Betongefüge



30% Flugasche F1; keine Schädigung erkennbar

M: Mörtelmatrix

G: reaktives Gesteinskorn

Abbildung 55: Mikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffen des Betongefüges nach 24 (20 und 30% F1) bzw. 12 (K1) Monaten Lagerung in der 40°C-Nebelkammer; Bildbreite = 2,5 mm, Kombination von UV- / Durchlicht

6.3.5 AKR in selbstverdichtenden Betonen

Der selbstverdichtende Beton SVB1 mit 100 % Portlandzement K1 wird durch die reaktiven Gesteinskörnungen Grauwacke bzw. Splitt Oberrhein nach rund 2 bis 3 monatiger Lagerung in der 40°C-Nebelkammer geschädigt. Dieser selbstverdichtende Beton stellt mit 600 kg Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,28 zwar einen in der Praxis sicherlich nicht auftretenden Extremfall dar, er ist aber dennoch dazu geeignet das theoretische Schädigungspotential dieser Betone zu veranschaulichen. Eine Besonderheit stellt das Schadensbild dieses Betons dar. Im Vergleich zu dem entsprechenden Normalbeton B2 ist mit 2,0 bzw. 2,3 mm/m gegenüber 1,1 bzw. 1,6 mm/m eine erhöhte Dehnung an den Balken der selbstverdichtenden Betone mit Splitt Oberrhein bzw. Grauwacke zu beobachten. Trotz dieser hohen Dehnungen bildet sich nur ein eng vernetztes Rissbild mit geringen Rissbreiten von 0,1 und 0,2 mm gegenüber 0,4 und 0,8 mm am Würfel mit 300 mm Kantenlänge aus, vgl. Abbildung 48, Abbildung 49 und Abbildung 56.

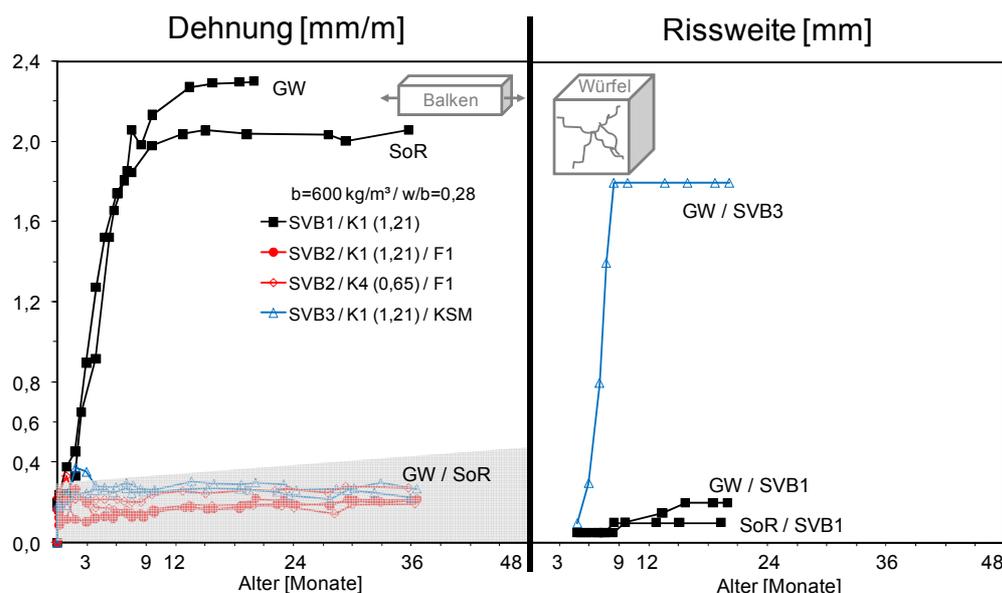
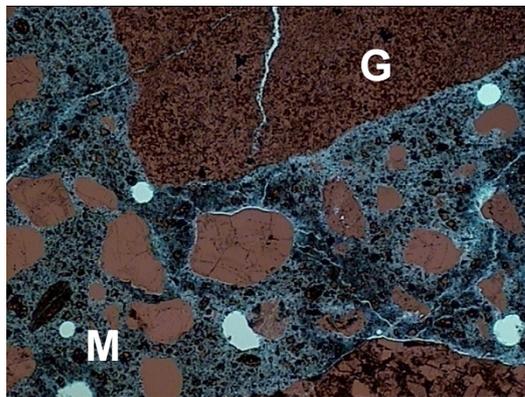


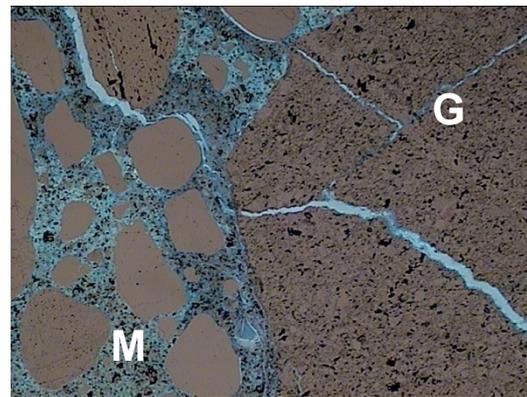
Abbildung 56: Vergleich der Bindemittelzusammensetzung; Dehnung (links) und Rissbildung (rechts) von selbstverdichtenden Betonen mit Grauwacke (GW) bzw. Splitt Oberrhein (SoR); 40°C-Nebelkammer.

Bei den Betonen mit Kalksteinmehl und Grauwacke als reaktive Gesteinskörnung (vgl. SVB3 / KSM mit B2 / 20KSM und B2 / 30KSM) hingegen ist an den Würfeln mit 300 mm Kantenlänge ein sehr grobes Rissbild mit Rissbreiten von 1,8 bzw. rd. 1,1 mm festzustellen, vgl. Abbildung 50 mit Abbildung 56. Im Gegensatz zur Grauwacke führt der Splitt Oberrhein im selbstverdichtenden Beton mit Kalksteinmehl (SVB3 / KSM) zu keiner Schädigung mehr. Hier kann man deutlich die Abhängigkeit der Schädigung von der Reaktivität der Gesteinskörnung erkennen: offensichtlich reicht eine Alkalimenge von 3,9 kg/m³ aus 320 kg/m³ Portlandzement K1 nicht mehr aus, um den Splitt Oberrhein zu schädigen.

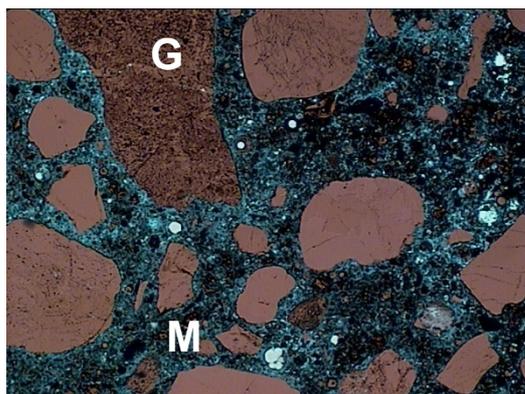
Wird der selbstverdichtende Beton mit Flugasche hergestellt (SVB2 / F1) so tritt sowohl bei der Verwendung von Grauwacke als auch von Splitt Oberrhein keine schädigende Alkalireaktion mehr auf. Hier spielen auch die Alkaligehalte der Portlandzemente keine Rolle mehr, vgl. SVB2 / F1 mit Portlandzement K1 bzw. K2, siehe Abbildung 56.



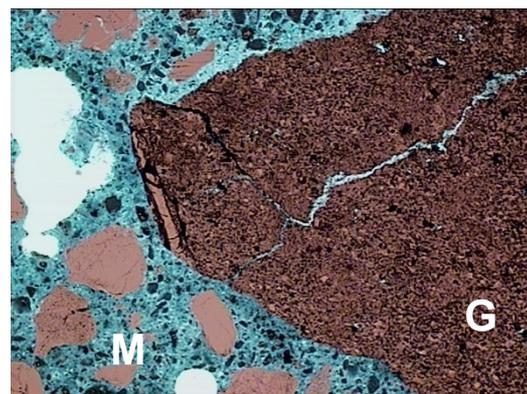
SVB1 100% K1



B2 100% K1



SVB2 / F1 / K1



SVB3 / KSM / K1

M: Mörtelmatrix

G: reaktives Gesteinskorn

Abbildung 57: Mikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffen des Betongefüges nach 18 (SVB) bzw. 12 (B2) Monaten Lagerung in der 40°C-Nebelkammer; Grauwacke; Bildbreite = 2,5 mm, Kombination von UV- / Durchlicht

Die Ergebnisse zur Dehnung und Rissbildung werden von Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen der Betone mit Grauwacke bestätigt, siehe Abbildung 57. Das Gefüge des Normalbetons B2 ist ebenso wie das des selbstverdichtenden Betons SVB1 mit 100 % Portlandzement K1 durchgreifend geschädigt. Im Gegensatz zum Normalbeton weist das Gefüge des selbstverdichtenden Betons allerdings ein feineres Rissbild auf. Dies konnte bereits an dem äußeren Schadensbild der zugehörigen Betonwürfel mit 300 mm Kantenlänge festgestellt werden. Das äußere Erscheinungsbild einer schädigenden Alkalireaktion hängt somit zumindest zu einem gewissen Grad von den relativen Steifigkeitsunterschieden innerhalb der Betonmatrix ab. Aufgrund der verhältnismäßig steifen Matrix des SVB1 mit 100 % Portlandzement werden die Spannungen lokal durch die Ausbildung fein verteilter

Haarrisse abgebaut. Dagegen führt eine Schädigung der Gesteinskörner im SVB3 mit Kalksteinmehl nicht immer zu einer direkten Schädigung der umgebenden Matrix. Offensichtlich werden hier die Spannungen vermehrt durch eine elastisch/plastische Verformung der relativ duktilen Matrix aufgenommen. Folglich werden bei Überschreiten der Bruchdehnung die Spannungen durch größere Risse abgebaut.

Im selbstverdichtenden Beton SVB2 mit Flugasche F1 ist keine Schädigung der Gesteinskörner mehr zu erkennen.

6.3.6 Zusammenfassung der Ergebnisse für natürliche Gesteinskörnungen

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus den Untersuchungen an Betonen mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen zusammengefasst:

- Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Betonen mit unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung bei Prüfung in der 40°C-Nebelkammer ist möglich. Aufgrund einer möglichen Verzögerung der Alkalireaktionen ist eine Lagerungsdauer von rd. 2, besser 3 Jahren nötig. Es sind die Balkendehnung und die Würfelrissbildung zu berücksichtigen. Aufgrund von Auslaugungseffekten und dem Einfluss der Prüfkörpergeometrie ist ein alleiniger Vergleich des Dehnungs- oder Rissbildungsverhaltens unterschiedlicher Rezepturen nicht sinnvoll.
- Auch bei relativ hohen Alkaligehalten aus Portlandzement kann mit einem ausreichend hohen Flugascheanteil eine schädigende Alkalireaktion im Beton dauerhaft verhindert werden. Die Verwendung von Flugasche führt auf keinen Fall zu einer verstärkten Schädigung der Betone.
- Flugaschen nach DIN EN 450-1 [DIN 450-1] haben allgemein eine hohe Wirksamkeit bezüglich der Vermeidung einer schädigenden AKR. Eine weitere Differenzierung der Leistungsfähigkeit von Flugaschen in Abhängigkeit von der Feinheit und des Alkaligehaltes ist möglich.
- Die Verwendung von Bindemitteln mit Flugasche nach DIN EN 450-1 [DIN 450-1] entsprechend bisheriger NA-Zemente ist sinnvoll. Auf der sicheren Seite liegend werden dafür eine Begrenzung des Portlandzementgehaltes auf 320 kg/m³ und ein Mindestflugaschegehalt von 30 M.-% bezogen auf das Gesamtbindemittel vorgeschlagen. Eine Begrenzung des Alkaliäquivalentes im Portlandzement auf 1,0 M.-% kann als weiterer Sicherheitsfaktor dienen. Eine weitere Differenzierung ist bei Berücksichtigung der reaktiven Gesteinskörnung, des Alkaliäquivalentes im Portlandzement und der Leistungsfähigkeit der Flugasche möglich.

6.4 Zusammenhang Porenlösung und Betonverhalten

Die Alkali-Kieselsäure Reaktion der Gesteinskörnungen wird maßgeblich durch die Alkalität der Porenlösung bestimmt. Die Alkalien sind zum einen Teil des quellfähigen Alkali-Silika Gels, zum anderen wird durch die Alkalien der pH-Wert in der Porenlösung erhöht, wodurch der chemische Angriff auf das reaktive Silikat der Gesteinskörnungen verstärkt wird. In Abbildung 58 bis Abbildung 61 werden die Ergebnisse der Betonversuche in der 40°C-Nebelkammer mit der OH⁻- bzw. der (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung im Alter von 28 und 90 Tagen in Beziehung gesetzt. Die leeren Markierungen zeigen die Ergebnisse ungeschädigter Betone mit ihrem Alter bei Auslagerung und die gefüllten Markierungen die Ergebnisse der Betone zum Zeitpunkt des Schädigungsbeginns, definiert als Dehnung oder Rissbildung.

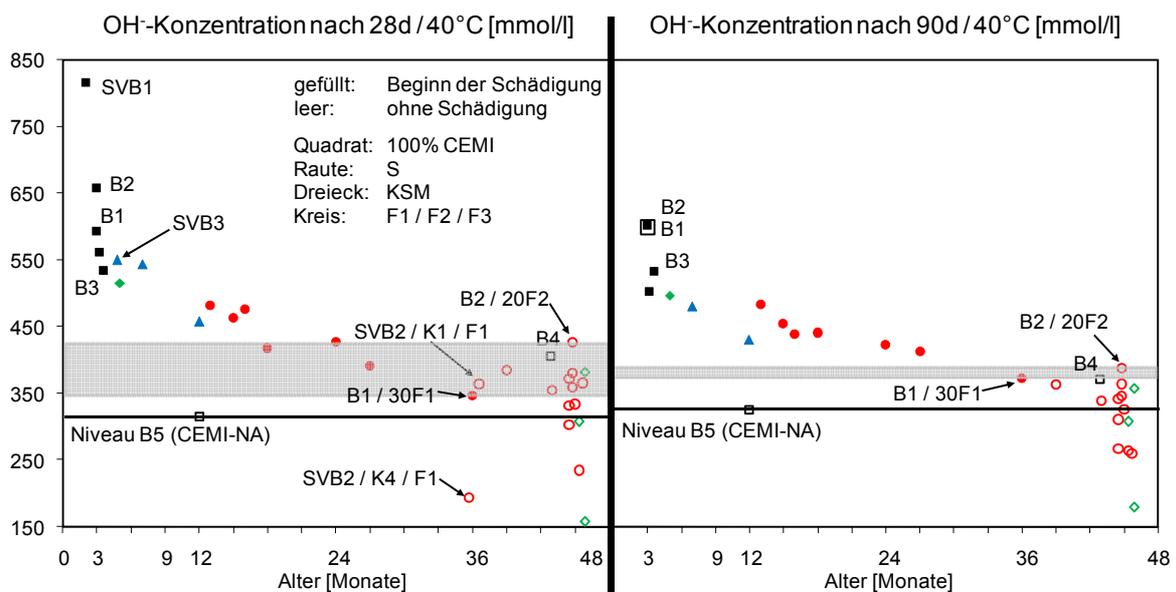
Prinzipiell sind bei der Korrelation des Betonverhaltens mit der OH⁻- bzw. der (Na⁺+K⁺)-Konzentration in der Porenlösung zu jeweils zwei Zeitpunkten, zumindest für eine Gesteinsart, immer gleiche Tendenzen zu erkennen. Diese Vorgehensweise wurde aber gewählt, um zu sehen, welcher Zeitpunkt das Verhalten der Betone am Besten widerspiegelt und ob sich gesteinspezifische Unterschiede ergeben. Aus den Ergebnissen für die hier untersuchten Gesteinskörnungen Grauwacke und Splitt bzw. Kies Oberrhein kann sehr gut der allgemeine Zusammenhang zwischen der Alkalität der Porenlösung und der Schädigung bzw. Schadensfreiheit von Betonen mit reaktiven Gesteinskörnungen abgeleitet werden.

6.4.1 Grauwacke

Für die hier verwendete Grauwacke kann gefolgert werden, dass, solange ein OH⁻-Niveau von rd. 350 bis 400 mmol/l bzw. ein (Na⁺+K⁺)-Niveau von rd. 450-500 mmol/l nicht überschritten wird, eine schädigende Alkalireaktion dauerhaft verhindert wird. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der in [Baet 07-2] für Grauwacken angegebenen Grenzhydroxilkonzentration von rd. 400 mmol/l überein, siehe Tabelle 14. Bei Flugasche im Bindemittel ist mit den Porenlösungsergebnissen nach 90d/40°C eine bessere Differenzierung der Betone zwischen geschädigt und ungeschädigt als nach 28d/40°C möglich. Offensichtlich stellen sich, aufgrund der verhältnismäßig langsamen puzzolanischen Reaktion der Flugasche, die für eine ebenfalls langsame, schädigende Alkalireaktion im Beton maßgebenden Porenlösungskonzentrationen erst in höherem Alter ein.

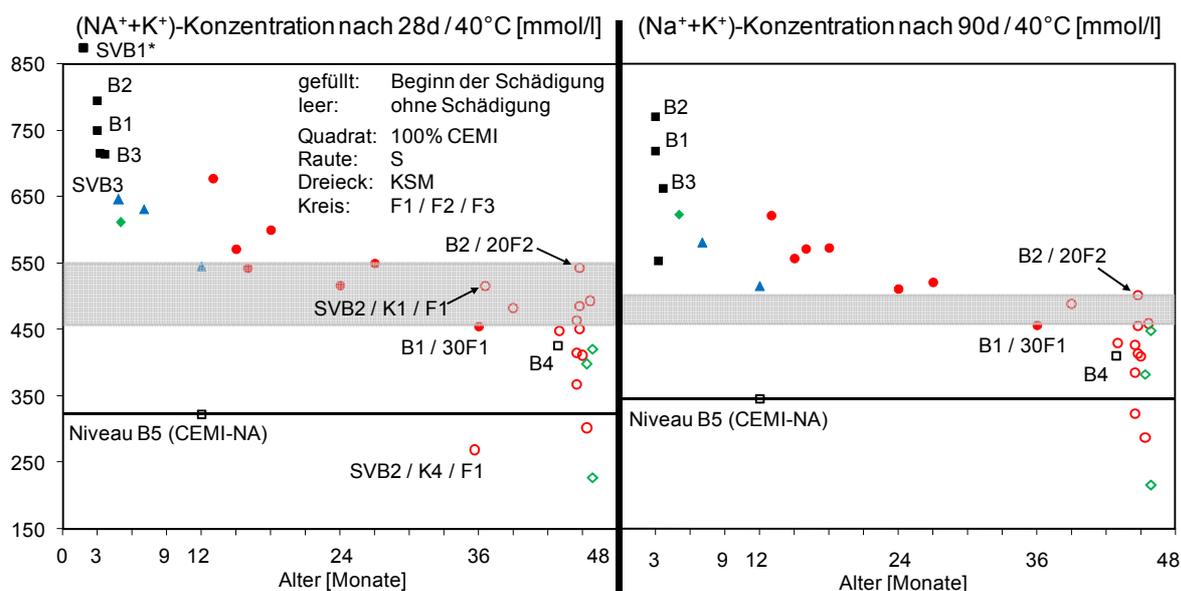
Es wird deutlich, dass der Anteil der Flugasche im Bindemittel in Abhängigkeit vom Gesamtbindemittelgehalt und den Eigenschaften der Flugasche zu wählen ist. Für die Wahl eines Grenzwertes stellt der Beton B1 / 30F1 einen Extremfall dar. Der Beton B1 / 30F1 überschreitet erst nach rd. 3 Jahren die in dieser Arbeit definierten Kriterien, wobei sich der Dehnungsverlauf auch im Weiteren nur knapp darüber bewegt, siehe Abbildung 51. Da aber Bindemittelgehalte von 500 kg/m³ als obere Grenze in Normalbetonen angesehen werden

können, ist davon auszugehen, dass bei der Wahl eines Mindestflugaschegehaltes von 30 % eine schädigende Alkalireaktion im Regelfall verhindert wird. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass der verwendete Portlandzement K1 mit 1,21 M.-% ein Alkaliäquivalent aufweist, das von in Deutschland produzierten Portlandzementen inzwischen nicht mehr erreicht wird. Darüberhinaus wird auch noch nicht eine unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Flugaschen mit einbezogen. So reichen im Beton B2 ($b = 400 \text{ kg/m}^3$) bereits 20 % der Flugaschen F2 und F3, um eine Schädigung zu vermeiden, wohingegen von der Flugasche F1 30 % benötigt werden. Dass der Beton B2 mit 20 % Flugasche F2 nicht geschädigt ist, obwohl im Alter von 28 Tagen noch eine OH^- -Konzentration von rd. 430 mmol/l gemessen wurde, ist offensichtlich auf die schnelle Absenkung der Alkalität durch eine verstärkte Reaktivität dieser feinen Flugasche zurückzuführen (vgl. Abbildung 58 links und rechts). Das heißt, dass bei Betrachtung der Feinheit und des Alkaligehaltes der Flugaschen eine weitere Differenzierung im Sinne einer Verminderung der Mindestflugaschemengen möglich ist.



Die Porenlösungszusammensetzung wurde für die selbstverdichtenden Betone nach 90d/40°C nicht ermittelt.

Abbildung 58: Korrelation der OH^- -Konzentration in der Porenlösung nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Grauwacke in der 40°C-Nebelkammer.



SVB1* ($\text{Na}^+\text{+K}^+$)-Konzentration nach 28d / 40°C beträgt 1490 mmol/l; Schädigung des Betons nach 2 Monaten.

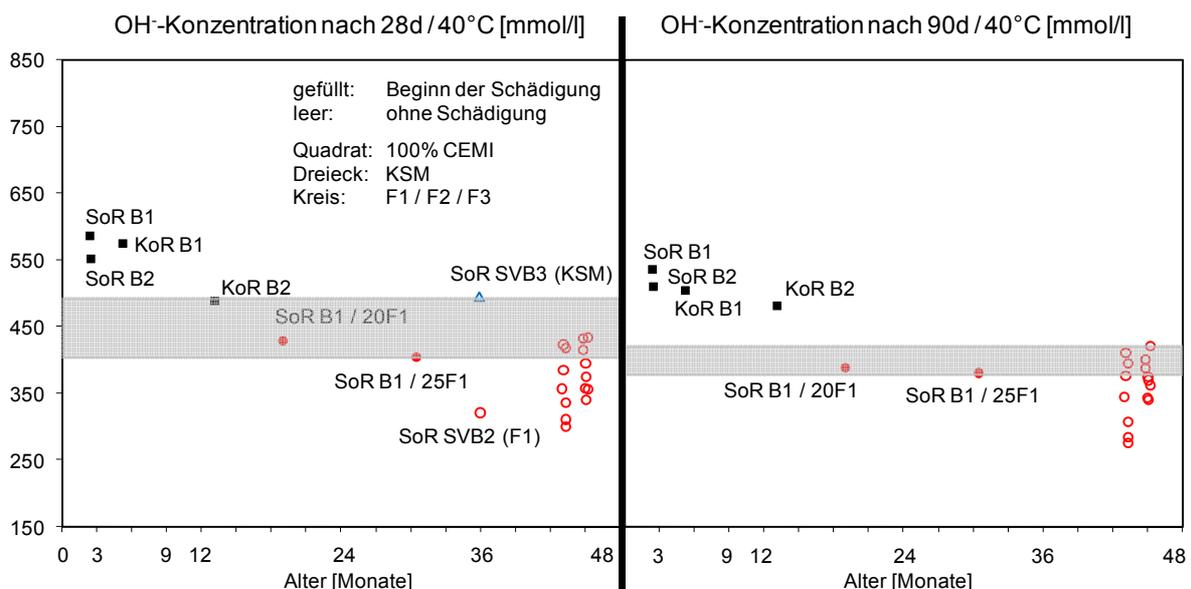
Die Porenlösungszusammensetzung wurde für die selbstverdichtenden Betone nach 90d/40°C nicht ermittelt.

Abbildung 59: Korrelation der ($\text{Na}^+\text{+K}^+$)-Konzentration in der Porenlösung nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Grauwacke in der 40°C-Nebelkammer.

Wie das Beispiel des selbstverdichtenden Betons SVB1 mit reinem Portlandzement K1 belegt, bewirkt ein niedriger w/z-Wert, hier 0,28, gegenüber den Normalbetonen eine stark erhöhte OH^- - und ($\text{Na}^+\text{+K}^+$)-Konzentration in der Porenlösung, siehe Abbildung 58 und Abbildung 59. Dies ist auf eine Aufkonzentration der Alkalien in der geringen Menge an freiem Porenwasser zurückzuführen. Somit ist allgemein davon auszugehen, dass in Betonen mit niedrigen w/z-Werten ein besonders starker Angriff auf reaktive Gesteinskörnungen stattfindet. Bereits in [Wiek 00] wird gewarnt, dass dadurch auch bisher als alkaliumempfindlich geltende Gesteinskörnungen eine schädigende Alkalireaktion im Beton bewirken können. Allerdings kann diesem Effekt durch die Verwendung von Flugasche bei Einhaltung eines konstanten w/b-Wertes entgegengewirkt werden. Die Flugasche F1 führt im Vergleich zum Kalksteinmehl zu einer weitergehenden Absenkung der OH^- - und ($\text{Na}^+\text{+K}^+$)-Konzentration im selbstverdichtenden Beton (vgl. SVB3 mit Kalksteinmehl und SVB2 mit Flugasche F1 in Abbildung 59). Dies erklärt auch die Schadensfreiheit des Betons mit Flugasche. Durch die Verwendung des Portlandzementes K4 mit niedrigem Alkaligehalt wird die Alkalität im Beton nochmals abgesenkt. Es ist also davon auszugehen, dass in selbstverdichtenden Betonen bei Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450-1 [DIN 450-1], aufgrund des hohen Gehaltes an Betonzusatzstoff, unabhängig vom Alkaligehalt des verwendeten Zementes, eine schädigende Alkalireaktion vermieden werden kann.

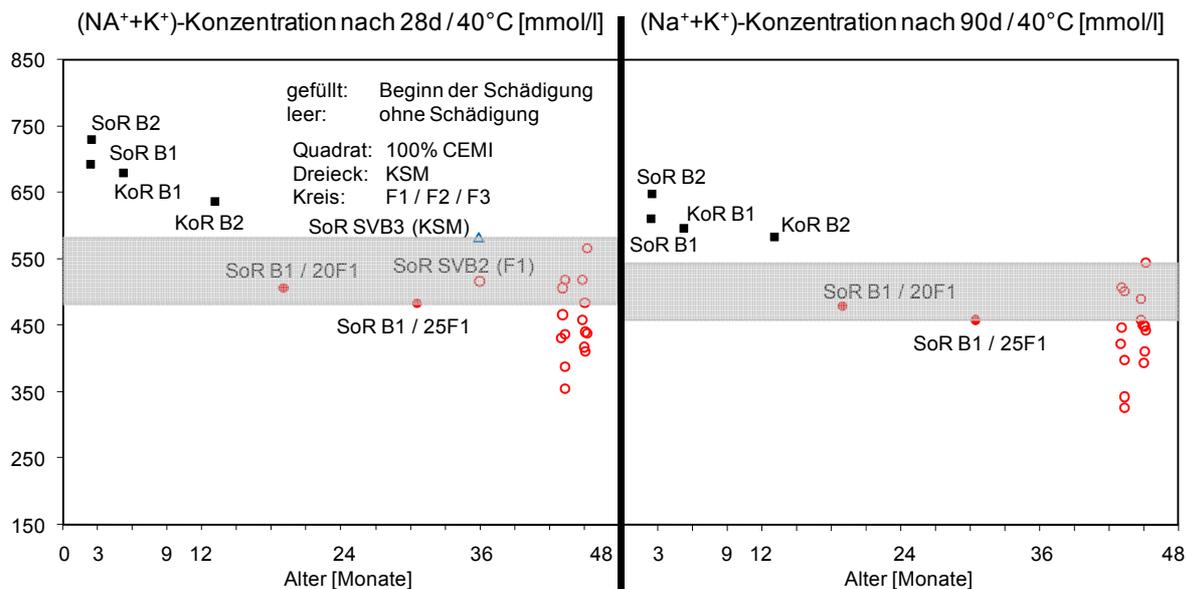
6.4.2 Splitt/Kies Oberrhein

Für das hier verwendete Material aus dem Oberrhein kann gefolgert werden, dass, solange ein OH-Niveau von rd. 400 bis 450 mmol/l bzw. ein $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Niveau von rd. 450-550 mmol/l nicht überschritten wird, eine schädigende Alkalireaktion dauerhaft verhindert wird. Dieses Ergebnis stimmt gut mit der in [Baet 07-2] für Splitt Oberrhein angegebenen Grenzhydroxilkonzentration von rd. 400-500 mmol/l überein, siehe Tabelle 14. Bei Flugasche im Bindemittel ist sowohl mit den Porenlösungsergebnissen nach 28d/40°C als auch nach 90d/40°C nur eine relativ unbefriedigende Differenzierung der Betone zwischen geschädigt und ungeschädigt möglich. Im Gegensatz zur Grauwacke werden durch das Material aus dem Oberrhein größere Mengen an Alkalien verbraucht, siehe auch Punkt 6.1.1. Stehen im Beton nicht genügend große Mengen an Alkalien zur Verfügung, so kann dies dazu führen, dass trotz einer relativ hohen Anfangskonzentration die Alkalireaktion zum Erliegen kommt bevor eine Schädigung des Betons sichtbar wird. Dass das Material aus dem Oberrhein einen weit höheren Alkaliumsatz benötigt, bevor eine Schädigung des Betons auftritt, kann mit der gegenüber der Grauwacke erhöhten Porosität der alkalireaktiven Gesteinsarten im Material aus dem Oberrhein begründet werden, vgl. 3 bis 10 Vol.-% gegenüber rd. 1 Vol.-%, siehe Anhang 1, Punkt 2.2. Der Porenraum in den Gesteinskörnern dient dabei als Puffervolumen für das sich bildende AKR-Gel [Hüng 08]. Offensichtlich muss, stärker als bei Grauwacke, neben der Alkalikonzentration auch die für eine Alkalireaktion zur Verfügung stehende Alkalimenge bei der Beurteilung eines Betons mit Material aus dem Oberrhein berücksichtigt werden.



Porenlösungszusammensetzung für selbstverdichtende Betone für 90d/40°C nicht ermittelt.

Abbildung 60: Korrelation der OH-Konzentration in der Porenlösung nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Splitt oder Kies Oberrhein in der 40°C-Nebelkammer.



Porenlösungszusammensetzung für selbstverdichtende Betone für 90d/40°C nicht ermittelt.

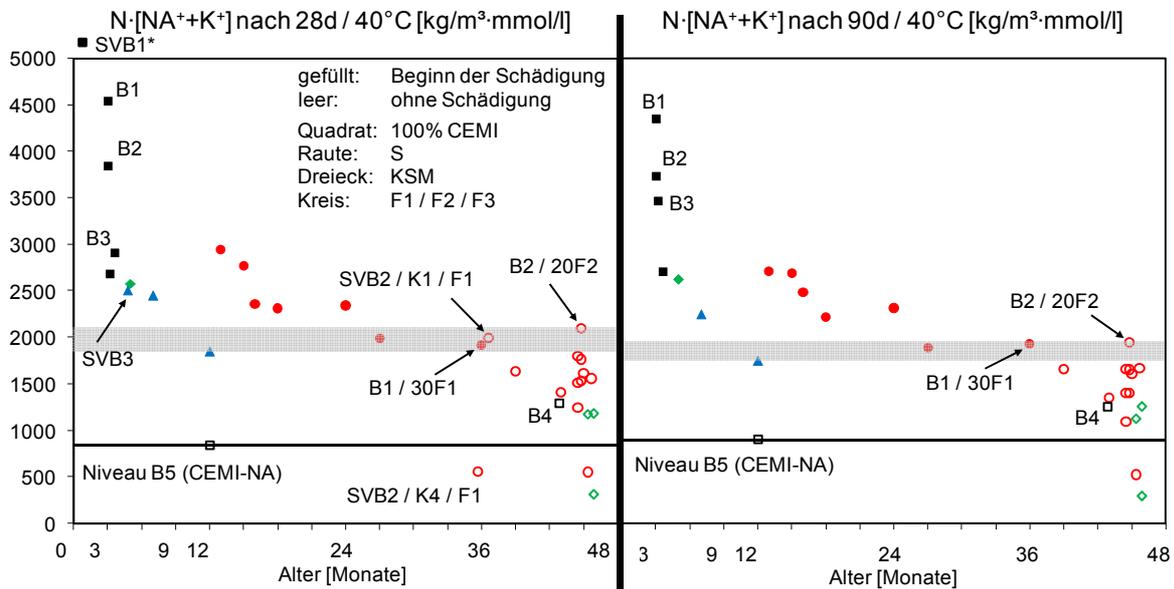
Abbildung 61: Korrelation der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Splitt oder Kies Oberrhein in der 40°C-Nebelkammer.

6.4.3 Gemeinsame Berücksichtigung der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration und der vorhandenen Gesamtalkalimenge aus Portlandzement

Die Korrelation mit der OH^- - und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration in der Porenlösung führt zu einer recht unbefriedigenden Trennschärfe zwischen geschädigten und ungeschädigten Betonen. Besser als die Angabe einer aus Konzentrationen abgeleiteten Grenzalkalität ist die Angabe der für die jeweilige Gesteinskörnung gültigen Grenzalkalitätsbedingung im Beton aus der Kombination Alkalimenge N [kg/m^3] aus Portlandzement und $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration [mmol/l] in der Porenlösung, siehe Abbildung 62 und Abbildung 63. Hier wird dem Umstand Rechnung getragen, dass für eine schädigende Alkalireaktion im Beton neben dem durch den pH-Wert gesteuerten chemischen Angriff auch die, für die Bildung eines quellfähigen Alkali-Silika Gels zur Verfügung stehende, Menge an Alkalien maßgebend ist. Damit kann auch besser auf die Eigenheiten einer Gesteinskörnung eingegangen werden. So steht bei der Grauwacke die Alkalität der Porenlösung gegenüber der Gesamtalkalimenge im Vordergrund, wogegen für das Material aus dem Oberrhein mit seinem großen Alkaliverbrauch die Gesamtmenge an Alkalien wichtiger wird.

Durch die Korrelation mit der Gesamtalkalitätsbedingung wird auch die gegenüber dem Kalksteinmehl verzögernde Wirkung der Flugasche besser deutlich, siehe Abbildung 62. In den Betonen mit Flugasche tritt auch bei deutlich schärferen Alkalitätsbedingungen eine Schädigung erst erheblich später auf. Dies ist auf jeden Fall auf eine Verlangsamung der Transportprozesse in den Betonen mit Flugasche zurückzuführen. Dass sich zusätzlich auch

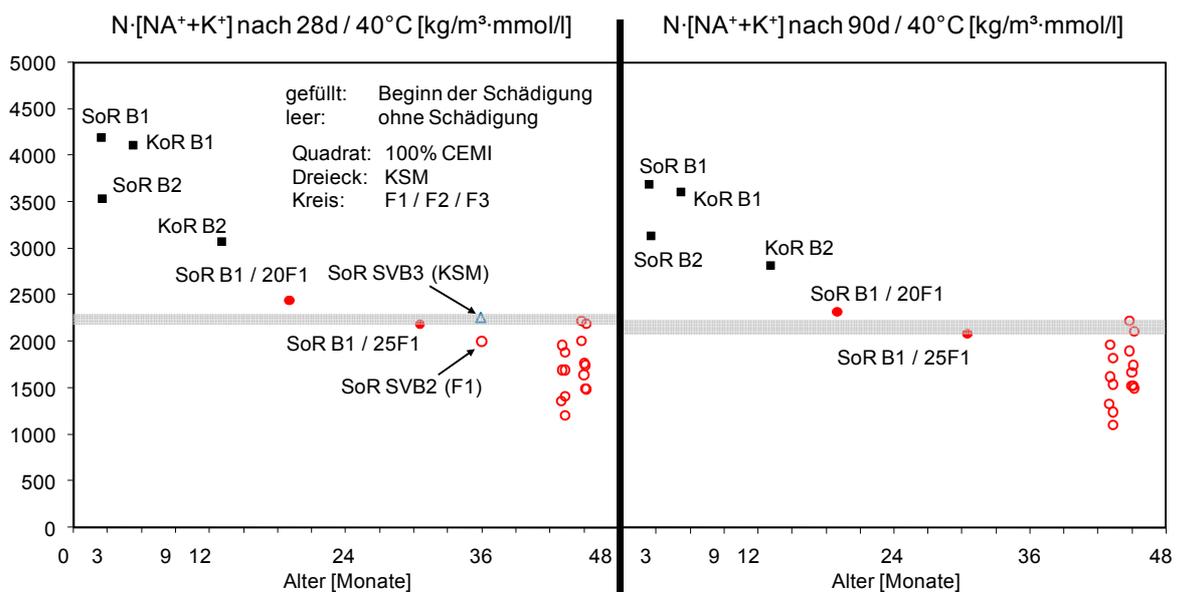
der, unter Punkt 6.1 beschriebene, Eintrag von Aluminium in die Porenlösung und der daraus zu erwartende Einbau des aus der Alkalireaktion der Gesteinskörnung freigesetzten Siliziums in nicht quellfähige C-A-S-H-Phasen verzögernd auswirkt, kann zumindest vermutet werden.



SVB1* N·[Na⁺+K⁺] nach 28d / 40°C beträgt 10817 kg/m³·mmol/l; Schädigung des Betons nach 2 Monaten.

Die Porenlösungszusammensetzung wurde für die selbstverdichtenden Betone nach 90d/40°C nicht ermittelt.

Abbildung 62: Korrelation der Alkalitätsbedingung in den Betonen nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Grauwacke in der 40°C-Nebelkammer.



Die Porenlösungszusammensetzung wurde für die selbstverdichtenden Betone nach 90d/40°C nicht ermittelt.

Abbildung 63: Korrelation der Alkalitätsbedingung in den Betonen nach 28d/40°C (links) bzw. 90d/40°C (rechts) mit dem Schädigungsbeginn der Betone mit Splitt oder Kies Oberrhein in der 40°C-Nebelkammer.

6.4.4 Zusammenfassung der Korrelation zwischen Porenlösung und Betonschaden

Nachfolgend sind die wichtigsten Erkenntnisse aus der Korrelation der Porenlösungszusammensetzung mit dem Verhalten der Betone mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen zusammengefasst:

- Bei gleichem Bindemittelgehalt führt eine Verringerung des w/z-Wertes zu einem verstärkten Angriff auf die Gesteinskörnung. Diesem Effekt kann durch den Austausch von Portlandzement durch Flugasche entgegengewirkt werden.
- Gegenüber der Grauwacke benötigt das Material aus dem Oberrhein einen weit höheren Alkaliumsatz bevor eine Schädigung des Betons auftritt. Dies kann mit der gegenüber der Grauwacke erhöhten Porosität der alkalireaktiven Gesteinsarten im Material aus dem Oberrhein begründet werden. Der Porenraum in den Gesteinskörnern dient dabei offensichtlich als Puffervolumen für das sich bildende AKR-Gel.
- Bei dem Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Betonrezepturen ist neben der Grenzalkalität auch der unterschiedliche Alkaliumsatz der jeweiligen Gesteinsart zu berücksichtigen. So führt die kombinierte Betrachtung der $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ -Konzentration und des Alkaligehalts aus Portlandzement zu einer besseren Trennschärfe zwischen geschädigten und ungeschädigten Betonen als die Angabe der Alkalität alleine.
- Bei ähnlichen Alkalitätsbedingungen führen eine Verlangsamung der Transportprozesse und evtl. auch der Eintrag von Aluminium im Vergleich zu anderen Bindemittelzusammensetzungen zu einer besseren Leistungsfähigkeit von Betonen mit Flugasche.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Betonversuche mit Duranglas als künstliche, schnell reagierende Gesteinskörnung und mit Grauwacke und Material aus dem Oberrhein als natürliche, langsam reagierende Gesteinskörnungen durchgeführt. Die Variation des Bindemittels erfolgte über den massebezogenen Austausch von Portlandzementen mit niedrigem bis hohem Alkaligehalt durch drei Flugaschen, die sich hinsichtlich der Feinheit und des Alkaligehaltes unterscheiden. Zum Vergleich dienten Hüttensand und Kalksteinmehl. Begleitend zu den Betonversuchen erfolgte die systematische Untersuchung der Porenlösungszusammensetzung der Betone und von ausgewählten Zementsteinen zur Unterscheidung der Wirksamkeit der Betonzusatzstoffe. Dies ermöglichte die Korrelation des Betonverhaltens mit den parallel dazu in der Porenlösung ablaufenden chemischen Prozessen.

Aus den Ergebnissen für die Betone mit den hier untersuchten Flugaschen und Gesteinskörnungen kann sehr gut das allgemeine Verhalten von Betonen mit Flugasche im Bindemittel und mit langsam reagierenden, dichten Gesteinskörnungen abgeleitet werden.

- Flugaschen nach DIN EN 450-1 [DIN 450-1] bewirken keinen AKR-relevanten Eintrag von Alkalien in den Beton. Die hohe AKR-Wirksamkeit von Flugaschen beruht vor allem darauf, dass in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion Alkalien eingebaut werden. Dies führt gegenüber einer einfachen Verdünnung zu einer weitergehenden Absenkung der Alkalität in der Porenlösung des Betons. Der Eintrag von Aluminium in die Porenlösung könnte sich durch die Bildung nicht-quellfähiger Alumosilikathydrate ebenfalls mindernd auf eine schädigende AKR auswirken. Zusätzlich zur Senkung der Alkalität erfolgt eine Verdichtung des Betongefüges und somit eine Verlangsamung dauerhaftigkeitsrelevanter Transportvorgänge.
- Mit der Prüfung in der 40°C-Nebelkammer ist eine differenzierte Abstufung hinsichtlich Beginn und Verlauf einer Schädigung von Betonen, die mit alkaliempfindlichen, langsam reagierenden Gesteinskörnungen und den Betonzusatzstoffen Kalksteinmehl, Hüttensand und Flugasche hergestellt werden, möglich. Die unterschiedliche Auswirkung dieser Betonzusatzstoffe auf die Dehnungsentwicklung und Rissbildung im Beton erschwert einen direkten Vergleich der Leistungsfähigkeit. Somit können keine allgemeingültigen Bewertungskriterien, wie Enddehnung, Dehnungszunahme oder Rissbreiten, aufgestellt werden, sondern es muss eine Beurteilung unter Berücksichtigung der für jeden Betonzusatzstoff charakteristischen Schadensbilder erfolgen.
- Die Prüfung bei 40°C führt zu einer Beschleunigung der Reaktionen sowohl im Bindemittel als auch in der Gesteinskörnung. Untersuchungen am Duranglas belegen

aber, dass bei einer Prüfung bei 40°C die gleichen Ergebnisse erzielt werden wie bei einer Prüfung bei 20°C. Bei längeren Lagerungszeiten in der 40°C-Nebelkammer besteht allerdings die Gefahr, insbesondere bei Betonen mit porösem Gefüge, dass die Ergebnisse aufgrund einer Auslaugung der Probekörper verfälscht werden. Die Verwendung großer Probekörper (z.B. Würfel mit 300 mm Kantenlänge) mindert solche Effekte.

- Die Verwendung von Bindemitteln mit Flugasche nach DIN EN 450-1 [DIN 450-1] entsprechend bisheriger NA-Zemente ist sinnvoll. Ein für Normalbetone konservativer Ansatz zur Vermeidung einer schädigenden AKR ist eine Begrenzung des Portlandzementgehaltes auf 320 kg/m³ und ein Mindestflugaschegehalt von 30 M.-% bezogen auf das Gesamtbindemittel. Eine Begrenzung des Alkaliäquivalentes im Portlandzement auf 1,0 M.-% kann als weiterer Sicherheitsfaktor dienen. Dies erfordert keine über die DIN EN 450 hinausgehende Spezifizierung der stofflichen Eigenschaften der Flugasche.
- Eine weitergehende Berücksichtigung der erhöhten Leistungsfähigkeit von Flugaschen mit niedrigem Alkaligehalt oder höherer Feinheit oder eines geringeren Schadenspotentials von Zementen mit moderatem Alkaligehalt ist denkbar.
- Über die Kenntnis einer für die vorgesehene Gesteinskörnung spezifischen Grenzalkalitätsbedingung kann eine Rezeptur entwickelt werden, die eine schädigende Alkalireaktion im Beton sicher vermeidet. Dabei ist neben der Grenzalkalität auch der unterschiedliche Alkaliumsatz der jeweiligen Gesteinsart zu berücksichtigen. So führt die kombinierte Betrachtung der (Na⁺+K⁺)-Konzentration und des Alkaligehalts aus Portlandzement zu einer besseren Trennschärfe zwischen geschädigten und ungeschädigten Betonen als die Angabe der (Na⁺+K⁺)-Konzentration alleine. Damit kann über die Porenlösungszusammensetzung die Leistungsfähigkeit der Flugasche bzw. des Bindemittelgemisches ermittelt und über den Alkaligehalt aus dem verwendeten Portlandzement das theoretische Schadenspotential im Beton definiert werden.
- Selbstverdichtende Betone stellen wegen ihrer betontechnologischen Randbedingungen - große Bindemittelmengen und niedriger w/b-Wert - hinsichtlich einer schädigenden Alkalireaktion einen vermeintlich ungünstigen Sonderfall dar. Durch Verwendung von Flugasche ist es allerdings möglich, selbstverdichtende Betone mit reaktiven Gesteinskörnungen herzustellen, ohne dass eine schädigende Alkalireaktion im Beton auftritt.

8 Anerkennung

Die vorliegende Arbeit ist aus den Ergebnissen folgender Forschungsvorhaben erstellt worden:

Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: „Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, AiF Nr. 13605, VGB Nr. 245, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.001/02, 2006

Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: Einsatz von Steinkohlenflugasche (SFA) als Betonzusatzstoff in selbstverdichtenden Betonen (SVB) mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, VGB-Nr. 249, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.009/03, 2008

Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: Bewertung Performance Prüfverfahren auf AKR bei Einsatz von SFA in Beton, DBV Nr. 263, DBV/VDZ, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.020/05, 2008

Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K., Dressler, A.: Einfluss der Diffusion auf eine schädigende AKR in Beton mit spät und langsam reagierenden alkalireaktiven Gesteinskörnungen, DFG, HE 3217/5-2, laufend

Labortechnische Entwicklung und Durchführung:

A. Lang¹⁾

Wissenschaftliche Anleitung und Diskussion:

Dr. R.E. Beddoe¹⁾; Physik, Chemie und Mechanismen

Dr. G. Grundmann²⁾; optische Mikroskopie für Petrographie und Gefügeuntersuchung

Prof. Dr. D. Heinz¹⁾; Projektleitung

Dr. H. Hilbig¹⁾; Chemie und NMR-Untersuchungen incl. Auswertung

Dr. L. Urbonas¹⁾; Projektleitung

1) cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung, TU München

2) Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, TU München

LITERATUR

- [Baet 07-1] Baetzner, S.; Böhm, M.: Vermeidung einer schädigenden AKR durch den Einsatz von Steinkohlenflugasche, Abschlussbericht des Forschungsinstituts der Zementindustrie, VGB-Projekt 272, 2007
- [Baet 07-2] Baetzner, S.; Böhm, M.: Einfluss der Porenlösungszusammensetzung auf die Schädigung von Beton mit verschiedenen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen infolge einer AKR, Abschlussbericht des Forschungsinstituts der Zementindustrie, AiF-Vorhaben-Nr. 14242 N, 2007
- [Bakk 80] Bakker, R.: Über die Ursache des erhöhten Widerstands von Beton mit Hochofenzement gegen die AKR und den Sulfatangriff. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1980
- [Bern 06] Berninger, A. M.: Mikrostrukturelle Eigenschaften von Quarz als Bestandteil spät reagierender, alkaliempfindlicher Zuschläge, Dissertation, Bauhaus Universität Weimar, 2006
- [Beru 95] Berube, M.A.; Carles-Gibergues, A.; et al.: Influence of particle size distribution on the effectiveness of type-F fly ash in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity, Proc. of the sixth CANMET/ACI Int. Conf. on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Milwaukee, 1995, pp. 177-192
- [Beru 02] Berube, M. A.; Duchnese, J.; et al.: Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, Cement and Concrete Research 32 (2002) 1215-1227
- [Bone 94] Bonen, D.; Diamond, S.: Interpretation of compositional patterns found by quantitative energy dispersive analysis for cement paste constituents. J. Am. Ceram. Soc., 77 [7], 1994, pp. 1875-1882
- [Bram 04] Brameshuber, W.; Pierkes, R.: Alkalibindung in flugaschehaltigen Bindemitteln – Langzeitversuche; Forschungsbericht F 902; Förderer: VGB Powertech e.V., 2004
- [Buch 05] Buchwald, A.; Hilbig, H.; Kaps, Ch.: Alkali-aktiviert metakaolin-slag blends – performance and structure in dependence of their composition, J. Mat. Sci., DOI: 10.1007/S10853-006-0525-6
- [Chat 88] Chatterji, S.; Jensen, A. D.; Thaulow, N.; Christensen, P.: Studies of alkali-silica reaction. Part 6. Practical implications of a proposed reaction mechanism, Cement and Concrete Research 18 (1988) 363-366

- [Cyr 02] Cyr, M.; Carles-Gibergues, A.: Interpretation of expansion curves of concrete subjected to accelerated alkali–aggregate reaction (AAR) tests, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 691–700
- [Dalz 86] Dalziel, J. A.; Gutteridge, W. A.: The Influence of Pulverized Fuel Ash upon the Hydration Characteristics and Certain Physical Properties of a Portland Cement Paste; Cement and Concrete Association, C&CA Technical Report Nr.560, 1986
- [Dent 79] Dent Glasser, L. S.: Osmotic pressure and the swelling of gels, *Cement and Concrete Research* 9 (1979) 515 - 517
- [Diam 81] Diamond, S.: Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement – fly ash pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, 1981, pp. 383 - 394
- [Diam 89] Diamond, S.: ASR - Another Look at Mechanisms, 8th Int. Conf. on AAR in Concrete, Kyoto, Japan, 1989, pp. 83-94
- [Duch 94] Duchnese, J.; Berube, M. A.: Evaluation of the Validity of the Pore Solution Expression Method from Hardened Cement Pastes and Mortars, *Cement and Concrete Research*, Vol. 24 (3), 1994, pp. 456-462
- [Four 01] Fournier, B.: The role of fly ash controlling alkali-silica reaction in concrete, Proc. of the seventh CANMET/ACI Int. Conf. on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Madras, India, 2001
- [Four 04] Fournier, B.; Nkinamubanzi, P.-C.; Chévrier, R.: Comparative field and laboratory investigations on the use of supplementary cementing materials to control alkali-silica reaction in concrete. 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Peking, 2004, International Academic Publishers: 528-537
- [Fraa 90] Fraay, A. L. A.: Fly Ash a Pozzolan in Concrete, Delft, Technische Universiteit, Dissertation, 1990
- [Frey 03] Freyburg, E.; Berninger, A.-M.: Mikroprozesse beim Ablauf der Alkali-Kieselsäure-Reaktion, 15. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, Tagungsbericht Band 2, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2003, S. 2-0719 ff
- [Härd 95] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung der Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1995, Heft 448

- [Hein 06] Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: „Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, AiF Nr. 13605, VGB Nr. 245, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.001/02, 2006
- [Hein 08a] Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: Einsatz von Steinkohlenflugasche (SFA) als Beton-zusatzstoff in selbstverdichtenden Betonen (SVB) mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, VGB-Nr. 249, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.009/03, 2008
- [Hein 08b] Heinz, D.; Urbonas, L.; Schmidt, K.: Bewertung Performance Prüfverfahren auf AKR bei Einsatz von SFA in Beton, DBV Nr. 263, DBV/VDZ, Schlussbericht cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München F10.020/05, 2008
- [Hein 08c] Heinz, D.; Schmidt, K.: Lösungsansätze zur Vermeidung von AKR-Schäden, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Straße und Autobahn, 05/2008, 59. Jhg., S. 282-289
- [Helm 87] Helmuth, R.: Fly Ash in Cement and Concrete, Skokie, Illinois, Portland Cement Association, 1987
- [Herr 92] Herr, R.; Wieker, W.: The hydroxide-sulphate ion equilibrium in cement paste pore solutions and its significance to the theory of AAR in concrete, 9th Int. Conf. on AAR in Concrete, 1992, pp. 440-450
- [Hilb 03] Hilbig, H.; Köhler, F.H.; Schießl, P.: Hydratation von Hochleistungsfeinkornbetonen, NMR-spektroskopische Untersuchungen, 15. Internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsband, 2003, Weimar, 1-0489 – 1-0496
- [Hobb 88] Hobbs, D. W.: In: Taylor, T (editor): Alkali-silica reaction in concrete, London, 1988
- [Hobb 94] Hobbs, D. W.: The effectiveness of PFA in reducing the risk of cracking due to ASR in concretes containing cristobalite, Mag. of Conc. Res., 1994, 46, No. 168, Sept., pp. 167-175
- [Holl 07] Holleman, A. F.; Wiberg, N.: Lehrbuch der anorganischen Chemie, 102. Auflage, 2007, Walter de Gruyter Verlag, Berlin, S. 949-982
- [Hong 99] Hong, S.-Y.; Glasser, F. P.: Alkali binding in cement pastes. Part I. The C-S-H Phase, Cement and Concrete Research, 29, 1999, pp. 1893 – 1903
- [Hong 02] Hong, S.-Y.; Glasser, F. P.: Alkali sorption by C-S-H and C-A-S-H gels. Part II. Role of alumina, Cement and Concrete Research, 32, 2002, pp. 1101-1111

- [Hoop 04] Hooper, R. L.; Matthews, J. D.; et al.: The Introduction of BS EN 450 Fly Ash and Mitigating the Risk of ASR in the UK. 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Peking, 2004, International Academic Publishers: 544-553
- [Hou 04] Hou, X.; Struble, L. J.; Kirkpatrick, J.: Formation of ASR gel and the roles of C-S-H and portlandite, *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, 2004, pp. 1683-1696
- [Hou 05] Hou, X.; Kirkpatrick, J.; Struble, L. J.; Monteiro, P.J.M.: Structural Investigations of Alkali Silicate Gels, *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 [4], 2005, 943-949
- [Hunk 06] Hunkeler, F.; Griesser, A.: Schäden durch AAR an Betonbauten in der Schweiz, TFG, Wildeg, AGB 2001/471, Juli 2006
- [Hüng 07] Hünter, K.-J.: The contribution of quartz and the role of aluminum for understanding the AAR with Greywacke, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, 2007, pp. 1193-1205
- [Hüng 08] Hünter, K.-J.; Bachmann, R.; et al.: An Accelerated Chemical Test Method for ASR Carried out Directly at Aggregate Grains. In: Broekmans, MATM, and Wigum, BJ (editors): *Proc. of the 13th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete*, 2008, Trondheim, Norway
- [Hütt 00] Hüttl, R.: Der Wirkungsmechanismus von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff, Dissertation, Berlin, 2000
- [Jens 93] Jensen, V.: Alkali Aggregate Reaction in Northern Norway. Doctor Technicae Thesis, NTH Trondheim, Norway, 1993
- [Keil 71] Keil, F.: Zement, Herstellung und Eigenschaften, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971
- [Labr 91] Labrid, J.: Modelling of high pH sandstone dissolution, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 30, 1991, pp. 67-74.
- [Lenz 81] Lenzner, D.: Untersuchungen zur Alkali-Zuschlag Reaktion mit Opalsandstein aus Schleswig-Holstein, RWTH Aachen, Dissertation 1981
- [Loch 00] Locher, F. W.: Zement: Grundlagen der Herstellung und Verwendung, Kapitel 8.5, Festigkeit, Verlag Bau und Technik, 2000, ISBN 3-7640-0400-2
- [Long 73] Longuet, P.; Burglen, L.; Zelwer, A.: The Liquid Phase of Hydrated Cement, (franz.), *Revue Mater. Const.* 676, 1973, pp. 35-41

- [Lutz 04] Lutze, D.; vom Berg, W. (Hrsg.): Handbuch Flugasche im Beton, Verlag Bau+Technik GmbH, ISBN 3-7640-0418-5, 2004
- [Malv 02] Malvar, L. J.; et al.: ASR Mitigation: State-of-the-Art and Recommendations, ACI Materials Journal, Vol. 99, No. 5, Sept.-Oct. 2002, pp. 480-489
- [Mans 08] Mansfeld, Th.: Das Quellverhalten von Alkalisilikatgelen unter Beachtung ihrer Zusammensetzung, Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2008
- [Mine 08] Vorlesung „Grundlagen der Mineralogie“ (Bachelorstudiengang): Insel-, Gruppen- und Ringsilicate; Kettensilicate; Schichtsilicate; Gerüstsilicate; Universität Freiberg, Institut für Mineralogie, <http://www.mineral.tu-freiberg.de/mineralogie/lehre>
- [Moha 81] Mohan, K.; Taylor, F. W.: Pastes of Tricalcium Silicate with Fly Ash - Analytical Electron Microscopy, Triamthyl Silication and other Studies, Material Research Society Proc., Symposium N: Effects of Flyash Incorporation in Cement and Concrete, (Diamond, S. (Ed.)), Boston, 1981, pp. 54-59
- [Nixo 08] Nixon, P. J.; et al.: The EU “PARTNER” Project – European Standard Tests to Prevent Alkali Reactions in Aggregates Final Results and Recommendations. In: Broekmans, MATM, and Wigum, BJ (editors): Proc. of the 13th Int. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, 2008, Trondheim, Norway
- [Page 83] Page, C. L.; Vennesland, Ö.: Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes, Materials and Structures 16 (1983) 91, pp. 19-25
- [Phil 04] Philipp, O.; Eifert, K.: Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung, BFT 10/2004, S. 6-19
- [Pike 58] Pike, R.: Pressures developed in cement pastes and mortars by the alkali-aggregate reaction, Highway Research Board Bulletin 171 (1958) 34-36
- [Powe 55] Powers, T. C.; Steinour, H. H.: An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reaction: Part 1. The chemical reactions and mechanisms of expansion. Journal of the American Concrete Institute 51 (1955) 497-516

- [Schä 04] Schäfer, E.: Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins, Clausthal, Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal, Dissertation, 2004
- [Sieb 00] Siebel, E.; Sylla, H.-M.; Bokern, J.: Einfluss von puzzolanischen Betonzusatzstoffen auf die Vermeidung einer schädigenden AKR. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 14. Int. Baustofftagung Ibausil; 20.-23. September 2000; Weimar; Tagungsbericht Band 1; Bauhaus-Univ. Weimar; 2000, S. 959 – 967
- [Sieb 01] Siebel, E.; Bokern, J.; Sylla, H.-M.: Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil, Teil 1, beton 12/2001, S. 693-697, Teil 2, beton 1/2002, S. 47-50
- [Sieb 06] Siebel, E.; Böhm, M.; et al.: AKR-Prüfverfahren - Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz, Teil 1. beton 12 /2006, S. 599-604
- [Sieb 07] Siebel, E.; Böhm, M.; et al.: AKR-Prüfverfahren - Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz, Teil 2. beton 1+2 /2007, S. 63-67
- [Spru 97] Sprung, S.; Sylla, H.-M.: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit und Wasseraufnahme von Betonzuschlagstoffen, ZKG International, Nr. 2, 1997, 50. Jahrgang, S. 63-75
- [Spru 98] Sprung, S.; Sylla, H.-M.: Ablauf der AKR im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen, ZKG International, Nr. 6, 1998, 51. Jahrgang, S. 334-346
- [Star 01] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton: Der Baustoff als Werkstoff; Hrsg. vom F.-A.-Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar; Birkhäuser Verlag, Basel (2001); S. 288-330.
- [Star 02] Stark, J.: Wirkung von Flugasche auf AKR, Literatustudie. Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, September 2002
- [Stru 89] Strubble, L.; Broeckman, M.: Standard Aggregate Materials for Alkali-Silica Reaction Studies, 8th Int. Conf. on AAR, Kyoto, 1989, pp. 433-437
- [Sybe 93] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff, DAfStb Heft 434, 1993, Berlin, Beuth Verlag
- [Tayl 85] Taylor, H.F.W.; Mohan, K.; Moir, G.K.: Analytical Study of Pure and Extended Portland Cement Pastes, Part I: Pure Portland Cement Pastes; Part II: Fly Ash and Slag Cement Pastes, J. Am. Ceram. Soc. 68 [12], 1985, pp. 680-690

- [Thau 92] Thaulow, N.; Geiker, M. R.: Determination of the residual reactivity of alkali silica reaction in concrete, 9th Int. Conf. on AAR, London, 1992, pp. 1050-1058
- [Thom 96] Thomas, M.D.A.: Review of the effect of fly ash and slag on alkali-aggregate reaction in concrete, Building Research Establishment Literature Review. 1996, ISBN 1 86081 0926
- [Thom 06] Thomas, M.D.A.; Fournier, B.; Folliard, K.; Ideker, J. and Shehata, M.: Test methods for evaluating preventive measures for controlling expansion due to alkali-silica reaction in concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 36, Issue 10, 2006, pp 1842-1856.
- [VDZ 03] Tätigkeitsbericht VDZ e.V.; 2001 / 2003; S. 97-99
- [Weid 03] Weidmüller, H.: Löse- und Stabilitätsuntersuchungen von Mineralbestandteilen präkambrischer Grauwacken im alkalischen Milieu, Universität Leipzig, Dissertation, 2003
- [Wiek 00] Wieker, W.; Hübert, C.; Heidemann, D.; Ebert, R.: Zur Reaktion von Alkaliverbindungen mit Kieselsäure und Silicaten im Hinblick auf betonschädigende Dehnungsreaktionen, 14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL, Tagungsbericht Band 1, Bauhaus-Universität Weimar, F.A.-Finger-Institut für Baustoffkunde, 2000, S. 1-0911 ff
- [Wier 94] Wierig, H.-J.; Kurz, M.: Alkalitreiben bei Dehnungsbehinderung des Betons, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover, Heft 66, 1994

NORMEN UND RICHTLINIEN

- [ASTM C1293] ASTM C 1293-01: Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction
- [CSA 06] National Standards of Canada; CAN/CSA-A23.2-27A: Standard practice to identify degree of alkali-reaktivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete; approved June 2006
- [CSR 99] Guidance notes: Alkali-Silica-Reaction: Minimising the Risk of Damage to Concrete, Concrete Society Report No. 30, Third Edition, 1999, ISBN 0 946691 63 0
- [CUR 02] CUR – Aanbeveling 89: Maatregelen ter voorkoming van betonschade door alkali-silicareactie (ASR), Juni 2002
- [DAfStB 03] DAfStb-Richtlinie: 2003-09. Selbstverdichtender Beton; 13. Entwurf

- [DAfStB 07] DAfStb-Richtlinie: 2007-02. Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)
- [DIN 196-1] DIN EN 196-1: 1995-05. Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1: 1994
- [DIN 196-21] DIN EN 196-21: 1990-03. Prüfverfahren für Zement, Teil 21: Bestimmung des Chlorid-, Kohlenstoffdioxid- und Alkalianteils von Zement; Deutsche Fassung EN 196-21: 1989
- [DIN 450-1] DIN EN 450-1: 2005. Flugasche für Beton, Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 450-1: 2005
- [DIN 1048-1] DIN 1048-1: 1991-06. Prüfverfahren für Beton, Teil 1: Frischbeton
- [DIN 1048-5] DIN 1048-5: 1991-06. Prüfverfahren für Beton, Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [DIN 1097-6] DIN EN 1097-6: 2000. Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- [DIN 1164-10] DIN 1164-10 : 2004-08. Zement mit besonderen Eigenschaften – Teil 10: Zusammensetzung, Anforderungen und Übereinstimmungsnachweis von Normalzement mit besonderen Eigenschaften
- [DIN 52450] DIN 52450: 1985-08. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern
- [LCPC 94] LCPC (1994): Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées: pp. 51
- [NB 08] NB Publication 21: 2008. Durable concrete with Alkali Reactive Aggregates, B. Wigum, Norwegen, in englisch
- [RILEM 05] RILEM TC 191 (2005, Entwurf): International Specification to Minimise Damage from Alkali Reactions in Concrete: Part 1: Alkali-Silica Reaction, RILEM

Anhang 1: Charakterisierung der Ausgangsstoffe

1 Zemente und Betonzusatzstoffe (Flugasche und Kalksteinmehl)

Tabelle A1 - 1: Chem. Zusammensetzung der Zemente in M.-%; bezogen auf die bei 105°C getrocknete Probe

Zement	K1	K2	K3	K4	K1 13% S	K1 42% S	K1 72% S
Bezeichnung	CEM I 32,5 R				CEM II/A 32,5 R	CEM III/A 32,5 N	CEM III/B 32,5 N
Glühverlust ¹⁾	2,6	2,2	2,8	2,4	2,1	1,4	0,6
SiO ₂	19,7	19,3	21,8	21,5	22,1	25,8	29,5
Al ₂ O ₃	5,04	4,76	5,65	5,55	5,96	7,45	9,39
Fe ₂ O ₃	3,48	2,55	2,34	2,69	2,95	2,17	1,33
CaO	60,8	64,2	62,6	64,1	57,7	53,3	47,1
MgO	2,26	3,50	1,09	1,12	2,99	4,78	6,55
TiO ₂	0,15	0,25	0,17	0,29	0,19	0,38	0,41
MnO	<0,1	0,12	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	0,19
SO ₃ ¹⁾	3,7 ¹⁾	3,5 ¹⁾	3,0 ¹⁾	3,7 ¹⁾	3,7 ¹⁾	3,9 ¹⁾	3,8 ¹⁾
K ₂ O ²⁾	1,43	1,05	0,87	0,58	1,24	1,08	0,73
Na ₂ O ²⁾	0,27	0,33	0,19	0,27	0,27	0,29	0,30
Na ₂ O _e ³⁾	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78
molar Na/K [-]	0,29	0,48	0,33	0,71	0,33	0,41	0,62

1) nach DIN EN 196-2

2) nach DIN EN 196-21

3) Na₂O_e = 0,658 K₂O + Na₂O [M.-%]

Tabelle A1 - 2: Chem. Zusammensetzung der Betonzusatzstoffe in M.-%; bezogen auf die bei 105°C getrocknete Probe

BZS	Flugasche				Kalksteinmehl
Bezeichnung	F1a ⁵⁾	F1b ⁵⁾	F2	F3	KSM
Glühverlust ¹⁾	2,4	2,7	3,8	4,3	--
CaO _{frei} ²⁾	0,2	0,6	<0,1	<0,1	--
HCL-unlös ¹⁾	83,6	82,2	84,4	79,0	--
SiO ₂	47,8	46,3	50,3	46,2	--
Al ₂ O ₃	26,6	22,6	28,0	24,9	--
Fe ₂ O ₃	9,1	8,1	4,7	4,6	--
CaO	3,6	2,9	2,6	4,7	--
MgO	2,2	2,0	1,9	1,5	--
TiO ₂	1,1	0,9	1,2	1,3	--
MnO	<0,1	--	<0,1	<0,1	--
SO ₃ ¹⁾	0,77	0,7	0,22	0,5	--
K ₂ O ³⁾	3,41	3,24	4,04	1,10	0,12
Na ₂ O ³⁾	1,36	1,09	1,09	0,37	0,13
Na ₂ O _e ⁴⁾	3,61	3,22	3,75	1,09	0,21
molar Na/K [-]	0,61	0,51	0,41	0,51	1,65

1) nach DIN EN 196-2

2) nach DIN EN 451-1

3) nach DIN EN 196-21

4) Na₂O_e = 0,658 K₂O + Na₂O [M.-%]

5) Charge der Flugasche F1 für (a) die Normalbetone bzw. (b) die selbstverdichtenden Betone

Tabelle A1 - 3: Physikalische Eigenschaften der Zemente

Zement	K1	K2	K3	K4	K1 13% S	K1 42% S	K1 72% S
Bezeichnung							
Dichte [g/cm ³]	3,15	3,14	3,14	3,15	3,11	3,04	2,99
Druck- festigkeit [N/mm ²]	7 d	44,5	40,4	41,0	35,5	43,0	33,9
	28 d	52,5	51,1	49,6	50,7	51,9	48,5
	90 d	60,7	57,8	57,3	64,0	61,1	52,0
Ausbreitmaß [mm]	17,3	18,6	13,1	16,5	17,1	17,7	18,8
spez. Oberfläche nach Blaine [cm ² /g]	3450	3350	3150	3250	3250	3550	4000

Tabelle A1 - 4: Physikalische Eigenschaften der Betonzusatzstoffe

Zement	Flugasche				Kalksteinmehl
Bezeichnung	F1a ²⁾	F1b ²⁾	F2	F3	KSM
Dichte [g/cm ³]	2,32	2,31	2,41	2,40	2,72
Aktivitäts- index ¹⁾ [%]	7 d	74	72	77	69
	28 d	84	83	91	81
	90 d	98	91	114	104
Ausbreitmaß [mm]	17,6	15,4	20,4	17,0	13,0
spez. Oberfläche nach Blaine [cm ² /g]	3000	3800	4450	3700	4600

1) Verhältnis f/z = 25/75; Zement CEM I 32,5 R; Ausbreitmaß z = 16,0 cm

2) Charge der Flugasche F1 für (a) die Normalbetone bzw. (b) die selbstverdichtenden Betone

Tabelle A1 - 5: Korngrößenverteilung der Betonzusatzstoffe aus Luftstrahlsiebung

Sieblinie	F1a ²⁾	F1b ²⁾	F2	F3	KSM
Lochweite [mm]	Summenlinie Rückstand [M.-%]				
	0	0	--	--	
0,25	1,1	1,0	--	0	1,2
0,125	5,4	4,8	0	2,0	8,2
0,063	16,2	15,2	0,5	11,4	27,1
0,045	21,4	20,4	1,0	18,1	43,7
0,04	24,1	23,8	2,1	20,6	47,5
0,02	37,4	37,7	100 ¹⁾	42,9	91,0
0	100	100	100	100	100

1) Luftstrahlsiebung nicht mehr möglich, da Sieb zugesetzt

2) Charge der Flugasche F1 für (a) die Normalbetone bzw. (b) die selbstverdichtenden Betone

Tabelle A1 - 6: Korngrößenverteilung der Betonzusatzstoffe aus Laserbeugung

Parameter	Dispergierung in 2-Propanol				
	F1a ¹⁾	F1b ¹⁾	F2	F3	KSM
Rückstand 20 µm	48	51	16	50	52
Rückstand 45 µm	28	26	4	28	33
Kornanteil >250 µm	2	2	0	1	0
Medianwert d ₅₀ [µm]	19	20	9	20	23

1) Charge der Flugasche F1 für (a) die Normalbetone bzw. (b) die selbstverdichtenden Betone

Tabelle A1 - 7: Minerale und amorpher Anteil der Flugaschen aus der Röntgenbeugungsanalyse mit Rietveld

Flugasche	F1a	F1b	F2	F3
Mineral				
Mullit	14,2	14,1	12,1	22,1
Magnetit	2,9	2,1	--	1,7
Quarz	2,7	5,3	3,2	7,9
CaO	< 0,5	0,6	--	0,8
amorpher Anteil	79,7	74,6	84,8	67,5

2 Gesteinskörnungen

Eine Zusammenstellung der verwendeten Gesteinskörnungen mit Angabe der Provenienz, der verwendeten Kornfraktionen und der Rohdichten nach DIN EN 1097 6:2000 [DIN 1097] ist in Tabelle A1 - 8 gegeben. Die angegebenen Rohdichten stellen den Mittelwert für die verwendeten Kornfraktionen dar. Diese Werte wurden für die Stoffraumrechnung der Betonrezepturen verwendet.

Tabelle A1 - 8: Übersicht über die verwendeten Gesteine

Gesteinskörnung	Einstufung	Provenienz	Kornfraktion	Rohdichte [kg/dm ³]
Quarzsand	EI ¹⁾	Leipziger Tieflandsbucht	0/2	2,66
Splitt Diabas	EI ¹⁾	Fichtelgebirge	2/5; 5/8	2,89
Kies Oberrheingraben (KoR)	EI ¹⁾	Oberrheinisches Tiefland	2/8; 8/16	2,64
Splitt Oberrheingraben (SoR)	EIII ²⁾	Oberrheinisches Tiefland	2/5; 5/8; 8/11; 11/16	2,66
Splitt Grauwacke (GW)	EIII ²⁾	Oberlausitz	2/5; 5/8; 8/11; 11/16	2,75
Duranglas (D)	EIII ²⁾	Fa. Schott	2/4; 4/8	2,19

1) unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion nach Alkali-Richtlinie DAfStb

2) bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion nach Alkali-Richtlinie DAfStb

2.1 Alkalireaktivität

Die potentielle Alkalireaktivität der Grauwacke, des Kiesel bzw. Splitts Oberrhein und des Duranglases bzw. die Alkaliunempfindlichkeit der als inert angenommenen Gesteinskörnungen Quarzsand und Diabas wurde durch Voruntersuchungen mit dem Magdeburger Schnelltest festgestellt [Phil 04], siehe Abbildung A1 - 1. Die jeweilige Prüfkörnung 0,5/2,0 mm wurde durch Siebung oder Siebung nach Zerkleinerung gewonnen. Erwartungsgemäß kam es bei der Grauwacke zur stärksten Dehnung mit rd. 4,5 %. Der Kies aus dem Oberrheingraben führte mit rd. 3,0 mm/m zu ähnlich starken Dehnungen wie der entsprechende Splitt mit 3,5 mm/m. Somit sind diese Gesteinskörnungen nach den Kriterien des Schnelltests - $\epsilon > 2,0$ mm nach 21 Tagen - als potentiell alkalireaktiv einzustufen.

Die weitergehende Prüfung mit dem Betonversuch nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, bestätigte die Alkaliempfindlichkeit (E-III) der Grauwacke und des Splitts Oberrhein. Dagegen darf nach den Ergebnissen des Betonversuches mit 400 kg Prüfzement und einem w/z-Wert von 0,45 der Kies Oberrhein als unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion eingestuft werden (EI), siehe Betone B2 in Abbildung A4 - 2, Abbildung A4 - 8 und Abbildung A4 - 10.

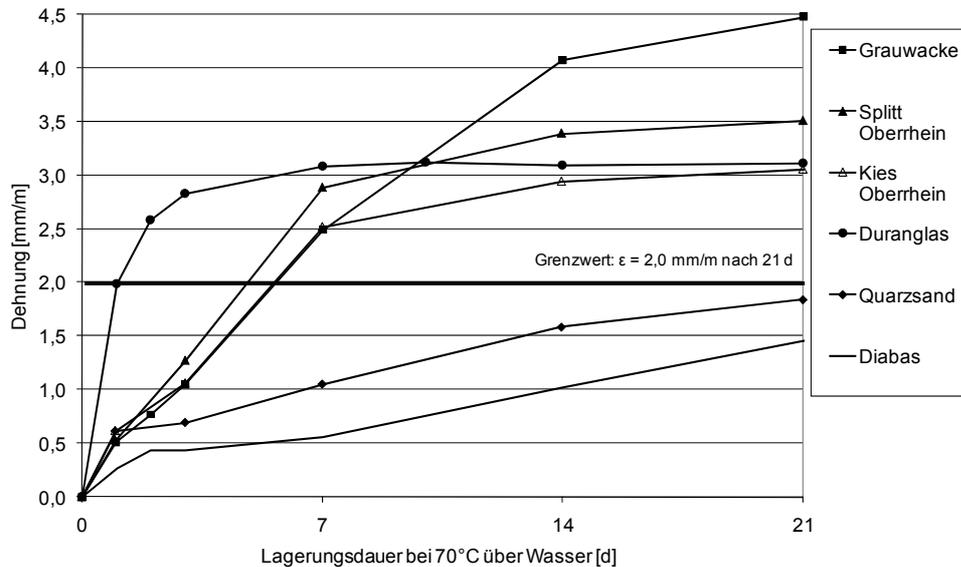


Abbildung A1 - 1: Dehnungsverhalten der geprüften Gesteinskörnungen unter AKR beschleunigenden Bedingungen. Lagerung bei 70°C über Wasser

2.2 Porosität

Eine wichtige Kenngröße der reaktiven Gesteinskörnungen ist ihre Porosität. Über kapillares Saugen und Diffusion dringen die Alkalien in das Porensystem ein. Zudem kann die Porosität des Gesteins als eine Art Puffervolumen dienen, in dem AKR-Gel abgelagert wird ohne zu einer schädigenden Quellspannung im Gestein zu führen [Hüng 08]. Kenntnisse über das Porenvolumen und die Porenverteilung können somit helfen das Verhalten verschiedener Gesteinsarten zu interpretieren.

Die Dichte ρ der Gesteinskörnungen wurde mit der Helium-Pyknometrie bestimmt. Die aus der Quecksilber-Druck Porosimetrie ermittelten Werte für die Dichte ρ , die Kornrohddichte ρ_{Korn} und das Porenvolumen V_P sind zum Vergleich ebenfalls in Tabelle A1 - 9 angegeben.

Die Grauwacke weist ein relativ geringes Porenvolumen von rd. 1 Vol.-% auf.

Von den inhomogen zusammengesetzten Gesteinskörnungen Splitt bzw. Kies Oberrhein wurden stichpunktartig nur von einigen der darin vorkommenden Gesteinsarten die Porositäten gemessen. Dabei wurden solche ausgewählt die als potentiell alkalireaktiv zu betrachten sind. Es ist davon auszugehen, dass die jeweiligen Gesteinsarten sowohl im Splitt als auch im Kies vorhanden sind.

Im Vergleich zur Grauwacke weisen der kieselig gebunden Sandstein aber auch der dicht verkieselte Sandstein und der Flint der Oberrheingesteinskörnungen ein deutlich höheres Porenvolumen von rd. 10 bzw. 3 Vol.-% auf.

Betrachtet man das Porenvolumen von rd. 40 Vol.-% eines zum Vergleich untersuchten Opalsandsteins so erscheint es zulässig die oben genannten Gesteinskörnungen als dicht zu bezeichnen, siehe Tabelle A1 - 9. Dass auch in solch dicht erscheinende Gesteinskörnungen die Porenlösung des Betons eindringen kann zeigt ein Vergleich mit der Permeabilität von Zementsteinen mit unterschiedlichen w/z-Werten. Dabei weisen z.B. Quarzdiorit, Marmor, Sandstein oder Granit mit Permeabilitätskoeffizienten zwischen $8,24 \cdot 10^{-14}$ und $1,56 \cdot 10^{-10}$ m/s Werte entsprechend Zementsteinen mit w/z-Werten zwischen 0,42 und 0,71 auf, aus [Jens 93] Kapitel 6.9.

Im Vergleich zur Grauwacke deutet das höhere Porenvolumen in den Gesteinen des Oberrheins auf eine erhöhte reaktive Oberflächen im Inneren des Gesteinskorns aber auch auf eine verstärkte Pufferkapazität für die Reaktionsprodukte einer AKR hin.

Tabelle A1 - 9: Dichte und Kennwerte zur Porosität der Gesteinskörnungen

Gesteinskörnung	Heliumpyknometrie		Quecksilber-Druck Porosimetrie	
	ρ	ρ	ρ_{Korn}	V_p
	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[Vol.-%]
Grauwacke ¹⁾	2,73	2,66	2,64	0,88
Kies Oberrhein ²⁾				
kieselig geb. Sandstein	2,68	2,63	2,37	9,98
dicht verkieselter Sandstein	2,68	2,65	2,57	3,05
Splitt Oberrhein ¹⁾				
Flint	2,66	2,63	2,55	2,96
dicht verkieselter Sandstein	2,71	2,62	2,54	3,27
Opalsandstein ³⁾	2,58	2,32	1,39	40,10

1) Proben aus Lieferkörnung 11/16

2) Proben aus Lieferkörnung 8/16

3) Proben aus Kies mit Opalsandstein/Flint, EIII-OF, Lieferkörnung 2/8

2.3 Petrographische Charakterisierung

Die petrographischen Untersuchungen wurden am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU-München durch Herrn Dr. G. Grundmann durchgeführt. Es wurde von repräsentativen Fragmenten der untersuchten Gesteinskörnung ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt. Besonderes Augenmerk wurde darauf gelegt, den Mineralbestand inklusive des geschätzten Volumenanteils der einzelnen Spezies und die Beschaffenheit des Gefüges zu charakterisieren. Bei den Untersuchungen wurde im Besonderen auf Parameter geachtet, die für eine AKR in den Gesteinskörnern relevant sein können, so auf den Grad der Kristallinität der SiO₂-Varietäten von Opal über kryptokristallin bis grobkristallin, auf Anzeichen einer Störung der Kristallgitterordnung, wie Spuren duktiler Deformation oder Stresslamellen, auf den Grad der Verwitterung und auf Gefügestörungen,

wie mechanisch induzierte Mikrorisse. Am Kies und Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben erfolgte zudem eine petrographische Geröllanalyse.

Es erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse. Die ausführliche Zusammenstellung der petrographischen Untersuchungen ist in Punkt 2.4 aufgeführt.

Grauwacke

Es handelt sich um eine sehr feine, hellbraungraue bis dunkelgraue Grauwacke mit im Allgemeinen unregelmäßigem und dichtem Gefüge. Die hier untersuchten Dünnschliffe zeigen eine Variationsbreite von sandsteinartiger bis toniger Matrix die kieselig, durch Hellglimmer bzw. durch Dunkelglimmer gebunden sein kann. Die Anteile an Pyrit von bis zu 5 % in der größeren Varietät sind offensichtlich für die nach längerer Lagerungszeit auftretende rostbraune Färbung der Grauwacke verantwortlich.

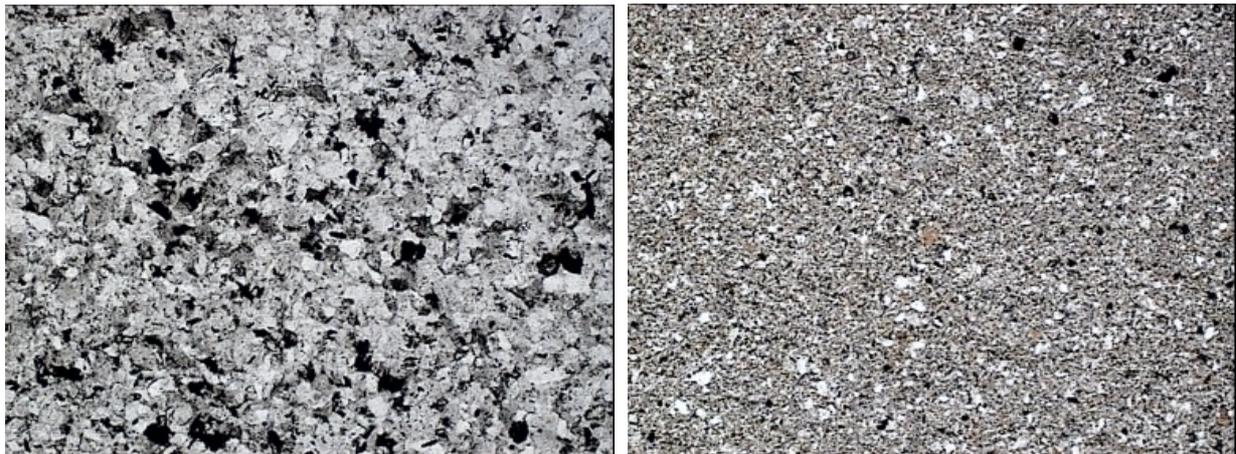


Abbildung A1 - 2: Grauwacke; links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, sandsteinartig, Matrix aus Glimmerschüppchen und kryptokristallinem Quarz;
rechts: BB = 2,1 mm, lin-Pol, tonig, Matrix aus Dunkelglimmer

Kies / Splitt Oberrhein

Im Kies und Splitt sind prinzipiell dieselben Gesteinsarten, vor allem Quarz/Quarzite, kieselig gebundene Sandsteine, Opalsandsteine und Flinte, in ähnlich hohen Gewichtsanteilen vorhanden. Damit können auch die ähnlich Dehnungen dieser Gesteinskörnungen im Magdeburger Schnelltest, in dem die zu prüfenden Gesteinskörnungen auf 0,5 bis 2,0 mm gebrochen werden, erklärt werden.

Sowohl die gebrochenen als auch die ungebrochenen Körner weisen über den gesamten Querschnitt einheitliche Verwitterungsspuren auf, dazu gehören Eisenhydroxid-Verwitterung, alterierte Glimmer und Feldspäte und ausgelaugte Carbonate. In den Kiesen wurden keine Anzeichen einer gegenüber den Splitten verstärkt ausgelaugten Randzone gefunden.

An den in dieser Arbeit untersuchten Splittkörnern konnten, unabhängig von der Gesteinsart, frische, auf mechanische Beanspruchung zurückzuführende, Mikrorisse festgestellt werden. Die Risse haben eine zur Oberfläche parallele Orientierung im Raum und verlaufen sowohl an Gefügegrenzen entlang als auch durch einzelne Körner hindurch. In Abbildung A1 - 3 ist exemplarisch eine schalenförmige Rissbildung entlang der Oberfläche eines kieselig gebundenen Sandsteins dargestellt. Eine solche Rissbildung tritt in den Kieskörnern nicht auf.

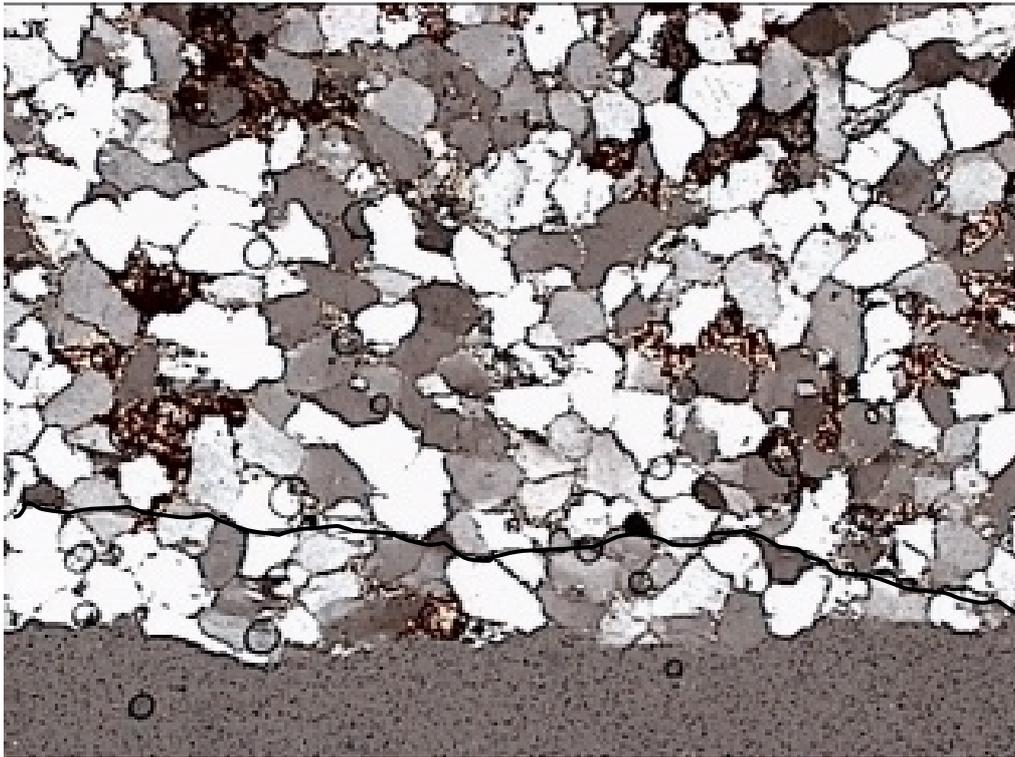


Abbildung A1 - 3: BB = 2,1 mm, X-pol; kieselig gebundener Sandstein mit Riss subparallel zur Oberfläche. (Riss nachgezeichnet)

2.4 Petrographie

2.4.1 Grauwacke

Es wurde von 2 repräsentativen Gesteinsfragmenten der Splittprobe „Grauwacke“, Fraktion 11/16 mm ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt.

Makroskopisch besitzt das Gestein ein regelloses, feinkörniges bis dichtes Gefüge, zum Teil ist andeutungsweise eine sedimentäre Schichtung mit hell-dunkel Bänderung zu erkennen. Die Farbe ist hellbraungrau bis dunkelgrau. Die Grauwacke ist diagenetisch verfestigt und metamorph überprägt.

Fragment 1

Das Fragment 1 weist einen sandstein- und einen schieferartigen Teilbereich auf.

Fragment 1; sandsteinartiger Bereich

Im Mikrogefüge ist keine Textur erkennbar. Es zeigt sich ein sandsteinartiges, gleichkörniges Gefüge detritischer Quarz- und Feldspatkörner mit einer Korngröße von rd. 0,1 mm. Die Matrix besteht aus Glimmerschuppen (Muskovit/Biotit) und kryptokristallinem Quarz. Die opaken Phasen bestehen fast ausschließlich aus Pyrit.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 30 Vol.-%

Detritischer Quarz mit einer Korngröße von rd. 0,1 mm und in der Regel mit Spuren duktiler Deformation.

Feldspat: ~ 30 Vol.-%

Detritischer Feldspat mit einer Korngröße von rd. 0,1 mm, teilweise alteriert (Hellglimmer-Füllung).

Nebengemenge:

Pyrit: frisch ~ 5 Vol.-%

Akzessorien:

Carbonat < 1 Vol.-%

Zirkon < 1 Vol.-%

Goethit < 1 Vol.-%



Abbildung A1 - 4: BB = 2,1 mm, lin-pol;
ungeregelte sandartige Matrix, opake Phasen



Abbildung A1 - 5: BB = 2,1 mm, X-pol; detritische
Quarze und Feldspäte

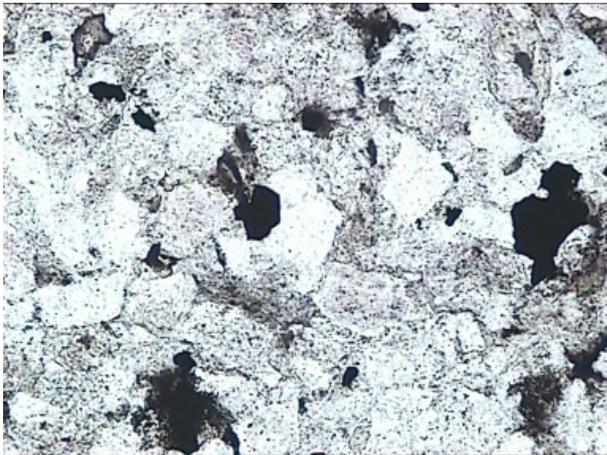


Abbildung A1 - 6: BB = 0,5 mm, lin-pol;
ungeregelte sandartige Matrix, opake Phasen

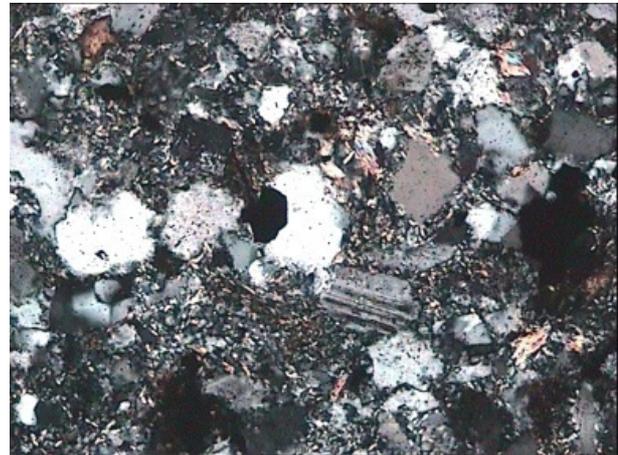


Abbildung A1 - 7: BB = 0,5 mm, X-pol; Matrix aus
Hellglimmerschüppchen und kryptokristalliner
Quarz, mit Hellglimmer gefüllter Feldspat

Fragment 1; schieferartiger Bereich

Das Mikrogefüge ist tonig und gleichkörnig mit leichter hell-dunkel Bänderung, die einer sedimentären Schichtungsfläche entspricht. Parallel bis diagonal zur Schieferung sind mit Chlorit gefüllte Zerrklüfte ausgebildet. Die Matrix besteht aus Hellglimmerfilz. Die opaken Phasen bestehen fast ausschließlich aus Pyrit.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 5 Vol.-%

Detritisch mit einer Korngröße von rd. 0,05 mm.

Feldspat: ~ 15 Vol.-%

Detritisch, alteriert, mit einer Korngröße von rd. 0,05 mm.

Pyrit: ~ 5 Vol.-%



Abbildung A1 - 8:BB = 2,1 mm, lin-pol; leicht geschiefertes toniges Gefüge mit Zerrkluft diagonal zur Schieferung

Fragment 2

Es zeigt sich ein toniges, wechselkörniges Mikrogefüge ohne erkennbare Textur. Die Matrix besteht vorwiegend aus frischem Biotit mit geringem Hellglimmeranteil. Es finden sich geringe Anteile opaker Phasen (Pyrit).

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 15 Vol.-%

Wechselkörnig mit einer Korngröße von rd. 0,01 bis 0,05 mm

Feldspat: ~ 15 Vol.-%

Wechselkörnig mit einer Korngröße von rd. 0,01 bis 0,05 mm



Abbildung A1 - 9: BB = 2,1 mm, lin-pol;
ungeregelte tonige Matrix



Abbildung A1 - 10: BB = 0,5 mm, X-pol;
Biotitmatrix

2.4.2 Splitt / Kies Oberrhein

Die Gesteinskörnungen „Splitt Oberrhein 11/16“ und „Kies Oberrhein 8/16“ wurden nach Augenschein in 9 Gesteinsarten aufgeteilt, siehe Tabelle A1 - 10. Die Gesamtmasse des Splittes bzw. Kieses betrug 705,6 bzw. 702,9 g. Stichpunktartig wurde an daraus ausgewählten Gesteinskörnern eine durchlichtmikroskopische Gesteinsbestimmung vorgenommen.

Tabelle A1 - 10: Art und Anteil der Gesteinsarten in den Gesteinskörnungen Splitt und Kies Oberrhein

Lfd-Nr.	Komponenten	Kies-Edelsplitt	Kies
		Fraktion 11/16	Fraktion 8/16
		Anteil [M.-%]	
1	Quarz/Quarzit	34,8	24,3
2	Sandstein, kieselig gebunden ¹⁾	17,6	24,9
3	Sandstein, dicht verkieselt ²⁾	18,0	24,5
4	Sandstein, glaukonitisch	4,8	2,0
5	Flint ³⁾	13,3	8,3
6	Porphy	--	1,4
7	Granit	4,8	8,4
8	Gneis	5,3	5,4
9	Kalkstein/Kieselkalk	1,4	0,8
Summe		100	100

- 1) Sandsteinstruktur
- 2) hornsteinähnlich
- 3) hornsteinähnlich, muscheliger Bruch

Splitt Oberrhein

Exemplarisch wurde von je einem Fragment der in der petrographischen Auszählung als Quarzit, Sandstein kieselig gebunden, Sandstein dicht verkieselt, Sandstein glaukonitisch und Kieselkalk bezeichneten Gesteinsarten ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt.

Verwitterungszustand

Der Splitt aus dem Oberrheingraben weist unabhängig von der Gesteinsart eine mehr oder minder starke Verwitterung auf. Die Verwitterung ist dabei jeweils über den gesamten Querschnitt gleich stark ausgeprägt. Es konnte kein Unterschied im Verwitterungsgrad zwischen der Randzone und dem Kernbereich der Körner festgestellt werden.

Mikrorisse im Gesteinskorn

An den im Dünnschliff untersuchten Splittkörnern konnten, unabhängig von der Gesteinsart, frische, auf mechanische Beanspruchung zurückzuführende Mikrorisse festgestellt werden. Die Risse haben eine zur Oberfläche parallele Orientierung im Raum und verlaufen sowohl entlang von Gefügegrenzen als auch durch einzelne Körner hindurch. In Abbildung A1 - 3 ist exemplarisch eine schalenförmige Rissbildung entlang der Oberfläche eines kieselig gebundenen Sandsteins dargestellt.

glaukonitischer Sandstein

Makroskopisch handelt es sich um feinkörnige Sandsteine mit hellgraugrüner bis hellbrauner Farbe.

Im Mikrogefüge zeigt sich für diese Probe ein wechsellagerter Sandstein mit Quarz und Glaukonit in kieseliger Grundmasse. Das Gefüge weist eine deutliche Einregelung plättchenförmiger Komponenten parallel zur Schichtung auf. Die nicht quarzitären Komponenten weisen in der Regel eine Eisenhydroxid-Verwitterung auf, die über den gesamten Querschnitt gleich stark ausgeprägt ist.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 65 Vol.-%

Wechsellagerter; mit gleichkörniger Grundmasse schwach suturierter Quarzkörner ($d \sim 0,1$ mm) und einzelner großer Bruchstücke ($d \sim 0,5$ mm) mit Spuren duktiler Deformation und mit braunen Verwitterungsrandern.

Glaukonit: ~ 15 Vol.-%

Nebengemenge:

Carbonat: ~ 5 Vol.-%

Feldspat: ~ 5 Vol.-%

Glimmer: 1-2 Vol.-%

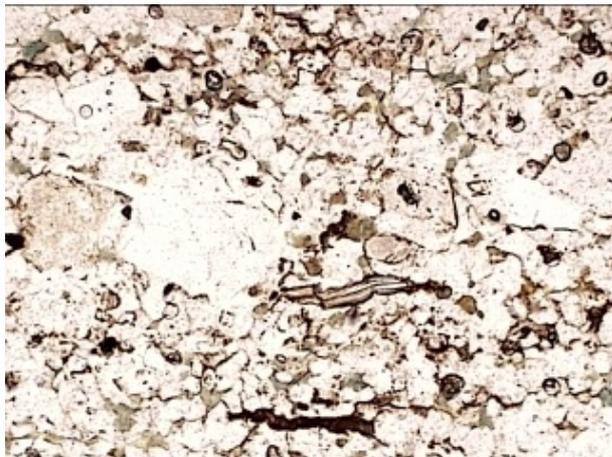


Abbildung A1 - 11: BB = 2,1 mm, lin-pol; eingeregelt Grundmasse mit einzelnen größeren Körnern, durchgehende Eisenhydroxid-Verwitterung

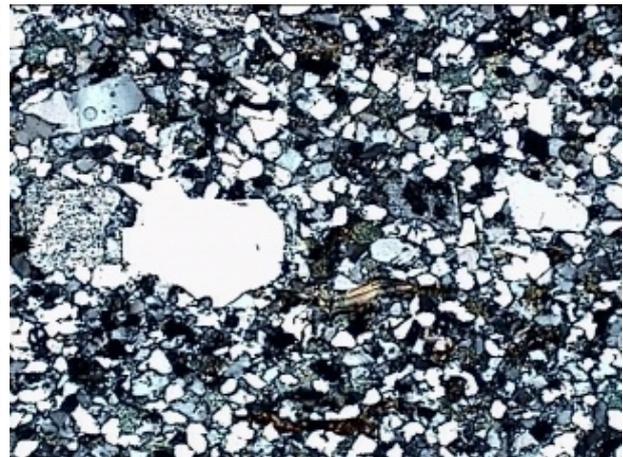


Abbildung A1 - 12: BB = 2,1 mm, X-pol; kieselige Matrix mit gleichkörnigen, schwach suturierten Quarzen ($d \sim 0,1$ mm) und einzelnen großen, eckig bis schwach gerundeten Quarzbruchstücken ($d \sim 0,5$ mm) meist mit Spuren duktiler Deformation

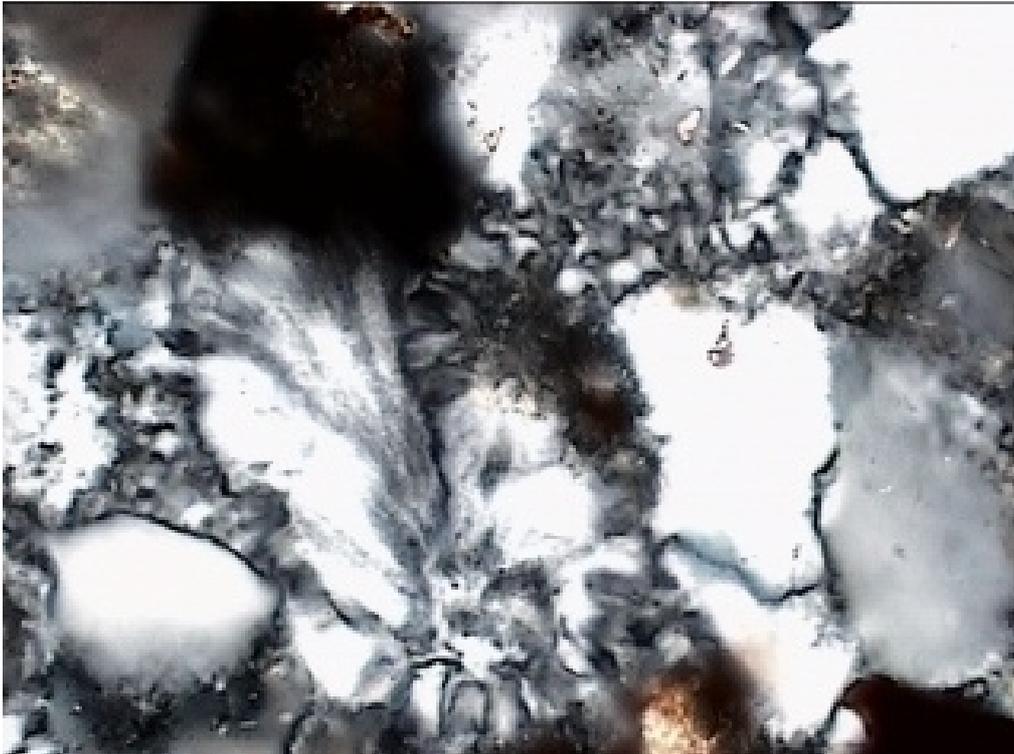


Abbildung A1 - 13: BB = 0,25 mm, X-pol; kieselige, fein-kryptokristalline Matrix mit schwach suturierten Quarzkörnern

Kieselig gebundener Sandstein

Makroskopisch handelt es sich um hellgraubraun gefleckte Sandsteine mit glänzenden Glimmerschüppchen.

Der Sandstein ist feinkörnig und weist ein gleichkörniges Pflastergefüge aus Quarzkörnern mit $d \sim 0,2$ mm auf. Die Matrix besteht aus Quarz und zu rd. 10-15 Vol.-% aus fleckigem, verwittertem eisenschüssigen Carbonat.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 80 Vol.-%

Gleichkörnig ($d \sim 0,2$ mm), Spuren duktiler Deformation, Pflastergefüge. Die Quarze weisen eine Neuspaltung um gut gerundete Altkörner auf. An den Korngrenzen liegt Glimmerhaut mit selten geschlossenen Kornbrüchen.

Carbonatzement: ~ 15 Vol.-%

Nebengemenge:

Glimmer: ~ 5 Vol.-%

Akzessorien:

Turmalin

Feldspat

Chalzedon

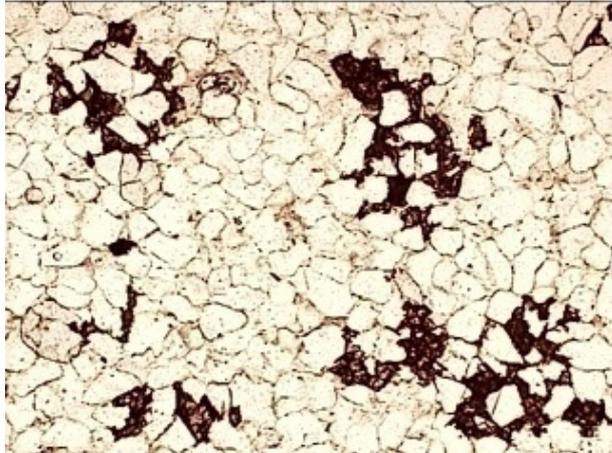


Abbildung A1 - 14: BB = 2,1 mm, lin-pol; fleckige, verwitterte, eisenschüssige Carbonatmatrix

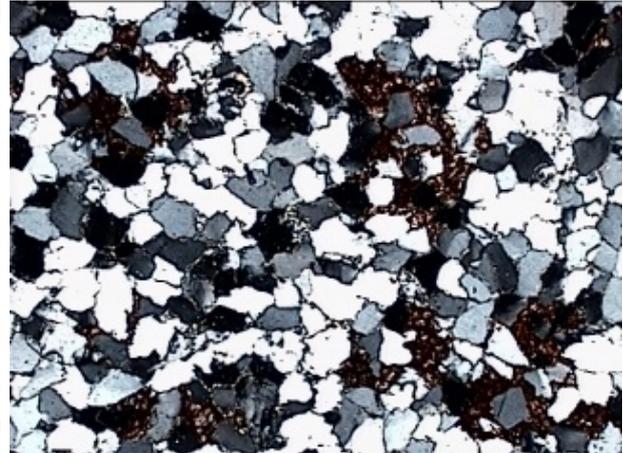


Abbildung A1 - 15: BB = 2,1 mm, X-pol; gleichkörniges Pflastergefüge der Quarzkörner (d ~ 0,2 mm)

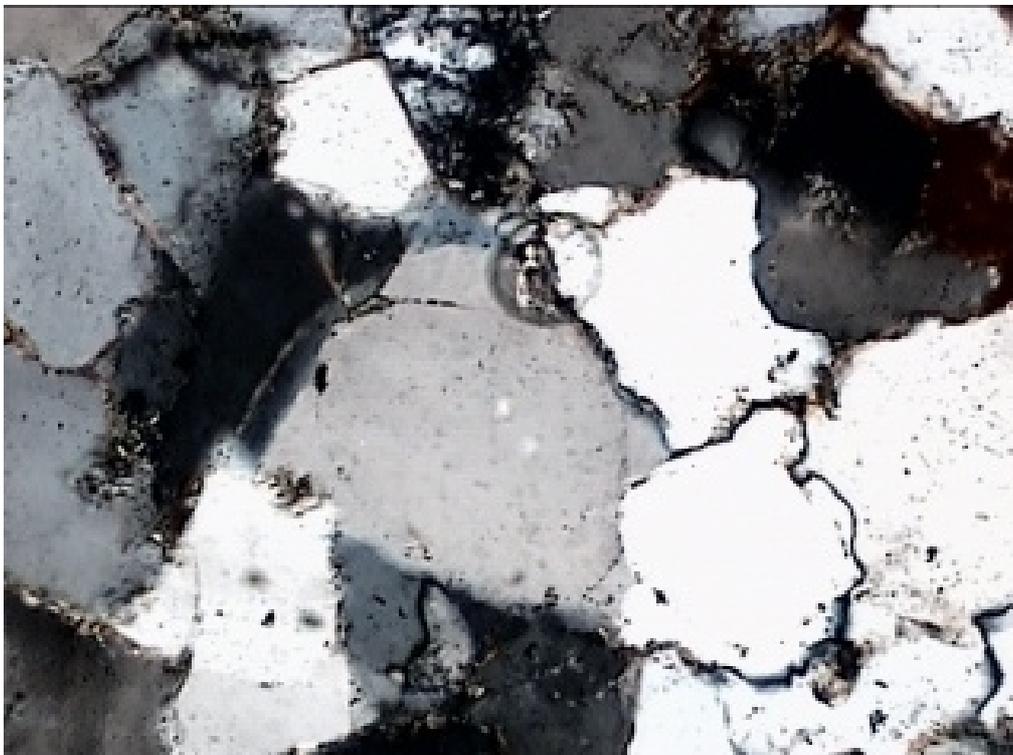


Abbildung A1 - 16: BB = 0,5 mm, X-pol; Neuspaltung von Quarz um ein gutgerundetes, detritisches Altkorn mit Glimmerhäutchen an den Korngrenzen

Dicht verkieselter Sandstein

Es handelt sich um einen hellgraubraunen bis mittelgrauen dicht verkieselten glaukonitischen Sandstein mit Carbonat.

Die Probe weist eine Wechsellagerung von detritischen Quarzkörnern und kryptokristallinen Quarz auf. Quer zur Schichtung sind wiederverheilte Risse zu erkennen. Aus der kryptokristallinen Grundmatrix heraus findet eine Neusprossung von kryptokristallinen Quarzaggregaten statt.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 15 Vol.-%

Es finden sich zwei Arten von Quarz:

Detritischer Quarz mit eckig bis schwach gerundeter Kornform (d ~ 0,1 mm)

Neugesprosser kryptokristalliner Quarz (d ~ 0,2 mm)

Carbonat: ~ 30 Vol.-%

Idiomorpher, teilweise verwitterter Dolomit (d ~ 0,1 mm) mit unregelmäßig zerlappter Kornform.

Nebengemenge:

Glaukonit: ~ 5 Vol.-%

Akzessorien:

Glimmer



**Abbildung A1 - 17: BB = 2,1 mm, lin-pol; Wechsel-
lagerung von detritischem und kryptokristallinem
Quarz mit quer zur Schichtung wiederverheilten
Rissen**



**Abbildung A1 - 18: BB = 2,1 mm, X-pol; dichtver-
kieselte Matrix**



**Abbildung A1 - 19: BB = 0,5 mm, X-pol; sphärenförmige Neuprossung von einschlussarmem
kryptokristallinem Quarz neben einschlussreichen Altkörnern**

Kieselkalk (Radiolarit)

Es handelt sich um einen feinkörnigen Kalkstein mit verkieselten, rundlichen Fossilbruchstücken ($d \sim 0,1$ mm) und verkieselten Rissen.

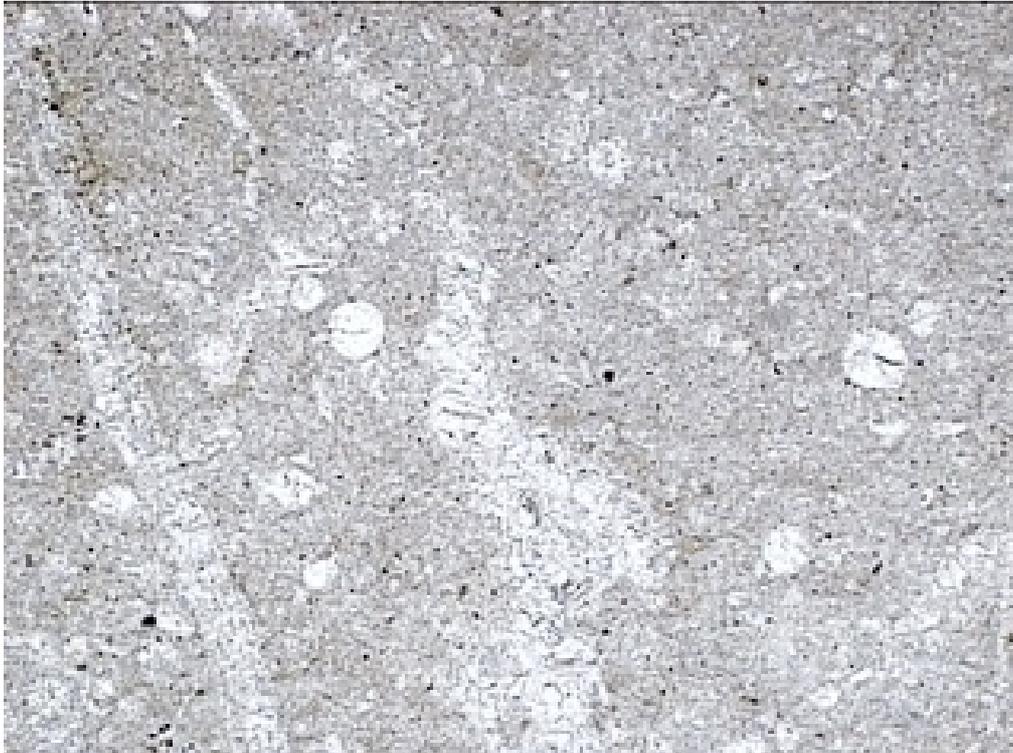


Abbildung A1 - 20: BB = 2,1 mm, lin-pol; feinkörniger Kalkstein mit verkieselten Einschlüssen

Quarzit

Die Quarzite haben in der Regel eine weiße bis hellbeige bzw. hellbräunliche Farbe.

Bei der hier untersuchten Probe handelt es sich wahrscheinlich um einen metamorphen Sandstein. Die wechsellagernde Quarzgrundmasse ist geschiefert, die Quarzkörner weisen suturierte Korngrenzen und Spuren duktiler Deformation auf.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 90 Vol.-%

Es finden sich zwei Arten von Quarz:

- a) deutlich geplättete Quarzkörner mit $L \sim 0,5$ mm und $B \sim 0,2$ mm
- b) Rekristallite ($d \sim 0,05$ mm)

In der Regel weisen die Quarze Spuren duktiler Deformation auf.

Feldspat: ~ 10 Vol.-%

Teilweise zerbrochene und mit Quarz verheilte detritische Feldspäte mit ungetrübtem Anwachssaum (d ~ 0,3-1,5 mm).

Akzessorien:

Glimmer:

Die Hellglimmer zeichnen die Schieferungsrichtung nach.

Chalzedon

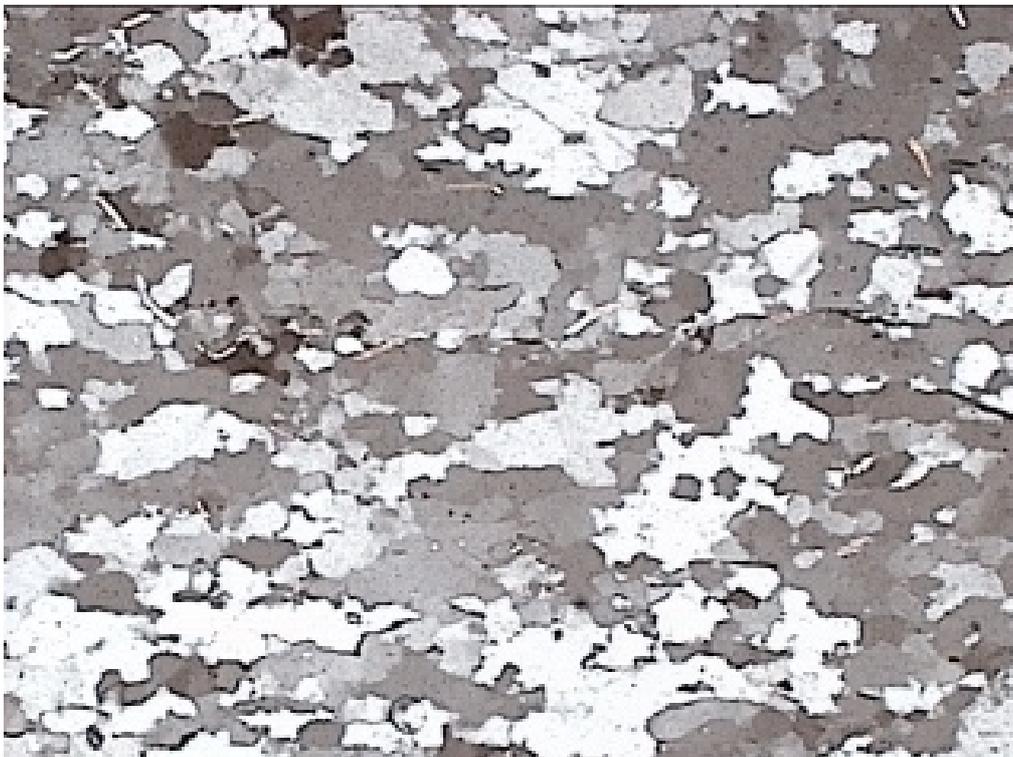


Abbildung A1 - 21: BB = 2,1 mm, X-pol; geplättete, aufgrund duktiler Deformation undulös auslöschende Quarzkörner mit suturierten Korngrenzen und die Schieferung nachzeichnenden Hellglimmern

Kies Oberrhein

Exemplarisch wurde von je einem Fragment der in der petrographischen Auszählung als Quarzit, Sandstein kieselig gebunden, Sandstein dicht verkieselt und Flint bezeichneten Gesteinsarten ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt. Da es sich prinzipiell um die selben Gesteinsarten wie beim Splitt Oberrhein handelt, wurde hier auf eine genaue Auflistung des Mineralienbestandes verzichtet und neben einer generellen Beschreibung nur noch auf eventuelle Besonderheiten hingewiesen.

Verwitterungszustand

Der Kies Oberrhein weist unabhängig von der Gesteinsart eine mehr oder minder starke Verwitterung auf. Die Verwitterung ist bei den hier untersuchten Dünnschliffen jeweils über den gesamten Querschnitt gleich stark ausgeprägt. Es konnte kein signifikanter Unterschied im Verwitterungsgrad zwischen der Randzone und dem Kernbereich der Körner festgestellt werden.

Mikrorisse im Gesteinskorn

In den hier untersuchten Kieskörnern konnten keine frischen, mechanisch bedingten Mikrorisse festgestellt werden.

Flint

Es handelt sich um einen Flint mit Carbonatdurchhäderung. Der Flint weist einen durch ausgelaugte Dolomithomboeder entstandenen Porenraum auf.



Abbildung A1 - 22: BB = 2,1 mm, X-pol; Flint mit Carbonatdurchhäderung

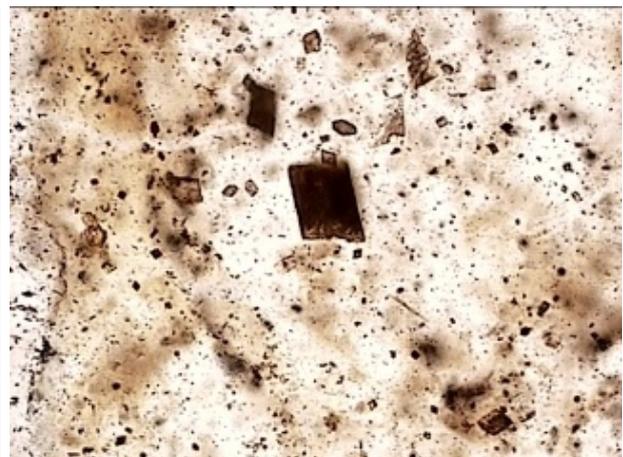


Abbildung A1 - 23: BB = 0,5 mm, lin-pol; Porenraum durch ausgelaugte Dolomithomboeder

Dicht verkieselter Sandstein

Das Korn ist über den gesamten Querschnitt stark ausgelaugt und weist einen 3-dimensional vernetzten Porenraum auf.



Abbildung A1 - 24: BB = 2,1 mm, lin-pol; 3-dimensional vernetzter Porenraum

Quarzit

Korn a)

Es handelt sich um einen metamorph überprägten, mittel- bis grobkörnigen Quarzit mit schwach suturierten Korngrenzen. Das Aggregat ist durchsetzt von wiederverheilten spröden Zerbrechungen, die durch perlschnurartig aneinander gereihte Flüssigkeitseinschlüsse nachgezeichnet werden.



Abbildung A1 - 25: BB = 2,1 mm, lin-pol; Quarzit mit verheilten Spuren spröder Deformation

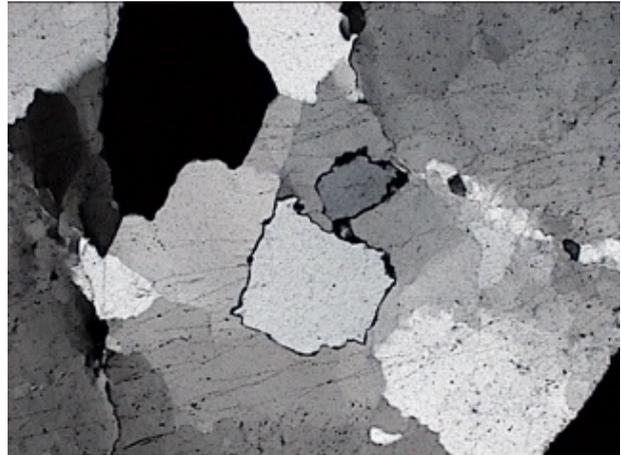


Abbildung A1 - 26: BB = 2,1 mm, X-pol; Quarzit mit verheilten Spuren spröder Deformation

Korn b)

Es handelt sich um einen wechsellkörnigen Quarzit. Dieser weist ein durchgreifendes Netzwerk einer Glimmertapete im gesamten Aggregat auf. Der Glimmer ist in der Regel bereits oxidiert.



Abbildung A1 - 27: BB = 2,1 mm, lin-pol; Quarzit mit durchgreifendem Netzwerk einer Glimmertapete im Intergranularraum



Abbildung A1 - 28: BB = 0,5 mm, lin-pol; Detail aus Abbildung A1 - 27, mit dem deutlich erkennbaren Glimmernetzwerk

Kieseliger Sandstein (Kieselschiefer; biogenes Sediment mit Schwammnadeln)

Es handelt sich um einen stark verwitterten kieseligen Sandstein mit Schwammnadelfragmenten.



Abbildung A1 - 29: BB = 2,1 mm, lin-pol; biogenes Sediment mit Schwammnadelfragmenten

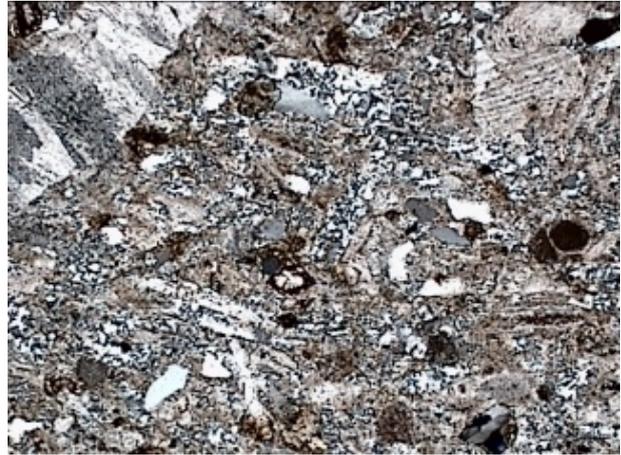


Abbildung A1 - 30: BB = 2,1 mm, X-pol; biogenes Sediment mit Schwammnadelfragmenten

2.5 Röntgenbeugungsanalyse

Mittels Röntgenbeugungsanalyse wurde der Mineralbestand und der amorphe Anteil in den reaktiven Gesteinen bestimmt, siehe Tabelle A1 - 11.

In der Grauwacke sind mit rd. 32 bzw. 23 M. % relativ große Mengen an Feldspat bzw. Glimmer zu finden. Dagegen weist die Grauwacke mit nur rd. 31 bzw. 13 M. % relativ geringe Mengen an Quarz bzw. amorphen Anteil auf.

Der Splitt und der Kies Oberrhein unterscheiden sich sowohl in den Gehalten an Quarz (rd. 65 M.-%) als auch an amorphen Anteilen (rd. 14 M.-%) nur unwesentlich. Darin ist somit keine Begründung für das unterschiedliche Verhalten dieser Gesteinskörnungen hinsichtlich einer schädigenden AKR im Beton zu finden.

Der zum Vergleich untersuchte Kies mit Opalsandstein/Flint (EIII-OF) weist mit 26 M.-% einen signifikant höheren amorphen Anteil als die Grauwacke bzw. die Gesteinskörnungen vom Oberrhein mit rd. 13 bzw. 14 M.-% auf. Zusammen mit der hohen Porosität (siehe Tabelle A1 - 9) dürfte darin auch der Grund für die sehr hohe Reaktionsgeschwindigkeit von Kiesen mit Opalsandstein/Flint (EIII-OF) zu finden sein.

Tabelle A1 - 11: Minerale und amorpher Anteil der reaktiven Gesteinskörnungen aus der Röntgenbeugungsanalyse mit Rietveld

Gesteinskörnung			EI	Gw	SoR	KoR	EIII-OF
Mineralgruppe	Mineral	Chem. Formel	Anteil %				
	Quarz	SiO ₂	19,7	31,2	64,8	64,6	39,3
Feldspat	Orthoklas	K[AlSi ₃ O ₈]	--	3,2	2,1	3,5	9,4
	Plagioklas (Albit)	Na[AlSi ₃ O ₈]	1,9	28,9	3,2	6,6	14,5
Glimmer	Muskovit	KAl ₂ [(OH,F) ₂ AlSi ₃ O ₁₀]	--	23,0	2,2	--	3,4
Tonmineral	Kaolinit	Al ₄ [(OH) ₈ /Si ₄ O ₁₀]	--	0,7	--	--	--
Karbonat	Calcit	CaCO ₃	38,1	--	14,2	11,5	7,4
	Dolomit	CaMg(CO ₃) ₂	29,0	--	--	--	--
amorpher Anteil			11,3	13,0	13,6	13,8	25,9

EI: calcitischer Kies, Fraktion 2/8 mm

Gw: Grauwacke, Fraktion 11/16 mm

SoR: Kies-Edelsplitt Oberrhein, Fraktion 11/16 mm

KoR: Kies Oberrhein, Fraktion 8/16

EIII-OF: Kies mit Opalsandstein/Flint, Fraktion 2/8, bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion

2.6 Chemische Zusammensetzung

Tabelle A1 - 12: Chem. Zusammensetzung der Grauwacke in M.-%; bezogen auf die bei 105°C getrocknete Probe

Oxide	Grauwacke
SiO ₂	67,1
Al ₂ O ₃	16,5
Fe ₂ O ₃	4,9
CaO	1,0
MgO	1,7
K ₂ O ¹⁾	3,04
Na ₂ O ¹⁾	2,78
Na ₂ O _e ²⁾	4,78

1) nach DIN EN 196-21

2) $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,658 \text{ K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ [M.-%]

Anhang 2: Kennwerte der Betone

1 Charakteristische Kennwerte zur Betonzusammensetzung

Tabelle A2 - 1: Alkaligehalte aus Portlandzement und w/z-Werte der Normalbetone

Betone	B1					B2 / B3 / B4 / B5 / B6 / B7 / B8						B2a	
b = z+BZS [kg/m ³]	500					400						400	
w/b-Wert	0,5					0,45						0,5	
BZS [M.-%]	0	20	25	30	35	0	10	20	25	30	35	0	30
w/z-Wert	0,5	0,62	0,67	0,71	0,77	0,45	0,5	0,56	0,6	0,64	0,69	0,5	0,71
Zement	Alkaligehalt ¹⁾ des Betons [kg/m ³]												
K1 (1,21)	6,0	4,8	4,5	4,2	3,9	4,8	4,4	3,9	3,6	3,4	3,1	4,8	3,6
K2 (1,02)	--	--	--	--	--	4,1	--	--	--	2,9	--	--	--
K3 (0,76)	--	--	--	--	--	3,0	--	--	--	2,1	--	--	--
K4 (0,65)	--	--	--	--	--	2,6	--	--	--	1,8	--	--	--
K1 13%S	--	--	--	--	--	4,4 4,2 ²⁾	--	--	--	3,1 2,9 ²⁾	--	--	--
K1 42%S	--	--	--	--	--	4,0 2,8 ²⁾	--	--	--	--	--	--	--
K1 72%S	--	--	--	--	--	3,1 1,4 ²⁾	--	--	--	--	--	--	--

1) Alkaligehalt = Na₂O_e des Zements [M.-%]×Zementgehalt [kg/m³]

2) Theoretische Berechnung bei Eintrag der Alkalien alleine durch den Portlandzementklinker

Tabelle A2 - 2: Alkaligehalte aus Portlandzement und w/z-Werte der selbstverdichtenden Betone

Bestandteile [kg/m ³]	SVB1	SVB2	SVB2	SVB3
Zement	K1 (1,21) 600	K1 (1,21) 320	K4 (0,65) 320	K1 (1,21) 320
Flugasche F1	--	280	280	--
Kalksteinmehl	--	--	--	280
w/p-Wert	0,28	0,28	0,28	0,28
w/z-Wert	0,28	0,53	0,53	0,53
Alkaligehalt ¹⁾ des Betons [kg/m ³]	7,3	3,9	2,1	3,9

1) Alkaligehalt = Na₂O_e des Zements [M.-%]×Zementgehalt [kg/m³]

2 Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone

Tabelle A2 - 3: Frisch- und Festbetoneigenschaften der Normalbetone mit Grauwacke

Bezeichnung der Mischung	ρ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	ρ Festbeton	DF 28d
--	kg/m ³	Vol.-%	cm	--	kg/m ³	N/mm ²
B1 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 500kg/m ³ ; w/b = 0,5						
B1	2470	0,9	66	F6	2340	45
B1 / 20F1	2320	0,7	66	F6	2270	38
B1 / 25F1	2290	0,6	68	F6	2260	36
B1 / 30F1	2290	0,7	67	F6	2250	36
B1 / 35F1	2280	0,5	70	F6	2290	31
B2 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,45						
B2	2430	1,2	1,2 ¹⁾	C2	2400	50
B2 / 20KSM	2420	1,0	30	F1	2400	45
B2 / 30KSM	2420	1,3	30	F1	2370	41
B2 / 10F1	2420	1,1	35	F2	2400	47
B2 / 20F1	2420	0,8	36	F2	2400	45
B2 / 25F1	2410	0,9	38	F2	2390	41
B2 / 30F1	2390	1,0	38	F2	2370	42
B2 / 35F1	2410	1,2	34	F1	2360	44
B2 / 10F2	2400	1,5	36	F2	2420	54
B2 / 20F2	2420	1,0	36	F2	2400	51
B2 / 25F2	2430	0,8	34	F1	2390	51
B2 / 30F2	2410	1,2	36	F2	2390	48
B2 / 20F3	2410	1,1	35	F2	2380	48
B2 / 25F3	2410	1,1	32	F1	2370	44
B2 / 30F3	2400	1,1	31	F1	2350	43
B2a (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,5						
B2a	2410	0,7	44	F3	2390	43
B2a / 30F1	2380	0,4	53	F4	2330	36
B3 (K2 mit Na ₂ O _e = 1,02 M.-%); B4 (K3 mit Na ₂ O _e = 0,76 M.-%); B5 (K4 mit Na ₂ O _e = 0,65 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,45						
B3	2440	1,0	33	F1	2420	51
B3 / 30F1	2410	0,6	36	F2	2380	42
B4	2430	1,5	29	F1	2400	57
B4 / 30F1	2410	n.b.	31	F1	2350	46
B5	2440	0,8	35	F2	2410	54
B5 / 30F1	2410	0,8	37	F2	2360	38
B6 (K1 13%S mit Na ₂ O _e = 1,09 M.-%); B7 (K1 42%S mit Na ₂ O _e = 1,00 M.-%); B8 (K1 72%S mit Na ₂ O _e = 0,78 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,45						
B6	2420	0,9	34	F1	2400	50
B6 / 30F1	2390	1,3	38	F2	2370	39
B7	2450	0,8	34	F1	2390	46
B8	2410	0,9	37	F2	2400	45

1) Verdichtungsmaß

Tabelle A2 - 4: Frisch- und Festbetoneigenschaften der Normalbetone mit Splitt Oberrhein

Bezeichnung der Mischung	ρ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	ρ Festbeton	DF 28d
--	kg/m ³	Vol.-%	cm	--	kg/m ³	N/mm ²
B1 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 500kg/m ³ ; w/b = 0,5						
B1	2330	0,9	66	F6	2300	46
B1 / 20F1	2250	0,8	70	F6	2260	45
B1 / 25F1	2250	0,6	70	F6	2260	43
B1 / 30F1	2260	0,5	> 70	--	2240	38
B2 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,45						
B2	2380	1,4	34	F1	2380	53
B2 / 20F1	2390	0,7	40	F2	2360	51
B2 / 25F1	2370	1,0	39	F2	2340	48
B2 / 30F1	2370	1,0	39	F2	2330	47
B2 / 35F1	2360	0,8	44	F3	2330	50
B2 / 20F2	2380	0,8	39	F2	2360	55
B2 / 25F2	2380	0,7	45	F3	2350	55
B2 / 30F2	2390	0,5	45	F3	2360	50
B2 / 20F3	2370	0,9	34	F1	2340	51
B2 / 25F3	2360	1,0	33	F1	2340	52
B2 / 30F3	2350	1,0	32	F1	2340	49

Tabelle A2 - 5: Frisch- und Festbetoneigenschaften der Normalbetone mit Kies Oberrhein

Bezeichnung der Mischung	ρ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	ρ Festbeton	DF 28d
--	kg/m ³	Vol.-%	cm	--	kg/m ³	N/mm ²
B1 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 500kg/m ³ ; w/b = 0,5						
B1	2300	1,0	63	F6	2280	42
B1 / 20F1	2260	0,8	69	F6	2260	39
B1 / 30F1	2220	0,7	68	F6	2240	31
B2 (K1 mit Na ₂ O _e = 1,21 M.-%); b = 400kg/m ³ ; w/b = 0,45						
B2	2380	1,2	37	F2	2350	48
B2 / 20F1	2350	1,1	47	F3	2320	48
B2 / 20F1	2350	1,0	44	F3	2320	40

Tabelle A2 - 6: Frisch- und Festbetoneigenschaften der selbstverdichtenden Betone

Bezeichnung der Mischung	ρ Frischbeton	Luftgehalt	smb	T	ρ Festbeton	DF 28d
--	kg/m ³	Vol.-%	[mm]	[s]	kg/m ³	N/mm ²
GW SVB1	2400	3,0	460	n. m.	2400	72
GW SVB2 / K1	2370	1,4	685	22,0	2350	77
GW SVB2 / K4	2380	0,5	760	12,1	2380	68
GW SVB3	2410	1,1	680	29,3	2400	59
SoR SVB1	2410	1,7	640	42,4	2390	81
SoR SVB2 / K1	2340	1,1	770	16,9	2320	80
SoR SVB2 / K4	2350	0,3	760	13,3	2340	71
SoR SVB3	2360	1,6	730	17,6	2340	52

smb Setzfließmaß mit Blockierring

T Trichterauslaufzeit

n. m. nicht messbar

Anhang 3: Untersuchungsmethoden

1 Frisch- und Festbetonprüfungen

1.1 Frischbetoneigenschaften

An den Normalbetonen wurden das Ausbreit- bzw. Verdichtungsmaß, der Luftporengehalt und die Frischbetonrohddichte nach [DIN 1048-1] ermittelt. An den selbstverdichtenden Betonen wurden entsprechend der DAfStb-Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ [DAfStB 03] die Rohddichte, der Luftporengehalt, die Fließfähigkeit mit dem Setzfließmaß mit Blockier-ring und zur Beschreibung der Viskosität die Trichterauslaufzeit bestimmt. Die Versuche wurden rd. 10 bis 15 Minuten nach Wasserzugabe durchgeführt.

1.2 Festbetoneigenschaften

Die Rohdichten und Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge gemäß [DIN 1048-5] im Alter von 28 Tagen an jeweils 3 Probekörpern je Beton geprüft.

2 Prüfung auf Alkali-Kieselsäure Reaktion

2.1 Prüfung der potentiellen Alkalireaktivität der Gesteinskörnungen (Magdeburger Schnelltest)

Gesteinskörnungen, für die kein Prüfzeugnis hinsichtlich ihrer Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse nach Alkali-Richtlinie des [DAfStb 07] vorliegt, wurden hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität nach dem Magdeburger Schnelltest [Phil 04] geprüft. Dazu werden die zu untersuchenden Gesteine in die Kornfraktion 0,5 bis 2,0 gebrochen und eine etwaige Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Mörtel durch ein hohes Angebot an Alkalien im Zementleim, einer hohen Lagerungstemperatur und Lagerung über Wasser beschleunigt. An Mörtelprismen (40/40/160 mm³) werden Dehnungen gemessen. Nach 21 Tagen kann bereits eine eindeutige Aussage zur Alkalireaktivität der Gesteine getroffen werden. Der Versuch entspricht im Wesentlichen dem Alternativ-Schnelltestverfahren nach Alkali-Richtlinie, Anhang A; mit dem Unterschied, dass die Messung warm, d.h. bei der Lagerungstemperatur von 70°C erfolgt.

2.2 Prüfung in der 40°C Nebelkammer, in 20°C / 100 % r.F. und im Freilager

Die Betone wurden in Anlehnung an die Vorschriften der Alkali-Richtlinie, Teil 3, [DAfStb 07], auf ihre Alkaliempfindlichkeit geprüft.

Zur Beurteilung möglicher Treiberscheinungen durch Alkalireaktion wurden 3 Balken mit den Maßen 500/100/100 mm³ für die Dehnungsmessungen und ein Würfel mit 300 mm Kantenlänge für die Beobachtung einer möglichen Rissbildung hergestellt. Die Probekörper werden in einer Nebelkammer bei 40°C und 100% r.F. gelagert. Die Dehnungsmessung der

Balken erfolgt monatlich direkt nach der Entnahme der Probekörper aus der Nebelkammer bei 40°C. Ab dem Alter von einem Jahr werden die Messungen alle drei Monate durchgeführt. Die Dehnwerte beziehen sich auf die Nullmessung im Alter von einem Tag bei 20°C. Somit ist neben einer möglichen Dehnung aus Alkalireaktion auch immer die Temperatur- und Feuchtedehnung beinhaltet ($\epsilon_{\text{Temp, Feucht}} \sim 0,2$ bis $0,4$ mm/m). Parallel zu den Dehnungsmessungen werden an den Balken die Gewichtsänderungen bestimmt. An den jeweiligen Prüfterminen werden die Probekörper auf Risse, Abplatzungen und Gelausscheidungen hin untersucht.

Für die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen sind in der Alkali Richtlinie, Teil3, Grenzwerte für die Dehnung der Betonbalken von $0,6$ mm/m und der Rissbreite der Würfel von $0,2$ mm nach 9 Monaten Lagerung in der 40°C Nebelkammer angegeben. Da hier zum Teil langsam reagierende Gesteinskörnungen verwendet wurden, und um die Langzeitwirkung der Vermeidung einer schädigenden AKR durch Flugasche im Beton sicher belegen zu können, wurden ausgewählte Betone, die im vorgesehenen Prüfzeitraum keine schädigenden Alkalireaktionen gezeigt haben, bis zum Alter von 36 bzw. 48 Monaten in der Nebelkammer weitergelagert.

Von allen Betonen wurde ein Würfel mit 300 mm Kantenlänge hergestellt und im Freien gelagert. Diese Probekörper werden alle drei Monate auf eine mögliche Rissbildung hin untersucht und mindestens bis zum Alter von 5 Jahren der freien Bewitterung ausgesetzt.

2.3 Prüfung der Betone mit Duranglas bei 20 / 40°C über Wasser

Je Beton und Lagerungstemperatur wurden 3 Prismen mit den Maßen $40/40/160$ mm³ mit stirnseitig einbetonierten Meßzapfen für die Dehnungsmessungen hergestellt. Die Messung der Dehnungen erfolgte gemäß [DIN 52450]. Die Probekörper wurden luftdicht in Plastikbehältern bei 20 bzw. 40°C über Wasser gelagert. Die Dehnungsmessung der bei 40°C gelagerten Proben erfolgte direkt nach der Entnahme der Probekörper aus dem Prüfklima. Die Dehnwerte beziehen sich auf die Nullmessung im Alter von einem Tag bei 20°C. Somit ist neben einer möglichen Dehnung aus Alkalireaktion auch immer die Temperatur- und Feuchtedehnung beinhaltet ($\epsilon_{\text{Temp, Feucht}} \sim 0,2$ bis $0,4$ mm/m). Parallel zu den Dehnungsmessungen wurden die Gewichtsänderungen bestimmt. An den jeweiligen Prüfterminen wurden die Probekörper auf Risse, Abplatzungen und Gelausscheidungen hin untersucht.

3 Mineralogische Untersuchungen

3.1 Durchlichtmikroskopische Untersuchungen

Die Herstellung der Dünnschliffe und die petrographische Untersuchung an den Gesteinskörnungen erfolgte am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU München. Die Dicke der Dünnschliffe beträgt 20 µm.

3.2 Röntgenbeugung mit Rietveld-Analyse

Die Zerkleinerung der Proben erfolgte, wenn nötig, zunächst mit dem Backenbrecher und der Scheibenschwingmühle. Die Gesamtmenge von mindestens 1 kg (für Gesteinskörnungen) wurde nach dem Mahlgang in der Scheibenschwingmühle mit einem Riffelteiler und einem Viertelteiler auf die benötigte Probenmenge reduziert. Diese Menge (ca. 1 g) wurde nach dem Zerkleinern vollständig durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 32 µm gegeben und anschließend von oben texturarm in eine Standard-Küvette aus Edelstahl eingebracht.

Für die Bestimmung des amorphen Anteils (Glasgehalt) wurde Zinkoxid als innerer Standard in definierter Menge zur Probe mit dem Mörser 15 min lang zugemischt.

Die Röntgenbeugungsanalysen wurden mit einem Diffraktometer XRD 3003TT der Firma GE Inspection Technologies Ahrensburg GmbH & Co. KG durchgeführt. Für die Messungen wurde eine Cu-Longfocusröhre bei 40 kV und 40 mA verwendet. Die Messungen wurden in einem Messbereich von 5 bis 60° 2Theta bei einer Schrittweite von 0,025° und einer Zählzeit von 6 Sekunden pro Schritt durchgeführt.

Die Quantifizierung des Mineralbestandes und des Glasgehaltes der Flugaschen und der Gesteinskörnungen wurde mit der Rietveldmethode durchgeführt. Für die Quantifizierung wurde das Programm Autoquan (GE Inspection Technologies Ahrensburg GmbH & Co. KG) genutzt.

4 Chemische Untersuchungen

Die chemischen Untersuchungen an den Zementen und den Betonzusatzstoffen Flugasche und Kalksteinmehl wurden vorwiegend mit der Röntgenfluoreszenzanalyse durchgeführt. Die Parameter K_2O und Na_2O wurden nach [DIN EN 196-21] mit einem optischen Emissionsspektrometer mit induktionsgekoppeltem Plasma bestimmt. Weitere Untersuchungsmethoden sind gesondert angeführt.

5 Physikalische Untersuchungen

5.1 Dichte

Die Dichte wurde mit dem Heliumpyknometer AccuPyc 1330 der Firma Micromeritics ermittelt.

5.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung der Betonzusatzstoffe wurde mittels Laserbeugung bestimmt. Es wurde das Gerät Mastersizer 2000 der Firma Malvern verwendet. Die Dispergierung erfolgte in der Dispergiereinheit Hydro 2000S (A) mit Ultraschall. Als Dispergent wurde Propan-2-ol mit einem Brechungsindex von 1,39 verwendet.

5.3 Porengrößenverteilung

Die Kennwerte für das Porensystem von Betonen und Gesteinskörnungen wurden mittels Quecksilber-Druck Porosimetrie (Gerät AutoPore III der Firma Micromeritics) in einem Druckbereich von 0,004 bis 400 MPa ermittelt. Damit werden Porenradien von 170 μm bis 1,6 nm erfasst. Es wird eine Oberflächenspannung σ des Quecksilbers von 0,485 N/m und ein Benetzungswinkel θ zwischen Quecksilber und Gestein bzw. Beton von 130° angenommen. Für die Aufnahme von Gesteins- bzw. Betonproben wurde ein Penetrometer mit einem Volumen von 5,9 ml bzw. 18,9 ml verwendet.

Die Betonproben wurden aus den für die Porenlösungsauspressversuche hergestellten Probekörpern gewonnen, indem unmittelbar vor der Gewinnung der Porenlösung, aus dem Bodenbereich dieser Proben Stücke mit einem Durchmesser von rd. 2 cm herausgebrochen wurden. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst kein Grobkorn in den Probestücken enthalten war und die Probestücke frei von geschalteten Flächen waren.

Die Proben wurden 7 Tage in Propan-2-ol gelagert, danach bei 50°C bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend bis zur Prüfung im Exsikkator über Blaugel bei 3% r.F. gelagert.

Um die Einflüsse aus unterschiedlich großen Anteilen an Gesteinskörnern in den Betonproben auf die Ergebnisse gering zu halten, wurden Probenmengen mit einem Gewicht von rd. 10 g untersucht und jeweils eine Doppelbestimmung durchgeführt. In Abbildung A3 - 1 ist eine gute Wiederholbarkeit der Messung der Porengrößenverteilung zu erkennen, so dass von repräsentativen Ergebnissen bei der Verwendung von Betonproben ausgegangen werden kann.

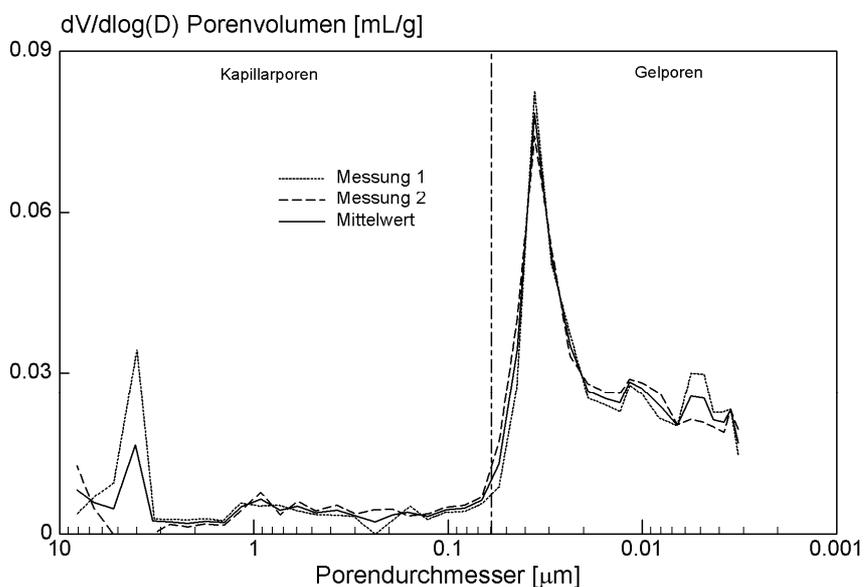


Abbildung A3 - 1: Wiederholbarkeit der Quecksilber-Druck Porosimetrie am Beton

6 Zusammensetzung der Porenlösung

6.1 Probekörper, Lagerung und Prüftermine

Die Proben wurden aus derselben Charge Beton wie für die Probekörper für die Betonprüfungen hergestellt. Stichpunktartig wurden zur Ergänzung der Betonversuche zusätzliche Leimmischungen hergestellt. Die Beton- bzw. Leimproben wurden in 500 ml bzw. 250 ml Polyethylen-Flaschen gefüllt und konservierend, d.h. kein Austausch mit der Umgebungsfeuchte, gelagert. Um Sedimentationserscheinungen zu vermeiden, wurden die Proben bis zum Erhärten im Probenwender gelagert. Nach einer Erhärungszeit von 24 Stunden bei 20°C wurden die Proben standardmäßig im jeweiligen Prüfklima bei 20°C, 40°C oder 60°C gelagert. Die Porenlösung wurde nach 28, 90 und 365 Tagen Lagerung im Prüfklima ausgepresst. Somit setzt sich das Gesamtalter der Proben aus einem Tag Erhärungszeit bei 20°C und der restlichen Lagerungszeit im jeweiligen Prüfklima zusammen.

6.2 Auspressverfahren

Das Auspressen der Porenlösung erfolgte mit Hilfe einer stählernen Auspressvorrichtung. Das Verfahren ist u. a. in [Long 73] beschrieben. Auf eine Grundplatte mit integriertem Porenwasser-Sammelsystem (ringförmige Vertiefung an der Oberseite mit Ablauf zur Mantelfläche) wird ein massiver Drucktopf gesetzt. Die auszupressende Probe wird in die Bohrung des Drucktopfes eingelegt. Die Größe der PE-Flaschen, in die die Proben gefüllt werden, wurde so gewählt, dass die Proben ohne Zerkleinerung in den Drucktopf gestellt werden können. Somit können rd. 350 ml Probe auf einmal ausgepresst werden. Auf die Probe werden eine 5 mm dicke Teflonscheibe zur Abdichtung und ein Druckverteilerstück gelegt. Dann wird über den Stempel die Kraft aus der Presse auf die Probe aufgebracht. Die ausgepresste Porenlösung sammelt sich auf der Grundplatte und läuft über den Sammelkanal nach außen. Dort wird über einen in die Bohrung eingeschobenen Silikonschlauch das Porenwasser in den Auffangbehälter geleitet, siehe Abbildung A3 - 2.



Abbildung A3 - 2: Schemadarstellung der Auspressvorrichtung für die Porenlösung von Beton

Die Proben wurden in der Regel 30 Minuten bis 3 Stunden nach Herausnehmen aus der Lagerungstemperatur bei einer Umgebungstemperatur von rund 20°C geprüft. Das Auspressen der Proben erfolgt in Abhängigkeit der Ergiebigkeit der Probe unter einem maximalen Druck von 600 bzw. 850 N/mm², die Laststeigerungsrate beträgt jeweils 0,7 N/mm² s. Nach Erreichen der Höchstlast wird der Druck so lange gehalten (5 bis 120 Minuten) bis genügend Porenlösung gewonnen wird. Nach [Page 83] und [Duch 94] hat der aufgebrauchte Auspressdruck keinen relevanten Einfluss auf die Zusammensetzung der gewonnenen Porenlösung.

Das aufgefangene Porenwasser wird durch einen Teflon-Membranspritzenfilter mit 0,45 µm Porengröße gedrückt; dadurch werden in der Porenlösung enthaltene Feinstteile herausgefiltert. Nach Beendigung dieser Arbeiten wird der Auffangbehälter mit der Porenlösung mit Stickstoff gespült und bis zur Analyse der Porenlösungszusammensetzung luftdicht gelagert. Dadurch wird eine Karbonatisierung und Verdampfung der Porenlösung verhindert.

Mit der Auspressvorrichtung kann auch von Betonen höheren Alters genügend Porenlösung für eine genaue chemische Analyse ausgepresst werden. In Tabelle A3 - 1 sind die Ergebnisse des Porenlösungsauspressversuchs von 3 Proben aus einer Charge Beton dargestellt. Da sich

eine gute Reproduzierbarkeit für die Porenlösung aus Beton mit 16 mm Größtkorn ergibt, wurde im Weiteren pro Prüftermin die Porenlösung von jeweils nur einer Probe ausgepresst.

Tabelle A3 - 1: Reproduzierbarkeit des Auspressversuchs; Betonalter 28 d; Lagerungstemperatur 40°C

Ion [mmol/l]	OH ⁻	Na ⁺	K ⁺
	394,2	145,7	354,7
Einzelwert	393,9	146,3	352,5
	403,0	147,4	355,4
Mittelwert	397,0	146,5	354,2
Standardabweichung	5,15	0,88	1,55
Variationskoeffizient [%]	1,30	0,60	0,44

6.3 Analyse der Porenlösung

An den bei 20 bzw. 40°C gelagerten Proben wurde standardmäßig die Natrium-, Kalium-, Aluminium, Silizium- und Hydroxidionenkonzentration der Porenlösung bestimmt. Nachdem sich herausgestellt hatte, dass bei höheren Temperaturen die Sulfationenkonzentration einen weiteren wichtigen Kennwert zur Beurteilung der Porenlösung darstellt, wurde an den später hergestellten, bei 60°C gelagerten Proben, diese ebenfalls ermittelt. Soweit zur Ergänzung auch noch die Porenlösung von bei 20°C oder 40°C gelagerten Proben gewonnen wurde, erfolgte nun an dieser ebenfalls die Bestimmung der Sulfationenkonzentration. Die Bestimmung der Hydroxidionenkonzentration erfolgte an einer Teilprobe durch Säure-Base-Titration gegen den Farbindikator Neutralrot. Die Sulfationenkonzentration wurde mit Ionenchromatographie ermittelt. Die Kationenkonzentrationen wurden mittels ICP OES (optische Emissionsspektroskopie mit gekoppelter Plasmaanregung; Hersteller Jobin Yvon, Ultima 2) an einer 1:50 verdünnten Lösung bestimmt.

7 Optische Mikroskopie am Beton

Eine eventuelle Schädigung des Betongefüges wurde an Dünnschliffen unter dem optischen Mikroskop unter Normal und UV-Licht untersucht. Von Betonproben mit 100 mm Kantenlänge wurden Scheiben mit einer Dicke von rd. 2 cm geschnitten. Aus dem Innenbereich dieser Scheiben wurden dann wiederum Proben für die Dünnschliffe mit einem Querschnitt von rund 40 auf 25 mm herausgeschnitten. Durch diese Vorgehensweise ist kein Einfluss aus Probekörpergeometrie auf z.B. die Rissbreiten des Betongefüges zu erwarten. Pro Beton wurden mindestens zwei in fluoreszierendes Kunstharz eingebettete Dünnschliffe hergestellt. Die Dicke der Dünnschliffe beträgt 20 µm.

Anhang 4: Dehnung bzw. Rissbildung der Betone

1 Prüfung mit der 40°C Nebelkammer

1.1 Normalbetone

1.1.1 Normalbetone mit Grauwacke als reaktive Gesteinskörnung

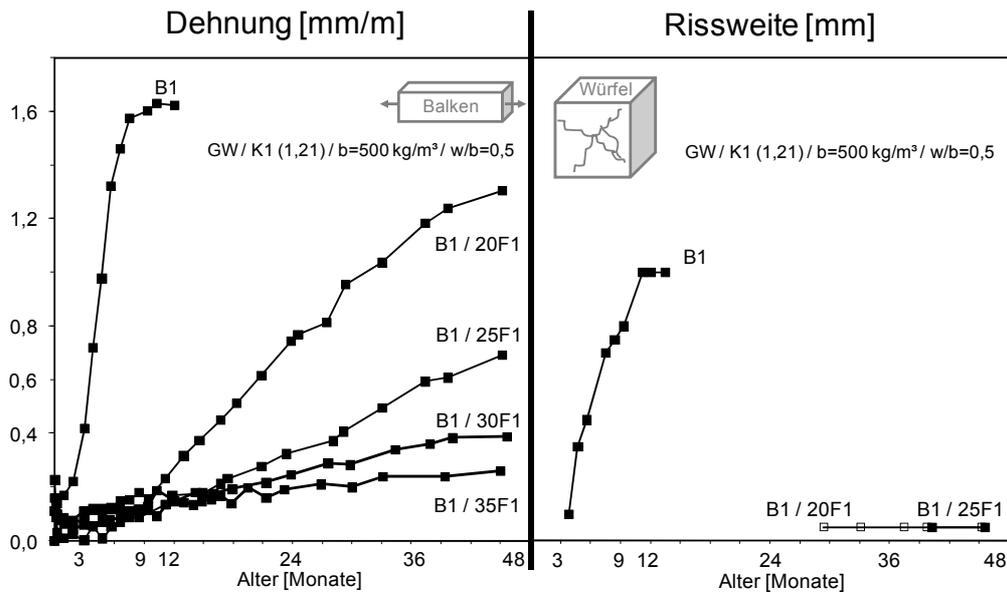


Abbildung A4 - 1: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B1 mit Flugasche F1; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

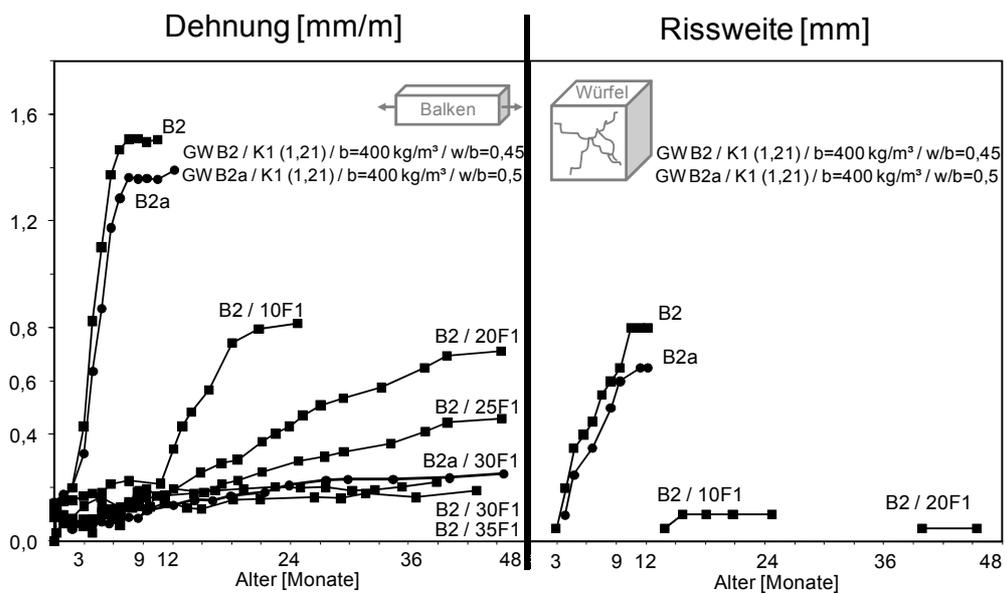


Abbildung A4 - 2: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 und B2a mit Flugasche F1; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

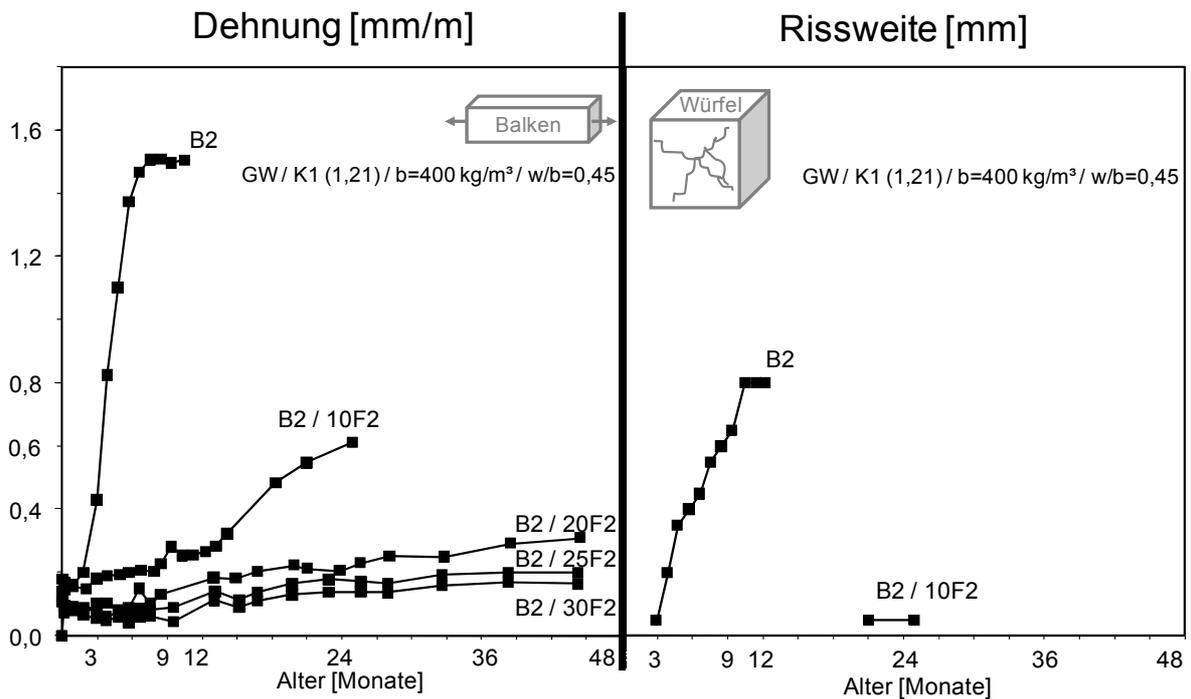


Abbildung A4 - 3: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Flugasche F2; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

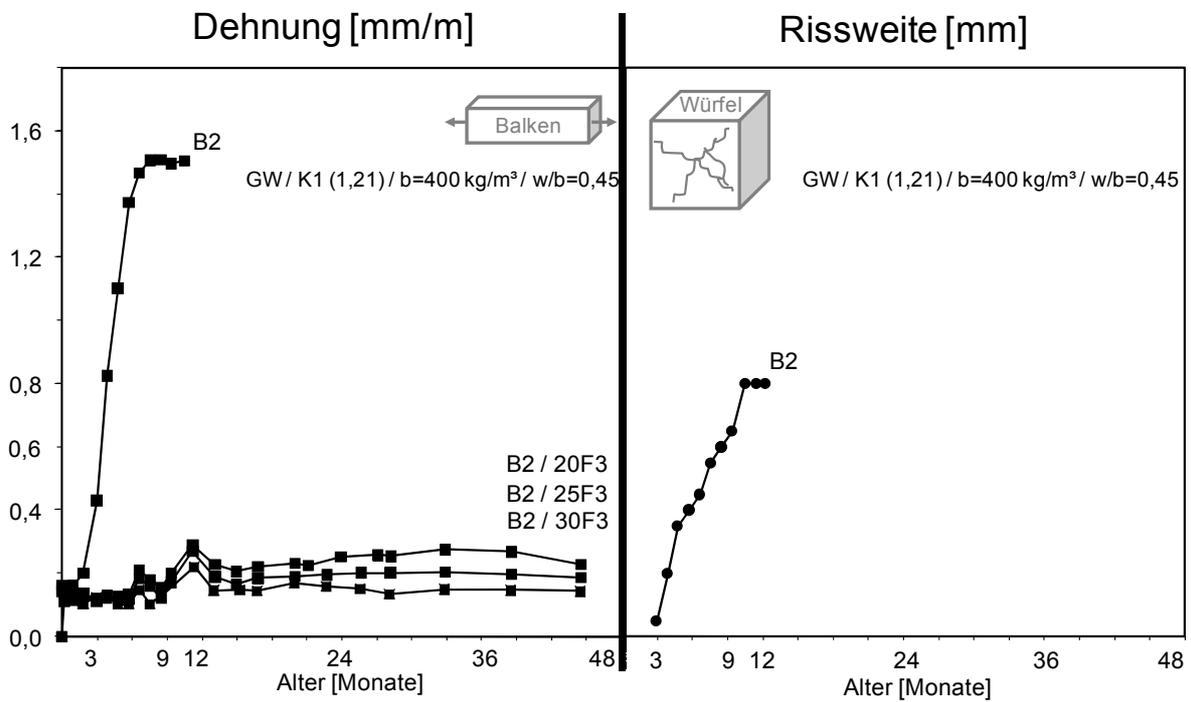


Abbildung A4 - 4: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Flugasche F3; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

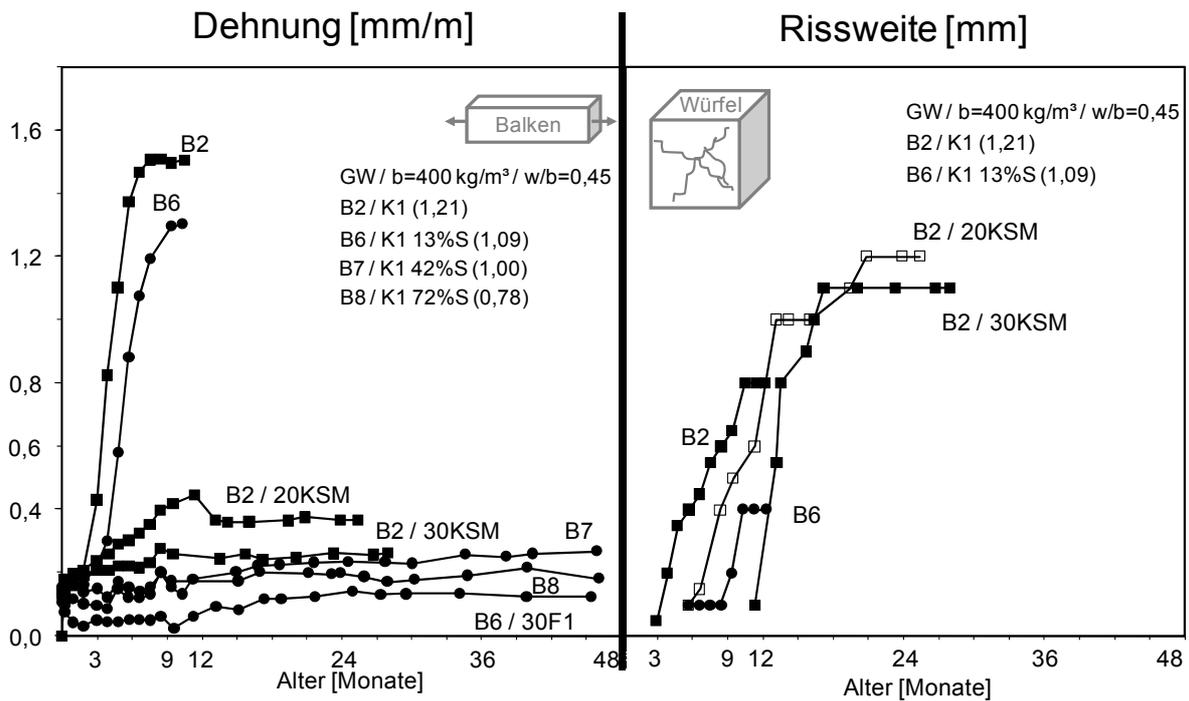


Abbildung A4 - 5: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Kalksteinmehl (KSM) und der Betone B6, B7 und B8 mit Hüttensand (S); Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

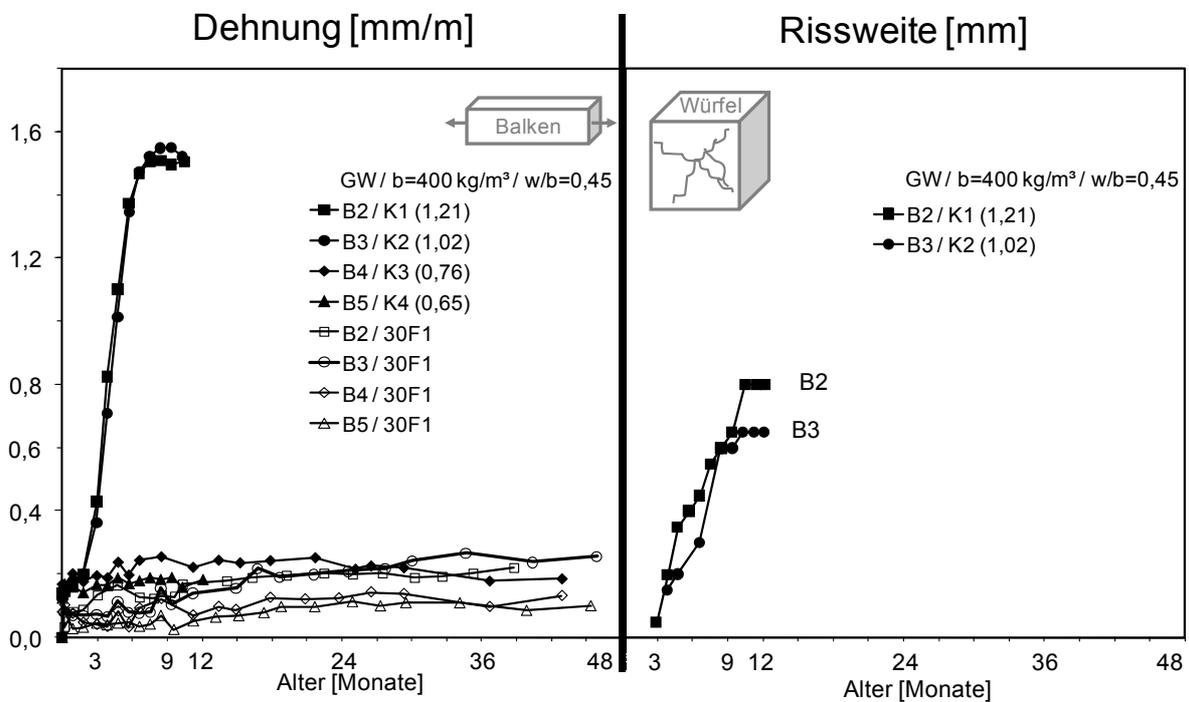


Abbildung A4 - 6: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2, B3, B4 und B5 mit den Portlandzementen K1, K2, K3 und K4 und mit 30 % Flugasche F1; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

1.1.2 Normalbetone mit Splitt bzw. Kies Oberrhein

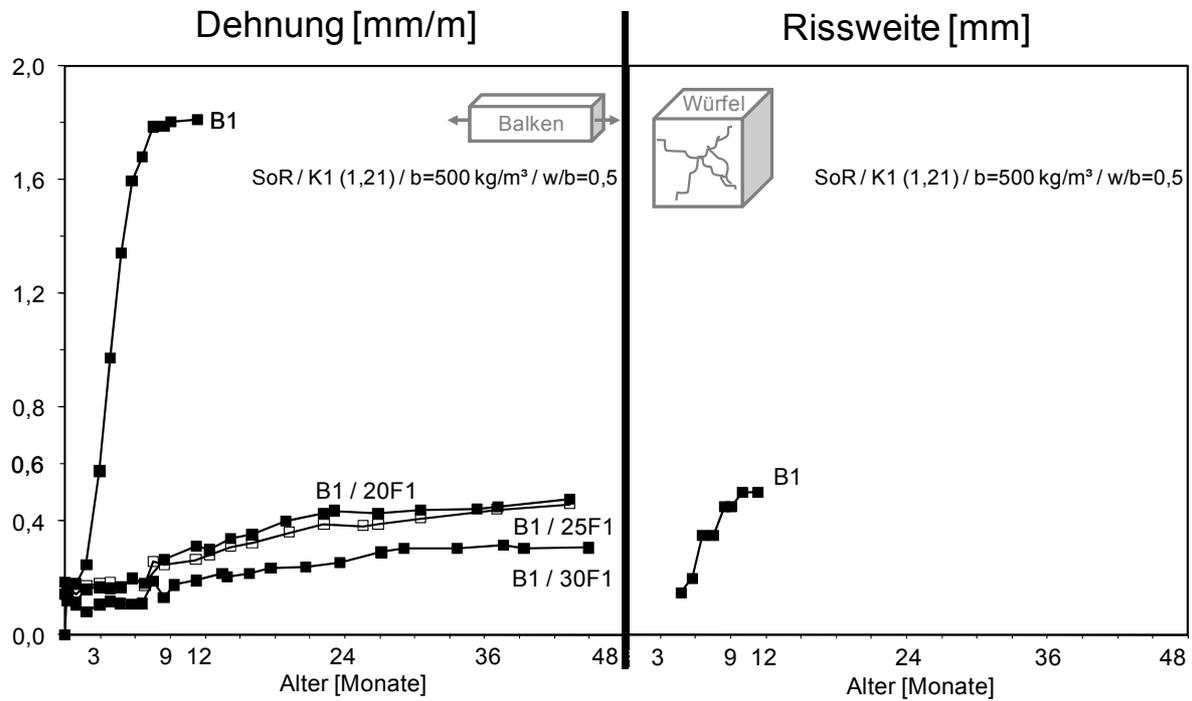


Abbildung A4 - 7: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B1 mit Flugasche F1; Splitt Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

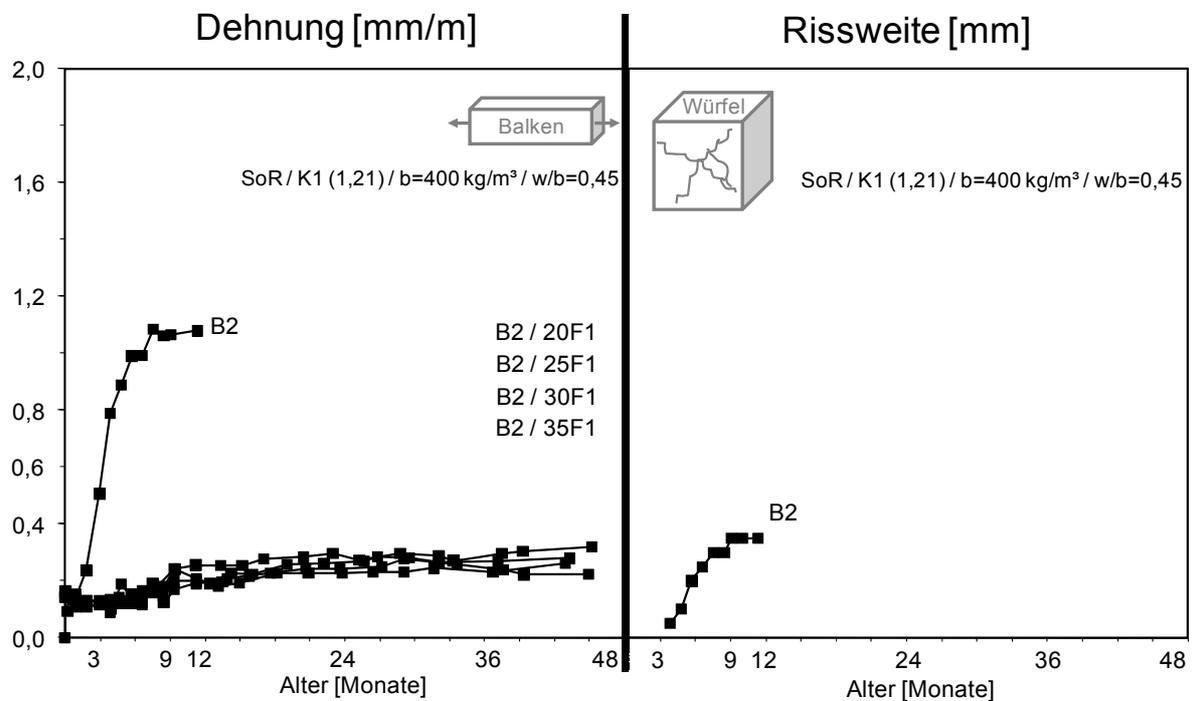


Abbildung A4 - 8: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Flugasche F1; Splitt Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

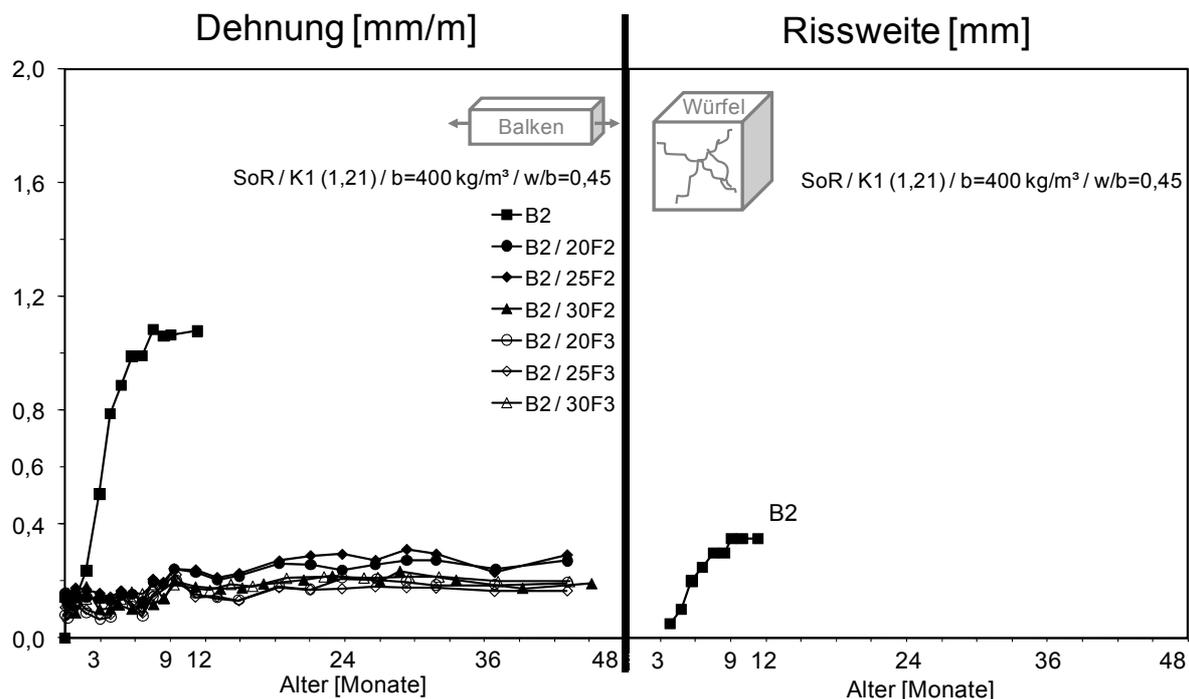


Abbildung A4 - 9: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Flugasche F2 bzw. F3; Splitt Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

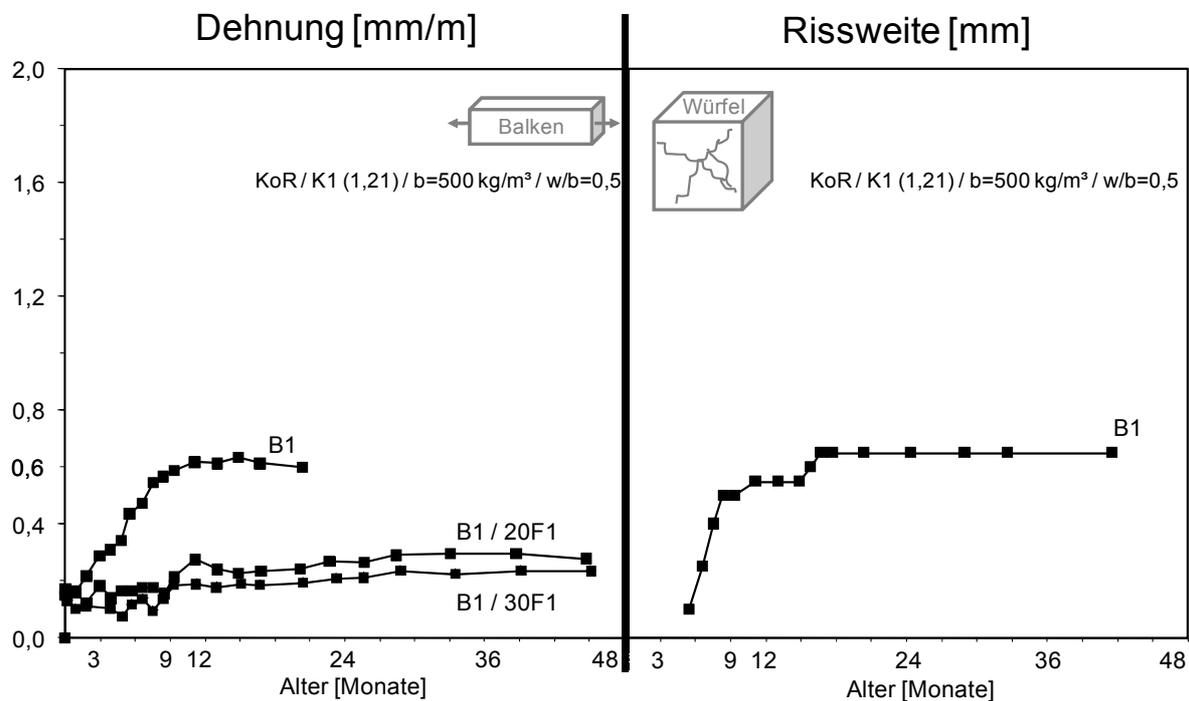


Abbildung A4 - 10: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B1 mit Flugasche F1; Kies Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

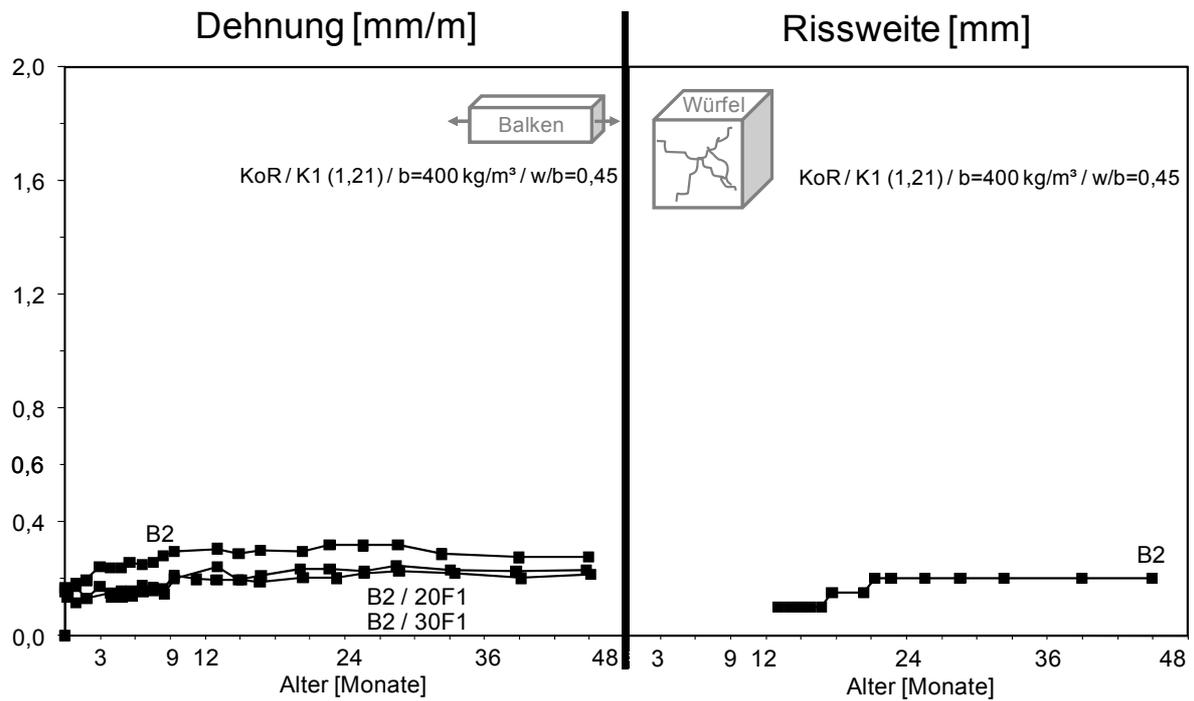


Abbildung A4 - 11: Dehnung und Rissentwicklung der Normalbetone B2 mit Flugasche F1; Kies Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

1.2 Selbstverdichtende Betone

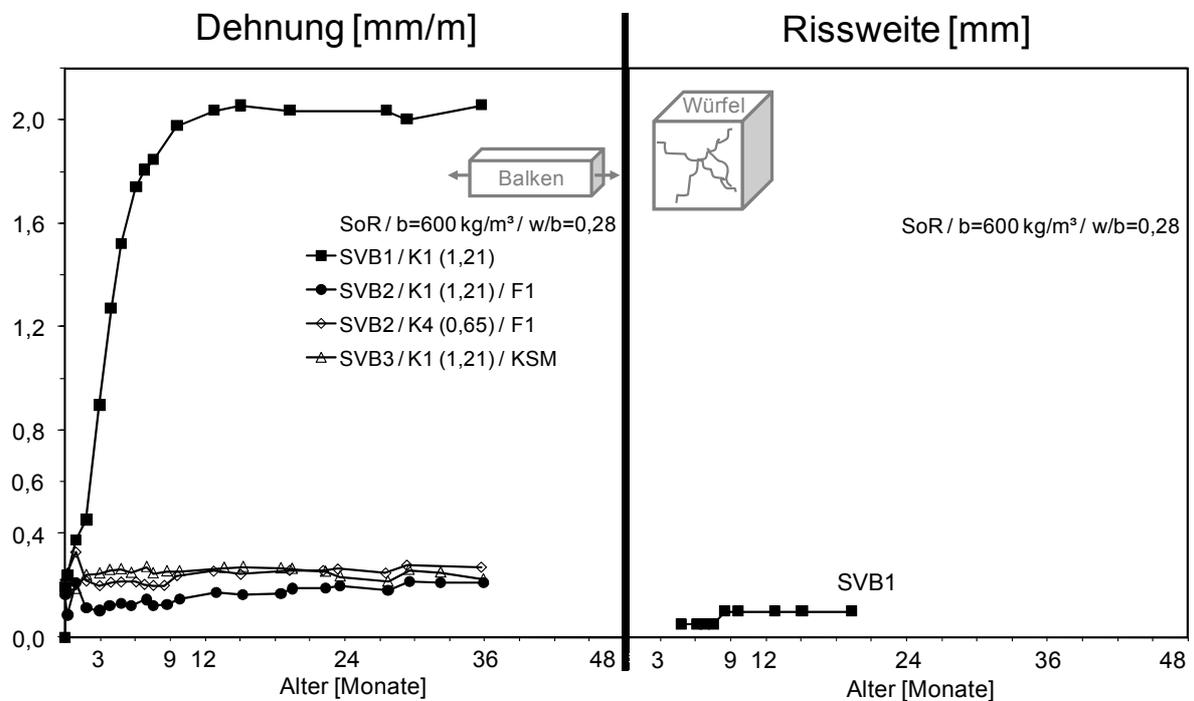


Abbildung A4 - 12: Dehnung und Rissentwicklung der selbstverdichtenden Betone; Splitt Oberrhein; 40°C-Nebelkammer

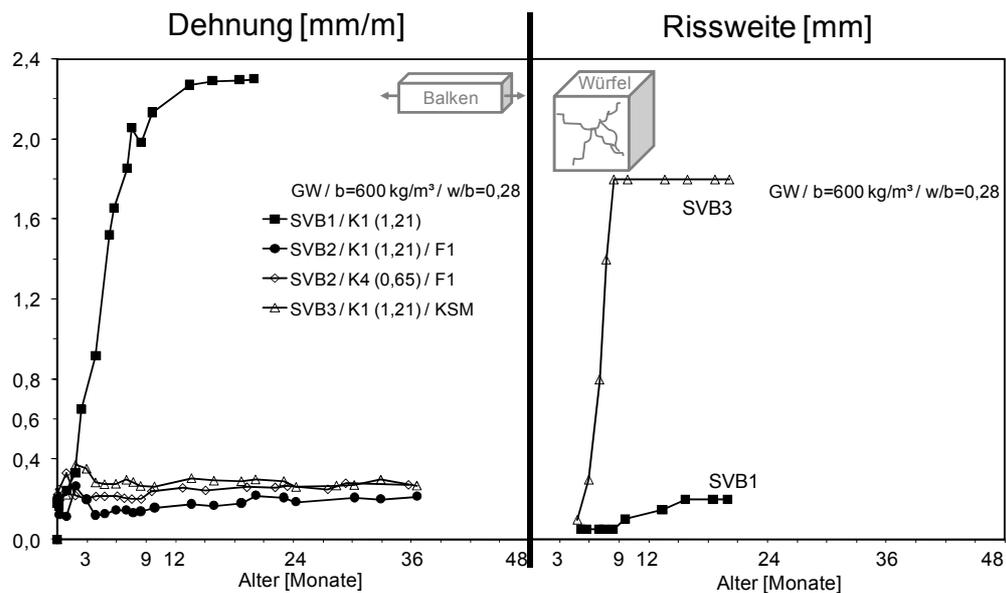


Abbildung A4 - 13: Dehnung und Rissentwicklung der selbstverdichtenden Betone; Grauwacke; 40°C-Nebelkammer

2 Prüfung mit dem Betonversuch bei 60°C über Wasser

Der „Betonversuch bei 60°C über Wasser“ wurde in Anlehnung an die Alkali-Richtlinie, Anhang B, durchgeführt [DAfStB 07]. Derzeit gibt es in Deutschland keine festen Grenzwerte für die Bewertung der Ergebnisse. Folgende Grenzwerte stehen derzeit zur Diskussion: 0,3 mm/m nach 3 Monaten für die Einstufung von Gesteinskörnungen und 0,2 mm/m nach 3 Monaten mit einer Erhöhung auf 0,3 mm/m zwischen 3 und 12 Monaten für die Performance-Prüfung von Betonen [Sieb 07].

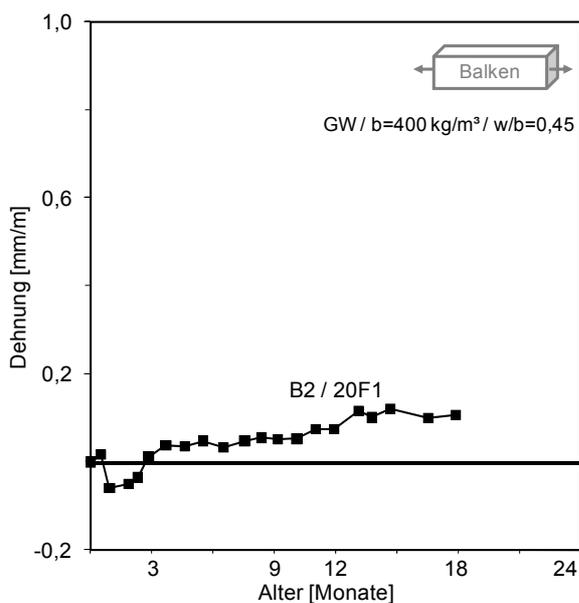


Abbildung A4 - 14: Dehnung des Normalbetons B2 mit 20% Flugasche F1; Grauwacke; 60°C-Betonversuch über Wasser

3 Prüfung von Betonen mit Duranglas bei 40 bzw. 20°C über Wasser

Tabelle A4 - 1: Enddehnung ε_e [mm/m] der Betone mit Duranglas nach Lagerung bei 20°C bzw. 40°C über Wasser

Beton		D1	D1a	D2	D3	D4	D5
ε_e	20°C	4,12	2,44	3,14	3,52	2,24	0,16
	40°C ¹⁾	3,87	2,28	3,04	2,75	1,72	0,08
Beton		D1 / 15F1	D1 / 20F1	D1 / 25F1	D1 / 30F1	D1 / 35F1	D1 / 40F1
ε_e	20°C	3,3	2,75	n.v.	1,99	n.v.	1,66
	40°C ¹⁾	2,59	2,36	1,99	1,81	1,45	1,19
Beton		D1 / 15F2	D1 / 20F2	D1 / 25F2	D1 / 30F2	D1 / 35F2	D1 / 40F2
ε_e	20°C	2,61	2,36	n.v.	1,79	n.v.	1,22
	40°C ¹⁾	2,28	1,9	n.v.	1,5	n.v.	0,79
Beton		D1 / 15F3	D1 / 20F3	D1 / 25F3	D1 / 30F3	D1 / 35F3	D1 / 40F3
ε_e	20°C	3,54	2,55	n.v.	2,2	n.v.	1,23
	40°C ¹⁾	2,63	2,06	1,94	1,32	0,68	0,19
Beton		D1 / 15KSM	D1 / 20KSM	D1 / 25KSM	D1 / 30KSM	D1 / 35KSM	D1 / 40KSM
ε_e	20°C	6,38	7,02	n.v.	8,8	n.v.	7,81
	40°C ¹⁾	3,87	3,66	5,02	4,62	5,23	4,66

n.v.: nicht vorhanden

1) 40°C-Werte um Temperaturdehnung von 0,2 mm/m korrigiert

Tabelle A4 - 2: Steigung m [mm/m/d] der Betone mit Duranglas nach Lagerung bei 20°C bzw. 40°C über Wasser

Beton		D1	D1a	D2	D3	D4	D5
m	20°C	0,022	0,021	0,021	0,017	0,012	0,001
	40°C	0,091	0,046	0,080	0,058	0,018	0,001
Beton		D1 / 15F1	D1 / 20F1	D1 / 25F1	D1 / 30F1	D1 / 35F1	D1 / 40F1
m	20°C	0,021	0,017	n.v.	0,012	n.v.	0,010
	40°C	0,063	0,051	0,042	0,035	0,023	0,016
Beton		D1 / 15F2	D1 / 20F2	D1 / 25F2	D1 / 30F2	D1 / 35F2	D1 / 40F2
m	20°C	0,017	0,014	n.v.	0,011	n.v.	0,007
	40°C	0,046	0,030	n.v.	0,016	n.v.	0,003
Beton		D1 / 15F3	D1 / 20F3	D1 / 25F3	D1 / 30F3	D1 / 35F3	D1 / 40F3
m	20°C	0,021	0,014	n.v.	0,015	n.v.	0,008
	40°C	0,068	0,052	0,045	0,027	0,012	0,007
Beton		D1 / 15KSM	D1 / 20KSM	D1 / 25KSM	D1 / 30KSM	D1 / 35KSM	D1 / 40KSM
m	20°C	0,022	0,024	n.v.	0,021	n.v.	0,022
	40°C	0,114	0,104	0,118	0,100	0,106	0,084

n.v.: nicht vorhanden

20°C: linearer Steigungsverlauf bis 28d

40°C: linearer Steigungsverlauf bis 90d

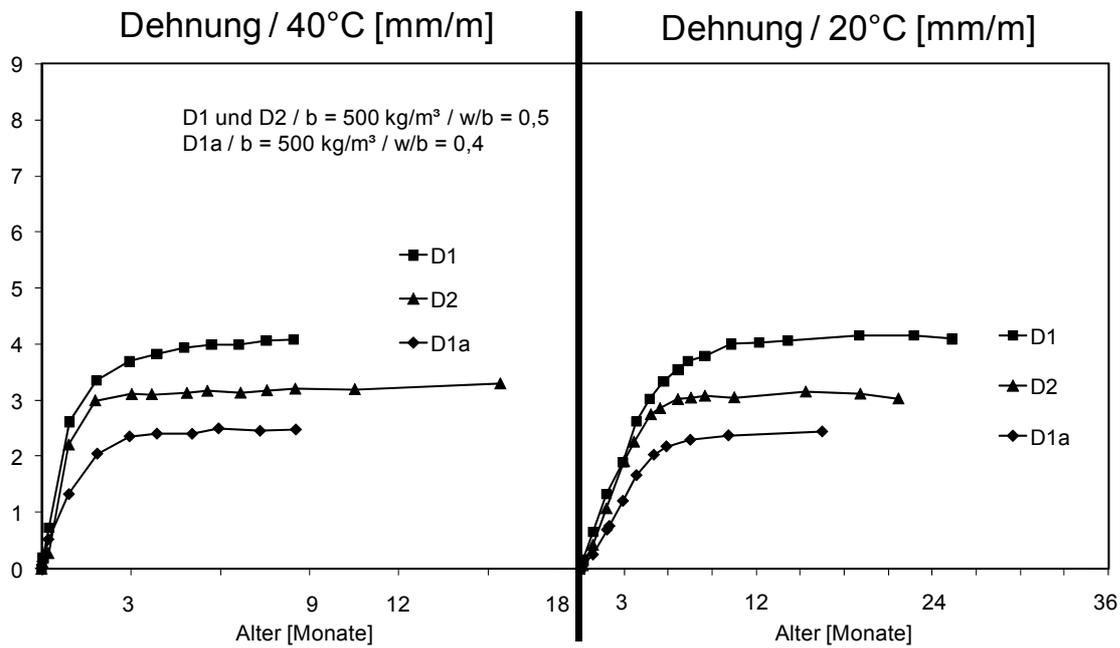


Abbildung A4 - 15: Dehnung der Normalbetone D1, D1a und D2; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

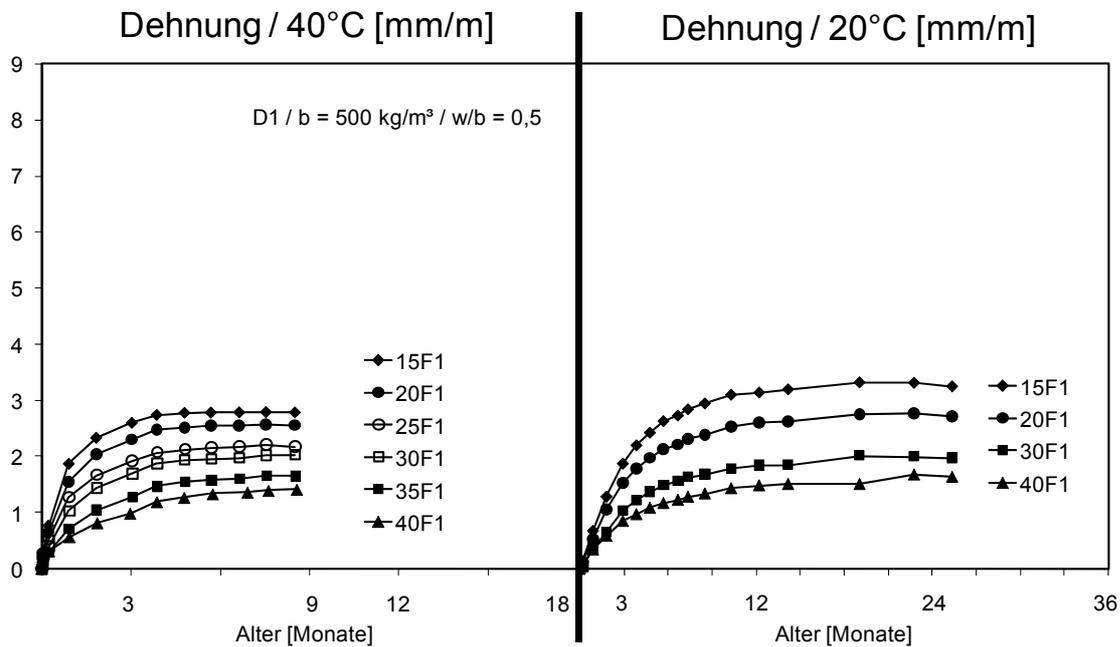


Abbildung A4 - 16: Dehnung der Normalbetone D1 mit Flugasche F1; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

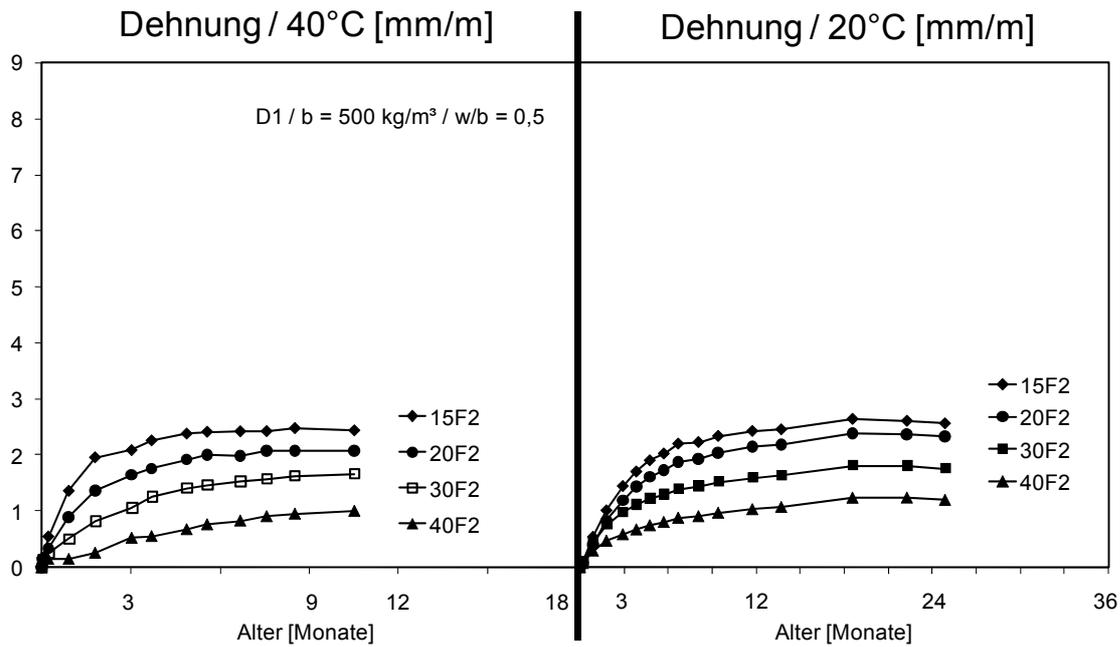


Abbildung A4 - 17: Dehnung der Normalbetone D1 mit Flugasche F2; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

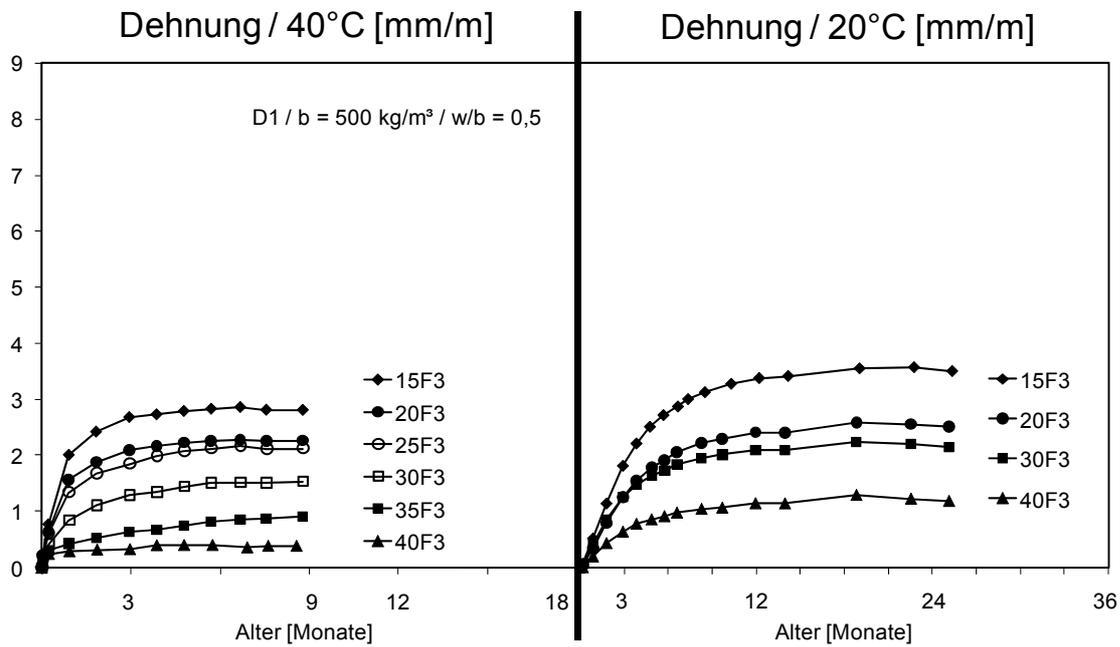


Abbildung A4 - 18: Dehnung der Normalbetone D1 mit Flugasche F3; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

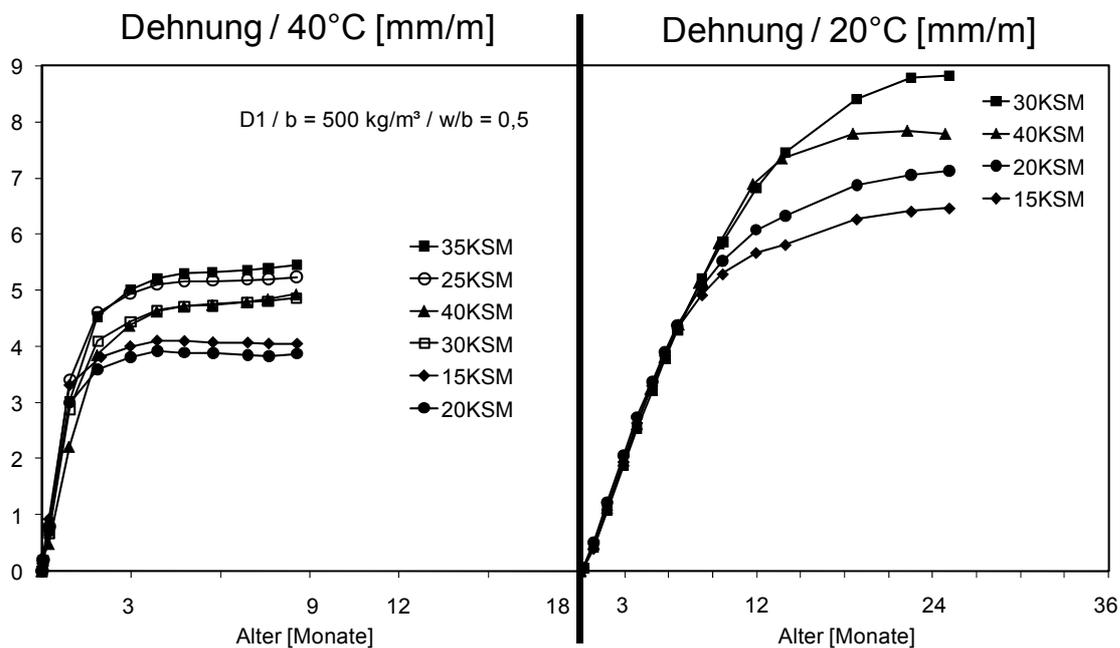


Abbildung A4 - 19: Dehnung der Normalbetone D1 mit Kalksteinmehl KSM; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

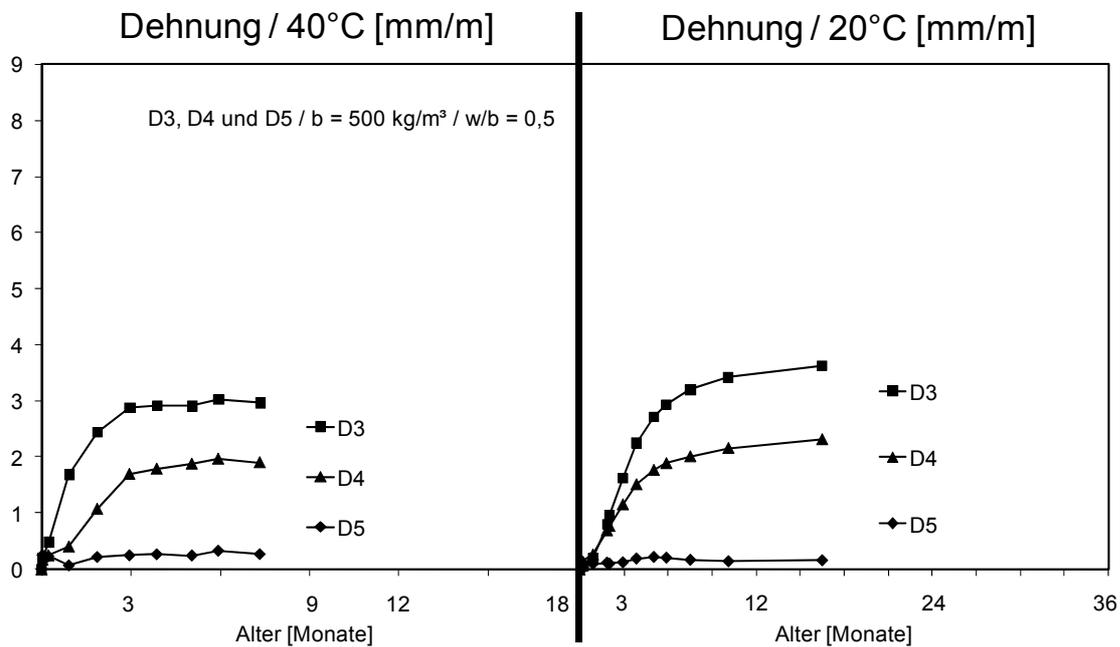


Abbildung A4 - 20: Dehnung der Normalbetone D3, D4 und D5 mit Hüttensand S; Duranglas; 40°C (links) bzw. 20°C (rechts) Lagerung über Wasser

Anhang 5: Porenlösung

1 Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Betone**1.1 Normalbetone mit Grauwacke**

Tabelle A5 - 1: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B1 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 20F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 25F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 30F1	20	28	460	119	400	0,6	0,62	n.b.
GW B1 / 35F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1	40	28	593	132	618	0,7	0,17	n.b.
GW B1 / 20F1	40	28	463	139	432	1,7	1,47	n.b.
GW B1 / 25F1	40	28	428	133	383	1,4	1,63	n.b.
GW B1 / 30F1	40	28	347	122	332	1,5	2,28	n.b.
GW B1 / 35F1	40	28	334	114	297	0,7	n.b.	n.b.
GW B1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 20F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 25F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 30F1	20	90	479	134	382	1,1	1,07	n.b.
GW B1 / 35F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1	40	90	603	135	584	4,3	0,19	n.b.
GW B1 / 20F1	40	90	455	144	412	2,6	0,77	n.b.
GW B1 / 25F1	40	90	423	140	371	3,1	1,24	n.b.
GW B1 / 30F1	40	90	373	130	327	1,5	1,24	n.b.
GW B1 / 35F1	40	90	326	118	291	0,8	n.b.	n.b.
GW B1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 20F1	20	365	495	153	450	1,4	1,05	n.b.
GW B1 / 25F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 35F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1	40	365	487	127	492	34,5	0,29	n.b.
GW B1 / 20F1	40	365	413	157	421	14,6	0,82	n.b.
GW B1 / 25F1	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B1 / 30F1	40	365	351	147	354	7,4	1,13	n.b.
GW B1 / 35F1	40	365	340	131	287	5,8	1,23	n.b.
GW B1	40	1170	372	117	325	85,7	0,12	28
GW B1 / 20F1	40	1136	382	145	334	50,7	0,42	47
GW B1 / 25F1	40	1137	356	141	308	25,8	0,61	45
GW B1 / 30F1	40	1158	318	136	275	22,4	0,71	42
GW B1 / 35F1	40	1394	306	128	275	7,2	0,79	36

Tabelle A5 - 2: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B2 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B2	20	28	738	150	666	1,1	0,47	n.b.
GW B2 / 10F1	20	28	653	130	606	1,0	0,19	29
GW B2 / 20F1	20	28	549	124	471	2,7	0,37	50
GW B2 / 25F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	20	28	447	120	386	3,1	0,60	43
GW B2 / 35F1	20	28	437	133	402	1,0	0,84	n.b.
GW B2	40	28	658	160	634	1,1	0,53	n.b.
GW B2 / 10F1	40	28	481	147	529	1,6	0,58	64
GW B2 / 20F1	40	28	418	146	452	1,2	1,31	n.b.
GW B2 / 25F1	40	28	391	141	408	1,1	1,58	n.b.
GW B2 / 30F1	40	28	384	141	341	1,7	2,02	n.b.
GW B2 / 35F1	40	28	354	129	319	1,3	1,65	n.b.
GW B2	60	28	375	126	505	2,9	0,02	146
GW B2 / 10F1	60	28	318	154	477	2,5	0,24	175
GW B2 / 20F1	60	28	317	147	400	4,7	0,45	137
GW B2 / 25F1	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	60	28	268	145	349	1,6	0,65	132
GW B2 / 35F1	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2	20	90	682	155	658	0,8	0,42	n.b.
GW B2 / 10F1	20	90	649	140	580	0,8	0,37	43
GW B2 / 20F1	20	90	428	136	402	8,8	1,39	59
GW B2 / 25F1	20	90	479	122	437	1,7	1,62	59
GW B2 / 30F1	20	90	442	141	376	2,1	1,60	45
GW B2 / 35F1	20	90	435	138	354	1,3	1,16	n.b.
GW B2	40	90	599	153	618	3,0	0,44	n.b.
GW B2 / 10F1	40	90	483	142	480	1,5	0,36	66
GW B2 / 20F1	40	90	441	149	423	2,9	0,66	n.b.
GW B2 / 25F1	40	90	413	142	379	2,3	1,11	n.b.
GW B2 / 30F1	40	90	363	148	341	1,7	1,79	n.b.
GW B2 / 35F1	40	90	339	129	301	3,3	1,67	54
GW B2	60	90	275	139	399	3,0	0,51	159
GW B2 / 10F1	60	90	270	150	398	10,8	0,90	164
GW B2 / 20F1	60	90	280	157	357	2,1	0,66	139
GW B2 / 25F1	60	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	60	90	252	150	337	2,2	0,82	132
GW B2 / 35F1	60	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2	20	365	687	163	690	2,9	0,60	68
GW B2 / 10F1	20	365	566	147	514	4,7	0,77	73
GW B2 / 20F1	20	365	454	141	425	1,4	0,78	44
GW B2 / 25F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	20	365	413	143	369	1,7	1,60	43
GW B2 / 35F1	20	365	470	158	444	1,7	1,28	n.b.
GW B2	40	365	413	122	462	27,1	0,22	n.b.
GW B2 / 10F1	40	365	411	130	399	7,1	0,68	70
GW B2 / 20F1	40	365	384	154	418	8,1	0,81	n.b.
GW B2 / 25F1	40	365	365	145	374	6,4	0,92	n.b.
GW B2 / 30F1	40	365	337	151	327	7,4	1,04	61
GW B2 / 35F1	40	365	309	128	289	3,3	1,10	n.b.

Tabelle A5 - 3: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B2 / F1 (Fortsetzung)

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B2	60	365	245	153	366	2,1	0,08	142
GW B2 / 10F1	60	365	249	156	391	8,4	0,15	144
GW B2 / 20F1	60	365	239	148	357	1,8	0,22	127
GW B2 / 25F1	60	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	60	365	228	148	324	2,8	0,35	116
GW B2 / 35F1	60	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2	40	927	331	133	302	49,7	0,25	42
GW B2	40	1170	289	116	287	30,5	0,18	n.b.
GW B2 / 10F1	40	714	378	132	361	14,7	0,38	55
GW B2 / 20F1	40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 25F1	40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F1	40	927	296	138	270	10,3	0,70	46
GW B2 / 35F1	40	1044	302	130	287	7,1	0,75	43

Tabelle A5 - 4: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B2 / F2

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B2 / 10F2	20	28	614	113	531	3,8	0,41	47
GW B2 / 20F2	20	28	515	104	438	3,3	0,61	39
GW B2 / 25F2	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	20	28	461	105	405	0,8	0,88	n.b.
GW B2 / 10F2	40	28	476	109	433	3,0	0,74	65
GW B2 / 20F2	40	28	426	117	425	1,4	1,70	n.b.
GW B2 / 25F2	40	28	381	108	377	1,5	1,72	n.b.
GW B2 / 30F2	40	28	360	104	347	1,6	1,64	n.b.
GW B2 / 10F2	60	28	328	122	454	2,2	0,23	151
GW B2 / 20F2	60	28	298	112	391	1,9	0,52	127
GW B2 / 25F2	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	60	28	259	102	328	2,0	0,81	103
GW B2 / 10F2	20	90	551	124	510	1,2	0,92	65
GW B2 / 20F2	20	90	479	122	437	1,7	1,62	58
GW B2 / 25F2	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	20	90	415	104	356	1,1	1,71	n.b.
GW B2 / 10F2	40	90	439	121	450	3,0	1,10	82
GW B2 / 20F2	40	90	388	110	391	1,7	1,16	n.b.
GW B2 / 25F2	40	90	365	104	351	1,5	1,25	n.b.
GW B2 / 30F2	40	90	347	97	317	1,3	1,88	n.b.
GW B2 / 10F2	60	90	313	128	429	3,4	0,54	148
GW B2 / 20F2	60	90	284	127	383	2,2	0,85	129
GW B2 / 25F2	60	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	60	90	252	112	337	1,2	0,99	112
GW B2 / 10F2	20	365	515	126	487	2,3	0,64	52
GW B2 / 20F2	20	365	444	116	411	1,8	1,27	41
GW B2 / 25F2	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	20	365	413	143	369	1,7	1,60	43
GW B2 / 10F2	40	365	412	118	424	5,4	0,55	63
GW B2 / 20F2	40	420	341	107	372	6,0	1,00	45
GW B2 / 25F2	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	40	420	303	104	336	2,5	1,24	39
GW B2 / 10F2	60	365	271	133	401	9,5	0,17	127
GW B2 / 20F2	60	365	253	129	391	2,9	0,36	128
GW B2 / 25F2	60	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F2	60	365	219	116	331	1,4	0,49	106

Tabelle A5 - 5: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B2 / F3

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B2 / 20F3	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 25F3	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F3	20	28	410	83	351	1,7	0,66	30
GW B2 / 20F3	40	28	371	97	367	0,8	0,52	n.b.
GW B2 / 25F3	40	28	331	90	325	0,8	0,67	n.b.
GW B2 / 30F3	40	28	304	84	283	0,8	0,74	n.b.
GW B2 / 20F3	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 25F3	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F3	20	90	353	84	299	4,6	0,77	27
GW B2 / 20F3	40	90	342	92	335	1,0	0,40	n.b.
GW B2 / 25F3	40	90	311	85	300	1,3	0,72	n.b.
GW B2 / 30F3	40	90	267	75	248	2,7	0,85	31
GW B2 / 20F3	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 25F3	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F3	20	365	304	82	257	1,1	0,60	19
GW B2 / 20F3	40	420	297	88	309	1,9	0,24	30
GW B2 / 25F3	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30F3	40	365	232	74	234	0,8	0,33	n.b.
GW B2 / 20F3	40	1092	271	81	243	3,9	0,32	23
GW B2 / 25F3	40	1401	236	81	239	3,2	0,50	32
GW B2 / 30F3	40	1092	222	70	191	2,6	0,35	16

Tabelle A5 - 6: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B2 / KSM

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B2 / 20KSM	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30KSM	20	28	498	100	445	0,6	0,09	n.b.
GW B2 / 20KSM	40	28	543	120	512	0,6	0,21	n.b.
GW B2 / 30KSM	40	28	458	109	435	0,6	0,14	n.b.
GW B2 / 20KSM	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 30KSM	20	90	497	103	444	0,3	0,26	n.b.
GW B2 / 20KSM	40	90	481	117	464	0,8	0,08	n.b.
GW B2 / 30KSM	40	90	430	109	406	1,0	0,14	n.b.
GW B2 / 20KSM	20	365	584	115	520	1,5	0,27	n.b.
GW B2 / 30KSM	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B2 / 20KSM	40	365	335	102	331	7,0	0,22	n.b.
GW B2 / 30KSM	40	365	325	93	284	4,2	0,22	n.b.

Tabelle A5 - 7: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B3 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B3	40	28	534	126	587	0,6	0,11	n.b.
GW B3 / 30F1	40	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B3	40	90	533	195	468	2,2	0,22	n.b.
GW B3 / 30F1	40	90	364	166	292	2,8	1,31	n.b.
GW B3	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B3 / 30F1	20	365	381	171	311	1,6	1,43	n.b.
GW B3	40	365	394	168	343	15,2	0,25	n.b.
GW B3 / 30F1	40	365	348	170	292	4,4	1,05	n.b.
GW B3	40	1172	302	160	249	30,4	0,29	43
GW B3 / 30F1	40	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tabelle A5 - 8: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B4 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B4	20	28	435	99	354	0,4	0,12	10
GW B4 / 30F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B4	40	28	406	103	322	0,4	0,20	14
GW B4 / 30F1	40	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B4	20	90	441	106	354	1,1	0,22	15
GW B4 / 30F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B4	40	90	372	105	305	0,6	0,16	18
GW B4 / 30F1	40	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B4	20	365	444	114	365	3,1	0,38	20
GW B4 / 30F1	20	365	331	123	229	0,9	0,89	15
GW B4	40	365	311	102	248	3,7	0,40	21
GW B4 / 30F1	40	365	281	121	208	1,7	0,68	24
GW B4	40	1062	281	116	224	7,2	0,20	n.b.
GW B4	40	1343	276	118	218	4,9	0,20	27
GW B4 / 30F1	40	1343	254	126	196	2,9	0,62	28

Tabelle A5 - 9: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B5 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B5	20	28	319	132	190	0,2	0,17	5
GW B5 / 30F1	20	28	282	130	173	0,2	0,21	n.b.
GW B5	40	28	316	142	180	0,3	0,14	5
GW B5 / 30F1	40	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B5	60	28	247	144	160	0,8	0,00	39
GW B5 / 30F1	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B5	20	90	324	145	186	0,3	0,14	6
GW B5 / 30F1	20	90	295	136	174	0,5	0,53	n.b.
GW B5	40	90	325	156	190	0,3	0,12	n.b.
GW B5 / 30F1	40	90	264	126	161	1,1	1,16	n.b.
GW B5	60	90	191	154	127	1,0	0,49	51
GW B5 / 30F1	60	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B5	20	365	344	152	194	3,8	0,43	10
GW B5 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B5	40	365	263	144	155	3,8	0,32	n.b.
GW B5 / 30F1	40	365	240	134	172	1,6	0,77	n.b.
GW B5	60	365	184	184	133	1,5	0,05	61
GW B5 / 30F1	60	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B5	40	1168	248	154	146	2,0	0,11	n.b.
GW B5 / 30F1	40	1441	229	138	161	2,4	0,70	31

Tabelle A5 - 10: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B6 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B6	20	28	566	118	517	2,9	0,32	22
GW B6 / 30F1	20	28	374	111	337	0,5	0,52	n.b.
GW B6	40	28	515	125	486	1,1	0,19	33
GW B6 / 30F1	40	28	308	116	282	1,0	1,61	n.b.
GW B6	20	90	619	127	533	1,3	0,21	38
GW B6 / 30F1	20	90	384	123	310	0,8	1,06	n.b.
GW B6	40	90	496	132	491	2,1	0,35	n.b.
GW B6 / 30F1	40	90	308	115	267	1,2	0,99	n.b.
GW B6	20	365	549	129	478	3,5	0,66	51
GW B6 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW B6	40	365	385	125	408	10,4	0,36	n.b.
GW B6 / 30F1	40	365	287	119	263	2,8	0,89	n.b.
GW B6	40	1170	305	111	278	17,5	0,18	44
GW B6 / 30F1	40	1441	227	119	234	4,9	0,72	53

Tabelle A5 - 11: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons GW B7

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW B7	20	28	438	98	363	1,1	0,27	11
GW B7	40	28	383	102	318	1,0	0,25	16
GW B7	20	90	427	102	336	0,7	0,28	21
GW B7	40	90	357	106	341	1,2	0,22	29
GW B7	20	365	387	102	310	4,9	0,53	37
GW B7	40	365	286	94	279	3,2	0,40	46
GW B7	40	1192	247	98	251	2,3	0,21	n.b.

Tabelle A5 - 14: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons SoR B2 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
SoR B2	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 20F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F1	20	28	489	123	422	1,2	0,55	n.b.
SoR B2 / 35F1	20	28	434	118	359	1,0	0,40	n.b.
SoR B2	40	28	552	126	603	2,1	0,30	n.b.
SoR B2 / 20F1	40	28	434	141	424	3,5	1,17	n.b.
SoR B2 / 25F1	40	28	419	137	381	3,8	1,26	n.b.
SoR B2 / 30F1	40	28	396	131	352	3,5	1,49	n.b.
SoR B2 / 35F1	40	28	357	123	307	2,9	1,34	n.b.
SoR B2	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 20F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F1	20	90	467	139	382	1,5	0,72	n.b.
SoR B2 / 35F1	20	90	432	135	344	2,2	0,75	n.b.
SoR B2	40	90	511	119	529	16,0	0,10	n.b.
SoR B2 / 20F1	40	90	421	141	403	15,6	0,62	n.b.
SoR B2 / 25F1	40	90	395	138	363	14,9	0,85	n.b.
SoR B2 / 30F1	40	90	375	131	320	6,3	1,08	n.b.
SoR B2 / 35F1	40	90	345	127	296	4,3	0,77	n.b.
SoR B2	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 20F1	20	365	441	149	428	11,0	0,70	n.b.
SoR B2 / 25F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 35F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2	40	365	354	112	374	23,0	0,17	n.b.
SoR B2 / 20F1	40	365	380	142	356	32,1	0,59	n.b.
SoR B2 / 25F1	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F1	40	365	312	128	285	15,1	0,78	n.b.
SoR B2 / 35F1	40	365	295	115	246	17,5	0,51	23
SoR B2	40	1092	237	90	183	12,6	0,19	15
SoR B2 / 20F1	40	1092	256	112	197	23,6	0,27	18
SoR B2 / 25F1	40	1092	265	120	204	26,3	0,32	19
SoR B2 / 30F1	40	1092	259	115	194	15,7	0,39	18
SoR B2 / 35F1	40	1092	229	116	180	15,3	0,40	19

Tabelle A5 - 15: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons SoR B2 / F2

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
SoR B2 / 20F2	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F2	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F2	20	28	428	104	394	0,9	0,87	n.b.
SoR B2 / 20F2	40	28	424	111	395	2,6	1,29	n.b.
SoR B2 / 25F2	40	28	385	105	361	1,9	1,24	n.b.
SoR B2 / 30F2	40	28	356	101	337	2,4	1,87	n.b.
SoR B2 / 20F2	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F2	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F2	20	90	409	107	356	1,8	1,46	n.b.
SoR B2 / 20F2	40	90	412	112	395	11,1	1,00	n.b.
SoR B2 / 25F2	40	90	377	103	344	7,3	1,14	n.b.
SoR B2 / 30F2	40	90	362	104	338	5,0	1,43	n.b.
SoR B2 / 20F2	20	365	417	112	399	4,0	1,12	35
SoR B2 / 25F2	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F2	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 20F2	40	365	340	106	345	27,0	0,41	41
SoR B2 / 25F2	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F2	40	365	331	107	313	24,0	0,75	n.b.
SoR B2 / 20F2	40	1092	289	96	227	16,2	0,32	19
SoR B2 / 25F2	40	1092	249	97	215	20,3	0,32	18
SoR B2 / 30F2	40	1092	252	92	212	16,6	0,46	17

Tabelle A5 - 16: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons SoR B2 / F3

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
SoR B2 / 20F3	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F3	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F3	20	28	411	102	392	1,6	0,32	n.b.
SoR B2 / 20F3	40	28	311	91	345	1,9	0,32	n.b.
SoR B2 / 25F3	40	28	336	84	304	1,4	0,44	n.b.
SoR B2 / 30F3	40	28	300	79	276	1,2	0,43	n.b.
SoR B2 / 20F3	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 25F3	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F3	20	90	362	86	318	0,9	0,25	n.b.
SoR B2 / 20F3	40	90	307	86	312	5,2	0,17	n.b.
SoR B2 / 25F3	40	90	284	77	266	3,8	0,27	n.b.
SoR B2 / 30F3	40	90	276	75	252	1,7	0,32	n.b.
SoR B2 / 20F3	20	365	343	87	321	5,3	0,37	19
SoR B2 / 25F3	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F3	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 20F3	40	365	266	74	245	7,5	0,24	17
SoR B2 / 25F3	40	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
SoR B2 / 30F3	40	365	232	71	218	8,4	0,11	16
SoR B2 / 20F3	40	1092	202	71	158	9,2	0,19	9
SoR B2 / 25F3	40	1092	201	69	158	7,2	0,21	11
SoR B2 / 30F3	40	1092	198	66	153	7,6	0,21	9

Tabelle A5 - 17: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons KoR B1 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
KoR B1	20	28	642	114	559	3,4	0,41	26
KoR B1 / 20F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B1 / 30F1	20	28	413	118	340	0,9	0,59	n.b.
KoR B1	40	28	574	120	560	2,7	0,33	n.b.
KoR B1 / 20F1	40	28	415	119	339	1,6	1,72	n.b.
KoR B1 / 30F1	40	28	341	117	293	3,4	1,83	n.b.
KoR B1	60	28	317	98	395	14,8	0,13	86
KoR B1 / 20F1	60	28	280	123	326	6,8	0,40	82
KoR B1 / 30F1	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B1	20	90	651	125	569	1,4	0,63	29
KoR B1 / 20F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B1 / 30F1	20	90	419	128	335	1,7	1,39	n.b.
KoR B1	40	90	505	113	484	7,3	0,21	n.b.
KoR B1 / 20F1	40	90	388	121	337	5,1	0,94	n.b.
KoR B1 / 30F1	40	90	341	123	288	5,1	1,42	n.b.
KoR B1	60	90	265	94	303	33,7	0,41	68
KoR B1 / 20F1	60	90	243	116	263	14,4	0,56	66
KoR B1 / 30F1	60	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B1	20	365	618	122	531	8,9	0,62	31
KoR B1 / 20F1	20	365	563	116	536	10,7	0,34	30
KoR B1 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B1	40	365	386	106	351	39,3	0,09	n.b.
KoR B1 / 20F1	40	365	296	105	245	27,0	0,33	n.b.
KoR B1 / 30F1	40	365	320	126	263	19,2	0,64	n.b.
KoR B1	60	365	237	103	234	22,8	0,06	50
KoR B1 / 20F1	60	365	195	113	200	11,3	0,14	48
KoR B1 / 30F1	60	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tabelle A5 - 18: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons KoR B2 / F1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
KoR B2	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B2 / 20F1	20	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B2 / 30F1	20	28	423	127	400	0,8	0,42	n.b.
KoR B2	40	28	489	114	522	2,5	0,98	n.b.
KoR B2 / 20F1	40	28	432	132	386	1,9	1,13	n.b.
KoR B2 / 30F1	40	28	376	127	314	1,9	1,71	n.b.
KoR B2	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B2 / 20F1	20	90	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B2 / 30F1	20	90	443	138	366	2,0	1,51	n.b.
KoR B2	40	90	481	112	471	5,9	0,28	n.b.
KoR B2 / 20F1	40	90	400	130	359	8,5	0,79	n.b.
KoR B2 / 30F1	40	90	370	133	317	4,8	1,34	n.b.
KoR B2	20	430	511	126	595	10,1	0,39	n.b.
KoR B2 / 20F1	20	365	429	132	376	8,7	0,59	n.b.
KoR B2 / 30F1	20	365	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
KoR B2	40	430	283	83	251	13,7	0,15	n.b.
KoR B2 / 20F1	40	430	307	113	268	14,1	0,28	n.b.
KoR B2 / 30F1	40	365	310	132	276	22,0	0,57	n.b.

1.3 Selbstverdichtende Betone mit Grauwacke bzw. Splitt Oberrhein

Tabelle A5 - 19: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der selbstverdichtenden Betone

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
GW SVB1	20	28	977	249	1270	1,0	0,34	n.b.
GW SVB2 / K1	20	28	563	167	513	1,4	1,26	n.b.
GW SVB2 / K4	20	28	288	132	195	0,7	0,36	n.b.
GW SVB3	20	28	574	133	493	0,4	0,25	n.b.
GW SVB1	40	28	816	269	1220	1,4	0,38	n.b.
GW SVB2 / K1	40	28	364	138	377	1,9	1,80	n.b.
GW SVB2 / K4	40	28	194	107	161	1,0	0,91	n.b.
GW SVB3	40	28	550	146	500	0,4	0,16	n.b.
GW SVB1	60	28	309	191	734	5,0	0,19	311
GW SVB2 / K1	60	28	226	134	372	3,2	0,85	151
GW SVB2 / K4	60	28	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
GW SVB3	60	28	285	121	403	2,3	0,14	116
SoR SVB2 / K1	20	28	538	160	490	1,6	1,42	n.b.
SoR SVB3	20	28	567	132	505	0,5	0,17	n.b.
SoR SVB2 / K1	40	28	320	137	379	2,4	1,78	n.b.
SoR SVB3	40	28	496	131	453	2,3	0,22	n.b.

1.4 Normalbeton mit calcitischem Kies

Tabelle A5 - 20: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung des Betons B1

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
EI B1	40	90	545	124	545	0,6	0,13	n.b.

1.5 Normalbeton mit Duranglas

Tabelle A5 - 21: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Betone D1, D1 / F1, D1 / F2 und D1 / F3

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
D1	20	28	700	124	643	7,4	0,12	n.b.
D1	40	28	486	147	533	3,1	0,14	n.b.
D1	20	90	617	146	602	8,7	0,25	59
D1	40	90	294	125	248	24,0	0,10	28
D1 / 15F1	20	28	610	126	521	6,4	0,17	n.b.
D1 / 20F1	20	28	553	119	452	7,7	0,26	n.b.
D1 / 30F1	20	28	463	117	376	4,9	0,34	n.b.
D1 / 40F1	20	28	416	112	314	3,6	0,59	n.b.
D1 / 15F1	40	28	383	152	412	8,4	0,63	n.b.
D1 / 20F1	40	28	379	148	396	6,8	0,91	n.b.
D1 / 25F1	40	28	376	143	378	3,5	1,17	n.b.
D1 / 30F1	40	28	350	141	348	3,8	1,42	n.b.
D1 / 35F1	40	28	319	137	315	2,7	1,45	n.b.
D1 / 40F1	40	28	328	112	257	2,4	1,27	n.b.
D1 / 15F1	20	90	505	149	453	15,9	0,48	48
D1 / 20F1	20	90	506	143	439	9,4	0,68	38
D1 / 30F1	20	90	453	140	375	11,0	1,15	31
D1 / 40F1	20	90	401	127	303	2,8	1,80	20
D1 / 15F1	40	90	355	141	312	42,7	0,51	38
D1 / 20F1	40	90	346	145	294	55,8	0,50	36
D1 / 25F1	40	90	338	142	283	44,1	0,60	38
D1 / 30F1	40	90	321	135	274	17,1	0,73	35
D1 / 35F1	40	90	315	128	261	13,6	0,82	32
D1 / 40F1	40	90	296	115	225	6,6	0,82	22
D1 / 15F2	40	28	423	125	418	4,4	1,33	n.b.
D1 / 20F2	40	28	382	113	357	6,0	1,54	n.b.
D1 / 30F2	40	28	348	101	311	3,5	1,62	n.b.
D1 / 40F2	40	28	296	92	262	3,1	1,85	n.b.
D1 / 15F2	20	90	466	116	436	7,3	0,82	43
D1 / 20F2	20	90	467	115	412	73,7	1,04	34
D1 / 30F2	20	90	405	113	350	9,8	1,81	30
D1 / 40F2	20	90	371	98	311	2,9	2,19	22
D1 / 15F3	40	28	339	107	365	11,6	0,41	n.b.
D1 / 20F3	40	28	334	96	334	2,8	0,47	n.b.
D1 / 25F3	40	28	284	89	296	2,6	0,70	n.b.
D1 / 30F3	40	28	254	79	263	2,9	0,98	n.b.
D1 / 35F3	40	28	227	72	235	2,5	0,65	n.b.
D1 / 40F3	40	28	241	60	188	1,0	0,51	n.b.
D1 / 15F3	20	90	485	108	441	6,9	0,22	36
D1 / 20F3	20	90	412	93	356	4,7	0,35	30
D1 / 30F3	20	90	336	82	290	3,3	0,44	25
D1 / 40F3	20	90	296	70	239	2,2	0,61	14

Tabelle A5 - 22: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Betone D1 / KSM, D1a, D2, D3 / 13S, D4 / 42S und D5 / 72S

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ⁻
D1 / 15KSM	20	28	558	102	511	5,0	0,17	n.b.
D1 / 20KSM	20	28	536	96	466	4,4	0,13	n.b.
D1 / 30KSM	20	28	476	89	405	6,4	0,14	n.b.
D1 / 40KSM	20	28	381	79	338	1,9	0,04	n.b.
D1 / 15KSM	40	28	434	119	412	1,4	0,15	n.b.
D1 / 20KSM	40	28	427	113	391	0,7	0,06	n.b.
D1 / 25KSM	40	28	382	107	353	0,8	0,06	n.b.
D1 / 30KSM	40	28	369	100	326	1,1	0,08	n.b.
D1 / 35KSM	40	28	369	92	314	0,6	0,05	n.b.
D1 / 40KSM	40	28	336	87	279	0,6	0,04	n.b.
D1 / 15KSM	20	90	514	112	437	4,0	0,00	33
D1 / 20KSM	20	90	509	105	435	3,9	0,13	28
D1 / 30KSM	20	90	424	92	359	3,6	0,10	23
D1 / 40KSM	20	90	377	80	321	2,1	0,07	13
D1 / 15KSM	40	90	285	117	222	9,1	0,13	24
D1 / 20KSM	40	90	278	115	217	14,4	0,12	24
D1 / 25KSM	40	90	281	112	215	17,0	0,17	21
D1 / 30KSM	40	90	257	109	201	9,9	0,14	21
D1 / 35KSM	40	90	232	103	176	9,2	0,11	16
D1 / 40KSM	40	90	234	97	175	7,0	0,10	15
D1a	40	28	421	144	364	14,7	0,20	n.b.
D1a	20	90	577	164	504	20,2	0,37	n.b.
D2	20	28	296	103	192	3,7	0,31	n.b.
D2	40	28	295	118	180	1,5	0,28	n.b.
D2	20	90	330	124	207	4,1	0,41	7
D2	40	90	250	115	136	6,1	0,42	8
D3 / 13S	40	28	416	139	360	38,1	0,38	n.b.
D4 / 42S	40	28	342	115	270	43,4	0,33	n.b.
D5 / 72S	40	28	222	73	148	0,6	0,24	n.b.
D3 / 13S	20	90	514	137	430	11,5	0,21	n.b.
D4 / 42S	20	90	421	120	332	21,1	0,42	n.b.
D5 / 72S	20	90	223	72	144	0,9	0,20	n.b.

2 Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Zementsteine

Tabelle A5 - 23: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Zementsteine

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ²⁻
K1 / w/z=0,5	40	90	655	131	668	1,6	0,04	66
K1 / w/z=0,45	40	90	722	146	724	0,5	0,27	n.b.
K1 / 20KSM	40	90	571	123	592	0,0	0,00	53
K1 / 30KSM	40	90	514	108	497	0,0	0,00	38
K1 / w/b=0,45 / 20F1	40	28	501	160	507	0,9	0,88	n.b.
K1 / w/b=0,45 / 20F1	40	90	517	160	502	0,8	1,00	71
K1 / w/b=0,45 / 20F1	40	365	494	163	499	2,4	1,47	109
K1 / w/b=0,45 / 30F1	40	90	462	143	408	1,2	1,81	n.b.
K1 / w/b=0,45 / 30F1	40	365	407	158	417	1,8	2,39	85
K1 / w/b=0,45 / 20F2	40	90	452	119	469	1,6	1,55	60
K1 / w/b=0,45 / 30F2	40	90	397	102	374	1,5	2,28	39
K1 / w/b=0,45 / 30F2	40	365	375	117	401	2,8	2,57	72
K1 / w/b=0,45 / 20F3	40	90	412	94	400	0,5	0,38	39
K1 / w/b=0,45 / 30F3	40	90	323	76	292	1,0	0,69	n.b.
K1 / w/b=0,45 / 30F3	40	365	307	75	288	0,8	1,04	33
K1 / w/b=0,45 / 13S	40	90	654	147	628	0,0	0,02	n.b.
K1 / w/b=0,45 / 72S	40	90	267	84	184	0,9	0,17	n.b.
K4 / w/z=0,45	40	90	418	168	301	1,7	0,03	n.b.
K4 / w/b=0,45 / 20F1	40	90	330	145	227	0,2	0,51	18
K4 / w/b=0,45 / 30F1	40	90	282	131	193	0,2	0,86	13
K5/K6 / w/z=0,3 / Na2Oe=1,0	40	7	847	128	1001	4,8	0,27	n.b.
K5/K6 / w/z=0,35 / Na2Oe=1,0	40	7	756	109	809	3,7	0,26	n.b.
K5/K6 / w/z=0,4 / Na2Oe=1,0	40	7	673	95	669	4,6	0,25	n.b.
K5/K6 / w/z=0,45 / Na2Oe=1,0	40	7	610	86	574	4,9	0,24	n.b.
K5/K6 / w/z=0,5 / Na2Oe=1,0	40	7	552	79	503	4,9	0,25	n.b.
K5/K6 / w/z=0,3 / Na2Oe=1,0	40	28	818	151	1099	1,2	0,09	n.b.
K5/K6 / w/z=0,35 / Na2Oe=1,0	40	28	754	133	872	1,3	0,09	n.b.
K5/K6 / w/z=0,4 / Na2Oe=1,0	40	28	663	107	746	4,4	0,56	n.b.
K5/K6 / w/z=0,45 / Na2Oe=1,0	40	28	592	97	634	3,3	0,54	n.b.
K5/K6 / w/z=0,5 / Na2Oe=1,0	40	28	554	87	559	3,0	0,55	n.b.
K5/K6 / w/z=0,3 / Na2Oe=1,0	40	90	791	168	1090	2,7	0,07	242
K5/K6 / w/z=0,35 / Na2Oe=1,0	40	90	718	130	822	0,8	0,09	130
K5/K6 / w/z=0,4 / Na2Oe=1,0	40	90	657	115	678	1,0	0,06	72
K5/K6 / w/z=0,45 / Na2Oe=1,0	40	90	599	105	583	0,9	0,08	48
K5/K6 / w/z=0,5 / Na2Oe=1,0	40	90	527	94	481	1,8	0,07	36

Tabelle A5 - 24: Chem. Zusammensetzung der Porenlösung der Zementsteine

Mischung	Temp. [°C]	Alter [d]	Konzentration [mmol/l]					
			OH ⁻	Na ⁺	K ⁺	Si	Al	SO ₄ ²⁻
K5/K6 / w/z=0,3 / Na2Oe=1,0	20	90	990	155	1114	1,6	0,11	159
K5/K6 / w/z=0,4 / Na2Oe=1,0	20	90	787	115	699	1,0	0,11	42
K5/K6 / w/z=0,45 / Na2Oe=1,0	20	90	703	101	631	0,6	0,05	22
K5/K6 / w/z=0,5 / Na2Oe=1,0	20	90	621	94	525	0,9	0,08	14
K5/K6 / w/z=0,45 / Na2Oe=0,6	40	90	397	141	275	0,2	0,05	n.b.
K6/K7 / w/z=0,45 / Na2Oe=1,2	40	90	745	104	754	1,4	0,10	n.b.
K5/K6 / w/b=0,45 / 5F1 / Na2Oe=1,0	40	90	672	134	592	0,5	0,10	52
K5/K6 / w/b=0,45 / 10F1 / Na2Oe=1,0	40	90	604	144	546	0,8	0,25	44
K5/K6 / w/b=0,45 / 20F1 / Na2Oe=1,0	40	90	474	134	425	0,8	0,83	35
K5/K6 / w/b=0,45 / 30F1 / Na2Oe=1,0	40	90	389	125	344	0,9	1,48	26
K7 / w/b=0,45 / 30F1 / Na2Oe=1,49*	40	90	476	209	418	1,2	2,32	56
K7 / w/b=0,45 / 30F2 / Na2Oe=1,49*	40	90	435	156	380	1,2	3,17	51
K7 / w/b=0,45 / 30F1 / Na2Oe=1,97*	40	90	537	321	404	1,5	3,28	95
K7 / w/b=0,45 / 30F2 / Na2Oe=2,15*	40	90	489	80	566	1,1	4,04	81

* Alkaliäquivalent des Portlandzements K7 mittels NaOH aufdotiert.

Ausgangsstoffe:

Alkaliäquivalente der Portlandzemente in M.-%							
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
Na ₂ O _e	1,21	1,02	0,76	0,65	0,59	1,07	1,21
Alkaliäquivalente der Hochofenzemente in M.-%							
Portlandzement Hüttensand (S) [M.-%]		K1 13%S		K1 42%S		K1 72%S	
Na ₂ O _e		1,09		1,00		0,78	
Kennwerte der Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl (KSM) und Flugasche (F)							
Betonzusatzstoff	Feinheit [M.-% > 45 µm]			Na ₂ O _e [M.-%]			
KSM	43,7			0,21			
F1a	21,4			3,61			
F1b	20,4			3,22			
F2	1,0			3,75			
F3	18,1			1,09			

F1a: Normalbeton; F1b: selbstverdichtender Beton

Betone:

Bezeichnung	Zement	z [kg/m ³]	w/z	N ¹⁾ [kg/m ³]
Betone mit natürlicher Gesteinskörnung				
B1	K1	500	0,5	6,05
B2	K1	400	0,45	4,84
B2a	K1	400	0,5	4,84
B3	K2	400	0,45	4,08
B4	K3	400	0,45	3,04
B5	K4	400	0,45	2,6
B6	K1 13%S	400	0,45	4,36
B7	K1 42%S	400	0,45	4,0
B8	K1 72%S	400	0,45	3,12
Betone mit Duranglas				
D1	K1	500	0,5	6,05
D1a	K1/K4 ²⁾	500	0,4	5,0
D2	K4	500	0,5	3,25
D3	K1 13%S	500	0,5	5,45
D4	K1 42%S	500	0,5	5,0
D5	K1 72%S	500	0,5	3,9

1) N = Alkaligehalt des Betons aus Zement [kg/m³]

2) Mischung aus K1 und K4 mit Na₂O_e = 1,0 M.-%

Selbstverdichtende Betone:

Bestandteile [kg/m ³]	SVB1	SVB2		SVB3
Zement	K1 600	K1	K4	K1
Flugasche F1b		320		320
Kalksteinmehl		280		--
N [kg/m ³]	7,26	3,87	2,08	3,87
w/p-Wert	0,28	0,28		0,28