

TUM – Centrum Baustoffe und Materialprüfung  
Baumbachstraße 7 + D-81245 München

Herrn Dipl.-Ing. H.-J. Feuerborn  
VGB PowerTech e. V.  
Klinkestr. 27-31  
45136 Essen

Universitäts- Professoren  
Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl  
Dr.-Ing. D. Heinz

Baumbachstraße 7  
D-81245 München  
Tel. +49 (0) 89-289-2 70 61  
Fax +49 (0) 89-289-2 70 64  
cbm@cbm.bv.tum.de

Sk/D

München, den 02.03.06

## **SCHLUSSBERICHT**

**Nr.: F 10.001/02**

**Thema:** Einsatz von Steinkohlenflugasche als Beton-  
zusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden  
Alkali-Kieselsäure Reaktion bei alkaliempfind-  
lichen Gesteinskörnungen

**Auftraggeber:** AiF-Nr. 13605  
VGB-Nr. 245

**Projektleitung:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz  
Dr.-Ing. L. Urbonas

**Sachbearbeiter:** K. Schmidt

Dieser Bericht umfasst: 107 Textseiten  
6 Anhänge mit 104 Seiten

INHALTSVERZEICHNIS:

1	EINLEITUNG .....	7
2	STAND DES WISSENS .....	8
2.1	Einleitung.....	8
2.2	Theoretische Ansätze zur Vermeidung einer Alkalireaktion.....	10
2.3	Wirksamer Alkaligehalt der Flugasche.....	10
2.4	Langzeitwirkung der Flugasche.....	11
2.5	Leistungsvermögen am Bauwerk.....	12
2.6	Regelwerke .....	13
3	ARBEITSABLAUFPLAN .....	15
3.1	Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsstoffe.....	16
3.2	Versuche zur Ermittlung des Pessimums von Gesteinskörnungen mit Opalsand- stein/Flint .....	17
3.3	Hauptversuche .....	18
3.4	Beschreibung der Betone .....	19
3.4.1	Zusammensetzung .....	19
3.4.2	Nomenklatur .....	21
3.5	Herstellung der Betone .....	22
4	UNTERSUCHUNGSMETHODEN .....	23
4.1	Frisch- und Festbetonprüfungen .....	23
4.2	Prüfung auf Alkali-Kieselsäure Reaktion .....	23
4.2.1	Prüfung der potentiellen Alkalireaktivität der Gesteinskörnungen (Magdeburger Schnelltest).....	23
4.2.2	Prüfung einer schädigenden AKR im Beton.....	23
4.3	Mineralogische Untersuchungen .....	25
4.4	Chemische Untersuchungen .....	25
4.5	Physikalische Untersuchungen .....	26
4.6	Zusammensetzung der Porenlösung .....	26
4.7	Porengrößenverteilung.....	29

5	UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE .....	30
5.1	Eigenschaften der Ausgangsstoffe.....	30
5.1.1	Zement .....	30
5.1.2	Flugasche und Kalksteinmehl.....	30
5.1.3	Gesteinskörnung .....	32
5.2	Frisch- und Festbetoneigenschaften.....	39
5.3	Pessimaler Gehalt von Kiesen mit Opalsandstein / Flint im Beton.....	40
5.3.1	Pessimum EIII-OF .....	42
5.3.2	Pessimum EII-OF .....	48
5.3.3	Zusammenfassung der Untersuchungen zur pessimalen Zusammensetzung der Betone mit Opalsandstein / Flint .....	48
5.4	Einfluss der Flugasche auf das Dehnungsverhalten der Betone aus AKR.....	49
5.4.1	Dehnungsverhalten der Betone mit inerten Gesteinskörnungen.....	50
5.4.2	Dehnungsverhalten der Betone mit Kiesen mit Opalsandstein/Flint.....	52
5.4.3	Dehnungsverhalten der Betone mit Grauwacke .....	54
5.4.4	Dehnungsverhalten der Betone mit Kies bzw. Kies-Edelsplitt Oberrheingraben .....	59
5.4.5	Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss der Flugasche auf das AKR-bedingte Dehnungsverhalten der Betone .....	62
5.5	Dehnungsverhalten und Zusammensetzung der Porenlösung der Feinbetone mit Duranglas.....	64
5.5.1	Pessimaler Gehalt von Duranglas im Feinbeton.....	64
5.5.2	Einfluss der Flugasche auf das Dehnungsverhalten und die Zusammensetzung der Porenlösung der Feinbetone mit Duranglas.....	65
5.6	Chemische Zusammensetzung der Porenlösung der Betone .....	69
5.6.1	Einleitung.....	69
5.6.2	Vorgehensweise.....	70
5.6.3	Einfluss des Alkaligehaltes des Portlandzementes auf die Zusammensetzung der Porenlösung .....	71
5.6.4	Einfluss der Gesteinskörnung auf die Zusammensetzung der Porenlösung.....	72
5.6.5	Einfluss der Bindemittelkombination auf die Zusammensetzung der Porenlösung.....	75
5.7	Vergleich der Betonzusatzstoffe.....	91
5.7.1	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Zusammensetzung der Porenlösung der Betone .....	92
5.8	Gegenüberstellung Porenlösung – Schädigung des Betons.....	95
5.9	Einfluss der Flugasche auf die Porengrößenverteilung in den Betonen.....	97

6	ZUSAMMENFASSUNG .....	102
---	-----------------------	-----

	LITERATURVERZEICHNIS .....	104
--	----------------------------	-----

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS:**

Abbildung 2-1:	AKR Schadensfall an der Neckarschleuse Schwabenheim .....	9
Abbildung 3-1:	Arbeitsablaufplan: Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen .....	15
Abbildung 4-1:	Schemadarstellung der Auspressvorrichtung für die Porenlösung von Beton.....	27
Abbildung 4-2:	Wiederholbarkeit der Quecksilberdruckporosimetrie am Beton .....	29
Abbildung 5-1:	Dehnungsverhalten der geprüften Gesteinskörnungen unter AKR-beschleunigenden Bedingungen. Lagerung bei 70°C über Wasser .....	32
Abbildung 5-2:	EIII-OF: Opalsandstein; links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, Opalschwammnadeln und Glaukonit; rechts: BB = 2,1 mm, X-Pol, sehr isotrope, kieselige Matrix ....	35
Abbildung 5-3:	EIII-OF: Flint; links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, Formrelikte von Kammertierchen und Schwammnadeln; rechts: BB = 0,53 mm, X-Pol, homogenes kryptokristallines Gefüge mit Chalzedon .....	36
Abbildung 5-4:	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 .....	36
Abbildung 5-5:	BB = 2,1 mm, X-pol; kieselig gebundener Sandstein mit Riss subparallel zur Oberfläche. (Riss nachgezeichnet) .....	37
Abbildung 5-6:	Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P1 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung .....	42
Abbildung 5-7:	Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P2 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung .....	43
Abbildung 5-8:	Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P5 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung .....	44
Abbildung 5-9:	Einfluss des Flugaschegehaltes auf die Massezunahme des Betons EIII-OF P1.	45
Abbildung 5-10:	Einfluss der Rezeptur auf die Dehnungen eines EIII-OF-haltigen Betons.....	47
Abbildung 5-11:	Dehnungsverhalten von Grauwackebetonen bei unterschiedlicher Rezeptur .....	56
Abbildung 5-12:	Zustand der Würfel mit 300 mm Kantenlänge nach Lagerung in der Nebelkammer (40°C/100% r.F.); Beton Gw2: Grauwacke, b = 400, w/b = 0,45 oben links: Gw2; Alter 9 Monate, $w_{Rmax} = 0,8$ mm; keine Ausblühungen oben rechts: Gw2 / F1 20; Alter 15 Monate, keine Schäden erkennbar unten links: Gw2 / KSM 20; Alter 14 Monate; $w_{Rmax} = 1,0$ mm; Ausblühungen unten rechts: Gw2 / KSM 30; Alter 14 Monate; $w_{Rmax} = 0,8$ mm; Ausblühungen .....	57
Abbildung 5-13:	Dehnungsverhalten von Betonen mit Kies und Kies-Edelsplitt Oberrheingraben bei unterschiedlicher Rezeptur .....	60
Abbildung 5-14:	Dehnungsverhalten des Feinbetons D P1 in Abhängigkeit des Anteils an Duranglas in der Gesteinskörnung .....	64
Abbildung 5-15:	Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe (BZS) auf das Dehnungsverhalten der Feinbetone mit Duranglas nach 118 Tagen .....	66
Abbildung 5-16:	Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe (BZS) auf die OH-Konzentration nach 28d.....	67
Abbildung 5-17:	Einfluss der Betonzusatzstoffe auf den Zusammenhang OH-Konzentration und Dehnung nach 28 Tagen .....	68

Abbildung 5-20:	OH <sup>-</sup> , (Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> )- und Ca <sup>++</sup> -Konzentration in Abhängigkeit vom Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> der Portlandzemente nach 28 Tagen.....	71
Abbildung 5-21:	Einfluss der Gesteinskörnungen auf die Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung des Betons der Rezeptur 1; z = 500 kg/m <sup>3</sup> ; w/z = 0,5 .....	74
Abbildung 5-22:	Einfluss der Gesteinskörnungen auf die Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung des Betons der Rezeptur 2; z = 400 kg/m <sup>3</sup> ; w/z = 0,45 .....	74
Abbildung 5-23:	Ionenkonzentration im Leim in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie .....	76
Abbildung 5-24:	Ionenkonzentration im Beton in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie .....	77
Abbildung 5-25:	Einfluss des w/z-Wertes auf die OH <sup>-</sup> -Konzentration von Betonen mit Kalksteinmehl.....	78
Abbildung 5-26:	OH <sup>-</sup> -Konzentration im Beton in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie nach 28, 90 und 365 Tagen.....	79
Abbildung 5-27:	Ionenkonzentration im Beton in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt des Zementes im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie.....	80
Abbildung 5-28:	Beitrag des Klinkers zur OH <sup>-</sup> -Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen.....	81
Abbildung 5-29:	OH <sup>-</sup> -Konzentration im Beton in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und Alter.....	82
Abbildung 5-30:	Einfluss der Flugaschen auf die OH <sup>-</sup> -Konzentration nach 28d .....	84
Abbildung 5-31:	Einfluss der Flugaschen auf die OH <sup>-</sup> -Konzentration nach 90d .....	84
Abbildung 5-32:	Einfluss des Flugaschegehaltes auf die Natrium-, Kaliumkonzentration nach 90 Tagen .....	85
Abbildung 5-33:	Beitrag der Flugasche F1 zur OH <sup>-</sup> -Konzentration der Porenlösung in Abhängigkeit vom Na <sub>2</sub> O-Äquivalent des Zementes in Bezug zur theoretischen Verdünnungslinie .....	87
Abbildung 5-34:	Einfluss des Flugaschegehaltes auf die zeitliche Entwicklung der OH <sup>-</sup> -Konzentration der Porenlösung .....	88
Abbildung 5-35:	Einfluss des Zementalkaligehaltes auf die zeitliche Entwicklung der OH <sup>-</sup> -Konzentration der Porenlösung bei 30 M.-% Flugasche F1 im Bindemittel .....	89
Abbildung 5-36:	Einfluss der Flugaschen auf die OH <sup>-</sup> -Konzentration im Alter von 90d bei 20°C und 40°C .....	90
Abbildung 5-37:	Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe auf die OH <sup>-</sup> -Konzentration .....	91
Abbildung 5-38:	Gegenüberstellung OH <sup>-</sup> -Konzentration nach 28 Tagen und Beginn einer Schädigung der Betone mit Grauwacke durch Alkalireaktion .....	96
Abbildung 5-39:	Einfluss der Zusatzstoffart auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 90d, Lagerung bei 40°C .....	99
Abbildung 5-40:	Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 365d Lagerung bei 40°C .....	99
Abbildung 5-41:	Einfluss des Flugaschegehaltes auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 365d, Lagerung bei 40°C .....	100
Abbildung 5-42:	Einfluss der Temperatur auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 90d, Lagerung bei 40°C und 20°C .....	100

**TABELLENVERZEICHNIS:**

Tabelle 2-1:	Use of Supplementary Cementing Materials (SCM) for Counteracting Alkali-Silica Reaction (Auszug) [18].....	14
Tabelle 3-1:	Kennwerte der beiden Grundrezepturen.....	20
Tabelle 4-1:	Reproduzierbarkeit des Auspressversuchs; Betonalter 28 d; Lagerungstemperatur 40°C.....	28
Tabelle 5-1:	Alkaligehalte der verwendeten Zemente.....	30
Tabelle 5-2:	Kennwerte der verwendeten Flugaschen.....	31
Tabelle 5-3:	Übersicht über die verwendeten Gesteine.....	33
Tabelle 5-4:	Dichte und Kennwerte zur Porosität der Gesteinskörnungen.....	34
Tabelle 5-5:	Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF hergestellten Betone zur Ermittlung der Pessima.....	40
Tabelle 5-6:	Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF hergestellten Betone zur Ermittlung der Pessima.....	41
Tabelle 5-7:	Dehnungen und Rissbreiten an Betonen mit inerten Gesteinskörnungen nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung.....	51
Tabelle 5-8:	Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklassen EIII-OF bzw. EII-OF hergestellten Betone.....	53
Tabelle 5-9:	Dehnungen und Rissbreiten an Grauwackebetonen nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung.....	58
Tabelle 5-10:	Dehnungen und Rissbreiten an Betonen mit Kies und Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung.....	61
Tabelle 5-11:	Zusammenstellung der mit Betonzusatzstoffen hergestellten Feinbetone mit Duranglas.....	65
Tabelle 5-12:	Charakteristische Kenngrößen der Porengrößenverteilungsanalyse an den Betonen.....	101
ANHANG 1:	Beschreibung des Schnelltests nach der Prüfvorschrift des LMPA Sachsen Anhalt	
ANHANG 2:	Charakterisierung der Ausgangsstoffe	
ANHANG 3:	Hergestellte Betone / Feinbetone	
ANHANG 4:	Frisch und Festbetonkennwerte	
ANHANG 5:	Ergebnisse aus der Nebelkammerlagerung	
ANHANG 6:	Porenlösungsauspressversuche	

## 1 Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist die Festlegung von Gehalten an Steinkohlenflugaschen entsprechend DIN EN 450 [6] in Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und nicht NA-Zementen, mit denen Schäden durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) sicher verhindert werden können. Dabei wird die Wirksamkeit der Flugasche bei zwei Arten von Gesteinskörnungen untersucht: schnell reagierende Gesteinskörnungen, wie opalsandstein-/flinthaltige Kiese und langsam reagierende Gesteinskörnungen, wie Grauwacke und Material aus dem Oberrheingraben. Die Beurteilung von Flugasche hinsichtlich ihrer Wirkung auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist allein aus Prüfungen unter reaktionsbeschleunigenden Bedingungen, wie sie bei einer Einlagerung in die Nebelkammer bei 40°C und 100 % r.F. vorliegen, derzeit nicht mit letzter Sicherheit möglich. Deshalb werden parallel zu der Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie Teil 3 an den untersuchten Betonen auch Versuche in der Außenlagerung durchgeführt. Eine erste Beurteilung der Ergebnisse erfolgte in diesem Bericht nach 9 Monaten Lagerungszeit in der Nebelkammer, die abschließende Bewertung der Ergebnisse soll nach bis zu 18 Monaten Lagerung in der Nebelkammer bzw. nach bis zu 5 Jahren Freilagerung durchgeführt werden. Hinsichtlich des Auftretens bzw. der Schädigung durch AKR wird das Verhalten verschiedener flugaschehaltiger Betone mit Betonen verglichen, bei denen Zemente mit niedrigem Alkaligehalt bzw. mit hohen Hüttensandgehalten oder auch Bindemittelkombinationen mit Kalksteinmehl als Zementaustauschstoff verwendet wurden. Es wird der Einfluss der Feinheit und des Gesamtalkaligehalts von Flugaschen auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich AKR untersucht.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Einleitung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) und die Schäden, die dadurch an Betonbauwerken entstehen, sind seit über 50 Jahren bekannt. Trotz intensiver Forschungsarbeit seither sind die Mechanismen der AKR und die Möglichkeiten, eine schädigende Alkalireaktion im Beton zu vermeiden, noch nicht gänzlich geklärt und werden zum Teil sehr kontrovers diskutiert. Unter anderem wird die Verwendung puzzolanischer Zusatzstoffe, wie z.B. Flugasche, seit langem als eine Möglichkeit, um Schadreaktionen zu vermeiden, in Betracht gezogen. Dieses Vorgehen ist bereits in einige internationale Normen und Richtlinien aufgenommen worden. Allerdings zeigte sich, dass an flugaschehaltigen Betonen unter beschleunigenden Testbedingungen gewonnene Ergebnisse nicht unbedingt das Langzeitverhalten unter natürlichen Umweltbedingungen widerspiegeln. So wurde in Betonen mit 15 M.-% Flugasche im Bindemittel bei Lagerung in der Nebelkammer (40°C/100 % r.F.) nach Kriterien der Alkali-Richtlinie, Teil 3, eine schädigende AKR unterdrückt. Diese Betone wiesen aber bei Lagerung im Freien zeitlich verzögert Schäden auf [1]. Auch über die Leistungsfähigkeit der Flugasche in Bauwerken sind in der Literatur immer wieder unterschiedliche Aussagen zu finden. Diese reichen von einem effektiven Alkalieneintrag über einen lediglich verzögernden Effekt bis hin zu einer langfristigen Vermeidung der Schadreaktion im Beton [2, 3]. Diese Widersprüche erfordern umfangreiche Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit flugaschehaltiger Betone, sowohl mit beschleunigenden Prüfverfahren, als auch unter natürlichen Umweltbedingungen.

In der Praxis spielte die AKR in Deutschland gegenüber anderen Schadensmechanismen, wie z.B. Frost-Tausalz Einwirkung, bislang eine eher untergeordnete Rolle. Dies ist neben der Wirksamkeit vorbeugender Maßnahmen darauf zurückzuführen, dass AKR-Schäden oft erst nach Jahren oder Jahrzehnten auftreten und das Schadensbild - netzartige Rissbildung - u. a. Frostschäden sehr ähnelt. Zudem erweist sich der Nachweis einer schädigenden Alkalireaktion des Betons häufig als schwierig, da die AKR oftmals in Kombination mit Frostsprengung und Ettringittreiben auftritt. Dies führt dazu, dass eine eindeutige Zuordnung des primären Schadensmechanismus nicht immer möglich ist. Es ist aber davon auszugehen, dass in der Vergangenheit Betonschäden aufgrund AKR oftmals nicht erkannt wurden.

In den letzten Jahren werden jedoch immer neue AKR-bedingte Schadensfälle bekannt. Betroffen sind vor allem Betonfahrbahndecken, Brückenbauwerke und Bauwerke der Wasserwirtschaft. Beispielhaft können AKR-Schäden an der Bundesautobahn A 24 [4] und an der Neckarschleuse Schwabenheim [5], siehe Abbildung 2-1, aufgeführt werden. Die immer wieder neu auftretenden Schäden und die damit verbundenen Kosten für die Erneuerung bzw. die Instandsetzung der geschädigten Bauwerke führen zu einem Vertrauensverlust in die Betonbauweise und erhöhen den Druck auf die Bauindustrie, zielsicher AKR-Schäden vermeiden zu können. Da aber vor allem im süddeutschen Raum eine flächendeckende Versorgung mit herkömmlichen NA-Zementen aus

rohstoffbedingten Gründen schwierig ist, stellt sich die Frage, ob nicht der Einsatz von Flugasche, als ein die Alkalireaktion vermeidender Betonzusatzstoff, eine sichere und kostengünstige Alternative zu NA-Zementen darstellt. Aus Gründen der Verfügbarkeit beziehen sich die im Folgenden für Deutschland geschilderten Überlegungen ausschließlich auf silikatische, kalkarme Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450 [6].



Abbildung 2-1: AKR Schadensfall an der Neckarschleuse Schwabenheim

## 2.2 Theoretische Ansätze zur Vermeidung einer Alkalireaktion

Die Gründe für eine Verringerung von Dehnungen aus einer Alkalireaktion im Beton aufgrund von Flugaschezugabe sind im Einzelnen nicht geklärt. Prinzipiell kann aber in eine mögliche „passive“ und „aktive“ Rolle der Flugasche unterschieden werden. Der „passive“ Effekt beruht auf einer reinen Verdünnung der Alkalienkonzentration in der Porenlösung und einer Verringerung des wirksamen Alkaligehalts des Betons bei Austausch von Zement durch Flugasche. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die Flugasche keine bzw. nur geringe Mengen an Alkalien in den Beton eingebracht werden. Der „aktive“ Effekt wird mit der Veränderung des Porengefüges in der Zementsteinmatrix und damit einer Verlangsamung des Transports von Alkalien bzw. Wasser zum Reaktionsort und mit der Bindung von Alkalien in die Hydratationsprodukte aus der puzzolanischen Reaktion der Flugasche erklärt.

Mechanismen:

- Verdünnung des Anteils wirksamer Alkalien im Beton (Verdünnungseffekt)
- Reduzierung der Ionendiffusion und Permeabilität (Transport)  
Durch Einsatz von puzzolanischen und inerten Zusatzstoffen wird eine Verfeinerung der Porenstruktur der Bindemittelmatrix erzielt. Durch die bei der puzzolanischen Reaktion gebildeten Hydratphasen kommt es zu einer Verdichtung des Matrixgefüges [7, 8]. Der Füllereffekt inerter Stoffe wie Kalksteinmehl beruht vor allem auf einer besseren Raumauffüllung der Bindemittelmatrix, dadurch müssen die Hydratationsprodukte des Zements nur noch geringere Hohlräume überbrücken [9]. Damit wird die Diffusion von Alkalien durch das Bindemittelporengefüge zum Reaktionsort erschwert. Dies führt zu einer Verlangsamung oder Unterdrückung der Alkali-Kieselsäure Reaktion.
- Chemische Bindung von Alkalien in puzzolanische Reaktionsprodukte der Flugasche (Hydratation)

## 2.3 Wirksamer Alkaligehalt der Flugasche

Bislang wird die Gefahr einer AKR-Schädigung des Betons über den Gehalt an wirksamen Alkalien aus den Bindemittelkomponenten, d. h. Zement und Zusatzstoffe und über die Empfindlichkeit und den Gehalt der reaktiven Gesteinskörnungen abgeschätzt [10].

Allerdings gibt es immer noch widersprüchliche Aussagen über den Beitrag der Alkalien aus puzzolanischen Zusatzstoffen [11, 12], wie z. B. der Steinkohlenflugasche, die nach DIN EN 450 Teil 1 mit bis zu 5 M.-% nennenswerte Gesamtalkaligehalte aufweisen darf.

Nach Alkalirichtlinie Teil 1 müssen 1/6 des Gesamtalkaligehalts der Flugasche als für eine Alkalireaktion wirksamer (effektiver) Alkaligehalt angerechnet werden. Diese u. a. auf Schlussfolgerungen aus Untersuchungen von Hobbs und Kollek [13, 14] zurückzuführende Regelung ist allerdings umstritten. Zum einen, da bei diesen Untersuchungen nur die äußerst schnell reagierenden und zum Teil künstlichen Gesteinskörnungen aus Cristobalit und Beltan

Opal, entsprechend Duranglas, verwendet wurden, so dass eine langsamere puzzolanische Reaktion der Flugasche nicht zur Wirkung kommen konnte und zum anderen, da hier nur Dehnungen von Probekörpern mit und ohne Flugasche verglichen wurden, so dass keine Aussage über den tatsächlichen Beitrag der Flugasche hinsichtlich des Alkalihaushaltes der Porenlösung gemacht werden kann. Dies ist nur durch eine chemische Analyse der Porenlösung selbst möglich. So ergaben Untersuchungen nach Nixon [47], der einen in Großbritannien vorkommenden natürlichen, flinthaltigen Sand verwendete, dass ein Zementaustausch von 20 bis 30 % durch eine Flugasche mit einem hohen Alkaligehalt von 3,4 M.-% eine Alkalireaktion im Beton vermeiden konnte. Zusätzlich durchgeführte Analysen der Porenlösung von Zementleimproben ergaben für Bindemittelkombinationen mit Zementen mit mittlerem bis hohem Alkaligehalt zumindest keinen Beitrag der Flugasche zur Alkalität der Porenlösung im höheren Alter. Bei niedrigem Alkaligehalt des Zements wurde zwar eine Erhöhung der Alkalität über eine theoretische Verdünnung hinaus festgestellt, dennoch wurde an diesen Betonen keine schädigende Alkalireaktion festgestellt. Dies wurde auf den allgemein geringen Alkaligehalt in diesen Betonen zurückgeführt.

Nach Thomas [15] ist mit diesem Hintergrund die Verwendung eines allgemein gültigen Wertes für den wirksamen Alkalibetrag aus Flugaschen nicht sinnvoll. Vielmehr müssen die Zementaustauschrate und die Art der reaktiven Gesteinskörnung berücksichtigt werden. So ergibt sich für reaktivere Gesteinskörnungen die Notwendigkeit höherer Mindestaustauschraten, um eine schädigende AKR im Beton zu verhindern, als für weniger reaktive Gesteinskörnungen.

## **2.4 Langzeitwirkung der Flugasche**

Die Ergebnisse des am ibac, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, durchgeführten Forschungsvorhabens „Alkalibindung in flugaschehaltigen Bindemitteln - Langzeitversuche“ [51], in dem die zeitliche Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Porenlösung in der Bindemittelmatrix in Abhängigkeit von der Flugascheverwendung untersucht wurde, weisen auf einen auch in langen Zeiträumen stabilen Alkalihaushalt flugaschehaltiger Bindemittel hin. Es konnte gezeigt werden, dass ein Fortschreiten der puzzolanischen Reaktion auch noch in Proben mit einem Alter von mehr als 8 Jahren stattfindet. Es konnte auch nachgewiesen werden, dass durch eine langanhaltende puzzolanische Reaktion von Flugasche eine für Alkalireaktionen kritische Freisetzung von Alkalien nicht stattfindet. Vielmehr bewirkt die fortschreitende Reaktion eine Erhöhung der Gefügedichtheit, die einer Betonschädigung durch einen von innen oder außen einwirkenden chemischen Angriff entgegensteht.

## 2.5 Leistungsvermögen am Bauwerk

Flugasche wird seit langem in Betonbauwerken als Teil des Bindemittels eingesetzt. Bisher sind noch keine AKR-Schadensfälle an Betonbauwerken bekannt geworden, in denen Flugasche in ausreichenden Mengen als Zusatzstoff 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 Gesteinskörnungen - zu erhalten, zum anderen ist es so gut wie unmöglich, die Beiträge verschiedener Mechanismen wie Alkalireaktion, Frost oder Schwinden zur Betonschädigung auseinander zu halten.

Die, u. a. von Hobbs [2] aufgeführten Beispiele AKR-bedingter Schäden an Betonbauwerken mit Flugasche im Bindemittel, die „Mc Pherson Test Road“ in den USA bzw. der „Hanshin Expressway“ in Japan lassen sich nach Thomas [16] bei genauerer Betrachtung auf ein Trocknungsschwinden des Betons, bzw. auf nicht ausreichende Flugaschegehalte (18 %) mit gleichzeitig hohen Alkaligehalten von rd. 8 kg pro m<sup>3</sup> Beton zurückführen.

Dagegen können von Thomas [16] 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/m<sup>3</sup> 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 ( $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,65 \text{ M.-%}$ ) mit Flugasche ( $\text{Na}_2\text{O}_e = 3,88 \text{ M.-%}$ ) eine schädigende Alkalireaktion im Beton verhindert werden. Als weiteres Beispiel kann der „Lower Notch“ Damm in Ontario, USA, aufgeführt werden, in dem auch eine als alkalireaktiv bekannte Grauwacke verwendet wurde. Auch hier konnte durch Flugascheaustausch von 20 bzw. 25 M.-% eines Portlandzementes mit hohem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,96 \text{ M.-%}$ ) eine schädigende Alkalireaktion verhindert werden.

## 2.6 Regelwerke

### Nationale Regelungen

Nach der DAfStb-Richtlinie „Alkalireaktion im Beton“; Teil 1, ist Flugasche als Betonzusatzstoff eingestuft, durch den zusätzlich Alkalien in den Beton eingebracht werden. Dabei ist 1/6 des Gesamtalkaligehalts der Flugasche als für eine Alkalireaktion wirksamer Alkaligehalt anzusetzen. Zusätzlich ist zu beachten, dass der wirksame Alkaligehalt aller Betonzusatzstoffe 600 g pro m<sup>3</sup> Beton nicht überschreiten darf [17].

Dies bedeutet für eine Flugasche mit einem Gesamtalkaligehalt von z.B. 3,5 M.-%, dass der Gehalt an Flugasche auf rd. 100 kg/m<sup>3</sup> Beton beschränkt ist sofern keine weiteren alkalihaltigen Betonzusatzstoffe eingesetzt werden.

Eine die Alkalireaktion vermindernde oder gar vermeidende Wirkung der SFA, die internationale Regelwerke seit langem nützen, wird dabei bisher nicht berücksichtigt. Somit darf Flugasche unter den o. g. Voraussetzungen bei Gesteinskörnungen der Empfindlichkeitsklassen EII (bedingt brauchbar) oder EIII (bedenklich) nur in Verbindung mit NA-Zementen eingesetzt werden. Die weiteren Regelungen der Alkalirichtlinie zur Betonzusammensetzung sind zu beachten.

### Internationale Regelungen

In Kanada sind in der Anwendungsregel A23.2-27A der Canadian Standards Association - CSA - vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton vorgesehen. Im Rahmen dieser Anwendungsregel werden die zu ergreifenden Maßnahmen sehr differenziert aufgelistet, sowohl auf Seiten der Ausgangsstoffe als auch unter Berücksichtigung der Bauwerksanforderungen. Es ist 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.-% dabei nicht überschreiten, siehe Tabelle 2-1 [18].

Ähnlich wie in Kanada erlauben niederländische und britische Richtlinien den Austausch von Zement durch Flugasche zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion. Dabei werden Flugaschegehalte von mindestens 25 M.-% vom Zement vorgeschrieben [19, 20].

Tabelle 2-1: Use of Supplementary Cementing Materials (SCM) for Counteracting Alkali-Silica Reaction (Auszug) [18]

Type of SCM	Total alkali content of SCM % Na <sub>2</sub> O equivalent	Chemical composition requirement (% oxides)	Cement replacement level (% by mass)		
			Prevention level W <sup>1)</sup>	Prevention level X <sup>1)</sup>	Prevention level Y and Z <sup>1)</sup>
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 Alkalireaktion-vermeidenden Wirkung der Flugasche erforderlich

### 3 Arbeitsablaufplan

Der Arbeitsablaufplan ist zusammengefasst in Abbildung 4-1 dargestellt:

<b>Ausgangsstoffe</b>	
<b>Gesteinskörnungen</b> Opalsandstein/Flint, Duranglas, Grauwacke, Kies/Splitt Oberrheingraben	<b>Zusatzstoffe</b> Steinkohlenflugasche (F), Kalksteinmehl (KSM)
<b>Zemente</b> CEM I; Na <sub>2</sub> O-Äqu. = 0,6 – 1,2 M.-% CEM II/A; CEM III/A; CEM III/B	
<b>Charakterisierung der Ausgangsstoffe</b>	
physikalisch:	Korngrößenverteilung, Porosität, spez. Oberfläche, mechanische Eigenschaften
chemisch:	Röntgen-Fluoreszenz-Analyse (RFA), Nasschemie
mineralogisch:	Röntgenbeugungsanalyse (RBA), optische Mikroskopie, potentielle Alkaliaktivität
<b>Betonrezepturen</b>	
<b>Grundrezeptur 1</b> w/b = 0,5 b = 500 kg/m <sup>3</sup> B16/C16	<b>Grundrezeptur 2</b> w/b = 0,45 b = 400 kg/m <sup>3</sup> A16/B16
<b>EII-OF / EIII-OF</b> Vorversuche zur Ermittlung der pessimalen Gehalte EII-OF / EIII-OF in der Fraktion 2/8 mm* *ergänzende Untersuchungen am Feinbeton B8/C8	<b>Grauwacke / Kies/Splitt Oberrheingraben</b> 70 M.-% in der Fraktion 2/16 mm
<b>Variation der Parameter</b>	
Alkaligehalt des Zements:	0,6 – 1,2 M.-%
Zementart:	CEM I; CEM II/A; CEM III/A; CEM III/B
Betonzusatzstoffe:	Flugasche (F): Feinheit; Alkaligehalt; Anteil (15 – 35 M.-%) Kalksteinmehl (KSM): Anteil (15 – 30 M.-%)
<b>Untersuchungen am Beton</b>	
<b>Schädigung des Betongefüges</b>	
<b>Versuch</b>	<b>Lagerung</b>
dyn. E-Modul (Balken 100/100/500 mm <sup>3</sup> )	Nebelkammer 40°C/100% r.F.
Dehnung (Balken 100/100/500 mm <sup>3</sup> )	Nebelkammer 40°C/100% r.F.
Rissbreite (Würfel 300 mm Kantenlänge)	Nebelkammer 40°C/100% r.F. / Außenlagerung
<b>Bestimmung der Zusammensetzung der Porenlösung</b>	
(Auspressen und Analyse der Porenlösung des Betons; Lagerung: kein Austausch mit der Umgebungsfeuchte bei 20 / 40°C)	
<b>Ermittlung der Porengrößenverteilung</b>	
(Quecksilberdruckporosimetrie am Beton; Lagerung: kein Austausch mit der Umgebungsfeuchte bei 20 / 40°C)	

Abbildung 3-1: Arbeitsablaufplan: Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion bei alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen

### 3.1 Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Mit der Auswahl der Ausgangsstoffe sollten sowohl von der Seite der Gesteinskörnungen als auch seitens der Bindemittel die in Deutschland vorkommenden Variationen an Ausgangsstoffen abgedeckt werden. Dies sollte eine Übertragung der Ergebnisse auch auf hier nicht explizit untersuchte Ausgangsstoffe ermöglichen.

Es erfolgte eine Charakterisierung der Ausgangsstoffe in chemischer, physikalischer und mineralogischer Hinsicht. Dies hatte neben der reinen Beschreibung der Materialkennwerte zum Ziel, für die Interpretation der Ergebnisse mögliche Erklärungsansätze zu liefern und das jeweilige Verhalten auf materialspezifische Eigenschaften zurückführen zu können.

#### **Gesteinskörnungen**

Es wurden die in der Alkalirichtlinie des DAfStb [30] genannten alkalireaktiven Gesteinskörnungen verwendet. Dabei handelt es sich um Gesteinskörnungen mit biogenen Sedimenten mit amorpher Kieselsäure wie Opalsandstein und Flint aus dem Norddeutschen Raum, um klastische Sedimente mit verschiedenen stark gestörten Quarzmodifikationen wie präkambrische Grauwacke und um Moränenschutt wie Kies bzw. Kies-Edelsplitt aus dem Oberrhein mit seiner Vielzahl an Gesteinsarten, wie Quarzite, quarzitische Sandsteine und andere, zum Teil metamorph überprägte, kieselige Sedimente.

#### **Zemente**

Es wurden reine Portlandzemente und hüttensandhaltige Zemente verwendet. Die Portlandzemente wurden so gewählt, dass die in deutschen Zementen vorkommenden Alkaligehalte von niedrig bis hoch, entsprechend Alkaliäquivalenten von 0,6 bis 1,2 M.-% v.Z. abgedeckt werden. Die hüttensandhaltigen Zemente dienen vor allem als Referenzzemente für die flugaschehaltigen Bindemittelkombinationen. Dies wird u. a. dadurch gewährleistet, dass diese Zemente aus dem gleichen Werk wie der Portlandzement mit dem hohen Alkaliäquivalent von 1,2 M.-% v.Z. stammen und somit mit dem selben Klinker hergestellt wurden.

#### **Flugaschen und Kalksteinmehl**

Die Flugaschen variieren in der Feinheit und im Alkaligehalt. Durch die Wahl von Flugaschen mit mittlerer und hoher Feinheit, bzw. mit hohem und niedrigem Alkaligehalt, können die Einflüsse aus unterschiedlicher puzzolanischer Reaktivität, bzw. aus unterschiedlichem Alkalibeitrag in die Porenlösung auf eine AKR-vermeidende Wirkung im Beton bestimmt werden.

Das Kalksteinmehl dient als inerter Referenzzusatzstoff.

### 3.2 Versuche zur Ermittlung des Pessimums von Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint

In Voruntersuchungen wurde in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung der Gehalt an Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint zum Erreichen eines nach Literaturangaben [21] zu erwartenden Dehnungsmaximums (Pessimum) ermittelt. Dazu wurde der Gehalt reaktiven Gesteins in Stufen von 5 % zwischen 10 und 35 % variiert. Von dem Beton mit  $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ , w/z-Wert = 0,5 und einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent ( $\text{Na}_2\text{O}_e$ ) des Portlandzements von 1,21 M.-% wurden die größten Dehnungen erwartet. An diesem Beton wurde untersucht, inwiefern sich ein Anteil von 15 % Flugasche im Bindemittel auf die Lage des Pessimums auswirkt. Zusätzlich wurde überprüft, ob es bei Flugaschegehalten von 35 % bei Portlandzementen bzw. 30 % bei Zementen mit Hüttensand noch zu einer schädigenden Alkalireaktion kommt. Die daraus erhaltenen Ergebnisse dienen dazu, die maximalen Flugaschegehalte in den Betonen der Hauptversuche zu bestimmen.

Nach dem Erreichen der Enddehnungen wurde, entsprechend der Lage des Pessimums, der Gehalt alkaliempfindlichen Materials EII-OF und EIII-OF in den Mischungen der Hauptversuchsmatrix festgelegt.

Die Betonproben (je 2 Balken  $100/100/500 \text{ mm}^3$ ) wurden in der Nebelkammer ( $40^\circ\text{C}$ ; 100 % r.F.) gelagert. Es erfolgten Dehnungs- und Ultraschalllaufzeitmessungen. Bei allen flugaschehaltigen Mischungen wurde die Flugasche F1, siehe Punkt 5.1.2, verwendet.

Für die Ermittlung des Pessimums wurden die Versuchsreihen an Betonbalken teilweise durch Versuche an Feinbetonprismen (je 3 Prismen  $40/40/160 \text{ mm}^3$ ) ergänzt. Bei ansonsten identischer Mischungszusammensetzung, wie Bindemittelgehalt, w/b-Wert und Anteil reaktiver Gesteinskörnung in der Kornfraktion 2/8 mm, unterscheiden sich die Feinbetonmischungen von den Betonmischungen nur in der Sieblinie, B/C 8 für den Feinbeton bzw. B/C 16 für den Beton. Die geringeren Probekörperabmessungen der Feinbetonmischungen führen zwar zu einer Verringerung der maximal erreichten Dehnungen, aber der prinzipielle Reaktionsverlauf und somit die Abschätzung eines pessimalen Gehalts reaktiver Gesteinskörnungen wird dadurch nicht beeinflusst [22]. Zudem sind in der Vergangenheit bereits mehrere Arbeiten zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen und des Ablaufs der Alkali-Kieselsäure-Reaktion mit Probekörperabmessungen  $40/40/160 \text{ mm}^3$  durchgeführt worden [23, 24].

### 3.3 Hauptversuche

#### 3.3.1.1 Vorgehensweise

Bei der Wahl der Betonrezepturen wurde differenziert auf das jeweilige Schadensverhalten der schnell reagierenden porösen Gesteinskörnungen (Opalsandstein) und der langsam reagierenden dichten Gesteinskörnungen (Grauwacke und Material aus dem Oberrheingraben) eingegangen. So zeigen die Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint das größte Schadenspotential bei hohen Bindemittelgehalten und w/b-Werten von 0,5 bis 0,6. Dagegen kann davon ausgegangen werden, dass dichte Gesteinskörnungen die größten Schäden bei geringeren Bindemittelgehalten und w/z-Werten um 0,45 aufweisen. Dies spiegelt sich auch in den Prüfplänen des DIBt und der Alkali-Richtlinie des DAfStb wieder [26, 30].

Begründet wird dieses unterschiedliche Verhalten im Allgemeinen damit, dass bei der AKR von porösen Gesteinskörnungen wie Opalsandstein, von der Oberfläche der Gesteinskörner ausgehend, große Mengen an Gel gebildet werden. Dabei wird durch einen ständig wachsenden Expansionsdruck die umgebende Mörtelmatrix gesprengt. Dafür wird aber ein steter Nachschub an Alkalien und Wasser benötigt. Bei dichteren Gesteinen hingegen reichen bereits geringe Mengen Gels für eine schlagartige Sprengung der Gesteinskörner von innen heraus aus. Die dabei entstehenden Risse im Gestein führen aber nur dann zu einer Schädigung der umgebenden Mörtelmatrix, wenn diese sich aufgrund geringer Porosität bzw. Duktilität nicht entsprechend verformen kann.

Die maximale Austauschrate von Zement durch Flugasche wurde auf 30 M.-% festgelegt. Stichpunktartig wurden Betone mit 35 M.-% Flugasche hergestellt. Diese Vorgehensweise beruhte auf der Auswertung von Vorschriften bestehender ausländischer Regelwerke [25].

Die Betonproben werden in der Nebelkammer (40°C; 100% r.F.) und im Freien gelagert. An den Probekörpern erfolgen Dehnungs- und Ultraschalllaufzeitmessungen, die Würfel mit 300 mm Kantenlänge werden auf Abplatzungen, Gelausscheidungen und Risse untersucht.

Die Charakterisierung des Betongefüges erfolgte mittels Quecksilberdruckporosimetrie. Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung wurde aus Beton- und Leimproben Porenlösung ausgepresst und mittels ICP analysiert. Nach Abschluss der Lagerung wird an ausgewählten Betonen das AKR-Schadensbild im Betongefüge mittels Dünnschliffmikroskopie erfasst.

### 3.4 Beschreibung der Betone

#### 3.4.1 Zusammensetzung

##### Betone

Die Grundrezepturen der Betone wurden in Abhängigkeit von der Gesteinsart ausgewählt. Damit konnten unter Berücksichtigung des unterschiedlichen Reaktionsverhaltens der Gesteinskörnungen jeweils möglichst scharfe Prüfbedingungen erreicht werden.

##### Grundrezeptur 1:

Für die Kiese mit Opalsandstein/Flint wurde eine Grundrezeptur mit 500 kg Zement, mit einem w/z-Wert von 0,5, der Sieblinie B16/C16 und der reaktiven Gesteinskörnung in der Fraktion 2/8 mm verwendet. Die Auswahl dieser Mischungszusammensetzung erfolgte in Anlehnung an einen Prüfplan des DIBt für die Zulassungsprüfung von Zementen als NA-Zement [26]. Die Gehalte der Kiese mit Opalsandstein/Flint im Beton richteten sich nach den Ergebnissen der Voruntersuchungen zum pessimalen Dehnungsverhalten der Betone. Zur Ermittlung des pessimalen Gehalts an reaktiver Gesteinskörnung EIII-OF bzw. EII-OF wurden die reaktiven Anteile an der Gesteinskörnung zwischen 15 und 30 M.-% variiert.

##### Grundrezeptur 2:

Die Grauwacke und die Gesteinskörnungen aus dem Oberrheingraben wurden mit 400 kg Zement, mit einem w/z-Wert von 0,45, der Sieblinie A16/B16 und mit der reaktiven Gesteinskörnung in der Fraktion 2/16 mm, entsprechend 70 M.-% vom Gesamtzuschlag, geprüft. Diese Rezeptur ist der Alkali-Richtlinie, Teil 3, entnommen.

Stichpunktartig wurden für die jeweiligen Gesteinsarten noch weitere Rezepturen, z.B. mit Variation des w/z-Wertes, verwendet.

Ausgehend von den Rezepturen ohne Flugasche erfolgte ein massebezogener Austausch der Zemente durch Flugasche. Dabei wurden Flugaschegehalte zwischen 15 und 35 M.-% v.Z. auf ihre Wirksamkeit hinsichtlich AKR untersucht. Der massebezogene Austausch von Zement durch Flugasche führt zu einer Erhöhung des Bindemittelvolumens in den flugaschehaltigen Betonen und somit zu einer Verringerung des Gesamtgehaltes an Gesteinskörnung. Unabhängig von der Menge ausgetauschter Flugasche wurde die Masse der reaktiven Gesteinskörnung je m<sup>3</sup> Beton, ermittelt aus der jeweiligen Grundrezeptur ohne Flugasche, konstant gehalten und das veränderte Gesamtgesteinsvolumen über die inerte Gesteinskörnung ausgeglichen.

In Tabelle 3-1 ist die Zusammensetzung der beiden Grundrezepturen bei Verwendung mit den verschiedenen Gesteinskörnungen angegeben.

Tabelle 3-1: Kennwerte der beiden Grundrezepturen

Parameter	Einheit	Grundrezeptur 1	Grundrezeptur 2
1	2	3	4
Bindemittel $b = (z+f)$	[kg/m <sup>3</sup> ]	500	400
w/b	--	0,50	0,45
Sieblinie:			
Opalsandstein/ Flint	--	B/C 16	B/C 16
Grauwacke, Oberrheingraben	--	A/B 16	A/B 16
Anteil reaktiver Gesteinskörnung:			
Opalsandstein/ Flint EII-OF	[M.-%]	15-30 <sup>1)</sup>	15-30 <sup>1)</sup>
Opalsandstein/ Flint EIII-OF	[M.-%]	15-30 <sup>1)</sup>	15-30 <sup>1)</sup>
Grauwacke	[kg/m <sup>3</sup> ]	1110	1305
Kies Oberrhein- graben	[kg/m <sup>3</sup> ]	1065	1250
Splitt Oberrhein- graben	[kg/m <sup>3</sup> ]	1075	1265

<sup>1)</sup> In Abhängigkeit vom pessimalen Gehalt an EII-OF bzw. EIII-OF Gesteinskörnung im Beton dosiert

### Feinbetone

Für ergänzende Untersuchungen zum pessimalen Gehalt der Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint im Beton wurden Feinbetone mit der Sieblinie B/C 8 bei ansonsten gleicher Bindemittelzusammensetzung und gleichen Anteilen reaktiven Materials in der Fraktion 2/8 mm wie für die Betone hergestellt.

Die Untersuchungen mit Duranglas als reaktivem Standardmaterial für die Bewertung der Effektivität von Flugasche hinsichtlich der Vermeidung einer AKR wurden an Feinbetonen mit der Sieblinie B/C 8, einem Bindemittelgehalt von 500 kg/m<sup>3</sup> und einem w/b-Wert von 0,5 durchgeführt. Das Duranglas wurde zu gleichen Anteilen in den Fraktionen 2/4 mm und 4/8 mm verwendet. Der Gehalt an Duranglas im Feinbeton richtete sich nach den Ergebnissen von Pessimumsuntersuchungen.

Eine Zusammenstellung der hergestellten Betone und Feinbetone findet sich in Anhang 3, Tabelle A3 1 bis Tabelle A3 9.

### 3.4.2 Nomenklatur

Betone zur Ermittlung des pessimalen Gehalts an Gesteinskörnungen mit Opalsandstein/Flint:

Es werden die Art der reaktiven Gesteinskörnung, die Kennzeichnung als Mischung der Matrix zur Ermittlung des Pessimums, die Betonrezeptur, der Gehalt reaktiver Gesteinskörnung und der Gehalt an Flugasche F1 im Bindemittel angegeben. Die Feinbetonmischungen erhalten zusätzlich zur Mischungsbezeichnung den Anhang „FB“.

Bezeichnungsbeispiel:

#### **EIII-OF P1 / 20-15**

Gesteinskörnung mit Opalsandstein/Flint der Alkaliempfindlichkeitsklasse **EIII-OF**, Mischung zur Ermittlung des Pessimums, Betonrezeptur **1**, **20 M.-%** reaktive Gesteinskörnung, **15 M.-%** Flugasche F1 im Bindemittel.

Betone zur Ermittlung der Wirkungsweise der Flugasche hinsichtlich AKR:

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

Bezeichnungsbeispiel:

#### **Gw2 / F2 30**

Gesteinskörnung **Grauwacke**, Betonrezeptur **2**, **30 M.-%** Flugasche **F2** im Bindemittel.

### **3.5 Herstellung der Betone**

#### **Beton**

Die Betonherstellung erfolgte in einem Zyklus-Gleichlauf-Zwangsmischer mit einem Nennvolumen von 100 Litern. Der Mischzyklus setzte sich aus einem Vormischen der trockenen Ausgangsstoffe von 60 Sekunden, der Wasserzugabe innerhalb 30 Sekunden und einer Hauptmischzeit von 60 Sekunden zusammen.

Die Probekörper wurden auf einem Rütteltisch verdichtet. Die Rüttelfrequenz und die Rütteldauer wurden entsprechend der Frischbetonkonsistenz eingestellt.

#### **Feinbeton und Leime**

Das Mischregime für die Feinbetone und Leime wurde in Anlehnung an DIN EN 196-1 [27] durchgeführt.

#### **Lagerung**

Die Beton- und Feinbetonprobekörper lagerten bis zum Ausschalen im Alter von 24 Stunden in einem Feuchtraum bei 20°C und einer relativen Luftfeuchte  $\geq 95\%$ . Anschließend wurden die Probekörper entsprechend den weiteren Prüfbedingungen gelagert.

Die Probekörper für die Außenlagerung wurden nach dem Ausschalen bis zum Alter von 28 Tagen bei Raumklima und in Plastikfolie eingeschlagen gelagert. Damit werden schädigende klimatische Einflüsse, wie Austrocknung und Frost, auf die Entwicklung des jungen Betons vermieden.

Die in PE-Flaschen gefüllten Leime 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.

## 4 Untersuchungsmethoden

### 4.1 Frisch- und Festbetonprüfungen

Am Frischbeton wurde bei allen Betonen das Ausbreit- bzw. Verdichtungsmaß, der Luftporengehalt und die Frischbetonrohddichte nach DIN 1048-1 [28] ermittelt. Die Versuche wurden rd. 10 bis 15 Minuten nach Wasserzugabe durchgeführt.

Die Rohdichten und Druckfestigkeiten wurden an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge gemäß DIN 1048-5 [29] im Alter von 28 Tagen an jeweils 3 Probekörpern je Beton geprüft.

### 4.2 Prüfung auf Alkali-Kieselsäure Reaktion

#### 4.2.1 Prüfung der potentiellen Alkalireaktivität der Gesteinskörnungen (Magdeburger Schnelltest)

Gesteinskörnungen, für die kein Prüfzeugnis hinsichtlich ihrer Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse nach Alkali-Richtlinie des DAfStb [30] vorliegt, wurden hinsichtlich ihrer Alkalireaktivität nach dem Magdeburger Schnelltest [31] 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 mm<sup>3</sup>) werden Dehnungen gemessen. Nach 21 Tagen kann bereits eine eindeutige Aussage zur Alkalireaktivität der Gesteine getroffen werden. Dieser Versuch ist nicht genormt, wurde aber durchgeführt, um die Reaktivität der verwendeten Gesteine einschätzen zu können. Die genaue Beschreibung des Schnelltests und die Kriterien zur Bewertung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen sind im Anhang 1 aufgeführt.

#### 4.2.2 Prüfung einer schädigenden AKR im Beton

##### Beton

Die Betone wurden nach den Vorschriften der Alkali-Richtlinie, Teil 3, des DAfStb [30] auf ihre Alkaliempfindlichkeit geprüft.

Zur Beurteilung möglicher Treiberscheinungen durch Alkalireaktion wurden 3 Balken mit den Maßen 100/100/500 mm<sup>3</sup> 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 zwei 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 ( $\epsilon \sim 0,2$  bis 0,4 mm/m). Parallel zu den Dehnungsmessungen werden an den Balken die Ultraschalllaufzeiten nach Heft 422 DAfStb [32] gemessen und 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, Teil 3, Absatz 3, 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 Nebelkammer angegeben. In diesem Forschungsvorhaben wurde die Bewertung der Betone prinzipiell nach 9 Monaten, entsprechend der Alkali-Richtlinie, vorgesehen. 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, werden die Betone, die im vorgesehenen Prüfzeitraum keine schädigenden Alkalireaktionen gezeigt haben, bis zum Alter von 18 Monaten in der Nebelkammer weitergelagert.

Ergänzend zu der Lagerung in der Nebelkammer wurde ein Würfel mit 300 mm Kantenlänge hergestellt und im Freien gelagert. Diese Probekörper werden monatlich auf eine mögliche Rissbildung hin untersucht und bis zum Alter von 5 Jahren der Bewitterung ausgesetzt.

### **Feinbeton**

Für Untersuchungen am Feinbeton wurden 3 Prismen mit den Maßen 40/40/160 mm<sup>3</sup> mit stirnseitig einbetonierten Meßzapfen für die Dehnungsmessungen hergestellt. Die Messung der Dehnungen erfolgt gemäß DIN 52450 [33]. Die Probekörper werden entsprechend den Betonbalken gelagert und zu denselben Terminen geprüft.

### 4.3 Mineralogische Untersuchungen

#### Durchlichtmikroskopische Untersuchungen

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

#### Röntgenbeugung mit Rietveld-Analyse

Die Zerkleinerung der Proben erfolgte, wenn nötig, zunächst mit dem Backenbrecher und der Scheibenschwingmühle. Die Gesamtmenge von mindestens 1 kg 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-Langfeinfocusröhre 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.

### 4.4 Chemische Untersuchungen

Die chemischen Untersuchungen an den Zementen und 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.

## 4.5 Physikalische Untersuchungen

### Dichte

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

### 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.

## 4.6 Zusammensetzung der Porenlösung

### Probekörper, Lagerung und Prüftermine

Die Proben wurden aus derselben Charge Beton wie für die Probekörper für die Prüfungen nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, entnommen. 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. Nach einer Erhärungszeit von 24 Stunden bei 20°C wurden die Proben standardmäßig bei 40°C gelagert. Um den Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Zusammensetzung der Porenlösung zu ermitteln, wurden stichpunktartig einige Proben bei 20°C und 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.

### Auspressverfahren

Das Auspressen der Porenlösung erfolgte mit Hilfe einer stählernen Auspressvorrichtung. Das Verfahren ist u. a. in [34] 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 4-1.



Abbildung 4-1: Schemadarstellung der Auspressvorrichtung für die Porenlösung von Beton

Das Auspressen der Proben erfolgt in Abhängigkeit der Ergiebigkeit der Probe unter einem maximalen Druck von 600 bzw. 850 N/mm<sup>2</sup>, die Laststeigerungsrate beträgt jeweils 0,7 N/mm<sup>2</sup> s. Nach Erreichen der Höchstlast wird der Druck so lange gehalten (5 bis 60 Minuten) bis genügend Porenlösung gewonnen wird. Nach [35] und [36] hat der aufgebrachte 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 4-1 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 4-1: Reproduzierbarkeit des Auspressversuchs; Betonalter 28 d;  
 Lagerungstemperatur 40°C

Ion [mmol/l]	OH <sup>-</sup>	Ca <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
1	2	3	4	5
Einzelwert	394,2	0,58	145,7	354,7
	393,9	0,80	146,3	352,5
	403,0	0,59	147,4	355,4
Mittelwert	397,0	0,66	146,5	354,2
Standardabweichung	5,15	0,12	0,88	1,55
Variationskoeffizient [%]	1,30	18,58	0,60	0,44

### Analyse der Porenlösung

Es wurde die Na<sup>+</sup>-, K<sup>+</sup>-, Ca<sup>++</sup>- und OH<sup>-</sup>-Ionenkonzentration der Porenlösung bestimmt. Die Bestimmung der OH<sup>-</sup>-Konzentration erfolgte an einer Teilprobe durch Säure-Base-Titration gegen den Farbindikator Neutralrot. Die Kationenkonzentrationen wurden mittels ICP OES (optische Emissionsspektroskopie mit gekoppelter Plasmaanregung; Hersteller Jobin Yvon, Ultima 2) an einer 1:50 verdünnten Lösung bestimmt.

#### 4.7 Porengrößenverteilung

Die Kennwerte für das Porensystem von Betonen und Gesteinskörnungen wurden mittels Quecksilberdruckporosimetrie (Gerät AutoPore III der Firma Micromeritics) in einem Druckbereich von 0,004 bis 400 MPa ermittelt. Damit werden Porenradien von 170  $\mu\text{m}$  bis 1,6 nm erfasst. Es wird eine Oberflächenspannung  $\sigma$  des Quecksilbers von 0,485 N/m und ein Benetzungswinkel  $\theta$  zwischen Quecksilber und Gestein bzw. Beton von  $130^\circ$  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  $50^\circ\text{C}$  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 4-2 ist eine gute Wiederholbarkeit der Messung der Porengrößenverteilung zu erkennen, so dass von repräsentativen Ergebnissen bei der Verwendung von Betonproben ausgegangen werden kann.

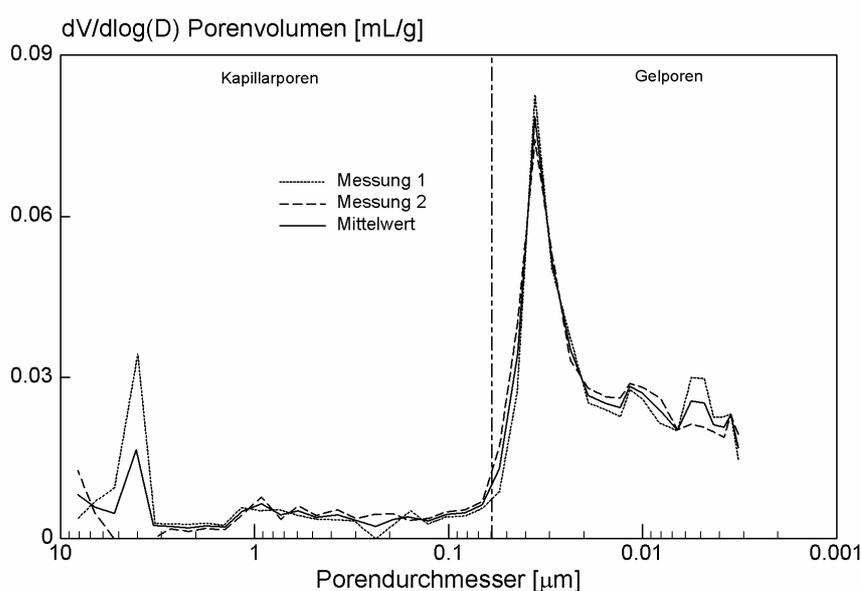


Abbildung 4-2: Wiederholbarkeit der Quecksilberdruckporosimetrie am Beton

## 5 Untersuchungsergebnisse

### 5.1 Eigenschaften der Ausgangsstoffe

#### 5.1.1 Zement

Es wurden 7 Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 eingesetzt. Es handelt sich dabei um handelsübliche Zemente nach DIN EN 197-1:2001-02 [37]. Mit diesen Zementen wurde die Bandbreite der Alkaligehalte - 0,6 bis 1,2 M.-% - in deutschen Portland- und Hüttenzementen abgedeckt, siehe Tabelle 5-1.

Die Portlandzemente, Z1 bis Z4, weisen in Abstufung von rd. 0,2 M.-% Alkaligehalte zwischen 1,2 und 0,6 M.-% auf. Die Zemente mit Hütten sand, Z5 bis Z7, stammen aus dem gleichen Werk wie der Portlandzement Z1 und sind mit dem gleichen Klinker hergestellt.

Tabelle 5-1: Alkaligehalte der verwendeten Zemente

Zement: CEM	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R	II/A-S 32,5 R	III/A 32,5 N	III/B 32,5 N
Bezeichnung	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
1	2	3	4	5	6	7	8
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> <sup>1)</sup> [M.-%]	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78
Hütten sand [M.-%]	--	--	--	--	13	42	72

1) Na<sub>2</sub>O-Äquivalent = 0,658 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O [M.-%]

#### 5.1.2 Flugasche und Kalksteinmehl

Es wurden drei Flugaschen aus Trockenfeuerung verwendet. Die Flugaschen unterscheiden sich in der Feinheit, dem Alkaliegehalt und dem Glasgehalt. Es werden die in Deutschland üblichen Flugasche-Qualitäten hinsichtlich Feinheit und Alkaliegehalt - 1,0 bis 3,7 M.-% - abgedeckt, siehe Tabelle 5-2.

Das verwendete Kalksteinmehl weist mit rd. 0,2 M.-% einen niedrigen Alkaliegehalt auf.

Die Flugaschen F1 bzw. F3, die mit rd. 20 M.-% > 45 µm jeweils eine mittlere Feinheit aufweisen, unterscheiden sich hinsichtlich des Alkaliegehalts mit 3,6 bzw. 1,1 M.-% und des Glasgehalts mit 80 bzw. 67 M.-%. Die Flugasche F2 ist eine gesichtete Flugasche hoher Feinheit mit einem Größtkorn von rd. 50 µm. Die Flugasche F2 weist einen Alkaliegehalt von 3,7 M.-% und einen Glasgehalt von 85 M.-%, ähnlich der Flugasche F1, auf. Mit CaO-Gehalten zwischen 2,6 und 4,7 M.-% können die 3 Flugaschen als CaO-arm eingestuft werden.

Tabelle 5-2: Kennwerte der verwendeten Flugaschen

Flugasche	Feinheit <sup>1)</sup> [M.-% > 45 µm]	Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> <sup>2)</sup> [M.-%]	Aktivitätsindex <sup>3)</sup> 28d / 90d [%]	Glasgehalt <sup>4)</sup> [M.-%]
1	2	3	4	5
F1	21,4	3,6	84 / 98	80
F2 <sup>5)</sup>	1,0	3,7	91 / 114	85
F3	18,1	1,1	81 / 104	67

1) Luftstrahlsiebung

2) Na<sub>2</sub>O-Äquivalent = 0,658 K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O [M.-%]

3) Aktivitätsindex nach DIN EN 450 3.5

4) Die Quantifizierung des Glasgehalts der Flugaschen wurde mit der Rietveldmethode durchgeführt

5) gesichtete Flugasche mit einem Größtkorn von rd. 50 µm

Die weiteren Angaben zur chemischen und mineralogischen Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften der Zemente, der Flugaschen und des Kalksteinmehls können dem Anhang 2, Tabelle A2 1 bis Tabelle A2 6 und Abbildung A2 1 bis Abbildung A2 2 entnommen werden.

### 5.1.3 Gesteinskörnung

Die Untersuchungen zum Einfluss der Flugasche auf eine Alkalireaktion im Beton wurden an den in der DAfStb-Richtlinie „Alkalireaktion im Beton“ [30] aufgeführten Gesteinskörnungen durchgeführt. Es wurden 2 Kiese mit Opalsandstein/Flint der Alkaliempfindlichkeitsklassen EII-OF (bedingt brauchbar) und EIII-OF (bedenklich) nach der Alkali-Richtlinie, Teil 2, des DAfStb, eine Grauwacke, ein Kies und ein Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben verwendet. Der Kies und der Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben stammen aus dem selben Lieferwerk. Als inerte Gesteinskörnungen wurden Quarzsand, calcitischer Kies und Diabas eingesetzt. Für ergänzende Untersuchungen an Feinbetonen wurde als künstliche Gesteinskörnung Duranglas verwendet.

Für die Kiese mit Opalsandstein/Flint liegen Prüfzeugnisse nach Alkali-Richtlinie Teil 2 hinsichtlich ihrer Alkaliempfindlichkeitsklasse vor, siehe Abbildung A2 3 und Abbildung A2 4. Die potentielle Alkalireaktivität der Grauwacke, des Kieses bzw. Kies-Edelsplittes aus dem Oberrheingraben und des Duranglases bzw. die Alkaliunempfindlichkeit der als inert angenommenen Gesteinskörnungen wurde durch Voruntersuchungen mit dem Magdeburger Schnelltest festgestellt [31], siehe Abbildung 5-1. 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.

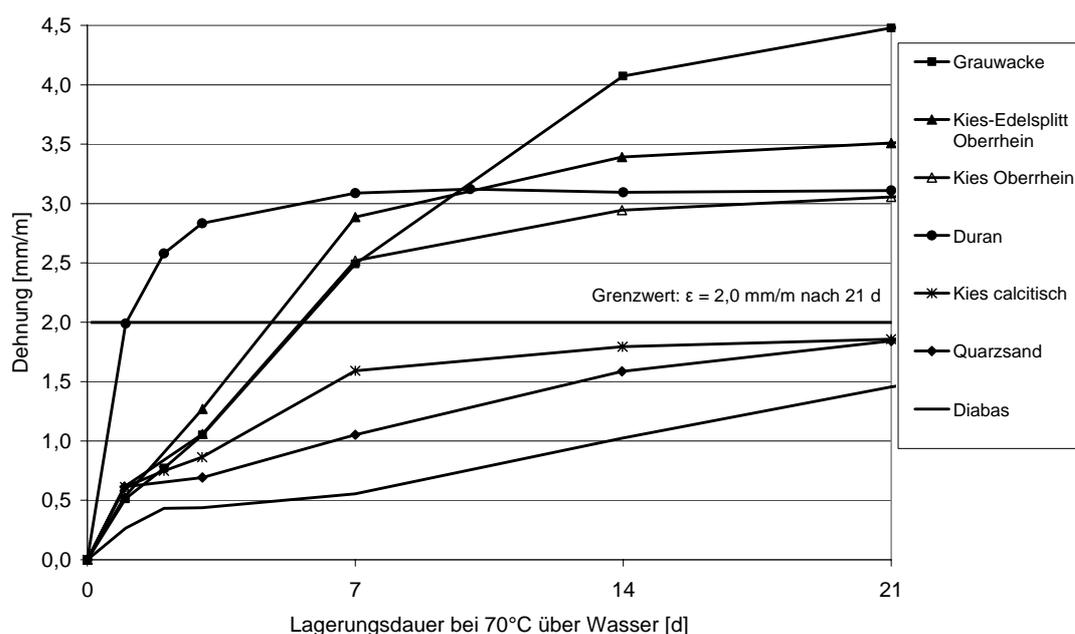


Abbildung 5-1: Dehnungsverhalten der geprüften Gesteinskörnungen unter AKR-beschleunigenden Bedingungen. Lagerung bei 70°C über Wasser

Eine Zusammenstellung der verwendeten Gesteinskörnungen mit Angabe der Provenienz, der verwendeten Kornfraktionen und der Rohdichten nach DIN EN 1097-6:2000 [38] ist in Tabelle 5-3 gegeben. Die angegebenen Rohdichten stellen den Mittelwert für die verwendeten Kornfraktionen dar. Diese Werte wurden für die Stoffraumrechnung der Betonrezepturen verwendet.

Tabelle 5-3: Übersicht über die verwendeten Gesteine

Gesteinskörnung	Bezeichnung	Provenienz	Kornfraktion	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]
1	2	3	4	5
Quarzsand	EI <sup>1)</sup>	Leipziger Tieflandsbucht	0/2	2,66
Kies, calcitisch	EI <sup>1)</sup>	Münchner Schotterebene	8/16	2,74
Splitt Diabas	EI <sup>1)</sup>	Fichtelgebirge	2/5; 5/8	2,89
Kies Opal-sandstein/Flint	EII-OF <sup>2)</sup>	norddeut. Raum	2/8	2,63
Kies Opal-sandstein/Flint	EIII-OF <sup>3)</sup>	norddeut. Raum	2/8	2,63
Kies Ober-rheingraben	KoR	Oberrhinesisches Tiefland	2/8; 8/16	2,64
Splitt Ober-rheingraben –	SoR	Oberrhinesisches Tiefland	2/5; 5/8; 8/11; 11/16	2,66
Splitt Grauwacke	Gw	Oberlausitz	2/5; 5/8; 8/11; 11/16	2,75
Duranglas	D	--	2/4; 4/8	2,19

<sup>1)</sup> unbedenklich hinsichtlich Alkalireaktion nach Alkali-Richtlinie DAfStb

<sup>2)</sup> bedingt brauchbar hinsichtlich Alkalireaktion nach Alkali-Richtlinie DAfStb

<sup>3)</sup> bedenklich hinsichtlich Alkalireaktion nach Alkali-Richtlinie DAfStb

## Porosität

Eine wichtige Kenngröße der reaktiven Gesteinskörnungen ist ihre Porosität. Über kapillares Saugen und Diffusion dringen die Alkalien in das Porensystem ein. Kenntnisse über das Porenvolumen und die Porenverteilung können somit zur Beurteilung des Angriffs der Alkalien auf die reaktiven Bestandteile der Gesteine herangezogen werden.

Die Dichte  $\rho$  der Gesteinskörnungen wurde mit der Helium-Pykometrie bestimmt. Die aus der Quecksilberdruckporosimetrie ermittelten Werte für die Dichte  $\rho$ , die Kornrohichte  $\rho_{\text{Korn}}$  und das Porenvolumen  $V_p$  sind zum Vergleich ebenfalls in Tabelle 5-4 angegeben.

Erwartungsgemäß wies der Opalsandstein der Gesteinskörnung EIII-OF mit rd. 40 % ein sehr hohes Porenvolumen im Vergleich zu den als dicht zu bezeichnenden Gesteinskörnungen Grauwacke bzw. Kies und Kies-Edelsplitt Oberrhein mit rd. 1 bzw. 3 Vol.-% auf. Dies kann u. a. als Grund für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der Alkalireaktion dieser Gesteinskörnungen angenommen werden.

Der hier nur stichpunktartig aus dem Kies Oberrhein untersuchte kieselig gebundene Sandstein wies mit rd. 10 % ein bereits recht hohes Porenvolumen auf. Ob diese Gesteinsart an einer schädigenden AKR im Beton beteiligt ist, muss aber erst durch eine mikroskopische Untersuchung des Betongefüges geklärt werden. Es ist davon auszugehen, dass auch im Kies-Edelsplitt solche Gesteinsarten vorhanden sind.

Tabelle 5-4: Dichte und Kennwerte zur Porosität der Gesteinskörnungen

Gesteinskörnung	Heliumpyknometrie	Quecksilberdruckporosimetrie		
	$\rho$	$\rho$	$\rho_{\text{Korn}}$	$V_p$
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[Vol.-%]
1	2	3	4	5
Kies mit Opalsandstein / Flint <sup>1)</sup>				
Opalsandstein	2,58	2,32	1,39	40,10
Flint	2,63	2,60	2,54	2,13
Grauwacke <sup>2)</sup>	2,73	2,66	2,64	0,88
Kies Oberrhein <sup>3)</sup>				
kieselig geb. Sandstein	2,68	2,63	2,37	9,98
dicht verkieselter Sandstein	2,68	2,65	2,57	3,05
Kies-Edelsplitt Oberrhein <sup>2)</sup>				
Flint	2,66	2,63	2,55	2,96
dicht verkieselter Sandstein	2,71	2,62	2,54	3,27

<sup>1)</sup> Proben aus Lieferkörnung 2/8

<sup>2)</sup> Proben aus Lieferkörnung 11/16

<sup>3)</sup> Proben aus Lieferkörnung 8/16

### Petrographische Beschreibung

An den reaktiven Gesteinskörnungen erfolgte eine petrographische Gesteinsbestimmung am Dünnschliff. Dies diente dazu, 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 Silikatvarietäten von amorph bzw. kryptokristallin bis grobkristallin, auf Anzeichen einer Störung der Kristallgitterordnung, wie undulöse Auslöschung 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. Die ausführlichen Ergebnisse der petrographischen Untersuchungen sind in Anhang 2 aufgeführt.

#### Kies Opalsandstein / Flint:

Der Kies mit Opalsandstein / Flint der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF ist eine Mischung verschiedenster Gesteinsarten. So fanden sich im Haufwerk neben den namengebenden biogenen Sedimenten Opalsandstein und Flint verschiedene Arten kieseliger gebundener Sandsteine und Quarzite sowie Granit und Diabas. Im Kies der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF wurden prinzipiell die selben Gesteinsarten gefunden, allerdings konnte kein Opalsandstein entdeckt werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Prüfzeugnisse des MPA Eckernförde, siehe Abbildung A2 3 und Abbildung A2 4.

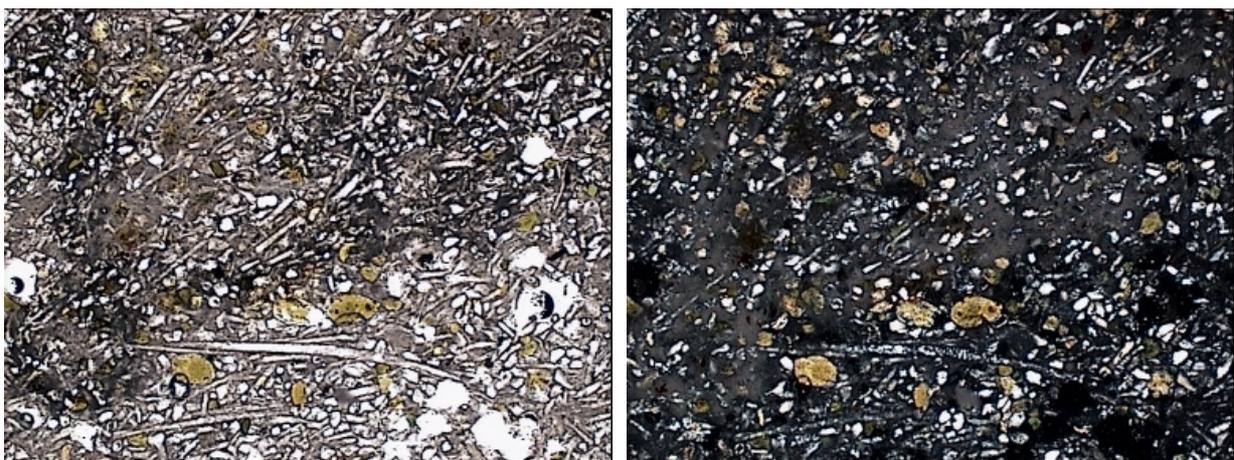


Abbildung 5-2: EIII-OF: Opalsandstein;  
links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, Opalschwammnadeln und Glaukonit;  
rechts: BB = 2,1 mm, X-Pol, sehr isotrope, kieselige Matrix

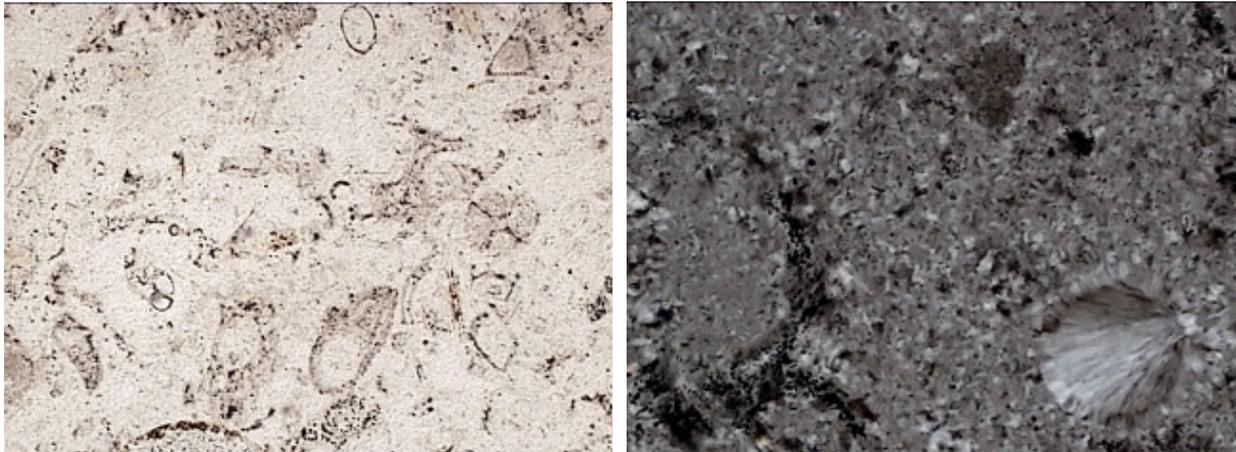


Abbildung 5-3: EIII-OF: Flint;  
 links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, Formrelikte von Kammertierchen und Schwammnadeln;  
 rechts: BB = 0,53 mm, X-Pol, homogenes kryptokristallines Gefüge mit Chalzedon

#### 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.

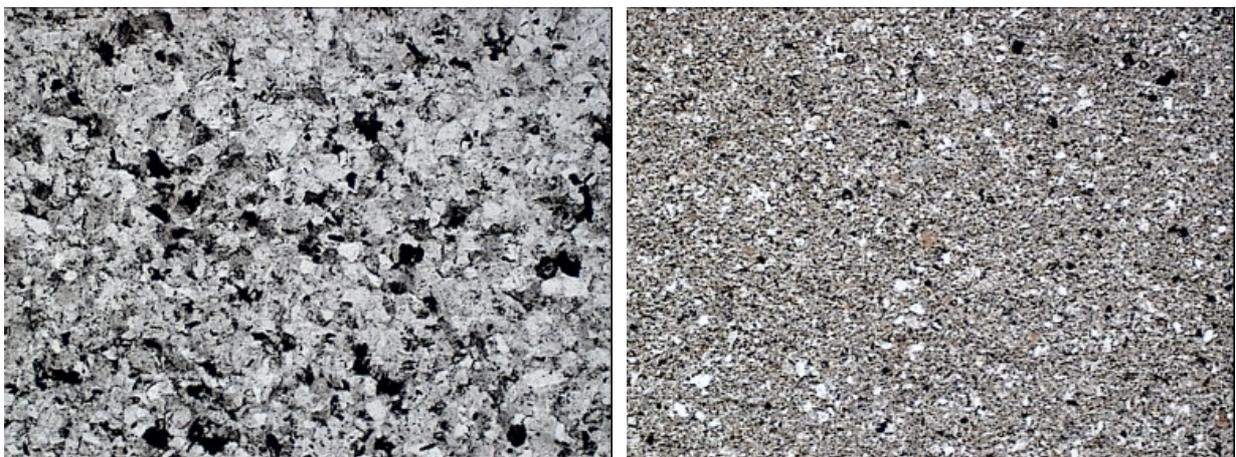


Abbildung 5-4: Grauwacke; links: BB = 2,1 mm, lin-Pol, sandsteinartig, Matrix aus Glimmerschüppchen und kryptokristallinem Quarz;  
 rechts: BB = 2,1 mm, lin-Pol, tonig, Matrix aus Dunkelglimmer

Kies / Kies-Edelsplitt Oberrhein:

Es zeigte sich, dass im Kies und Kies-Edelsplitt prinzipiell die selben Gesteinsarten, vor allem Quarz/Quarzite, kieselig gebundene Sandsteine und Flinte in ähnlich hohen Gewichtsanteilen vorhanden sind. Damit können auch die ähnlich großen 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 wiesen 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 subparallele Orientierung im Raum und verlaufen sowohl an Gefügegrenzen entlang als auch durch einzelne Körner hindurch. In Abbildung 5-5 ist exemplarisch eine schalenförmige Rissbildung entlang der Oberfläche eines kieselig gebundenen Sandsteins dargestellt. Eine solche Rissbildung konnte in den Kieskörnern nicht gefunden werden.

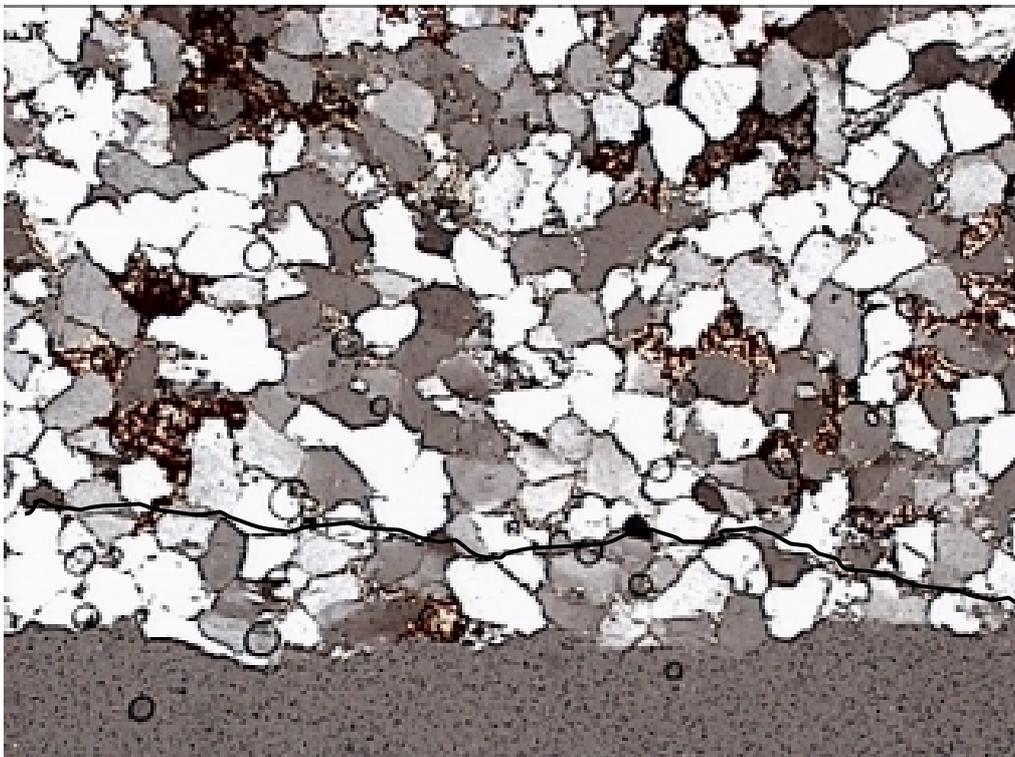


Abbildung 5-5: BB = 2,1 mm, X-pol; kieselig gebundener Sandstein mit Riss subparallel zur Oberfläche. (Riss nachgezeichnet)

## Röntgenbeugungsanalyse

Mittels Röntgenbeugungsanalyse wurde der Mineralbestand und der amorphe Anteil in den reaktiven Gesteinen bestimmt, siehe Tabelle A2 8.

Der Kies EIII-OF weist mit 26 M.-% einen signifikant höheren amorphen Anteil als der Kies EII-OF mit 18 M.-% auf. Darin dürfte auch der Grund für die stärkere Reaktivität des Kieses EIII-OF gegenüber dem Kies EII-OF zu finden sein.

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 Kies-Edelsplitt und der Kies Oberrhein unterscheiden sich sowohl in den Gehalten an Quarz als auch an amorphen Anteilen nur unwesentlich. Darin ist somit keine Begründung für das unterschiedliche Verhalten dieser Gesteinskörnungen hinsichtlich AKR zu finden.

## 5.2 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Ermittlung der Frisch- und Festbetoneigenschaften hatte vor allem die Kontrolle der Mischungseinwaage zum Ziel, zusätzlich konnte der Einfluss des Austausches von Zement durch Betonzusatzstoffe auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften erfasst werden. An den Betonen zur Ermittlung des pessimalen Gehalts an opalsandstein/flinthaltiger Gesteinskörnung wurden die Festbetonkennwerte jeweils an den Betonen mit 15 M.-% opalsandstein/flinthaltiger Gesteinskörnung geprüft. Die Frisch- und Festbetonkennwerte sind in Anhang 4 aufgeführt.

Die Grundrezepturen mit  $b = 500 \text{ kg/m}^3$  und  $w/b = 0,5$  (Rezeptur 1) bzw.  $b = 400 \text{ kg/m}^3$  und  $w/b = 0,45$  (Rezeptur 2) bewegen sich hinsichtlich der Verarbeitbarkeit in betontechnologischen Grenzbereichen. Damit sollte eine maximale Variation der Einflussparameter auf eine AKR, wie Zementgehalt und Porenraum, ermöglicht werden. Die Mischungen der Rezeptur 1 bewegen sich im Konsistenzbereich F 5 - 6, fließfähig - sehr fließfähig und die Mischungen der Rezeptur 2 im Konsistenzbereich C1, steif. Eine Erhöhung des  $w/b$ -Wertes der Rezeptur 1 von 0,5 auf 0,55 führte zu starkem Bluten und Sedimentation des Betons, so dass eine befriedigende Verarbeitbarkeit nicht mehr gegeben war.

Generell führte eine steigende Austauschmenge von Zement durch die Flugaschen F1 und F2 zu einer leicht verbesserten Verarbeitbarkeit bzw. Verflüssigung der Betone, während die Flugasche F3 eher zu einer steiferen Konsistenz führte. Bei Verwendung von Kalksteinmehl wurden ähnliche Konsistenzen wie für die reinen Zementmischungen erzielt.

Die Höhe der Druckfestigkeiten nach 28 Tagen ist überwiegend vom  $w/b$ -Wert bestimmt. So ergaben sich weitgehend unabhängig vom Zementgehalt -  $500$  bzw.  $400 \text{ kg/m}^3$  - und der verwendeten Gesteinskörnung für die Grundrezepturen bei einem  $w/z$ -Wert von 0,5 Druckfestigkeiten im Bereich von  $45 \text{ N/mm}^2$  gegenüber rd.  $50 \text{ N/mm}^2$  bei einem  $w/z$ -Wert von 0,45. Erwartungsgemäß sanken bei zunehmendem, rein massenbezogenem, Austausch von Zement durch Flugasche -  $F_{\max} = 35 \text{ M.-% v.Z.}$  - die Druckfestigkeiten auf Werte um die  $35 \text{ N/mm}^2$  bei einem  $w/b$ -Wert von 0,5 und  $45 \text{ N/mm}^2$  bei einem  $w/b$ -Wert von 0,45. Durch die Flugasche F2 wurden tendenziell etwas höhere Festigkeiten im Vergleich zu den Flugaschen F1 und F3 erreicht. Dies ist offensichtlich auf ihre höhere Feinheit zurückzuführen.

Dass bereits nach 28 Tagen eine beginnende puzzolanische Reaktion der Flugaschen zur Festigkeit der Betone beiträgt, zeigt der Vergleich der Ergebnisse mit Kalksteinmehl. Die Betone mit Kalksteinmehl erreichten bei gleicher Austauschrate in der Regel niedrigere Festigkeiten als die flugaschehaltigen Betone. Dies kann auf die Erhöhung des  $w/z$ -Wertes bei inertem Verhalten des Kalksteinmehls zurückgeführt werden.

### 5.3 Pessimaler Gehalt von Kiesen mit Opalsandstein / Flint im Beton

In Vorarbeiten wurde der pessimale Gehalt an Kies mit Opalsandstein/Flint im Beton, d.h. der Gehalt an EIII-OF bzw. EII-OF Gesteinskörnung, bei dem die größten Dehnungen aus einer Alkalireaktion entstehen, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Rezepturen und Zemente bestimmt. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden in einem zweiten Schritt die Zemente durch Flugasche in einer Größenordnung zwischen 15 und 35 M.-% ausgetauscht.

Unterstützend zu den Versuchen an Betonen wurden Feinbetone mit einem Größtkorn von 8 mm hergestellt. Eine Zusammenstellung der hergestellten Betone bzw. Feinbetone und der daraus erhaltenen Ergebnisse können Anhang 3, Tabelle A3 2 bis Tabelle A3 5 und Anhang 5, Abbildung A5 9 bis Abbildung A5 43 entnommen werden. Zur Übersicht sind die für die Pessimumsuntersuchungen hergestellten Betone in nachfolgenden Tabellen noch einmal aufgelistet.

Tabelle 5-5: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF hergestellten Betone zur Ermittlung der Pessima.

Bezeichnung	EIII-OF P1	EIII-OF P1a <sup>1)</sup>	EIII-OF P2	EIII-OF P3	EIII-OF P4	EIII-OF P5	EIII-OF P6
1	2	3	4	5	6	7	8
Zement	Z1	Z1	Z2	Z3	Z1	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,02	0,76	1,21	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	500	400	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	6,1	5,1	3,8	4,8	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,55	0,5	0,5	0,45	0,5	0,5
Kies EIII-OF [M.-% v. G.]							
ohne Flugasche	15/20/25/30	15	15/20/25/30	15/20/25/30	15/20/25/30	15/25	15/25
15 M.-% F1	15/20/25/30	--	--	--	--	--	--
35 M.-% F1	15/25/30	--	--	--	15/25/30	--	--

1) Rezeptur nach DIBt-Prüfplan [26]

Tabelle 5-6: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF hergestellten Betone zur Ermittlung der Pessima.

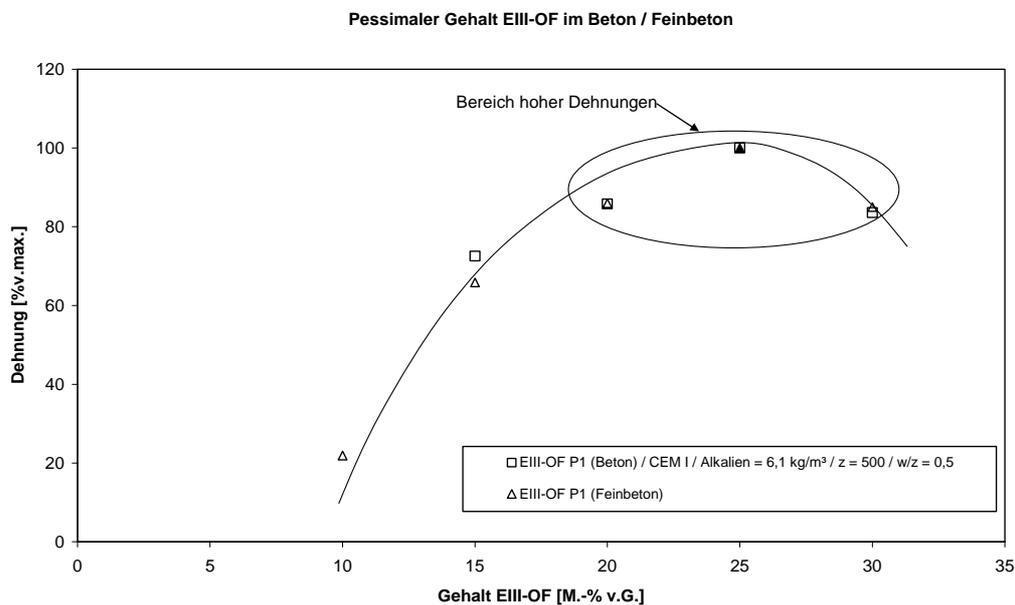
Bezeichnung	EII-OF P1	EII-OF P1a <sup>1)</sup>	EII-OF P3	EII-OF P4	EII-OF P5	EII-OF P6
1	2	3	4	5	6	7
Zement	Z1	Z1	Z3	Z1	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	0,76	1,21	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	400	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	6,1	3,8	4,8	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,55	0,5	0,45	0,5	0,5
Kies EII-OF [M.-% v. G.]						
ohne Flugasche	15/20/ 25/30	15	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/25	15/25
35 M.-% F1	15/25/ 30	--	--	15/25/ 30	--	--

1) Rezeptur nach DIBt-Prüfplan [26]

### 5.3.1 Pessimum EIII-OF

#### Betone mit Portlandzement

Der Beton P1 -  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ;  $w/z = 0,5$  - zeigte mit einem Alkaligehalt von  $6,1 \text{ kg pro m}^3$  Beton bei Gehalten von 20 bis 30 M.-% EIII-OF in der Gesamtgesteinskörnung einen Bereich starker Schädigung mit hohen Dehnungen, intensiver Rissbildung und Gelausscheidung in den Probekörpern. Die höchste Dehnung ergab sich bei 25 M.-% EIII-OF, allerdings zeigte dieser Beton auch bei abweichenden Gehalten von  $\pm 5 \text{ M.-%}$  EIII-OF noch hohe Dehnungen im Bereich von 80 % der pessimalen Dehnung, siehe Abbildung 5-6.

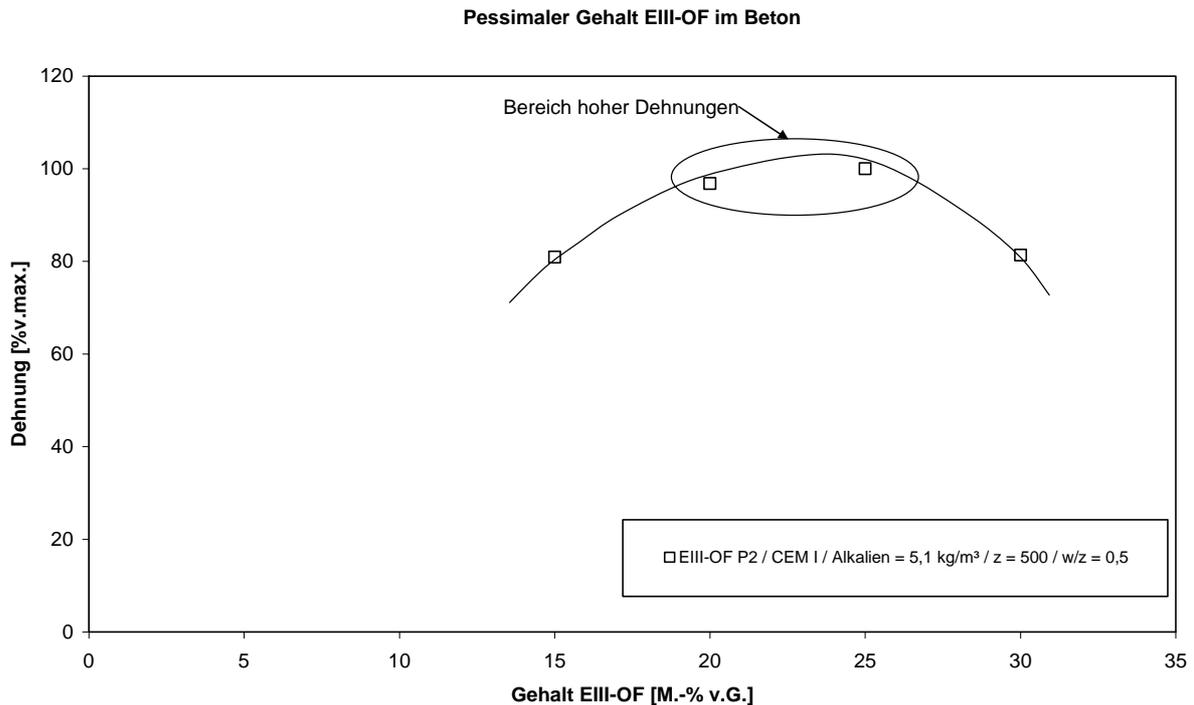


Kennwerte des Betons EIII-OF P1 aus Abbildung 5-6

Zement	$\text{Na}_2\text{O}_e$ [M.-% v.Z.]	Z [kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalien v.Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z-Wert [-]	Sieblinie	Fraktion EIII-OF
CEM I (Z1)	1,21	500	6,1	0,5	B16/C16	2/8 mm

Abbildung 5-6: Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P1 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung

Für den Beton P2 -  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ;  $w/z = 0,5$  - wurde bei einem Alkaligehalt von  $5,1 \text{ kg pro m}^3$  Beton, bei in etwa gleich großen Dehnungen, ein pessimaler Gehalt zwischen 20 und 25 M.-% EIII-OF in der Gesamtgesteinskörnung erhalten. Im Gegensatz zu den Betonen P1 zeigten die Betone P2 auch noch bei 15 M.-% EIII OF hohe Dehnungen im Bereich von 80 % der pessimalen Dehnung, Abbildung 5-7. Dies könnte darauf hindeuten, dass sich in Betonen mit geringeren Alkaligehalten, bei ansonsten identischer Zusammensetzung, das Pessimum in Richtung geringerer Gehalte EIII-OF verschiebt.



Kennwerte des Betons EIII-OF P2 aus Abbildung 5-7

Zement	Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-% v.Z.]	Z [kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalien v.Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z-Wert [--]	Sieblinie	Fraktion EIII-OF
CEM I (Z2)	1,02	500	5,1	0,5	B16/C16	2/8 mm

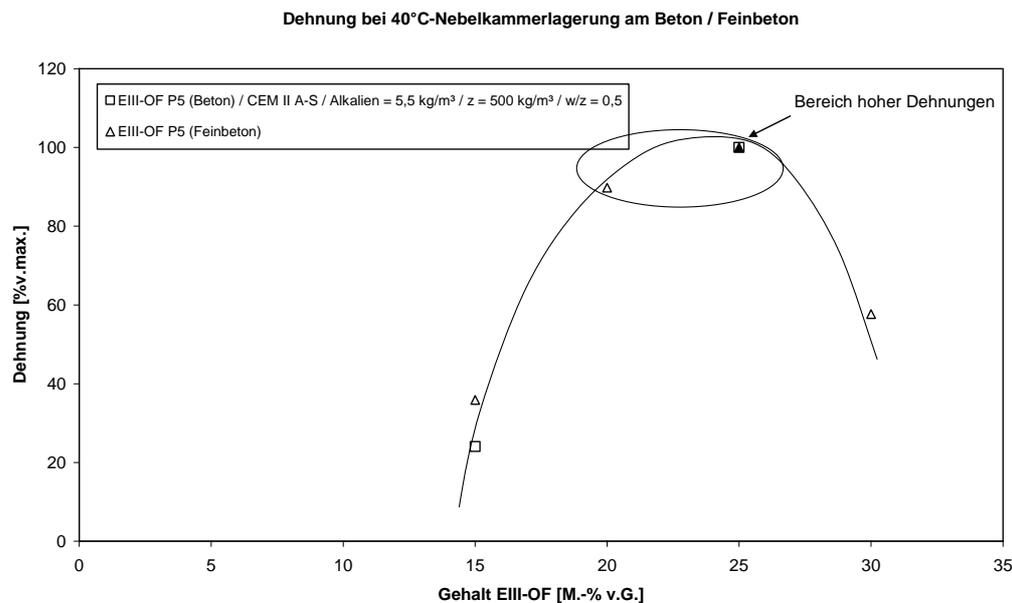
Abbildung 5-7: Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P2 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung

Während der bisherigen Lagerungszeit von über 9 Monaten konnten an dem Beton P3 -  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ ;  $w/z = 0,5$  - mit einem Alkaligehalt von  $3,8 \text{ kg/m}^3$  keine Dehnungen aus Alkalireaktion festgestellt werden. Auch der Beton P4 mit  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ ,  $w/z = 0,45$  und einem Alkaligehalt von  $4,8 \text{ kg/m}^3$  zeigte nach über einem Jahr noch keine Dehnungen aus Alkalireaktion, siehe Abbildung A5 20 und Abbildung A5 22. Dass der Beton P4 trotz ähnlicher Alkaligehalte wie der Beton P2 keine schädigende AKR aufweist, könnte mit dem geringeren w/z-Wert und damit langsameren Massetransport und/oder mit einer geringeren Verfügbarkeit der Alkalien bei niedrigerem Zementgehalt zu erklären sein. Damit aber eventuelle Fehler bei der Mischungseinwaage ausgeschlossen werden können, wurden diese Betone jeweils ein zweites Mal hergestellt, aber auch die Wiederholungsmischungen zeigen bislang keine schädigenden Alkalireaktionen. Da eine stark verlängerte Induktionsphase nicht ausgeschlossen werden kann, werden diese Betone bis zum Alter von 18 Monaten weiter gelagert.

### Betone mit Hüttensand und Flugasche

Durch den Beton P5 mit dem Hüttenzement CEM II/A-S 32,5 R konnte bei einem Alkaligehalt von  $5,5 \text{ kg pro m}^3$  Beton im Gegensatz zu Beton P1 mit  $6,1 \text{ kg Alkalien}$  bei  $15 \text{ M.-\% EIII-OF}$  (ansonsten gleiche Betonrezeptur) eine Dehnung aus Alkalireaktion noch

unterdrückt werden. Dennoch wurde im Beton P5 ebenso wie in den Betonen P1 und P2 zwischen rd. 20 und 25 M.-% EIII-OF ein Bereich hoher Dehnungen erreicht. Dies könnte auf den in etwa gleichen Gesamtalkaligehalt der Betone zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu den Betonen P1 und P2 bewirkte hier eine Veränderung des EIII-OF-Gehalts um  $\pm 5$  M.-% aber eine auffallend starke Verringerung der Dehnungen um über 40 %, siehe Abbildung 5-8.



Kennwerte des Betons EIII-OF P5 aus Abbildung 5-8

Zement	Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-% v.Z.]	Z [kg/m <sup>3</sup> ]	Alkalien v.Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z-Wert [-]	Sieblinie	Fraktion EIII-OF
CEM II / A-S (Z5)	1,09	500	5,5	0,5	B16/C16	2/8 mm

Abbildung 5-8: Pessimales Dehnungsverhalten des Betons EIII-OF P5 in Abhängigkeit des Anteils an EIII-OF Gesteinskörnung

Ebenso wie die Portlandzementbetone P3 und P4 und der Beton P6 mit CEM III/B 32,5 N NA führten auch die Betone P1 mit 15 bzw. 35 M.-% Flugasche bei EIII-OF-Gehalten von 15 bis 30 M.-% während der bisherigen Lagerungszeit von über 12 Monaten zu keinen Dehnungen aus Alkalireaktion. Daher konnte für diese Betone kein pessimaler EIII-OF-Gehalt, bzw. keine Verschiebung des Pessimums festgestellt werden.

Im Gegensatz zu dem Beton EIII-OF P1 mit 35 M.-% Flugasche wurden an den Oberflächen der Probekörper des Betons EIII-OF P1 mit 15 M.-% Flugasche ab 20 M.-% EIII-OF noch vereinzelt Gelausscheidungen gefunden. Daher ist davon auszugehen, dass es zumindest bei einem Austausch von Zement durch 15 M.-% Flugasche noch in begrenztem Umfang zu einer Alkalireaktion gekommen ist, die aber nicht mehr zu schädigenden Auswirkungen im Betongefüge der Balken - Dehnungen bzw. Rissbildung - geführt hat. Bestätigt wird dies durch den Vergleich der Massezunahme der Betone EIII-OF P1 mit 0, 15 und 35 M.-% Flugasche im Bindemittel, siehe Abbildung 5-9. Die Probekörper ohne Flugasche erreichten

bei starker Gefügeschädigung eine Massezunahme zwischen 1,0 und 1,6 M.-%, während ein steigender Flugaschegehalt zu einer Verringerung der Massezunahme von rd. 30 bis 50 % gegenüber den flugaschefreien Betonen führte. Da die Betone mit 15 M.-% Flugasche mit einer Massezunahme von rd. 0,8 M.-% sich im Bereich des entsprechenden Referenzbetons EI 1 bewegen, kann erst die nochmals verringerte Massezunahme des Betons mit 35 M.-% Flugasche auf eine weitgehende Verringerung der Kapillarporosität zurückgeführt werden. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zum Einfluss der Flugasche auf die Porosität des Betons, siehe Punkt 5.8. So kann die Vermeidung einer schädigenden Alkaliereaktion im Beton EIII-OF P1 / F1-15 nur mit einer zusätzlichen Veränderung der Porenlösung erklärt werden, da durch den Austausch von 15 M.-% Flugasche immer noch ein Alkaligehalt aus Zement von 5,1 kg pro m<sup>3</sup> Beton vorhanden ist. Dieser hatte im Beton EIII-OF P2 zu erheblichen Schäden geführt.

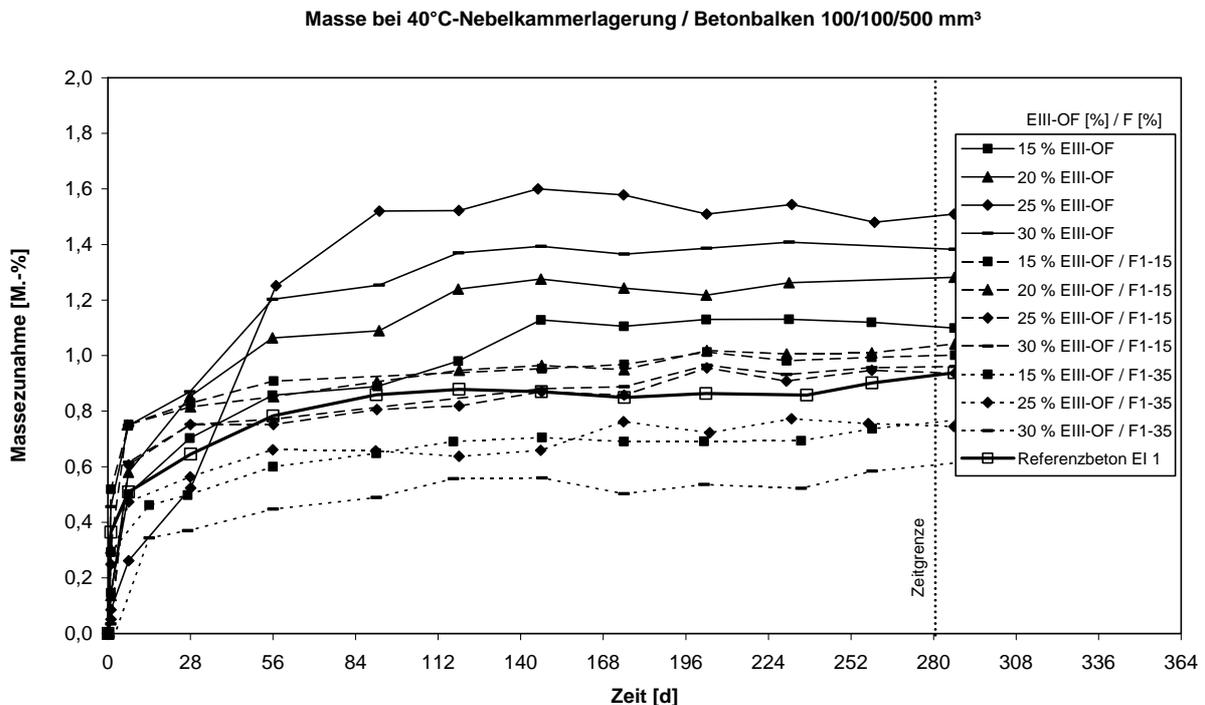


Abbildung 5-9: Einfluss des Flugaschegehaltes auf die Massezunahme des Betons EIII-OF P1

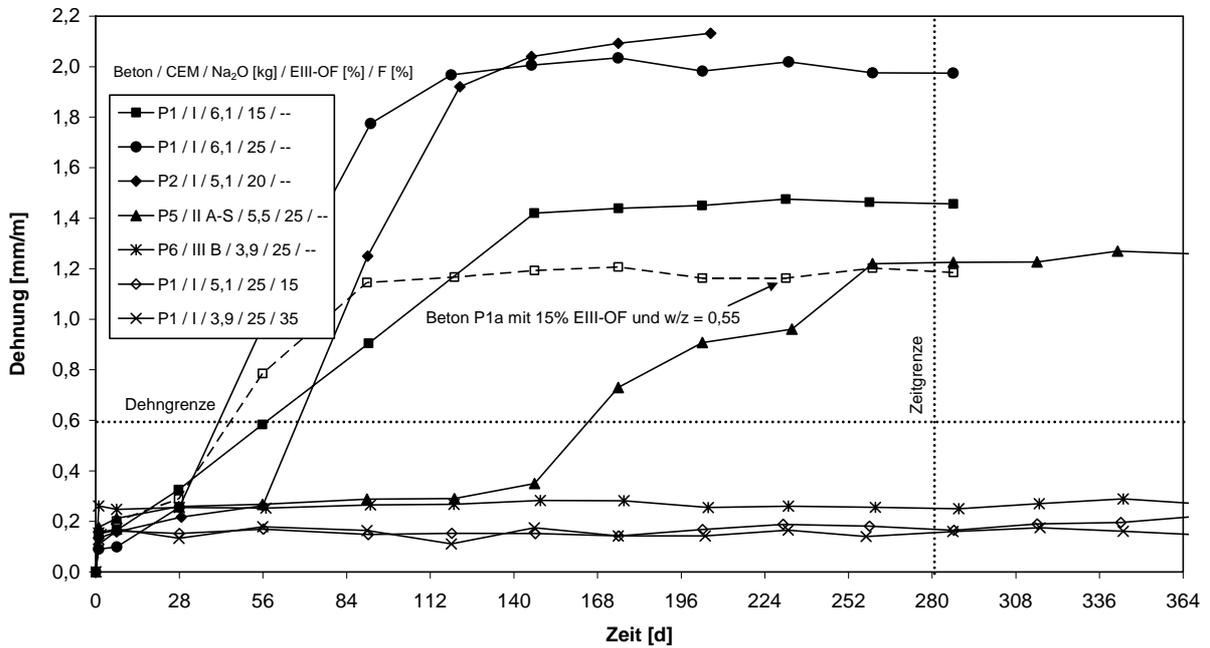
In Abbildung 5-10 ist der Einfluss der Betonrezeptur - Bindemittel, w/b-Wert - auf das Dehnungsverhalten von Betonen mit Kies der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF dargestellt.

Der Vergleich der Betone P1 / 15 und P1a / 15 zeigt, dass eine Verringerung des w/b-Werts von 0,55 zu 0,5, bei in etwa gleich bleibendem Dehnungsverlauf, ein etwas höheres Schädigungspotential im Beton bewirkte. Dies kann damit erklärt werden, dass bei einem w/b-Wert von 0,5 die für die Bildung des Alkalikieselsäure-Gels benötigte Zufuhr von Wasser und Alkalien weiterhin ausreichend gewährleistet ist, während die Möglichkeit für

den Abbau von Spannungen aufgrund der geringeren Porosität der Bindemittelmatrix beeinträchtigt wird. Außerdem wurde, zumindest für die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Gesteinskörnung, mit 15 M.-% Kies EIII-OF und einem w/b-Wert von 0,55 das „pessimale“ Schadpotential nicht erreicht, wie der Vergleich der Dehnungen von 2,0 gegenüber 1,2 mm/m des Betons P1 / 25 und P1a / 15 aus Abbildung 5-10 zeigt. In dem Beton P2 mit 5,1 kg Alkalien pro m<sup>3</sup> Beton wurde der Beginn der Dehnungen gegenüber dem Beton P1 zwar um einen Monat verzögert, allerdings stellten sich mit rd. 2,2 mm/m etwas höhere Enddehnungen ein. Die hohen Enddehnungen könnten mit dem höheren Alter und somit einem spröderen Bruchverhalten des Betons zu Beginn der Dehnungen erklärt werden.

Der Hüttenzement CEM II/A-S 32,5 R verzögert bei in etwa gleichen Alkaligehalten im Beton den Beginn der Dehnung aus Alkalireaktion gegenüber der Mischung mit Portlandzement. So tritt die Schädigung am Beton P5 / 25 erst nach rd. 5 Monaten gegenüber 1 Monat am Beton P1 / 25 auf. Bis zum Alter von 9 Monaten werden mit 1,2 mm/m Enddehnungen in der Größenordnung des Betons P1a / 15 erreicht.

Die Betone P1 / 25 mit 15 und 35 M.-% Flugasche weisen, ebenso wie der Beton P6 / 25 mit einem hohen Gehalt an Hüttsand (CEM III/B 32,5 N NA), während der bisherigen Lagerungszeit von über 12 Monaten, unabhängig vom Gehalt an Kies mit Opalsandstein/Flint, keine schädigende Alkalireaktion im Beton auf. Um eine evtl. längere Induktionsphase, wie z.B. bei Beton P5 / 25, zu berücksichtigen, werden diese Betone für mindestens 18 Monate in der Nebelkammer gelagert.

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>


Kennwerte der Betone mit Opalsandstein/Flint von Abbildung 5-10

Bezeichnung	P1			P1	P1a <sup>1)</sup>	P2	P5	P6
Zement CEM	I			I	I	I	II/A-S	III/B
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21			1,21	1,02	1,09	0,78	
b = z+f [kg/m <sup>3</sup> ]	500			500	500	500	500	500
Flugasche F1 [M.-% v.Z.]	--	15	35	--	--	--	--	--
Alkaligehalt aus Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	5,1	3,9	6,1	5,1	5,5	3,9	
w/b-Wert	0,5			0,5	0,55	0,5	0,5	0,5
EIII-OF [M.-%]	25			15	20	25	25	25

1) nach DIBt Prüfplan [26]

Abbildung 5-10: Einfluss der Rezeptur auf die Dehnungen eines EIII-OF-haltigen Betons

### 5.3.2 Pessimum EII-OF

An den in dieser Arbeit hergestellten Betonen mit den als bedingt brauchbar eingestuften Kiesen EII-OF konnten zwar geringe Dehnungen und eine leichte Rissbildung an den Probekörpern festgestellt werden, allerdings blieben die Dehnungen bei Gehalten von 15 bis 30 M.-% EII-OF in der Gesteinskörnung immer unterhalb von 0,6 mm/m, dem Grenzwert der Dehnungen bei Nebelkammerlagerung, siehe Abbildung A5 30 bis Abbildung A5 43. Es konnte kein pessimales Verhalten gefunden werden, da die höchsten Gehalte an EII-OF auch die größten Dehnungen erzeugten. Dies ist offensichtlich mit den geringen Gehalten an Opalsandstein in der EII-OF Gesteinskörnung zu erklären. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde im Weiteren unabhängig von der Betonrezeptur ein Gehalt von 40 M.-% EII-OF in der Fraktion 2/8 mm eingesetzt, dies entspricht in etwa dem maximal möglichen Anteil der Fraktion 2/8 in der Sieblinie B16/C16.

### 5.3.3 Zusammenfassung der Untersuchungen zur pessimalen Zusammensetzung der Betone mit Opalsandstein / Flint

Für die hier verwendete EIII-OF Gesteinskörnung können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Es zeigt sich ein starker Einfluss des Alkaligehalts und der Porosität des Betons auf das Ausmaß der Schädigung des Betons.
2. Die Erhöhung des w/z-Wertes von 0,5 auf 0,55 führt bei gleichen EIII-OF-Gehalten zu geringeren Dehnungen im Beton.
3. Unabhängig vom EIII-OF-Gehalt treten keine schädigenden Alkalireaktionen im Beton auf bei:
  - einem w/z-Wert von 0,5 und einem Alkaligehalt aus Portlandzement unter 3,8 kg/m<sup>3</sup>,
  - einem w/z-Wert von 0,45 und einem Alkaligehalt aus Portlandzement unter 4,8 kg/m<sup>3</sup>,
  - den hier untersuchten Betonen durch Austausch von mindestens 15 M.-% Zement durch Flugasche bis 5,1 kg/m<sup>3</sup> Alkaligehalt aus Portlandzement,
  - Einsatz eines Zements CEM III B mit einem Gesamtalkaligehalt aus Portlandzementklinker und Hüttensand unter 3,9 kg/m<sup>3</sup>.
4. Die Veränderung des Alkaligehaltes bzw. der Zementart im Beton mit einem w/z-Wert von 0,5 führt zu einer Verlängerung der Induktionsphase gegenüber dem Beton mit einem Alkaligehalt aus Portlandzement von 6,1 kg/m<sup>3</sup> bei:
  - Portlandzementen um rd. einen Monat bei Verringerung des Alkaligehalts um 1 kg/m<sup>3</sup>,
  - Einsatz von Hüttenzement CEM II/A-S um rd. 5 Monate.

Für die hier verwendete EII-OF Gesteinskörnung kann folgender Schluss gezogen werden:

1. Mit 15 bis 30 M.-% Kies der Empfindlichkeitsklasse EII-OF in der Gesteinskörnung wurde das Pessimum in den hier untersuchten Betonen nicht erreicht.

Aus den Voruntersuchungen zum pessimalen Gehalt an opalsandstein- / flinthaltiger Gesteinskörnung im Beton wurden für die weitere Vorgehensweise folgende Schlüsse gezogen:

1. Da sich für den Beton mit  $z = 400 \text{ kg/m}^3$  und  $w/z = 0,45$  keine schädigende AKR ergeben hat, wurde diese Rezeptur nicht mehr weiter verfolgt.
2. Zwar wird der Alkaligehalt aus Zement im Beton mit zunehmendem Austausch durch Flugasche verringert, um aber die Vergleichbarkeit der Ergebnisse hinsichtlich der Wirksamkeit von Flugasche zu gewährleisten, wurde für das weitere Vorgehen jeweils der aus den Betonen ohne Flugasche ermittelte pessimale Gehalt EIII-OF gewählt.
3. Folgende Gehalte opalsandstein- / flinthaltiger Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen EIII-OF und EII-OF wurden im Weiteren in den Betonen -  $b = 500 \text{ kg/m}^3$  und  $w/b = 0,5$  - eingesetzt:
  - CEM I mit  $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,21 \text{ M.-%}$  25 M.-% EIII-OF
  - CEM II / A mit  $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,09 \text{ M.-%}$  25 M.-% EIII-OF
  - alle übrigen Zementvariationen 20 M.-% EIII-OF
  - unabhängig von der Zementart 40 M.-% EII-OF

#### 5.4 Einfluss der Flugasche auf das Dehnungsverhalten der Betone aus AKR

Prinzipiell erfolgte die Bewertung hinsichtlich einer schädigenden Alkali-reaktion an den Betonen entsprechend den Bewertungskriterien nach Alkali-Richtlinie Teil 3 nach 9 Monaten Lagerungszeit in der Nebelkammer. Es kann davon ausgegangen werden, dass nach Alkali-Richtlinie Teil 3 geprüfte Gesteinskörnungen, die innerhalb dieser Zeit unter den darin vorgegebenen Dehnungs- bzw. Rissbreitengrenzen bleiben, keine schädigende Alkali-reaktionen im Beton erzeugen. Da aber in dieser Arbeit auch von der Alkali-Richtlinie, Teil 3, abweichende Betonrezepturen, mit z. B. geringeren Alkaligehalten im Portlandzement, sowie Hüttenzemente und Flugaschen im Bindemittel, verwendet wurden, die evtl. nur eine Verzögerung, nicht aber eine endgültige Vermeidung einer schädigenden Alkali-reaktion der Gesteinskörnungen bewirken könnten, werden diese Betonrezepturen bis zum Alter von 18 Monaten in der Nebelkammer weitergelagert und danach abschließend bewertet. Damit soll eine sichere Aussage über das Langzeitverhalten dieser Betone ermöglicht werden.

Die Dehnwerte beziehen sich auf die Nullmessung der Probekörper bei  $20^\circ\text{C}$  vor dem Einbringen in die Nebelkammer. Sie beinhalten also neben einer möglichen Dehnung durch Alkali-reaktion auch immer die Temperatur- und Feuchtedehnung ( $\epsilon = 0,2$  bis  $0,4 \text{ mm}$ ).

In Anhang 5, Abbildung A5 1 bis Abbildung A5 87 sind die Verläufe der Entwicklung der Dehnungen, des dynamischen E-Moduls und der Rissbildung aller Betone zusammengestellt.

#### **5.4.1 Dehnungsverhalten der Betone mit inerten Gesteinskörnungen**

An den Referenzbetonen mit als inert angenommenen Gesteinskörnungen wurden während der Lagerungsdauer von einem Jahr keine Anzeichen einer AKR-bedingten Dehnung bzw. Rissbildung beobachtet. Die an den Probekörpern gemessenen Dehnungen sind auf die Temperaturdifferenz -  $\Delta T = 20^\circ\text{C}$  - und auf die Feuchteaufnahme der Betone zurückzuführen. Die Würfel der Betone EI 1 und EI 2 werden aus Vergleichsgründen bis zum Abschluss der Lagerung der flugaschehaltigen Betone weiterhin in der Nebelkammer gelagert. In Tabelle 5-7 sind die Dehnungen der EI Betone nach 9 Monaten Lagerungszeit angegeben. In Anhang 5, Abbildung A5 1 bis Abbildung A5 8 sind die Verläufe der Entwicklung der Dehnungen und des dynamischen E-Moduls zusammengestellt.

Unabhängig vom w/z-Wert liegen die Dehnungen der Betone mit Portlandzement und inerten Gesteinskörnungen bei rd. 0,25 mm/m. Eine Verringerung des Zementgehaltes von 500 auf 400 kg/m<sup>3</sup> bewirkt eine leichte Verringerung der Dehnungen um rd. 0,05 mm/m. Stärker wirkt sich das Alkaliäquivalent des Zementes aus. Der Beton EI 3 mit dem NA-Zement weist eine rd. 0,1 mm/m geringere Dehnung auf als der Beton EI 1 mit dem Zement hohen Alkaligehaltes. Dies deckt sich mit Untersuchungen von Fleischer [39], nach denen ein höherer Alkaligehalt im Zement zu einer höheren Feuchtedehnung des C-S-H-Gels führt.

Mit steigendem Hüttensandgehalt im Zement nehmen die Dehnungen ab. So zeigt der Beton EI 4 mit CEM II/A (13 % Hüttensand) noch in etwa die gleichen Dehnungen wie der Beton EI 1 (0,25 mm/m). Von dem Beton EI 6 mit CEM III/B (72 % Hüttensand) werden jedoch nur noch Dehnungen um rd. 0,1 mm/m erreicht.

Der Austausch von Zement durch Flugasche (30 bis 35 M.-%) führt zu einer Verringerung der Dehnungen gegenüber den reinen Portlandzementen um rd. 0,15 mm/m. Diese Betone bewegen sich mit Werten um die 0,11 mm/m (Ausnahme EI 2 / F1 35 mit 0,17 mm/m) im Bereich der Dehnungen des Betons EI 6 mit CEM III/B. Die Abnahme der Dehnungen der Betone mit Flugasche bzw. Hüttensand gegenüber den Betonen mit reinem Portlandzement könnte auf eine Verringerung des Gehalts an C-S-H-Gel oder auch auf eine Verringerung der Kapillarporosität zurückzuführen sein. Bei gleicher Austauschrate von Portlandzement durch Betonzusatzstoff wird für den Beton EI 1 bei Einsatz von Flugasche eine geringere Dehnung erzielt als durch Kalksteinmehl (Ausnahme EI 2 / F1 35 und EI 2 / KSM 35 mit 0,17 und 0,15 mm/m). Die größere Dehnung des Betons mit Kalksteinmehl dürfte auf dessen höhere Porosität (w/z = 0,69) zurückzuführen sein.

Tabelle 5-7: Dehnungen und Rissbreiten an Betonen mit inerten Gesteinskörnungen nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung

Bezeichnung	EI 1	EI 1a <sup>1)</sup>	EI 2	EI 2a	EI 3	EI 4	EI 5	EI 6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zement	Z1	Z1	Z1	Z1	Z4	Z5	Z6	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,21	0,65	1,09	1,00	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	400	400	500	500	500	500
w/b-Wert	0,5	0,55	0,45	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
ohne Flugasche								
Dehnung [mm/m]	0,25	0,27	0,23	0,20	0,17	0,28	0,19	0,14
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]								
F1	35	--	35	35	30	--	--	--
Dehnung [mm/m]	0,08	--	0,17	0,11	0,11	--	--	--
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--
KSM	35	--	35	--	--	--	--	--
Dehnung [mm/m]	0,16	--	0,15	--	--	--	--	--
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--

<sup>1)</sup> Rezeptur nach DIBt-Prüfplan [26]

### **5.4.2 Dehnungsverhalten der Betone mit Kiesen mit Opalsandstein/Flint**

Nach Auswertung der Ergebnisse aus den Untersuchungen zum pessimalen Gehalt der Gesteinskörnungen EIII-OF und EII-OF wurden die in Tabelle 4-1 aufgelisteten Betone entsprechend Punkt 4.2.2 „Prüfung einer schädigenden AKR im Beton“ hergestellt und gelagert. Aufgrund der unvorhergesehen langen Dauer der im Vorlauf durchzuführenden Versuche zur Ermittlung der pessimalen Gehalte reaktiver Kiese mit Opalsandstein/Flint in der Gesteinskörnung haben diese Betone in der Regel noch nicht die für eine endgültige Auswertung erforderliche Lagerungsdauer erreicht. Die Balkenlagerung der Vorversuche wurde durch Würfel mit 300 mm Kantenlänge sowohl in der Nebelkammer als auch in der Außenlagerung ergänzt.

#### **Nebelkammerlagerung**

Es wird eine Bestätigung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen erwartet. Eine Darstellung der Dehnungen erfolgte bis zum Alter von 6 Monaten. Die Dehnungsverläufe sind in Anhang A5, Abbildung A5 44 bis Abbildung A5 57 dargestellt.

#### **Freilagerung**

Der im Freien gelagerte Würfel mit 300 mm Kantenlänge des Betons EIII-OF1 ohne Flugasche zeigte bereits im Alter von 4 Monaten eine beginnende Rissbildung und erreichte zu Beginn des Winters 2005/2006, im Alter von 8 Monaten, Rissbreiten von bis zu 0,25 mm. In [1] wird von einem Beton mit Opalsandstein/Flint in der Gesteinskörnung und 15 M.-% Flugasche im Bindemittel berichtet, an dem zwar bei Nebelkammerlagerung keine schädigende AKR festgestellt wurde, der aber in der Freilagerung eine AKR-bedingte Schädigung aufwies. In der hier vorliegenden Arbeit konnten unabhängig von der Betonzusammensetzung während der bisherigen Lagerungszeit von in der Regel über 6 Monaten an den freigelagerten Würfeln mit Opalsandstein/Flint im Beton keine Anzeichen einer schädigenden AKR gefunden werden.

Tabelle 5-8: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklassen EIII-OF bzw. EII-OF hergestellten Betone

Bezeichnung	EIII-OF 1	EIII-OF 2	EIII-OF 3	EIII-OF 5	EIII-OF 6	EIII-OF 7	EII-OF 1	EII-OF 2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zement	Z1	Z2	Z4	Z5	Z6	Z7	Z1	Z2
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,02	0,65	1,09	1,00	0,78	1,21	1,02
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	500	500	500	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	5,1	3,3	5,5	5,0	3,9	6,1	5,1
w/b-Wert	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kies mit Opalsandstein/ Flint [kg/m <sup>3</sup> ]	379	303	303	379	303	303	606	606
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]								
F1 [M.-%]	15/20/ 25/30/ 35	30	--	30	--	--	15/30	30
F2 [M.-%]	20/30	--	--	--	--	--	--	--
F3 [M.-%]	20/30	--	--	--	--	--	--	--
KSM [M.-%]	15/30	--	--	--	--	--	--	--

### 5.4.3 Dehnungsverhalten der Betone mit Grauwacke

#### Nebelkammerlagerung

An den Betonen mit Grauwacke (s. Abbildung 5-11) zeigt sich bei den Portlandzementmischungen mit Alkaligehalten zwischen 4,1 und 6,1 kg pro m<sup>3</sup> Beton ein relevanter Dehnungsanstieg bereits zwischen dem zweiten und dritten Monat Nebelkammerlagerung. Nach spätestens vier Monaten wird die Dehngrenze von 0,6 mm/m überschritten. Für diese Mischungen ergeben sich unabhängig vom Alkaligehalt Enddehnungen zwischen 1,5 und 1,6 mm/m. Eine Erhöhung des w/z-Wertes von 0,45 auf 0,5 führt in dem Beton Gw2a, bei gleichem Zeitpunkt des Dehnungsbeginns, mit 1,36 mm/m zu etwas geringeren Dehnungen als in dem Beton Gw2, siehe Tabelle 5-9. Der Vergleich mit der EIII-OF Referenzmischung belegt die langsamere Reaktionsgeschwindigkeit und das geringere Dehnungspotential - 1,6 gegenüber 2,0 mm/m - der Grauwacke gegenüber Opalsandstein/Flint als reaktiver Gesteinskörnung.

Der Dehnungsanstieg des Betons Gw6 mit Hüttenzement CEM II/A-S 32,5 R beginnt erst nach rd. 4 Monaten Lagerung. Dies könnte auf die langsamere Reaktion des Hüttensandes im Zement zurückzuführen sein, da dadurch ein geringerer wirksamer Alkaligehalt in der Porenlösung vorliegt. Hier führt ein theoretischer Gesamtalkaligehalt von 4,4 kg pro m<sup>3</sup> Beton mit rd. 1,3 mm/m zu geringeren Dehnungen wie bei den reinen Portlandzementbetonen.

An den parallel zu den Balken eingelagerten Würfeln mit 300 mm Kantenlänge zeigen sich bei allen diesen Betonen Risse mit Breiten von 0,2 bis 0,8 mm.

Erst ein Alkaligehalt der Portlandzementmischungen von kleiner 3,0 kg/m<sup>3</sup>, siehe Tabelle 5-9 Beton Gw4 und Gw5, führt, ebenso wie bei den Betonen mit hochhüttensandhaltigen Zementen mit Alkaligehalten von 4,0 und 3,1 kg/m<sup>3</sup>, siehe Tabelle 5-9, Betone Gw7 und Gw8, zu keinen Dehnungen mehr, die auf eine schädigende Alkalireaktion zurückzuführen sind.

Die Mischungen mit Flugasche als Betonzusatzstoff führen unabhängig von den verwendeten Flugaschen, der Zementart und der ausgetauschten Menge des Zements - 20 bis 35 M.-% v.Z. - nach 9 Monaten Lagerungszeit zu keinen Dehnungen aus Alkalireaktion im Beton. Die Dehnungen liegen mit rd. 0,15 mm/m im Bereich der Dehnungen der Betone mit NA-Zementen bzw. mit inerten Gesteinskörnungen. Auch die parallel zu den Balken eingelagerten Würfel mit einer Kantenlänge von 300 mm zeigen keine Anzeichen einer Alkalireaktion. Exemplarisch ist in Abbildung 5-11 das Dehnungsverhalten des Betons Gw2 mit Flugasche F1 und Kalksteinmehl (KSM) dargestellt. Obwohl der Beton Gw 2 bei 20 M.-% Flugasche F1 mit 3,9 kg pro m<sup>3</sup> Beton in etwa den selben Alkaligehalt wie die Betone Gw 3 und Gw 6 aufweist, zeigen sich nach 9 Monaten Lagerung keine Dehnungen bzw. Risse an den Probekörpern. Dabei wurde aber noch nicht berücksichtigt, dass sich bei vollständiger Anrechnung bzw. bei Anrechnung von 1/6 der Alkalien aus der Flugasche ein

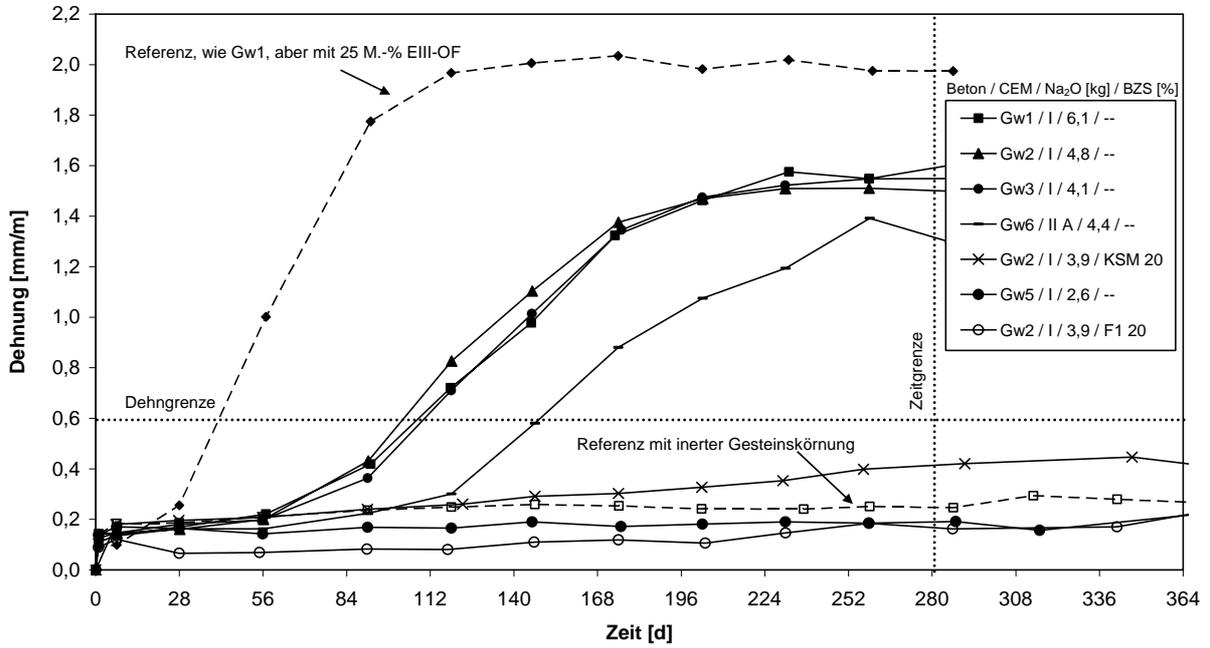
Alkaligehalt des Betons Gw 2 / F2 20 von 6,8 bzw. 4,4 kg pro m<sup>3</sup> Beton ergibt. Der Beton Gw2 mit 20 M.-% Kalksteinmehl weist ein stetiges Ansteigen der Dehnungen auf, das auch nach 9 Monaten noch nicht abgeschlossen ist. Nach 9 Monaten bleibt dieser Beton mit rd. 0,4 mm/m Dehnung zwar unterhalb der Dehngrenze von 0,6 mm/m, aber die Rissbreiten des parallel dazu eingelagerten Würfels überschreiten mit 0,5 mm die maximal erlaubten Rissbreiten von 0,2 mm deutlich. Der Vergleich dieser Mischungen weist auf eine aktive Rolle der Flugasche bei der Vermeidung einer Alkalireaktion im Beton hin.

An länger als 9 Monate gelagerten Betonen mit Flugasche wurde bislang nur am Beton Gw 1 / F1 20 eine ab dem rd. zwölften Monat beginnende Dehnung und Haarrissbildung an den Balken festgestellt; nach 15 Monaten Lagerungsdauer wurde eine Dehnung von rd. 0,4 mm/m mit konstant zunehmendem Dehnungsverlauf gemessen. Der dazugehörige Würfel mit 300 mm Kantenlänge zeigt allerdings noch keine Schäden. Ansonsten wurde während der bisherigen Lagerungsdauer an keinem flugaschehaltigen Beton - 20 bis 35 M.-% v.Z. - eine Schädigung festgestellt. So zeigt der Beton Gw 2 mit 30 M.-% Flugasche F1 auch nach 24-monatiger Lagerung in der Nebelkammer keine Anzeichen einer Dehnung aus Alkalireaktion im Beton (o. Abb.). Wohingegen der Beton Gw 2 mit 30 M.-% Kalksteinmehl, zwar keine ausgeprägten Dehnungen am Balken, jedoch nach 12 Monaten mit 0,55 mm eine starke Rissbildung und Gelausscheidung am Würfel zeigt. Einen Vergleich der Schadensbilder an Würfeln mit 300 mm Kantenlänge zeigt Abbildung 5-12.

### **Freilagerung**

An den im Freien gelagerten Würfeln mit 300 mm Kantenlänge konnten, unabhängig von der Betonzusammensetzung, während der bisherigen Lagerungszeit von in der Regel über 12 Monaten bis zu 2 Jahren keine Anzeichen einer schädigenden AKR gefunden werden.

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>



Kennwerte der Grauwackebetone aus Abbildung 5-11:

Bezeichnung	Gw1	Gw2	Gw2 / F1 20	Gw2 / KSM 20	Gw3	Gw5	Gw6
Zement: CEM	I	I			I	I	II/A
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21			1,02	0,65	1,09
b = z+f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	400			400	400	400
Flugasche F1 [M.-% v.Z.]	--	--	20	30	--	--	--
Alkaligehalt aus Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	4,8	3,9	3,9	4,1	2,6	4,4
w/b-Wert	0,5	0,45			0,45	0,45	0,45
Grauwacke [kg/m <sup>3</sup> ]	1110	1305			1305	1305	1305

Abbildung 5-11: Dehnungsverhalten von Grauwackebetonen bei unterschiedlicher Rezeptur

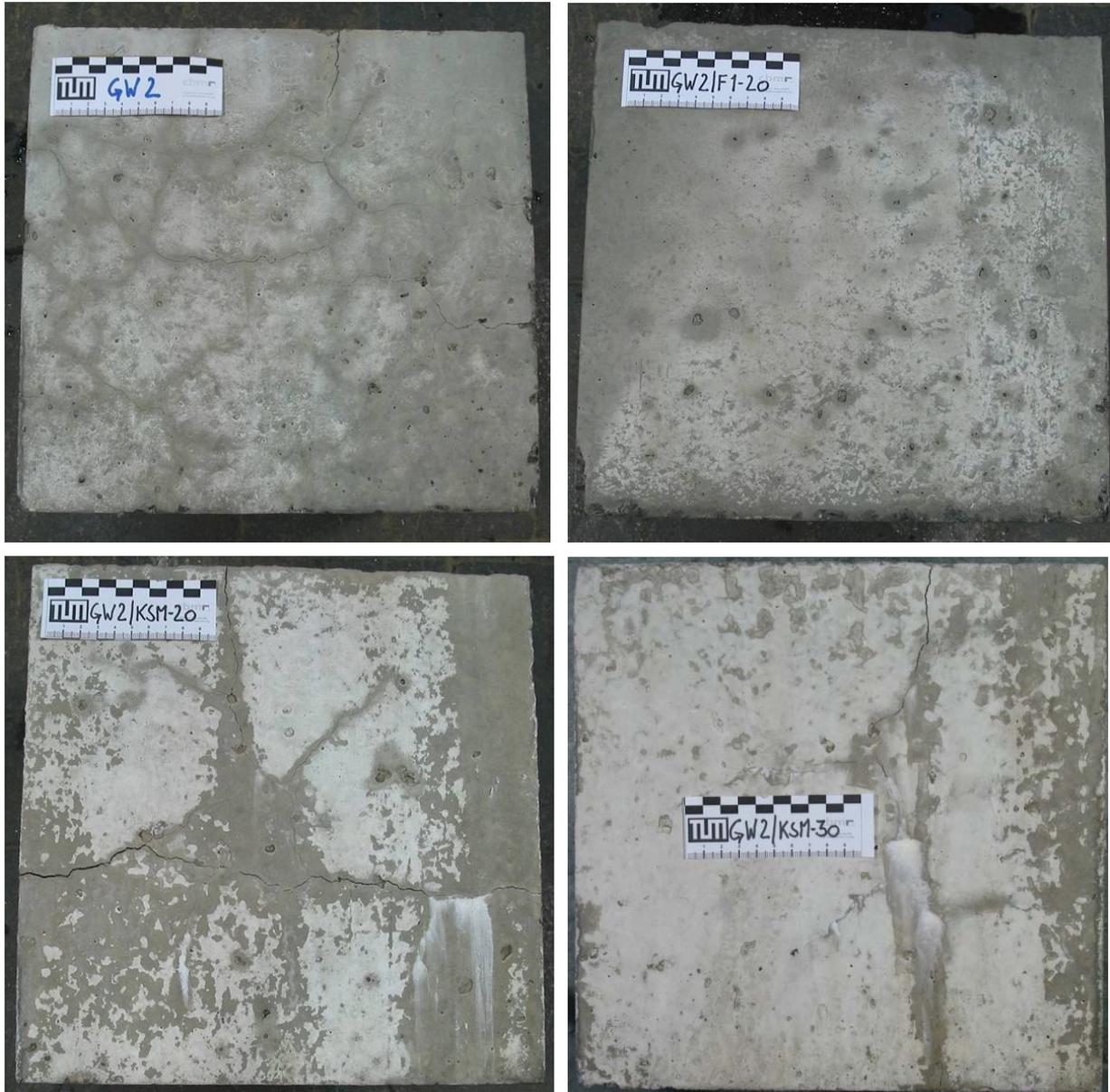


Abbildung 5-12: Zustand der Würfel mit 300 mm Kantenlänge nach Lagerung in der Nebelkammer (40°C/100% r.F.); Beton Gw2: Grauwacke,  $b = 400$ ,  $w/b = 0,45$   
 oben links: Gw2; Alter 9 Monate,  $w_{Rmax} = 0,8$  mm; keine Ausblühungen  
 oben rechts: Gw2 / F1 20; Alter 15 Monate, keine Schäden erkennbar  
 unten links: Gw2 / KSM 20; Alter 14 Monate;  $w_{Rmax} = 1,0$  mm; Ausblühungen  
 unten rechts: Gw2 / KSM 30; Alter 14 Monate;  $w_{Rmax} = 0,8$  mm; Ausblühungen

Tabelle 5-9: Dehnungen und Rissbreiten an Grauwackebetonen nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung

Bezeichnung	Gw1	Gw2	Gw2a	Gw3	Gw4	Gw5	Gw6	Gw7	Gw8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zement CEM	I	I	I	I	I	I	II/A	III/A	III/B
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	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
Grauwacke [kg/m <sup>3</sup> ]	1110	1305	1305	1305	1305	1305	1305	1305	1305
ohne Flugasche									
Dehnung [mm/m]	<b>1,60</b>	<b>1,50</b>	<b>1,36</b>	<b>1,55</b>	0,32	0,19	<b>1,30</b>	0,15	0,17
Rissbreite [mm]	<b>0,80</b>	<b>0,65</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>	--	--	<b>0,20</b>	--	--
Betonzusatzstoff [M.-% v.Z.]									
F1	20/25/ 30/35	20/25/ 30/35	30	30	30	30	30	--	--
Dehnung [mm/m]	0,12- 0,15	0,12- 0,20	0,12	0,10	0,18	0,03	0,06	--	--
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
F2	--	20/25/ 30	--	--	--	--	--	--	--
Dehnung [mm/m]	--	0,04- 0,13	--	--	--	--	--	--	--
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
F3	--	20/25/ 30	--	--	--	--	--	--	--
Dehnung [mm/m]	--	0,17- 0,20	--	--	--	--	--	--	--
Rissbreite [mm]	--	--	--	--	--	--	--	--	--
KSM	--	20/30	--	--	--	--	--	--	--
Dehnung [mm/m]	--	<b>0,42/ 0,30</b>	--	--	--	--	--	--	--
Rissbreite [mm]	--	<b>0,5/--</b>	--	--	--	--	--	--	--

#### 5.4.4 Dehnungsverhalten der Betone mit Kies bzw. Kies-Edelsplitt Oberrheingraben

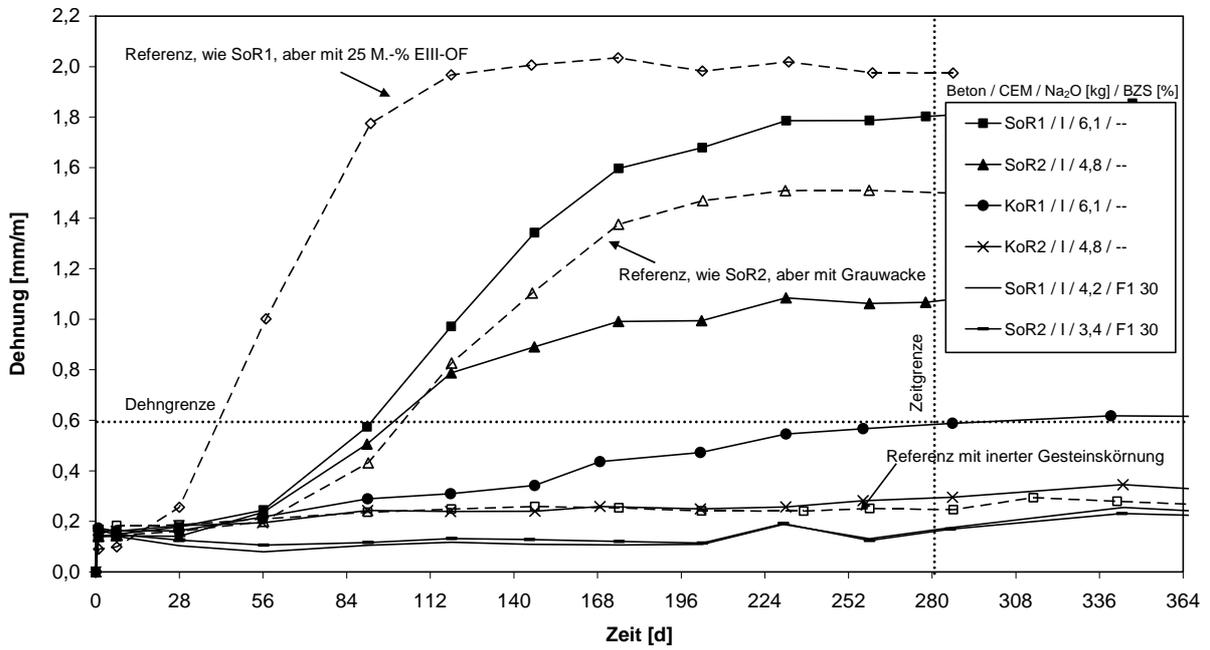
##### Nebelkammerlagerung

Abbildung 5-13 zeigt das Dehnungsverhalten von Betonen mit Gesteinskörnungen aus dem Oberrheingraben. Der verwendete Kies bzw. Kies-Edelsplitt stammt aus demselben Lieferwerk. Der Splitt wird aus dem bei der Kiesgewinnung anfallenden Überkorn gebrochen. Somit haben beide Gesteinskörnungen die prinzipiell gleiche mineralogische Zusammensetzung. Voruntersuchungen zur potentiellen Alkalireaktivität der verwendeten Gesteinskörnungen mit dem Magdeburger Schnelltest [31] ergaben für beide Gesteinskörnungen ein ähnliches Reaktionspotential. Dennoch zeigen diese Gesteinskörnungen im Beton bei Nebelkammerlagerung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, ein stark unterschiedliches Reaktionsverhalten.

Die Betone, die mit dem Kies-Edelsplitt Oberrheingraben hergestellt wurden, zeigen bereits nach 2 bis 3 Monaten Lagerungsdauer einen starken Dehnungsanstieg mit beginnender Rissbildung in den Probekörpern, ähnlich dem Verhalten der Betone mit Grauwacke, nur dass der Kies-Edelsplitt empfindlicher auf die Betonzusammensetzung reagiert als die Grauwacke, vgl. Abbildung 5-11, Betone Gw 1, Gw 2 und Gw 3 mit Abbildung 5-13, Betone SoR 1 und SoR 2. So erreicht der Beton SoR 2 mit einem Alkaligehalt von 4,8 kg und 400 kg Zement pro m<sup>3</sup> Beton mit rd. 1,0 mm/m eine geringere Dehnung nach 9 Monaten als der Beton SoR 1 mit einem Alkaligehalt von 6,1 kg und 500 kg Zement pro m<sup>3</sup> Beton und rd. 1,7 mm/m.

Der Dehnungsverlauf des Betons KoR 2 entspricht in etwa dem des Referenzbetons mit inerte Gesteinskörnung. Dies entspricht den Erfahrungen aus der Praxis, wonach Betone mit Kiesen aus dem Oberrheingraben keine schädigende Alkalireaktion zeigen. Allerdings setzte bei dem Beton KoR 1 mit einem Alkaligehalt von 6,1 kg und 500 kg Zement pro m<sup>3</sup> Beton ab dem fünften Monat ein Dehnungsanstieg mit begleitender Rissbildung ein. Mit Dehnungen von rd. 0,6 mm/m und Rissbreiten von rd. 0,5 mm nach 9 Monaten überschreitet der Beton KoR 1, der sich allerdings in seiner Zusammensetzung von den Prüfbetonen mit 400 kg/m<sup>3</sup> unterscheidet, die Kriterien nach Alkali-Richtlinie, Teil 3. Um die langsamere und spätere Reaktion der Kiese erfassen zu können, werden diese Betone länger als die in der Alkali-Richtlinie, Teil 3, vorgeschriebenen 9 Monate in der Nebelkammer gelagert.

Bei einer Lagerungsdauer von 9 Monaten weist keiner der flugaschehaltigen Betone - 20 bis 35 M.-% - Anzeichen einer schädigenden Alkalireaktion auf. Die Dehnungen bewegen sich, ähnlich wie bei den flugaschehaltigen Betonen mit Grauwacke, im Bereich von 0,2 mm/m, siehe Tabelle 5-10. Um eine endgültige Aussage treffen zu können, werden diese Betone für mindestens 18 Monate in der Nebelkammer gelagert.

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>


Kennwerte der Betone mit Kies und Kies-Edelsplitt Oberrheingraben aus Abbildung 5-13

Bezeichnung	SoR1	SoR1 / F1 30	SoR2	SoR2 / F1 30	KoR1	KoR2
Kornform	Splitt		Splitt		Kies	Kies
Zement: CEM	I		I		I	I
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21		1,21		1,21	1,21
b = z+f [kg/m <sup>3</sup> ]	500		400		500	400
Flugasche F1 [M.-% v.Z.]	--	30	--	30	--	--
Alkaligehalt aus Zement [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	4,2	4,8	3,4	6,1	4,8
w/b-Wert	0,5		0,45		0,5	0,45
reaktives Gestein [kg/m <sup>3</sup> ]	1073		1263		1065	1253

Abbildung 5-13: Dehnungsverhalten von Betonen mit Kies und Kies-Edelsplitt Oberrheingraben bei unterschiedlicher Rezeptur

Tabelle 5-10: Dehnungen und Rissbreiten an Betonen mit Kies und Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben nach 9 Monaten Nebelkammerlagerung

Bezeichnung	KoR1	KoR2	SoR1	SoR2
1	2	3	4	5
Zement	I	I	I	I
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,21
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	400	500	400
w/b-Wert	0,5	0,45	0,5	0,45
Kies / Kies-Edelsplitt [kg/m <sup>3</sup> ]	1065	1253	1073	1263
ohne Flugasche				
Dehnung [mm/m]	<b>0,59</b>	0,30	<b>1,80</b>	<b>1,07</b>
Rissbreite [mm]	<b>0,50</b>	--	<b>0,45</b>	<b>0,35</b>
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]				
F1	20/30	20/30	20/25/30	20/25/ 30/35
Dehnung [mm/m]	0,21/0,19	0,20/0,21	0,17-0,33	0,17-0,24
Rissbreite [mm]	--	--	--	--
F2	--	--	--	20/25/30
Dehnung [mm/m]	--	--	--	0,20-0,24
Rissbreite [mm]	--	--	--	--
F3	--	--	--	20/25/30
Dehnung [mm/m]	--	--	--	0,19-0,22
Rissbreite [mm]	--	--	--	--

### Freilagerung

An den im Freien gelagerten Würfeln mit 300 mm Kantenlänge konnten, unabhängig von der Betonzusammensetzung, während der bisherigen Lagerungszeit von in der Regel einem Jahr, keine Anzeichen einer schädigenden AKR festgestellt werden.

### 5.4.5 Zusammenfassung der Untersuchungen zum Einfluss der Flugasche auf das AKR-bedingte Dehnungsverhalten der Betone

#### Nebelkammerlagerung

Aus den bei der Nebelkammerlagerung gewonnenen Ergebnisse können für die hier untersuchten Betone folgende Schlüsse gezogen werden:

Betone mit Opalsandstein/Flint:

Bei einer bisherigen Lagerungszeit von über 6 Monaten werden die Ergebnisse aus den Voruntersuchungen zur Ermittlung des pessimalen Gehaltes von Kiesen mit Opalsandstein/Flint bestätigt, siehe Punkt 5.3.3. Die wesentlichen Punkte sind nachfolgend noch einmal aufgeführt:

1. Es zeigt sich ein starker Einfluss des Alkaligehalts und der Porosität des Betons auf das Ausmaß der Schädigung des Betons.
2. Unabhängig vom EIII-OF-Gehalt treten keine schädigenden Alkalireaktionen im Beton auf bei:
  - einem w/z-Wert von 0,5 und einem Alkaligehalt aus Portlandzement unter  $3,8 \text{ kg/m}^3$ ,
  - einem w/z-Wert von 0,45 und einem Alkaligehalt aus Portlandzement unter  $4,8 \text{ kg/m}^3$ ,
  - den hier untersuchten Betonen durch Austausch von mindestens 15 M.-% Zement durch Flugasche bis  $5,1 \text{ kg/m}^3$  Alkaligehalt aus Portlandzement,
  - Einsatz eines Zements CEM III B mit einem Gesamtalkaligehalt aus Portlandzementklinker und Hüttensand unter  $3,9 \text{ kg/m}^3$ .

Betone mit Grauwacke:

1. Die Betone mit Portlandzement reagieren hinsichtlich des Beginns und des Ausmaßes einer schädigenden AKR relativ unempfindlich auf eine Veränderung des Alkaligehaltes zwischen  $4,1$  und  $6,1 \text{ kg/m}^3$  bzw. des w/z-Wertes zwischen 0,45 bis 0,5.
2. Der Einsatz von Hüttenzement CEM II/A-S führt zu einer Verlängerung der Induktionsphase gegenüber den Portlandzementbetonen von 2 auf rd. 4 Monate.
3. Der Austausch von Portlandzement durch 20 bzw. 30 M.-% Kalksteinmehl führt zu einer Verlängerung der Induktionsphase gegenüber den Portlandzementbetonen von 2 auf rd. 9 bzw. 12 Monate.
4. Es treten keine schädigenden Alkalireaktionen im Beton auf bei:
  - einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$ , einem w/z-Wert von 0,45 und einem Alkaligehalt aus Portlandzement unter  $3,0 \text{ kg/m}^3$ ,

- einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$ , einem w/z-Wert von 0,45 und einem Alkaligehalt aus Hüttenzement unter  $4,0 \text{ kg/m}^3$  bzw. einem Hütten sandgehalt von über 42 M.-% im Zement,
- den hier untersuchten Betonen mit Austausch von mindestens 25 M.-% Zement durch Flugasche.

Betone mit Kies und Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben:

1. Sowohl die Betone mit Kies als auch mit Kies-Edelsplitt reagieren hinsichtlich des Ausmaßes einer Schädigung des Betons empfindlich auf eine Änderung des Alkaligehaltes.
  - Der Beton mit Kies mit einem Zementgehalt von  $500 \text{ kg/m}^3$ , einem w/z-Wert von 0,5 und einem Alkaligehalt von  $6,1 \text{ kg/m}^3$  zeigt eine Schädigung durch AKR nach 9 Monaten Lagerungszeit
2. Es treten keine schädigenden Alkalireaktionen im Beton auf bei:
  - mit Kies hergestelltem Beton mit einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$ , einem w/z-Wert von 0,45 und einem Alkaligehalt von  $4,8 \text{ kg/m}^3$ ,
  - den hier untersuchten Betonen mit Austausch von mindestens 20 M.-% Zement durch Flugasche.

### **Freilagerung**

Der Beton mit Kies mit Opalsandstein/Flint der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF mit einem Zementgehalt von  $500 \text{ kg pro m}^3$  Beton und einem Alkaligehalt von  $6,1 \text{ kg/m}^3$  zeigt seit dem Alter von drei Monaten eine beginnende Rissbildung aus Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Weder die Betone mit Grauwacke noch diejenigen mit Kies bzw. Kies-Edelsplitt aus dem Oberrhein zeigen während der bisherigen Lagerungszeit von bis zu 18 Monaten Schäden aus Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

## 5.5 Dehnungsverhalten und Zusammensetzung der Porenlösung der Feinbetone mit Duranglas

### 5.5.1 Pessimaler Gehalt von Duranglas im Feinbeton

Es zeigte sich kein Pessimumverhalten für die Feinbetone mit Duranglas in der Fraktion 2/8 mm, sondern es wurden umso größere Dehnungen erzielt je mehr Duranglas im Feinbeton enthalten war. Allerdings zeigte sich ab rd. 45 M.-% Duranglas in der Mischung keine signifikante Erhöhung der Dehnungen mehr. Da sich ab einem Alter von rd. 5 Monaten eine Rissbildung in den Probekörpern zeigte, sich aber bereits vorher ein Abklingen der Dehnungszunahme abzeichnete, wurden für die nachfolgende Darstellung des Dehnungsverhaltens die Werte nach 4 Monaten verwendet. Um die Sieblinie B/C 8 einzuhalten, wurde für die weiteren Arbeiten mit Betonzusatzstoffen ein Gehalt von 45 M.-% Duranglas, entsprechend  $568 \text{ kg/m}^3$ , gewählt. Die Dehnungsverläufe der Versuche zur Ermittlung des Pessimums sind in Anhang A5, Abbildung A5 88 dargestellt.

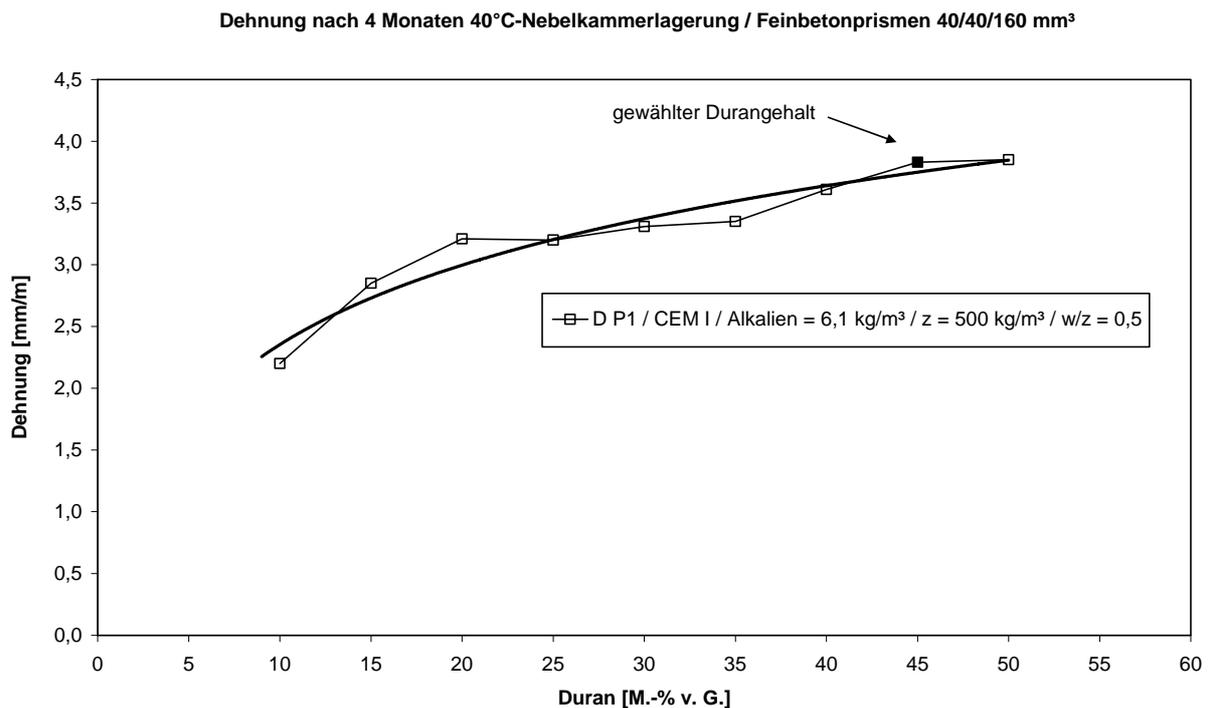


Abbildung 5-14: Dehnungsverhalten des Feinbetons D P1 in Abhängigkeit des Anteils an Duranglas in der Gesteinskörnung

### 5.5.2 Einfluss der Flugasche auf das Dehnungsverhalten und die Zusammensetzung der Porenlösung der Feinbetone mit Duranglas

Ausgehend von der Rezeptur mit 45 M.-% Duranglas, entsprechend  $568 \text{ kg/m}^3$ , wurde der Zement durch zwei Flugaschen und ein Kalksteinmehl in 5 %-Schritten von 15 bis 40 M.-% v.Z. ausgetauscht. Der Gehalt an Duranglas wurde unabhängig vom Bindemittelvolumen konstant gehalten. Die Flugaschen F1 und F3 unterscheiden sich bei in etwa gleicher Feinheit von rd.  $20 \text{ M.-%} > 45 \mu\text{m}$  und gleicher Aktivität von rd. 80 % nach 28 Tagen vor allem in ihrem Alkali- und ihrem Glasgehalt mit 3,61 gegenüber 1,09 M.-% und 80 gegenüber 67 M.-%. Das Kalksteinmehl dient als inertes Referenzmaterial.

Es wurden die in Tabelle 5-11 aufgelisteten Feinbetone hergestellt.

Tabelle 5-11: Zusammenstellung der mit Betonzusatzstoffen hergestellten Feinbetone mit Duranglas

Bezeichnung	D / F1	D / F3	D / KSM
1	2	3	4
Zement	Z1	Z1	Z1
$\text{Na}_2\text{O}_e$ v. Z. [M.-%]	1,21	1,21	1,21
$b = z + f$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	500	500	500
w/b-Wert	0,5	0,5	0,5
Duranglasgehalt	568 [ $\text{kg/m}^3$ ]	568 [ $\text{kg/m}^3$ ]	568 [ $\text{kg/m}^3$ ]
BZS [M.-% v. Z.]	15/20/25/ 30/35/40	15/20/25/ 30/35/40	15/20/25/ 30/35/40

#### Dehnungen

Eine Darstellung der Dehnungen erfolgte entsprechend den Ergebnissen aus den Versuchen zur Ermittlung des pessimalen Gehalts an Duranglas im Feinbeton bis zum Alter von 4 Monaten. In den flugaschehaltigen Feinbetonen fand in etwa proportional zur durch Flugasche ausgetauschten Menge Zement eine Verringerung der Dehnungen statt. Erst ab Austauschraten von 30 M.-% wirkte sich der niedrigere Alkaligehalt der Flugasche F3 gegenüber der Flugasche F1 verstärkt auf die Verringerung der Dehnungen aus. Die Feinbetone mit Kalksteinmehl im Bindemittel zeigten selbst bei hohen Zementaustauschraten von bis zu 40 M.-% größere Dehnungen als der Feinbeton mit Zement alleine, vgl. Abbildung 5-15.

Dass sich die Verdünnung des Bindemittels durch Kalksteinmehl nicht positiv auf die Dehnungen auswirkte kann damit erklärt werden, dass die restlichen Zementgehalte auch

weiterhin für eine starke Alkalireaktion des Duranglases ausreichen. Zugleich wird durch die Erhöhung des w/z-Wertes der Transport von Wasser und Alkalien zum Reaktionsort vereinfacht. Nicht zuletzt dürfte eine Verringerung der Festigkeit durch den massebezogenen Austausch von Zement durch Kalksteinmehl den Widerstand des Gefüges gegenüber einer Verformung schwächen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Versuche mit Duranglas als reaktive Gesteinskörnung vor allem der Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Gefügedichtigkeit bestimmt werden kann. Aufgrund der starken Reaktivität des Duranglases wird der Effekt der Verdünnung der Porenlösung aber nur in geringem Maße abgebildet.

Die Dehnungsverläufe im Einzelnen sind in Anhang A5, Abbildung A5 89 bis Abbildung A5 91 dargestellt.

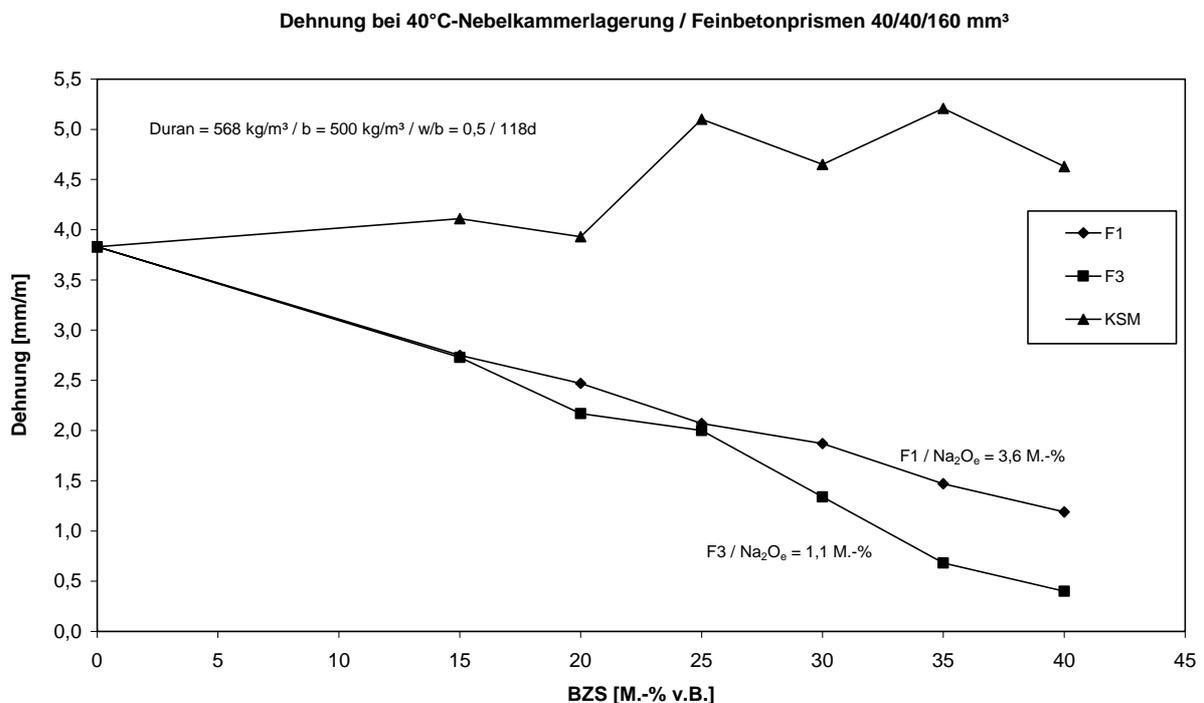


Abbildung 5-15: Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe (BZS) auf das Dehnungsverhalten der Feinbetone mit Duranglas nach 118 Tagen

### Zusammensetzung der Porenlösung

Die Zusammensetzung der Porenlösung der Feinbetone wurde nach 28 Tagen Lagerung bei 40°C bestimmt, siehe Tabelle A6 7. In Abbildung 5-16 ist die OH<sup>-</sup>-Konzentration in Abhängigkeit vom Gehalt und von der Art des verwendeten Betonzusatzstoffes nach 28 Tagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass von der Flugasche F1 mit hohem Alkaligehalt zumindest kein Beitrag zur Basizität der Porenlösung zu erwarten ist. Unabhängig von der Austauschrate Zement durch Flugasche werden Werte im Bereich der theoretischen Verdünnungslinie gemessen. Die Werte bleiben immer unterhalb der Ergebnisse für das Kalksteinmehl.

Der verringerte Alkaligehalt der Flugasche F3 mit rd. 1,1 gegenüber 3,6 M.-% der Flugasche F1 führt zu einer deutlichen Absenkung der OH<sup>-</sup>-Konzentration in der Porenlösung.

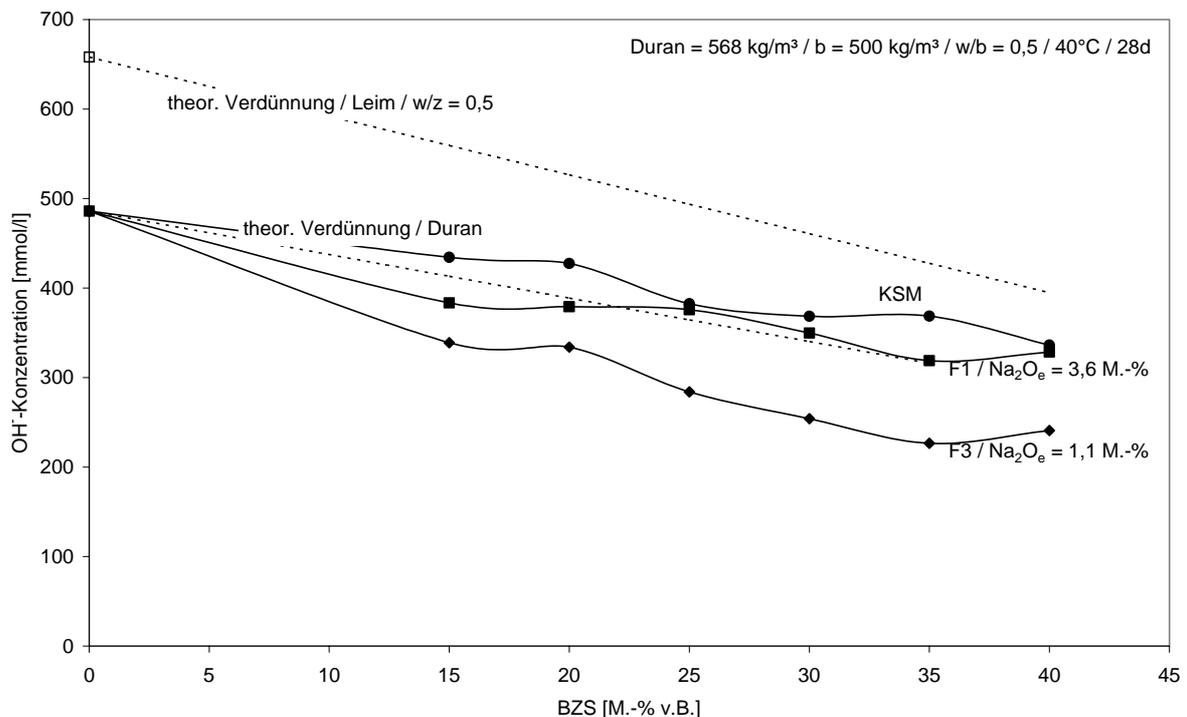


Abbildung 5-16: Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe (BZS) auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration nach 28d

Ein Vergleich der Dehnungen nach 28 Tagen mit der Hydroxylionenkonzentration zeigt, dass das Kalksteinmehl, trotz deutlicher Reduzierung der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung, bei Austauschraten zwischen 15 und 35 M.-% v.Z. zu einer Erhöhung der Dehnungen gegenüber dem Feinbeton ohne Betonzusatzstoff führt. Dies kann mit der Erhöhung des w/z-Wertes von 0,5 auf bis zu 0,77 bei 35 M.-% Kalksteinmehl im Bindemittel erklärt werden. Offensichtlich führt hier die Verbesserung des Alkalien-, Hydroxylionen- und Wassertransports zu einer deutlich verstärkten Reaktion des Duranglases. Dies wird durch die Beobachtung belegt, dass an den Probekörpern mit Portlandzement alleine erst nach rd. 5

Monaten der Beginn einer Rissbildung (keine Gelausscheidungen) festgestellt werden konnte, während die Probekörper mit Kalksteinmehl bereits nach 28 Tagen eine Rissbildung mit starker Gelbildung aufwiesen. Erst ab 40 M.-% Kalksteinmehl und einer Hydroxylionenkonzentration von unter 350 mmol/l wird eine Absenkung der Dehnungen auf rd. 80 % des Wertes ohne Betonzusatzstoff erreicht.

Bereits ab einer Austauschrate von 15 M.-% bewirken die Flugaschen eine deutliche Verringerung der Dehnungen um rd. 30 % gegenüber der Nullmischung. Die deutlich geringeren Hydroxylionenkonzentrationen der Mischungen mit der Flugasche F3 führen allerdings zu keiner bzw. erst ab hohen Austauschraten von rd. 30 M.-% zu einer leicht stärkeren Verringerung der Dehnungen gegenüber den Feinbetonen mit Flugasche F1. Dies spricht dafür, dass in den hier vorliegenden Hydroxylionenkonzentrationsbereichen noch immer ein starker Angriff des Duranglases vorliegt, während die Verringerung der Porosität der Matrix und somit die Verlangsamung des Transports der bestimmende Faktor ist.

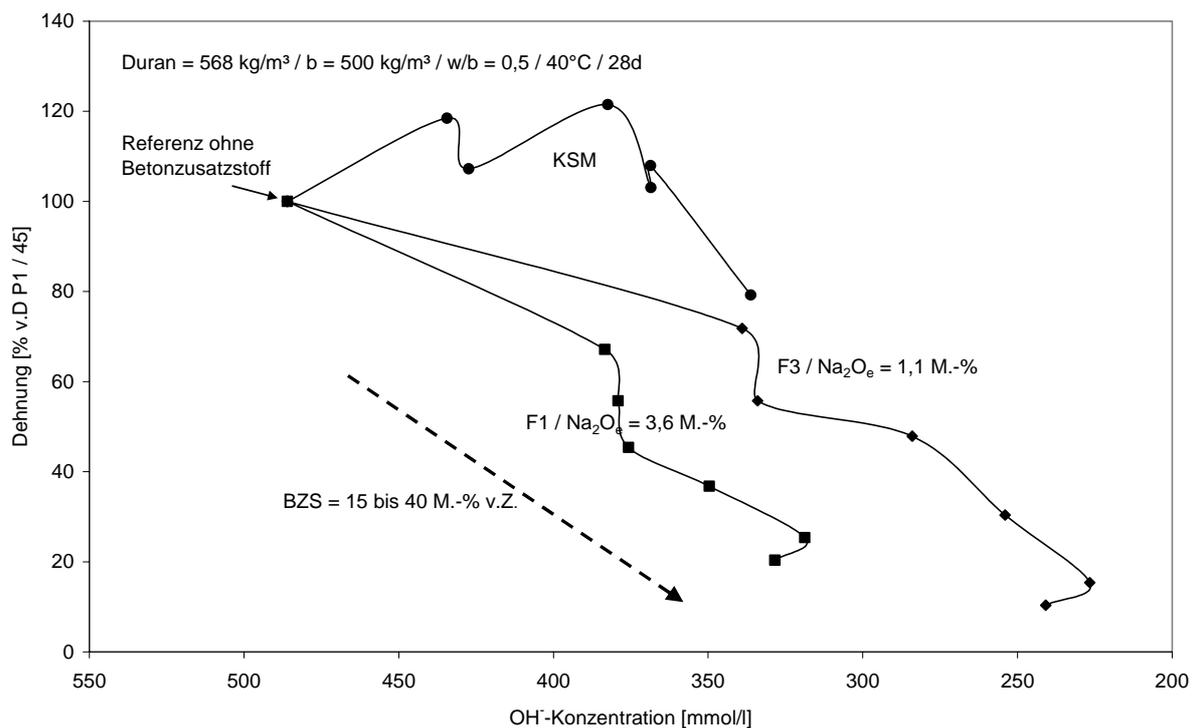


Abbildung 5-17: Einfluss der Betonzusatzstoffe auf den Zusammenhang OH<sup>-</sup>-Konzentration und Dehnung nach 28 Tagen

## 5.6 Chemische Zusammensetzung der Porenlösung der Betone

### 5.6.1 Einleitung

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist eine chemische Reaktion zwischen der reaktiven Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ ) in der Gesteinskörnung und den Alkalihydroxiden in der Porenlösung des Zementsteins. Dabei entsteht ein Alkali-Kieselsäure-Gel, das unter Wasseraufnahme betonschädigende Quelldrücke aufbauen kann. An der Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH-Phasen) bei der puzzolanischen Reaktion von Steinkohlenflugasche sind deren glasige Bestandteile und hier vor allem das  $\text{SiO}_2$  beteiligt. Generell wird die puzzolanische Reaktion der Flugasche dabei von denselben Parametern beeinflusst wie die AKR in der Gesteinskörnung.

Die Löslichkeit der Kieselsäure ist u.a. abhängig von deren Kristallinität (amorph bis grobkristallin), von der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung und der Temperatur beim Lösungsvorgang.

Je höher die  $\text{OH}^-$ -Konzentration und dementsprechend der pH-Wert der Porenlösung ist, umso schneller reagiert die alkaliempfindliche Kieselsäure. Die Löslichkeit der Kieselsäure steigt oberhalb von  $\text{pH} = 12,0$  exponentiell an. Dies gilt streng genommen aber nur für amorphes  $\text{SiO}_2$ , wie es z.B. in opalhaltigen Gesteinen vorliegt, für kristallines  $\text{SiO}_2$ , z.B. in Form von Bergkristall, liegt die tatsächliche Löslichkeitsgrenze bei  $0,2 \text{ g/l}$  [40]. Die Löslichkeit des Flugascheglasses zeigt eine ähnliche Abhängigkeit vom pH-Wert der Porenlösung. Es wurden Löslichkeiten von bis zu  $0,7 \text{ g/l}$  bei einem pH-Wert von rd.  $14,0$  gefunden [41].

Der pH-Wert in der Porenlösung des Zementsteins liegt zwischen  $12,5$  und  $13,9$ , wobei die Werte größer  $12,5$  durch die Alkalien in der Porenlösung bedingt sind. Somit kann durch betontechnologische Maßnahmen die den pH-Wert in der Porenlösung senken, wie z.B. die Verwendung von Zement mit niedrigem Alkaligehalt oder ein Zementaustausch durch Betonzusatzstoffe, der Angriff auf die Kieselsäure in der Gesteinskörnung beeinflusst werden. Allerdings wird dadurch auch die Reaktionsgeschwindigkeit der Flugasche herabgesetzt.

Nach Fraay [41] ergibt sich für Flugasche in Abhängigkeit vom pH-Wert eine unterschiedliche Abhängigkeit der Löslichkeit von der Temperatur. So ändert sich bei pH-Werten zwischen  $13,37$  und  $13,99$  die Löslichkeit bei einem Temperaturunterschied von  $20^\circ\text{C}$  um etwa eine Zehnerpotenz, während sich bei einem pH-Wert von  $13,01$  die Erhöhung der Temperatur um  $20^\circ\text{C}$  nur geringfügig auf die Löslichkeit auswirkt. Es kann davon ausgegangen werden, dass für  $\text{SiO}_2$  aus Gesteinskörnungen dieselben Abhängigkeiten bestehen.

Neben dem Verbrauch von Hydroxylionen werden zudem verstärkt Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion der Flugasche eingebaut. Dies wird u.a. auf das niedrigere Ca/Si-Verhältnis der Hydratationsprodukte der Flugasche zurückgeführt, da

sich dadurch deren Oberflächenladung verringert und damit die Fähigkeit Alkalien zu adsorbieren steigt [42]. Somit stehen diese Alkalien für eine Alkali-Kieselgel-Bildung mit dem  $\text{SiO}_2$  aus der Gesteinskörnung nicht mehr zur Verfügung.

In Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen und flugaschehaltigen Bindemitteln findet eine miteinander in Konkurrenz stehende Reaktion zwischen dem  $\text{SiO}_2$  aus der Gesteinskörnung und dem  $\text{SiO}_2$  aus der Flugasche mit den im Porenwasser gelösten Alkalihydroxiden statt. Inwiefern der Einsatz von Flugasche im Beton eine schädigende Alkalireaktion der Gesteinskörnungen verhindern kann hängt damit von der Reaktivität der Flugasche und ihrem Anteil im Bindemittel ab. Da durch die Flugasche neben der Zusammensetzung der Porenlösung u.a. auch gleichzeitig die Dichte des Betongefüges verändert wird, ist eine Trennung der einzelnen Faktoren, die für eine differenzierte Bewertung der Effektivität der Flugasche notwendig ist, durch Dehnungsversuche allein nicht möglich. Nur durch die Bestimmung der Zusammensetzung der Porenlösung kann der Einfluss der Flugasche auf die chemischen Abläufe der Alkali-Kieselsäure-Reaktion getrennt von anderen Parametern untersucht werden. Dabei ist besonders der Einfluss der Flugasche auf die Alkali- und Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung von Interesse.

### 5.6.2 Vorgehensweise

Der Einfluss des Bindemittels, vor allem der flugaschehaltigen Kombinationen, auf die chemische Zusammensetzung der Porenlösung wurde überwiegend an Proben ermittelt, die aus der selben Betoncharge entnommen wurden wie die Probekörper für die Prüfung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3. Dabei ist davon auszugehen, dass durch die Alkali-Kieselsäure Reaktion der Gesteinskörnungen die Porenlösung beeinflusst wurde. Somit sind die im Folgenden dargestellten Effekte nicht alleine auf die jeweiligen Änderungen der Bindemittelkombination zurückzuführen. Allerdings hat diese Vorgehensweise im Gegensatz zu reinen Leimversuchen den Vorteil, dass dadurch der Zustand im Inneren des Betons direkt mit dem äußeren Erscheinungsbild (Dehnungen, Rissbildung) verglichen werden kann. Zur besseren Einschätzung der Ergebnisse wurde aber auch stichpunktartig die Zusammensetzung der Porenlösung von Leimen bestimmt. Die Porenlösungen wurden in der Regel nach 28, 90 und 365 Tagen aus dem Beton gepresst. Aufgrund des großen Hydratationsfortschritts bis zum Alter von 28 Tagen wird nicht mehr davon ausgegangen, dass bei der weiteren Hydratation eine signifikante Aufkonzentration der Porenlösung durch den Einbau von Wasser in die Hydratationsprodukte stattfindet. Deshalb wurde darauf verzichtet die Konzentrationen für einen definierten Gehalt an freiem Wasser, entsprechend dem Wasserkonzentrationsfaktor nach Diamond [43], zu ermitteln bzw. die Ionengehalte in der Porenlösung auf den Feststoff zu beziehen.

Eine Zusammenstellung aller Ergebnisse zur Zusammensetzung der Porenlösung ist in Anhang 6, Tabelle A6 1 bis Tabelle A6 6 aufgeführt.

### 5.6.3 Einfluss des Alkaligehaltes des Portlandzementes auf die Zusammensetzung der Porenlösung

Für die hier verwendeten Portlandzemente mit  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalenten ( $\text{Na}_2\text{O}_e$ ) zwischen 0,6 und 1,2 M.-% v.Z. zeigte sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Alkali- und Hydroxylioneneintrag in die Porenlösung und ihrem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent. So wurde nach 28 Tagen bei dem Zement mit niedrigem Alkaligehalt ein pH-Wert von 13,49, entsprechend 315 mol/l Hydroxylionen gegenüber einem pH-Wert von 13,82, entsprechend 660 mmol/l Hydroxylionen bei dem Zement mit hohem Alkaligehalt erreicht. In Analogie zu den Dehnungsergebnissen bei Verwendung des Zementes mit niedrigem Alkaligehalt ist zu erwarten, dass, wenn durch den Austausch von Zement durch Betonzusatzstoffe ein Niveau von rd. 350 mmol/l Hydroxylionen erreicht wird, es zu keiner schädigenden AKR im Beton mehr kommt. Dabei sind allerdings noch nicht evtl. Einflüsse auf den Transport bzw. auf die mechanischen Eigenschaften des Betons durch Zusatzstoffe berücksichtigt. Die im Allgemeinen verwendete Näherung  $[\text{OH}^-] = [\text{K}^+] + [\text{Na}^+]$  trifft hier nur für den Zement mit niedrigem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent zu, wohingegen bei höheren Alkaligehalten die Hydroxylionenkonzentration weit überschätzt wird, vgl. Abbildung 5-18. Weitergehende Untersuchungen zeigten, dass der Ladungsausgleich in der Porenlösung durch Chlorid- und Sulfationen erfolgt und damit der Überhang von Natrium und Kalium erklärt werden kann.

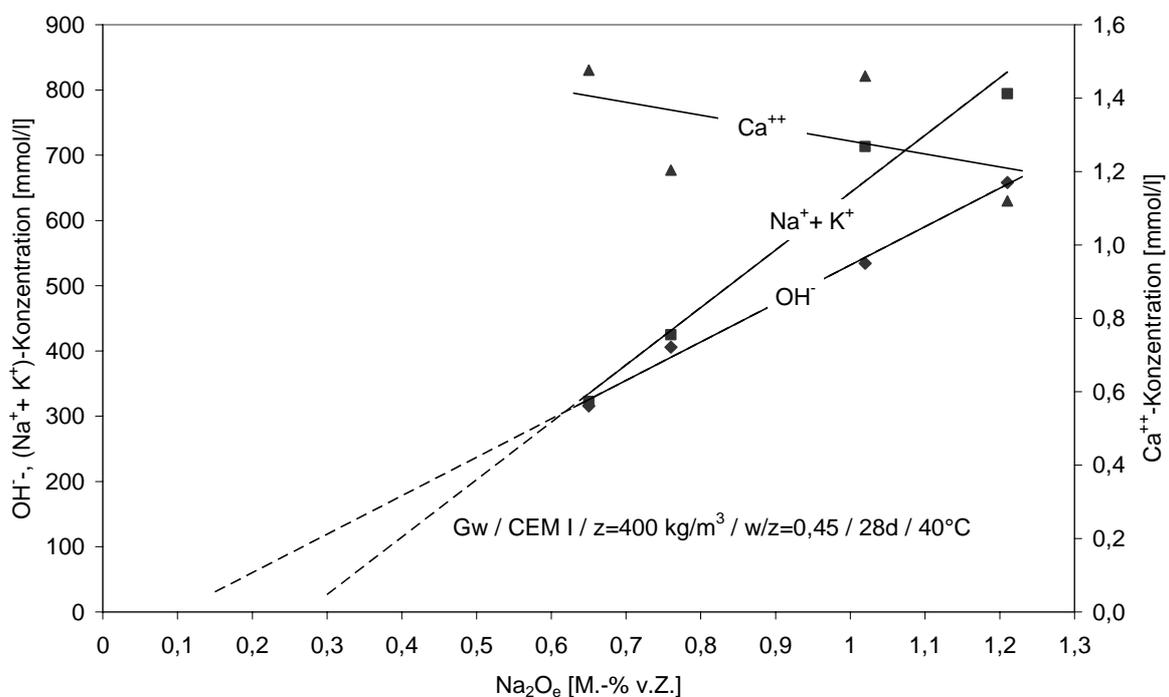


Abbildung 5-18:  $\text{OH}^-$ -,  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ - und  $\text{Ca}^{++}$ -Konzentration in Abhängigkeit vom  $\text{Na}_2\text{O}_e$  der Portlandzemente nach 28 Tagen

#### 5.6.4 Einfluss der Gesteinskörnung auf die Zusammensetzung der Porenlösung

Unabhängig von der Rezeptur und Gesteinskörnung weisen die Betone bereits im Alter von 28 Tagen geringere Ionenkonzentrationen als die zu Referenzzwecken hergestellten Leime auf. Dies kann auf einen Verbrauch von Alkalien und Hydroxylionen durch die Gesteinskörnungen zurückgeführt werden. Auffällig ist, dass die Ionenkonzentrationen der Betone mit dem als inert eingestuften EI Material im Bereich der Betone mit Grauwacke und Kies/Kies-Edelsplitt Oberrhein liegen. Es kann davon ausgegangen werden, dass auch bei dem EI Material ein Verbrauch von Alkalien und Hydroxylionen durch in der Gesteinskörnung enthaltenes  $\text{SiO}_2$  stattgefunden hat. Offensichtlich führt dies aber nicht zu einer schädigenden AKR.

Anhand der Leimergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass durch die Verringerung des w/z-Wertes von 0,5 auf 0,45 die Ionenkonzentration in der Porenlösung erhöht und somit ein Angriff auf die Gesteinskörnungen verstärkt wird, vgl. OH<sup>-</sup>-Konzentration der Leime L1 (w/z = 0,5) und L2 (w/z = 0,45) mit 658 und 716 mmol/l im Alter von 28 Tagen.

Wie bereits bei den Dehnungen konnte auch in Bezug auf die Zusammensetzung der Porenlösung ein unterschiedliches Verhalten der Gesteinskörnungen bei Verwendung der Grundrezeptur 1 mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$ , w/z-Wert = 0,5 und Alkaligehalt =  $6,1 \text{ kg/m}^3$  und der Grundrezeptur 2 mit  $z = 400 \text{ kg/m}^3$ , w/z-Wert = 0,45 und Alkaligehalt =  $4,8 \text{ kg/m}^3$ , festgestellt werden, vgl. Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20.

#### Grauwacke

Unabhängig von der Rezeptur wird durch die Grauwacke ein verhältnismäßig geringer Abbau der OH<sup>-</sup>-Konzentration von rd. 10 % gegenüber dem Leim im Alter von 28 Tagen bewirkt. Der Beton Gw2 weist im Gegensatz zu Beton Gw1 zwischen 28 und 90 Tagen eine weitere Verringerung der OH<sup>-</sup>-Konzentration gegenüber der Leimmischung auf, vgl. Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20. Dies könnte darauf hindeuten, dass in der Rezeptur 1 mit  $z = 500 \text{ kg/m}^3$  und einem Alkaligehalt von  $6,1 \text{ kg/m}^3$  die für eine AKR nötige Menge an Reaktionspartnern im Überschuss vorhanden ist und es innerhalb dieses Zeitraumes nicht mehr zu einer weiteren Absenkung der Konzentrationen durch die Reaktion der Grauwacke kommt, sondern sich ein Gleichgewicht zwischen dem Verbrauch durch die Gesteinskörnung und der Freisetzung durch den Zement einstellt. Bestärkt wird diese Vermutung dadurch, dass sich nach 365 Tagen für die Rezeptur 1 mit rd. 490 mmol/l noch eine deutlich höhere OH<sup>-</sup>-Konzentration als für die Rezeptur 2 mit rd. 410 mmol/l ergibt. Dies könnte auch erklären, warum die Betone Gw1 und Gw2 ein in etwa gleiches Schadensbild aufwiesen. Somit kann für die Grauwacke festgestellt werden, dass mit 400 kg Zement mit hohem Alkaligehalt bereits ein ausreichend hoher Gehalt an Reaktionspartnern für eine optimale (pessimale) AKR zur Verfügung gestellt wird.

### **Kies / Kies-Edelsplitt Oberrhein**

Sowohl die Betone mit unebrochenen als auch diejenigen mit gebrochenen Gesteinskörnungen aus dem Oberrhein weisen ab einem Alter von 90 Tagen unabhängig von der Rezeptur eine um rd. 100 mmol/l geringere Hydroxylionenkonzentration auf als die entsprechenden Betone mit Grauwacke. Dies kann mit dem hohen Gehalt verschiedenster Quarzvarietäten dieser Gesteinskörnungen erklärt werden, der auch aus der petrographischen Gesteinsbestimmung, siehe Anhang 2, ersichtlich ist. Erstaunlicher Weise führt der Kies bis zum Alter von 90 Tagen sogar zu einem tendenziell stärkeren Abbau der Hydroxylionenkonzentrationen als der Kies-Edelsplitt. Somit muss für den Kies von einer starken prinzipiellen Alkali-Kieselsäure-Reaktion ausgegangen werden, diese führt aber offensichtlich zu einer weitaus geringeren Schädigung des Betons als der Kies-Edelsplitt. Gründe hierfür sind aus diesen Ergebnissen nicht ersichtlich.

Durch den Kies und den Kies-Edelsplitt werden bei der Rezeptur 2 mit einem Zementgehalt von 400 kg/m<sup>3</sup> und einem Alkaligehalt von rd. 4,8 kg/m<sup>3</sup> bereits nach 28 Tagen die Hydroxylionenkonzentrationen auf ein Niveau von rd. 500 mmol/l abgesenkt. Diese werden bei der Rezeptur 1 mit einem Zementgehalt von 500 kg/m<sup>3</sup> und einem Alkaligehalt von rd. 6,1 kg/m<sup>3</sup> erst nach rd. 90 Tagen erreicht. Der insgesamt hohe Hydroxylionenverbrauch der Gesteinskörnungen Kies / Kies-Edelsplitt Oberrhein und die schnelle Absenkung des Hydroxylionenniveaus in der Rezeptur mit dem geringeren Gesamtalkaligehalt deuten auf eine starke Abhängigkeit der Alkali-Kieselsäure-Reaktion dieser Gesteinskörnungen vom Alkali- bzw. Hydroxylionenangebot im Beton hin. Diese Ergebnisse entsprechen den Ergebnissen der Dehnungsversuche, aus denen bereits eine starke Abhängigkeit des Schadensausmaßes vom Alkaligehalt des Betons hervorgeht, vgl. Abbildung 5-13.

Nach einem Jahr wurde unabhängig von der Rezeptur eine OH<sup>-</sup>-Konzentration von 350 bis 400 mmol/l erreicht. Dies könnte darauf hindeuten, dass es im Bereich dieser Konzentrationen bei den Gesteinskörnungen aus dem Oberrhein zu keiner weiteren bzw. nur mehr einer sehr langsamen Alkalireaktion kommt.

### **Kies mit Opalsandstein / Flint (EIII-OF)**

Der Beton mit EIII-OF als reaktive Gesteinskörnung zeigt erwartungsgemäß den stärksten Abbau an Hydroxylionen. Bereits nach 28 Tagen wird im Beton EIII-OF1 mit einem Wert um 400 mmol/l nur noch rd. 60 % der Hydroxylionenkonzentration der Porenlösung des Leims gemessen. Auch dies deckt sich mit den Ergebnissen bezüglich des hohen amorphen Anteils der Gesteinskörnung EIII-OF und der sehr schnellen und starken Reaktivität dieser Gesteinskörnung.

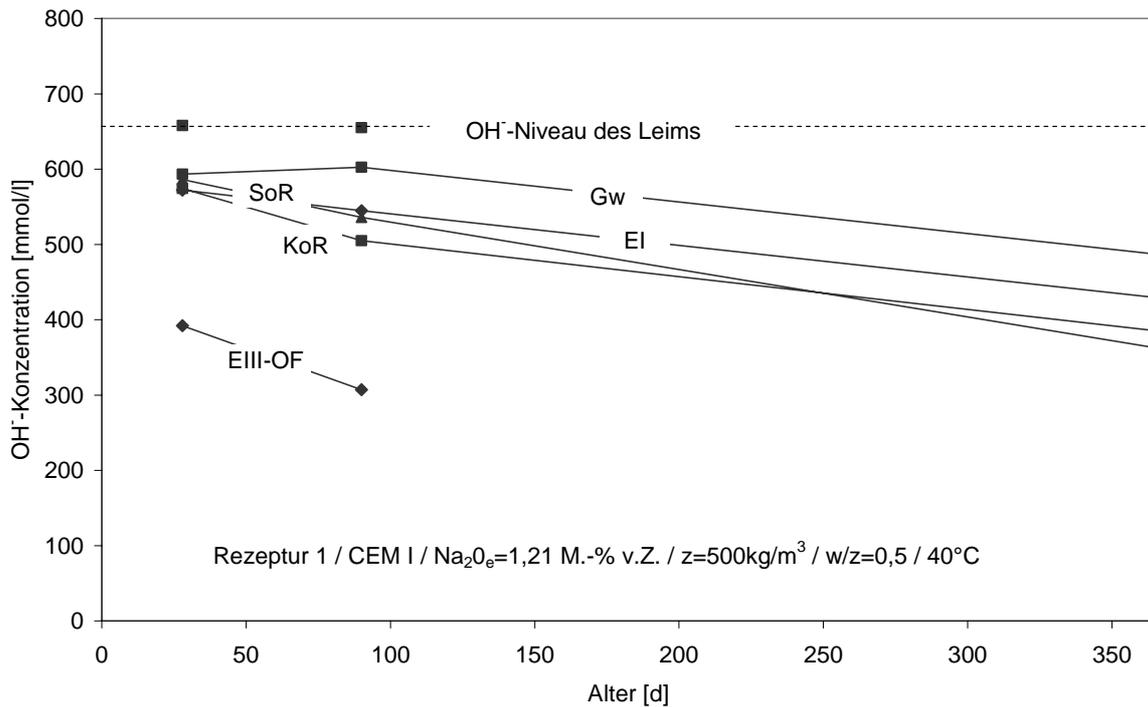


Abbildung 5-19: Einfluss der Gesteinskörnungen auf die Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung des Betons der Rezeptur 1; z = 500 kg/m<sup>3</sup>; w/z = 0,5

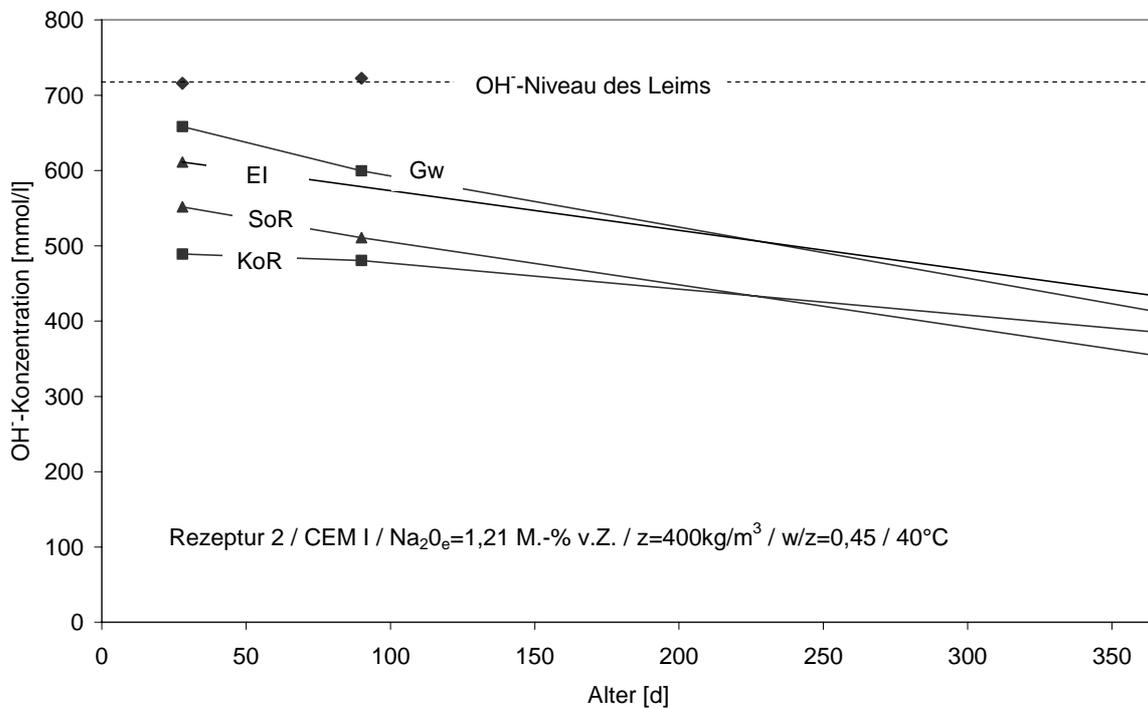


Abbildung 5-20: Einfluss der Gesteinskörnungen auf die Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung des Betons der Rezeptur 2; z = 400 kg/m<sup>3</sup>; w/z = 0,45

### 5.6.5 Einfluss der Bindemittelkombination auf die Zusammensetzung der Porenlösung

Die Abschätzung der Wirksamkeit der verwendeten Betonzusatzstoffe erfolgte im Allgemeinen über den Vergleich mit theoretischen Verdünnungslinien. Dabei wird, ausgehend von den Ergebnissen einer Mischung mit reinem Portlandzementklinker, die theoretische Ionenkonzentration in der Porenlösung bei teilweisem, rein massebezogenen Ersatz des Klinkers durch einen inerten, alkalifreien Betonzusatzstoff berechnet. Dies geschieht unter Annahme einer unabhängig vom w/z-Wert gleich bleibenden Alkalifreisetzung aus dem Klinker. Liegen dann die tatsächlich gemessenen Werte auf der theoretischen Verdünnungslinie wird der Betonzusatzstoff als neutral eingestuft, liegen die Werte über- bzw. unterhalb der Linie, wird von einer Freisetzung bzw. Einbindung von Ionen ausgegangen.

Im Folgenden wird die Bewertung der Wirksamkeit der Betonzusatzstoffe an Betonen mit Grauwacke durchgeführt. Obwohl davon ausgegangen werden kann, dass mit zunehmendem Alter ein immer größer werdender Einfluss der Gesteinskörnung auf die Porenlösungszusammensetzung vorhanden ist, wird für das weitere Vorgehen immer der Wert des Betons ohne Betonzusatzstoff als Ausgangswert für die Berechnung von theoretischen Verdünnungslinien verwendet.

### 5.6.5.1 Kalksteinmehl

#### Beitrag des Kalksteinmehls zur Zusammensetzung der Porenlösung

Bei den reinen Leimen mit Kalksteinmehl zeigt sich, dass die gemessenen Ionenkonzentrationen verhältnismäßig gut den theoretischen Verdünnungslinien entsprechen, siehe Abbildung 5-21. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Erhöhung des w/z-Wertes zu keiner signifikant verstärkten Freisetzung von Alkalien aus Portlandzementklinker gegenüber den Referenzmischungen ohne Betonzusatzstoff führt. Dies entspricht den Ergebnissen von Schäfer [44], die bei Kompositzementsteinen mit Kalksteinmehl ebenfalls keine Veränderung des Lösungsverhaltens der im Klinker enthaltenen Alkalien feststellte. Somit können die Verdünnungslinien einen Hinweis darauf liefern, ob durch den verwendeten Betonzusatzstoff Alkalien verbraucht oder freigesetzt werden.

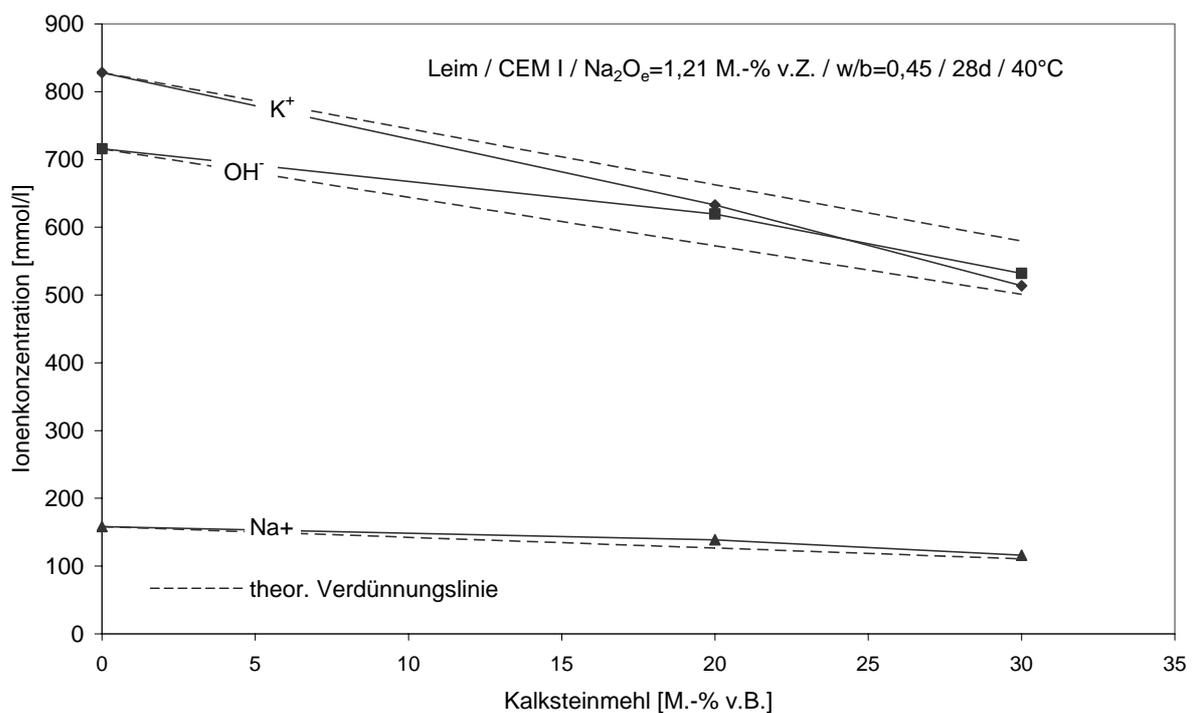


Abbildung 5-21: Ionenkonzentration im Leim in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie

Das gleiche Verhalten kann an der Zusammensetzung der Porenlösung des Betons Gw2 beobachtet werden, vgl. Abbildung 5-22. Somit kann im Weiteren davon ausgegangen werden, dass eine Bewertung der Ergebnisse am Beton möglich ist.

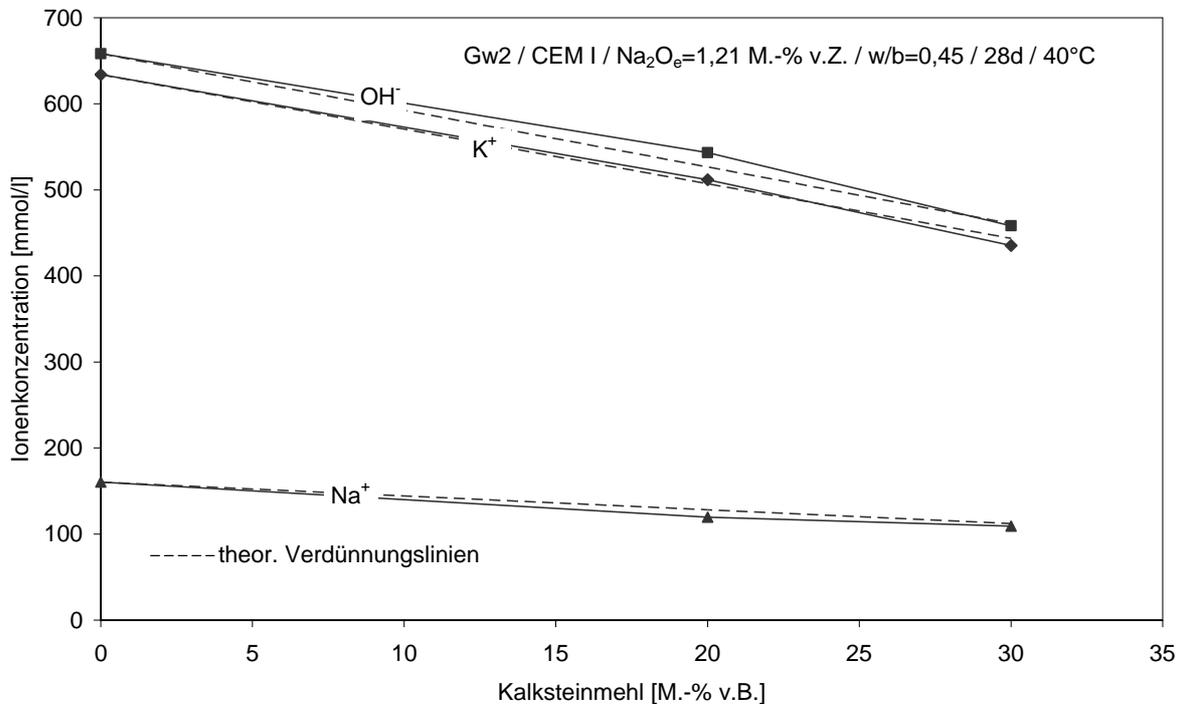


Abbildung 5-22: Ionenkonzentration im Beton in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie

Dass die Verdünnung der Porenlösung vor allem durch die Erhöhung des w/z-Wertes bei massebezogenem Austausch von Zement zu erklären ist, zeigt Abbildung 5-23. Mit zunehmendem Austausch des Zementes durch Kalksteinmehl nimmt die  $\text{OH}^-$ -Konzentration proportional zur Erhöhung des w/z-Wertes ab. Die Verringerung der  $\text{OH}^-$ -Konzentration ist also auf die Verdünnung der Porenlösung zurückzuführen, somit ist das Kalksteinmehl als inerte Betonzusatzstoff hinsichtlich Alkalireaktion einzustufen.

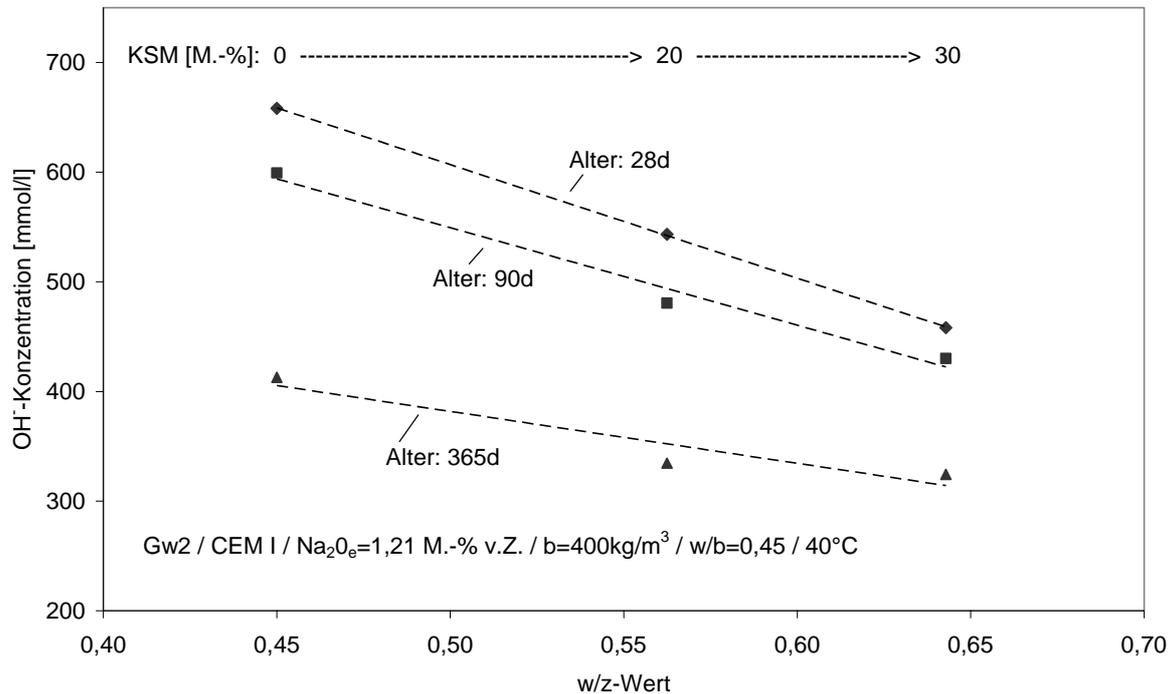


Abbildung 5-23: Einfluss des w/z-Wertes auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration von Betonen mit Kalksteinmehl

### Einfluss des Kalksteinmehls auf die zeitliche Entwicklung der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung

Erwartungsgemäß führt im Alter von 28 Tagen ein zunehmender Gehalt an Kalksteinmehl im Bindemittel zu einer Verringerung der Hydroxylionenkonzentration entsprechend der theoretischen Verdünnungslinie. Im Alter von 365 Tagen wird sowohl in dem Beton mit 20 M.-% als auch in dem Beton mit 30 M.-% Kalksteinmehl die Hydroxylionenkonzentration auf rd. 320 mmol/l abgesenkt. Da auch in dem Beton ohne Kalksteinmehl eine Hydroxylionenkonzentration im Bereich von 400 mmol/l erreicht wird, kann der Schluss gezogen werden, dass, zumindest für die hier verwendete Grauwacke, unterhalb einer Hydroxylionenkonzentration von rd. 300 mmol/l keine signifikante Alkalireaktion mehr stattfindet, vgl. Abbildung 5-24.

Obwohl die Ergebnisse für die Betone mit Kalksteinmehl auch im Alter von 365 Tagen gut mit den theoretischen Verdünnungslinien übereinstimmen verdeutlicht Abbildung 5-24, dass mit zunehmendem Alter ein Vergleich mit theoretischen Verdünnungslinien am Beton nicht mehr uneingeschränkt gültig sein kann. Die Reaktion der Alkalien mit der Gesteinskörnung wirkt sich im Laufe der Zeit immer stärker auf den Ausgangswert für die theoretischen Verdünnungslinien aus. So wird im Leim im Alter von 28 und 90 Tagen jeweils eine Konzentration von rd. 700 mmol/l erreicht, während im Beton durch die Alkalireaktion der Grauwacke die Konzentration von rd. 700 mmol/l nach 28 Tagen auf rd. 400 mmol/l nach 365 Tagen gesenkt wird. Daher ist es kritisch aus den am Beton gewonnenen Werten eine

Aussage zum Langzeitverhalten der Betonzusatzstoffe hinsichtlich ihres Nettobeitrages zur Porenlösung zu treffen. Dennoch erscheint es für eine prinzipielle Orientierung sinnvoll, auch in höherem Alter, unter Berücksichtigung der o. g. Einschränkungen, mit theoretischen Verdünnungslinien am Beton zu arbeiten, da damit die Auswirkungen der unterschiedlichen Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl, Hüttensand und Flugasche zumindest qualitativ miteinander verglichen werden können.

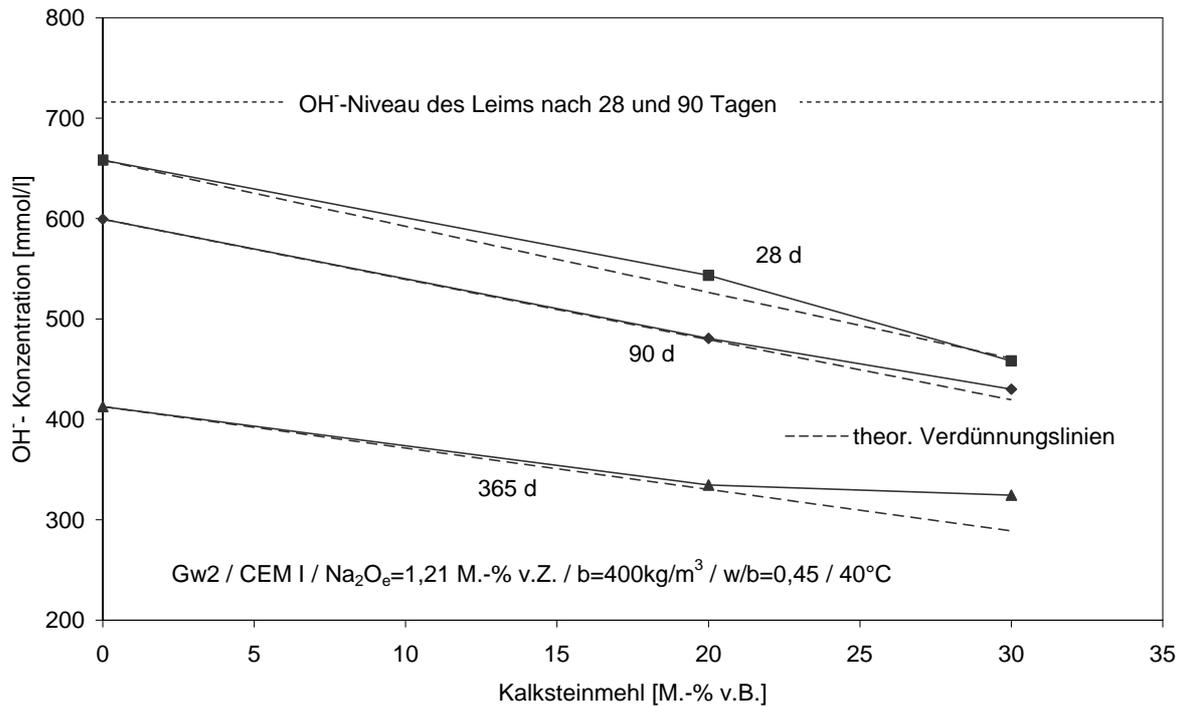


Abbildung 5-24: OH<sup>-</sup>-Konzentration im Beton in Abhängigkeit von dem Anteil an Kalksteinmehl im Bindemittel im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie nach 28, 90 und 365 Tagen

### 5.6.5.2 Hüttensand

Durch die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen, die mit dem gleichen Klinker hergestellt wurden wie der Portlandzement Z1 (CEM I 32,5 R mit  $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,21 \text{ M.-%}$ ), konnte der Einfluss des Hüttensandes auf die Porenlösung eingehend untersucht werden. Dabei wurden hüttensandhaltige Zemente mit 13, 42 und 72 M.-% Hüttensand im Zement verwendet.

#### Beitrag des Hüttensandes zur Zusammensetzung der Porenlösung

In Abbildung 5-25 sind die Alkali- und Hydroxylionenkonzentrationen der Betone mit hüttensandhaltigen Zementen im Alter von 28 Tagen dargestellt. Es ist erkennbar, dass die gemessenen Werte für die Natrium- und Hydroxylionenkonzentrationen gut mit den berechneten übereinstimmen. Bei Hüttensandgehalten von 13 und 42 M.-% wird eine Kaliumionenkonzentration erreicht, die deutlich unterhalb der theoretischen Verdünnungslinie liegt. Somit kann der Hüttensand bezüglich des Hydroxyl- und Alkaliionenhaushaltes im Beton zumindest als neutraler Zusatzstoff eingestuft werden.

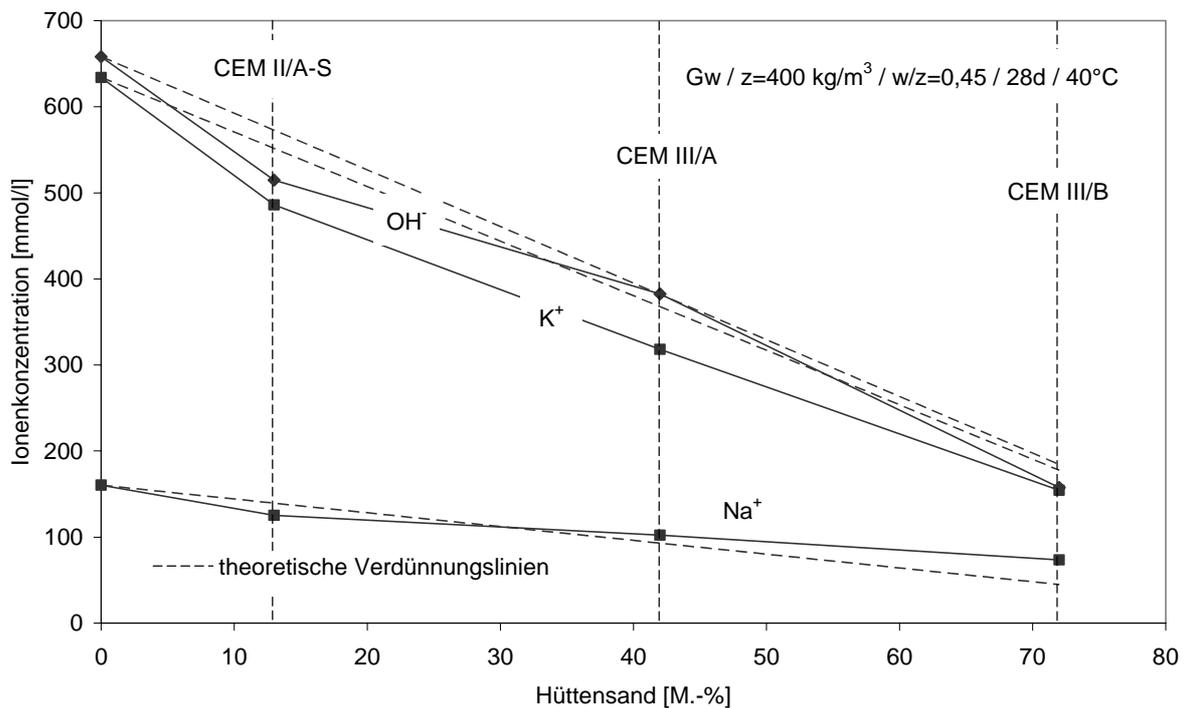


Abbildung 5-25: Ionenkonzentration im Beton in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt des Zementes im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie

Wird nur mit dem Klinkeranteil der hüttensandhaltigen Zemente gerechnet und ausgehend vom Beton mit reinem Portlandzement die theoretische Hydroxylionenkonzentration gegen das theoretische Alkaliäquivalent aufgetragen, so ist erkennbar, dass die gemessenen Hydroxylionenkonzentrationen bezogen auf das theoretische Alkaliäquivalent sehr gut mit den berechneten Werten übereinstimmen, vgl. Abbildung 5-26. Dies bedeutet, dass für die hüttensandhaltigen Zemente, unabhängig vom Hüttensandgehalt, der Beitrag an Hydroxylionen aus dem Klinker konstant bleibt und wie bereits aus Abbildung 5-25 ersichtlich, kein Beitrag des Hüttensandes zur Alkalität der Porenlösung erfolgt.

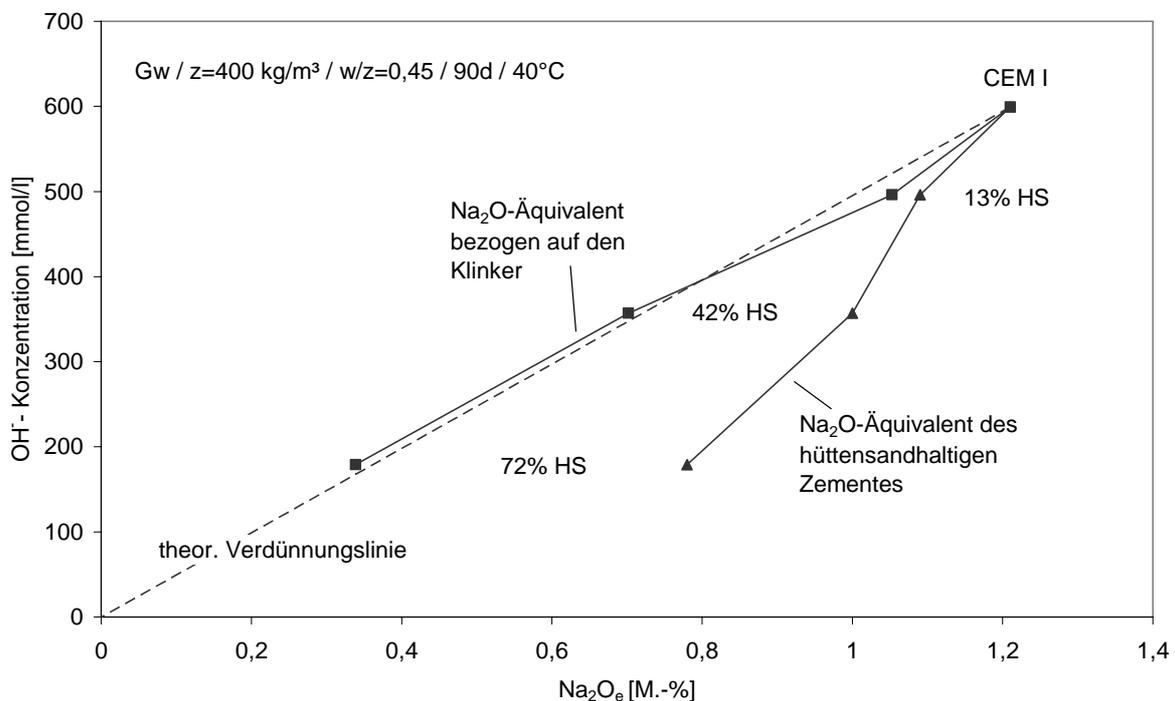


Abbildung 5-26: Beitrag des Klinkers zur OH<sup>-</sup>-Konzentration in der Porenlösung von Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen

### Einfluss des Hüttensandes auf die zeitliche Entwicklung der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung

In Abbildung 5-27 wird die OH<sup>-</sup>-Konzentration in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt des Zementes und vom Alter dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmenden Hüttensandgehalt im Laufe der Zeit die OH<sup>-</sup>-Konzentration immer weniger abnimmt, bis sie bei 72 % Hüttensandgehalt annähernd waagrecht verläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmendem Hüttensandgehalt die OH<sup>-</sup>-Ausgangskonzentration in der Porenlösung abnimmt und damit der Angriff auf die Gesteinskörnung und somit auch der Verbrauch von Hydroxylionen verringert wird. Nimmt man die Hydroxylionenkonzentration von rd. 350 mmol/l als Grenzwert, entsprechend den Ergebnissen für den Portlandzement mit niedrigem Alkaligehalt, siehe Abbildung 5-18, so ist bereits für den CEM III/A mit 42 M.-% Hüttensand keine schädigende Alkalireaktion im Beton mehr zu erwarten. Dies deckt sich mit den Betonversuchen nach Alkalirichtlinie Teil 3, bei denen für diese Betone während der bisherigen Lagerungszeit keine auf Alkalireaktion zurückzuführenden Treiberscheinungen zu erkennen sind.

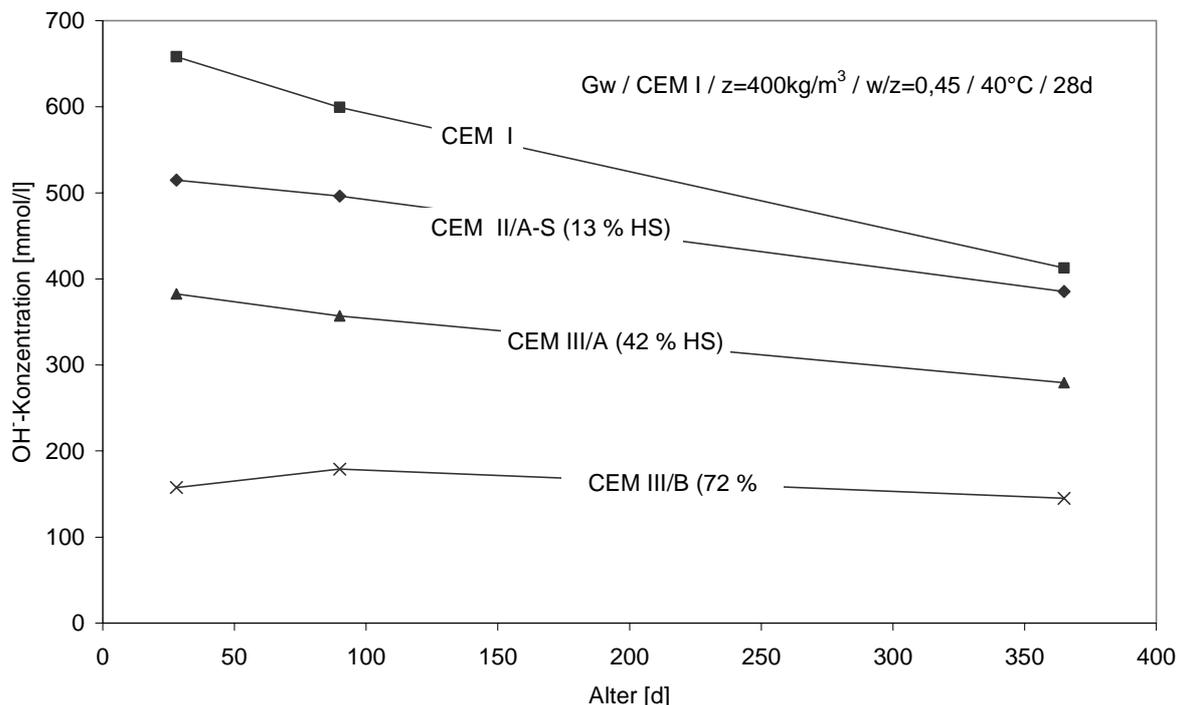


Abbildung 5-27: OH<sup>-</sup>-Konzentration im Beton in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und Alter

### 5.6.5.3 Flugasche

#### Beitrag der Flugaschen zur Zusammensetzung der Porenlösung

Hydroxylionenkonzentration:

Die Porenlösungen der bei 40°C gelagerten flugaschehaltigen Betone weisen unabhängig von der verwendeten Flugasche deutlich geringere OH<sup>-</sup>-Konzentrationen auf als durch eine reine Verdünnung bei Zementaustausch zu erwarten wäre. In Abbildung 5-28 und Abbildung 5-29 ist die OH<sup>-</sup>-Konzentration in Abhängigkeit vom Gehalt und von der Art der verwendeten Flugasche im Alter von 28 und 90 Tagen dargestellt.

Ein deutlicher Einfluss der Feinheit und der damit verbundenen schnelleren puzzolanischen Reaktion auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration konnte nach 28 Tagen noch nicht festgestellt werden. Dagegen führt der geringere Alkaligehalt der Flugasche F3 mit rd. 1,0 M.-% gegenüber den Flugaschen F1 bzw. F2 mit rd. 3,6 M.-% bereits im Alter von 28 Tagen zu einer signifikant stärkeren Absenkung der OH<sup>-</sup>-Konzentration in der Porenlösung. So wird durch den Austausch von 30 M.-% des Zements mit den alkalireichen Flugaschen eine Absenkung von rd. 20 % gegenüber der theoretischen Verdünnung erreicht, während durch die alkaliarme Flugasche die Konzentration sogar um 35 % verringert wird. In den hier untersuchten Austauschraten zwischen 20 und 35 M.-% Flugasche wird bei höheren Flugaschegehalten tendenziell eine proportional etwas geringere Absenkung der OH<sup>-</sup>-Konzentrationen bewirkt, siehe Abbildung 5-28. Nach 90 Tagen allerdings erzeugt die höhere Feinheit der Flugasche F2 eine deutliche Absenkung der Hydroxylionenkonzentration gegenüber der Flugasche F1 mit mittlerer Feinheit. Obwohl der Gesamtalkaligehalt der Flugaschen weiterhin der bestimmende Faktor bleibt, wirkt sich die Feinheit mit zunehmender Reaktionsdauer immer stärker auf die Hydroxylionenkonzentration der Porenlösung aus, siehe Abbildung 5-29.

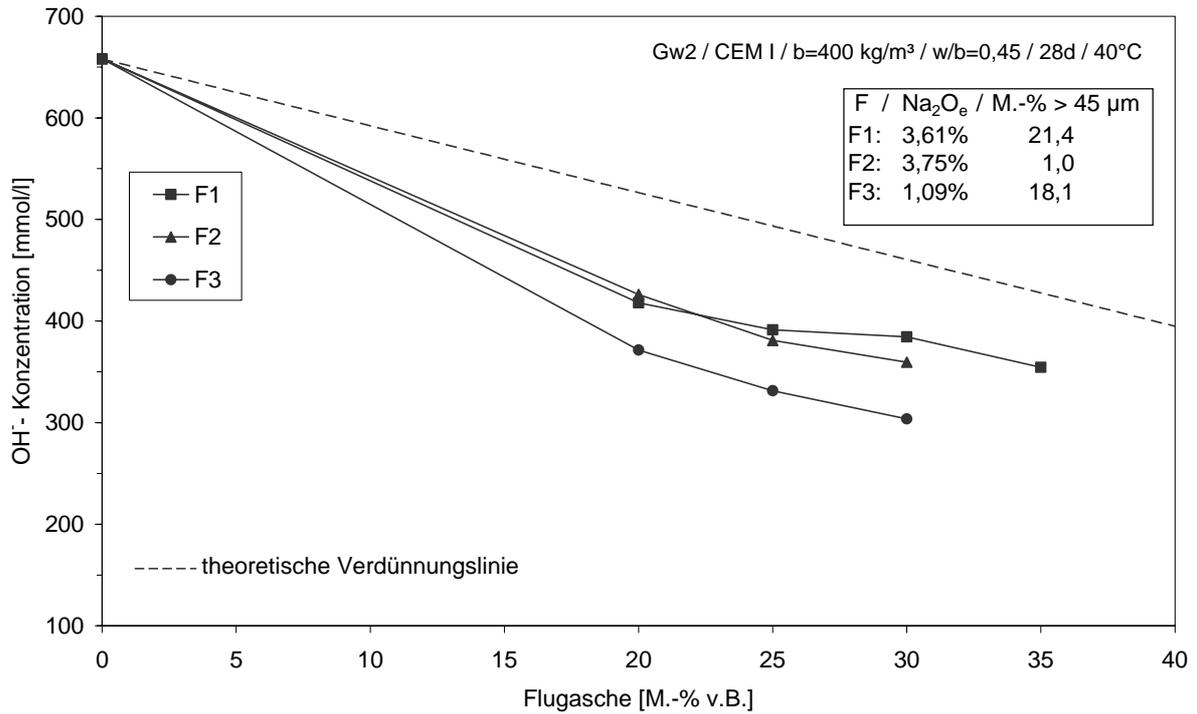


Abbildung 5-28: Einfluss der Flugaschen auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration nach 28d

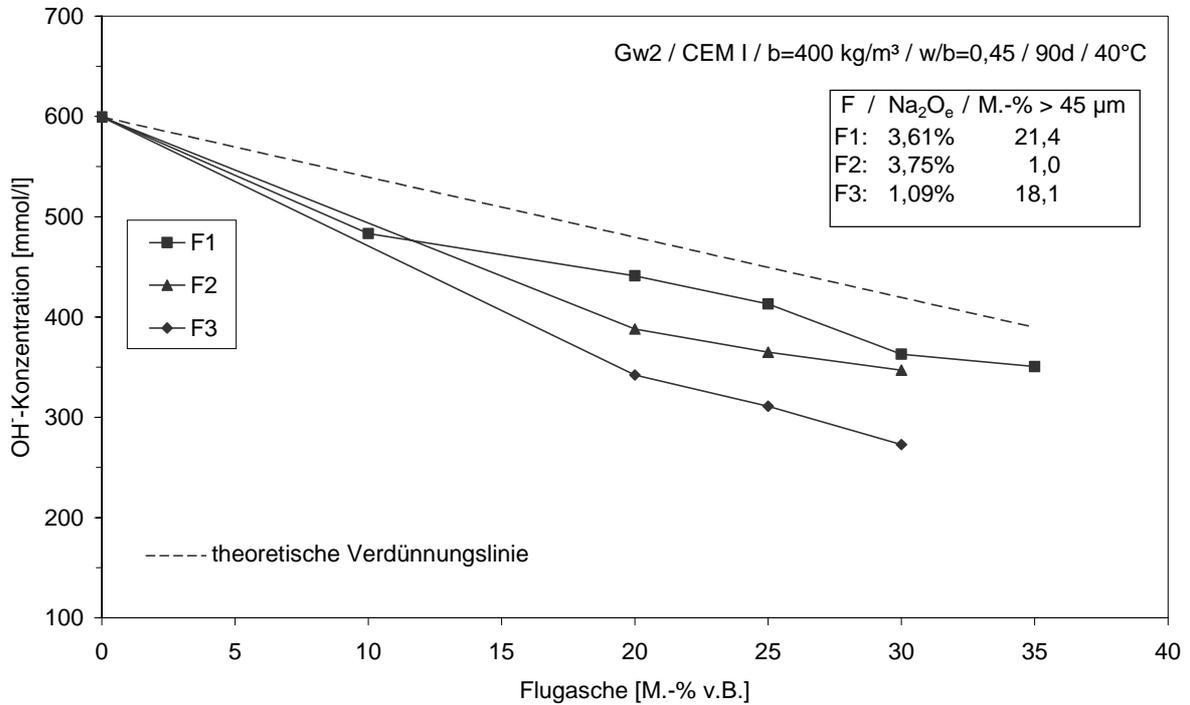


Abbildung 5-29: Einfluss der Flugaschen auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration nach 90d

### Alkaliionenkonzentration:

In Abbildung 5-30 ist der Einfluss der Feinheit und des Alkaligehaltes der Flugaschen auf die Alkaliionenkonzentration der Porenlösung im Alter von 90 Tagen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit abnehmendem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Gehalt der Flugaschen auch die Natriumkonzentration in der Porenlösung sinkt, wobei der Beton mit der feinen Flugasche F2 eine niedrigere Natriumkonzentration aufweist als man im Vergleich zu der Flugasche F1 erwarten könnte.

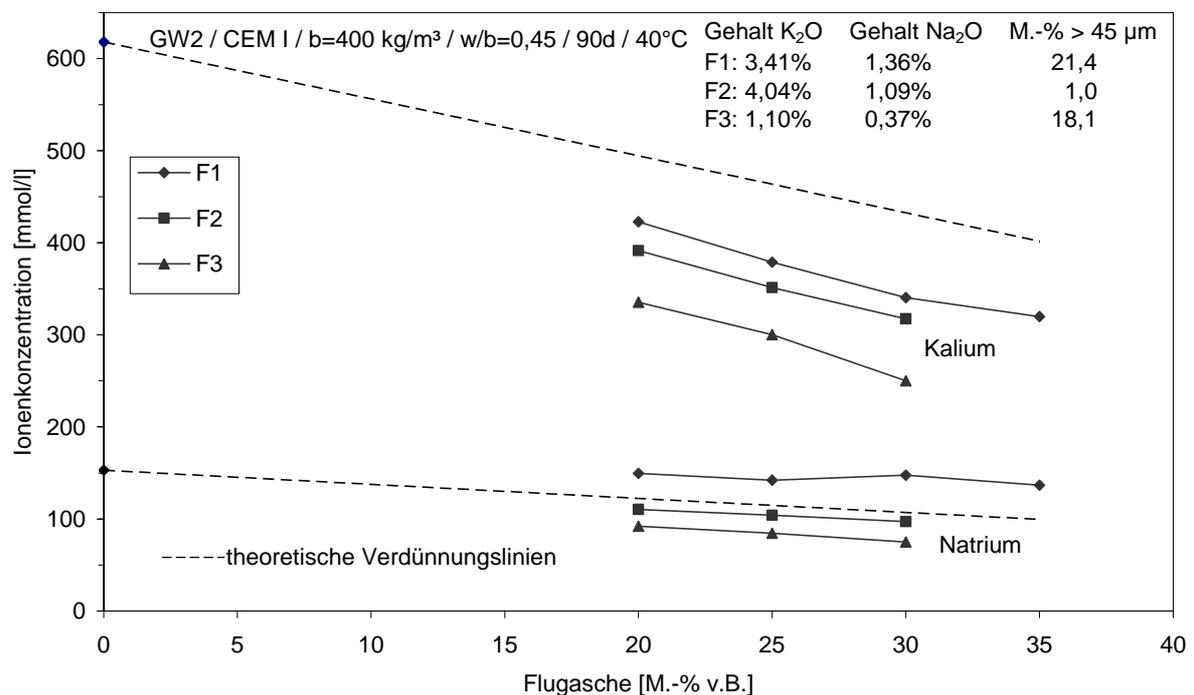


Abbildung 5-30: Einfluss des Flugaschegehaltes auf die Natrium-, Kaliumkonzentration nach 90 Tagen

Das Gleiche gilt für die Kaliumkonzentration. Auch hier weisen nicht die Betone mit der kaliumreichsten, feinen Flugasche F2 die höchsten Kaliumkonzentrationen auf, sondern die Betone mit der groben Flugasche F1 mit dem zweithöchsten Gehalt an  $\text{K}_2\text{O}$ . D.h. bei höherer Feinheit ist hier trotz höherem Kaliumgehalt der Flugasche F2 die Kaliumkonzentration geringer. Dies lässt den Schluss zu, dass durch die stärkere Reaktivität der Flugasche F2 mehr bzw. schneller Natrium und Kalium in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion eingebaut werden als durch eine grobe Flugasche.

Die Betone mit der kaliumarmen Flugasche F3 haben mit Abstand die geringste Kaliumkonzentration in der Porenlösung. Dies zeigt, dass der Alkaligehalt gegenüber der Feinheit der Flugaschen den dominierenden Einfluss auf die Porenlösung hat. Dies deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur [45], bei denen ebenfalls nur ein verhältnismäßig geringer Einfluss der Feinheit der Flugasche auf die Porenlösung festgestellt werden konnte.

Im Vergleich zu der theoretischen Verdünnung wird durch die Flugasche F1 Natrium in einer Größenordnung von rd. 30 mmol/l in die Porenlösung eingebracht. Allerdings ergibt sich in der Gesamtbilanz ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) für die Flugasche F1 weiterhin eine Reduzierung der Alkalien um rd. 60 mmol/l gegenüber der theoretischen Verdünnung. Dies gilt für den gesamten Bereich der hier untersuchten Flugaschegehalte zwischen 20 und 35 M.-%.

Bei allen Flugaschen fällt auf, dass sich mit zunehmender Austauschrate die Natrium- und die Kaliumkonzentrationen unterschiedlich verändern. Während die Natriumkonzentration fast konstant bleibt, nimmt die Kaliumkonzentration mit zunehmendem Flugaschegehalt deutlich ab. So nimmt bei Flugaschegehalten zwischen 20 und 30 M.-% das molare Verhältnis Kalium zu Natrium für die Flugasche F1 um rd. 20 % und für die Flugaschen F2 und F3 um rd. 10 % ab. Dieses Verhalten, das auf eine unterschiedliche Löslichkeit und/oder einen unterschiedlichen Einbau der jeweiligen Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion der Flugasche hinweisen könnte, wurde bereits in früheren Untersuchungen festgestellt [46, 51].

### Einfluss des Zementalkaligehaltes auf den Beitrag der Flugaschen zur Hydroxylionenkonzentration der Porenlösung

Der Beitrag der Flugaschen zur Zusammensetzung der Porenlösung verändert sich in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des Portlandzementklinkers [47]. Für die alkalireiche Flugasche F1 ( $\text{Na}_2\text{O}_e = 3,60 \text{ M.-%}$ ) konnte ein deutlicher Einfluss in der Wirkung in Abhängigkeit vom verwendeten Zement gefunden werden. Abbildung 5-31 zeigt, dass erst ab einem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Zementes von rd. 1,0 M.-% gegenüber der theoretischen Verdünnungslinie eine Verringerung der Hydroxylionenkonzentration stattfindet und somit von einer effektiven Einbindung von Ionen in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion ausgegangen werden kann. Es liegt auf der Hand, dass sich der relativ geringe Beitrag an Hydroxylionen aus der Flugasche von 20 mmol/l bei dem Zement mit niedrigem Alkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}_e = 0,65 \text{ M.-%}$ ) nicht negativ im Sinne einer schädigenden Alkalireaktion im Beton auswirkt, weil ein OH-Niveau von 50 mmol/l unterhalb des Niveaus in der Porenlösung des Betons ohne Flugasche erreicht wird. Dies deckt sich auch mit den Dehnungsergebnissen der Betone Gw5 und Gw5 / F1 30, die während der bisherigen Lagerungszeit von über 9 Monaten keine Anzeichen einer schädigenden Alkalireaktion aufweisen, siehe Anhang 5, Abbildung A5 70.

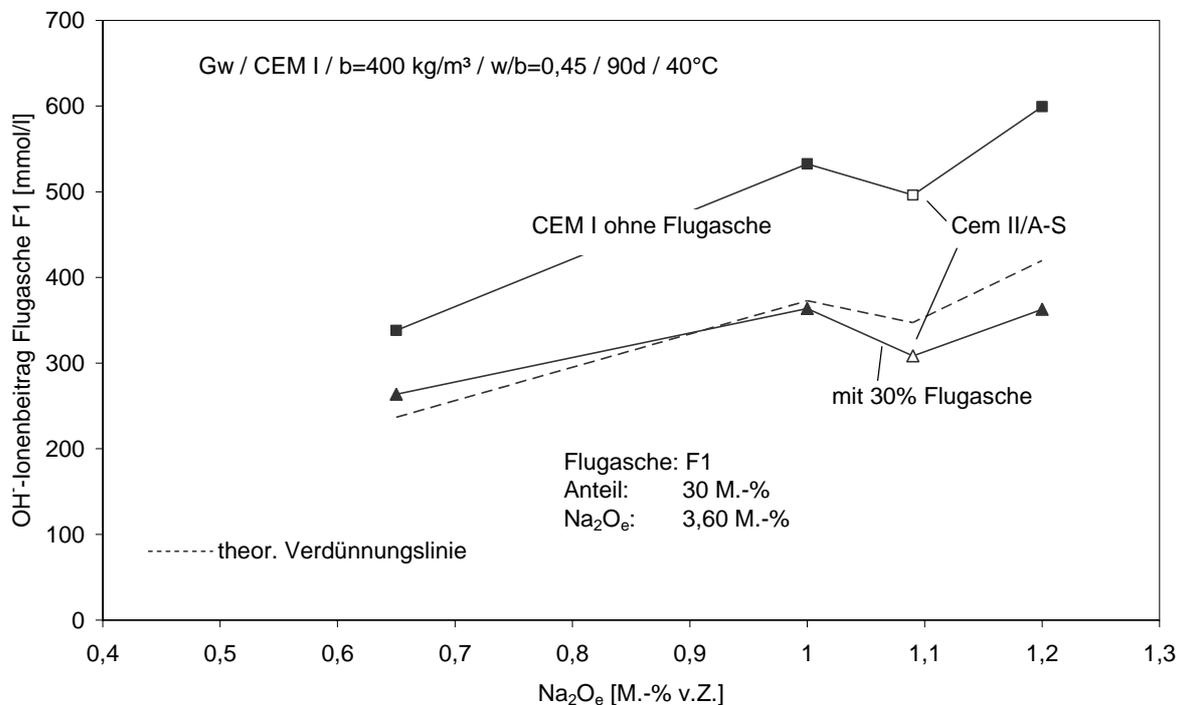


Abbildung 5-31: Beitrag der Flugasche F1 zur OH-Konzentration der Porenlösung in Abhängigkeit vom  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent des Zementes in Bezug zur theoretischen Verdünnungslinie

### Einfluss des Flugaschegehaltes auf die zeitliche Entwicklung der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung

In Abbildung 5-32 ist die zeitliche Entwicklung der OH<sup>-</sup>-Konzentration in der Porenlösung bei verschiedenen Gehalten an Flugasche F1 im Beton dargestellt, als Vergleich dienen die Betone mit den Zementen mit hohem und niedrigem Alkaligehalt. Für die 28-Tage-Werte ist zu erkennen, dass bereits bei 20 M.-% Flugasche die OH<sup>-</sup>-Konzentration deutlich abgesenkt wird. Eine weitere Flugaschezugabe führt erwartungsgemäß zu einer weiteren Senkung der OH<sup>-</sup>-Konzentration, vgl. Abbildung 5-28. Unabhängig vom Gehalt an Flugasche - 20 bis 35 M.-% - wird im Alter von 28 Tagen eine Ausgangskonzentration im Bereich von rd. 350 bis 400 mmol/l erreicht. Diese ist nur bis zu rd. 100 mmol/l höher als für den Zement mit niedrigem Alkaligehalt. Für den Zement mit hohem Alkaligehalt ist zwischen 28 und 365 Tagen eine starke Abnahme der OH<sup>-</sup>-Konzentration von rd. 650 auf rd. 450 mmol/l aufgrund Alkalireaktion im Beton zu erkennen. Auch die flugaschehaltigen Betone und der Beton mit Zement mit niedrigem Alkaligehalt weisen eine leichte Abnahme der Hydroxylionenkonzentration auf. Da die Konzentrationsabnahme der flugaschehaltigen Betone in etwa parallel zu dem Beton mit niedrigem Alkaligehalt verläuft, kann aber davon ausgegangen werden, dass hier kein signifikanter Verbrauch von Hydroxylionen durch Alkalireaktion stattgefunden hat. Vielmehr deutet dies darauf hin, dass unterhalb einer OH<sup>-</sup>-Konzentration von rd. 400 mmol/l, zumindest in Betonen mit Grauwacke als reaktive Gesteinskörnung, keine schädigende Alkalireaktion im Beton mehr stattfindet.

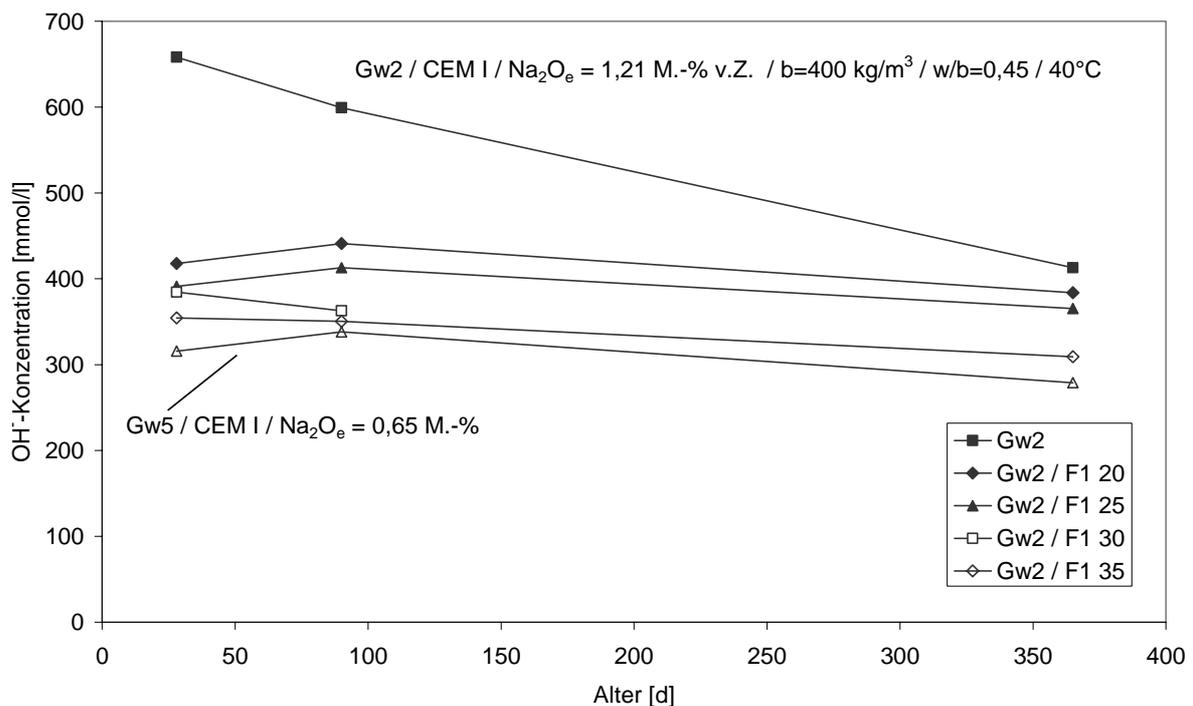


Abbildung 5-32: Einfluss des Flugaschegehaltes auf die zeitliche Entwicklung der OH<sup>-</sup>-Konzentration der Porenlösung

In Abbildung 5-33 wird die zeitliche Entwicklung der Hydroxylionenkonzentration von Betonen mit Zementen unterschiedlichen Alkaligehaltes bei Austausch von 30 M.-% Zement durch die Flugasche F1 dargestellt. Wie schon in Abbildung 5-31 gezeigt, hat der Alkaligehalt der verwendeten Zemente einen Einfluss auf den Beitrag der Flugasche F1 mit einem Alkaligehalt von  $3,6 \text{ kg/m}^3$  zur Zusammensetzung der Porenlösung. So kann zumindest für diese Flugasche im Vergleich zur theoretischen Verdünnungslinie von einer geringfügigen Erhöhung der  $\text{OH}^-$ -Konzentration in Betonen mit Zementen mit niedrigem Alkaligehalt ausgegangen werden, wobei aber auch dann noch eine  $\text{OH}^-$ -Konzentration weit unter dem Niveau des Betons ohne Flugasche erreicht wird. Aus Abbildung 5-33 ist ersichtlich, dass unabhängig vom Grundalkaligehalt der Zemente durch den Austausch von 30 M.-% Zement durch Flugasche F1 eine  $\text{OH}^-$ -Konzentration erreicht wird, die im Bereich des flugaschefreien Betons Gw5 mit Zement mit niedrigem Alkaligehalt liegt. Im Gegensatz zur flugaschefreien Mischung mit hohem Alkaligehalt bei der zwischen 28 und 365 Tagen die  $\text{OH}^-$ -Konzentration durch die Alkali-Kieselsäure-Reaktion stetig abnimmt, kommt es bei keinem dieser Betone zu einem signifikanten Abbau der  $\text{OH}^-$ -Konzentration.

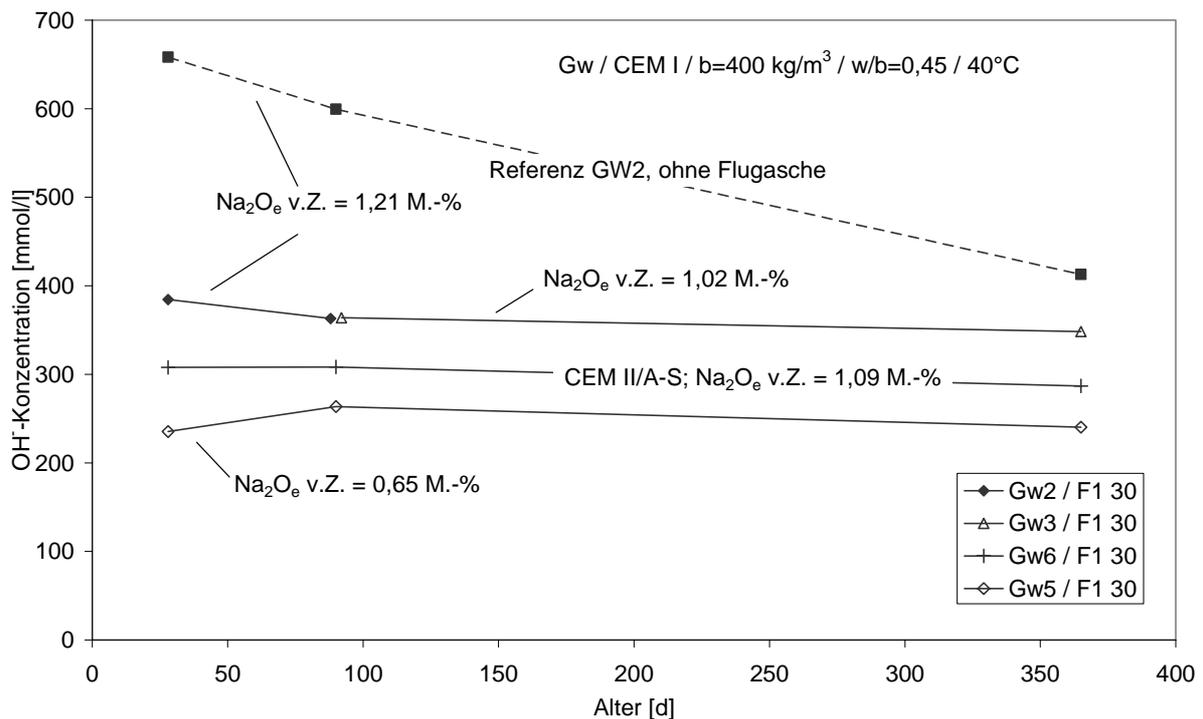


Abbildung 5-33: Einfluss des Zementalkaligehaltes auf die zeitliche Entwicklung der  $\text{OH}^-$ -Konzentration der Porenlösung bei 30 M.-% Flugasche F1 im Bindemittel

### Einfluss der Lagerungstemperatur auf die Entwicklung der Porenlösungszusammensetzung

Im Alter von 90 Tagen wird ebenso wie bei 40°C auch bei 20°C die OH<sup>-</sup>-Konzentration durch Flugaschezugabe unter das Niveau einer reinen Verdünnung abgesenkt, Abbildung 5-34. Dies spricht für eine Einbindung bzw. einen Verbrauch von Hydroxylionen aufgrund der puzzolanischen Reaktion auch bei einer Temperatur von 20°C. Bei 40°C ist die Ausgangshydroxylionenkonzentration bereits deutlich geringer als bei 20°C, d. h. dass bei höheren Temperaturen eine Beschleunigung der Reaktionen zwischen der Porenlösung und dem reaktiven Gestein stattfindet. Auf die Konzentration bei 20°C bezogen ergibt sich für den Beton ohne Flugasche eine Verringerung um rd. 10 % und für die Betone mit 30 % Flugasche F1, F2 bzw. F3 eine Verringerung um rd. 20, 15 bzw. 20 %. Dies deutet auf einen stärkeren Einfluss der Temperatur auf die Reaktionen in den Betonen mit Flugasche als in den Betonen mit reinem Portlandzement hin. Zudem wirkt sich die Temperaturerhöhung im Verhältnis etwas günstiger auf die Flugaschen mittlerer Feinheit als auf die feine Flugasche aus.

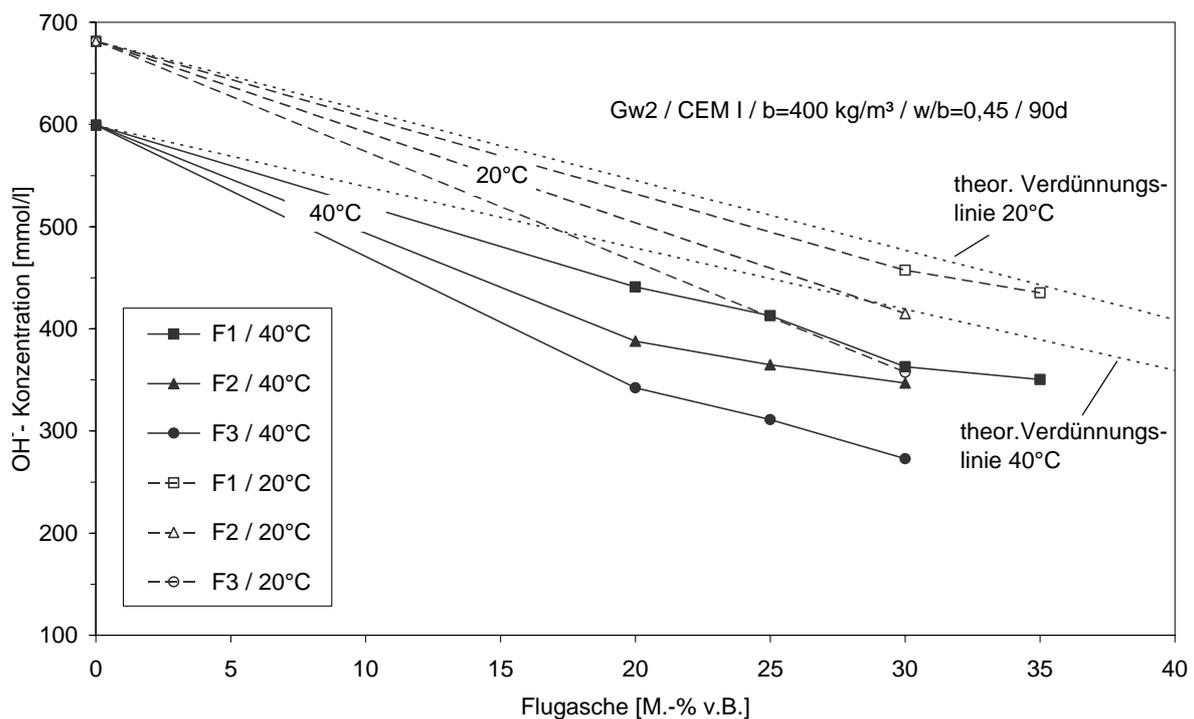


Abbildung 5-34: Einfluss der Flugaschen auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration im Alter von 90d bei 20°C und 40°C

## 5.7 Vergleich der Betonzusatzstoffe

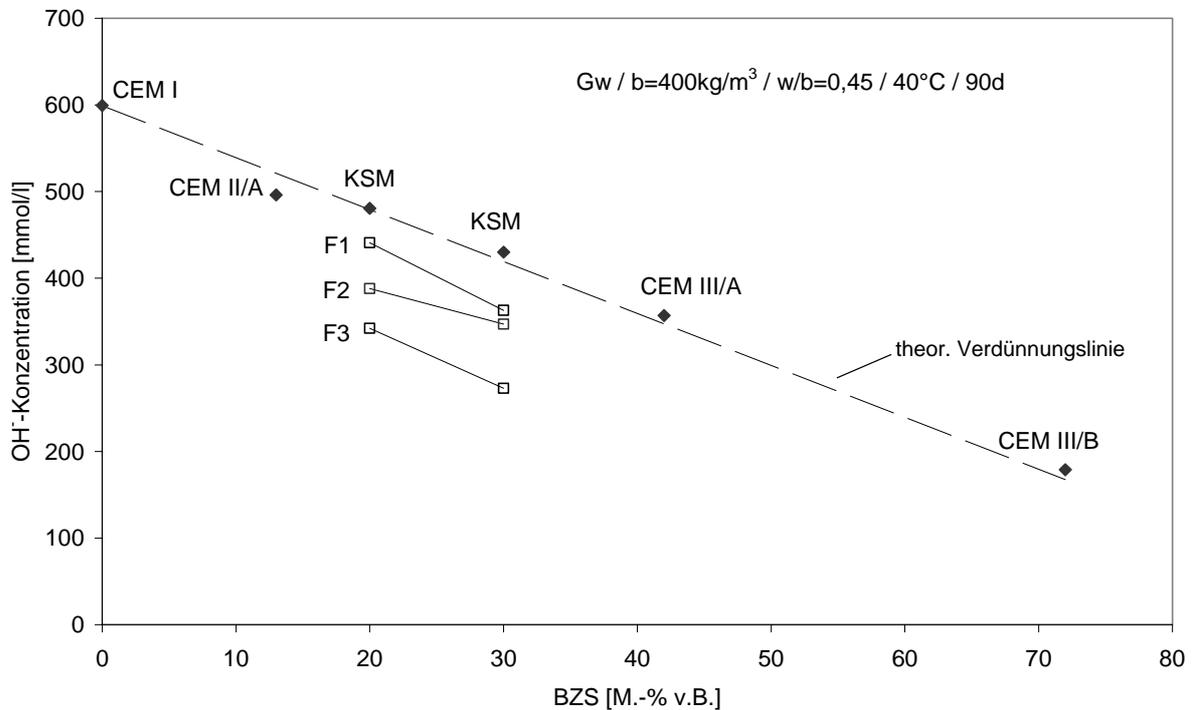


Abbildung 5-35: Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration

In Abbildung 5-35 ist der Einfluss von Art und Menge der Betonzusatzstoffe auf die OH<sup>-</sup>-Konzentration dargestellt. Hier zeigt sich, dass zwei Faktoren für die OH<sup>-</sup>-Konzentration maßgeblich sind, erstens die ausgetauschte Menge an Betonzusatzstoffen und zweitens die Einbindung von Alkalien in Reaktionsprodukte. Bei dem hier verwendeten Hüttensand und Kalksteinmehl führt die ausgetauschte Menge an Zementklinker zu einer proportionalen Absenkung der OH<sup>-</sup>-Konzentration. Nur bei den Flugaschen, insbesondere bei Flugasche F3, ist über den Verdünnungseffekt hinaus eine Abnahme der OH<sup>-</sup>-Konzentration festzustellen. Dies ist offensichtlich auf die Fähigkeit der Flugaschen zurückzuführen, Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion einbauen zu können.

### 5.7.1 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Zusammensetzung der Porenlösung der Betone

#### Portlandzement

1. Der pH-Wert der Porenlösung der hier hergestellten Betone mit Zement mit niedrigem bis hohem Alkaligehalt liegt bis zu einem Alter von 90 Tagen und bei einer Lagerungstemperatur von 40°C in einem Bereich zwischen rd. 13,5 und 13,8, entsprechend einer OH<sup>-</sup>-Konzentration zwischen 330 und 600 mmol/l.
2. Es zeigt sich ein direkter Zusammenhang zwischen dem Alkaligehalt des Zements und der Zusammensetzung der Porenlösung.

#### Gesteinskörnung

1. Vom Verbrauch an Alkalien bzw. einer Senkung der Hydroxylionenkonzentration durch Gesteinskörnungen kann nicht direkt auf eine schädigende AKR im Beton geschlossen werden.
2. Für eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist nicht nur ein hoher pH-Wert entscheidend, sondern in Abhängigkeit von der Gesteinsart ergibt sich auch ein unterschiedlicher Bedarf an Reaktionspartnern (Alkali- / Hydroxylionen) für eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton.

Für die hier untersuchten Betone ohne Zusatzstoffe lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Bei der Grauwacke führen Alkaligehalte von über 4,8 kg/m<sup>3</sup> zu keinem stärkeren Verbrauch an Hydroxylionen und somit offensichtlich zu keiner weiteren Zunahme der Alkali-Kieselsäure-Reaktion mehr.
- Im Bereich eines Alkaliangebots von 4,8 bis 6,1 kg pro m<sup>3</sup> Beton wird von der Gesteinskörnung aus dem Oberrhein die Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung innerhalb eines Jahres durch die AKR auf ein Niveau zwischen 350 und 400 mmol/l gesenkt. Daher findet hier bei einem höheren Alkaliangebot eine verstärkte Alkali-Kieselsäure-Reaktion statt.

## Betonzusatzstoffe

### Kalksteinmehl:

Das Kalksteinmehl führt zu einer Reduzierung der OH<sup>-</sup>-Konzentration in dem selben Maße wie der Zementklinker durch das Kalksteinmehl ausgetauscht wird. Das Kalksteinmehl hat demnach keinen Einfluss auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion.

### Hüttensand:

Der hier verwendete Hüttensand führt in dem alkalireichen Portlandzement mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,21 M.-% bei einem Austausch von 13, 42 und 72 M.-% im Wesentlichen zu einer Verdünnung der Porenlösung. Bei einer getrennten Betrachtung der Natrium-, Kalium- und OH<sup>-</sup>-Konzentrationen kann festgestellt werden, dass durch den Hüttensand die Natriumkonzentration geringfügig erhöht wird, während die Kalium- und OH<sup>-</sup>-Konzentrationen geringfügig abnehmen. Insgesamt kann der Hüttensand als inert hinsichtlich Alkalibindung eingestuft werden.

### Flugasche:

Die untersuchten Flugaschen führen zu einer Verringerung der Alkalien- und Hydroxylionenkonzentration über einen reinen Verdünnungseffekt hinaus. Somit kann bei den Flugaschen von einer aktiven Einbindung von Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion ausgegangen werden.

Es zeigt sich ein unterschiedlicher Einfluss der Feinheit und des Alkaligehaltes der Flugaschen auf die Alkali- und Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung.

Die höhere Feinheit der Flugasche F2 führt bei anfänglich in etwa gleichen Werten mit zunehmender Hydratationsdauer zu geringeren Alkali- und Hydroxylionenkonzentrationen in der Porenlösung als die entsprechende Flugasche F1 mit ähnlichem Alkaligehalt aber mittlerer Feinheit. Dies ist offensichtlich auf die höhere Reaktionsgeschwindigkeit der feineren Flugasche zurückzuführen.

Einen deutlichen sofortigen Einfluss zeigt der Alkaligehalt der Flugaschen. So bewirkt bei einer Austauschrate von 30 M.-% die alkaliarme Flugasche F3 gegenüber den alkalireicheren Flugaschen F1 und F2 im Alter von 28 Tagen eine Absenkung der Hydroxylionenkonzentration von rd. 35 % gegenüber der theoretischen Verdünnung, während durch die alkalireichen Flugaschen die Konzentration nur um rd. 20 % verringert wird.

In den hier untersuchten Austauschraten zwischen 20 und 35 M.-% Flugasche wird bei höheren Flugaschegehalten tendenziell eine verhältnismäßig etwas geringere Absenkung der Hydroxylionenkonzentration als bei 20 M.-% bewirkt.

Der Alkaligehalt des Zementes wirkt sich auf den Einfluss der Flugasche F1 hinsichtlich der Porenlösungszusammensetzung aus. Während bei den alkalireichen Zementen eine Zugabe von Flugasche F1 zu Konzentrationen unterhalb einer theoretischen Verdünnung führt, wird dies bei dem Zement mit niedrigem Alkaligehalt knapp nicht mehr erreicht. Allerdings bleiben die Konzentrationen weiterhin im Bereich einer reinen Verdünnung, so dass nicht von einem effektiven Beitrag der Flugasche zur Porenlösungszusammensetzung ausgegangen werden kann.

### **Zeitliche Entwicklung**

Wenn hohe Anfangskonzentrationen in der Porenlösung vorliegen, dann werden diese verhältnismäßig schnell durch Reaktionen mit der Gesteinskörnung und/oder den reaktiven Betonzusatzstoffen abgebaut. Bei niedrigen Anfangskonzentrationen sind nur mehr geringe Änderungen in der Porenlösung über die Zeit festzustellen. Dies dürfte auf das geringere Angriffspotential gegenüber den Gesteinskörnungen und den reaktiven Betonzusatzstoffen zurückzuführen sein.

### **Temperatureinfluss**

Auch bei einer Lagerungstemperatur von 20°C findet eine über die reine Verdünnung hinausgehende Verringerung der Hydroxylionenkonzentration in der Porenlösung statt.

### **Fazit**

Bei den Betonzusatzstoffen führen im Wesentlichen zwei Faktoren zu einer Verringerung der Alkalikonzentration in der Porenlösung. Zum einen die reine Verdünnung durch Austausch des Zementklinkers durch einen geeigneten Betonzusatzstoff mit niedrigem oder nicht löslichem Alkaligehalt, zum anderen durch Bindung von Alkalien durch reaktive Betonzusatzstoffe, wie die Flugaschen, wobei die Effektivität der Einbindung durch den Alkaligehalt im Zement beeinflusst wird. Bei Flugaschen überlagern sich die Effekte der reinen Verdünnung und der Einbindung der Alkalien in die Hydratationsprodukte der puzzolanischen Reaktion. Dabei wird das Bindungsvermögen der Flugasche durch einen niedrigen Alkaligehalt und eine hohe Feinheit der Flugasche verstärkt.

## 5.8 Gegenüberstellung Porenlösung – Schädigung des Betons

Für die Betone mit Grauwacke wurde eine Gegenüberstellung des Verhaltens bei Nebelkammerlagerung nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie und der Hydroxylionenkonzentration der Porenlösung nach 28 Tagen Lagerung bei 40°C vorgenommen, siehe Abbildung 5-36. Die Betone mit Portlandzement mit  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalenten von 1,0 bis 1,2 M.-% und Zementgehalten zwischen 400 und 500  $\text{kg}/\text{m}^3$  weisen mit Hydroxylionenkonzentrationen zwischen 500 und 650  $\text{mmol}/\text{l}$  bereits nach spätestens 4 Monaten Lagerungsdauer eine Schädigung - Dehnung und/oder Rissbildung - auf. Es ist auffällig, dass durch den Austausch von Zement durch die Betonzusatzstoffe Kalksteinmehl und Hüttensand eine Verzögerung der schädigenden Alkalireaktion um 2 bis 4 Monate erzielt wurde, wenn  $\text{OH}^-$ -Konzentrationen erreicht wurden, die mit rd. 500 bis 550  $\text{mmol}/\text{l}$  zumindest im unteren Bereich der Portlandzementbetone liegen. Eine Verringerung auf rd. 450  $\text{mmol}/\text{l}$  führte in dem Beton Gw2 mit 30 M.-% Kalksteinmehl im Bindemittel erst nach rd. 12 Monaten zu einer äußeren Schädigung. Für den Beton Gw1 mit einem Bindemittelgehalt von 500  $\text{kg}/\text{m}^3$  und 20 M.-% Flugasche F1 tritt bei dieser Konzentration erst nach rd. 15 Monaten eine beginnende Schädigung auf, die aber zur Zeit noch unterhalb der Grenzwerte nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, liegt. Die starke Verzögerung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton ist somit nicht allein durch eine Veränderung der Porenlösungszusammensetzung zu erklären, sondern es müssen auch Effekte der Betonzusatzstoffe auf die Porosität (Transport) und die mechanischen Eigenschaften (Duktilität) der Betone berücksichtigt werden.

Für die in dieser Arbeit verwendete Grauwacke ist unterhalb eines  $\text{OH}^-$ -Niveaus von rd. 400  $\text{mmol}/\text{l}$  nicht mehr von einer schädigenden Alkalireaktion im Beton auszugehen, so dass unabhängig vom Alkaligehalt der Zemente und vom Gesamtbindemittelgehalt - bei den hier verwendeten Betonen zwischen 400 und 500  $\text{kg}/\text{m}^3$  - zumindest ab einer Austauschrate der Flugasche von 25 M.-% v.B. eine schädigende AKR sicher ausgeschlossen werden kann.

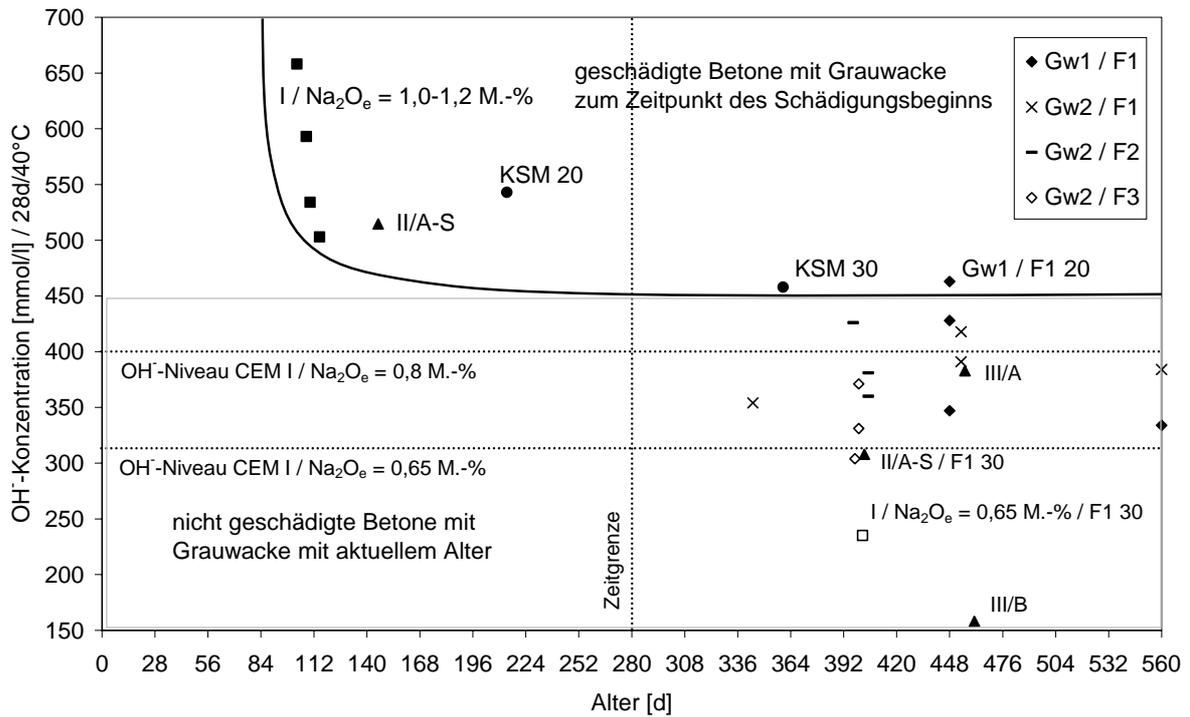


Abbildung 5-36: Gegenüberstellung OH<sup>-</sup>-Konzentration nach 28 Tagen und Beginn einer Schädigung der Betone mit Grauwacke durch Alkalireaktion

## 5.9 Einfluss der Flugasche auf die Porengrößenverteilung in den Betonen

Exemplarisch wurde der Einfluss der Flugaschen F1 und F2 und des als Inertstoff verwendeten Kalksteinmehls auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 mit  $400 \text{ kg/m}^3$  Bindemittel und einem w/b-Wert von 0,45 untersucht. Die Flugasche F2 unterscheidet sich von der Flugasche F1 durch ihre hohe Feinheit - rd. 1 gegenüber 21 M.-%  $> 45 \mu\text{m}$  - und durch einen größeren Aktivitätsindex im Alter von 90 Tagen - 114 gegenüber 98 % - deutlich. Bei etwa gleichen amorphen Anteilen - rd. 80 % - lassen die höhere Feinheit und der größere Aktivitätsindex auf eine stärkere puzzolanische Reaktion der Flugasche F1 schließen. Es wurde davon ausgegangen, dass durch die Auswahl dieser beiden Flugaschen die Bandbreite der Einflüsse auf die Porengrößenverteilung im Zementstein des Betons durch Flugasche weitestgehend abgedeckt werden kann.

Bei der Beurteilung der Messergebnisse muss beachtet werden, dass zum einen isolierte Poren nicht erfasst und zum anderen, durch den so genannten „Flaschenhals“-Effekt, große Poren viel kleineren Zugangsöffnungen zugeordnet werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass durch diese Fehlerquellen eine zu niedrige Porosität der Probe gemessen, bzw. das Porenvolumen größerer Poren unterschätzt wird, nimmt mit abnehmender Vernetzung der Poren, also mit sinkendem w/z-Wert, zunehmendem Hydratationsgrad und steigender Probengröße zu [48]. Zudem ist zu beachten, dass mit der Quecksilberdruckporosimetrie Porendurchmesser  $< 0,003 \mu\text{m}$  nicht mehr erfasst werden können. So kann in flugaschehaltigen Mischungen eine evtl. Erhöhung der Gesamtporosität, die auf einen größeren Feinstporenanteil  $< 0,003 \mu\text{m}$  zurückzuführen wäre, nicht mehr ermittelt werden.

Durch die Verwendung von Betonproben wird im Gegensatz zu reinen Zementsteinproben durch die Gesteinskörner selbst, bzw. durch die erhöhte Porosität in der Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Zementstein die Porenverteilung beeinflusst. Aus diesen Gründen erscheint es sinnvoll, nur in grober Abschätzung absolute Aussagen über Porenvolumen zu treffen, auch wenn durch die Verwendung verhältnismäßig großer Probenmengen die Streuungen der Messergebnisse gering gehalten werden, siehe Abbildung 4-2. Die Quecksilberdruckporosimetrie wird daher vor allem zum Vergleich der differentiellen Porengrößenverteilungen der verschiedenen Betone verwendet.

In der nachfolgenden Auswertung der Messergebnisse werden Poren mit einem Durchmesser  $< 0,06 \mu\text{m}$  nach Setzer [49] als Gelporen definiert.

In Abbildung 5-37 ist der Einfluss der verschiedenen Betonzusatzstoffe auf die Porenverteilung im Beton nach 90 Tagen Lagerung bei  $40^\circ\text{C}$  im Vergleich zur Mischung ohne Zusatzstoff zu erkennen. Generell weisen die Betone mit Zusatzstoffen im Gelporenbereich neben einem Peak bei rd.  $0,03 \mu\text{m}$  einen zweiten bei rd.  $0,01 \mu\text{m}$  Porendurchmesser auf. Da die Kalksteinmischung ebenso wie die Flugaschemischungen den

Feinstporenanteil im Bereich von  $0,01\ \mu\text{m}$  erhöht, kann generell von einer verstärkten Hydratation des Zements und damit einhergehenden Verfeinerung des Porenraums durch einen Kondensationskeimeffekt der feinen Zusatzstoffe ausgegangen werden. Dies ist für die Mischungen mit Kalkstein und Flugasche F1 sehr ausgeprägt, während die Flugasche F2 eher eine kontinuierliche Verteilung der Poren in diesem Bereich aufweist. Dies deutet auf eine gleichmäßige Verfeinerung der Porensystemes in diesem Bereich als eine Auswirkung der stärkeren puzzolanischen Reaktion der Flugasche F2 im Alter von 90 Tagen hin. Belegt wird diese Vermutung durch den Vergleich mit der Porengrößenverteilung des Betons mit Flugasche F1 nach 365 Tagen, siehe Abbildung 5-38. Dort ist zu erkennen, dass sich auch für die Flugasche F1 bei längerer Reaktionsdauer eine gleichmäßigere Verteilung hin zu feineren Gelporen einstellt.

Unabhängig von der Feinheit der verwendeten Flugasche wird im Vergleich zur reinen Zementmischung das Verhältnis der Gelporenanteile ( $\varnothing < 0,06\ \mu\text{m}$ ) zum Porenanteil mit einem Durchmesser  $< 10\ \mu\text{m}$  um etwa 10 % von rd. 80 % auf 90 % erhöht, während das Kalksteinmehl eine Verschiebung der Porenverhältnisse um nur rd. 5 % bewirkt.

Sowohl die Betone mit reinem Zement als auch diejenigen mit Flugasche im Bindemittel weisen eine in etwa gleich bleibende Porosität von rd. 12 % im Porenbereich  $> 0,003\ \mu\text{m}$  auf. Der Austausch von Zement durch 30 % Kalksteinmehl führt auf Grund der Erhöhung des w/z-Werts von 0,45 auf 0,64 im Gegensatz zu den übrigen Mischungen zu einer deutlichen Verschiebung der Porenverteilung hin zu gröbereren Poren und einer Erhöhung der Porosität im Porenbereich  $> 0,003\ \mu\text{m}$  von rd. 12 % auf 16 %, siehe Abbildung 5-37 und Tabelle 5-12. Dies ist auf das rein inerte Verhalten des Kalksteinmehls zurückzuführen.

Mit steigender Austauschrate von Zement durch Flugasche zeigt sich erwartungsgemäß eine zunehmende Verfeinerung der Porengrößenverteilung, siehe Abbildung 5-39. Dies deckt sich mit den Ausführungen in Heft 448 des DAfStb „Veränderung des Porengefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften“ [50] und den Ergebnissen des Forschungsberichts „Alkalibindung in flugaschehaltigen Bindemitteln [51].

Die Erhöhung der Lagerungstemperatur führt sowohl in der reinen Zementmischung als auch in der flugaschehaltigen Mischung zu einer leichten Erhöhung der Porenanteile mit einem Durchmesser von rd.  $0,01\ \mu\text{m}$ , siehe Abbildung 5-40. Es kann kein signifikanter Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Porosität und den Mediandurchmesser festgestellt werden.

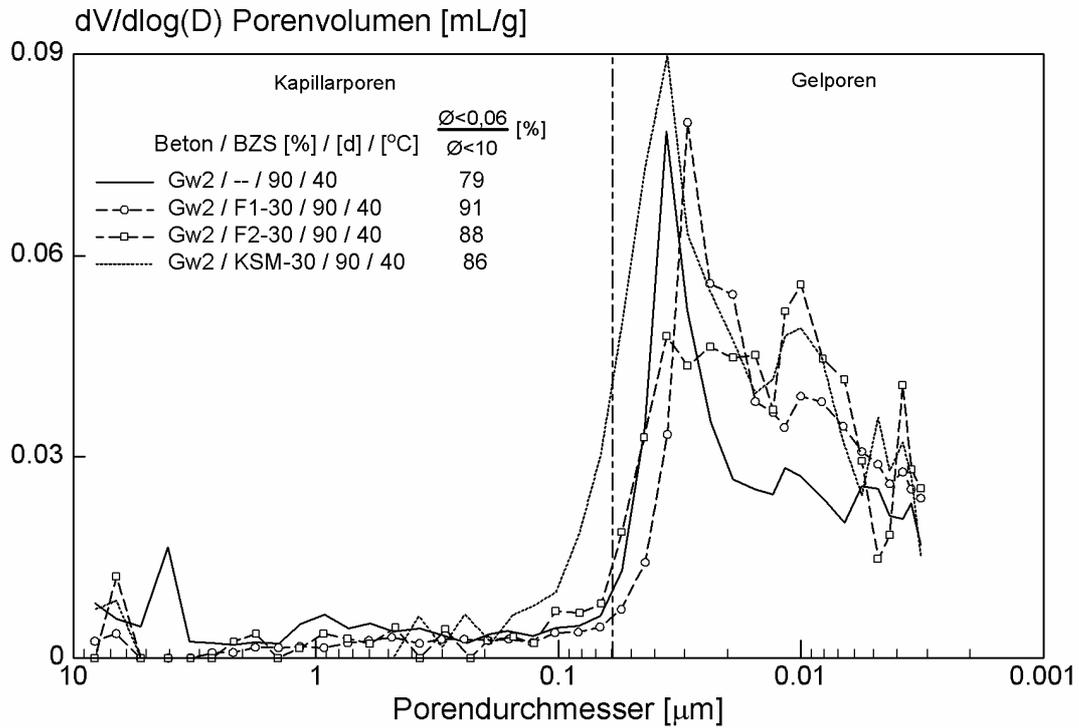


Abbildung 5-37: Einfluss der Zusatzstoffart auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 90d, Lagerung bei 40°C

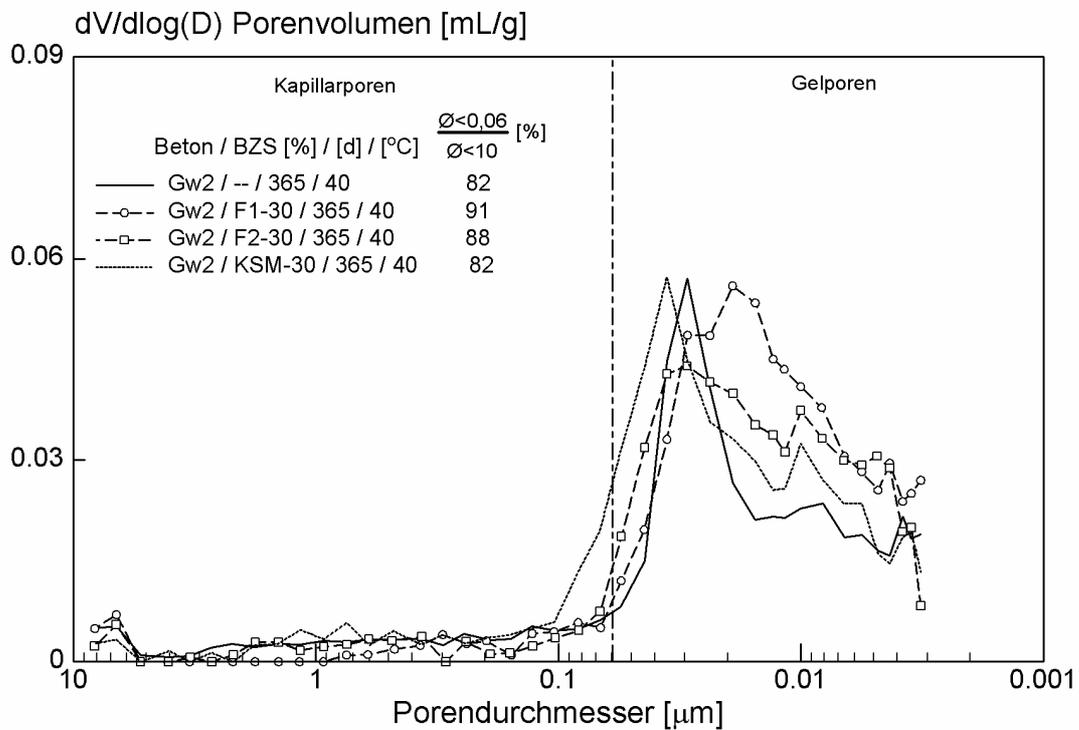


Abbildung 5-38: Einfluss der Betonzusatzstoffe auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 365d Lagerung bei 40°C

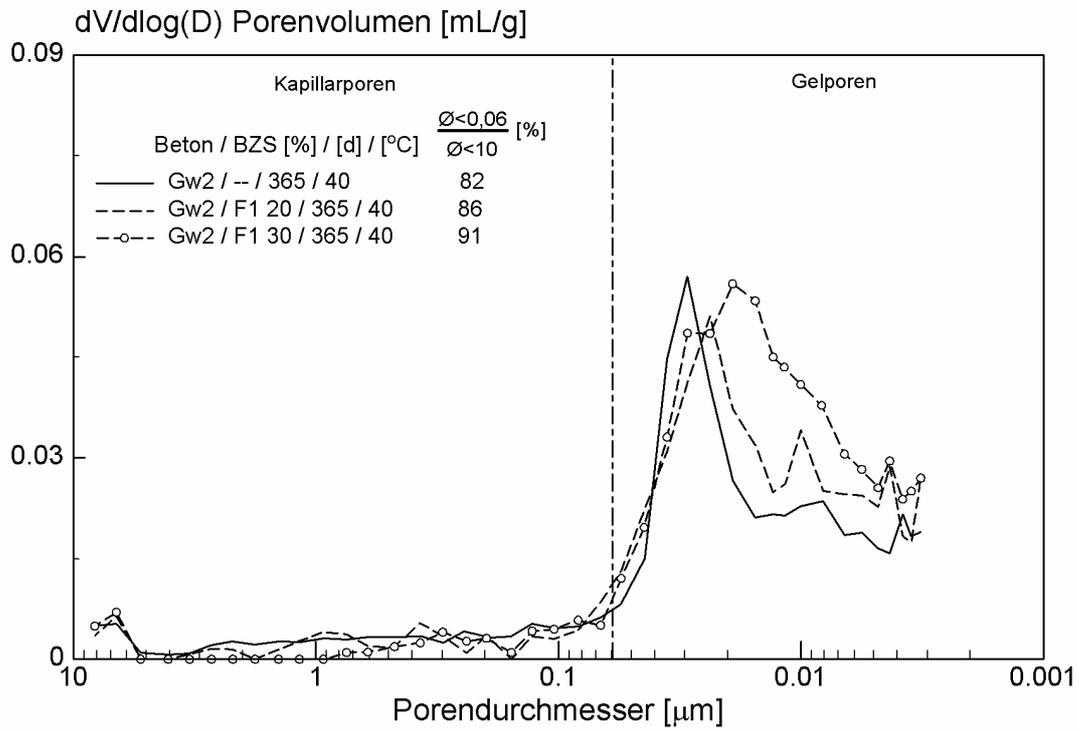


Abbildung 5-39: Einfluss des Flugaschegehalts auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 365d, Lagerung bei 40°C

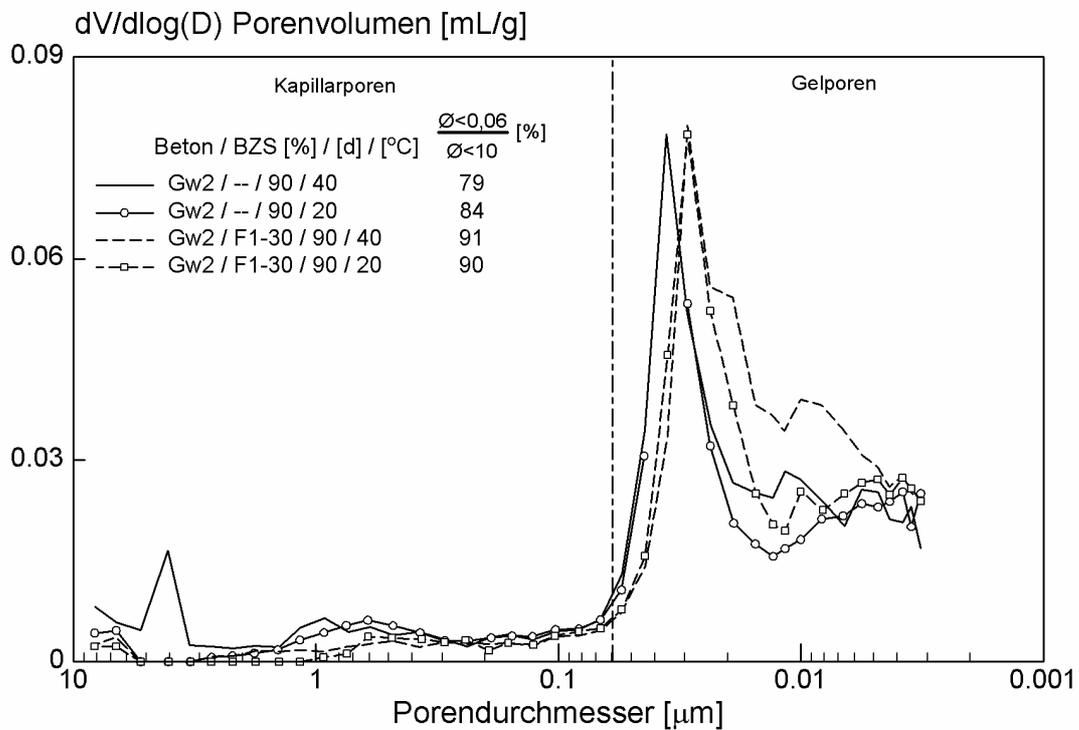


Abbildung 5-40: Einfluss der Temperatur auf die Porengrößenverteilung des Betons Gw2 nach 90d, Lagerung bei 40°C und 20°C

Tabelle 5-12: Charakteristische Kenngrößen der Porengrößenverteilungsanalyse an den Betonen

Beton/BZS [%]/d/°C	Median-Ø	Porosität Ø>0,003µm	Kapillar porosität Ø>0,06µm	Verhältnis Ø $\frac{< 0,06\mu m}{< 10\mu m}$
--	µm	%	%	%
1	3	4	5	6
Gw2/--/90/40	0,032	12,2	3,7	78,8
Gw2/F1-30/90/40	0,020	12,9	2,3	90,6
Gw2/F2-30/90/40	0,019	11,4	2,1	88,2
Gw2/KSM-30/90/40	0,029	16,4	3,5	86,3
Gw2/--/365/40	0,028	10,9	3,3	82,1
Gw2/F1-30/365/40	0,018	12,6	2,0	90,9
Gw2/F2-30/365/40	0,021	12,0	2,2	88,5
Gw2/KSM-30/365/40	0,029	12,4	3,0	81,8
Gw2/F1-20/365/40	0,023	11,6	2,7	86,3
Gw2/--/90/20	0,033	11,8	3,2	83,7
Gw2/F1-30/90/20	0,023	11,0	1,8	90,4

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Möglichkeit der Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen bei Einsatz von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff untersucht. Wesentliches Ziel war die Überprüfung der Möglichkeit des Einsatzes von Flugasche als Betonzusatzstoff in Betonen mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen, der über die in Alkali-Richtlinie, Teil 2, beschriebenen Anwendungsgrenzen hinausgeht. Dies bedeutet zum einen eine Überprüfung der „1/6-tel-Regelung“ bei der Berücksichtigung des Alkaligehaltes der Flugaschen und zum anderen die Überprüfung der Möglichkeit, flugaschehaltige Bindemittelkombinationen entsprechend derzeitiger NA-Zemente einsetzen zu können. Diese in mehreren internationalen Regelwerken [18, 19] bereits eingeführte Vorgehensweise wurde für die in Deutschland typischen alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen - Kiese mit Opalsandstein/Flint, Grauwacken und Material aus dem Oberrheingraben - nachgeprüft.

Zur Klärung dieser Fragestellung wurden Betone untersucht, bei denen ein massebezogener Austausch von Zement durch Flugaschen mit unterschiedlicher Feinheit und mit unterschiedlichem Alkaligehalt erfolgte. Als Vergleich wurden hüttensandhaltige Zemente und als weiterer Betonzusatzstoff Kalksteinmehl verwendet. Die Betone wurden in Anlehnung an das in der Alkali-Richtlinie, Teil 3, beschriebene Prüfverfahren in der Nebelkammer bei 40°C und 100 % r.F. und in der Außenlagerung geprüft. Zusätzlich erfolgte eine Analyse der Porenlösungszusammensetzung und stichpunktartig die Bestimmung der Porengrößenverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie.

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Flugasche vereint die Möglichkeiten zur Vermeidung einer schädigenden Alkalireaktion im Beton: Erhöhung der Dichtigkeit des Betongefüges, Verdünnungseffekt durch Zementaustausch und Einbindung von Alkalien, bzw. Verbrauch von Hydroxylionen bei der puzzolanischen Reaktion. Die Verringerung der Alkalität der Porenlösung nimmt mit zunehmender Feinheit und einer Abnahme des Alkaligehaltes der Flugasche zu.
- Zwar ist ein Einfluss der Feinheit und des Alkaligehaltes der Flugaschen und des Alkaligehaltes der Zemente auf die Porenlösungszusammensetzung erkennbar, dennoch kann für die hier untersuchten Zementaustauschraten bzw. Flugaschegehalte im Bindemittel von 20 M.-% in keinem Fall davon ausgegangen werden, dass die Alkalien in der Flugasche im Sinne der Alkalirichtlinie wirksam werden. Selbst bei der Verwendung eines NA-Zementes zeigte sich keine messbare Alkalifreisetzung der Flugasche.

- Eine hohe Feinheit und ein niedriger Alkaligehalt wirken sich verstärkend auf die Fähigkeit der Flugaschen aus, eine Alkalireaktion im Beton zu vermeiden. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass Flugaschen entsprechend DIN EN 450 [6] auf jeden Fall eine ausreichend hohe Wirksamkeit hinsichtlich der Vermeidung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion aufweisen. Eine Anpassung der auszutauschenden Mengen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Flugaschen, wie zum Beispiel in der kanadischen Anwendungsregel A23.2-27A, vgl. Punkt 2.6, ist daher nicht nötig.
- Die Gesteinskörnungen zeigen ein unterschiedliches Verhalten bei Änderung des Alkaligehaltes im Beton.

Für die Betone mit Opalsandstein/Flint zeigt sich ein starker Einfluss des Alkaligehaltes auf das Ausmaß der Schädigung. Unter 3,8 kg Alkalien pro m<sup>3</sup> Beton zeigen diese Gesteinskörnungen keine schädigende Alkalireaktion mehr.

Die Betone mit Grauwacke weisen im Bereich zwischen 4,1 und 6,1 kg/m<sup>3</sup> einen ähnlichen Schadensverlauf auf und es findet erst bei einem Alkaligehalt unter 3,0 kg/m<sup>3</sup> keine schädigende Alkalireaktion mehr statt.

Bei sehr hohen Alkaligehalten aus Portlandzement (6,1 kg/m<sup>3</sup>) zeigt der Kies aus dem Oberrhein eine schädigende Alkalireaktion, wohingegen bei einer Prüfung nach Alkali-Richtlinie, Teil 3, mit 4,8 kg/m<sup>3</sup> keine Schädigung aus Alkalireaktion mehr zu erkennen ist.

- Selbst bei den zum Teil extrem hohen Zement- und Alkaligehalten in den hier verwendeten Betonen treten keine schädigenden Alkalireaktionen im Beton auf bei einem Austausch von Zement durch Flugasche in Höhe von mindestens 15 M.-% bei Opalsandstein/Flint, 25 M.-% bei Grauwacke und 20 M.-% bei Kies bzw. Kies-Edelsplitt Oberrhein.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es durch den Austausch von Zement durch Flugasche möglich ist, Betone mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen herzustellen, ohne dass es zu einer schädigenden Alkalireaktion im Beton kommt. Da der Einsatz von Flugasche in keinem Fall zu einer Verstärkung der Alkalireaktion im Beton führte erscheint es gerechtfertigt, die in der Alkali-Richtlinie enthaltene „1/6-tel Regelung“ für Flugaschen bei Einhaltung der ansonsten bestehenden vorbeugenden Maßnahmen aufzugeben und die Alkaligehalte der Flugasche bei der Aufstellung einer Alkalibilanz unberücksichtigt zu lassen. Weiterhin eröffnet sich aus Sicht der in dieser Arbeit erhaltenen Ergebnisse die Möglichkeit, flugaschehaltige Bindemittelkombinationen, bei Einhaltung eines Mindestgehaltes an Flugasche von 15 bis 25 M.-%, entsprechend der Verwendung von derzeit genormten NA-Zementen in Beton einzusetzen.

## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] E. Siebel, H.-M. Sylla, J. Bokern: Einfluss von puzzolanischen Betonzusatzstoffen auf die Vermeidung einer schädigenden AKR, *ibausil 2000*, Band 1, S. 959-967
- [2] 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
- [3] Thomas, M. D. A.: Field studies of fly ash concrete structures containing reactive aggregates, *Mag. of Conc. Res.*, 1996, 48, No. 177, Dec., pp. 265-279
- [4] Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) bei Straßenbeton, Abstimmungsgespräch am 27.10.2004, Weimar
- [5] Tätigkeitsbericht der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Bautechnik, 2003
- [6] DIN EN 450-1:2005. Flugasche für Beton - Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien
- [7] Hårdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung der Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, 1995, Heft 448
- [8] Feldman, R. F., Cheng-yi, H.: Properties of portland cement-silica fume pastes, I. Porosity and surface properties, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, pp. 765-774, 1985
- [9] Locher, Ch.: Zum Einfluss verschiedener Zuschlagstoffe auf das Gefüge von erhärtendem Zementstein in Mörteln und Betonen; Dissertation, RWTH Aachen (1988)
- [10] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali - Richtlinie): Teil 1: Allgemeines; Teil 2: Betonzuschlag mit Opalsandstein und Flint; Teil 3: Betonzuschlag aus präkambrischer Grauwacke oder anderen alkaliempfindlichen Gesteinen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStb (Hrsg.) – Berlin: Beuth, 2001. (DAfStb – Richtlinie)
- [11] Diamond, S.: Effects of two Danish fly ashes on alkali contents of pore solutions of cement – fly ash pastes. *Cement and Concrete Research* 11 (1981), pp. 383 - 394
- [12] Schäfer, E., Meng, B.: Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion. *Beton* 51 (2001), H. 10, S. 577 - 584
- [13] Hobbs, D. W.: Deleterious expansion of concrete due to alkali-silica reaction: influence of fly ash and slag. *Mag. Concr. Res.*, 1986, 38, No. 137, pp. 191-205

- 
- [14] Kollek, J. J.: Effective Alkalis from Pulverised Fuel Ash, Granulated Blast Furnace Slag and Natural Pozzolana Deduced from Mortar Bar Expansion Results, Trondheim Conference, 1989, SP 114-17, pp. 373-401
- [15] Thomas, M. D. A.; Blackwell, B. Q.; Nixon, P. J.: Estimating the alkali contribution from fly ash to expansion due to alkali-aggregate reaction in concrete, Mag. of Conc. Res., 1996, 48, No. 177, Dec., pp. 251-264
- [16] Thomas, M. D. A.: Review of the effect of fly ash and slag on alkali-aggregate reaction in concrete, Building Research Establishment, 1996, ISBN 1860810926
- [17] DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie); Teil 1: Allgemeines, Ausgabe Mai 2001
- [18] CSA Standard A23.2-27A: Standard Practice to Identify Degree of Alkali-Reactivity of Aggregates and to Identify Measures to Avoid Deleterious Expansion in Concrete, September 2000
- [19] CUR – Aanbeveling 89: Maatregelen ter voorkoming van betonschade door alkali-silicareactie (ASR), June 2002
- [20] Concrete Society Technical Report No. 30, Third Edition: Alkali-Silica-Reaction: Minimising the Risk of Damage to Concrete, Guidance notes and model clauses for specifications, 1999
- [21] Locher, F. W.; Sprung S.: Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton, ZKG International Nr. 4, 1975; S. 162-169
- [22] C. Zhang et al.: Influence of Dimension of Test Specimen on Alkali Aggregate Reactive Expansion, ACI Materials Journal, March-April 1999
- [23] S. Sprung, H.-M. Sylla: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit und Wasseraufnahme von Betonzuschlagsstoffen, ZKG International Nr. 2, 1997
- [24] S. Sprung, H.-M. Sylla: Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen, ZKG International Nr. 6, 1998
- [25] CSA 2000: Appendix B – Alkali-aggregate reaction. CSA A23.2-27A – concrete materials and methods of concrete construction. Canadian Standards Association, Toronto, Ont.
- [26] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Portlandhüttenzement CEM II/B-S mit einem höheren  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent als nach DIN 1164-1/A1 als ein NA-Zement für die Verwendung gemäß Alkali-Richtlinie, Teil 2, Entwurfssfassung November 1998

- 
- [27] DIN EN 196-1:1995-05. Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsche Fassung EN 196-1: 1994
- [28] DIN 1048-1: 1991-06. Prüfverfahren für Beton; Frischbeton
- [29] DIN 1048-5: 1991-06. Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [30] DAfStb-Richtlinie: „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie); Mai 2001
- [31] O. Philipp, K. Eifert: Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung, BFT 10/2004
- [32] N. Bunke: Heft 422 des DAfStb, Prüfung von Beton; Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1991
- [33] DIN 52450: August 1985. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern
- [34] P. Longuet, L. Burglen, A. Zelwer: The Liquid Phase of Hydrated Cement, (franz.), Revue Mater. Const. 676 (1973) pp. 35-41
- [35] C. L. Page, Ö. Vennesland: Pore Solution Composition and Chloride Binding Capacity of Silica-Fume Cement Pastes, Materials and Structures 16 (1983) 91, pp. 19-25
- [36] J. Duchnese, M. A. Berube: 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
- [37] DIN EN 197-1:2001-02: Zement; Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197-1: 2000
- [38] DIN EN 1097-6:2000: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- [39] R. Springenschmidt, W. Fleischer: Untersuchung der Ursachen von Oberflächenrissen (Netzzissen) in Betonfahrbahndecken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 651, 1993
- [40] Freyburg, E.; Berninger, A. M.: Bewertung alkalireaktiver Zuschläge außerhalb des Geltungsbereiches der Alkalirichtlinie des DAfStb: Kenntnisstand und neue Erkenntnisse; 14. Internationale Baustofftagung IBAUSIL 2000 Weimar, Tagungsbericht-Band 1, S. 1-0931 bis 1-0947.

- 
- [41] A. L. A. Fraay: Fly ash a pozzolan in concrete. Delft, Technische Universität, Diss., 1990
- [42] J. Stark: Wirkung von Flugasche auf AKR, Literaturstudie, Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, September 2002
- [43] S. Diamond: Effects of two Danish Flyashes on Alkali Content of Pore Solutions of Cement-Flyash Pastes, Cement and Concrete Research 11 (1981), Nr. 3, pp. 383-394
- [44] E. Schäfer: 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
- [45] I. Canham, C. L. Page and P. J. Nixon: Aspects of the Pore Solution Chemistry of Blended Cements Related to the Control of Alkali Silica Reaction, Cement and Concrete Research Vol. 17, 1987, pp. 839-844
- [46] E. Schäfer, B. Meng und H.-M. Sylla: Alkalihaushalt der Porenlösung – Beitrag verschiedener Zementkomponenten, ibausil 2000, Band 1, S. 0949-0957
- [47] P. J. Nixon, C. L. Page, R. Bollinghaus, I. Canham: The effect of a Pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali silica reaction. Magazine of Concrete Research 38 (1986), N134, pp. 30-35
- [48] Moro, F.: Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung des Bindemittels und der Porenstruktur des Zementsteins im Beton. Bericht-Nr. 151 (1996), EMPA, Abteilung 111
- [49] M. J. Setzer, R. Auberg, V. Hartmann: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands von Transportbeton. Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie, Heft 11 (1999); S. 12
- [50] R. Härdtl: Heft 448 des DAfStb, Veränderung des Porengefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften; Beuth Verlag GmbH, Berlin 1995
- [51] W. Brameshuber, R. Pierkes: Alkalibindung in flugaschehaltigen Bindemitteln – Langzeitversuche; Forschungsbericht F 902; Förderer: VGB Powertech e.V.

## Anhang 1: Beschreibung des Schnelltests nach der Prüfvorschrift des LMPA Sachsen-Anhalt:

### Beschreibung des Schnelltests nach der Prüfvorschrift des LMPA Sachsen-Anhalt:

#### Allgemein

Für die Einschätzung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung wird die Dehnung von Mörtelprobekörpern mit Messzapfen - 40/40/160 mm<sup>3</sup> - entsprechend DIN 52450 gemessen. Die Herstellung der Probekörper erfolgt in Anlehnung an DIN EN 196-1.

#### Probenvorbereitung

Die zu untersuchende Gesteinskörnung wird mit einem Backenbrecher zerkleinert und durch Siebung die Kornfraktionen 0,5/1 und 1/2 mm gewonnen. Um Störgrößen auszuschalten, werden die abschlämmbaren Bestandteile abgewaschen und die Proben bis zur Massenkonzanz bei 60°C getrocknet.

#### Mörtelzusammensetzung

Zement CEM I 42,5 R mit 1,0 M.-% Na<sub>2</sub>O-Äquivalent

**450g**

Inert-Körnung Quarzsand in der Fraktion 0,125/0,5

**450g**

Prüf-Körnung jeweilige Gesteinskörnung

**450g** in der Fraktion 0,5/1

**450g** in der Fraktion 1/2

Anmachwasser **225 ml** 1 molare Natronlauge, w/z-Wert = 0,5

#### Lagerung der Probekörper

Die Probekörper werden bis zum Ausschalen nach einem Tag bei 20°C und 95 % r. F. gelagert. Danach erfolgt die Hauptlagerung bei 70°C über Wasser.

#### Messtermine

Nach dem Ausschalen erfolgt die Nullmessung der Probekörper. Danach werden die Probekörper nach 1, 2, 3, 7, 10, 14 und 21 Tagen Hauptlagerung gemessen. Für die Messung werden die Probekörper nur kurz aus der Hauptlagerung entnommen, um ein Austrocknen und Abkühlen der Probekörper zu vermeiden. Die Dehnwerte beziehen sich auf die Nullmessung der Probekörper bei 20°C vor der Hauptlagerung bei 70°C über Wasser. Sie beinhalten also neben einer möglichen Dehnung durch Alkalireaktion auch immer eine Temperatur- und Feuchtedehnung (~ 0,5 ‰).

#### Bewertung der Ergebnisse

Als vorläufiges Bewertungskriterium gilt, dass wenn nach 21 Tagen Hauptlagerung eine Dehnung von 2,0 ‰ überschritten wird, die geprüfte Gesteinskörnung als potentiell reaktiv hinsichtlich AKR einzustufen ist.

Zudem können die Ergebnisse hinsichtlich des zeitlichen Dehnungsverlaufes mit Referenzmischungen verglichen werden.

## Anhang 2: Charakterisierung der Ausgangsstoffe

### 1 Zemente und Betonzusatzstoffe (Flugasche und Kalksteinmehl)

Tabelle A2 1: Chemische Zusammensetzung der Zemente und Betonzusatzstoffe in M.-%; bezogen auf die bei 105°C getrocknete Probe

Prüfgröße	Zement: CEM							Flugasche			Kalksteinmehl
	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R NA	II/A-S 32,5 R	III/A 32,5 N	III/B 32,5 N	--	--	--	--
Bezeichnung	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	F1	F2	F3	KSM
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Glühverlust <sup>1)</sup>	2,6	2,2	2,8	2,4	2,1	1,4	0,6	2,4	3,8	4,3	--
CaO <sub>frei</sub> <sup>2)</sup>	--	--	--	--	--	--	--	0,2	<0,1	0,1	--
HCL-unlös. <sup>1)</sup>	--	--	--	--	--	--	--	83,6	84,4	79,0	--
SiO <sub>2</sub>	19,70	19,30	21,80	21,51	22,10	25,80	29,50	47,8	50,3	46,2	--
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,04	4,76	5,65	5,55	5,96	7,45	9,39	26,6	28,0	24,9	--
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,48	2,55	2,34	2,69	2,95	2,17	1,33	9,1	4,7	4,6	--
CaO	60,8	64,2	62,6	64,1	57,7	53,3	47,1	3,6	2,6	4,7	--
MgO	2,26	3,50	1,09	1,12	2,99	4,78	6,55	2,2	1,9	1,5	--
TiO <sub>2</sub>	0,15	0,25	0,17	0,29	0,19	0,38	0,41	1,1	1,2	1,3	--
MnO	<0,1	0,12	<0,1	<0,1	<0,1	0,18	0,19	0,1	<0,1	<0,1	--
SO <sub>3</sub>	3,7 <sup>1)</sup>	3,5 <sup>1)</sup>	3,0 <sup>1)</sup>	3,7 <sup>1)</sup>	3,7 <sup>1)</sup>	3,9 <sup>1)</sup>	3,8 <sup>1)</sup>	0,77	0,22	0,5	--
K <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	1,43	1,05	0,87	0,58	1,24	1,08	0,73	3,41	4,04	1,10	0,12
Na <sub>2</sub> O <sup>3)</sup>	0,27	0,33	0,19	0,27	0,27	0,29	0,30	1,36	1,09	0,37	0,13
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub>	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78	3,61	3,75	1,09	0,21

<sup>1)</sup> nach DIN EN 196-2

<sup>2)</sup> nach DIN EN 451-1

<sup>3)</sup> nach DIN EN 196-21

Tabelle A2 2: Physikalische Eigenschaften der Zemente

CEM	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R	I 32,5 R NA	II/A-S 32,5 R	III/A 32,5 N	III/B 32,5 N	
Bezeichnung	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	3,15	3,14	3,14	3,15	3,11	3,04	2,99	
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	7 d	44,5	40,4	41,0	35,5	43,0	30,6	33,9
	28 d	52,5	51,1	49,6	50,7	51,9	48,0	48,5
	90 d	60,7	57,8	57,3	64,0	61,1	61,6	52,0
Ausbreitmaß [mm]	17,3	18,6	13,1	16,5	17,1	17,7	18,8	
spez. Oberfläche nach Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	3450	3350	3150	3250	3250	3550	4000	

Tabelle A2 3: Physikalische Eigenschaften der Flugaschen und des Kalksteinmehls

Betonzusatzstoff	F1	F2	F3	KSM	
Bezeichnung					
1	2	3	4	5	
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,32	2,41	2,40	2,72	
Aktivitätsindex <sup>1)</sup> [%]	7 d	74	77	79	69
	28 d	84	91	81	68
	90 d	98	114	104	62
Ausbreitmaß <sup>1)</sup> [cm]	17,6	20,4	17,0	13,0	
spez. Oberfläche nach Blaine [cm <sup>2</sup> /g]	3000	4450	3700	4600	

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

Tabelle A2 4: Korngrößenverteilung der Flugaschen aus Luftstrahlsiebung

Siebe	Sieblinie F1		Sieblinie F2		Sieblinie F3	
Lochweite [mm]	Summenlinie [M.-%]		Summenlinie [M.-%]		Summenlinie [M.-%]	
	Rückstand	Durchgang	Rückstand	Durchgang	Rückstand	Durchgang
1	2	3	4	5	6	7
	0	100				
<b>0,25</b>	1,1	98,9			0	100
0,125	5,4	94,6	0	100	2,0	98,0
0,063	16,2	83,8	0,5	99,5	11,4	88,6
<b>0,045</b>	<b>21,4</b>	78,6	<b>1,0</b>	99,0	<b>18,1</b>	81,9
0,04	24,1	75,9	2,1	97,9	20,6	79,4
0,02	37,4	62,6	100 <sup>1)</sup>	0 <sup>1)</sup>	42,9	57,1
0	100	0	100	0	100	0

<sup>1)</sup> Luftstrahlsiebung nicht mehr möglich, da Sieb zugesetzt

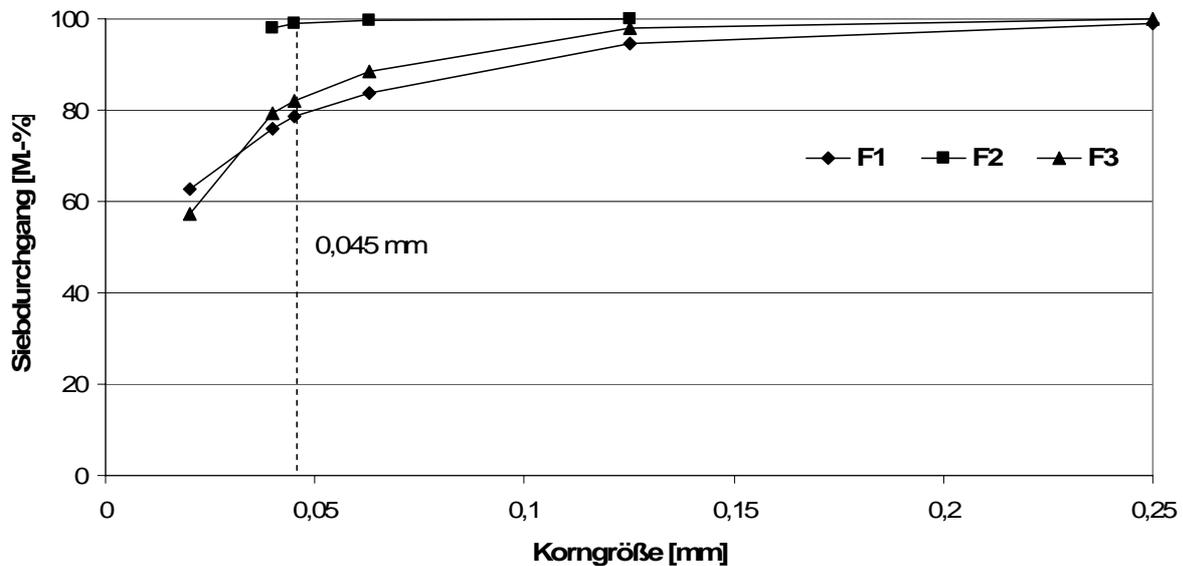


Abbildung A2 1: Korngrößenverteilung der Flugaschen aus Luftstrahlsiebung

Tabelle A2 5: Kennwerte zur Korngrößenverteilung der Betonzusatzstoffe aus Laserbeugung

Dispergierung in 2-Propanol				
Parameter	F1	F2	F3	KSM
1	2	3	4	5
Rückstand 20 $\mu\text{m}$	48	16	50	52
Rückstand 45 $\mu\text{m}$	28	4	28	33
Kornanteil >250 $\mu\text{m}$	2	0	1	0
Medianwert $d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	19	9	20	23

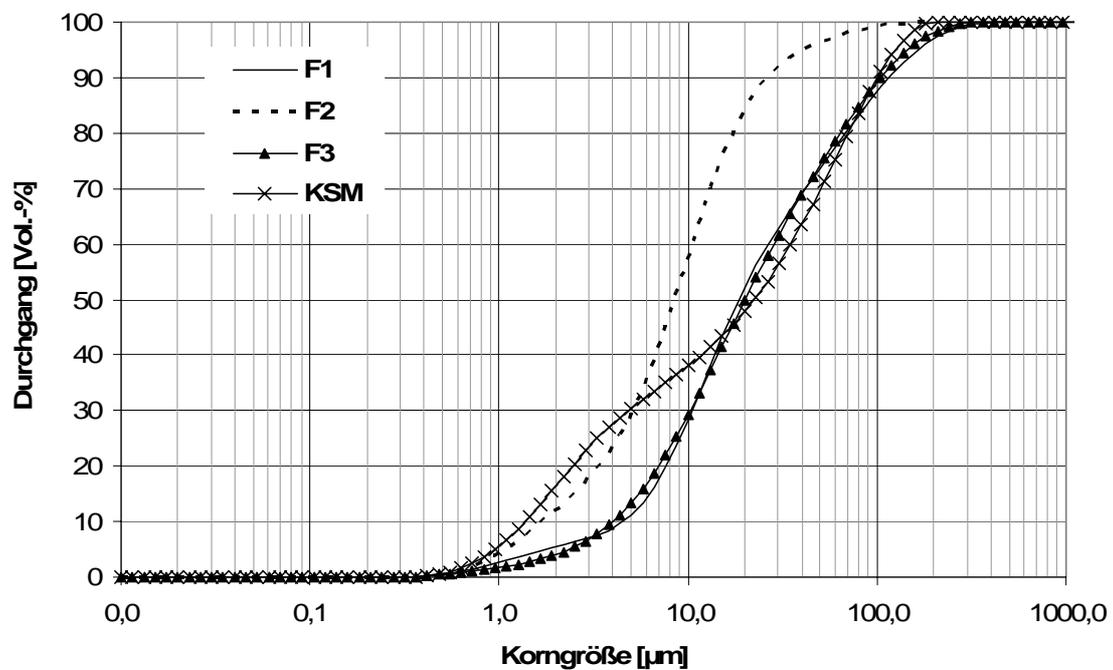


Abbildung A2 2: Mittels Laserbeugung erhaltene Korngrößenverteilung der Betonzusatzstoffe (einfach logarithmischer Maßstab)

Tabelle A2 6: Minerale und amorpher Anteil der Flugaschen aus der Röntgenbeugungsanalyse

Flugasche	F1	F2	F3
Mineral	Anteil [%]		
1	2	3	4
Mullit	14,2	12,1	22,1
Magnetit	2,9	--	1,7
Quarz	2,7	3,2	7,9
CaO	< 0,5	--	0,8
amorpher Anteil	79,7	84,8	67,5

## 2 Gesteinskörnungen

### 2.1 Alkaliempfindlichkeit EII-OF und EIII-OF

MPA Eckernförde

TU-München E II-Material

Korngruppe/Lieferkörnung 2/8 mm

#### KORNGRÖSSENVERTEILUNG

Kornklasse	mm	Summe	< 1	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Gewicht	g	3729	16	25	1073	2509	106	0	0
Anteil	M.-%	100,0	0,4	0,7	28,8	67,3	2,8	0,0	0,0

#### PETROGRAFISCHE PRÜFUNG

Kornklasse	mm	4/8	8/16	16/32	> 32
Einwaage	g	437,3	-	-	-
Alkaliunempf. Bestandteile	M.-%	76,4	-	-	-
Flint	M.-%	23,6	-	-	-
Opalsandstein u. fragliche Bestandteile	M.-%	0,0	-	-	-

#### ALKALIEMPFINDLICHE BESTANDTEILE

Kornklasse	mm	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Einwaage	g	-	447,3	0,0	-	-	-
Gewicht nach NaOH-Test	g	-	444,5	0,0	-	-	-
Opalsandstein	M.-%	-	0,6	0,0	-	-	-
Erweichte Körner	g	/	/	0,0	-	-	-
	M.-%			0,0	-	-	-
Flintrohichte	g/cm <sup>3</sup>	/		2,43	-	-	-
Reaktionsfähiger Flint	M.-%			5,6	-	-	-
5 x Opalsandstein u. reaktionsfähiger Flint	M.-%			5,6	-	-	-

#### BEURTEILUNG DER ALKALIEMPFINDLICHKEIT

Kornklasse	mm	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Opalsandstein	unbedenklich	E I-O	-	-	EI-O	-	-
	bedingt brauchbar	EII-O	-	EII-O	-	-	-
	bedenklich	EIII-O	-	-	-	-	-
Opalsandstein und Flint	unbedenklich	E I-OF	-	-	-	-	-
	bedingt brauchbar	EII-OF	-	-	EII-OF	-	-
	bedenklich	EIII-OF	-	-	-	-	-

 Die Korngruppe/Lieferkörnung 2/8 mm ist einzustufen als: **EII-O - EII-OF**

Das Ergebnis gilt für die im März 2003 gelieferte Gesteinskörnung 2/8 mm.

Eckernförde, den 12.03.2003

Materialprüfanstalt Eckernförde  
 – Öffentliche Baustoffprüfstelle –  
 Lorenz-von-Stein-Ring 1 · D-24340 Eckernförde  
 Tel. 043 51/47 16-200 · Fax 043 51/47 16 201



Abbildung A2 3: Prüfzeugnis für die Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF

MPA Eckernförde

TU-München E III-Material

Korngruppe/Lieferkörnung 2/8 mm

**KORNGRÖSSENVERTEILUNG**

Kornklasse	mm	Summe	< 1	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Gewicht	g	3899	82	87	1434	2233	63	0	0
Anteil	M.-%	100,0	2,1	2,2	36,8	57,3	1,6	0,0	0,0

**PETROGRAFISCHE PRÜFUNG**

Kornklasse	mm	4/8	8/16	16/32	> 32
Einwaage	g	430,2	-	-	-
Alkaliunempf. Bestandteile	M.-%	80,2	-	-	-
Flint	M.-%	16,4	-	-	-
Opalsandstein u. fragliche Bestandteile	M.-%	3,4	-	-	-

**ALKALIEMPFINDLICHE BESTANDTEILE**

Kornklasse	mm	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Einwaage	g	-	460,5	14,5	-	-	-
Gewicht nach NaOH-Test	g	-	448,2	1,8	-	-	-
Opalsandstein	M.-%	-	2,7	2,9	-	-	-
Erweichte Körner	g	/		5,9	-	-	-
	M.-%			1,4	-	-	-
Flintrohichte	g/cm <sup>3</sup>			2,52	-	-	-
Reaktionsfähiger Flint	M.-%			1,8	-	-	-
5 x Opalsandstein u. reaktionsfähiger Flint	M.-%	-	-	16,3	-	-	-

**BEURTEILUNG DER ALKALIEMPFINDLICHKEIT**

Kornklasse	mm	1/2	2/4	4/8	8/16	16/32	> 32
Opalsandstein	unbedenklich	E I-O	-	-	-	-	-
	bedingt brauchbar	EII-O	-	-	-	-	-
	bedenklich	EIII-O	-	EIII-O	EIII-O	-	-
Opalsandstein und Flint	unbedenklich	E I-OF	-	-	-	-	-
	bedingt brauchbar	EII-OF	-	-	-	-	-
	bedenklich	EIII-OF	-	-	EIII-OF	-	-

Die Korngruppe/Lieferkörnung 2/8 mm ist einzustufen als: **EIII-O - EIII-OF**

Das Ergebnis gilt für die im März 2003 gelieferte Gesteinskörnung 2/8 mm.

Eckernförde, den 12.03.2003

*i. A.*

Materialprüfanstalt Eckernförde  
 – Chemische und Metallprüfstelle –  
 Lorenzstraße 11, D-24341 Eckernförde  
 Tel. 04551 747 16 200 Fax 04551 747 10 231



Abbildung A2 4: Prüfzeugnis für die Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF

## 2.2 Petrographische Untersuchungen

Die petrographischen Untersuchungen wurden am Lehrstuhl für Ingenieurgeologie der TU-München durch Herrn Dr. G. Grundmann durchgeführt.

### 2.2.1 Kies-Edelsplitt / Kies Oberrhein

Die Gesteinskörnungen „Kies-Edelsplitt Oberrhein 11/16“ und „Kies Oberrhein 8/16“ wurden nach Augenschein in 9 Gesteinsarten aufgeteilt, siehe Tabelle A2 7. Die Gesamtmasse des Kies-Edelsplittes bzw. Kieses betrug 705,6 bzw. 702,9 g. Stichpunktartig wurde an daraus ausgewählten Gesteinskörnern eine durchlichtmikroskopische Gesteinsbestimmung vorgenommen. Dies diente dazu, den Mineralienbestand zu bestimmen, das Gefüge zu charakterisieren und Hinweise auf eine mögliche Alkalireaktivität einzelner Gesteinsgruppen zu erhalten.

Tabelle A2 7: Art und Anteil der Gesteinsarten in den Gesteinskörnungen Kies-Edelsplitt und Kies Oberrhein

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

<sup>1)</sup> Sandsteinstruktur

<sup>2)</sup> hornsteinähnlich

<sup>3)</sup> hornsteinähnlich, muscheliger Bruch

### **Gesteinsbestimmung an den Dünnschliffen für „Kies-Edelsplitt Oberrhein 11/16“**

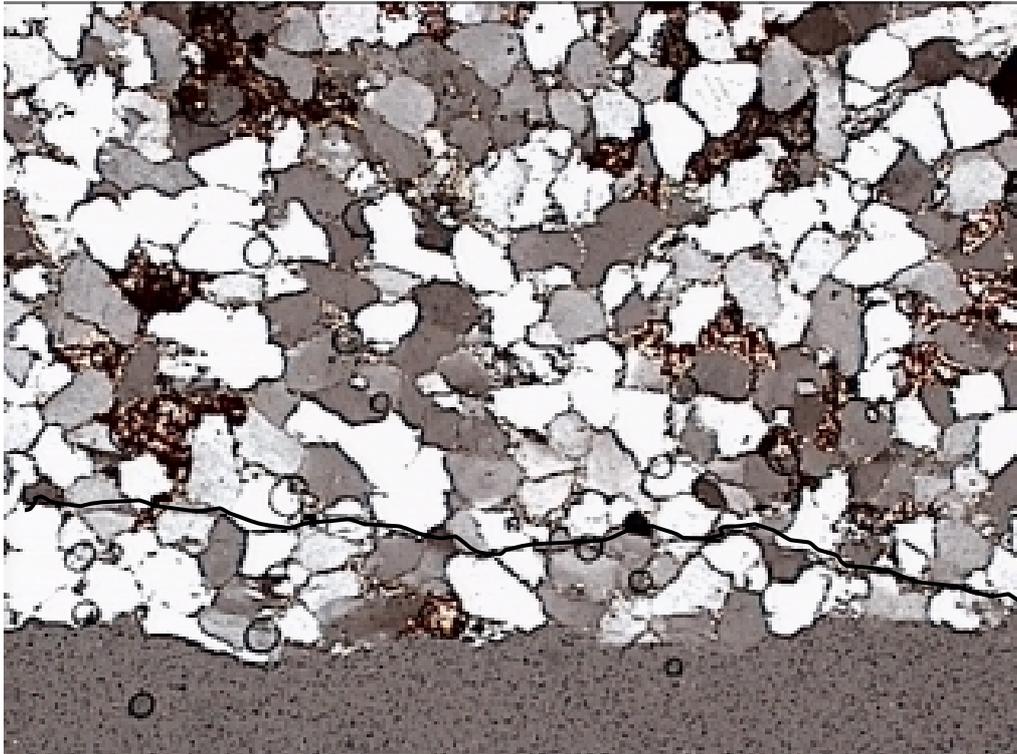
Exemplarisch wurde von je einem Fragment der in der petrographischen Auszählung als Quarzit, Sandstein kieselig gebunden, Sandstein dicht verkieselt, Sandstein glaukonitisch und Kieselkalk bezeichneten Gesteinsarten ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt. Bei der Vielzahl an Gesteinsarten im Kies-Edelsplitt aus dem Oberrhein kann hier aber nur von einer stichpunktartigen Untersuchung gesprochen werden.

#### 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 subparallele Orientierung im Raum und verlaufen sowohl entlang Gefügegrenzen als auch durch einzelne Körner hindurch. In Abbildung A2 5 ist exemplarisch eine schalenförmige Rissbildung entlang der Oberfläche eines kieselig gebundenen Sandsteins dargestellt.



**Abbildung A2 5: BB = 2,1 mm, X-pol; kieselig gebundener Sandstein mit Riss subparallel zur Oberfläche. (Riss nachgezeichnet)**

### 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, undulös auslöschender Bruchstücke ( $d \sim 0,5$  mm) mit braunen Verwitterungsrändern.

Glaukonit: ~ 15 Vol.-%

Nebengemenge:

Carbonat: ~ 5 Vol.-%

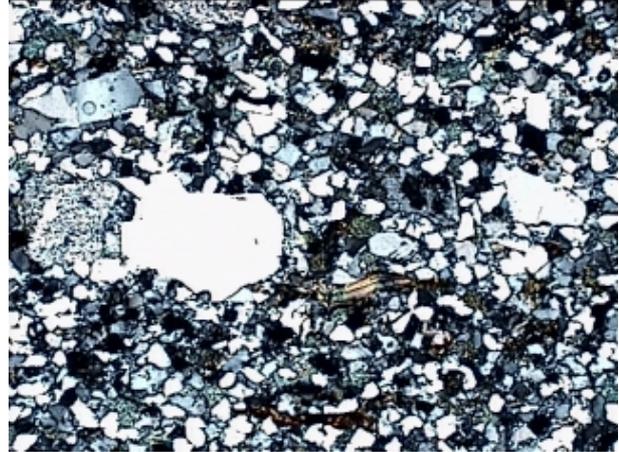
Feldspat: ~ 5 Vol.-%

Glimmer:

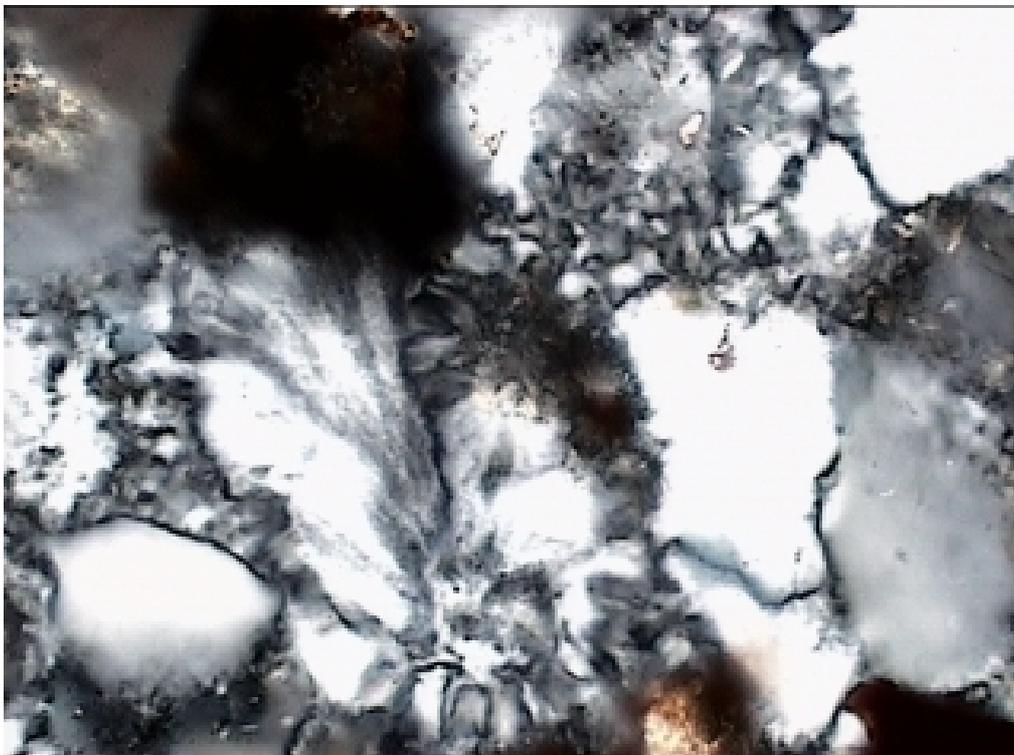
1-2 Vol.-%



**Abbildung A2 6:** BB = 2,1 mm, lin-pol; eingeregelt Grundmasse mit einzelnen größeren Körnern, durchgehende Eisenhydroxid-Verwitterung



**Abbildung A2 7:** 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 meist undulös auslöschenden Quarzbruchstücken ( $d \sim 0,5$  mm)



**Abbildung A2 8:** BB = 0,25 mm, X-pol; kieselige, chalcedonartige Matrix mit schwach suturierten Quarzkörnern

### Kieselig gebundener Sandstein

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

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

Hauptgemenge:

Quarz:  $\sim 80$  Vol.-%

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

Carbonatzement:  $\sim 15$  Vol.-%

Nebengemenge:

Glimmer:  $\sim 5$  Vol.-%

Akzessorien:

Turmalin

Feldspat

Chalzedon

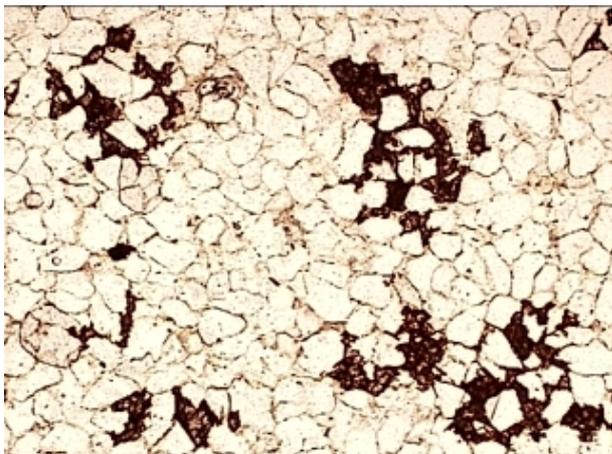


Abbildung A2 9: BB = 2,1 mm, lin-pol; fleckige, verwitterte, eisenschüssige Carbonatmatrix

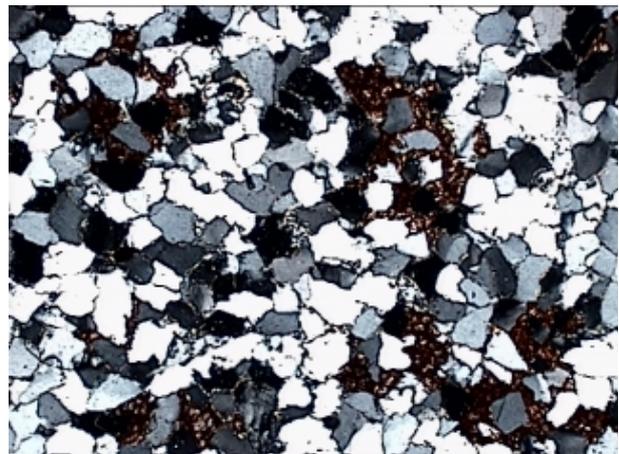
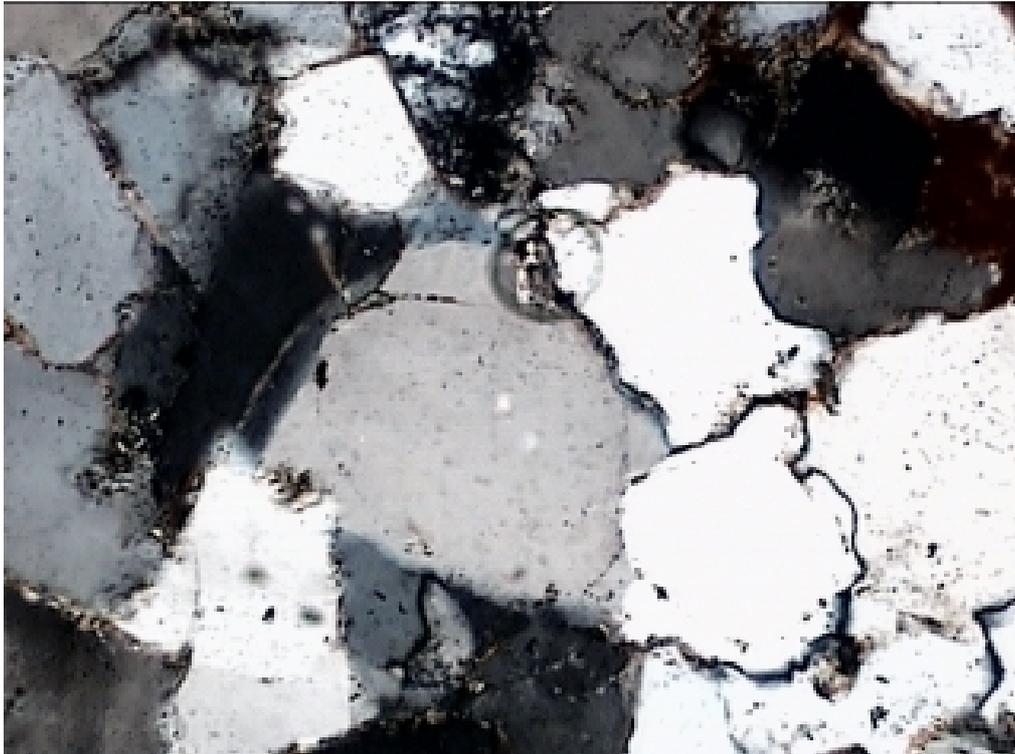


Abbildung A2 10: BB = 2,1 mm, X-pol; gleichkörniges Pflastergefüge der Quarzkörner ( $d \sim 0,2$  mm)



**Abbildung A2 11: BB = 0,5 mm, X-pol; Neusprossung um gut gerundetes 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 Chalzedonaggregaten 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 Chalzedon (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

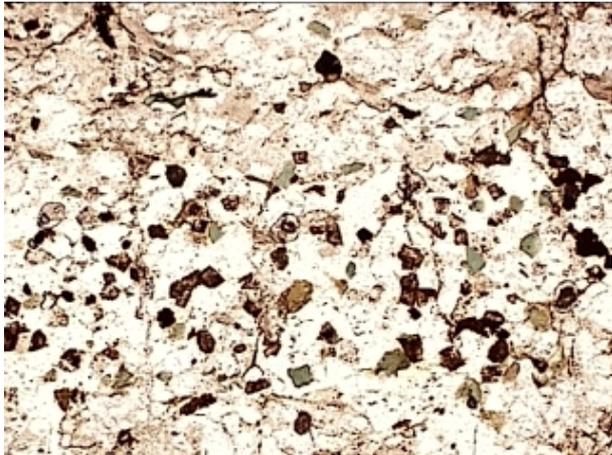


Abbildung A2 12: BB = 2,1 mm, lin-pol; Wechsel-lagerung detritischer und kryptokristalliner Quarz mit quer zur Schichtung wiederverheilten Rissen



Abbildung A2 13: BB = 2,1 mm, X-pol; dichtver-kieselte Matrix

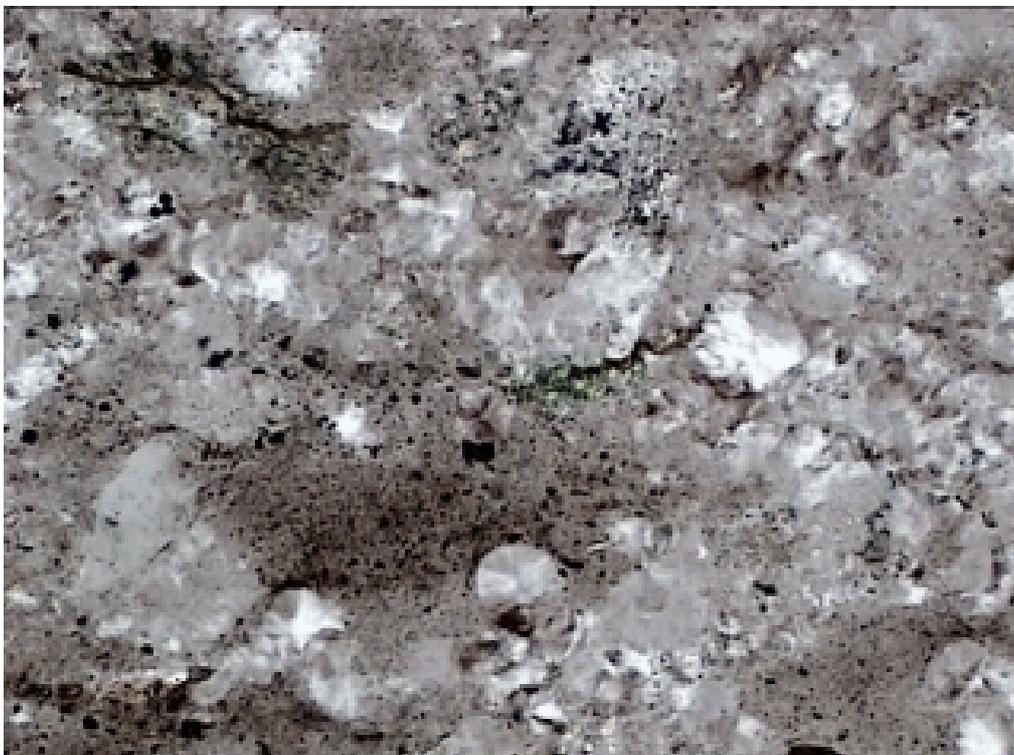
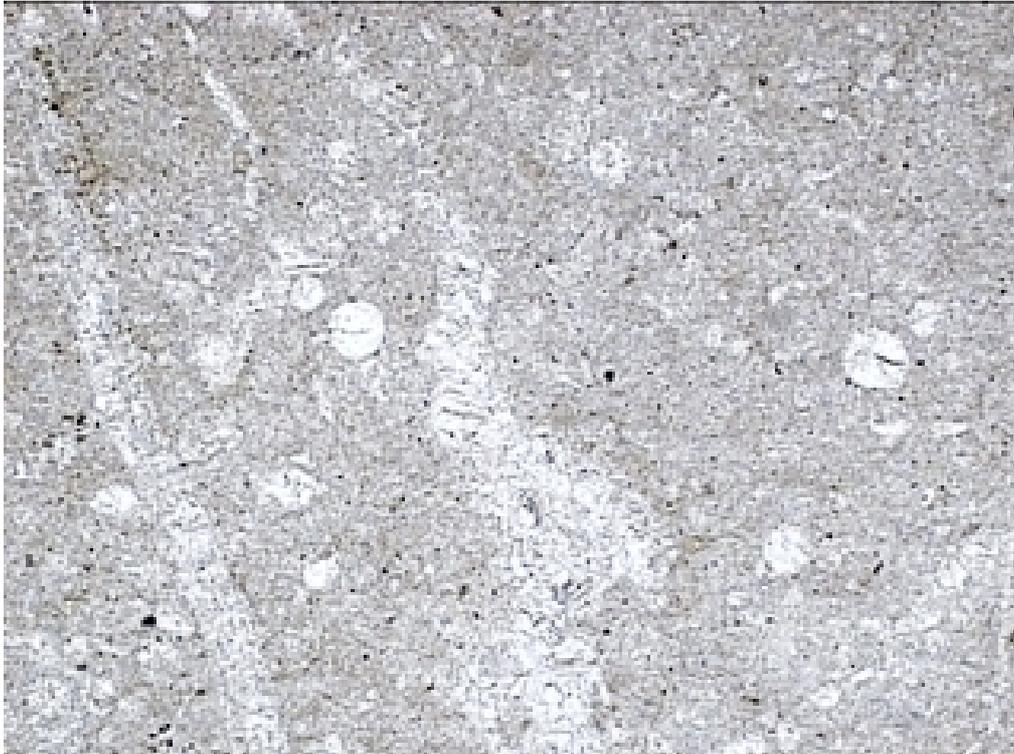


Abbildung A2 14: BB = 0,5 mm, X-pol; aus kryptokristalliner Grundmasse gereinigte, sphäreförmige Chalzedonspaltung

### Kieselkalk (Radiolarit)

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



**Abbildung A2 15: 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 wechsellörnige Quarzgrundmasse ist geschiefert, die Quarzkörner weisen suturierte Korngrenzen und undulöse Auslöschung auf.

Hauptgemenge:

Quarz:  $\sim 90 \text{ Vol.-%}$

Es finden sich zwei Arten von Quarz:

a) deutlich geplättete Quarzkörner mit  $L \sim 0,5 \text{ mm}$  und  $B \sim 0,2 \text{ mm}$

b) Rekristallisate ( $d \sim 0,05 \text{ mm}$ )

In der Regel weisen die Quarze eine starke undulöse Auslöschung auf.

Feldspat:  $\sim 10 \text{ Vol.-%}$

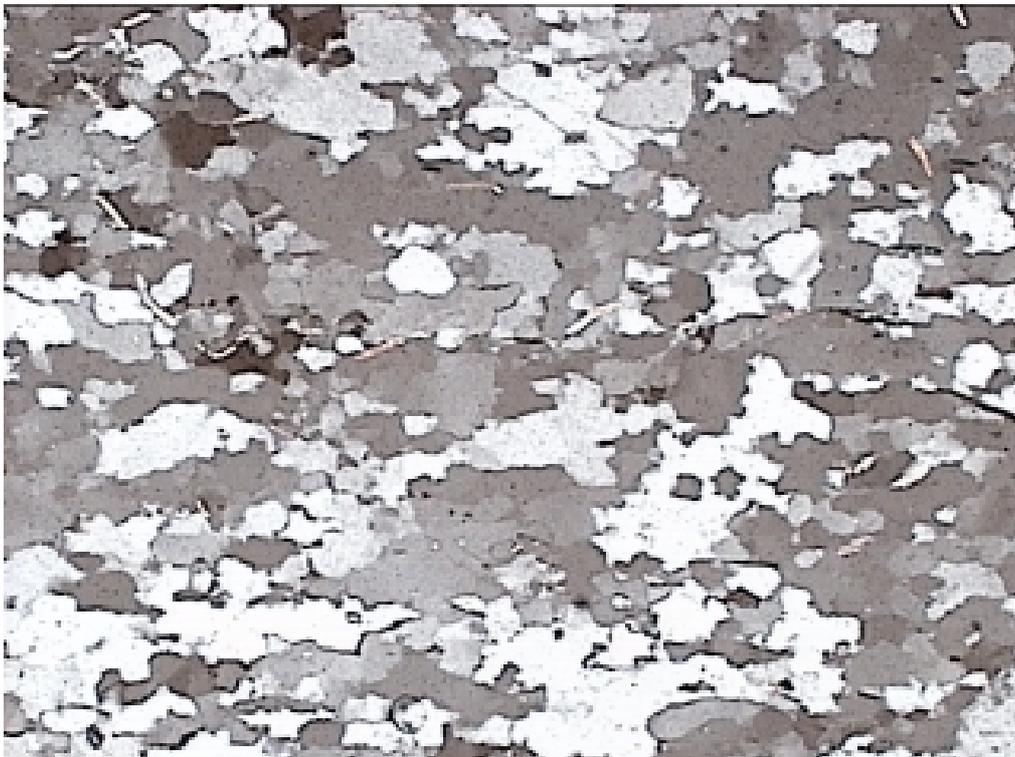
Teilweise zerbrochene und mit Quarz verheilte detritische Feldspäte mit ungetrübttem Anwachssaum ( $d \sim 0,3-1,5 \text{ mm}$ )

Akzessorien:

Glimmer:

Die Hellglimmer zeichnen die Schieferungsrichtung nach.

Chalzedon



**Abbildung A2 16: BB = 2,1 mm, X-pol; geplättete, undulös auslöschende Quarzkörner mit suturierten Korngrenzen und die Schieferung nachzeichnender Hellglimmer**

### **Gesteinsbestimmung an den Dünnschliffen für „Kies Oberrhein 8/16“**

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 Kies-Edelsplitt handelt, wurde hier auf eine genaue Auflistung des Mineralienbestandes verzichtet und neben einer generellen Beschreibung nur noch auf eventuelle Besonderheiten hingewiesen. Bei der Vielzahl an Gesteinsarten im Kies aus dem Oberrhein kann hier aber nur von einer stichpunktartigen Untersuchung gesprochen werden.

### Verwitterungszustand

Der Kies aus dem Oberrheingraben 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 Dolomithomben entstandenen Porenraum auf



Abbildung A2 17: BB = 2,1 mm, X-pol; Flint mit Carbonatdurchhäderung

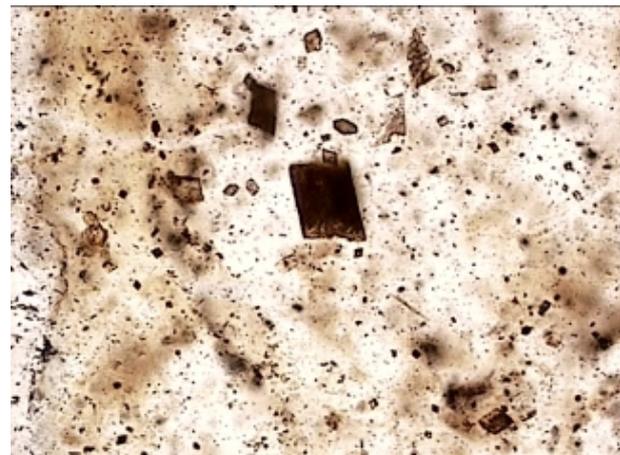


Abbildung A2 18: BB = 0,5 mm, lin-pol; Porenraum durch ausgelaugte Dolomithomben

Dicht verkieselter Sandstein

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



Abbildung A2 19: BB = 2,1 mm, lin-pol; 3-dimensional vernetzter Porenraum

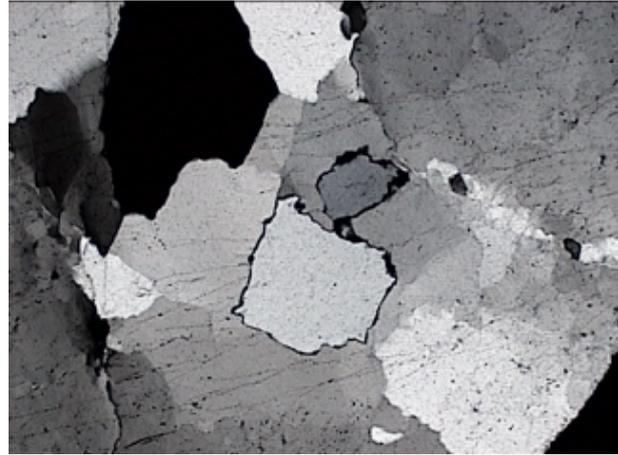
## Quarzit

### 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 A2 20: BB = 2,1 mm, lin-pol; mit spröden Zerbrechungen durchsetzter Quarzit**



**Abbildung A2 21: BB = 2,1 mm, X-pol; mit spröden Zerbrechungen durchsetzter Quarzit**

### Korn b)

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



**Abbildung A2 22: BB = 2,1 mm, lin-pol; Quarzit mit durchgreifendem Netzwerk einer Glimmertapete**



**Abbildung A2 23: BB = 0,5 mm, lin-pol; oxidiertes Glimmer**

### Kieseliger Sandstein (Kieselschiefer; biogenes Sediment mit Schwammnadeln)

Es handelt sich um einen stark verwitterten kieseligen Sandstein mit Schwammnadeln

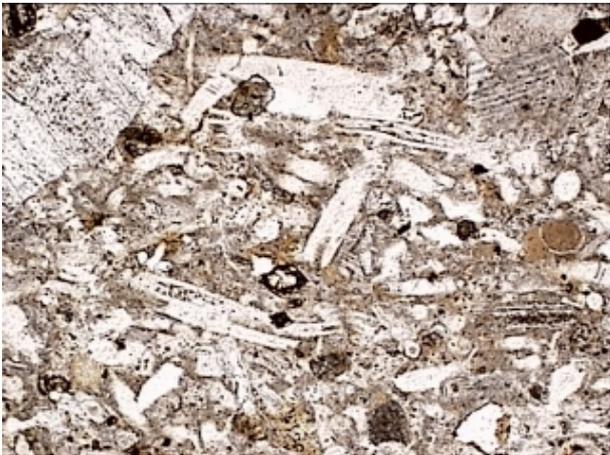


Abbildung A2 24: BB = 2,1 mm, lin-pol; biogenes Sediment mit Schwammnadeln

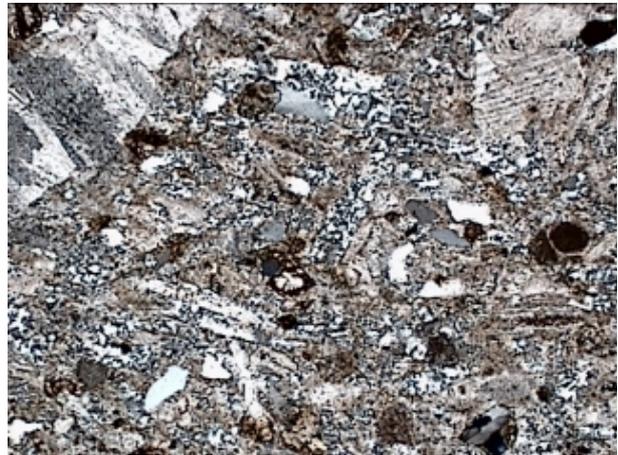


Abbildung A2 25: BB = 2,1 mm, X-pol; biogenes Sediment mit Schwammnadeln

#### 2.2.2 Kies mit Opalsandstein / Flint

An der Gesteinskörnung Kies mit Opalsandstein/Flint der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF erfolgte für die Fraktion 2/8 mm eine orientierende Bestimmung der darin enthaltenen Gesteinsarten ohne Ermittlung der jeweiligen Massenanteile. Exemplarisch erfolgte an ausgewählten Gesteinskörnern die Bestimmung der Gesteinsart am Dünnschliff. Im Kies der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF wurden prinzipiell die selben Gesteinsarten gefunden, allerdings konnte kein Opalsandstein entdeckt werden. Dies deckt sich mit den Prüfzeugnissen des MPA Eckernförde, siehe Abbildung A2 3 und Abbildung A2 4. Für den Kies EII-OF wurde auf die Herstellung von eigenen Dünnschliffen verzichtet.

#### Gesteinsarten

- Flint
- Diabas
- Granit
- Quarzite
- Sandstein
- Carbonatgesteine
- Glimmerschiefer
- Opalsandstein

### **Gesteinsbestimmung an den Dünnschliffen für „EIII-OF Kies Opalsandstein/Flint 2/8“**

Exemplarisch wurde von mehreren Fragmenten der in der petrographischen Auszählung als Flint, Opalsandstein und Carbonatgesteine bezeichneten Gesteinsarten ein petrographischer Dünnschliff angefertigt und die Gesteinsart bestimmt. Bei der Vielzahl an Gesteinsarten im Kies aus dem Norddeutschen Raum kann hier aber nur von einer stichpunktartigen Untersuchung gesprochen werden.

#### Kieseliger Schluffstein

Das Korn weist ein extrem feinkörniges, gleichkörniges und hochporöses Gefüge auf. Die kieselige Matrix ist massenhaft von Glimmerplättchen durchzogen.

Quarz:

Die detritischen Quarzkörner besitzen eine eckige Kornform und zeigen undulöse Auslöschung.

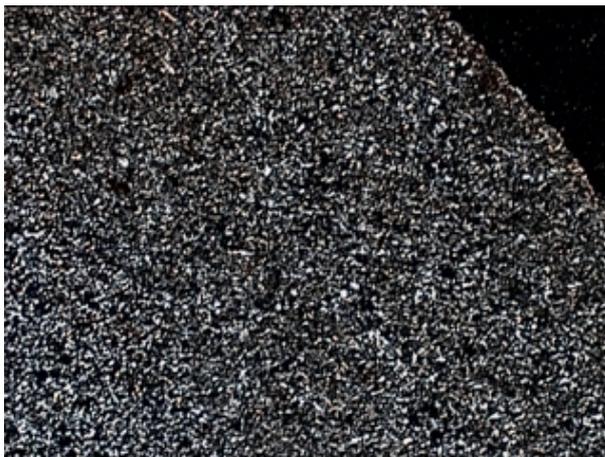


Abbildung A2 26: BB = 2,1 mm, X-pol;  
feinstkörniges Gefüge mit kieseliger Matrix

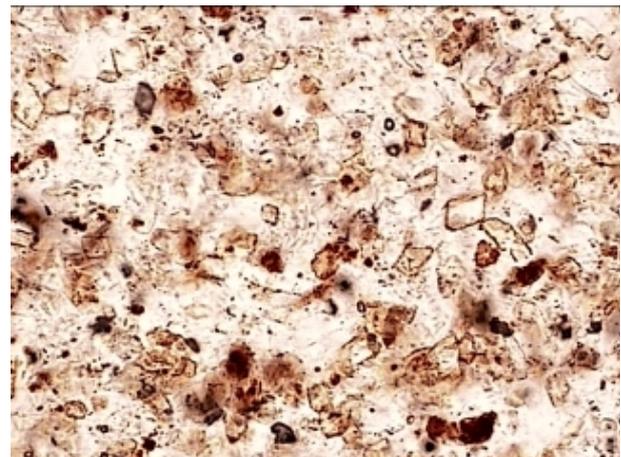


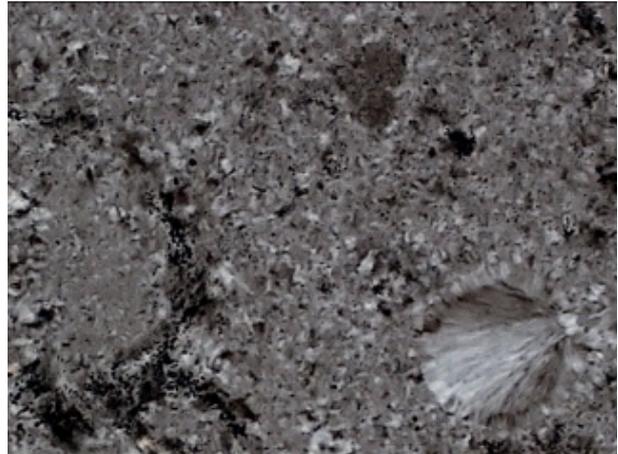
Abbildung A2 27: BB = 0,25 mm, lin-pol;  
weggelöste rhombenförmige Formrelikte

#### Flint

Das Korn weist ein homogenes kryptokristallines Gefüge auf (~ 99%). In der Matrix finden sich Formrelikte von Kammertierchen und Schwammnadeln.



**Abbildung A2 28: BB = 2,1 mm, lin-pol; Fossile Reste von Kammertierchen und Schwammnadeln**



**Abbildung A2 29: BB = 0,53 mm, X-pol; strahlenförmiger Chalzedon in kryptokristalliner Matrix**

### Kieselkreide

Es finden sich verkieselte Schalen- und Skelettreste in einer Matrix aus feinstkörnigem Carbonat.



**Abbildung A2 30: BB = 2,1 mm, X-pol; verkieselte Fossilien in Carbonatmatrix**

### Opalsandstein

Es handelt sich um einen kieselig gebundenen glaukonitischen Sandstein mit Opalschwammnadeln.

Hauptgemenge:

Quarz: ~ 25 Vol.-%

Detritische, eckige bis leicht gerundete Körner mit einer Korngröße zwischen 0,05 und 0,1 mm

Glaukonit: 10 - 15 Vol.-%

Korngröße zwischen 0,1 und 0,15 mm

Opalschwammnadeln: ~ 15 Vol.-%

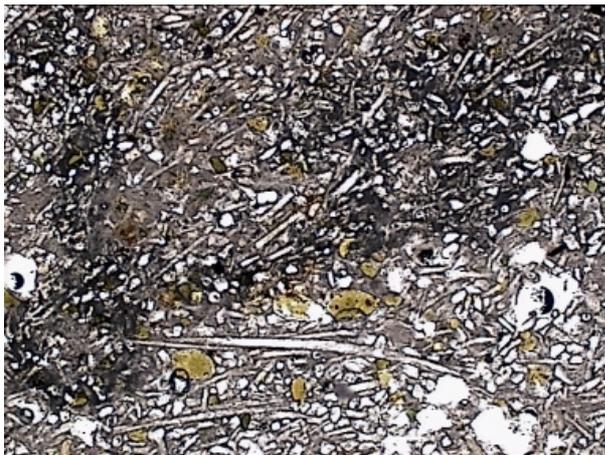


Abbildung A2 31: BB = 2,1 mm, lin-pol; glaukonitischer Sandstein mit Opalschwammnadeln



Abbildung A2 32: BB = 2,1 mm, X-pol; isotrope, kieselige Matrix

### 2.2.3 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; sandsteinartger 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), kryptokristallinen 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 undulös auslöschend.

Feldspat: ~ 30 Vol.-%

Detritischer Feldspat, teilweise durch Alteration mit Hellglimmer gefüllt, Korngröße ~ 0,1 mm.

Nebengemenge:

Pyrit: frisch ~ 5 Vol.-%

Akzessorien:

Carbonat < 1 Vol.-%

Zirkon < 1 Vol.-%

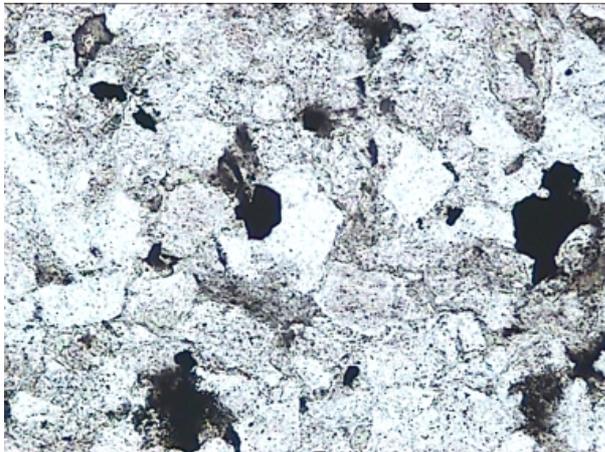
Goetit < 1 Vol.-%



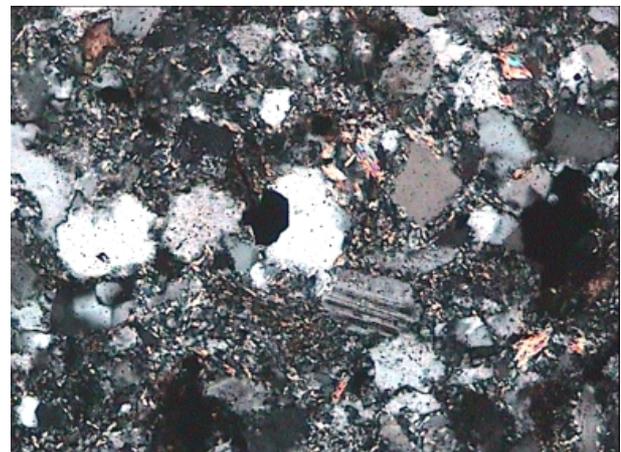
**Abbildung A2 33: BB = 2,1 mm, lin-pol;  
ungeregelte sandartige Matrix, opake Phasen**



**Abbildung A2 34: BB = 2,1 mm, X-pol; detritische  
Quarze und Feldspäte**



**Abbildung A2 35: BB = 0,5 mm, lin-pol;  
ungeregelte sandartige Matrix, opake Phasen**



**Abbildung A2 36: BB = 0,5 mm, X-pol; Matrix aus  
Hellglimmerschüppchen und kryptokristalliner  
Quarz, mit Hellglimmer gefüllter Feldspat**

Fragment 1; schieferartiger Bereich

Im Mikrogefüge zeigt sich ein toniges, gleichkörniges Gefüge 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 A2 37: 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.-%

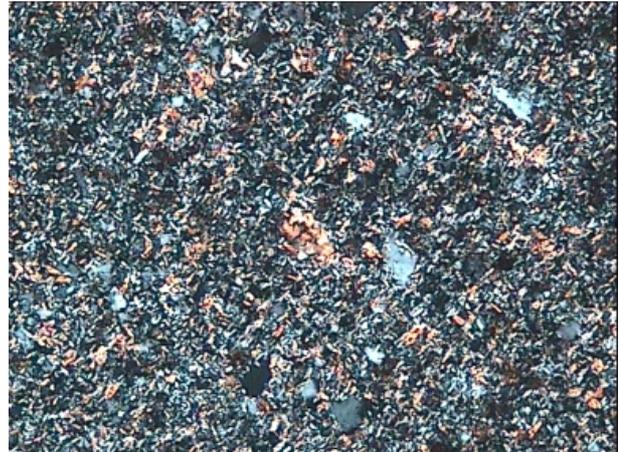
Wechselkörnig mit einer Korngröße von rd. 0,01 bis 0,05 mm

Feldspat: ~ 15 Vol.-%

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



**Abbildung A2 38: BB = 2,1 mm, lin-pol;  
ungeregelte tonige Matrix**



**Abbildung A2 39: BB = 0,5 mm, X-pol;  
Biotitmatrix**

### 2.3 Röntgenbeugungsanalyse

Tabelle A2 8: Minerale und amorpher Anteil der reaktiven Gesteinskörnungen aus der Röntgenbeugungsanalyse

Gesteinskörnung			Gw	SoR	KoR	EIII-OF	EII-OF
Mineralgruppe	Mineral	Chem. Formel	Anteil [%]				
1	2	3	4				
	Quarz	SiO <sub>2</sub>	31,2	64,8	64,6	39,3	37,7
Feldspat	Orthoklas	K[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	3,2	2,1	3,5	9,4	12,8
	Plagioklas (Albit)	Na[AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> ]	28,9	3,2	6,6	14,5	15,1
Glimmer	Muskovit	KAl <sub>2</sub> [(OH,F) <sub>2</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> ]	23,0	2,2	--	3,4	4,0
Tonmineral	Kaolinit	Al <sub>4</sub> [(OH) <sub>8</sub> /Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ]	0,7	--	--	--	--
Karbonat	Calcit	CaCO <sub>3</sub>	--	14,2	11,5	7,4	12,3
amorpher Anteil			13,0	13,6	13,8	25,9	18,1

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

EII-OF: Kies mit Opalsandstein/Flint, Fraktion 2/8, bedingt brauchbar hinsichtlich Alkalireaktion

### Anhang 3: Hergestellte Betone / Feinbetone

Tabelle A3 1: Zusammenstellung der mit inerter Gesteinskörnung hergestellten Referenzbetone

Bezeichnung	EI 1	EI 1a <sup>1)</sup>	EI 2	EI 2a	EI 3	EI 4	EI 5	EI 6
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zement	Z1	Z1	Z1	Z1	Z4	Z5	Z6	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,21	0,65	1,09	1,00	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	400	400	500	500	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	6,1	4,8	4,8	3,3	5,5	5,0	3,9
w/b-Wert	0,5	0,55	0,45	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]								
F1 [M.-%]	35	--	35	35	30	--	--	--
KSM [M.-%]	35	--	35	--	--	--	--	--

1) Rezeptur nach DIBt-Prüfplan [26]

Tabelle A3 2: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF hergestellten Pessimumbetone.

Bezeichnung	EIII-OF P1	EIII-OF P1a <sup>1)</sup>	EIII-OF P2	EIII-OF P3	EIII-OF P4	EIII-OF P5	EIII-OF P6
1	2	3	4	5	6	7	8
Zement	Z1	Z1	Z2	Z3	Z1	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,02	0,76	1,21	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	500	400	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	6,1	5,1	3,8	4,8	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,55	0,5	0,5	0,45	0,5	0,5
Kies EIII-OF [M.-% v. G.]							
ohne Flugasche	15/20/ 25/30	15	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/25	15/25
15 M.-% F1	15/20/ 25/30	--	--	--	--	--	--
35 M.-% F1	15/25/ 30	--	--	--	15/25/ 30	--	--

1) Rezeptur nach DIBt-Prüfplan [26]

Tabelle A3 3: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-OF hergestellten Pessimumfeinbetone.

Bezeichnung	EIII-OF P1 / FB	EIII-OF P5 / FB	EIII-OF P6 / FB
1	2	3	4
Zement	Z1	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,5	0,5
Kies EIII-OF [M.-% v. G.]			
ohne Flugasche	10/15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30
15 M.-% F1	10/15/20/ 25/30	--	--
35 M.-% F1	10/15/20/ 25/30	--	--

Tabelle A3 4: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF hergestellten Pessimumbetone.

Bezeichnung	EII-OF P1	EII-OF P3	EII-OF P4	EII-OF P5	EII-OF P6
1	2	3	4	5	6
Zement	Z1	Z3	Z1	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	0,76	1,21	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	400	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	3,8	4,8	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,5	0,45	0,5	0,5
Kies EII-OF [M.-% v. G.]					
ohne Flugasche	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30	15/25	15/25
35 M.-% F1	15/25/ 30	--	15/25/ 30	--	--

Tabelle A3 5: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklasse EII-OF hergestellten Pessimumfeinbetone.

Bezeichnung	EII-OF P5 / FB	EII-OF P6 / FB
1	2	3
Zement	Z5	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,09	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	5,5	3,9
w/b-Wert	0,5	0,5
Kies EII-OF [M.-% v. G.]		
ohne Flugasche	15/20/ 25/30	15/20/ 25/30

Tabelle A3 6: Zusammenstellung der mit opalsandstein/flint-haltiger Gesteinskörnung der Alkaliempfindlichkeitsklassen EIII-OF bzw. EII-OF hergestellten Betone

Bezeichnung	EIII-OF 1	EIII-OF 2	EIII-OF 3	EIII-OF 5	EIII-OF 6	EIII-OF 7	EII-OF 1	EII-OF 2
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zement	Z1	Z2	Z4	Z5	Z6	Z7	Z1	Z2
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,02	0,65	1,09	1,00	0,78	1,21	1,02
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	500	500	500	500	500
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	5,1	3,3	5,5	5,0	3,9	6,1	5,1
w/b-Wert	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kies mit Opalsandstein/ Flint [kg/m <sup>3</sup> ]	379	303	303	379	303	303	606	606
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]								
F1 [M.-%]	15/20/ 25/30/ 35	30	--	30	--	--	15/30	30
F2 [M.-%]	20/30	--	--	--	--	--	--	--
F3 [M.-%]	20/30	--	--	--	--	--	--	--
KSM [M.-%]	15/30	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle A3 7: Zusammenstellung der mit Grauwacke hergestellten Betone

Bezeichnung	Gw1	Gw2	Gw2a	Gw3	Gw4	Gw5	Gw6	Gw7	Gw8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zement	Z1	Z1	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,02	0,76	0,65	1,09	1,00	0,78
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	400	400	400	400	400	400	400	400
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	4,8	4,8	4,1	3,0	2,6	4,4	4,0	3,1
w/b-Wert	0,5	0,45	0,5	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Grauwacke [kg/m <sup>3</sup> ]	1110	1305	1305	1305	1305	1305	1305	1305	1305
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]									
F1 [M.-%]	20/25/ 30/35	20/25/ 30/35	30	30	30	30	30	--	--
F2 [M.-%]	--	20/25/ 30	--	--	--	--	--	--	--
F3 [M.-%]	--	20/25/ 30	--	--	--	--	--	--	--
KSM [M.-%]	--	20/30	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle A3 8: Zusammenstellung der mit Kies und Kies-Edelsplitt aus dem Oberrheingraben hergestellten Betone

Bezeichnung	KoR1	KoR2	SoR1	SoR2
1	2	3	4	5
Zement	Z1	Z1	Z1	Z1
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,21
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	400	500	400
Alkalien v. Z. [kg/m <sup>3</sup> ]	6,1	4,8	6,1	4,8
w/b-Wert	0,5	0,45	0,5	0,45
Kies / Kies-Edelsplitt [kg/m <sup>3</sup> ]	1065	1253	1073	1263
Betonzusatzstoff [M.-% v. Z.]				
F1	20/30	20/30	20/25/30	20/25/ 30/35
F2	--	--	--	20/25/30
F3	--	--	--	20/25/30

Tabelle A3 9: Zusammenstellung der mit Duranglas hergestellten Feinbetone

Bezeichnung	D P1	D F1	D F3	D KSM
1	2	3	4	4
Zement	Z1	Z1	Z1	Z1
Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> v.Z. [M.-%]	1,21	1,21	1,21	1,21
b = z + f [kg/m <sup>3</sup> ]	500	500	500	500
w/b-Wert	0,5	0,5	0,5	0,5
Duranglasgehalt	10/15/20/25/ 30/35/40/45 <sup>1)</sup> /50 [M.-% v. G.]	568 [kg/m <sup>3</sup> ]	568 [kg/m <sup>3</sup> ]	568 [kg/m <sup>3</sup> ]
BZS [M.-% v. Z.]	--	15/20/ 25/30/35	15/20/ 25/30/35	15/20/ 25/30/35

1) für die Untersuchungen mit Betonzusatzstoffen gewählter Gehalt an Duranglas im Feinbeton

## Anhang 4: Frisch- und Festbetonkennwerte

Tabelle A4 1: Frisch- und Festbetonkennwerte der inerten Referenzbetone

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Rezeptur nach DIBt-Prüfplan; EI; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,55						
EI 1a	2284	0,9	>70	--	2321	45
EI; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,50						
EI 1	2344	1,3	66	F6	2333	46
EI 1 / F1 35	2298	0,6	69	F6	2250	37
EI 1 / KSM 35	2330	1,1	65	F6	2288	29
EI; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
EI 2	2397	2,8	1,28 <sup>1)</sup>	C1	2363	49
EI 2 / F1 35	2367	2,5	1,19 <sup>1)</sup>	C2	2339	44
EI 2 / KSM 35	2371	2,8	1,32 <sup>1)</sup>	C1	2345	37
EI; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
EI 2a	2385	1,6	1,13 <sup>1)</sup>	C2	2366	46
EI 2a / F1 35	2364	n.b.	49	F4	2334	38
EI; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,50						
EI 3	2325	1,1	67	F6	2311	47
EI 3 / F1 30	2299	0,4	70	F6	2242	31
EI 4	2350	1,1	59	F5	2375	44
EI 5	2338	0,9	64	F6	2304	48
EI 6	2361	n.b.	67	F6	2376	44

1) Verdichtungsmaß

Tabelle A4 2: Frisch- und Festbetonkennwerte der Pessimumbetone mit EIII-OF und EII-OF

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
DIBt; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,55						
EIII-OF P1a / 15	2305	0,9	>70		2291	41
EIII-OF; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,50						
EIII-OF P1 / 15	2320	1,6	64	F6	2277	42
EIII-OF P1 / 20	2323	1,4	64	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 25	2299	1,4	64	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 30	2181	1,9	60	F5	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 15-15	2305	0,9	65	F6	2291	42
EIII-OF P1 / 20-15	2299	0,7	64	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 25-15	2291	0,8	66	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 30-15	2288	0,8	66	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 15-35	2280	0,8	69	F6	2257	39
EIII-OF P1 / 25-35	2284	0,8	66	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P1 / 30-35	2269	1,0	68	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P2 / 15	2293	1,8	63	F6	2297	48
EIII-OF P2 / 20	2292	1,9	64	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P2 / 25	2279	1,9	63	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P2 / 30	2230	2,7	59	F5	n.b.	n.b.
EIII-OF P3 / 15	2328	0,8	54	F4	2282	49
EIII-OF P3 / 20	2314	0,8	60	F5	n.b.	n.b.
EIII-OF P3 / 25	2297	0,9	55	F4	n.b.	n.b.
EIII-OF P3 / 30	2290	0,9	54	F4	n.b.	n.b.
EIII-OF; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
EIII-OF P4 / 15	2341	3,5	1,28 <sup>1)</sup>	C1	2317	50
EIII-OF P4 / 20	2325	3,8	1,27 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EIII-OF P4 / 25	2315	3,8	1,29 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EIII-OF P4 / 30	2315	3,5	1,29 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EIII-OF P4 / 15-35	2352	2,6	1,28 <sup>1)</sup>	C1	2292	41
EIII-OF P4 / 25-35	2294	3,8	1,25 <sup>1)</sup>	C2	n.b.	n.b.
EIII-OF P4 / 30-35	2285	3,9	1,29 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.

1) Verdichtungsmaß

Tabelle A4 2: Frisch- und Festbetonkennwerte der Pessimumbetone mit EIII-OF und EII-OF (Fortsetzung)

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
EIII-OF; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
EIII-OF P5 / 15	2337	0,9	66	F6	2310	43
EIII-OF P5 / 25	2309	1,3	63	F6	n.b.	n.b.
EIII-OF P6 / 15	2321	0,9	65	F6	2301	36
EIII-OF P6 / 25	2301	0,9	68	F6	n.b.	n.b.
EII-OF; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,50						
EII-OF P1 / 15	2306	0,9	67	F6	2309	43
EII-OF P1 / 20	2328	1,1	67	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P1 / 25	2320	1,0	66	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P1 / 30	2316	1,2	66	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P1 / 15-35	2293	0,5	> 70	--	2282	40
EII-OF P1 / 25-35	2275	0,7	67	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P1 / 30-35	2266	0,8	70	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P3 / 15	2337	0,6	57	F5	2319	53
EII-OF P3 / 20	2326	0,9	58	F5	n.b.	n.b.
EII-OF P3 / 25	2331	n.b.	59	F5	n.b.	n.b.
EII-OF P3 / 30	2317	0,9	58	F5	n.b.	n.b.
EII-OF; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
EII-OF P4 / 15	2355	4,0	1,31 <sup>1)</sup>	C1	2354	42
EII-OF P4 / 20	2337	3,8	1,32 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EII-OF P4 / 25	2336	4,0	1,28 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EII-OF P4 / 30	2324	3,5	1,34 <sup>1)</sup>	C1	n.b.	n.b.
EII-OF P4 / 15-35	2336	2,7	1,19 <sup>1)</sup>	C2	n.b.	n.b.
EII-OF P4 / 25-35	2340	2,9	31	F1	n.b.	n.b.
EII-OF P4 / 30-35	2298	3,7	1,24 <sup>1)</sup>	C2	n.b.	n.b.
EII-OF; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,50						
EII-OF P5 / 15-0	2333	0,9	66	F6	2313	45
EII-OF P5 / 25-0	2321	0,9	68	F6	n.b.	n.b.
EII-OF P6 / 15	2321	0,9	65	F6	2301	36
EII-OF P6 / 25	2301	0,9	68	F6	n.b.	n.b.

1) Verdichtungsmaß

Tabelle A4 3: Frisch- und Festbetonkennwerte der Betone mit EIII-OF und EII-OF

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
EIII-OF; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
EIII-OF1	2281	2,1	59	F5	2275	50
EIII-OF1 / F1 15	2277	1,6	65	F6	2246	44
EIII-OF1 / F1 20	2249	1,7	62	F5	2229	39
EIII-OF1 / F1 25	2262	0,7	68	F6	2191	40
EIII-OF1 / F1 30	2256	0,7	71	F6	2214	38
EIII-OF1 / F1 35	2252	1,0	67	F6	2212	37
EIII-OF1 / F2 20	2298	0,8	65	F6	2280	43
EIII-OF1 / F2 30	2292	0,5	66	F6	2266	43
EIII-OF1 / F3 20	2274	1,2	58	F5	2237	39
EIII-OF1 / F3 30	2253	1,3	57	F5	2198	33
EIII-OF1 / KSM 15	2266	1,7	62	F5	2251	37
EIII-OF1 / KSM 30	2255	1,7	63	F6	2228	29
EIII-OF2	2283	2,3	56	F5	n.b.	n.b.
EIII-OF2 / F1 30	2254	1,3	61	F5	n.b.	n.b.
EIII-OF3	2289	1,5	60	F5	2260	44
EIII-OF5	2276	1,8	57	F5	2261	39
EIII-OF5 / 30	2264	0,8	65	F6	2232	35
EIII-OF6	2298	1,4	55	F4	2261	41
EIII-OF7	2268	1,2	58	F5	2262	36
EII-OF; z = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
EII-OF1	2285	2,0	58	F5	44	2275
EII-OF1 / F1 15	2279	1,1	64	F6	38	2254
EII-OF1 / F1 30	2251	0,7	66	F6	36	2231
EII-OF2	2256	2,6	59	F5	44	2267
EII-OF2 / F1 30	2258	1,0	64	F6	n.b.	n.b.

Tabelle A4 4: Frisch- und Festbetonkennwerte der Betone mit Grauwacke

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Grauwacke; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
Gw1	2468	0,9	66	F6	2342	45
Gw1 / F1 20	2323	0,7	66	F6	2272	38
Gw1 / F1 25	2294	0,6	68	F6	2260	36
Gw1 / F1 30	2287	0,7	67	F6	2251	36
Gw1 / F1 35	2279	0,5	70	F6	2285	31
Grauwacke; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
Gw2	2435	0,9	1,2 <sup>1)</sup>	C2	2391	51
Gw2 / KSM 20	2424	1,0	30	F1	2398	45
Gw2 / KSM 30	2418	1,3	30	F1	2368	41
Gw2 / F1 20	2421	0,8	36	F2	2394	42
Gw2 / F1 25	2408	0,9	38	F2	2391	41
Gw2 / F1 30	2388	0,5	46	F3	2369	39
Gw2 / F1 35	2412	1,2	34	F1	2361	44
Gw2 / F2 20	2422	1,1	35	F1	2394	48
Gw2 / F2 25	2430	0,8	34	F1	2392	51
Gw2 / F2 30	2399	1,0	35	F1	2381	47
Gw2 / F3 20	2411	1,1	35	F1	2384	48
Gw2 / F3 25	2406	1,1	32	F1	2368	44
Gw2 / F3 30	2398	1,1	31	F1	2353	43
Grauwacke; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
Gw2a	2411	0,7	44	F3	2391	43
Gw2a / F1 30	2380	0,4	53	F4	2329	36
Grauwacke; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
Gw3	2438	1,0	33	F1	2415	51
Gw3 / F1 30	2408	0,6	36	F2	2377	42
Gw4	2433	1,5	29	F1	2398	57
Gw4 / F1 30	2412	n.b.	31	F1	2354	46
Gw5	2443	0,6	35	F2	2407	54
Gw5 / F1 30	2407	0,8	37	F2	2364	38

1) Verdichtungsmaß

Tabelle A4 4: Frisch- und Festbetonkennwerte der Betone mit Grauwacke (Fortsetzung)

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Grauwacke; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
Gw6	2422	0,9	34	F1	2396	50
Gw6 / F1 30	2385	1,3	38	F2	2372	39
Gw7	2447	0,8	34	F1	2393	46
Gw8	2414	0,9	37	F2	2396	45

Tabelle A4 5: Frisch- und Festbetonkennwerte der Betone mit Kies Oberrhein

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Kies Oberrhein; b = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
KoR1	2313	0,8	66	F6	2272	41
KoR1 / F1 20	2240	0,8	> 70	--	2264	40
KoR1 / F1 30	2224	0,7	68	F6	2235	31
Kies Oberrhein; b = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
KoR2	2381	1,2	37	F2	2352	48
KoR2 / F1 20	2349	1,1	47	F3	2319	48
KoR2 / F1 30	2347	1,0	44	F3	2321	40

Tabelle A4 6: Frisch- und Festbetonkennwerte der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrhein

Bezeichnung der Mischung	$\rho$ Frischbeton	Luftgehalt	Ausbreitmaß	Konsistenz	$\rho$ Festbeton	DF 28d
--	kg/m <sup>3</sup>	Vol.-%	cm	--	kg/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
Splitt Oberrhein; z = 500kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,5						
SoR1	2325	0,9	66	F6	2301	46
SoR1 / F1 20	2251	0,8	70	F6	2255	45
SoR1 / F1 25	2253	0,6	70	F6	2255	43
SoR1 / F1 30	2258	0,5	> 70	--	2238	38
Splitt Oberrhein; z = 400kg/m <sup>3</sup> ; w/b = 0,45						
SoR2	2384	1,4	34	F1	2380	53
SoR2 / F1 20	2389	0,7	40	F2	2360	51
SoR2 / F1 25	2369	1,0	39	F2	2343	48
SoR2 / F1 30	2374	1,0	39	F2	2327	47
SoR2 / F1 35	2364	0,8	44	F3	2334	50
SoR2 / F2 20	2381	0,8	39	F2	2362	55
SoR2 / F2 25	2377	0,7	45	F3	2353	55
SoR2 / F2 30	2389	0,5	45	F3	2360	50
SoR2 / F3 20	2373	0,9	34	F1	2337	51
SoR2 / F3 25	2364	1,0	33	F1	2343	52
SoR2 / F3 30	2351	1,0	32	F1	2335	49

### Anhang 5: Ergebnisse aus der Nebelkammerlagerung

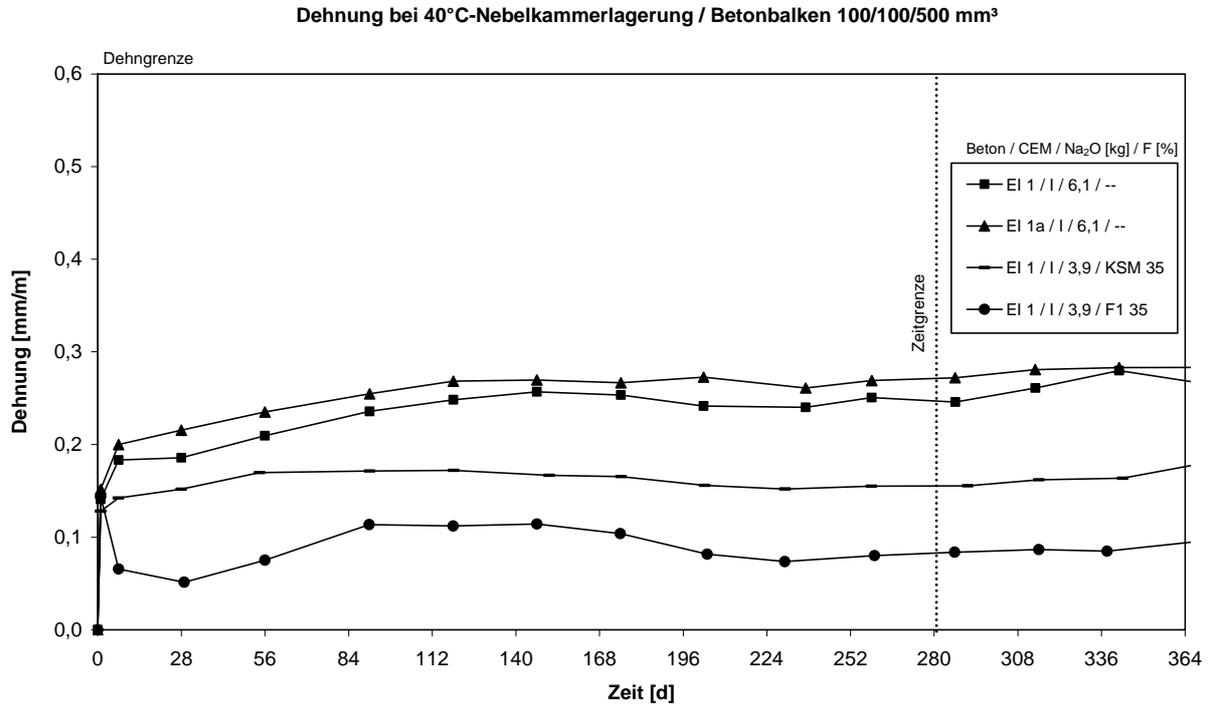


Abbildung A5 1: Dehnungsverlauf der Referenzbetone EI 1 mit inerten Gesteinskörnungen

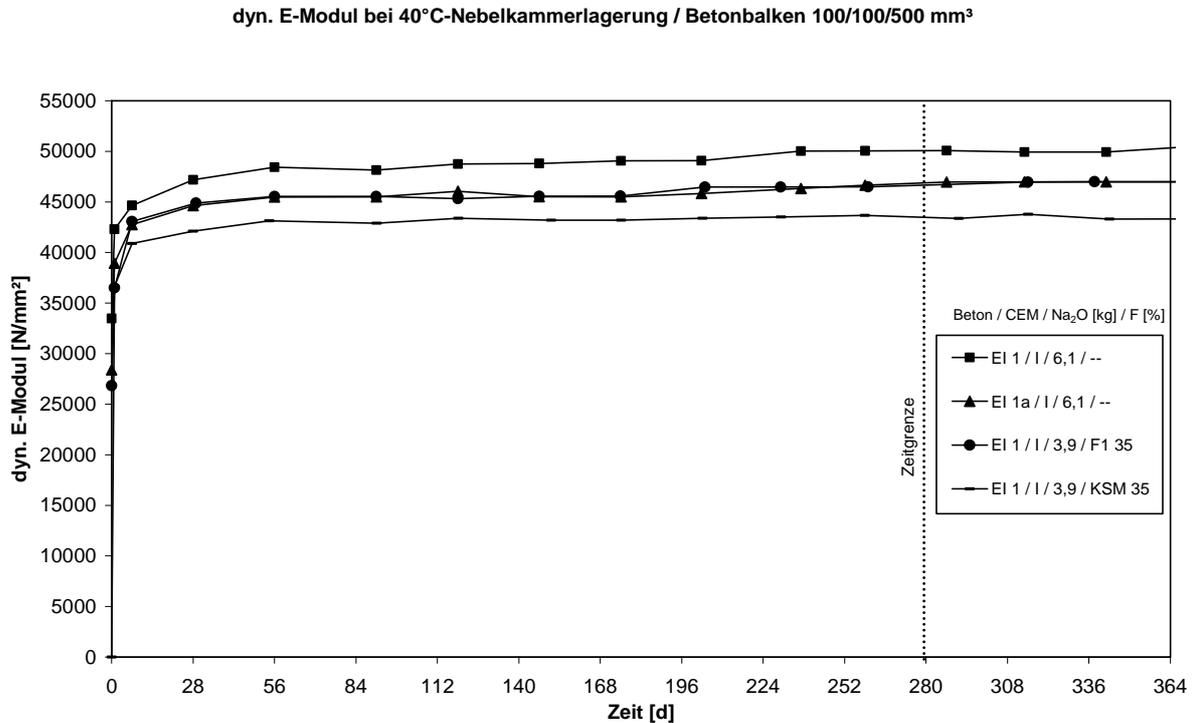


Abbildung A5 2: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Referenzbetone EI 1 mit inerten Gesteinskörnungen

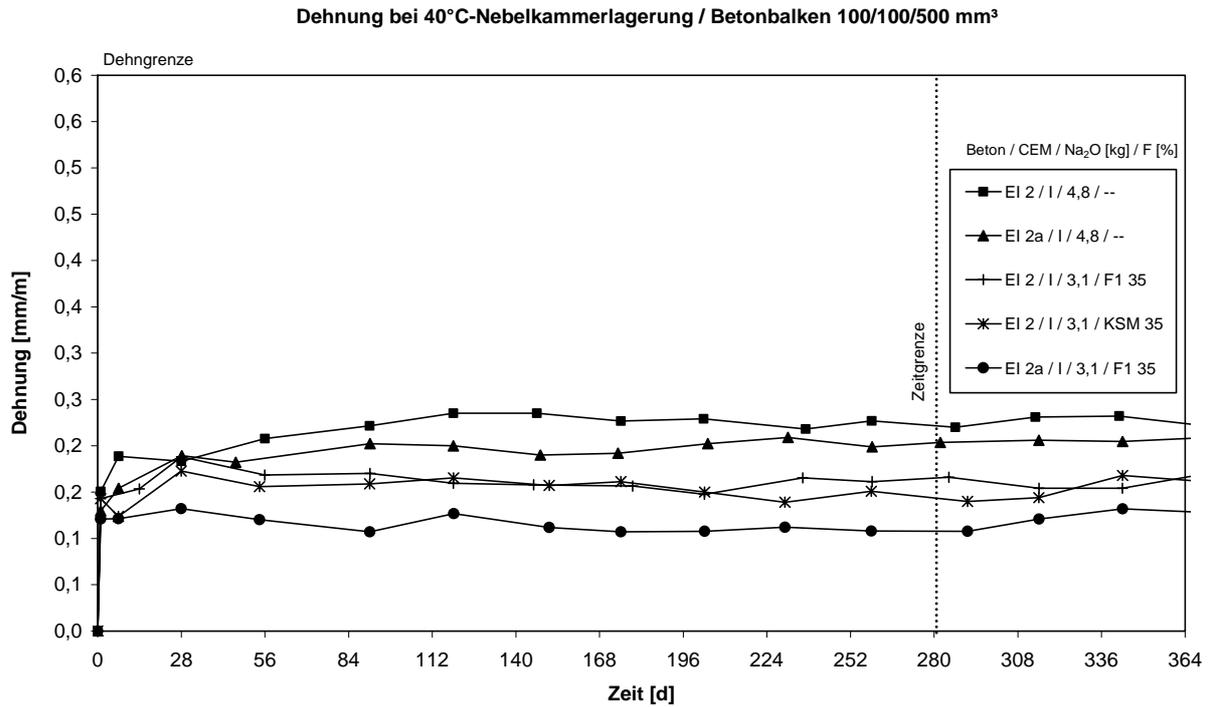


Abbildung A5 3: Dehnungsverlauf der Referenzbetone EI 2 mit inerten Gesteinskörnungen

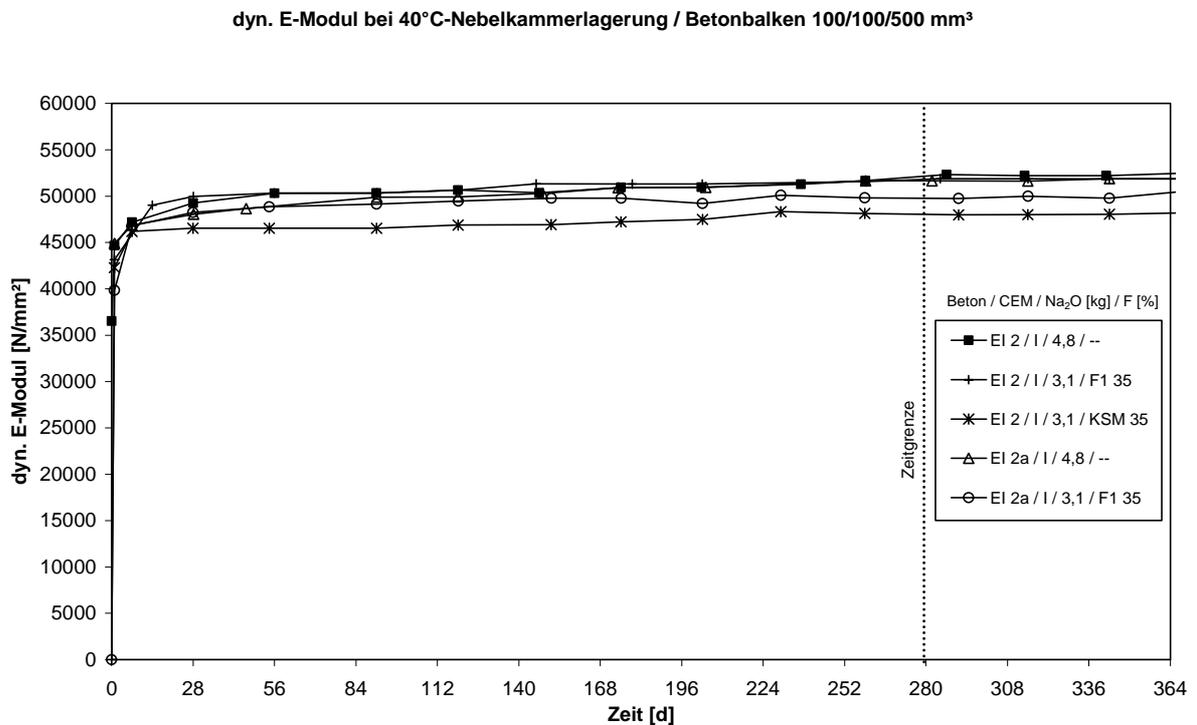


Abbildung A5 4: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Referenzbetone EI 2 mit inerten Gesteinskörnungen

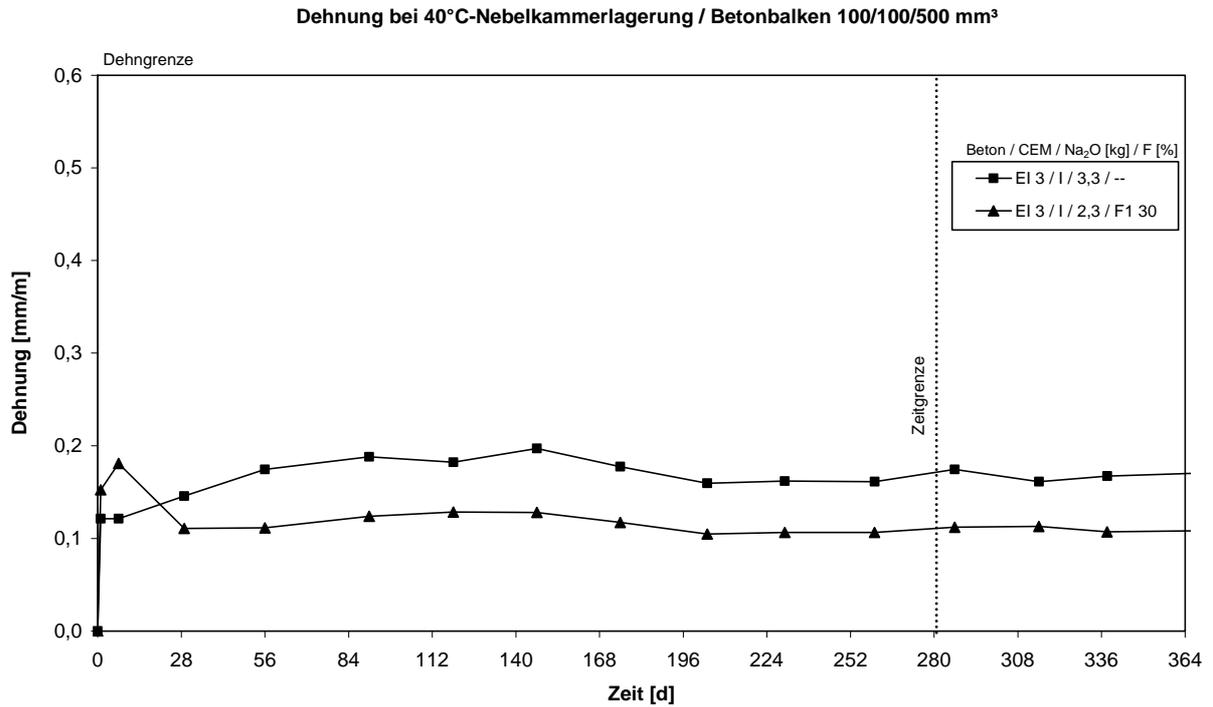


Abbildung A5 5: Dehnungsverlauf der Referenzbetone EI 3 mit inerten Gesteinskörnungen

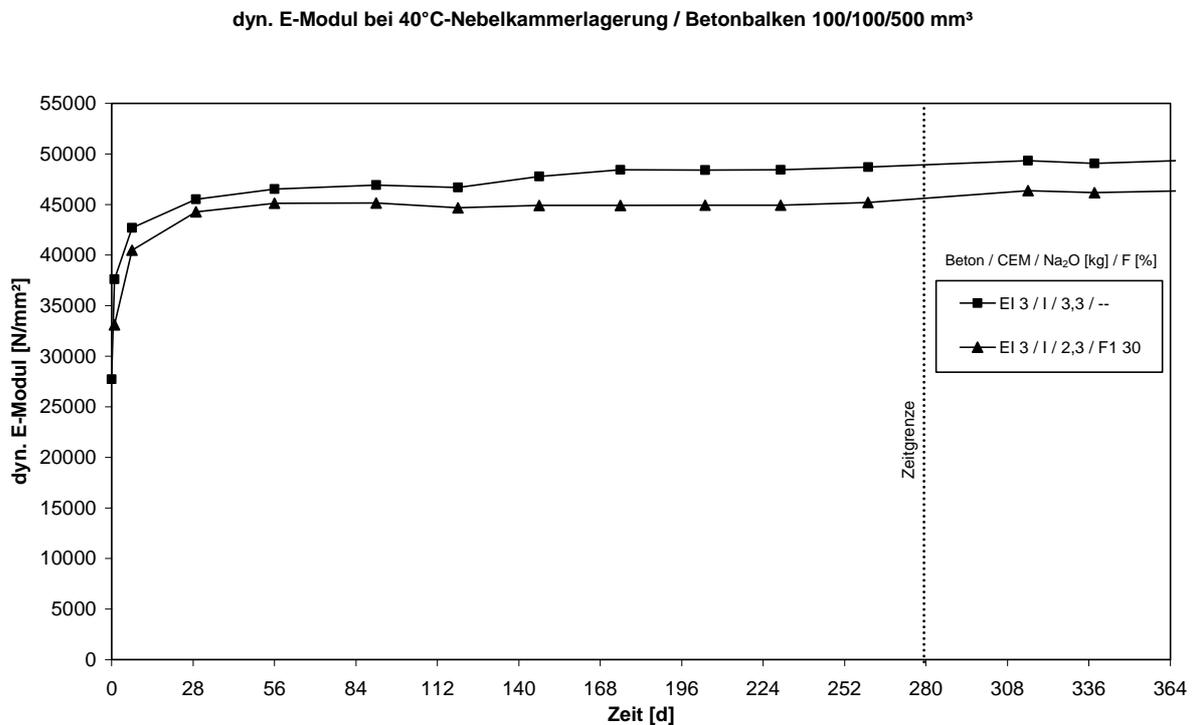


Abbildung A5 6: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Referenzbetone EI 3 mit inerten Gesteinskörnungen

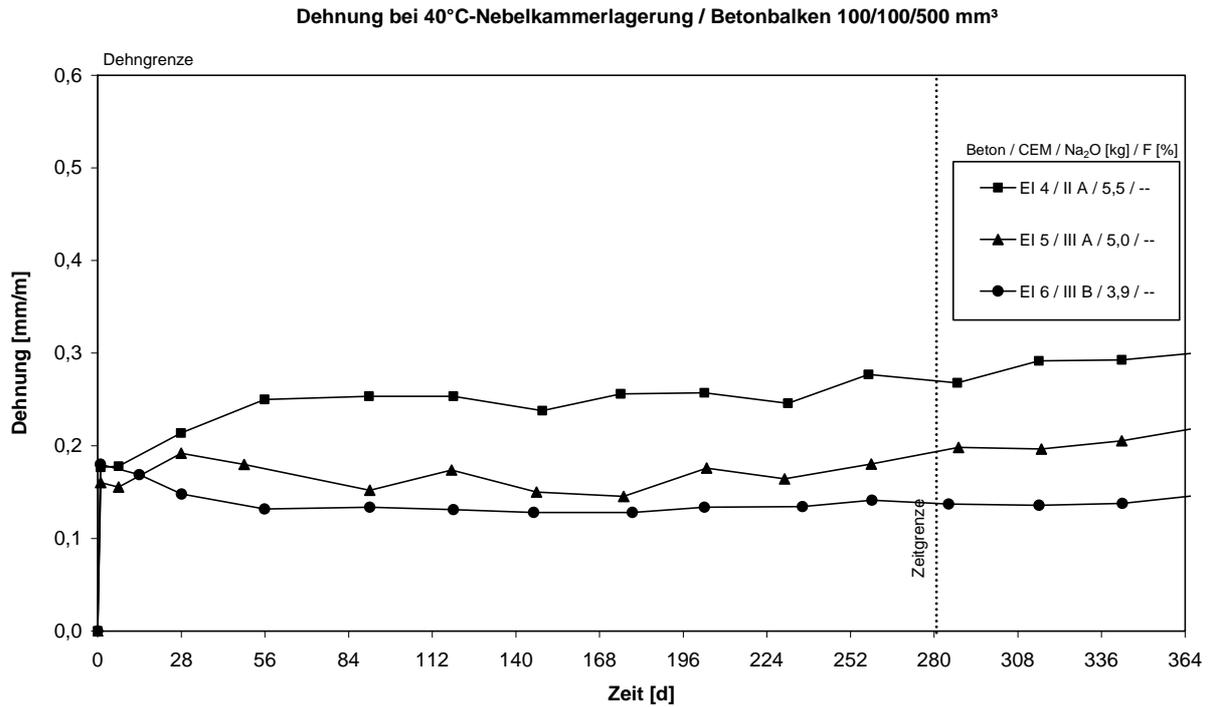


Abbildung A5 7: Dehnungsverlauf der Referenzbetone EI 4, EI 5 und EI 6 mit inerten Gesteinskörnungen

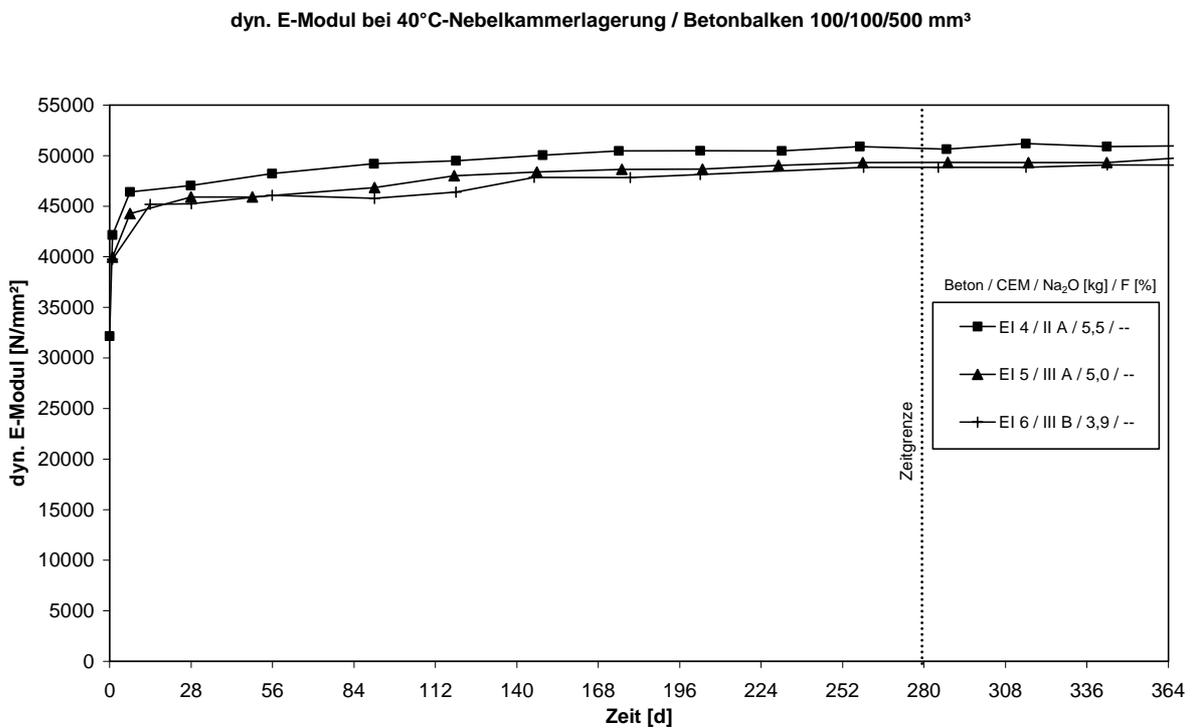


Abbildung A5 8: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Referenzbetone EI 4, EI 5 und EI 6 mit inerten Gesteinskörnungen

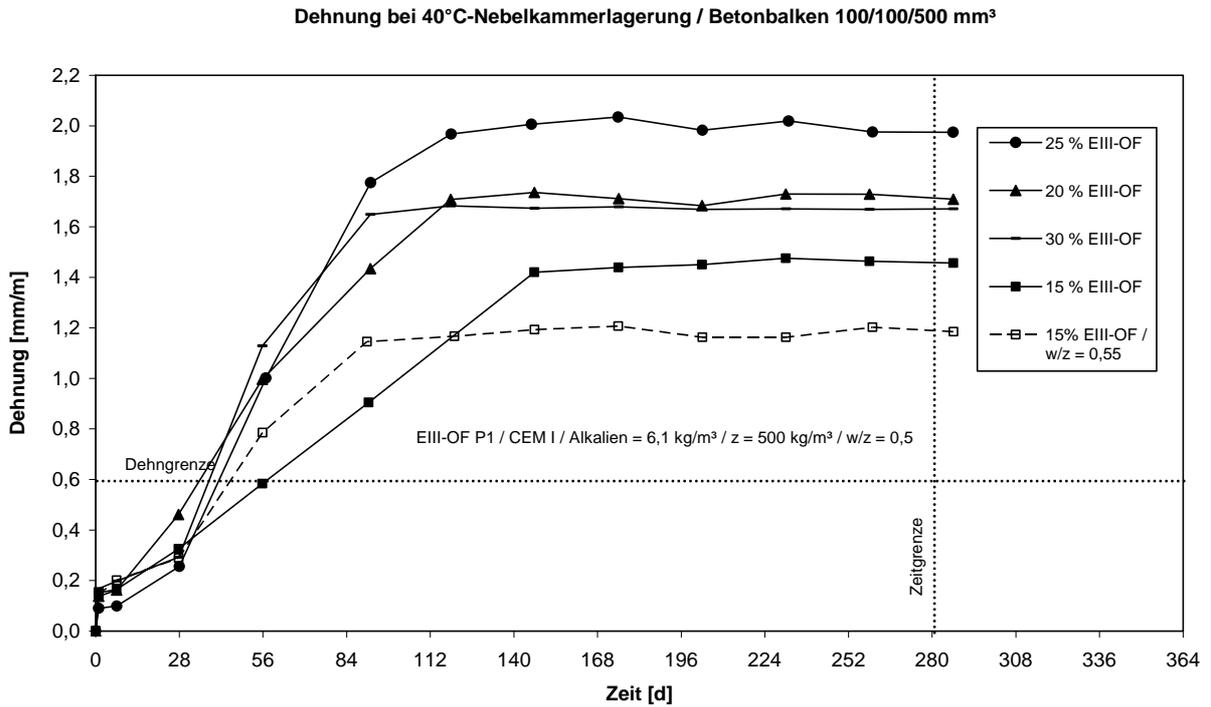


Abbildung A5 9: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P1

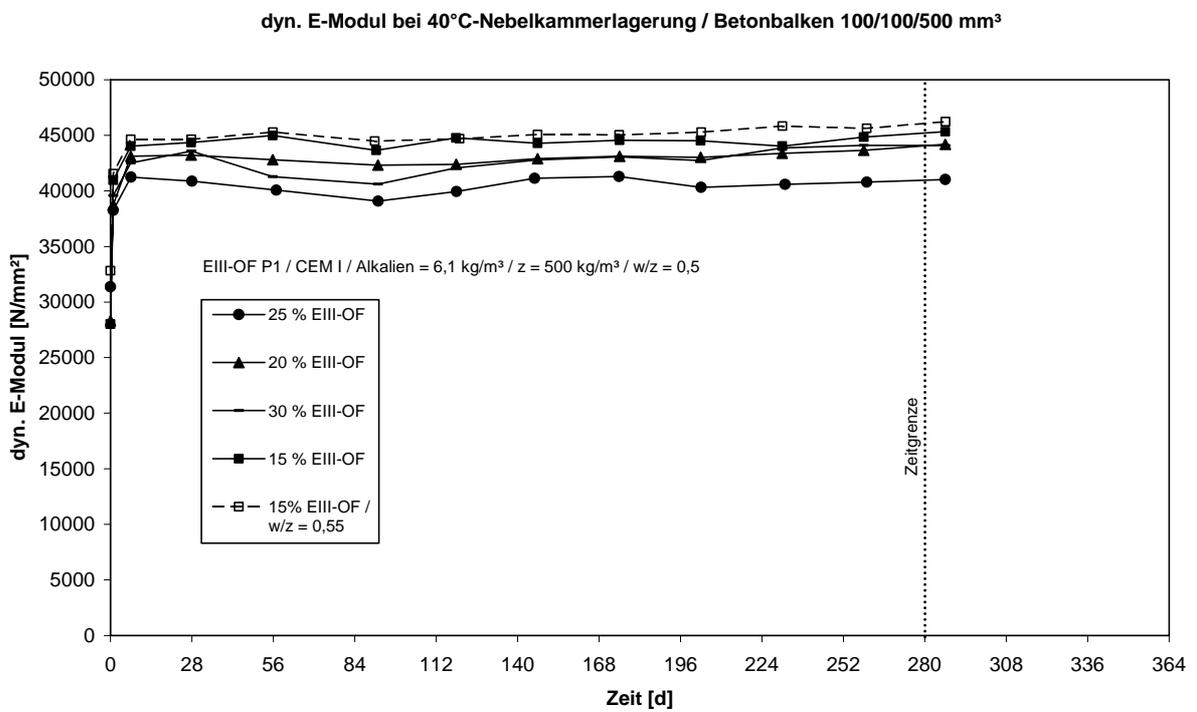


Abbildung A5 10: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P1

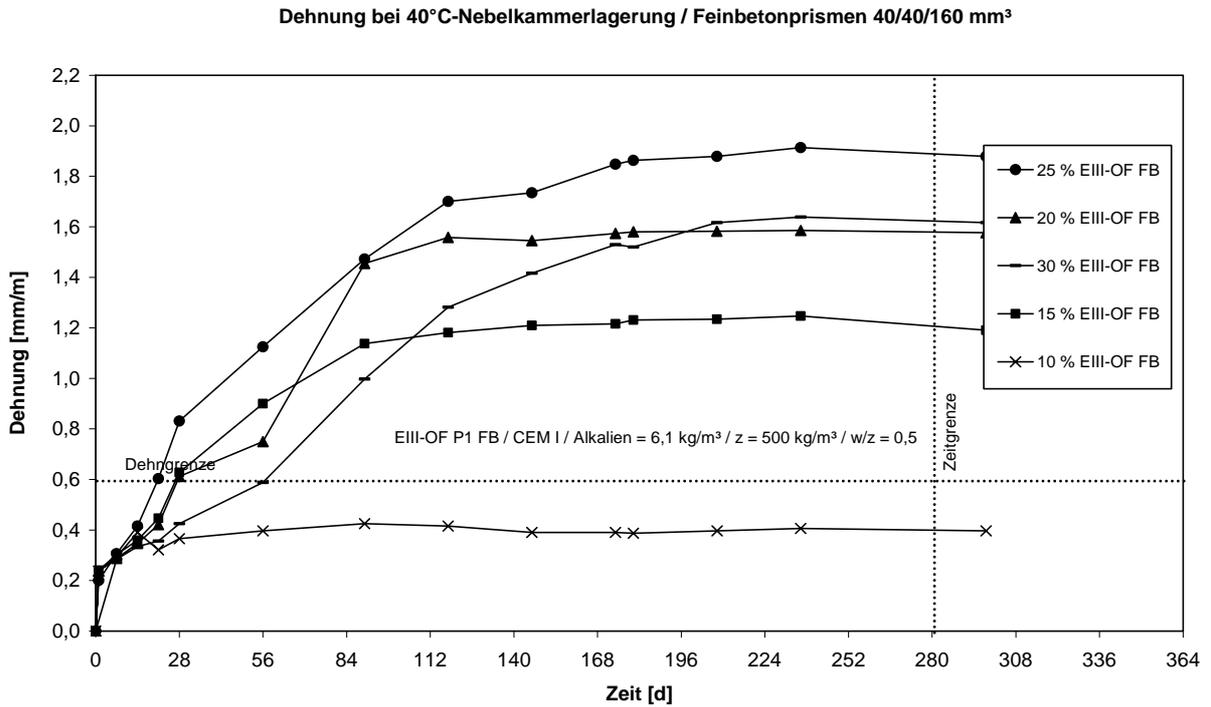


Abbildung A5 11: Dehnungsverlauf der Pessimfeinbetone EIII-OF / P1 FB

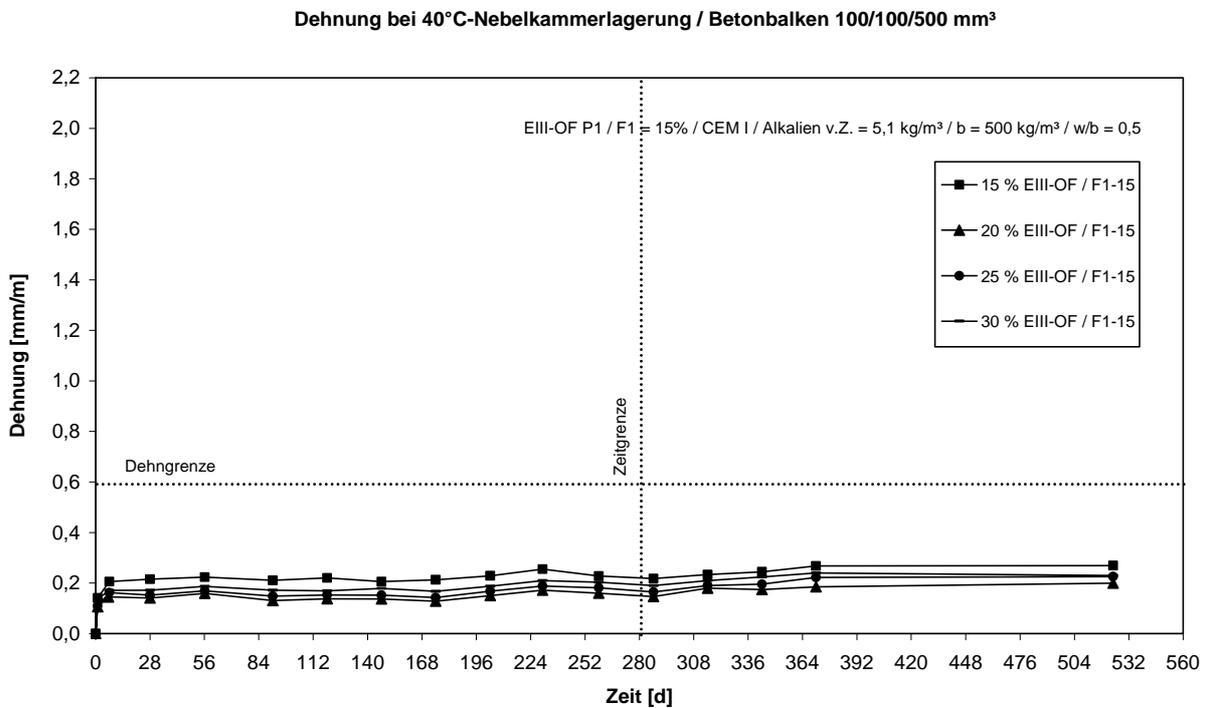


Abbildung A5 12: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P1 / F1-15

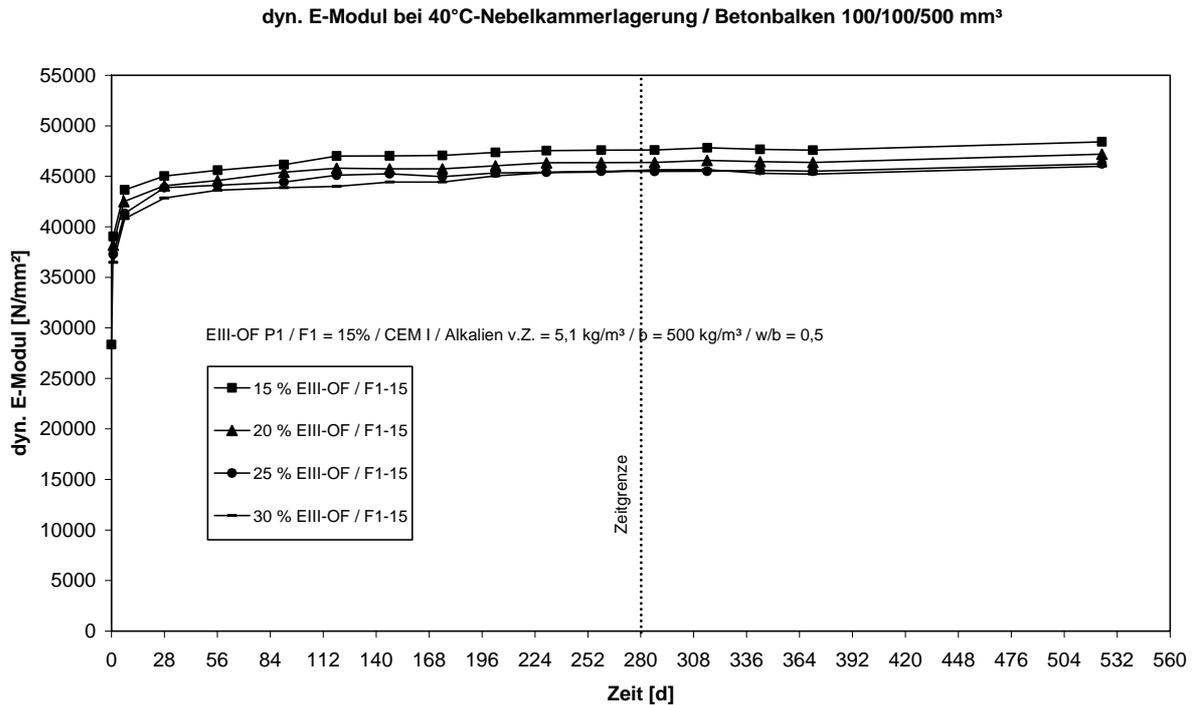


Abbildung A5 13: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P1 / F1-15

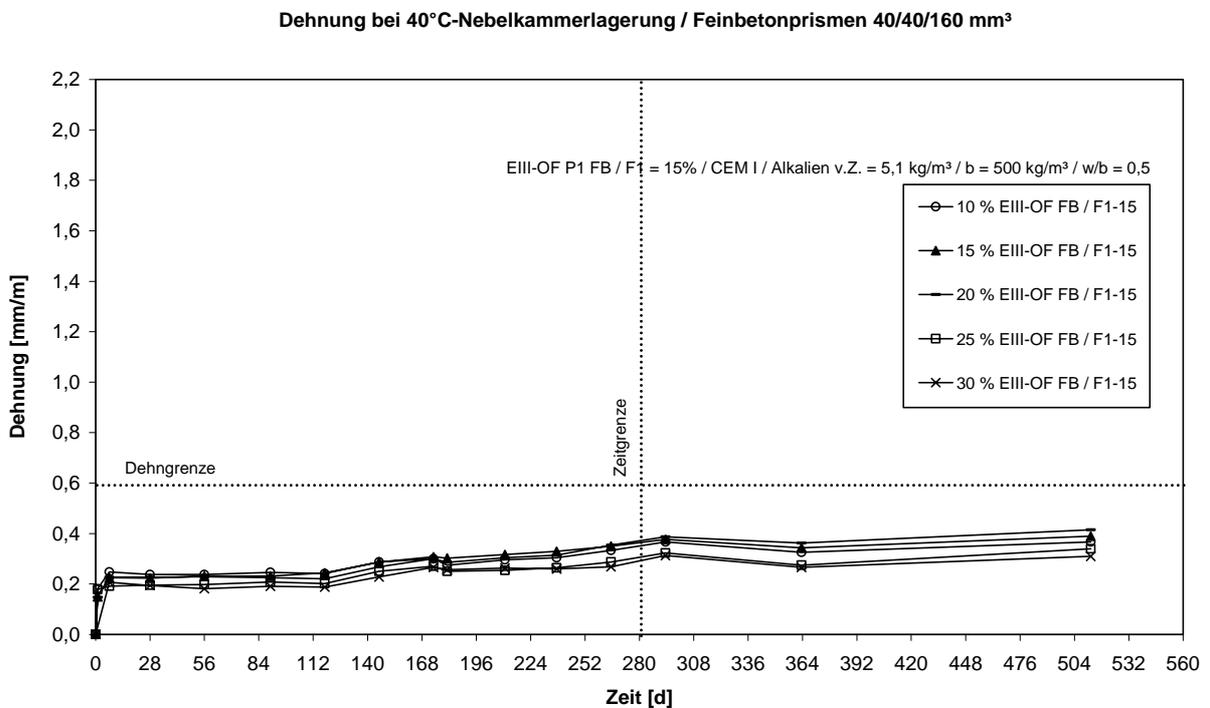


Abbildung A5 14: Dehnungsverlauf der Pessimumfeinbetone EIII-OF P1 FB / F1-15

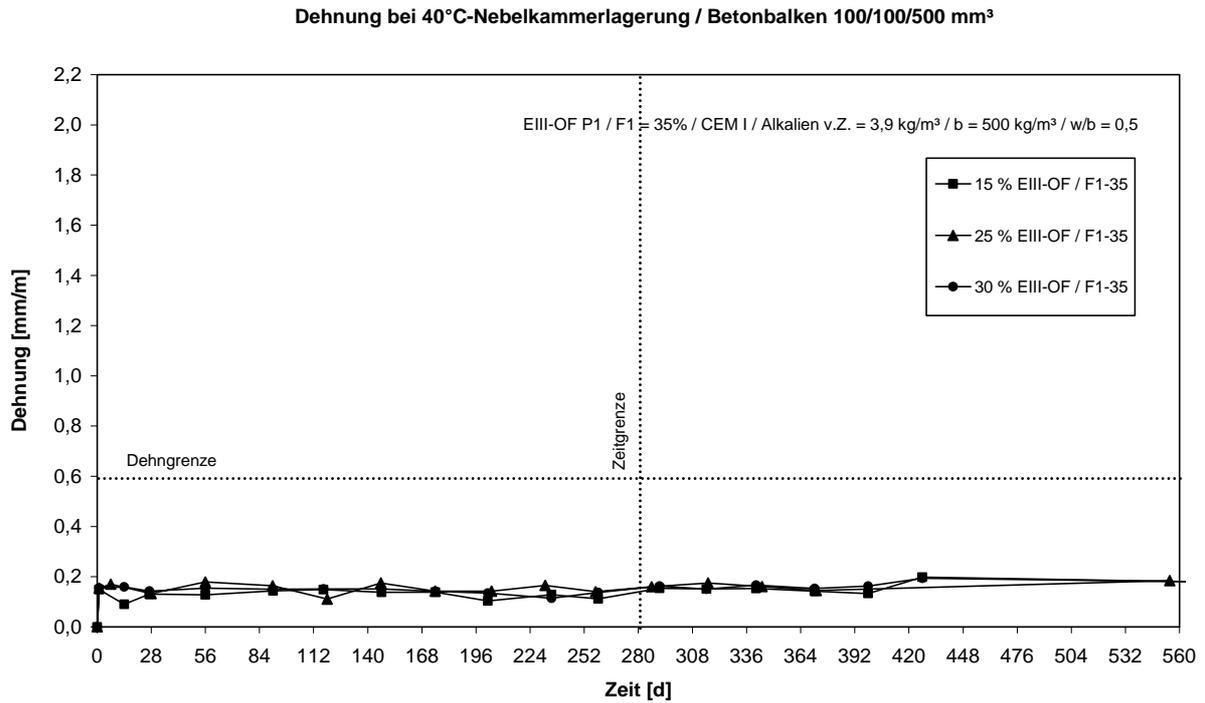


Abbildung A5 15: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P1 / F1-35

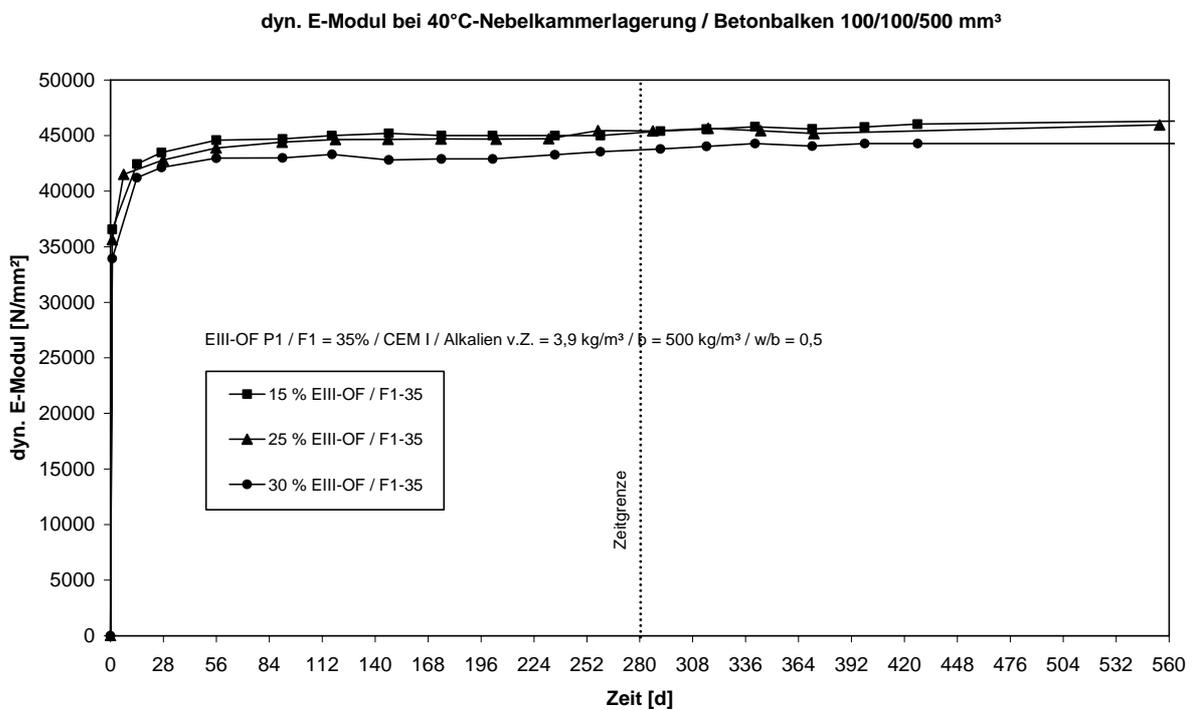


Abbildung A5 16: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P1 / F1-35

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Feinbetonprismen 40/40/160 mm<sup>3</sup>

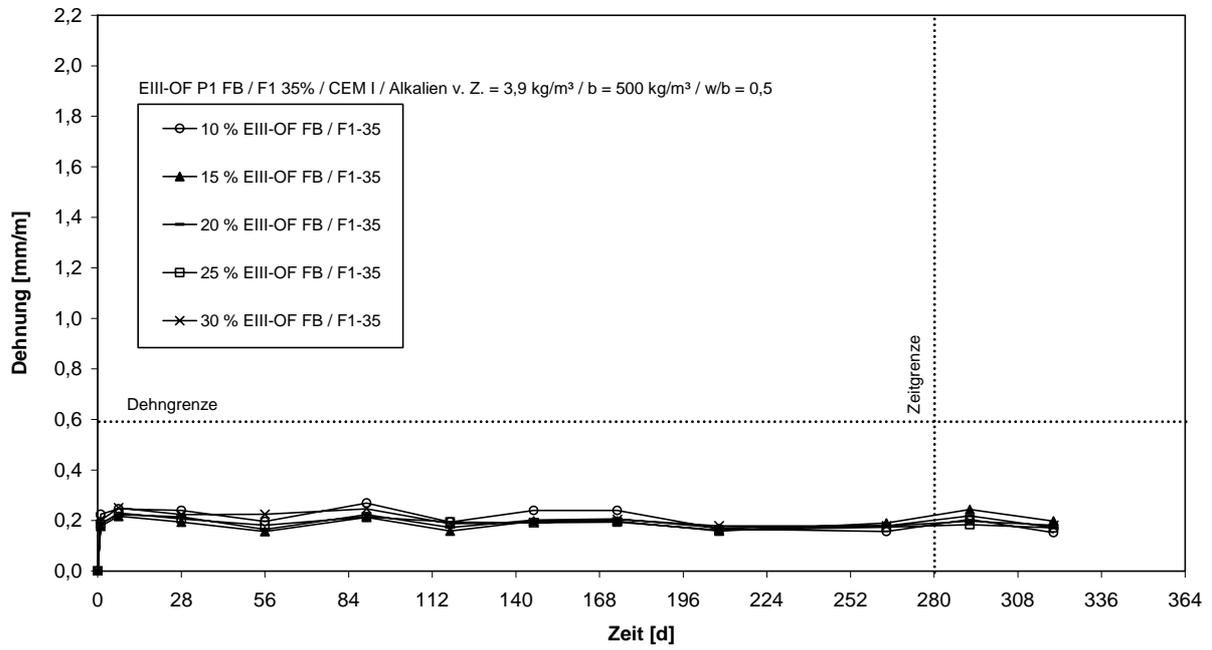


Abbildung A5 17: Dehnungsverlauf der Pessimumfeinbetone EIII-OF P1 FB / F1-35

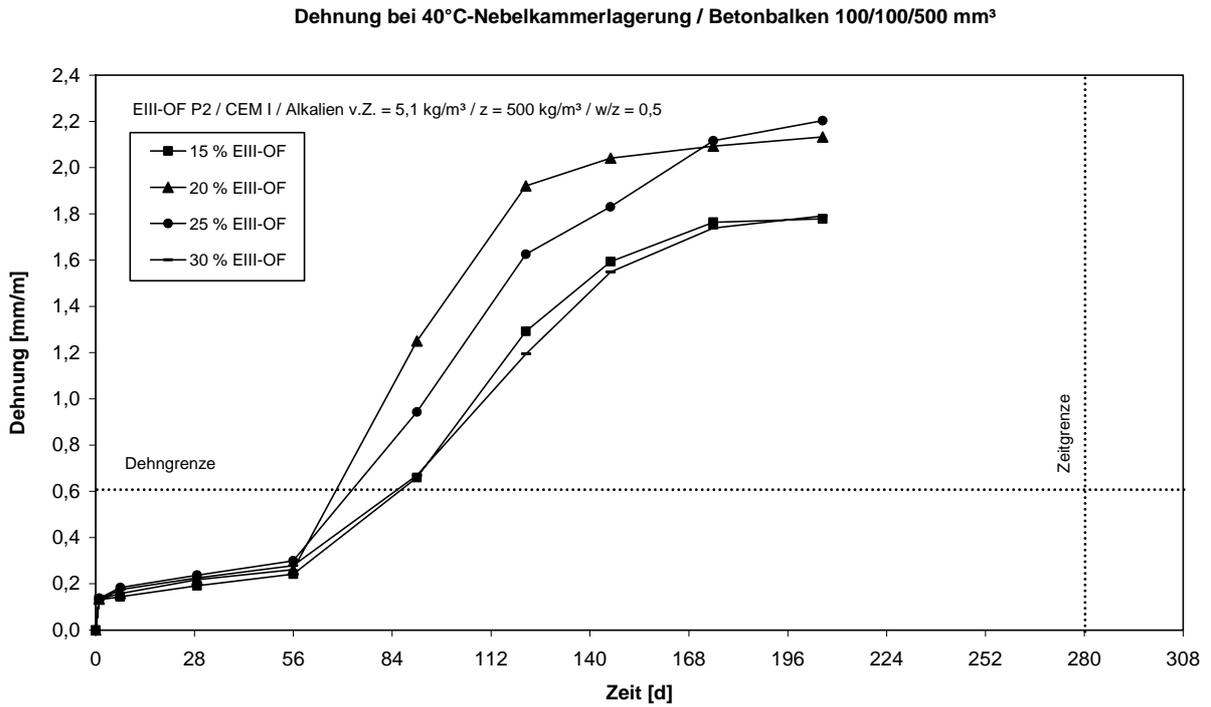


Abbildung A5 18: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P2

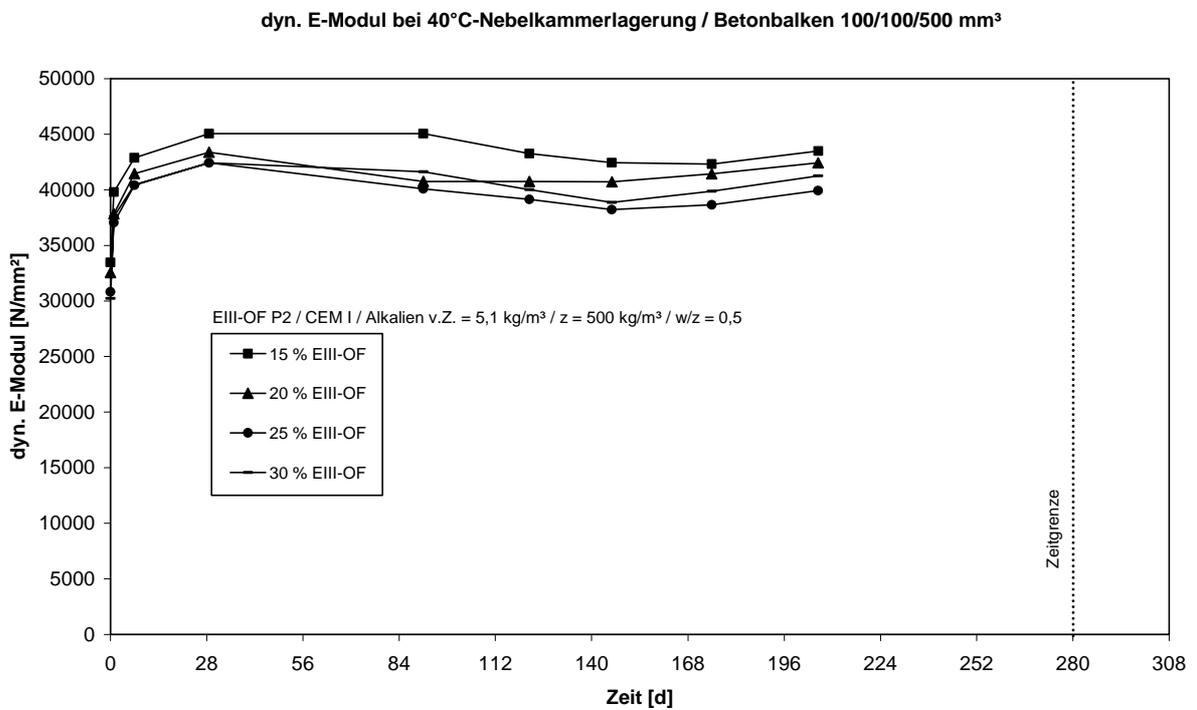


Abbildung A5 19: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P2

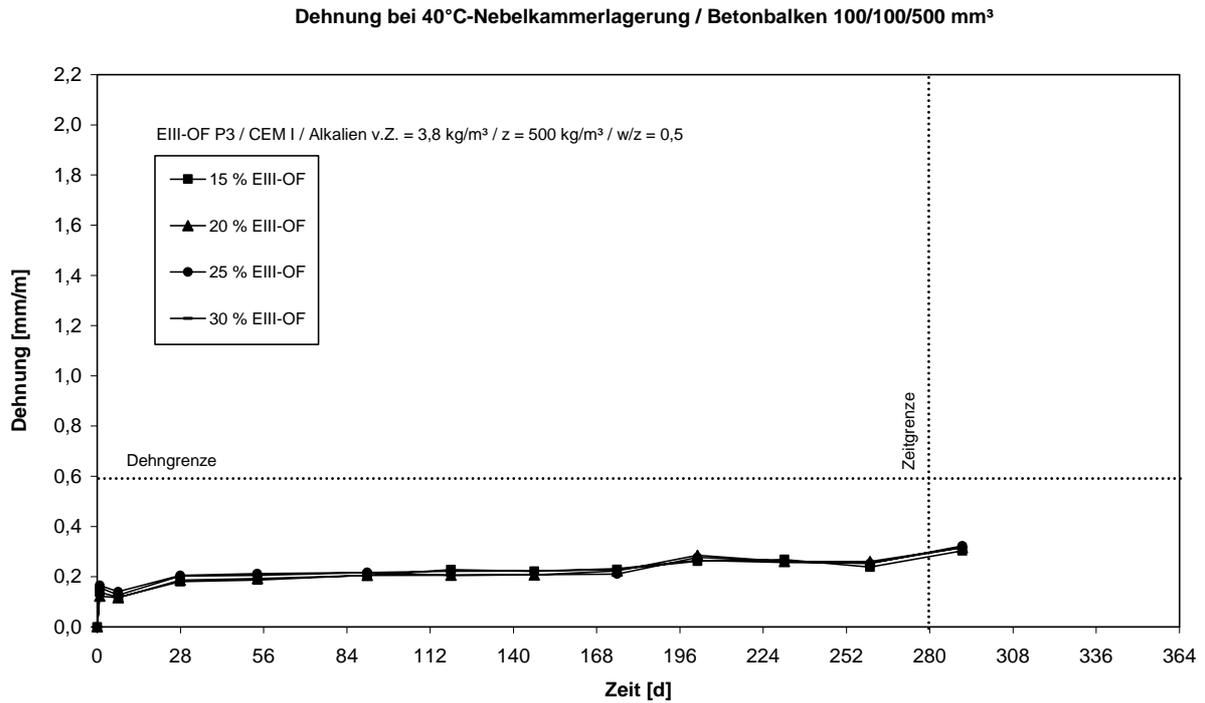


Abbildung A5 20: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P3

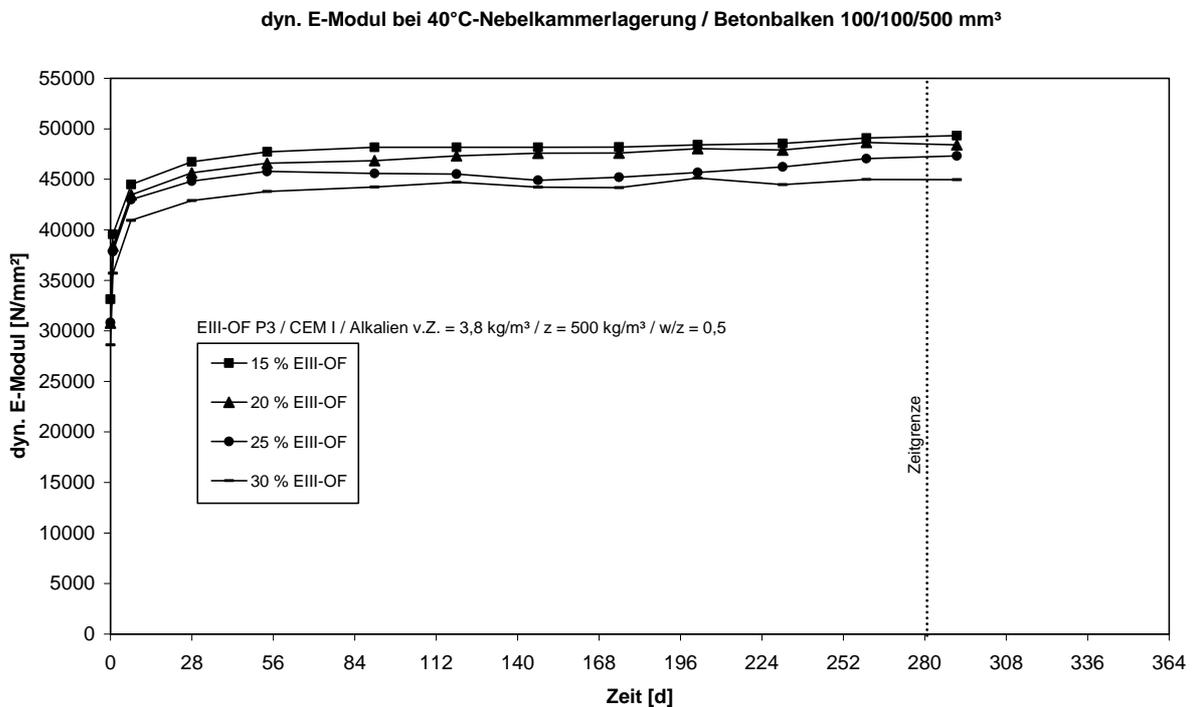


Abbildung A5 21: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P3

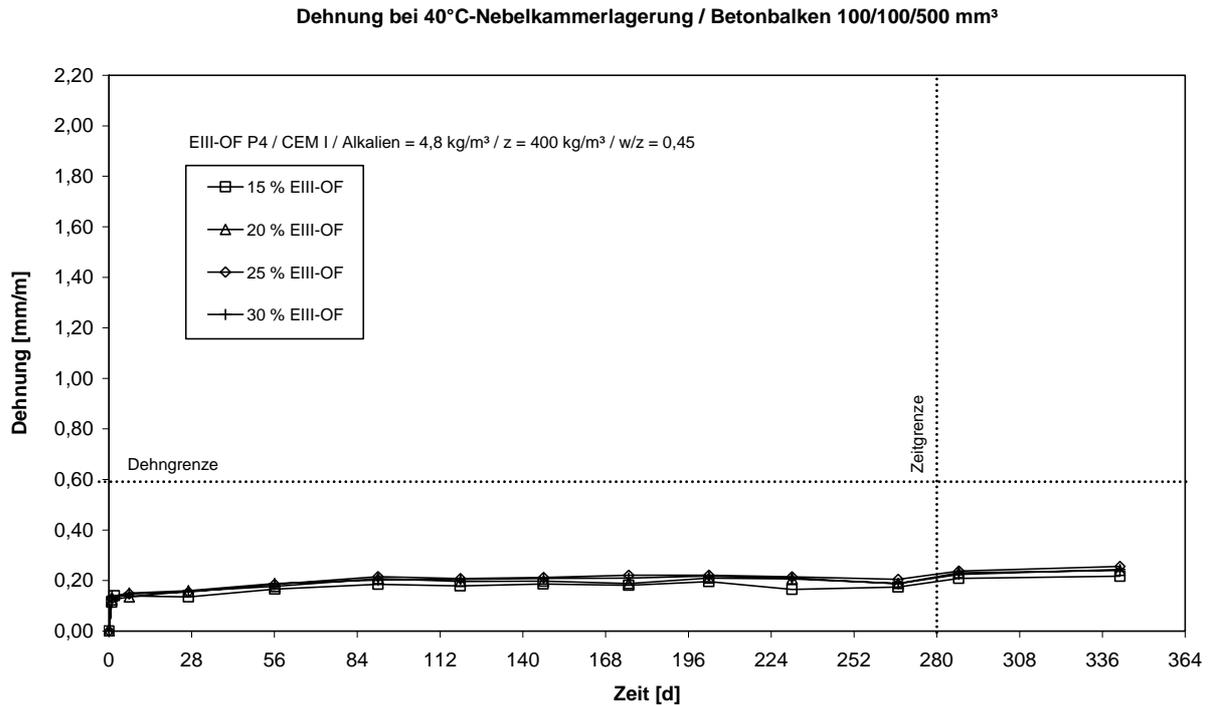


Abbildung A5 22: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P4

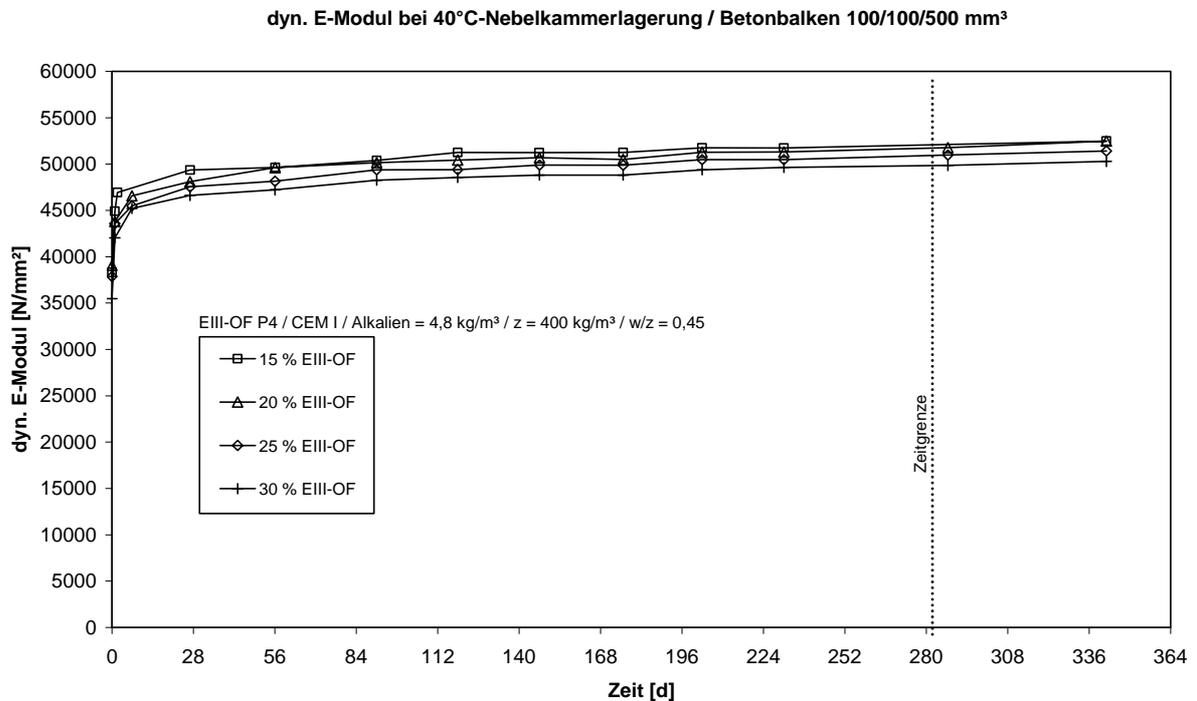


Abbildung A5 23: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P4

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

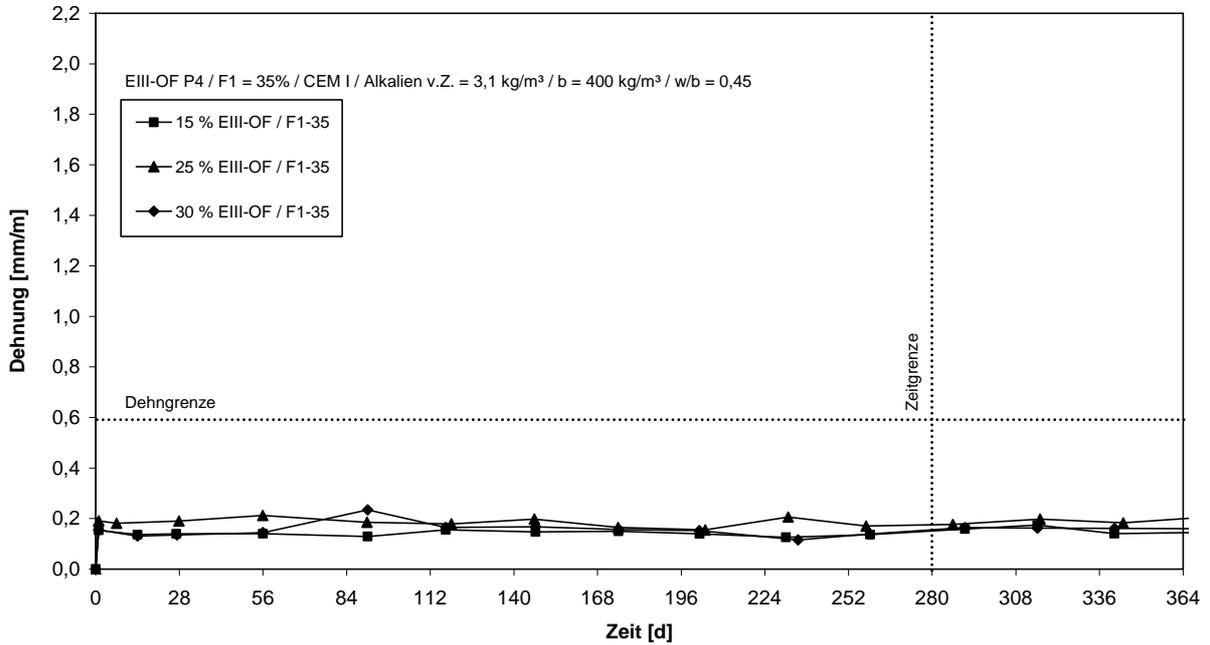


Abbildung A5 24: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EIII-OF P4 / F1-35

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

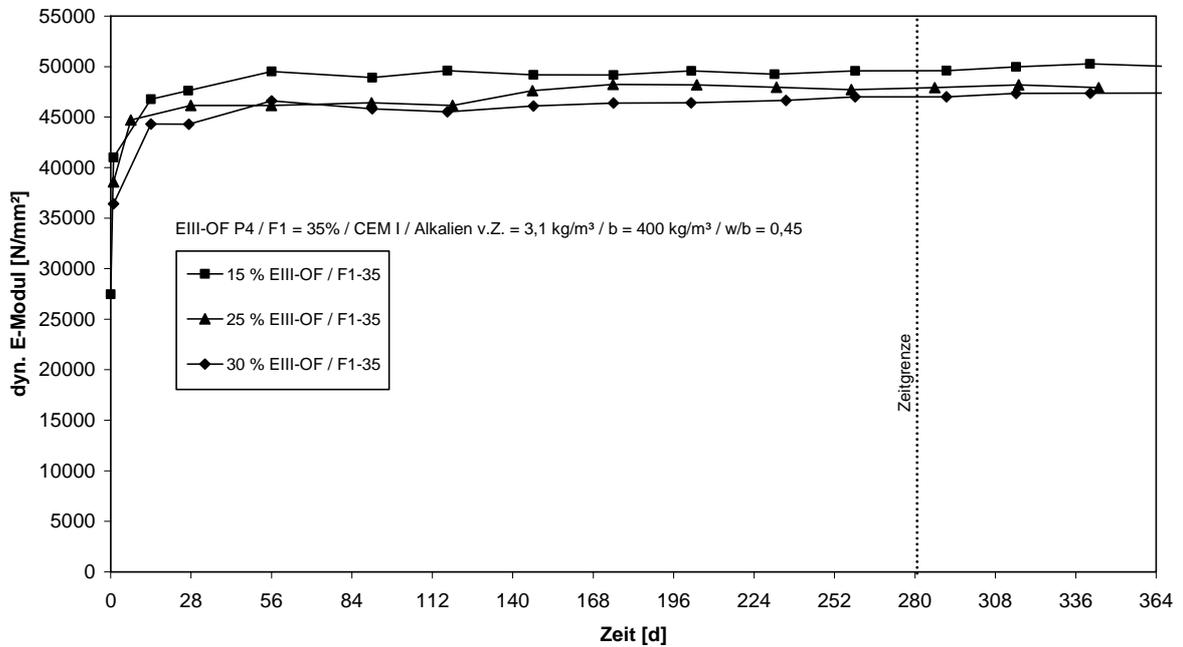


Abbildung A5 25: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P4 / F1-35

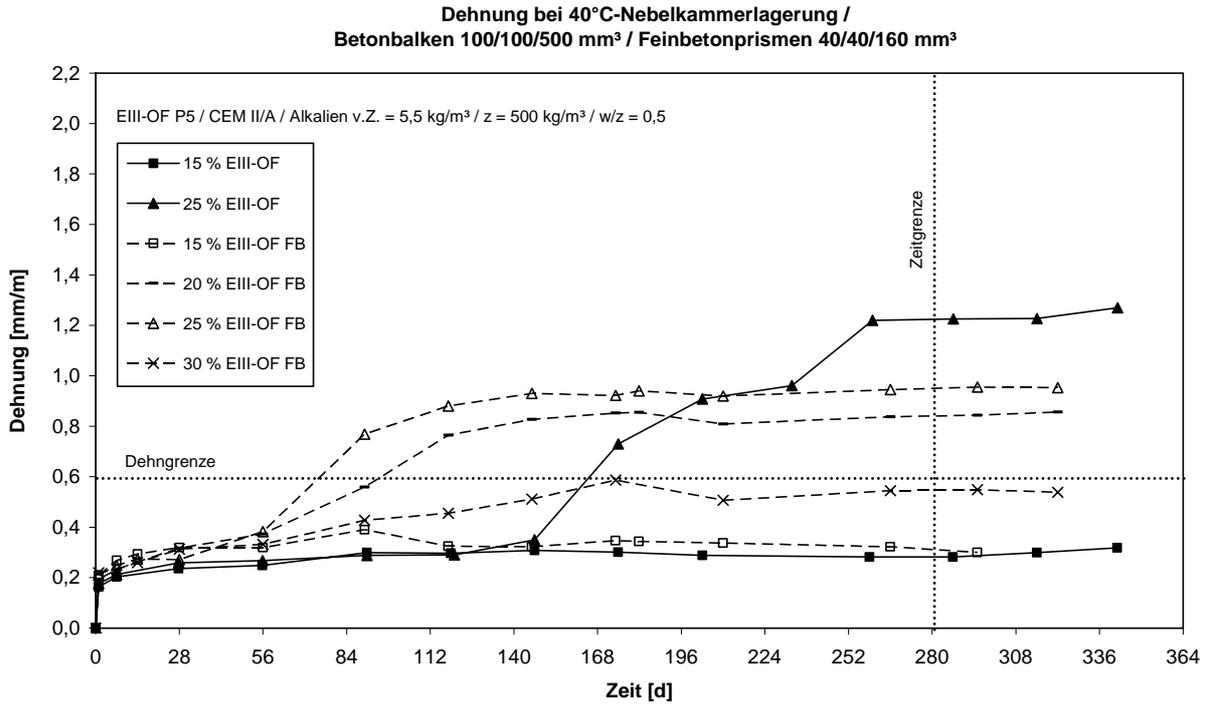


Abbildung A5 26: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone / -feinbetone EIII-OF P5

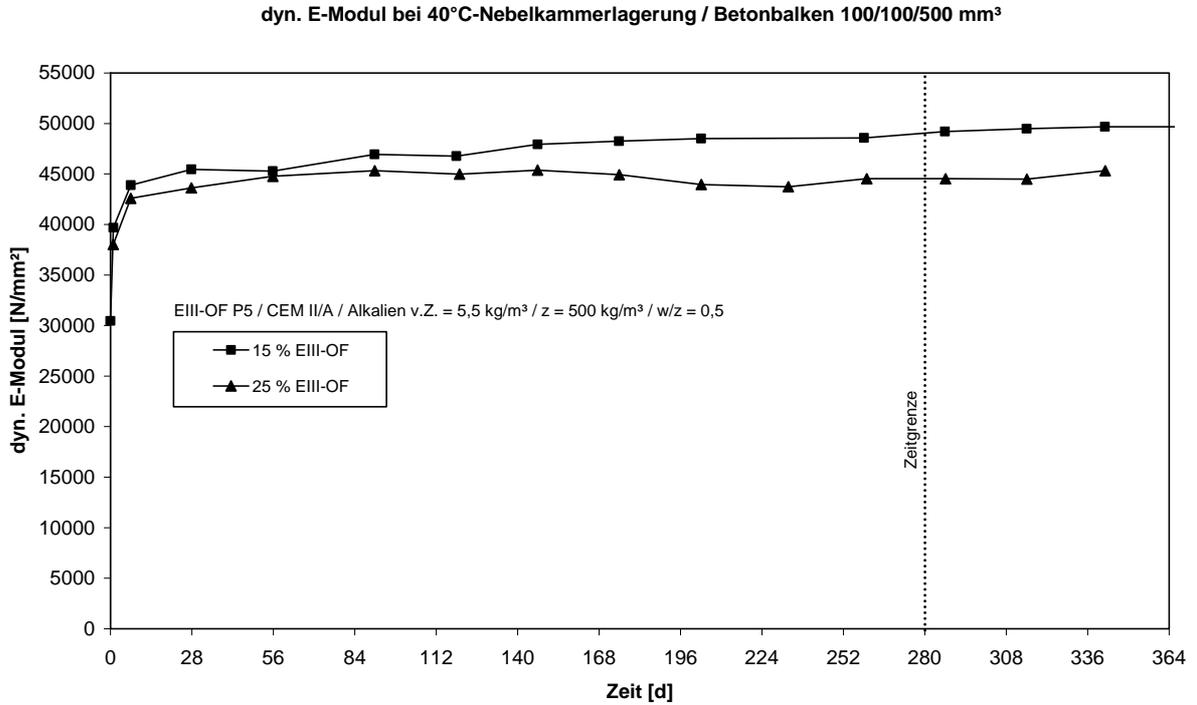


Abbildung A5 27: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P5

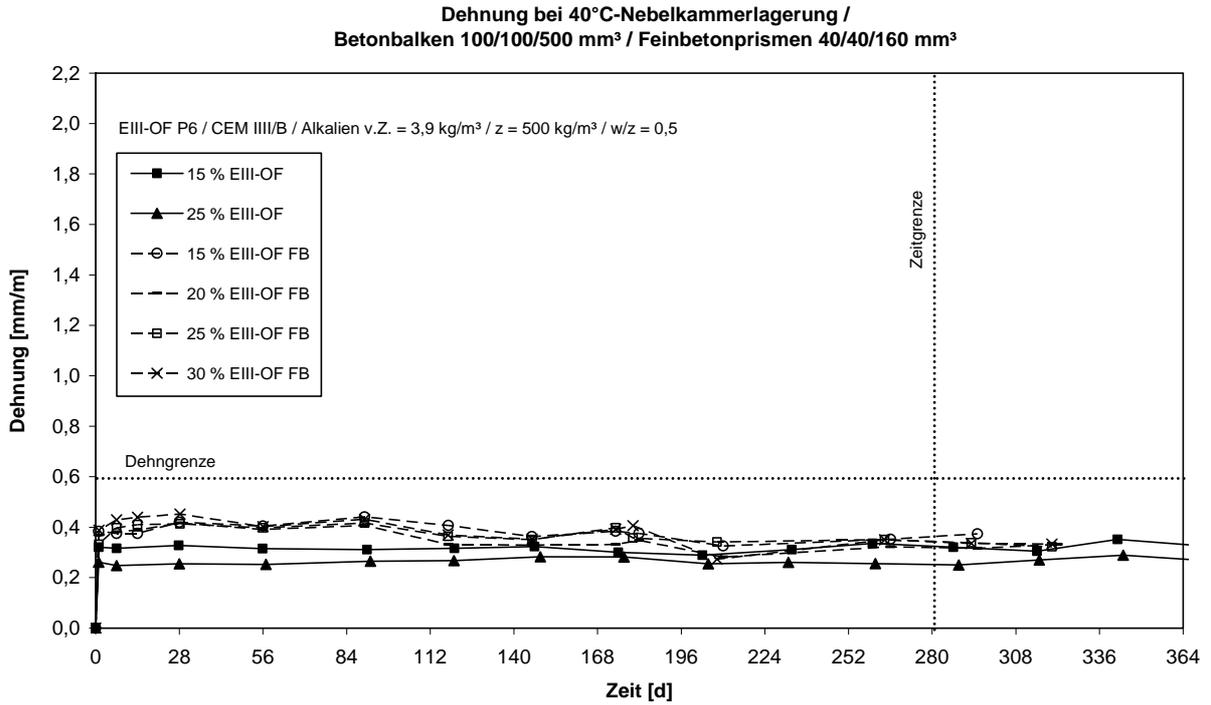


Abbildung A5 28: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone / -feinbetone EIII-OF P6

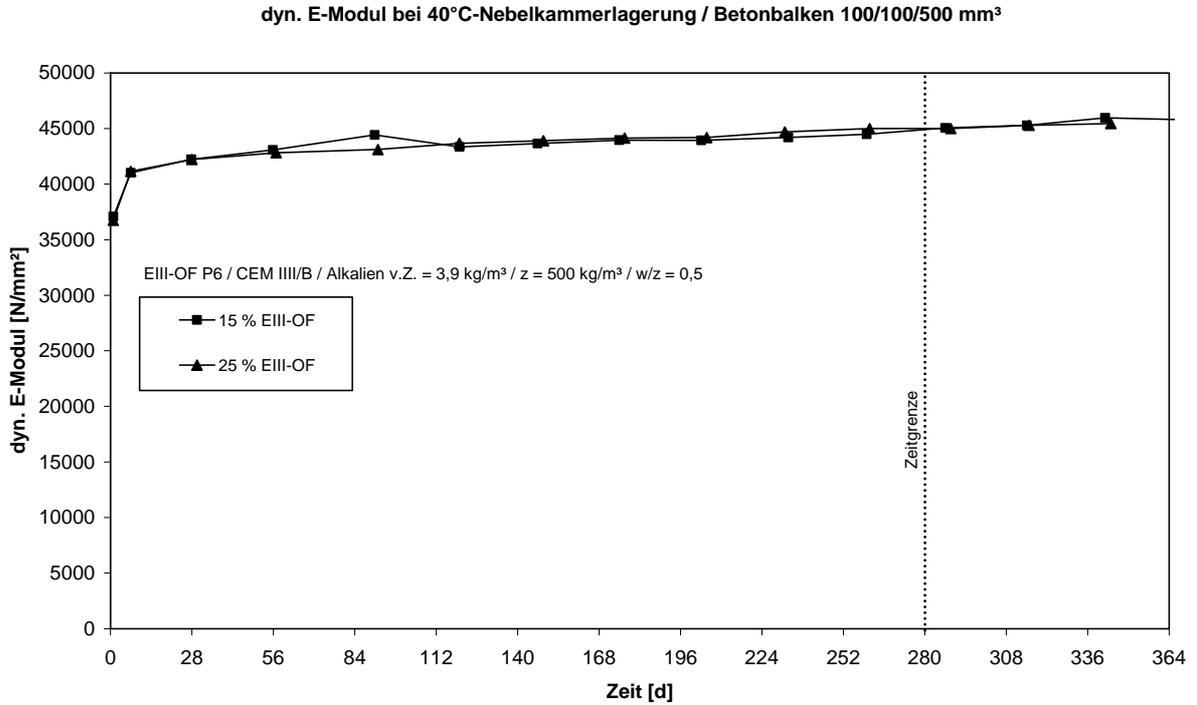


Abbildung A5 29: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EIII-OF P6

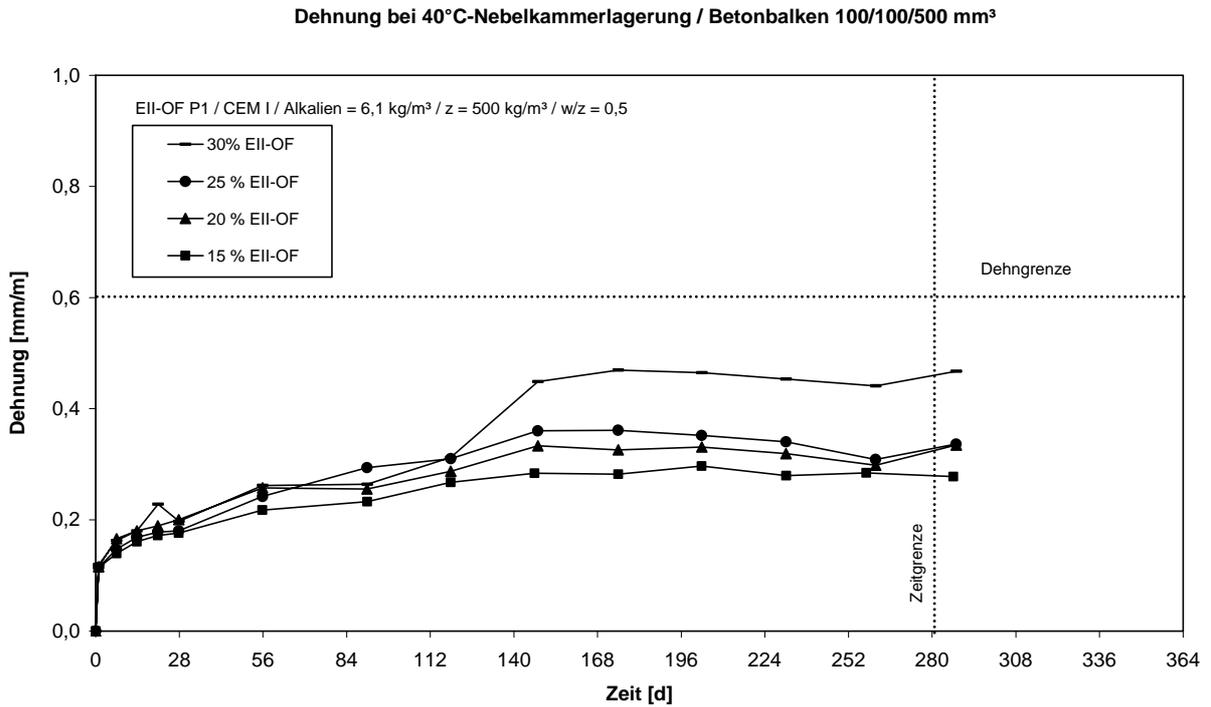


Abbildung A5 30: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EII-OF P1

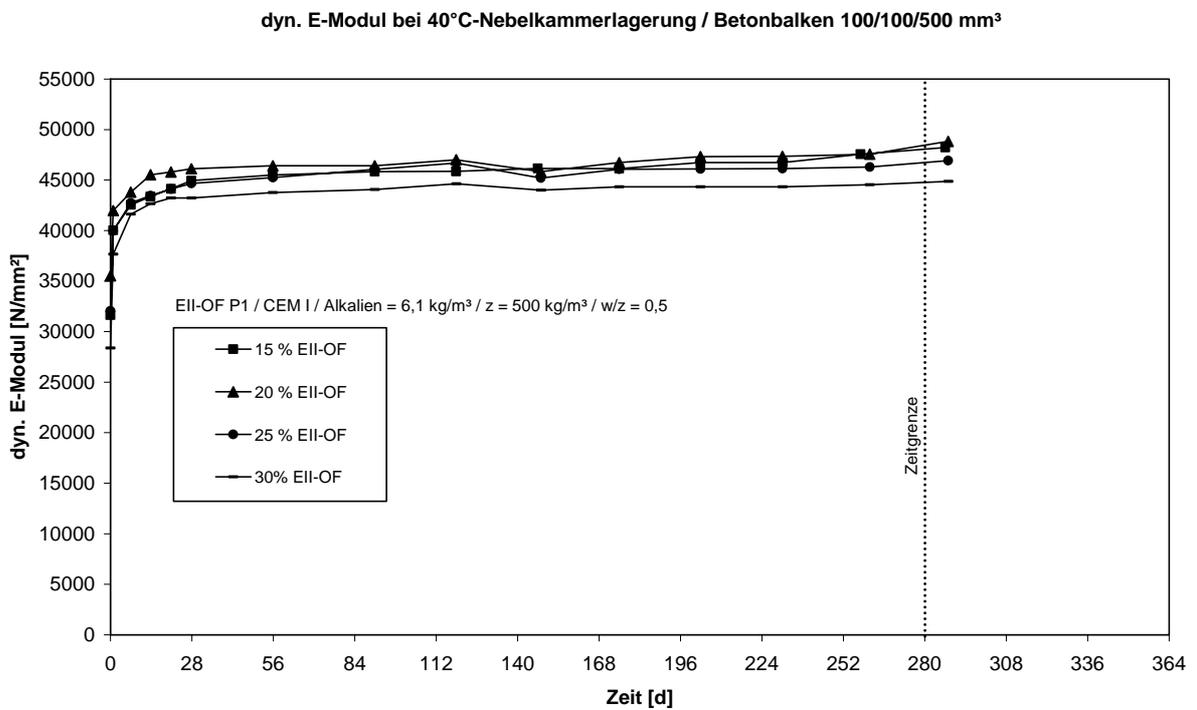


Abbildung A5 31: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P1

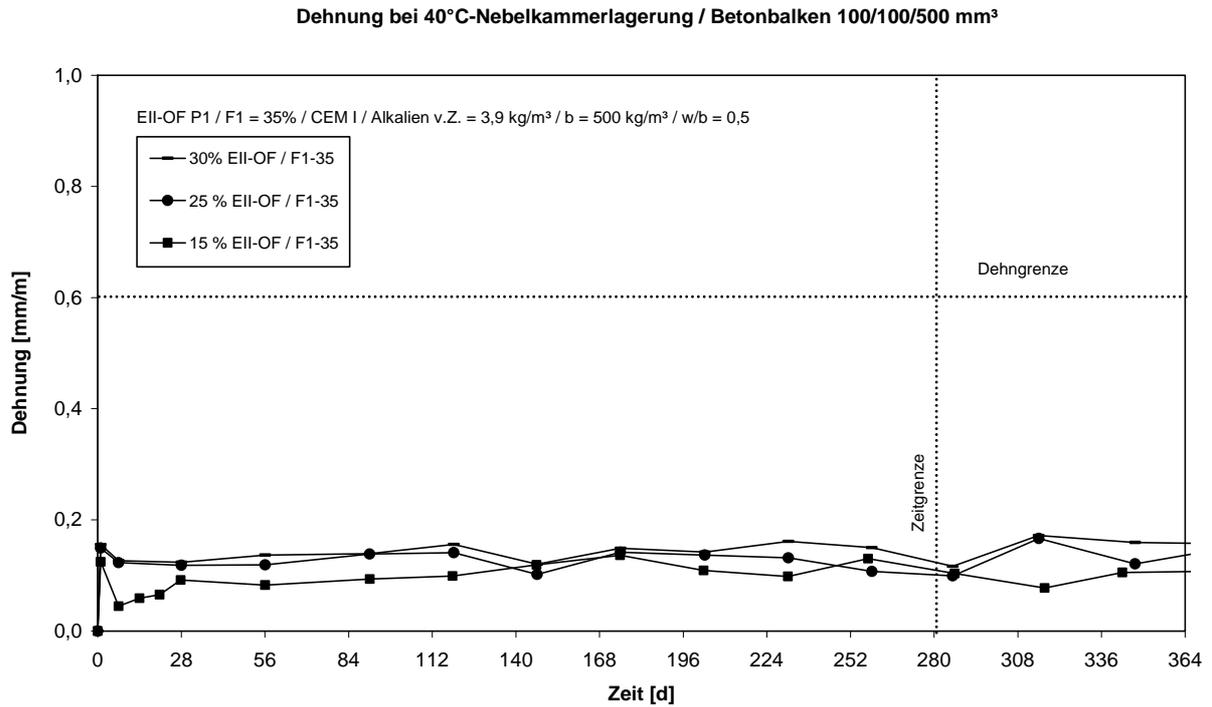


Abbildung A5 32: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EII-OF P1 / F1-35

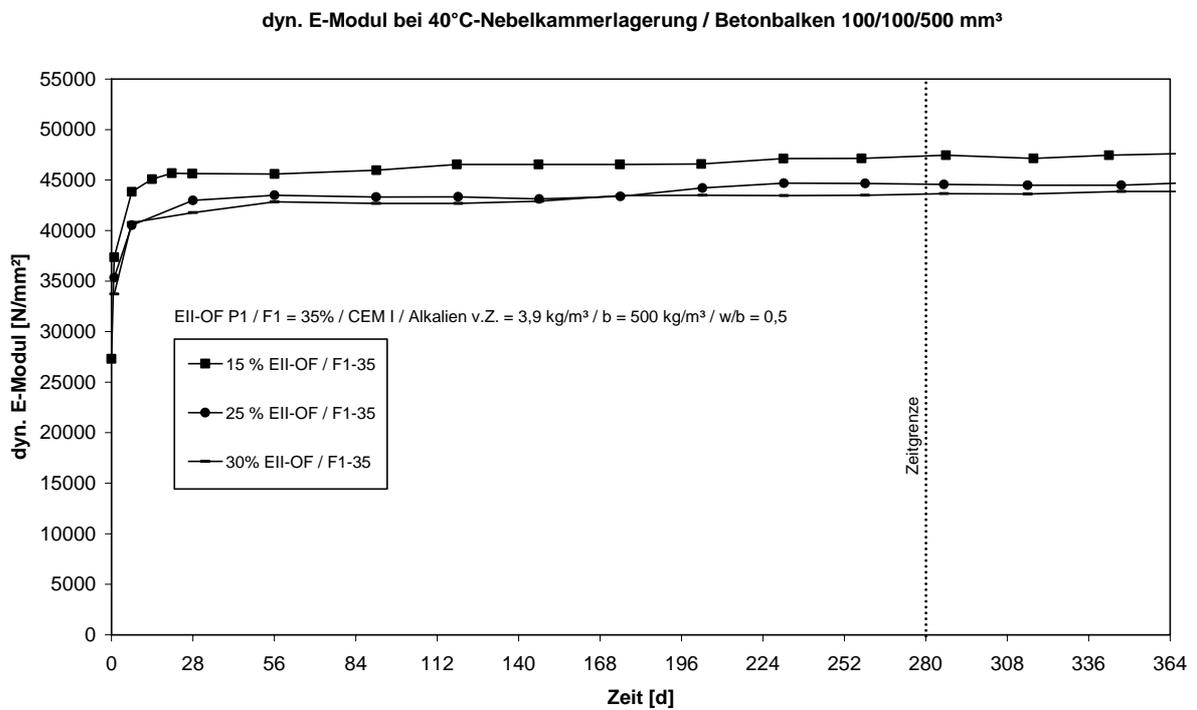


Abbildung A5 33: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P1 / F1-35

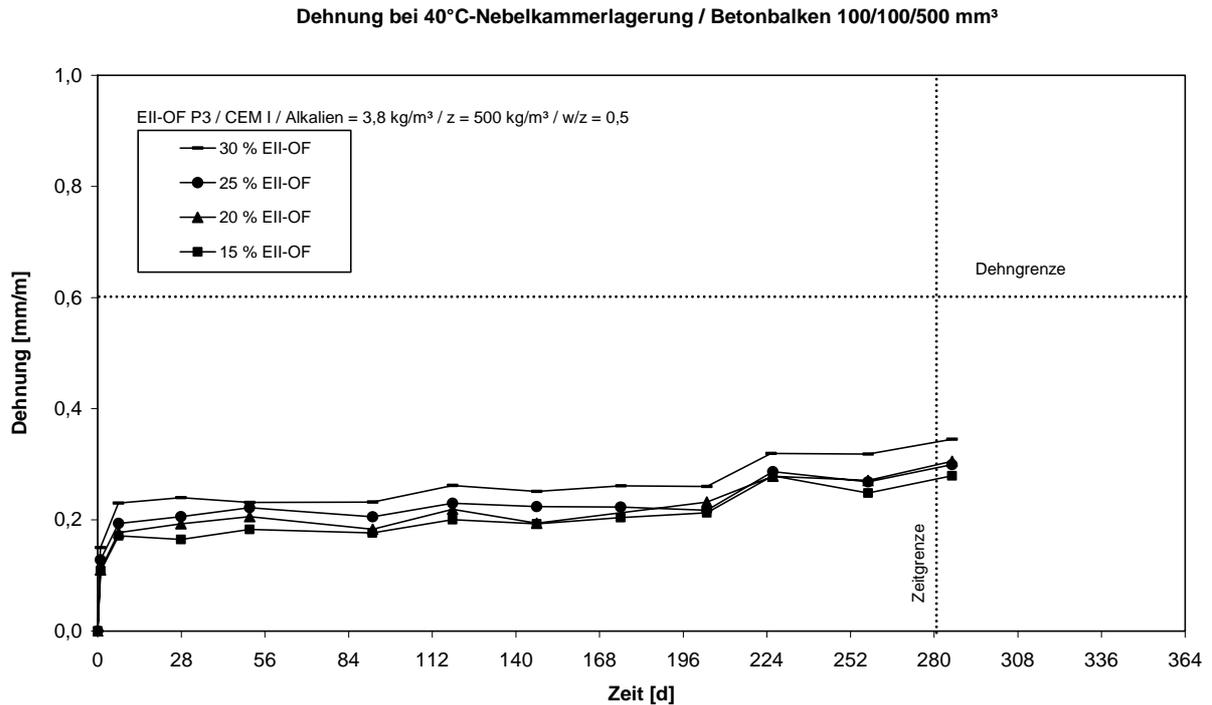


Abbildung A5 34: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EII-OF P3

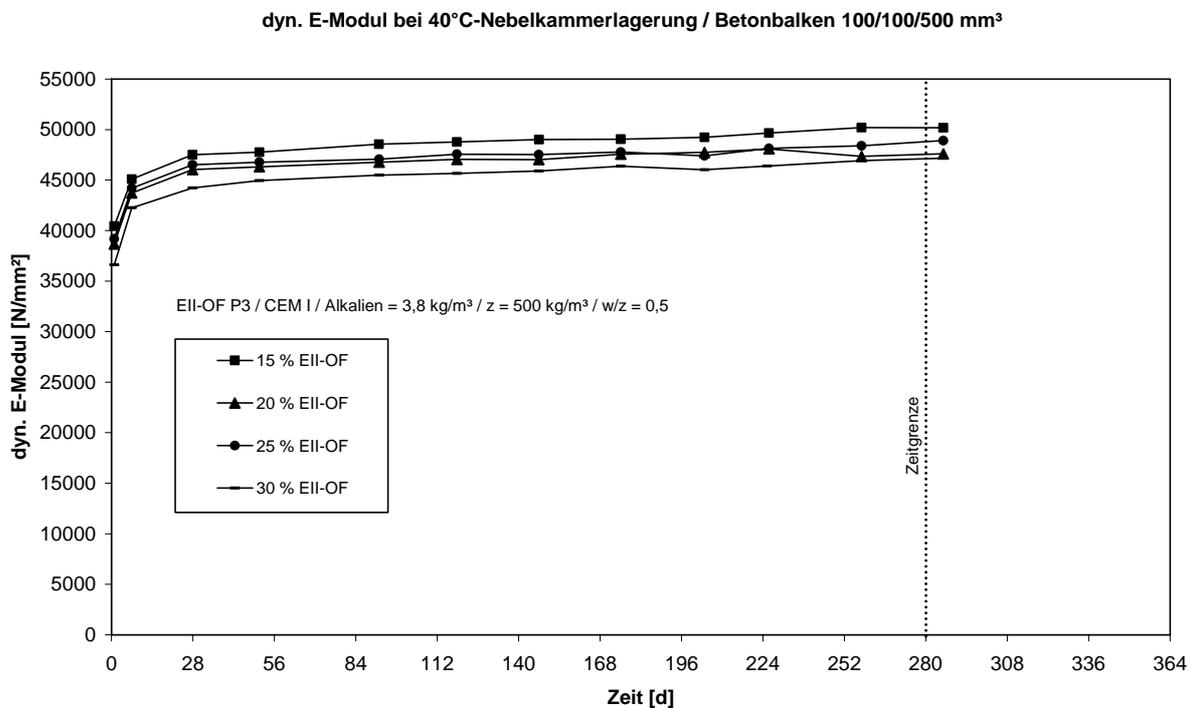


Abbildung A5 35: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P3

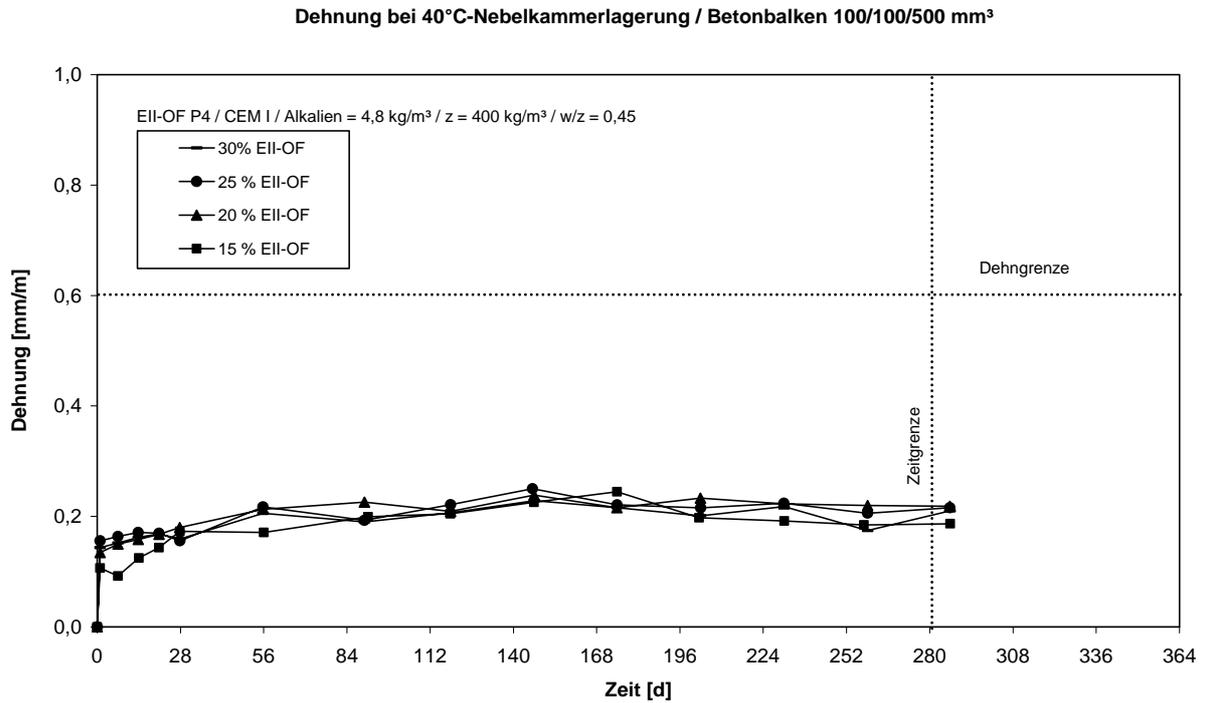


Abbildung A5 36: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EII-OF P4

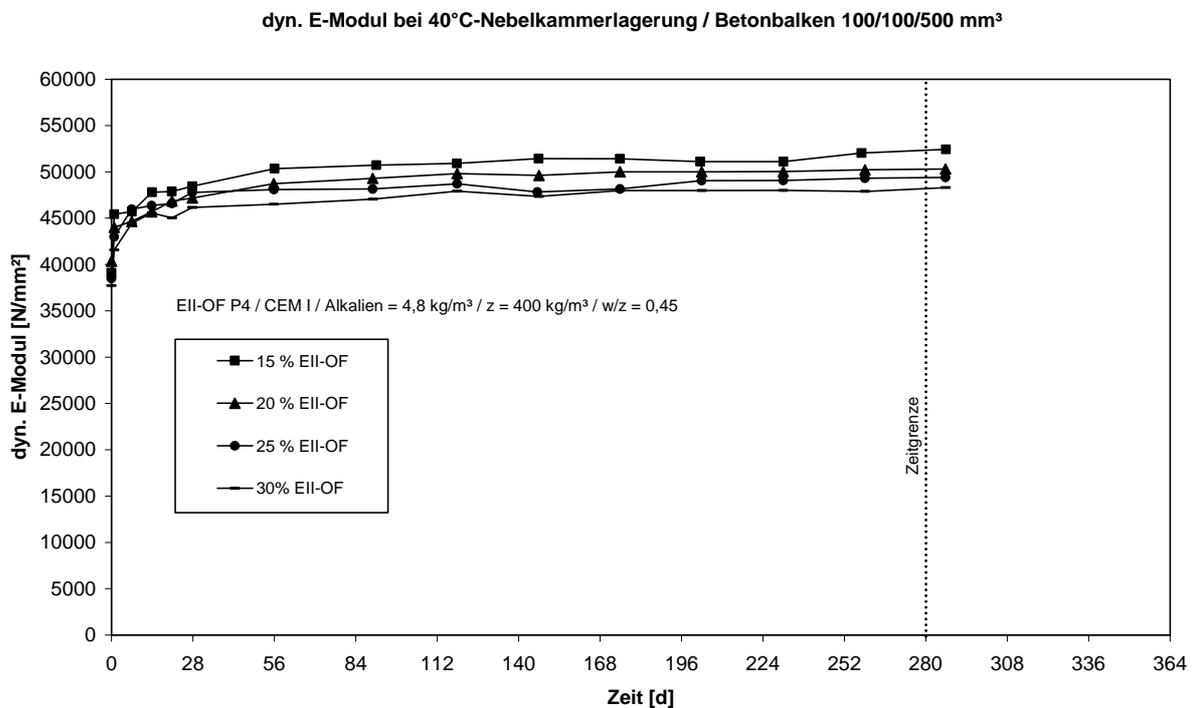


Abbildung A5 37: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P4

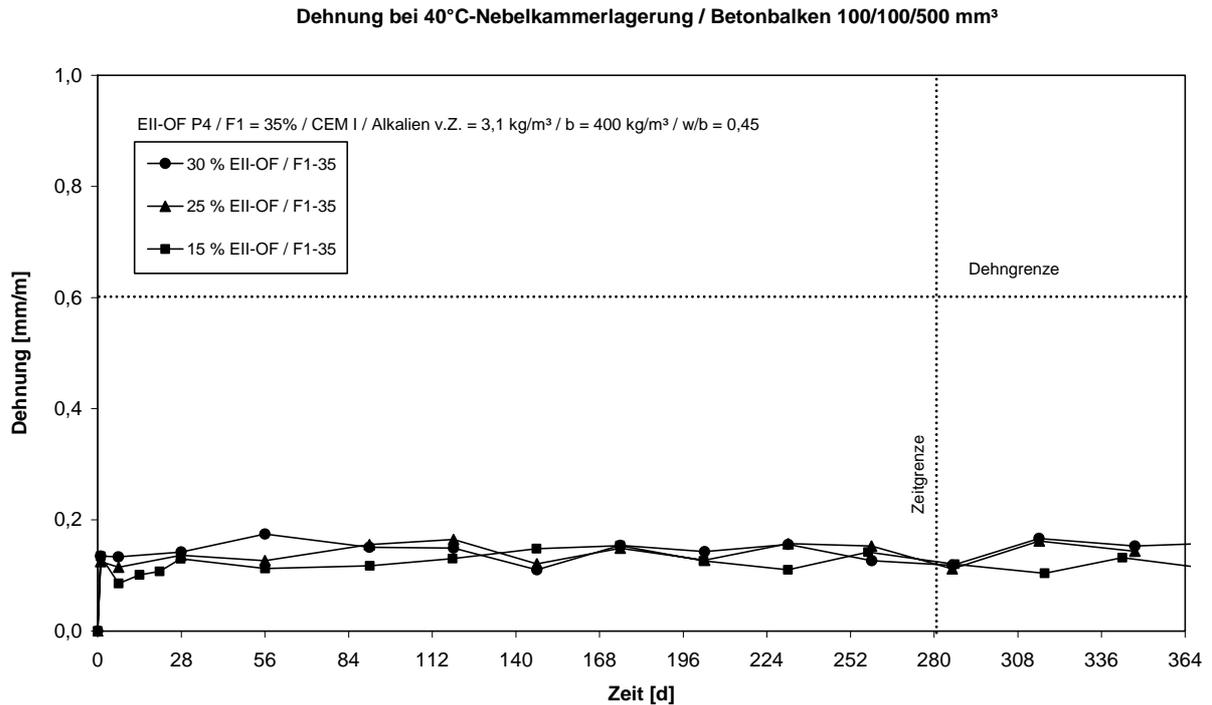


Abbildung A5 38: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone EII-OF P4 / F1-35

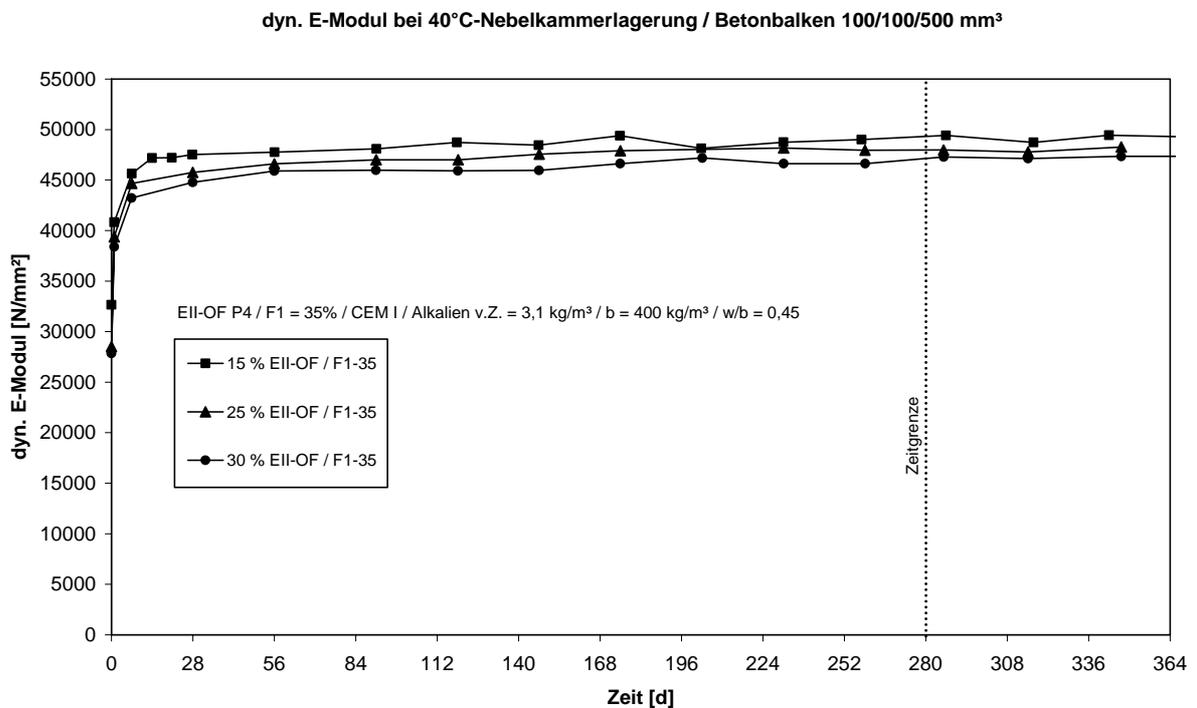


Abbildung A5 39: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P4 / F1-35

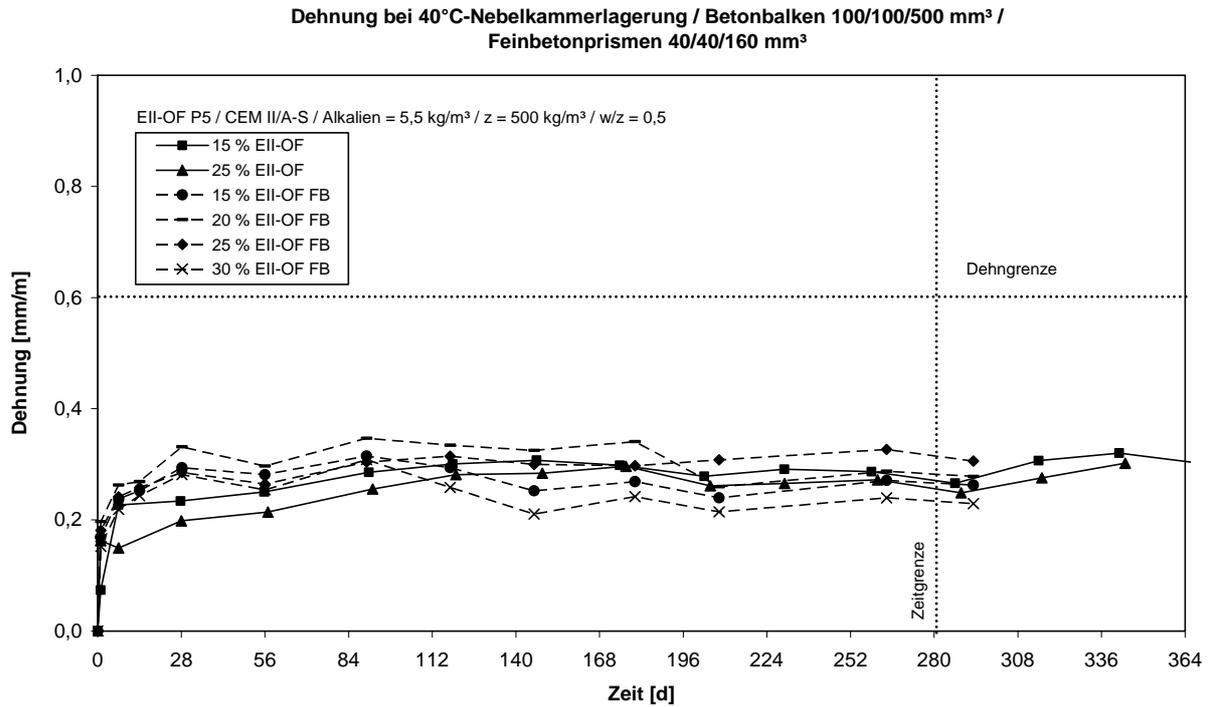


Abbildung A5 40: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone / -feinbetone EII-OF P5

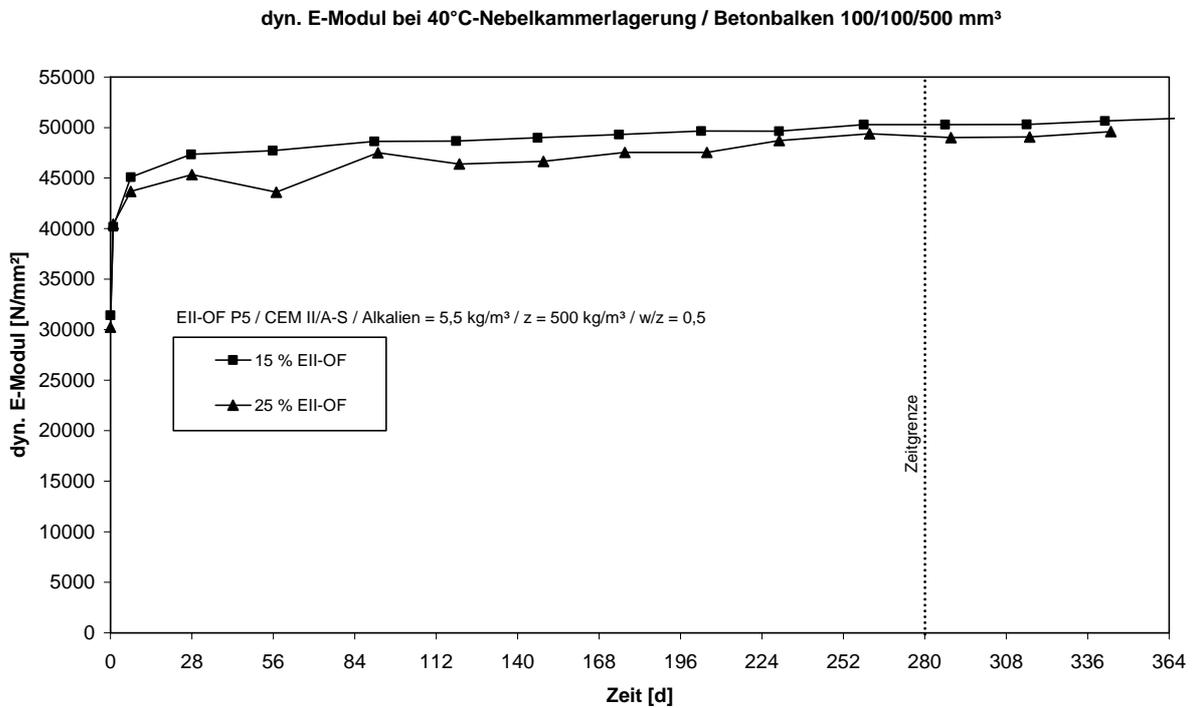


Abbildung A5 41: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P5

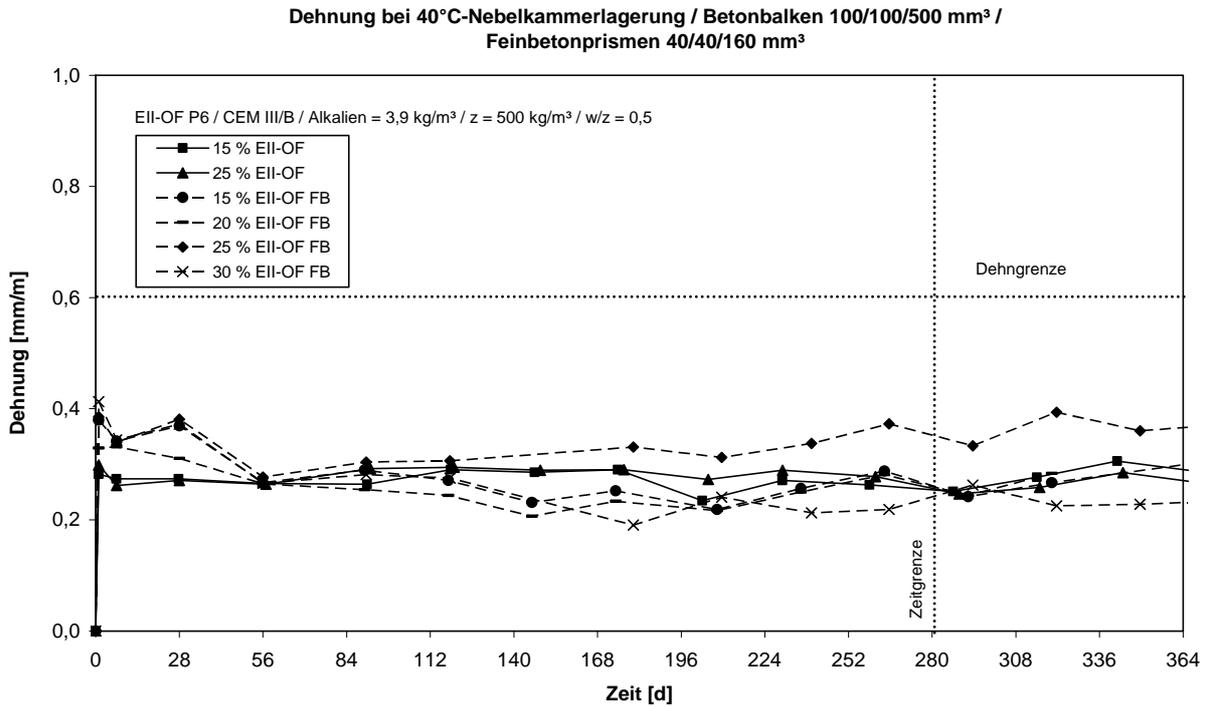


Abbildung A5 42: Dehnungsverlauf der Pessimumbetone / -feinbetone EII-OF P6

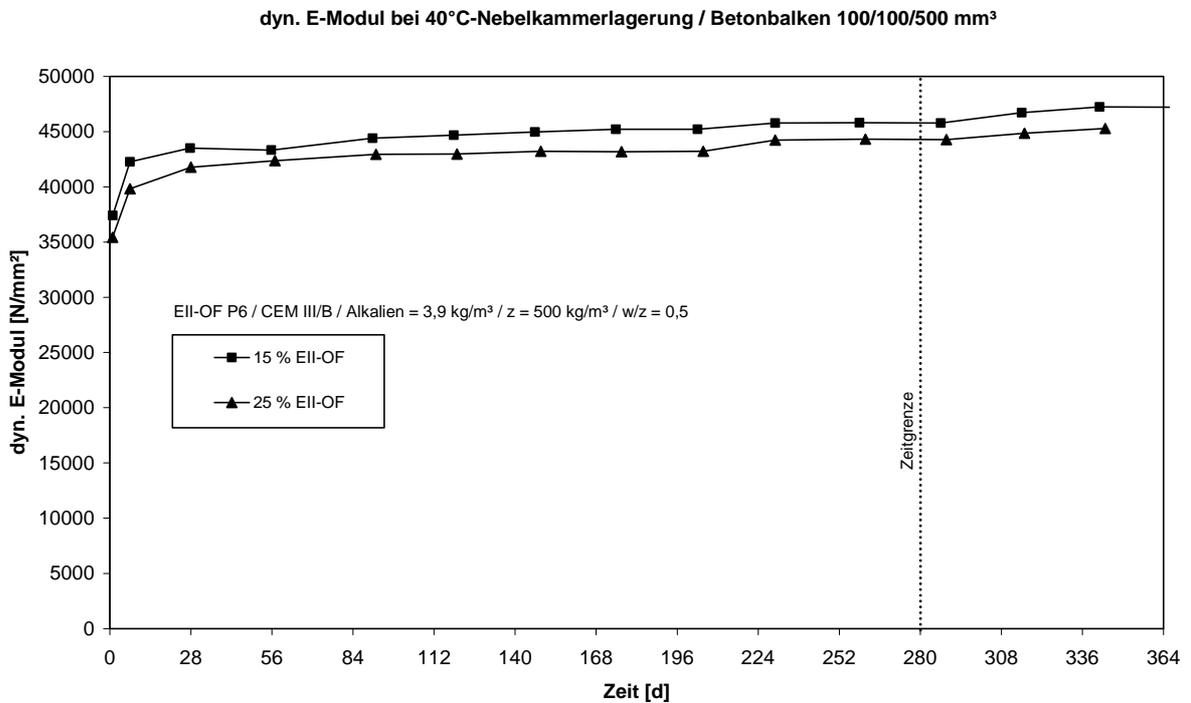


Abbildung A5 43: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Pessimumbetone EII-OF P6

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

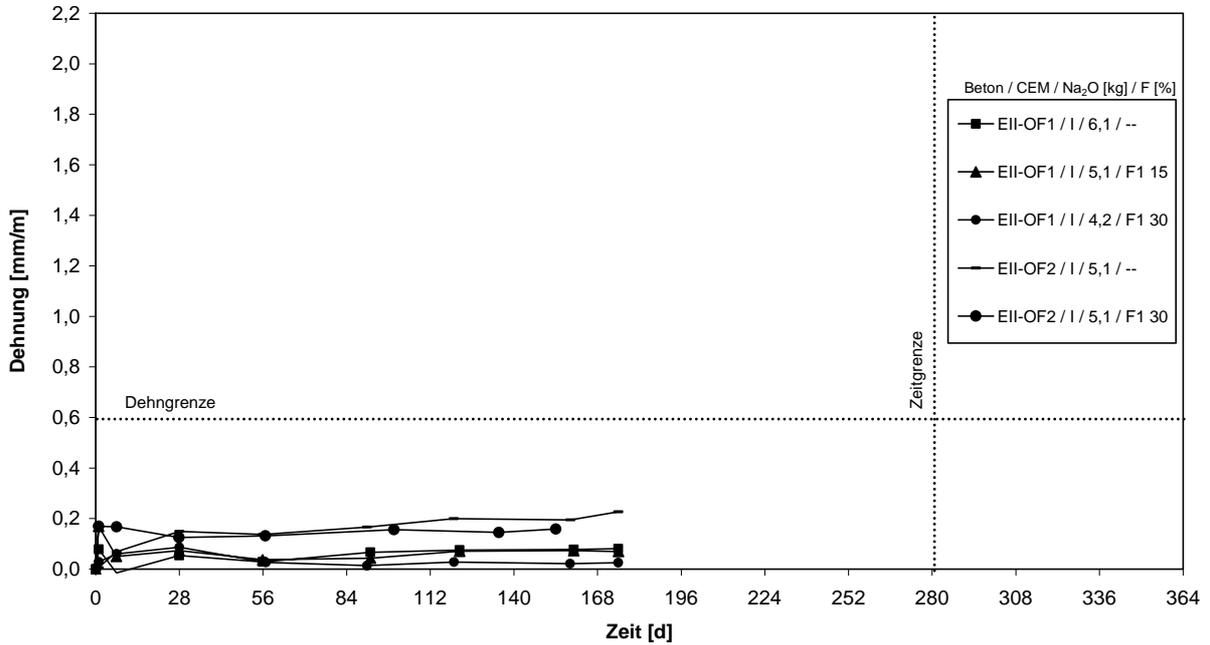


Abbildung A5 44: Dehnungsverlauf der Betone mit Opalsandstein / Flint EII-OF1 und EII-OF2

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

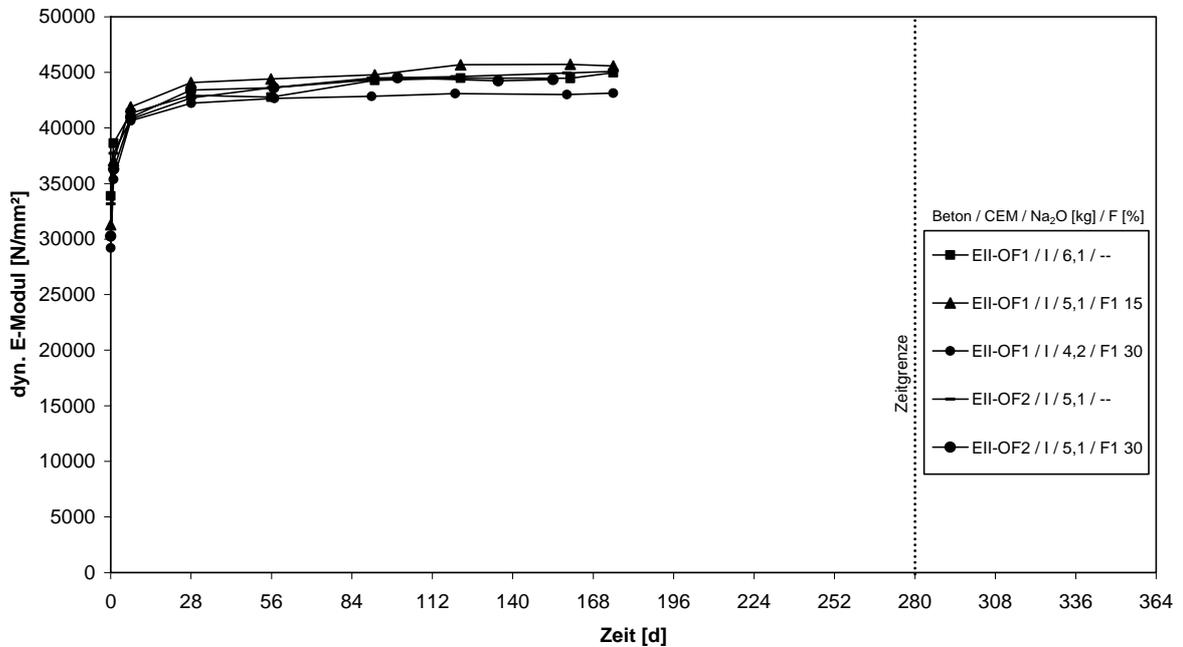


Abbildung A5 45: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Opalsandstein / Flint EII-OF1 und EII-OF2

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

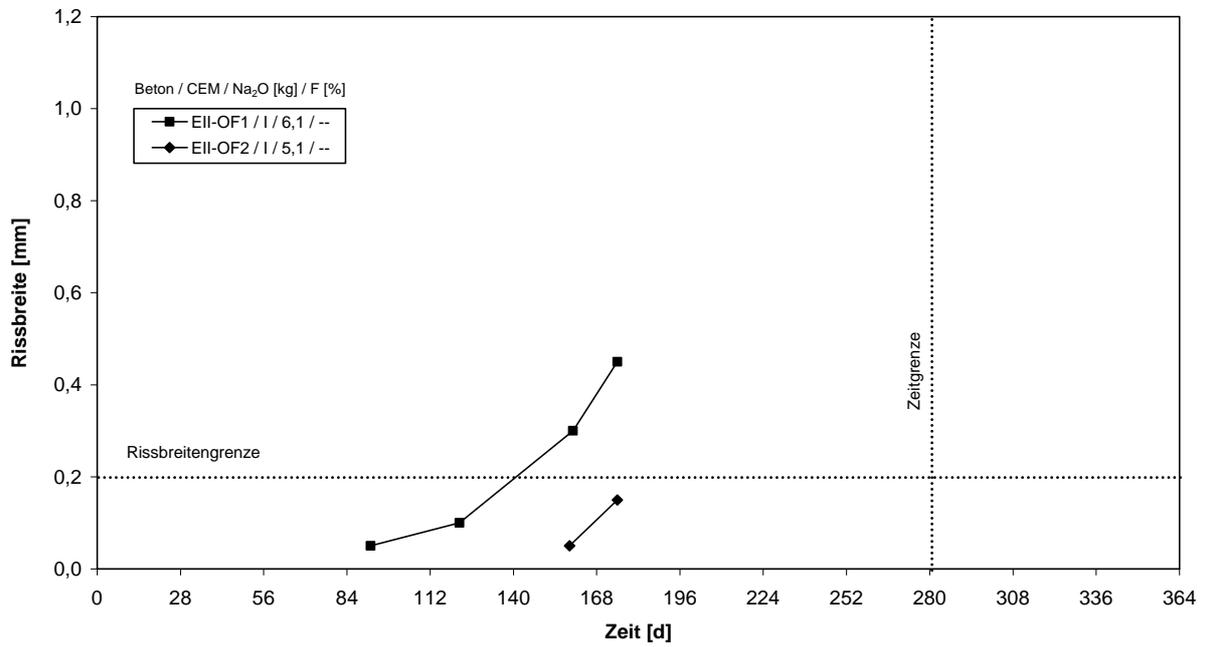


Abbildung A5 46: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Opalsandstein / Flint EII-OF1 und EII-OF2

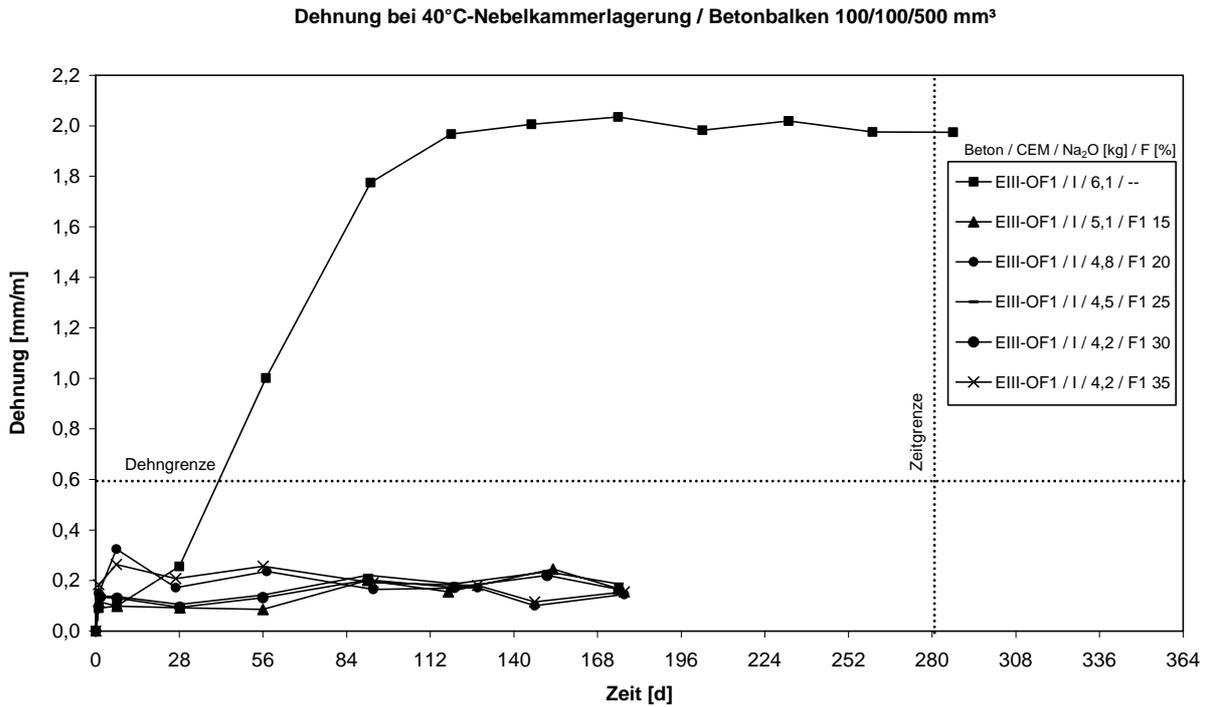


Abbildung A5 47: Dehnungsverlauf der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF1 / F1

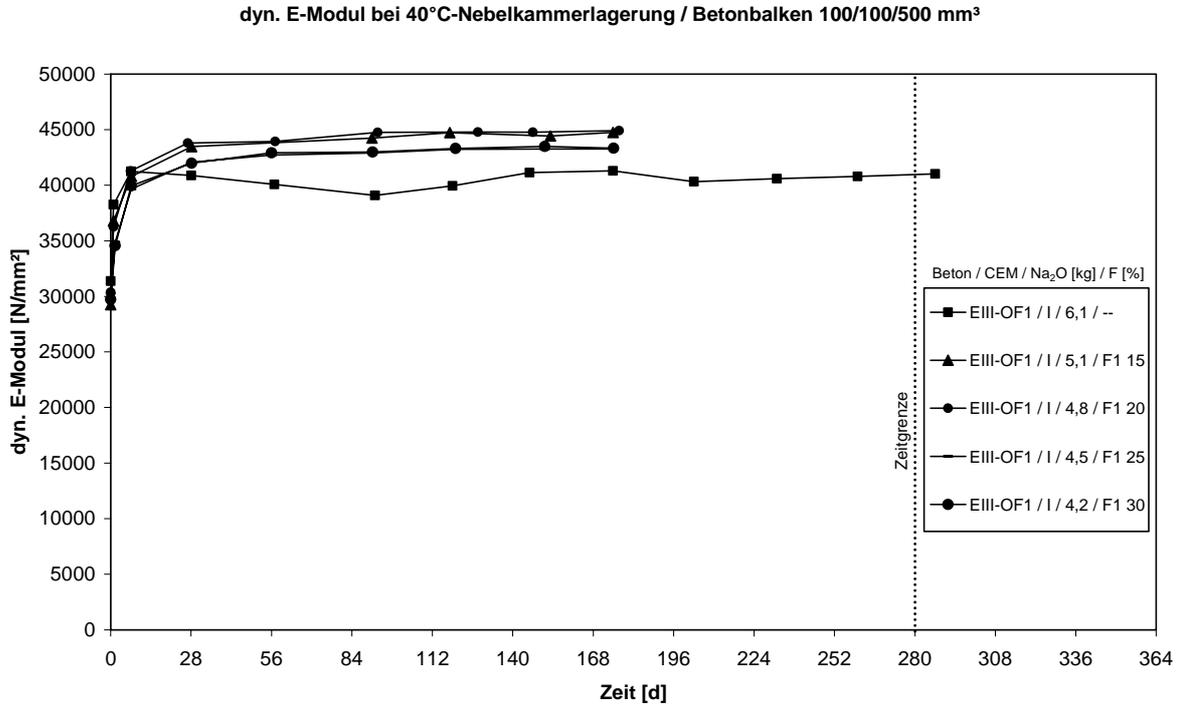


Abbildung A5 48: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF1 / F1

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

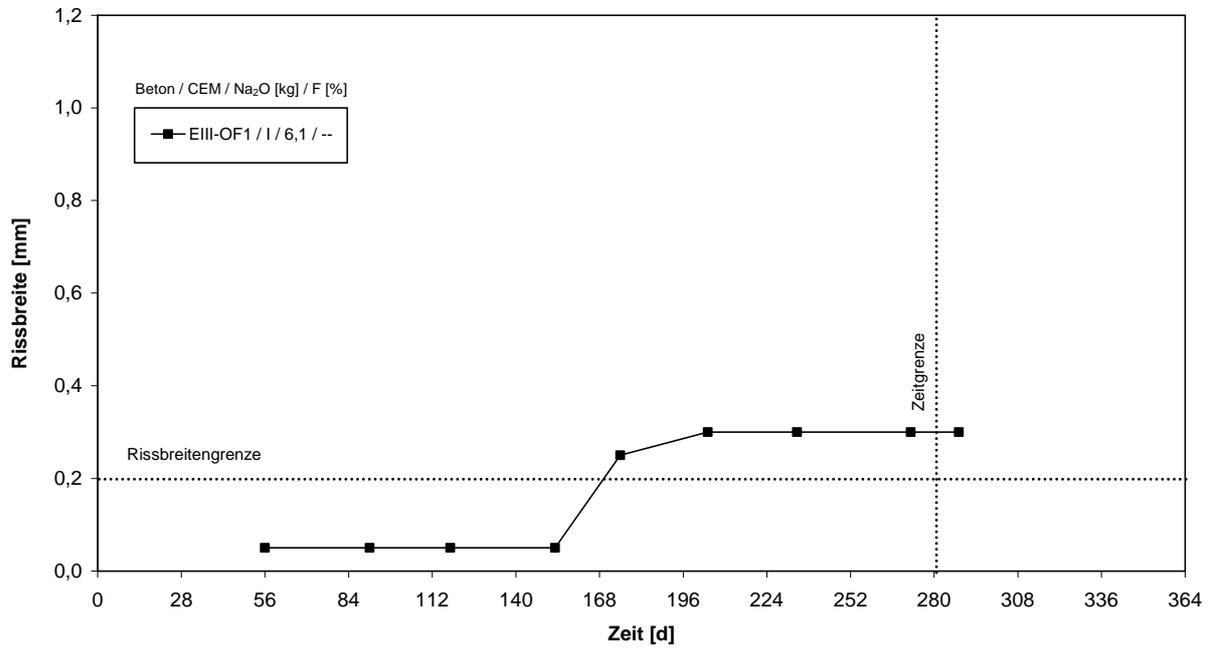


Abbildung A5 49: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF1 / F1

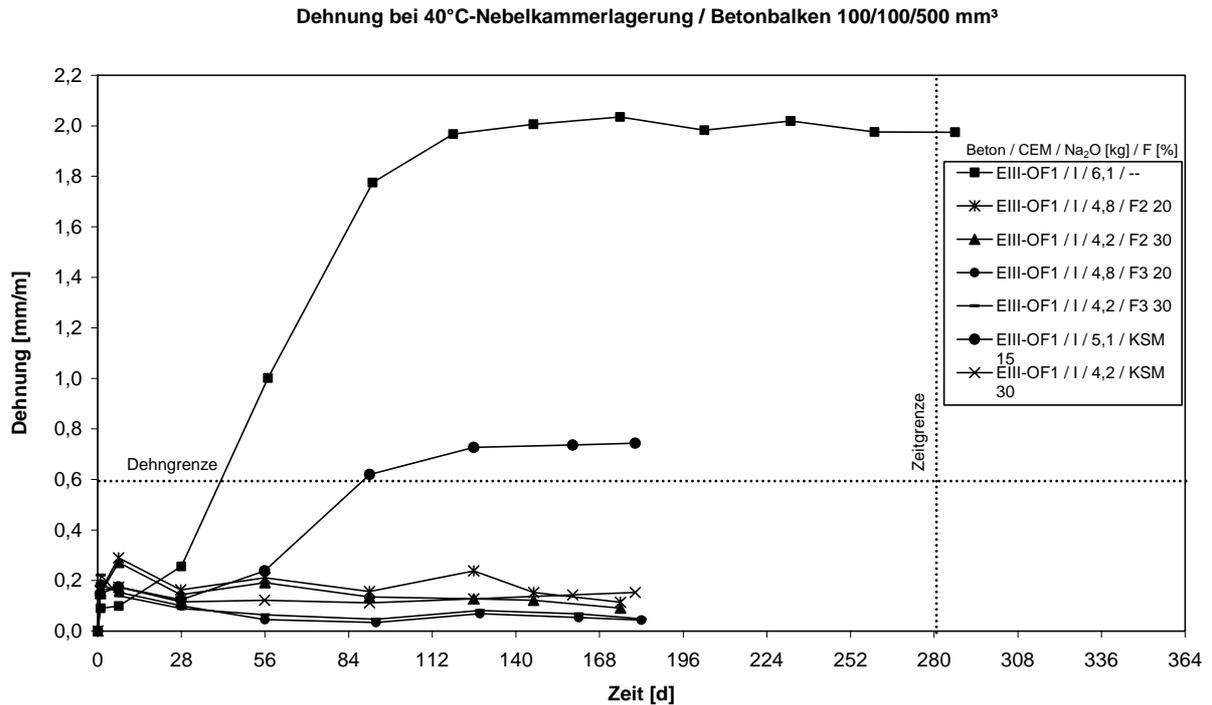


Abbildung A5 50: Dehnungsverlauf der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF1 / F2, EIII-OF1 / F3 und EIII-OF1 / KSM

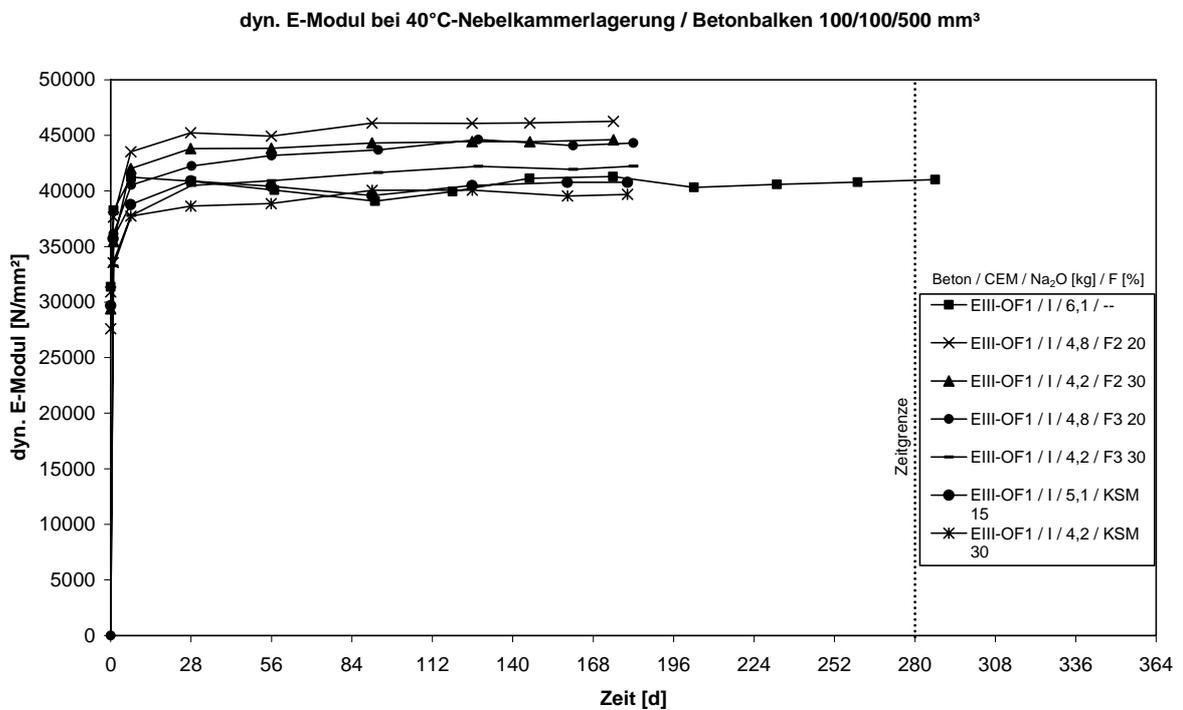


Abbildung A5 51: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF1 / F2, EIII-OF1 / F3 und EIII-OF1 / KSM

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

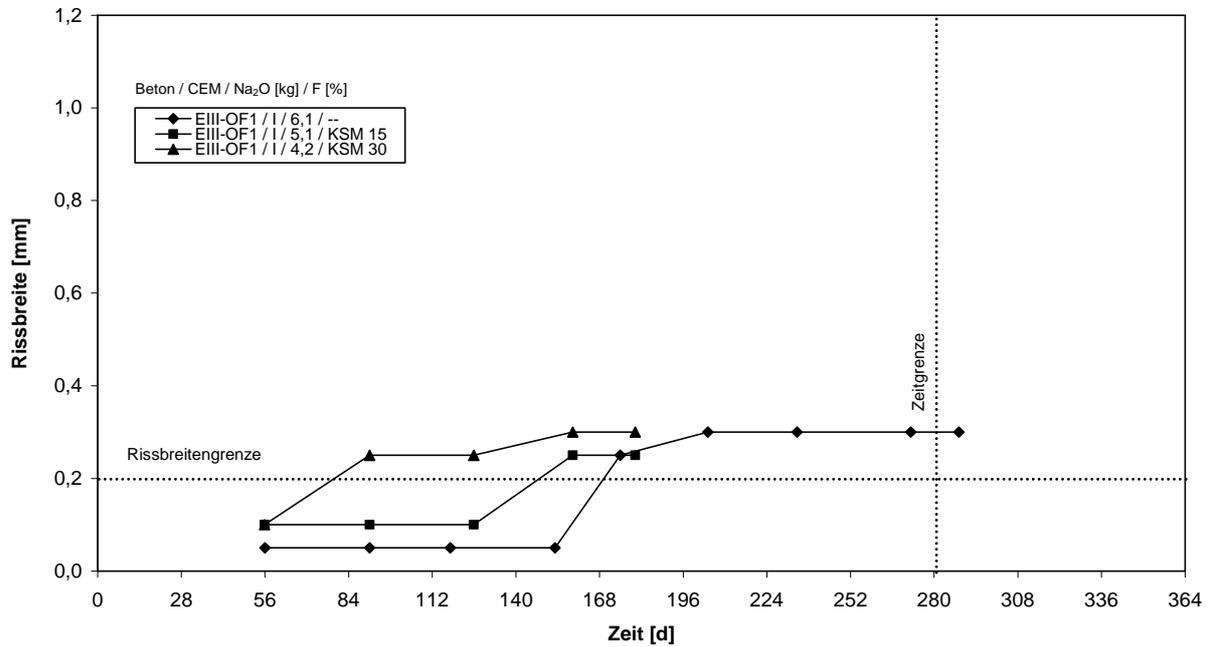


Abbildung A5 52: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Opalsandstein / Flint  
EIII-OF1 / F2, EIII-OF1 / F3 und EIII-OF1 / KSM

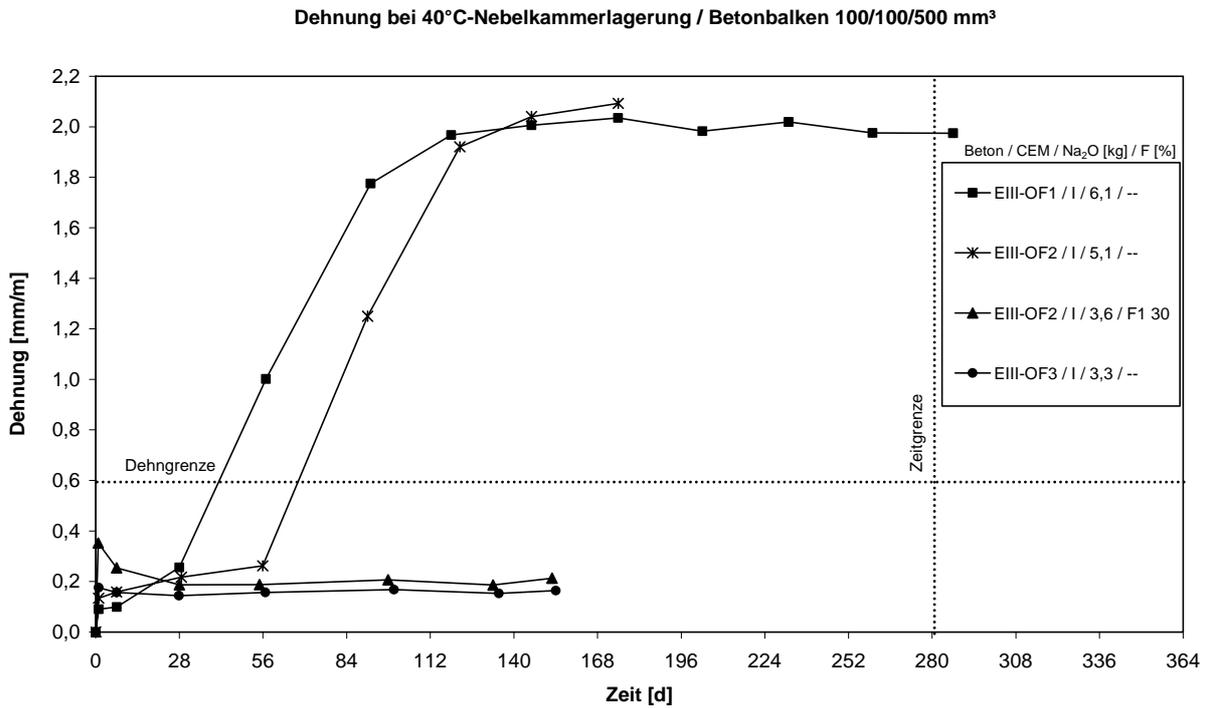


Abbildung A5 53: Dehnungsverlauf der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF2 und EIII-OF3

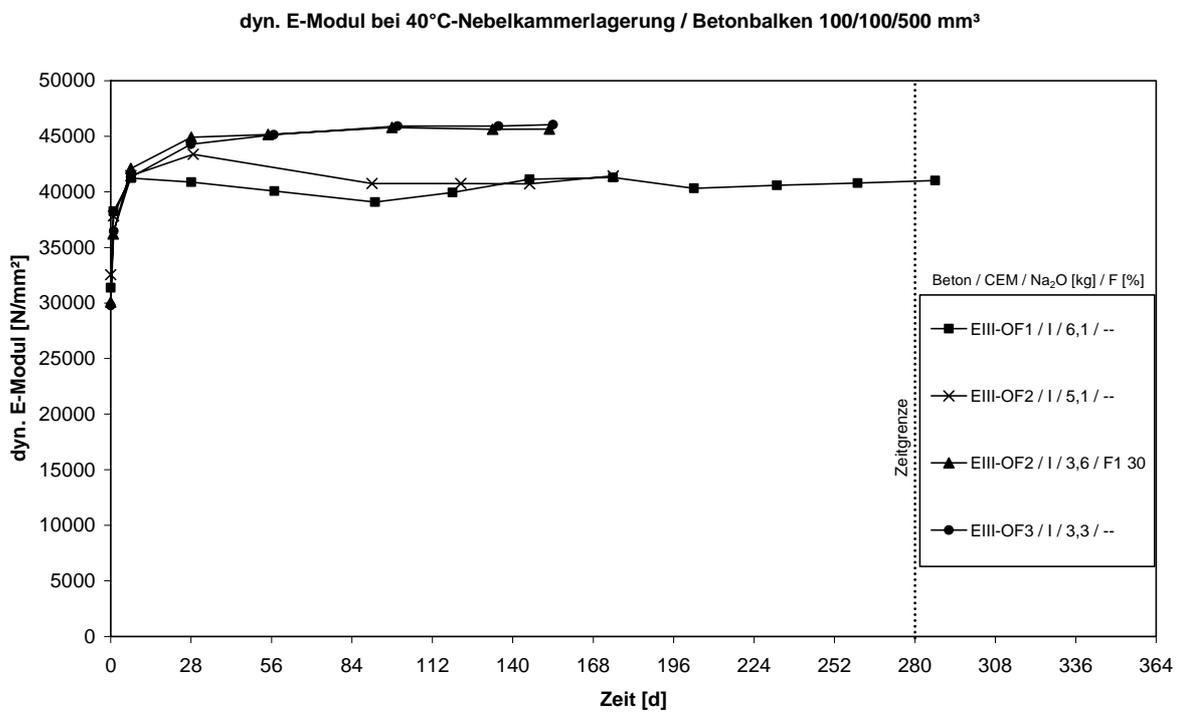


Abbildung A5 54: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF2 und EIII-OF3

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

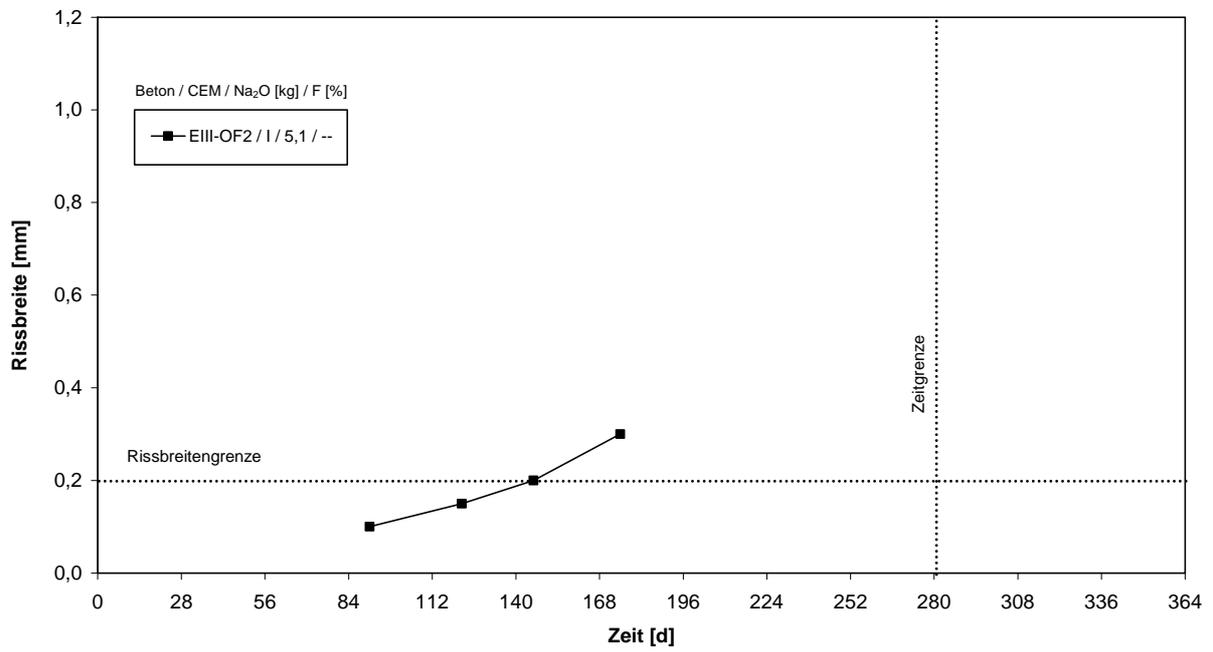


Abbildung A5 55: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF2 und EIII-OF3

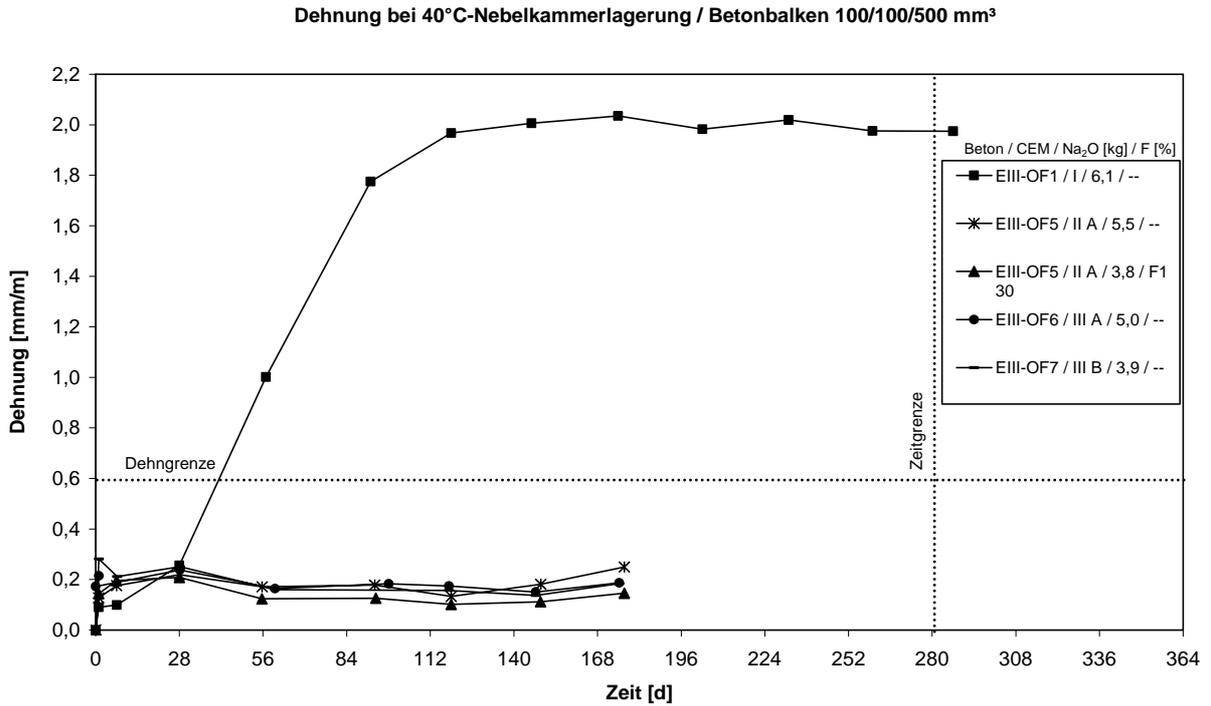


Abbildung A5 56: Dehnungsverlauf der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF5, EIII-OF6 und EIII-OF7

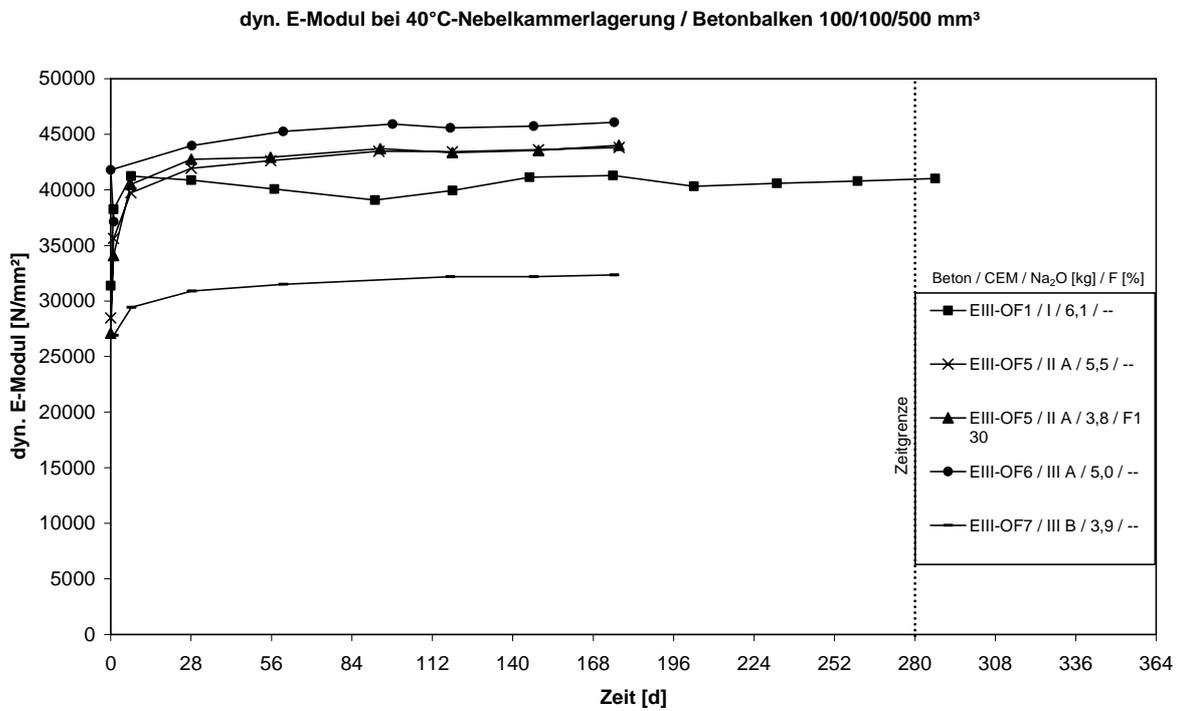


Abbildung A5 57: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Opalsandstein / Flint EIII-OF5, EIII-OF6 und EIII-OF7

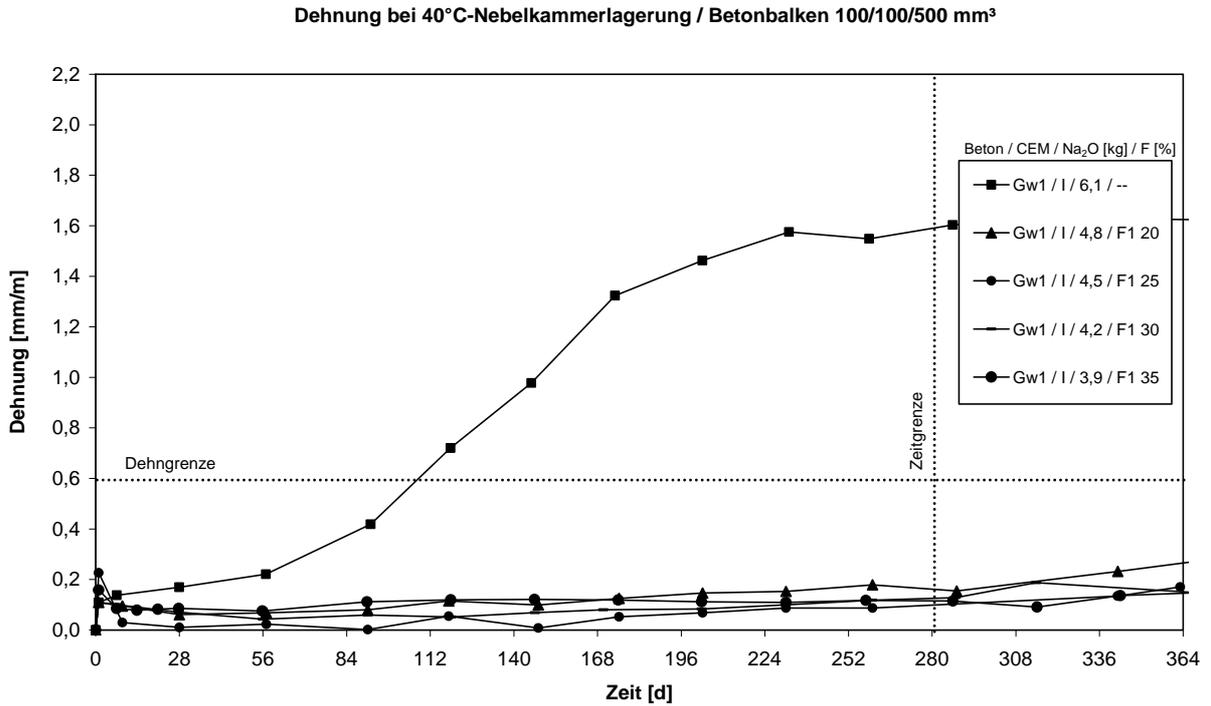


Abbildung A5 58: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw1

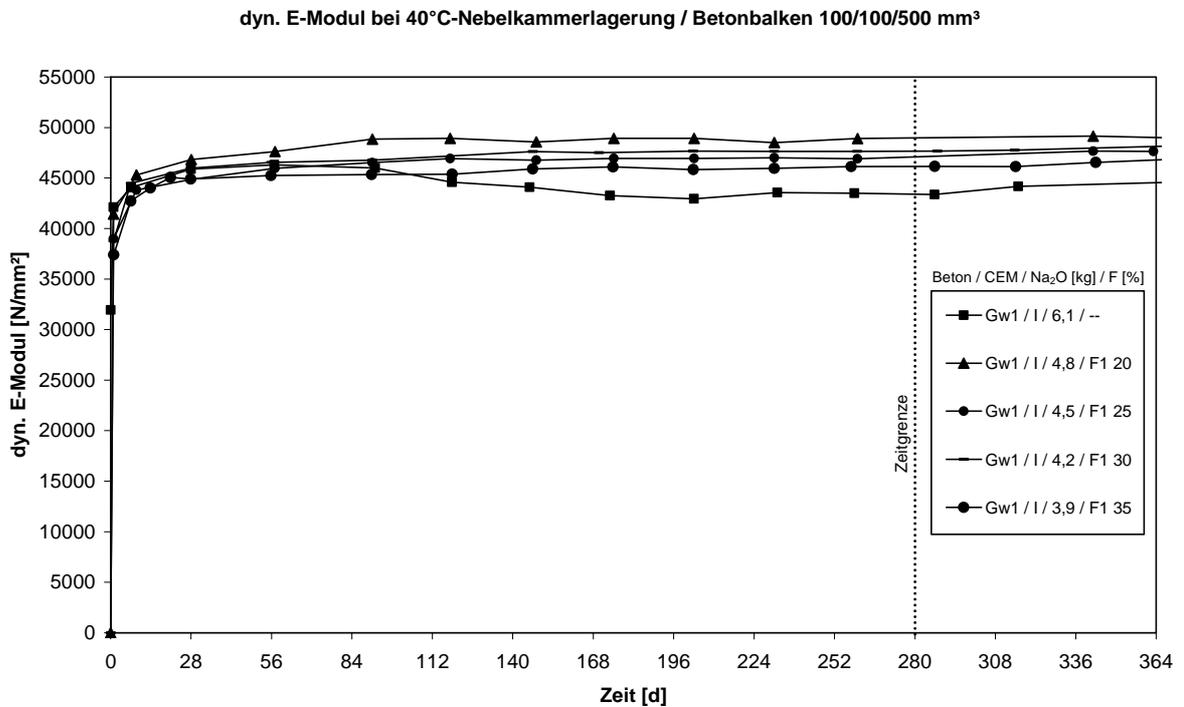


Abbildung A5 59: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw1

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

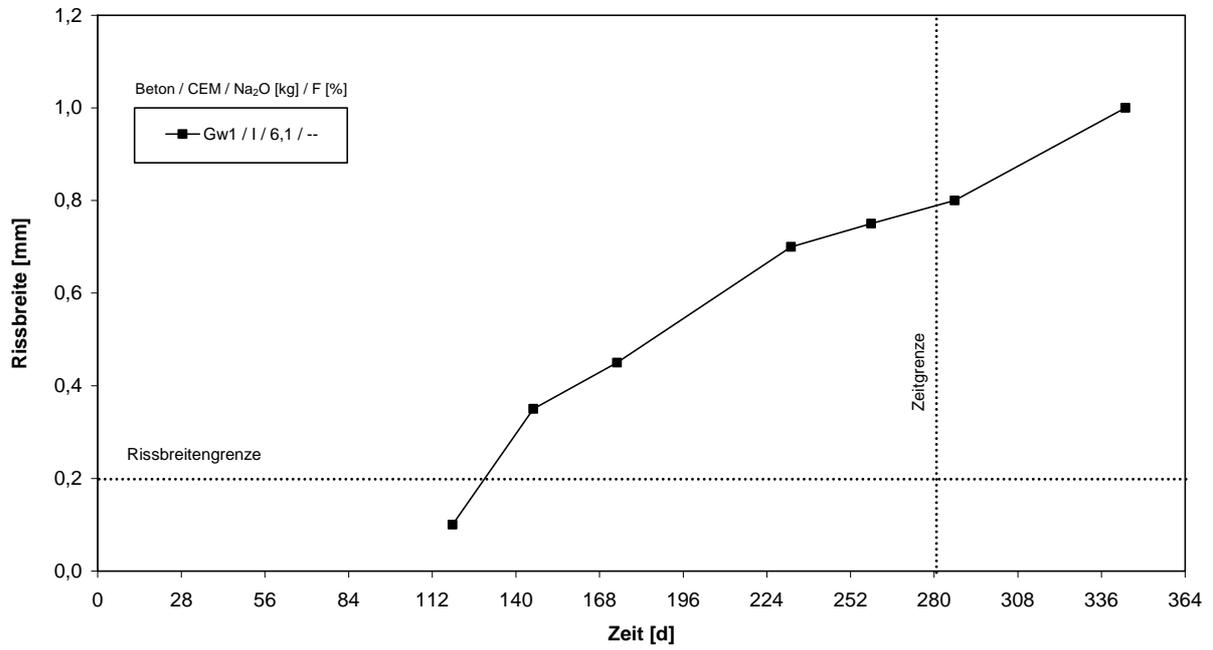


Abbildung A5 60: Entwicklung der Rissbreiten der Grauwackebetone Gw1

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

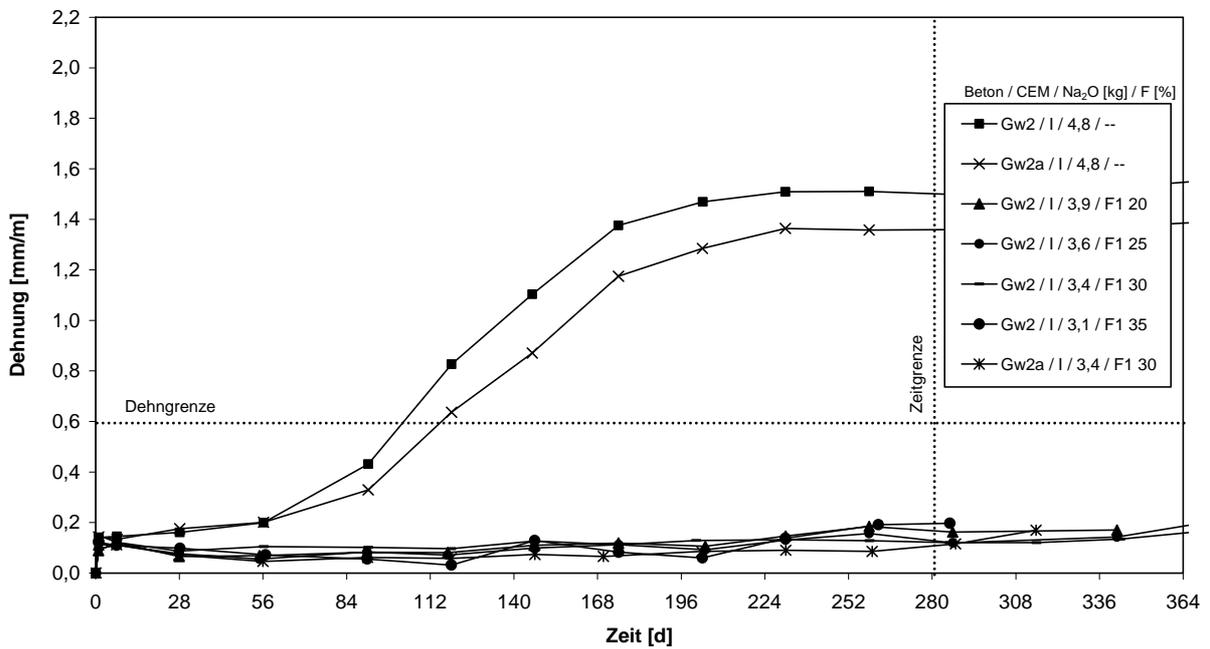


Abbildung A5 61: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw2 / F1 und Gw2a / F1

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

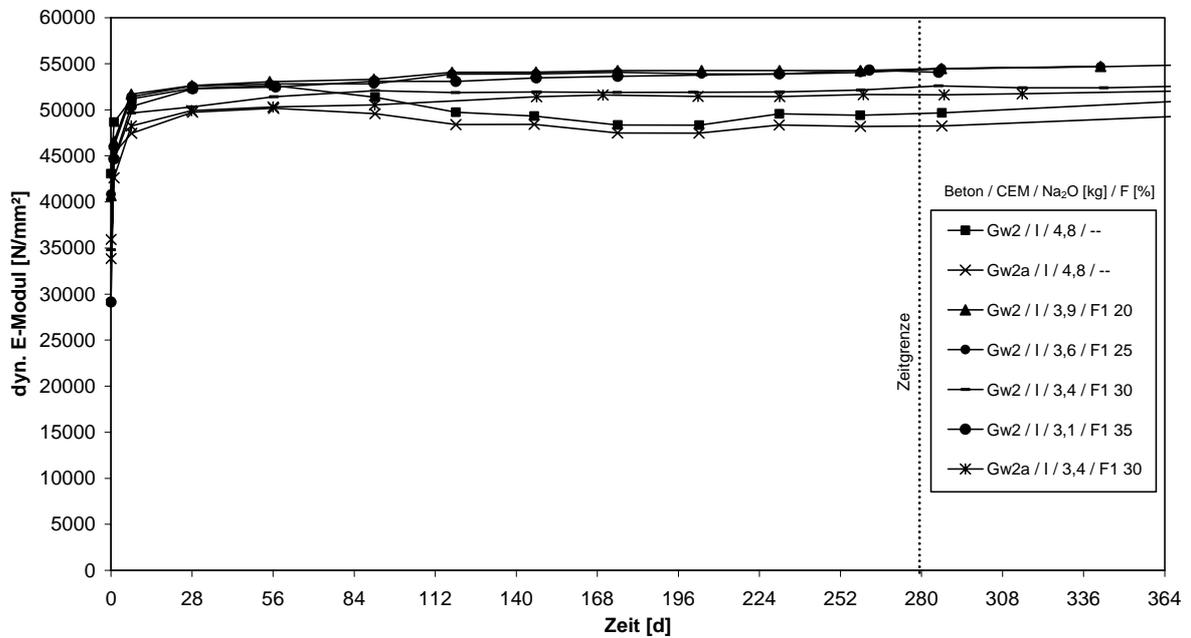


Abbildung A5 62: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw2 / F1 und Gw2a / F1

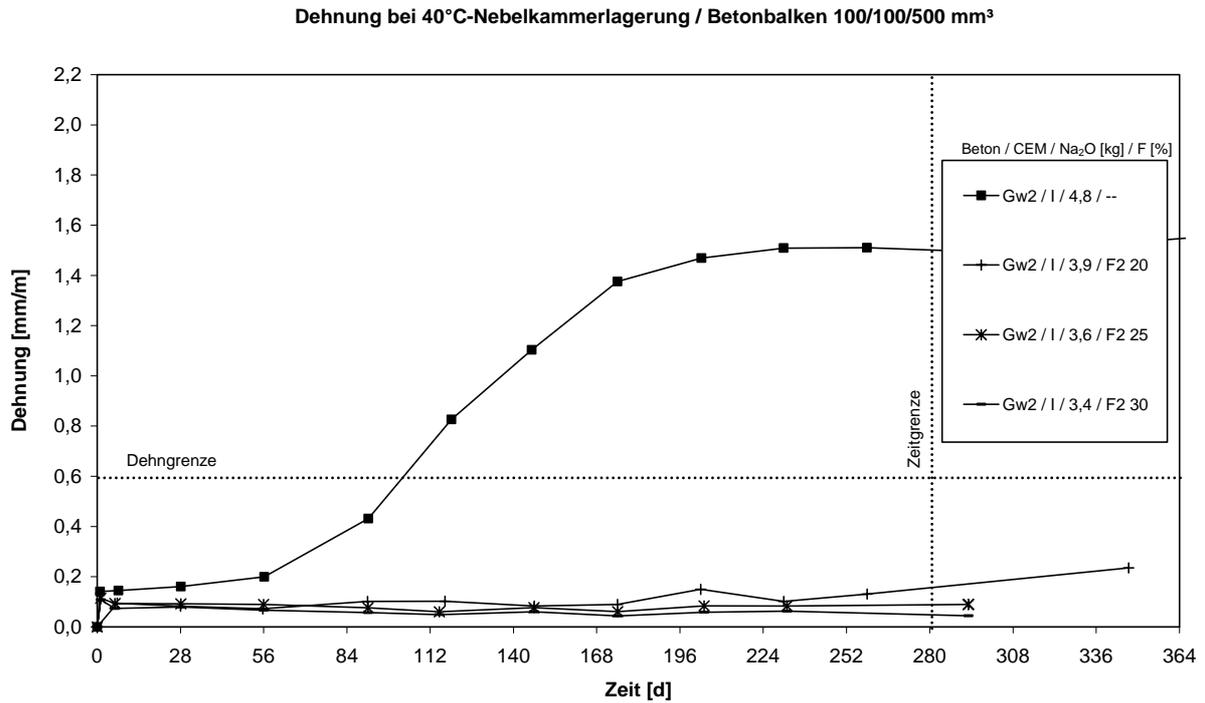


Abbildung A5 63: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw2 / F2

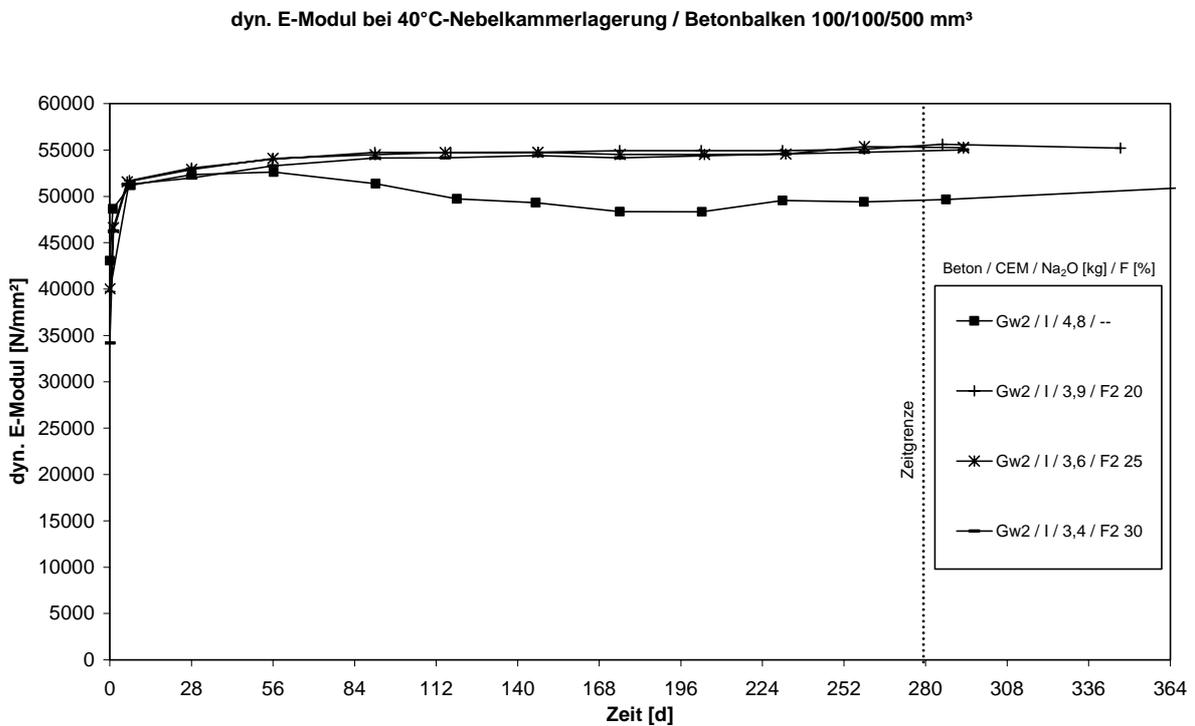


Abbildung A5 64: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw2 / F2

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

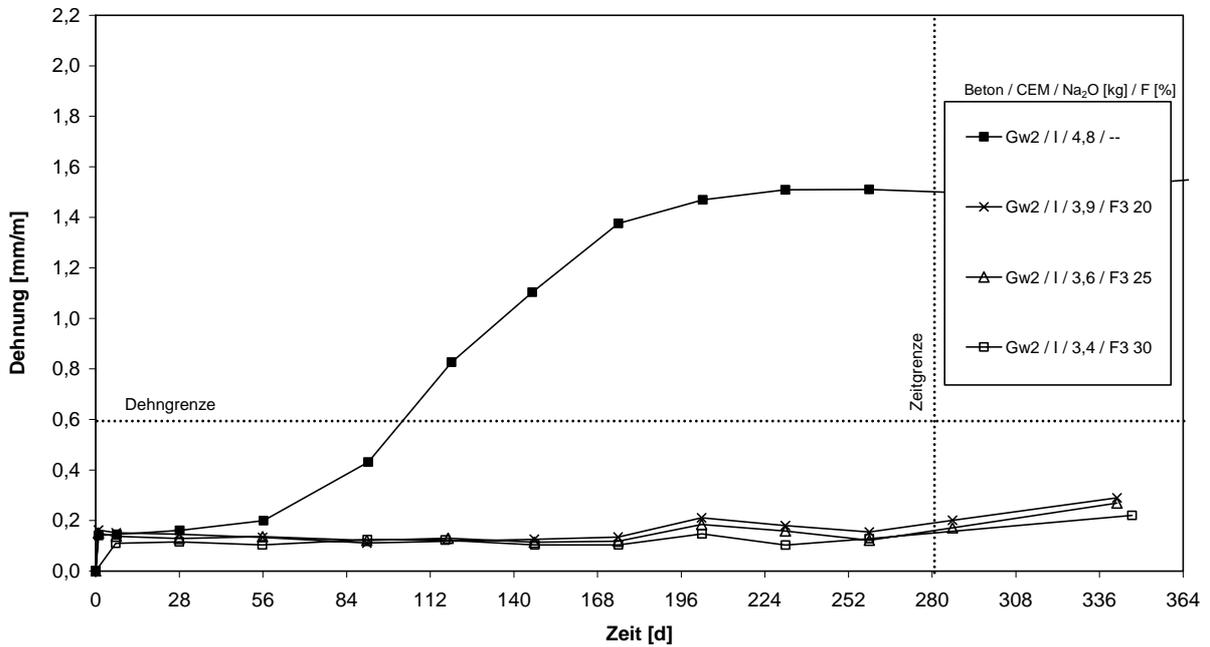


Abbildung A5 65: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw2 / F3

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

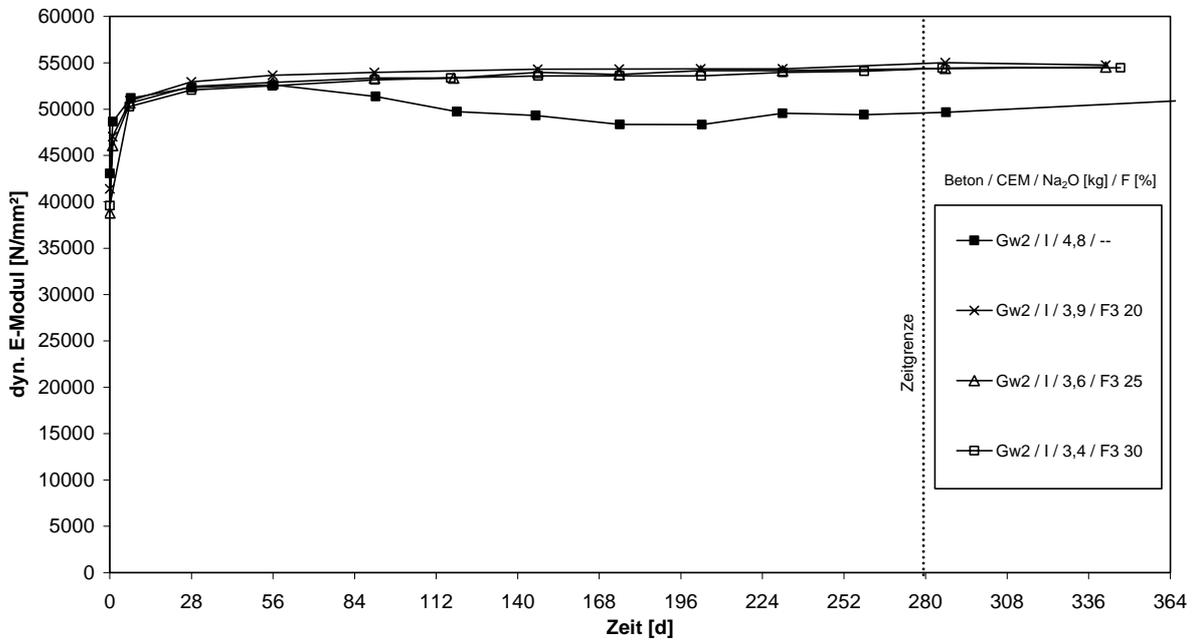


Abbildung A5 66: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw2 / F3

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

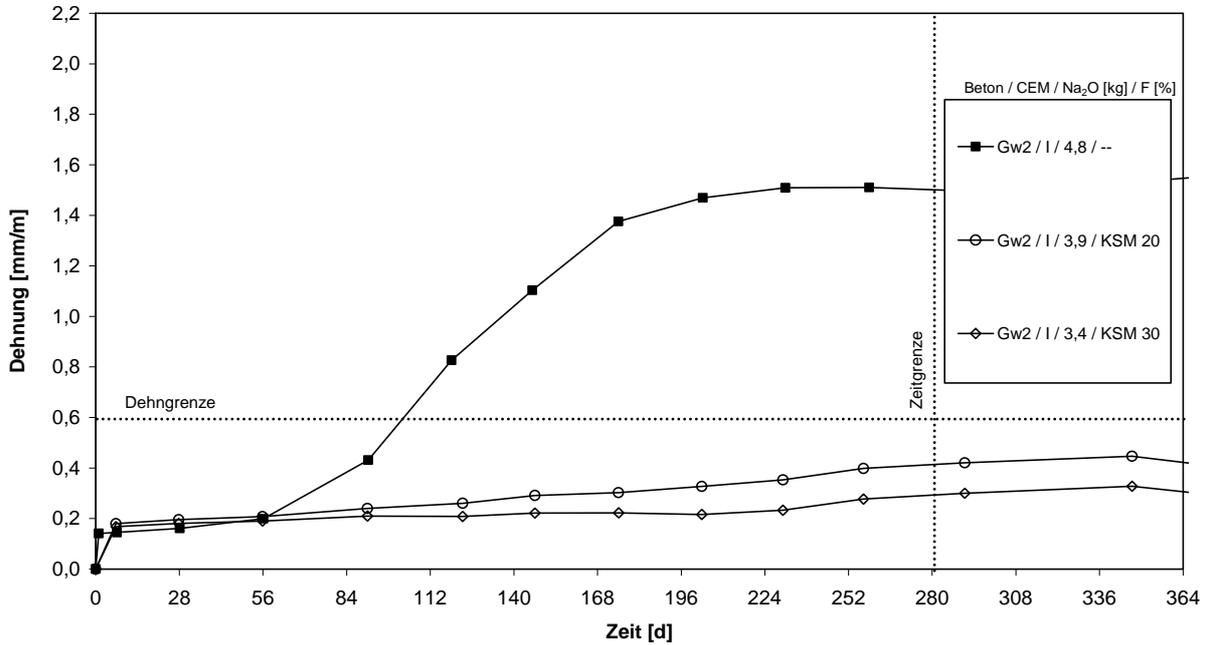


Abbildung A5 67: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw2 / KSM

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

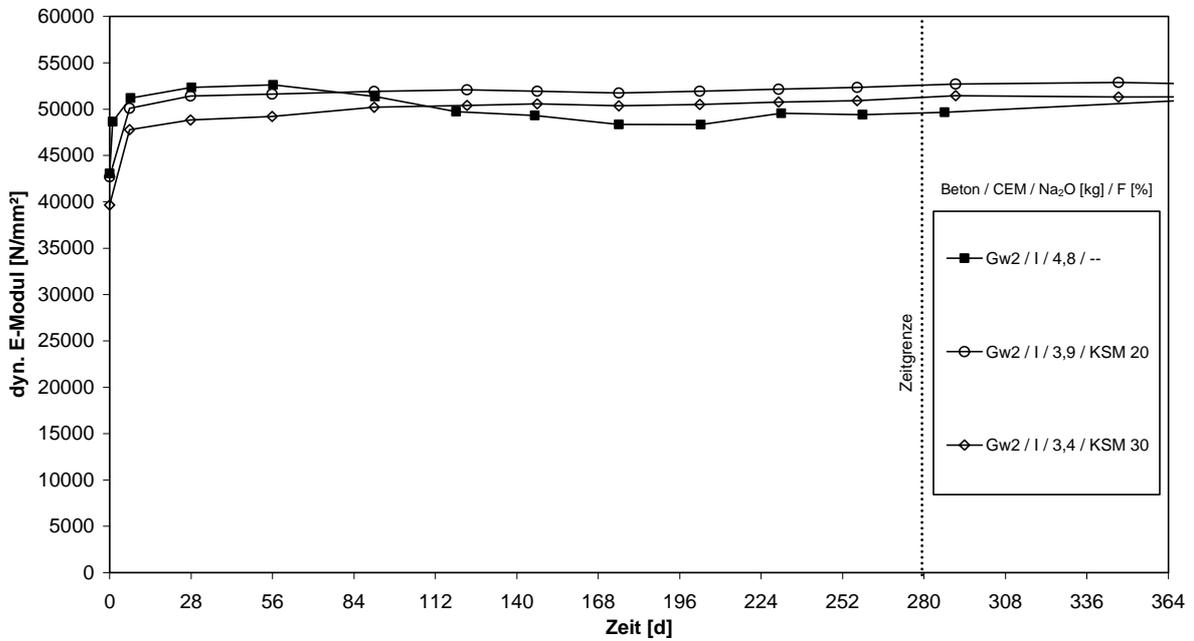


Abbildung A5 68: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw2 / KSM

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

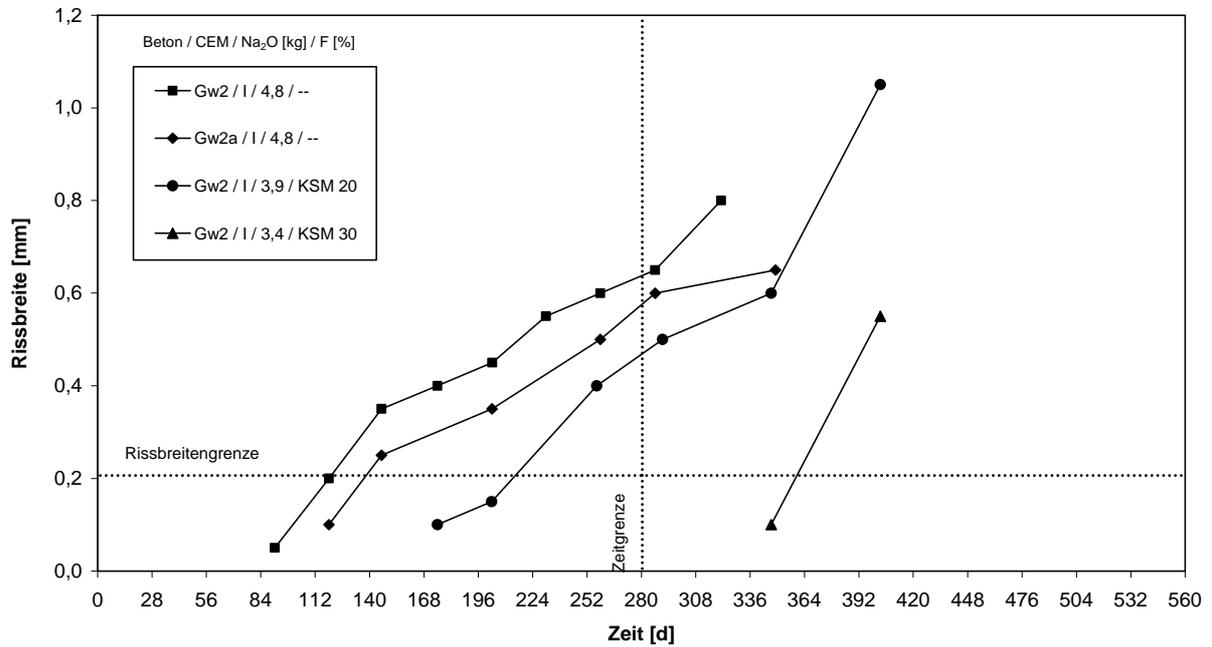


Abbildung A5 69: Entwicklung der Rissbreiten der Grauwackebetone Gw2 und Gw2a

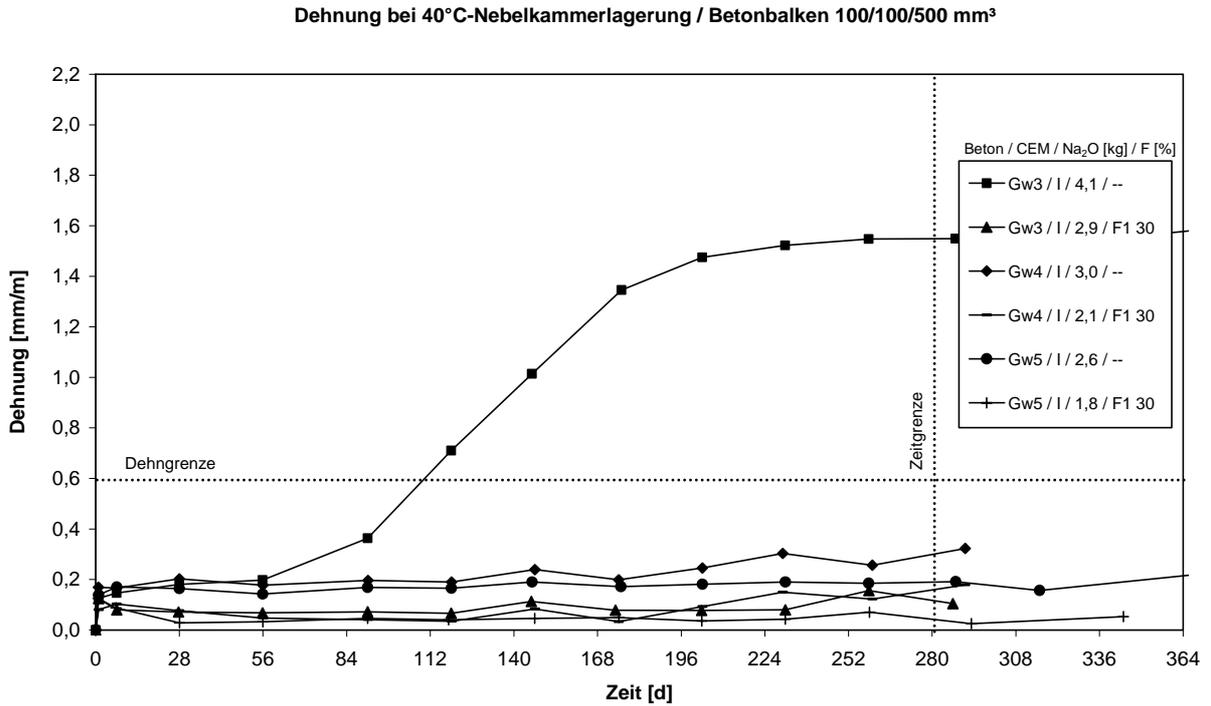


Abbildung A5 70: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw3, Gw4 und Gw5

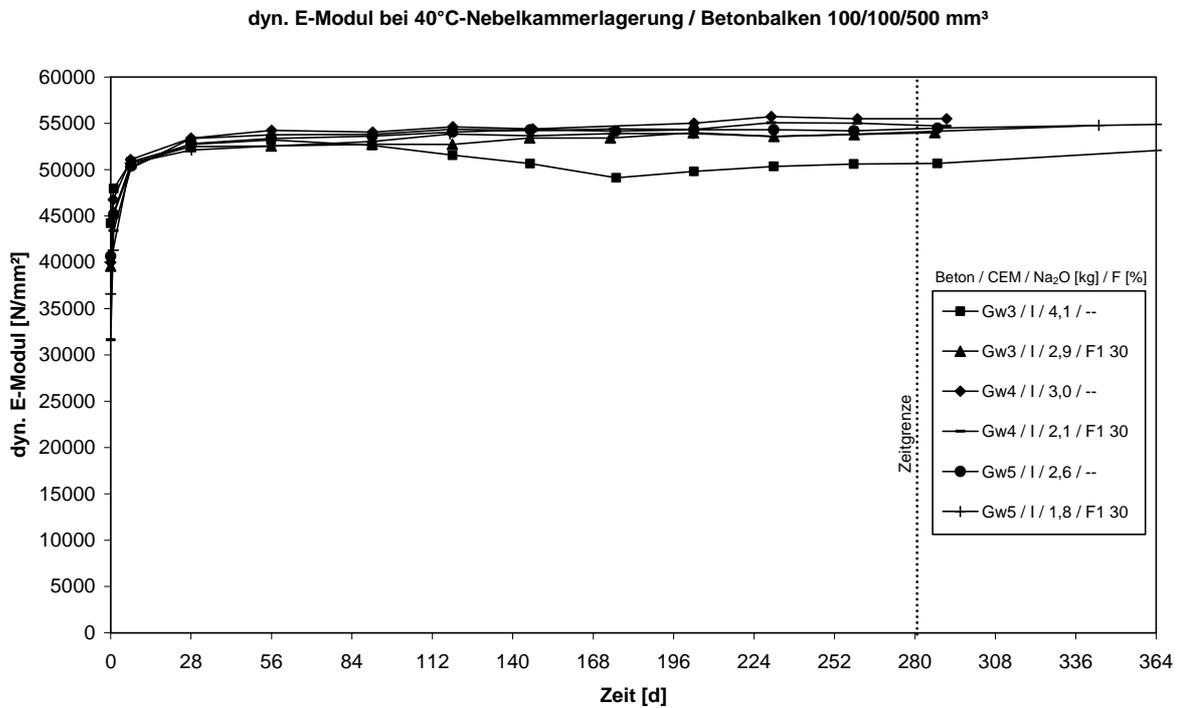


Abbildung A5 71: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw3, Gw4 und Gw5

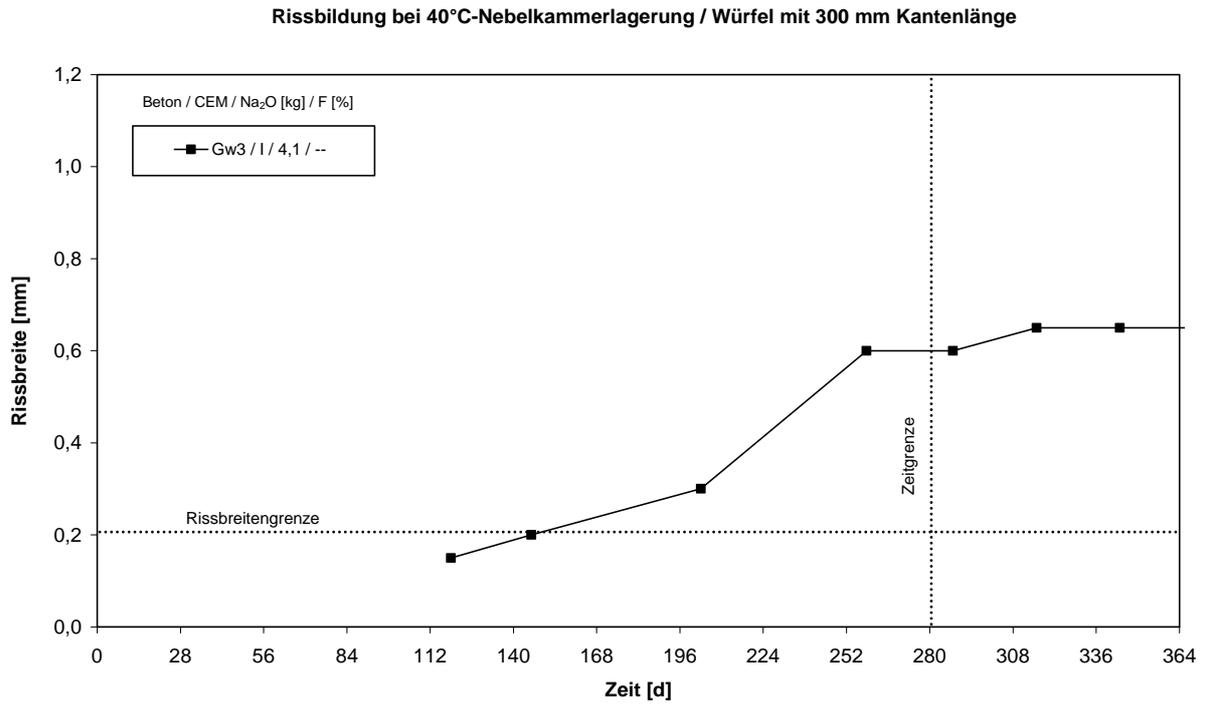


Abbildung A5 72: Entwicklung der Rissbreiten der Grauwackebetone Gw3, Gw4 und Gw5

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

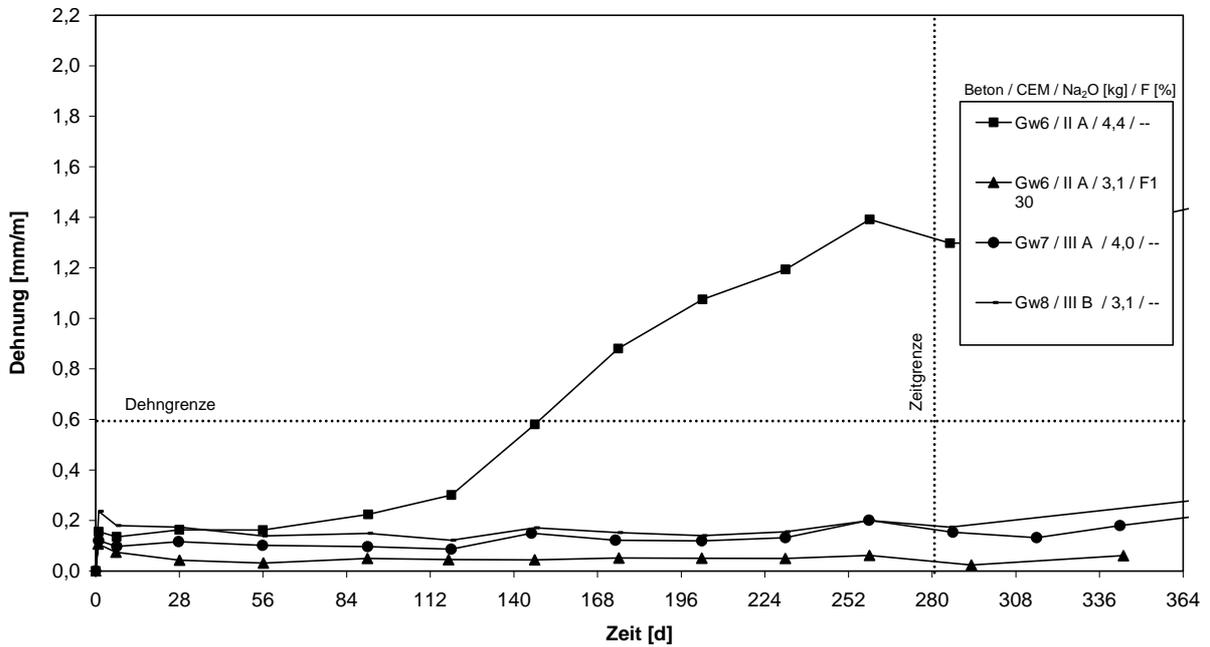


Abbildung A5 73: Dehnungsverlauf der Grauwackebetone Gw6, Gw7 und Gw8

dyn. E-Modul bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

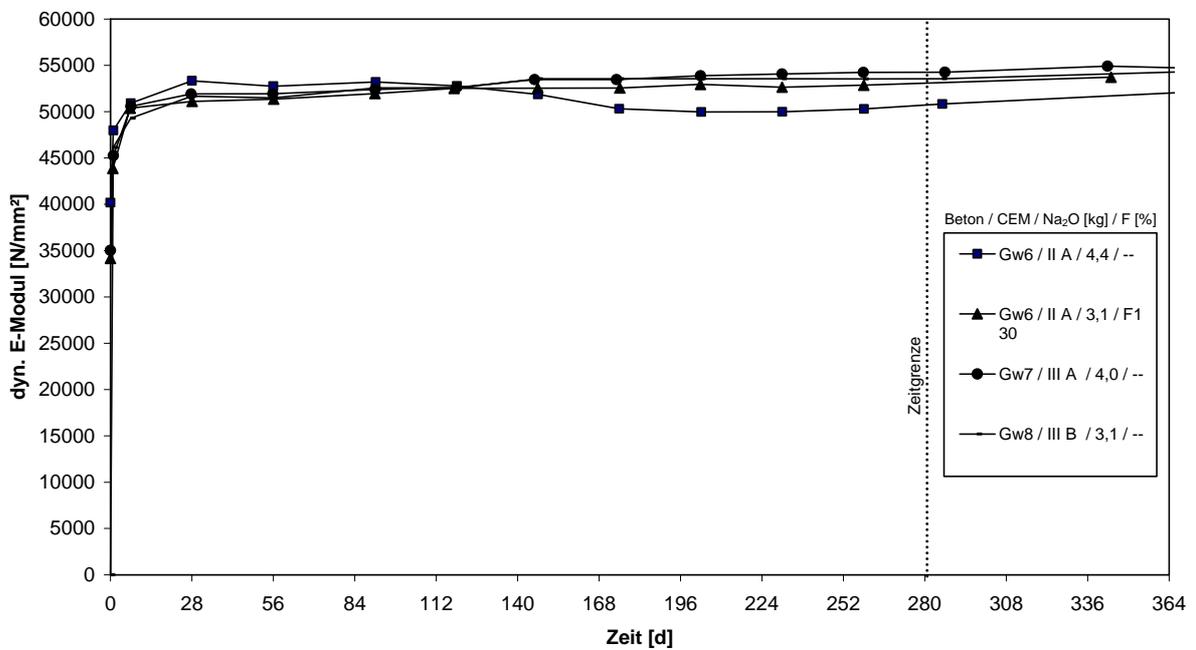


Abbildung A5 74: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Grauwackebetone Gw6, Gw7 und Gw8

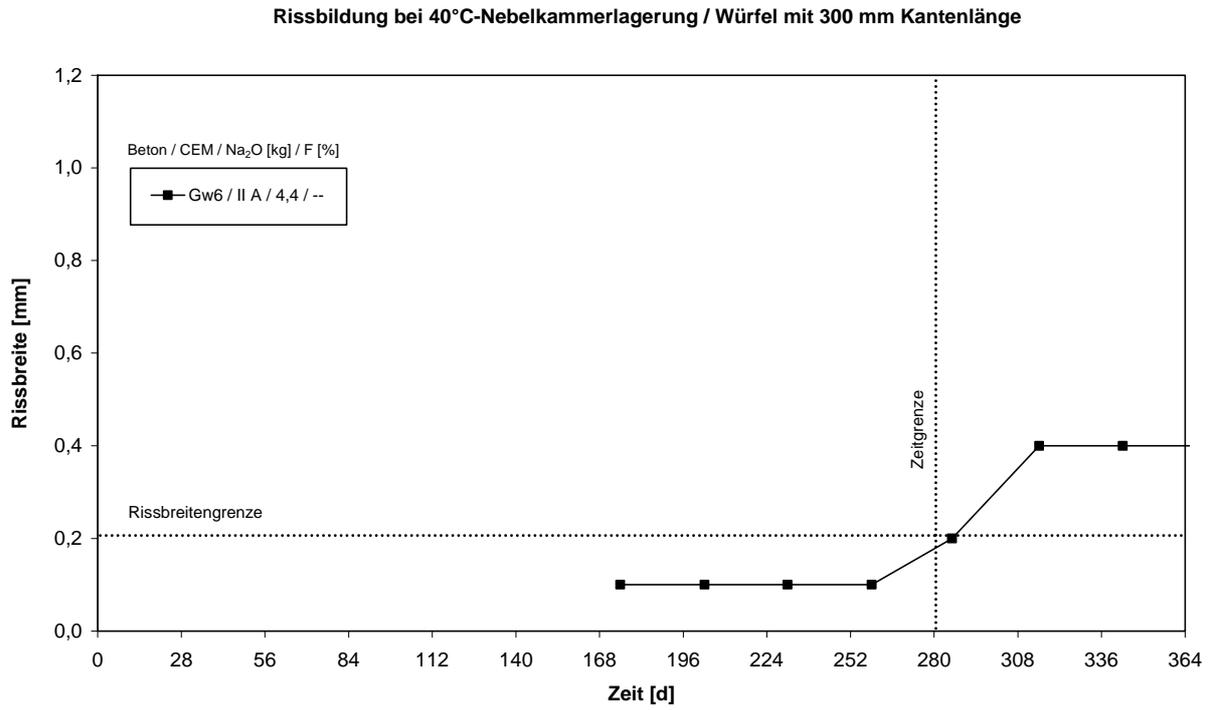


Abbildung A5 75: Entwicklung der Rissbreiten der Grauwackebetone Gw6, Gw7 und Gw8

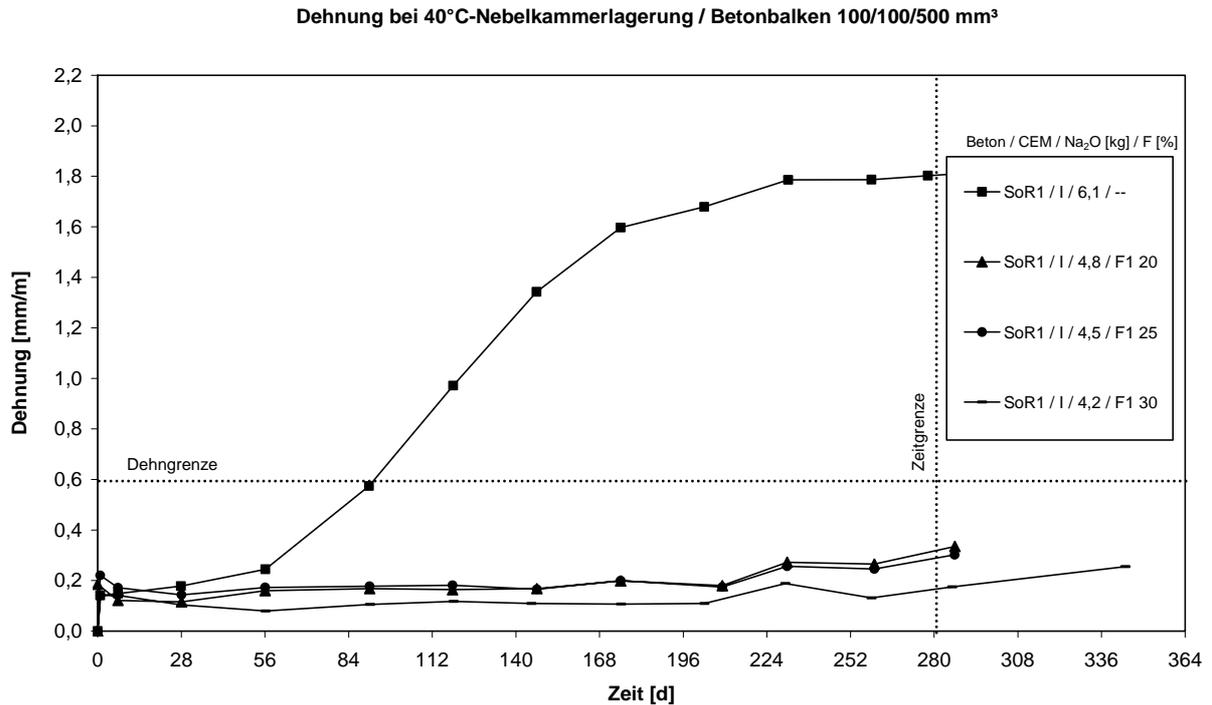


Abbildung A5 76: Dehnungsverlauf der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR1

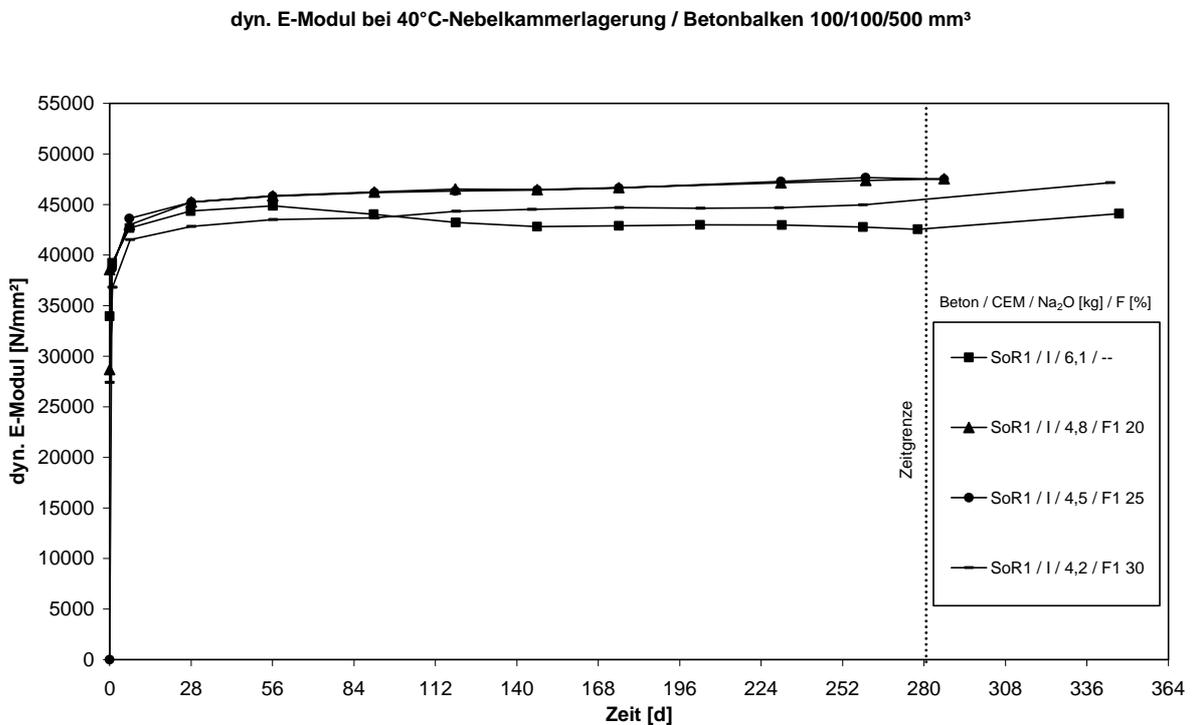


Abbildung A5 77: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR1

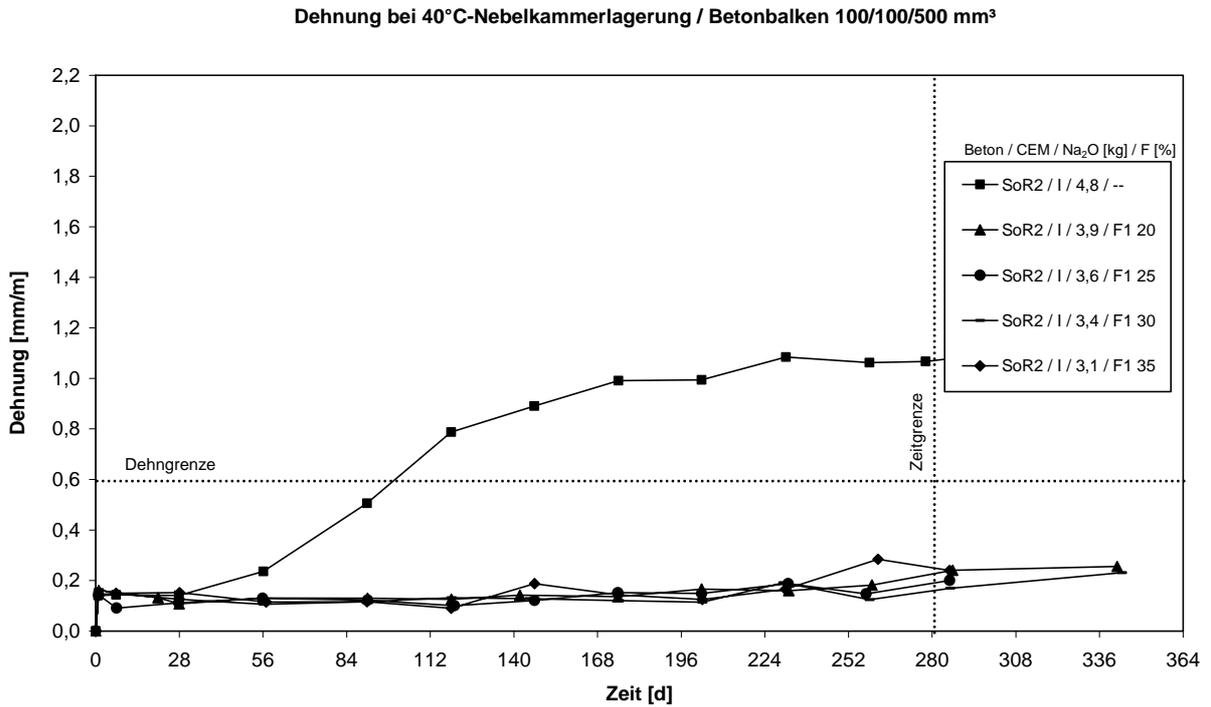


Abbildung A5 78: Dehnungsverlauf der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F1

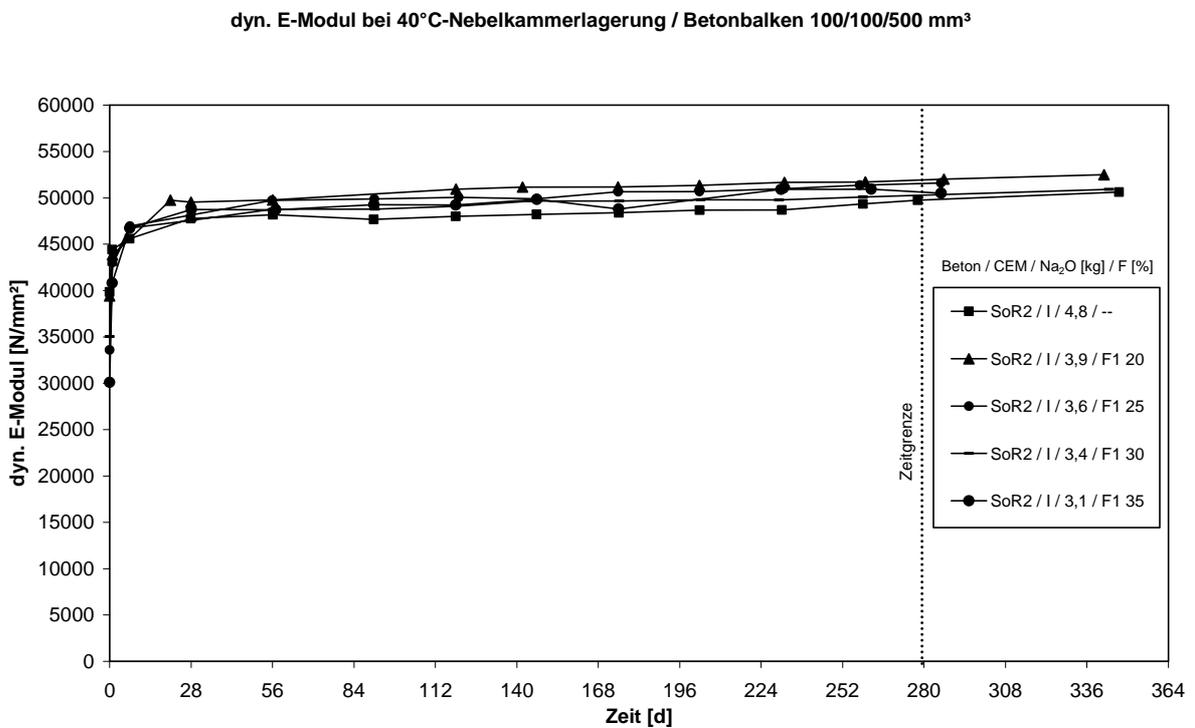


Abbildung A5 79: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F1

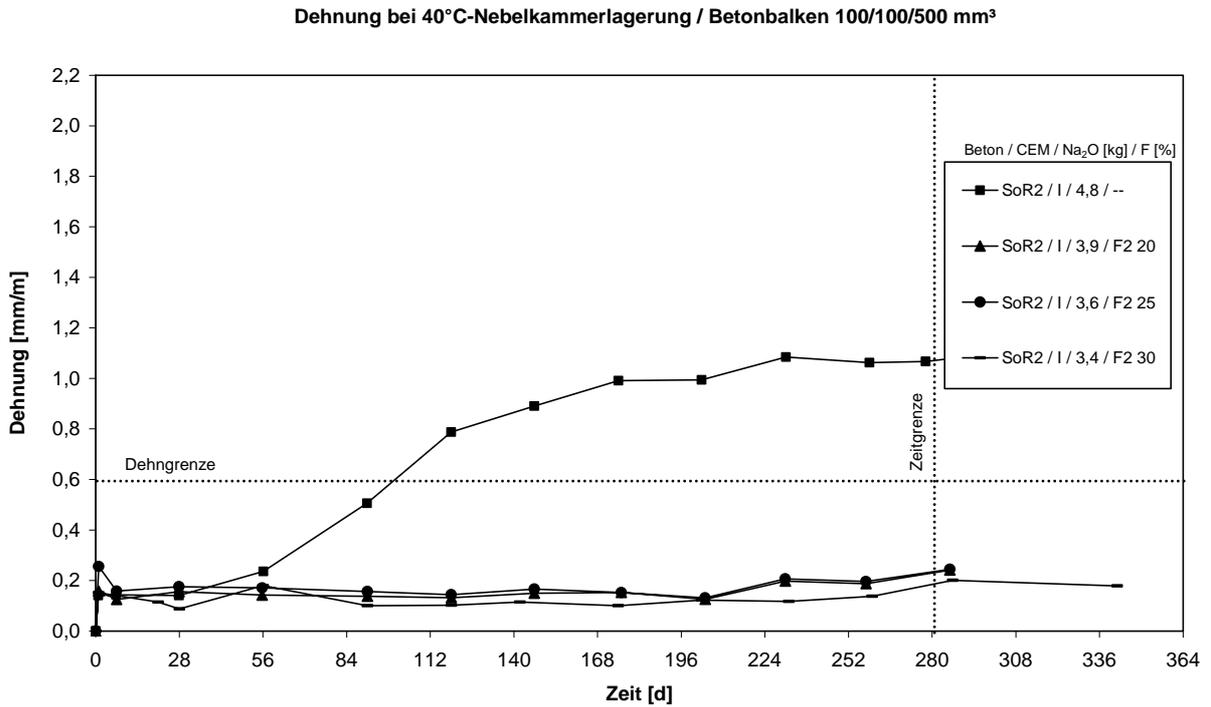


Abbildung A5 80: Dehnungsverlauf der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F2

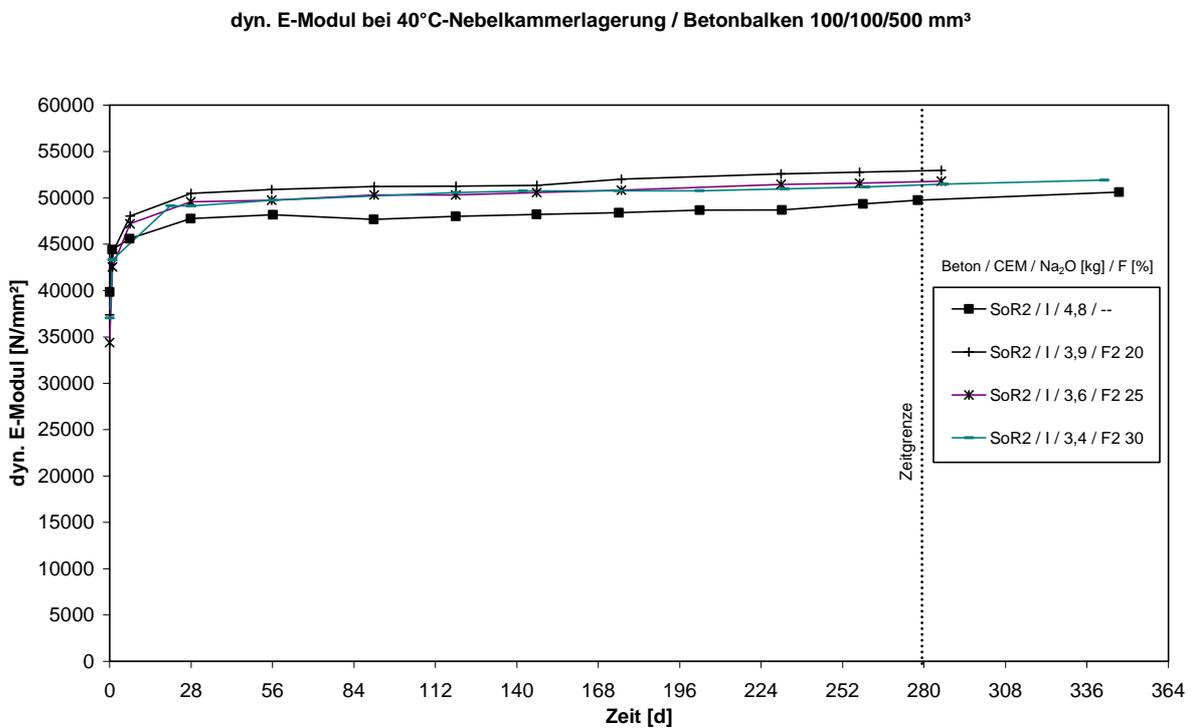


Abbildung A5 81: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F2

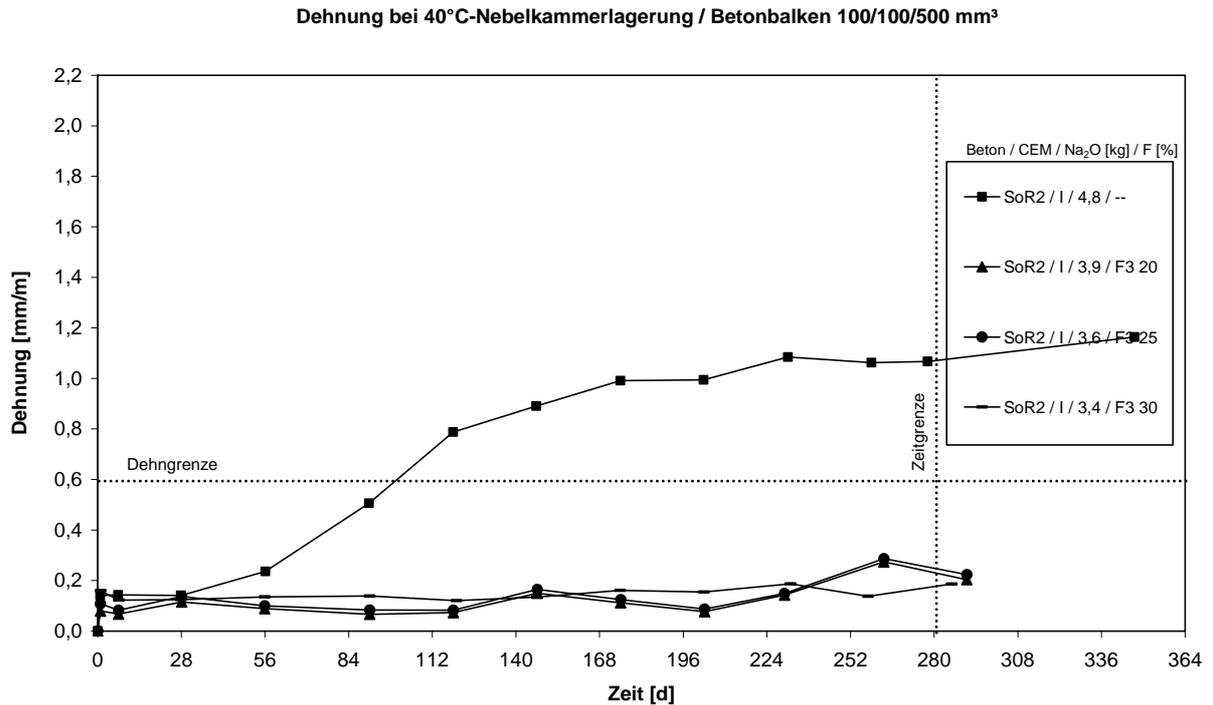


Abbildung A5 82: Dehnungsverlauf der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F3

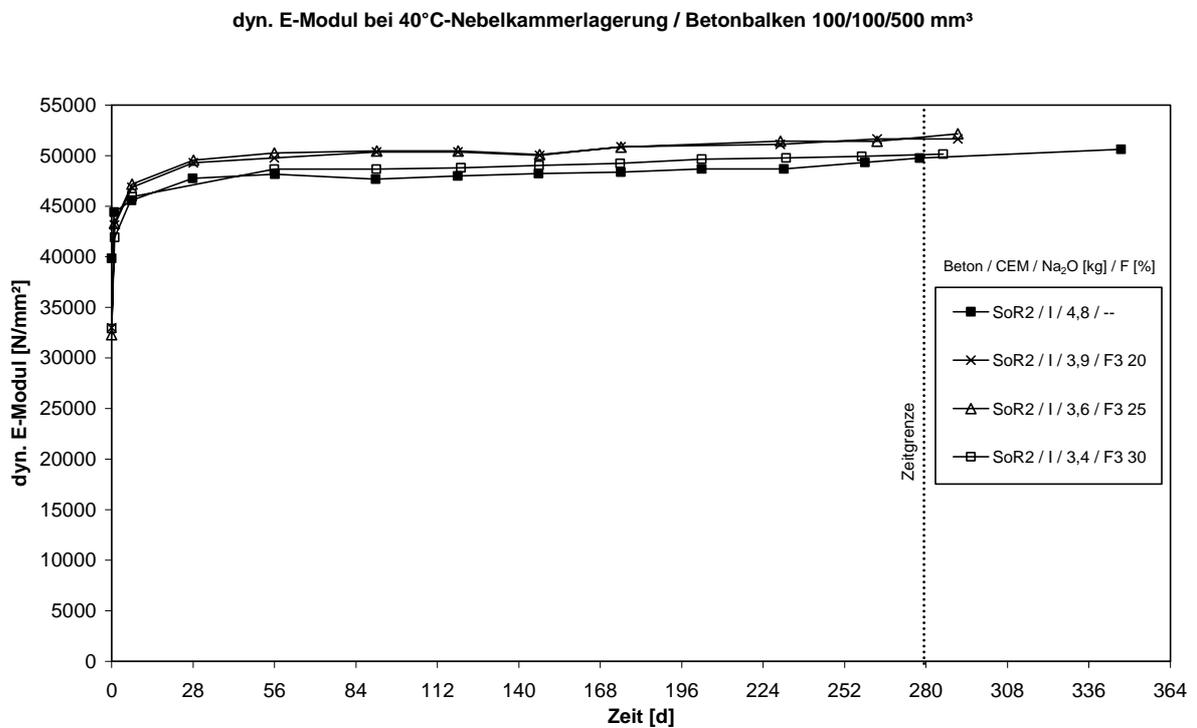


Abbildung A5 83: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR2 F3

Rissbildung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Würfel mit 300 mm Kantenlänge

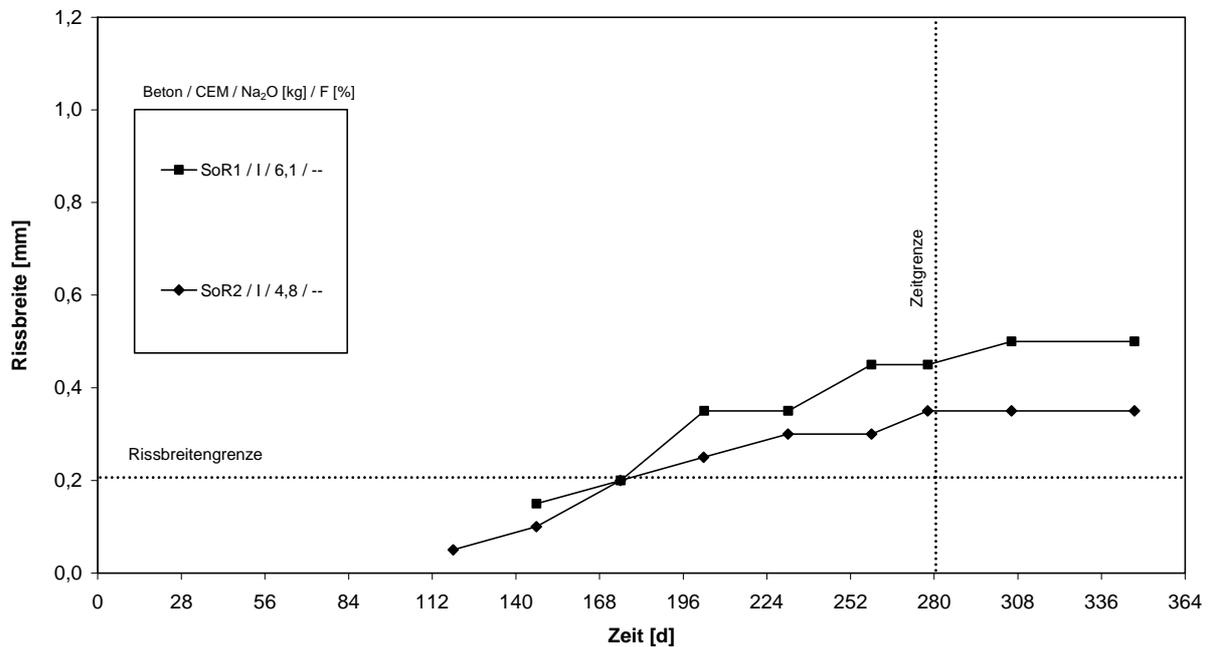


Abbildung A5 84: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Kies-Edelsplitt Oberrheingraben SoR1 und SoR2

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Betonbalken 100/100/500 mm<sup>3</sup>

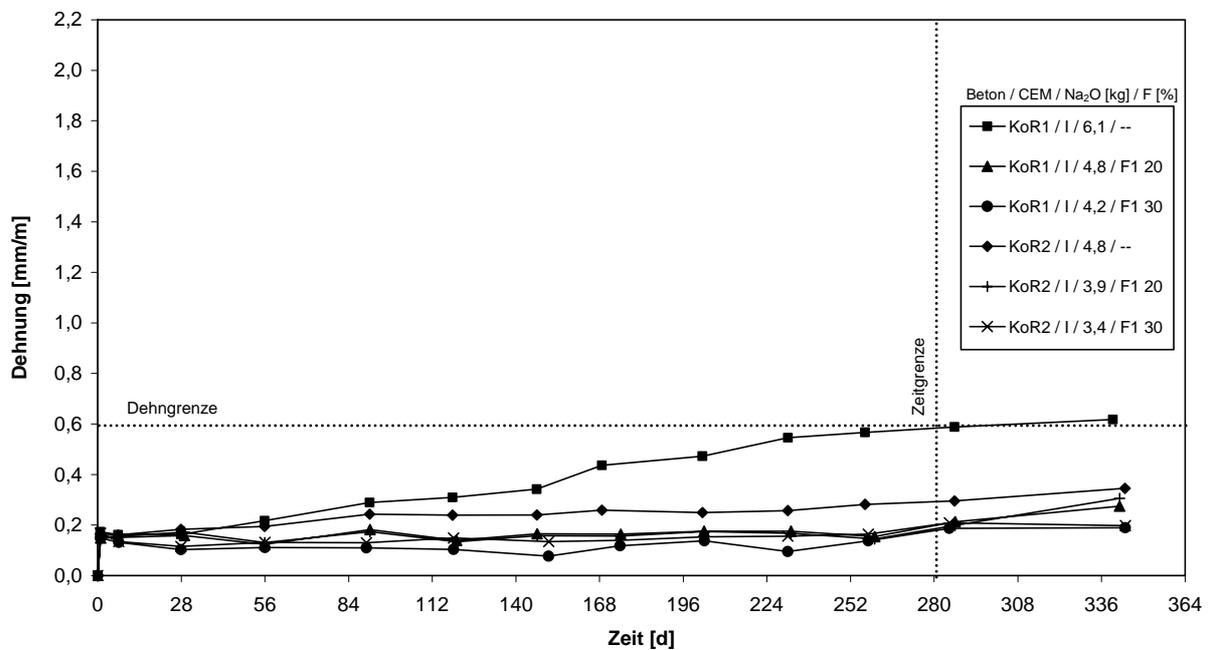


Abbildung A5 85: Dehnungsverlauf der Betone mit Kies Oberrheingraben KoR1 und KoR2

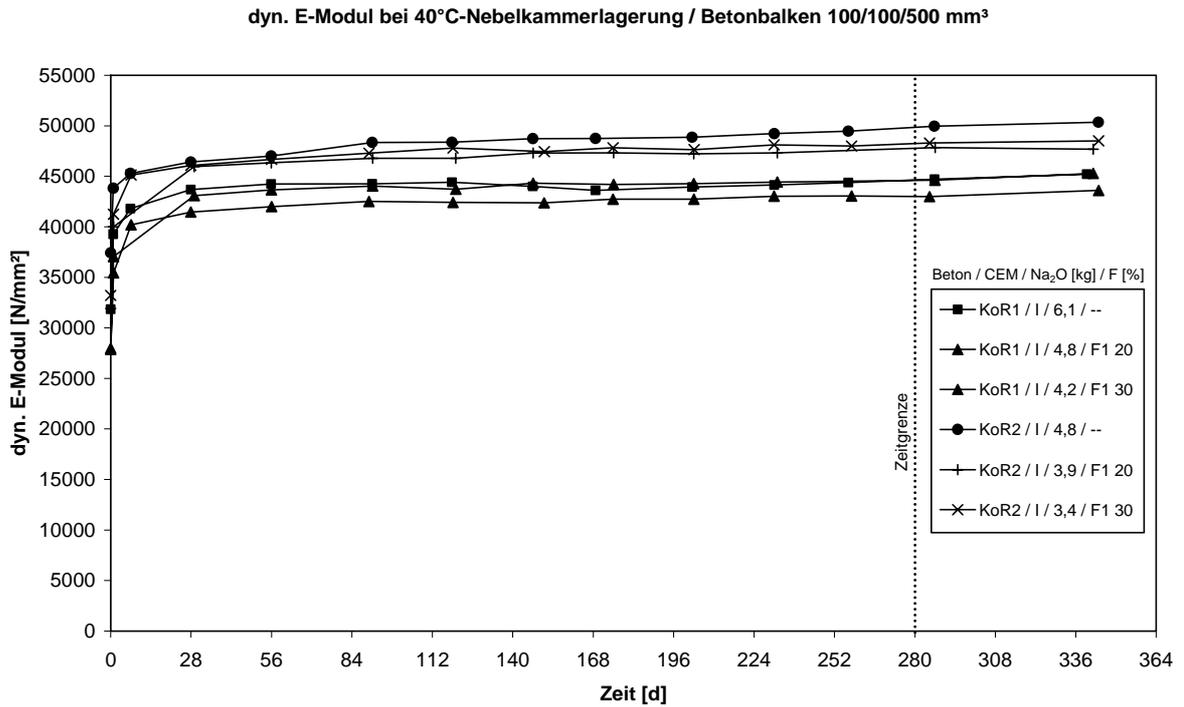


Abbildung A5 86: Entwicklung des dyn. E-Moduls der Betone mit Kies Oberrheingraben KoR1 und KoR2

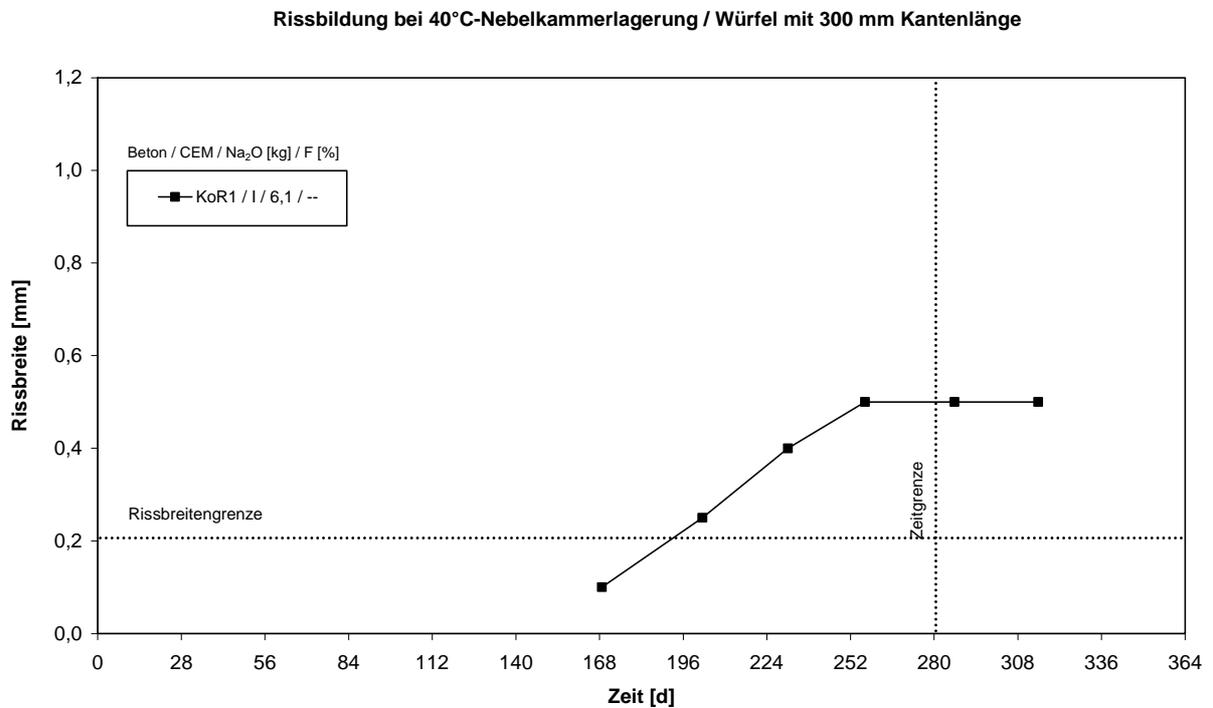


Abbildung A5 87: Entwicklung der Rissbreiten der Betone mit Kies Oberrheingraben KoR1 und KoR2

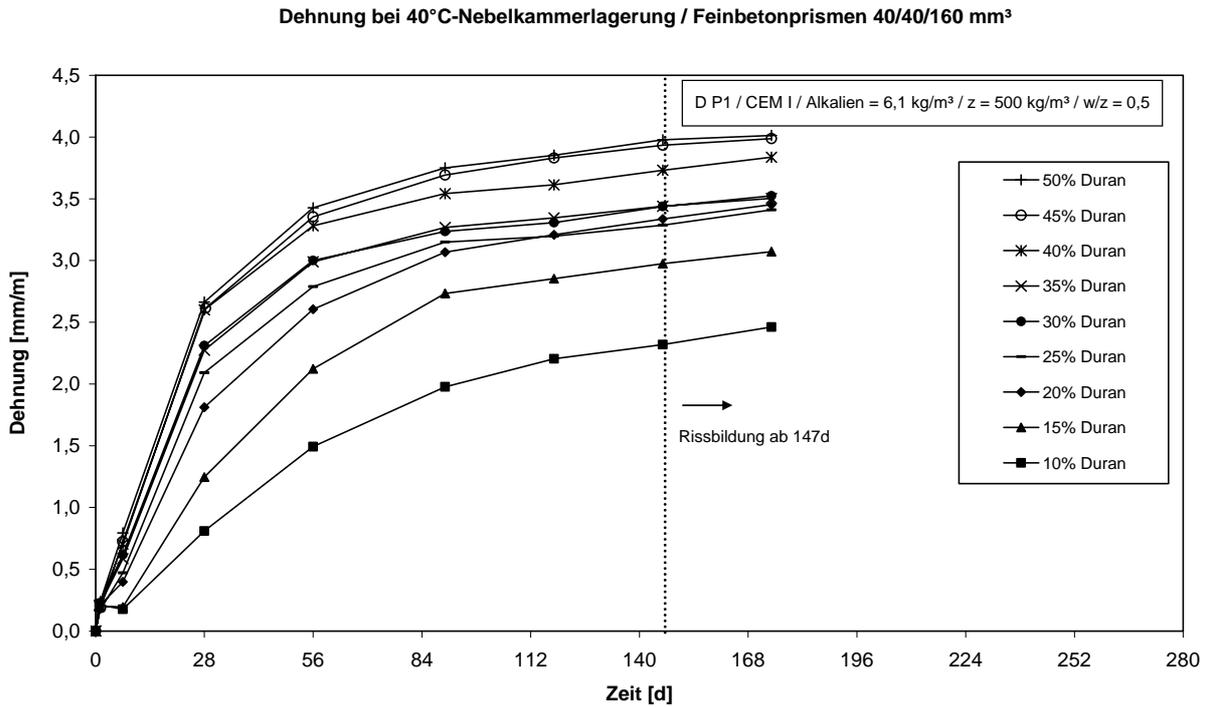


Abbildung A5 88: Dehnungsverlauf der Pessimumfeinbetone mit Duranglas

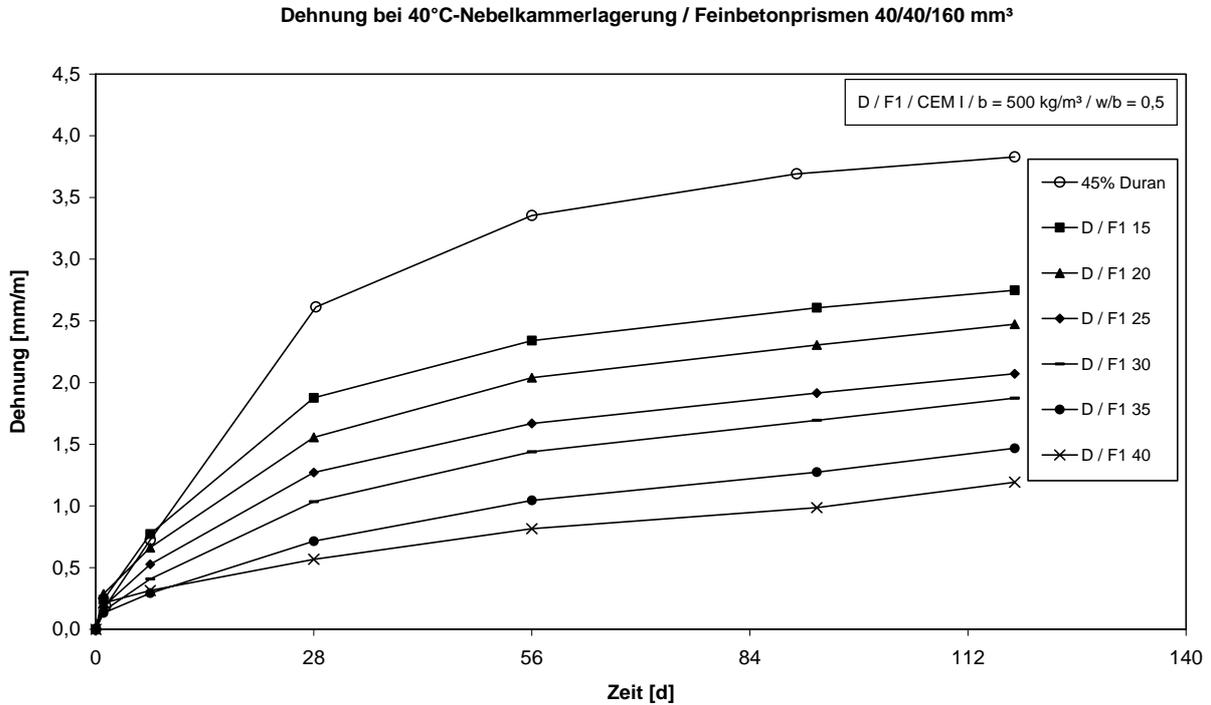


Abbildung A5 89: Dehnungsverlauf der Feinbetone mit Duranglas bei Verwendung der Flugasche F1 im Bindemittel

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Feinbetonprismen 40/40/160 mm<sup>3</sup>

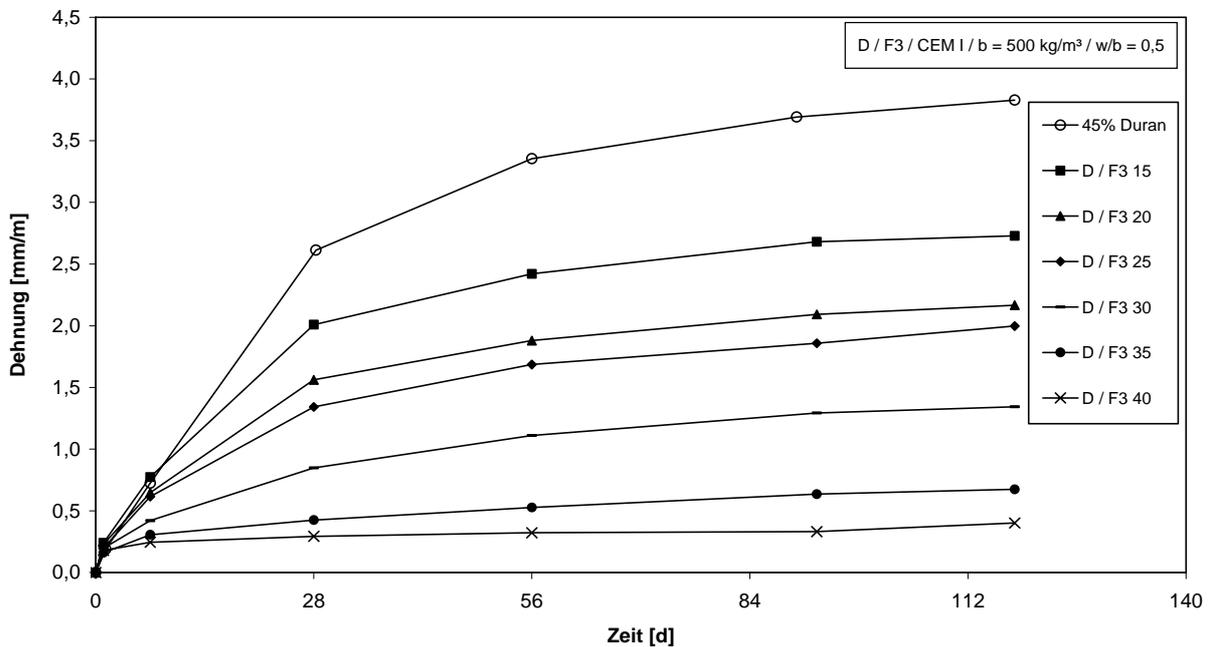


Abbildung A5 90: Dehnungsverlauf der Feinbetone mit Duranglas bei Verwendung der Flugasche F3 im Bindemittel

Dehnung bei 40°C-Nebelkammerlagerung / Feinbetonprismen 40/40/160 mm<sup>3</sup>

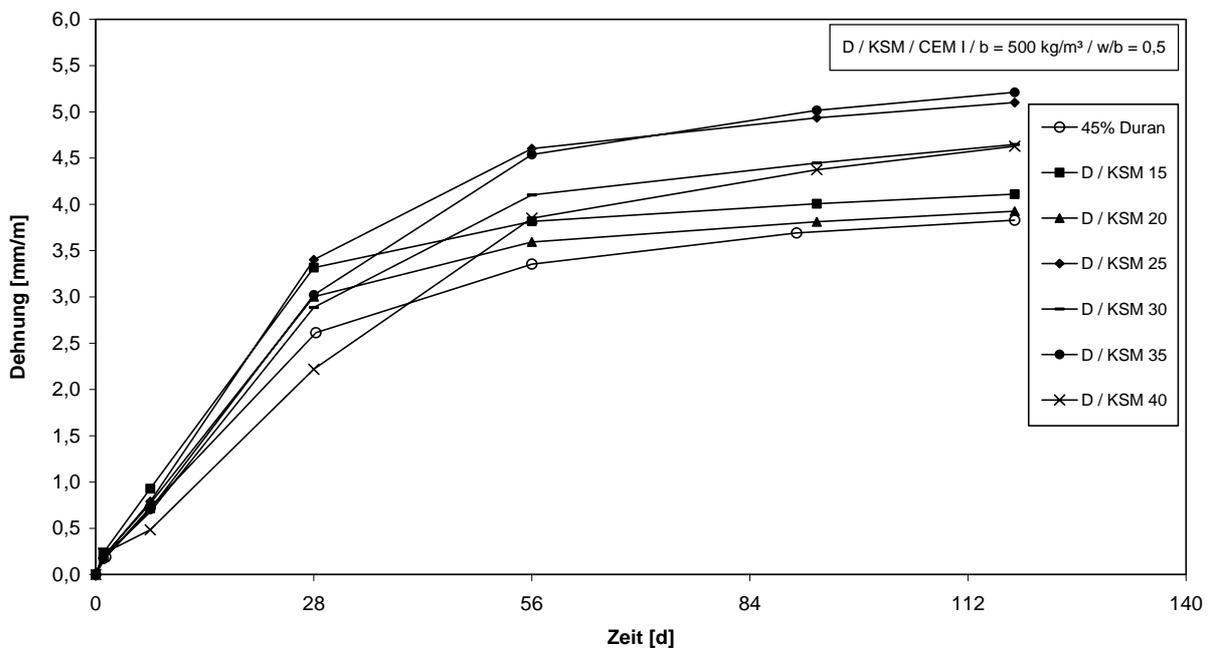


Abbildung A5 91: Dehnungsverlauf der Feinbetone mit Duranglas bei Verwendung des Kalksteinmehls KSM im Bindemittel

## Anhang 6: Porenlösungsauspressversuche

Tabelle A6 1: Chem. Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton EI – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH <sup>-</sup>		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		--		mmol/l		--	
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
Rezeptur nach DIBt-Prüfplan / CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,55											
EI 1a	28	--	561	--	13,7	--	0,5	--	120	--	548
	90	--	519	--	13,7	--	0,2	--	108	--	489
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 1	28	--	572	--	13,8	--	0,5	--	116	--	584
	90	--	545	--	13,7	--	0,5	--	124	--	545
	365	--	430	--	13,6	--	0,2	--	111	--	420
EI 1 / F1 35	28	--	328	--	13,5	--	0,4	--	115	--	281
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	341	--	13,5	--	0,5	--	130	--	281
EI 1 / KSM 35	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	306	--	13,5	--	0,6	--	78	--	263
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
EI 2	28	691	611	13,84	13,79	1,1	0,9	124	129	648	619
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	434	--	13,6	--	0,3	--	118	--	449
EI 2 / F1 35	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	381	--	13,6	--	0,7	--	139	--	312
EI 2 / KSM 35	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	315	--	13,5	--	0,7	--	82	--	267

## Anhang 6: Porenlösungsauspressversuche

Tabelle A6 1: Chem. Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton EI – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung (Fortsetzung)

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH <sup>-</sup>		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		mmol/l					
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 2a	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	489	--	13,7	--	0,2	--	123	--	465
EI 2a / F1 35	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	367	--	13,6	--	0,2	--	134	--	292
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 0,65 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 3	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	262	--	13,4	--	1,4	--	137	--	155
EI 3 / F1 30	28	--	237	--	13,4	--	0,4	--	106	--	140
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	235	--	13,4	--	0,8	--	119	--	143
CEM II / A, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,09 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 4	28	--	570	--	13,8	--	1,3	--	123	--	590
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	466	--	13,7	--	0,5	--	118	--	476
CEM III / A, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,00 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 5	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	340	--	13,5	--	0,5	--	100	--	297
CEM III / B, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 0,78 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
EI 6	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	490	--	13,7	--	0,2	--	124	--	499







Tabelle A6 4: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton Gw – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH <sup>-</sup>		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		mmol/l					
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
Gw1	28	--	593	--	13,8	--	2,2	--	132	--	618
	90	--	603	--	13,8	--	0,2	--	135	--	584
	365	--	487	--	13,7	--	0,1	--	127	--	492
Gw1 / F1 20	28	--	463	--	13,7	--	0,5	--	139	--	432
	90	--	455	--	13,7	--	0,9	--	144	--	412
	365	495	413	13,69	13,6	0,1	0,0	153	157	450	421
Gw1 / F1 25	28	--	428	--	13,6	--	0,5	--	133	--	383
	90	--	423	--	13,6	--	5,5	--	140	--	371
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Gw1 / F1 30	28	460	347	13,7	13,5	0,8	0,4	119	122	400	332
	90	479	373	13,7	13,6	0,6	0,0	134	130	382	327
	365	--	351	--	13,5	--	0,1	--	147	--	354
Gw1 / F1 35	28	--	334	--	13,5	--	0,2	--	114	--	297
	90	--	326	--	13,5	--	0,2	--	118	--	291
	365	--	340	--	13,53	--	0,2	--	131	--	287
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw2	28	572	658	13,7	13,8	1,1	1,1	159	160	617	634
	90	682	599	13,8	13,8	1,1	0,2	155	153	658	618
	365	--	413	--	13,6	--	0,13	--	122	--	463
Gw2 / KSM 20	28	--	543	--	13,7	--	1,2	--	120	--	512
	90	--	481	--	13,7	--	0,5	--	117	--	464
	365	584	335	13,77	13,52	1,0	0,3	115	102	520	331
Gw2 / KSM 30	28	498	458	13,7	13,7	1,2	1,1	100	109	445	435
	90	497	430	13,7	13,6	1,6	1,0	103	109	444	406
	365	--	325	--	13,51	--	0,3	--	93	--	284
Gw 2 / F1 20	28	--	418	--	13,6	--	0,5	--	146	--	452
	90	--	441	--	13,6	--	0,0	--	149	--	423
	365	490	384	13,69	13,6	0,2	0,1	162	154	485	419
Gw2 / F1 25	28	--	391	--	13,6	--	0,5	--	141	--	408
	90	--	413	--	13,6	--	0,0	--	142	--	379
	365	470	365	13,67	13,6	0,6	0,1	158	145	444	374



Tabelle A6 4: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton Gw – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung (Fortsetzung)

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		mmol/l					
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,02 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw3	28	--	534	--	13,7	--	1,5	--	126	--	587
	90	--	533	--	13,7	--	0,4	--	195	--	468
	365	--	394	--	13,6	--	0,1	--	168	--	343
Gw3 / F1 30	28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	90	--	364	--	13,6	--	0,0	--	166	--	292
	365	381	348	13,6	13,5	0,5	0,0	171	170	311	292
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 0,76 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
GW4	28	435	406	13,64	13,61	1,3	1,2	99	103	354	322
	90	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 0,65 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw 5	28	319	316	13,50	13,50	1,7	1,5	132	142	190	180
	90	--	338	--	13,5	--	1,0	--	164	--	210
	365	--	279	--	13,5	--	0,6	--	154	--	177
Gw5 / F1 30	28	282	235	13,5	13,4	1,5	0,7	130	131	173	171
	90	295	264	13,5	13,4	2,2	1,5	136	126	174	161
	365	--	240	--	13,4	--	0,5	--	134	--	172
CEM II / A, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,09 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw6	28	566	515	13,75	13,71	1,1	1,1	118	125	518	486
	90	--	496	--	13,7	--	0,1	--	132	--	491
	365	--	385	--	13,6	--	0,1	--	125	--	408
Gw6 / F1 30	28	374	308	13,6	13,5	0,8	0,6	111	116	337	282
	90	384	308	13,6	13,5	0,7	0,5	123	115	310	267
	365	--	287	--	13,5	--	0,1	--	119	--	263
CEM III / A, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,00 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw7	28	438	383	13,64	13,58	1,2	1,1	98	102	363	318
	90	--	357	--	13,6	--	0,8	--	106	--	341
	365	--	279	--	13,5	--	0,3	--	103	--	298
CEM III / B, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 0,78 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
Gw8	28	--	158	--	13,2	--	0,1	--	73	--	154
	90	--	179	--	13,3	--	1,4	--	74	--	142
	365	--	145	--	13,2	--	0,9	--	76	--	138

Tabelle A6 5: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton KoR – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		mmol/l					
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 500kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,50											
KoR1	28	--	574	--	13,8	--	0,4	--	120	--	560
	90	--	505	--	13,7	--	0,2	--	113	--	485
	365	620	386	13,79	13,59	0,1	0,2	130	106	586	351
KoR1 / F1 20	28	--	415	--	13,6	--	0,1	--	119	--	339
	90	--	388	--	13,6	--	0,1	--	121	--	337
	365	434	296	13,64	13,47	0,2	0,2	121	105	347	245
KoR1 / F1 30	28	413	341	13,6	13,5	0,8	0,1	118	117	340	293
	90	419	341	13,6	13,5	0,5	0,1	128	123	335	288
	365	--	320	--	13,51	--	0,1	--	126	--	263
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
KoR2	28	--	489	--	13,7	--	0,6	--	114	--	522
	90	--	481	--	13,7	--	0,1	--	112	--	471
	365	511	283	13,71	13,45	0,3	0,3	126	83	595	251
KoR2 / F1 20	28	--	432	--	13,6	--	0,4	--	132	--	386
	90	--	400	--	13,6	--	0,0	--	130	--	359
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
KoR2 / F1 30	28	423	376	13,6	13,6	0,8	0,5	127	127	400	314
	90	443	370	13,7	13,6	0,4	0,1	138	133	366	317
	365	--	310	--	13,49	--	0,1	--	132	--	276



Tabelle A6 6: Chemische Zusammensetzung des Porenwassers aus dem Beton SoR – Einfluss Temperatur - zeitliche Entwicklung (Fortsetzung)

Bezeichnung der Mischung	Alter	OH		pH-Wert		Ca <sup>++</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>	
--	d	mmol/l		--		mmol/l					
1	2	3		4		5		6		7	
Temperatur [°C]		20	40	20	40	20	40	20	40	20	40
CEM I, Na <sub>2</sub> O <sub>e</sub> = 1,21 M.-% / b = 400kg/m <sup>3</sup> / w/b = 0,45											
SoR2 / F2 20	28	--	424	--	13,6	--	0,2	--	111	--	395
	90	--	412	--	13,6	--	0,1	--	112	--	395
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SoR2 / F2 25	28	--	385	--	13,6	--	0,1	--	105	--	361
	90	--	377	--	13,6	--	0,2	--	103	--	344
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SoR2 / F2 30	28	428	356	13,6	13,6	0,6	0,1	104	101	394	337
	90	409	362	13,6	13,6	0,5	0,2	107	104	356	338
	365	--	331	--	13,52	--	107	--	107	--	313
SoR2 / F3 20	28	--	311	--	13,5	--	0,4	--	91	--	345
	90	--	307	--	13,5	--	0,1	--	86	--	312
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SoR2 / F3 25	28	--	336	--	13,5	--	0,1	--	84	--	304
	90	--	284	--	13,5	--	0,1	--	77	--	266
	365	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
SoR2 / F3 30	28	411	300	13,6	13,5	0,7	0,1	102	79	392	276
	90	362	276	13,6	13,4	0,3	0,1	86	75	318	252
	365	--	341	--	13,53	--	0,0	--	140	--	323



