

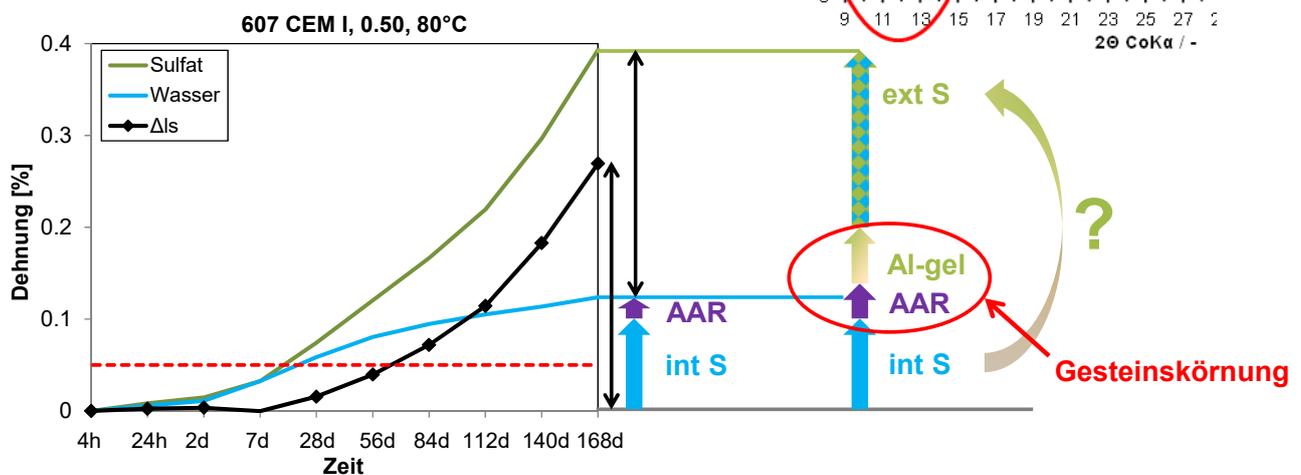
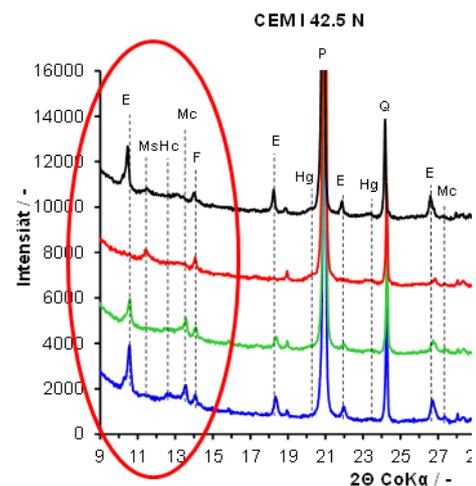
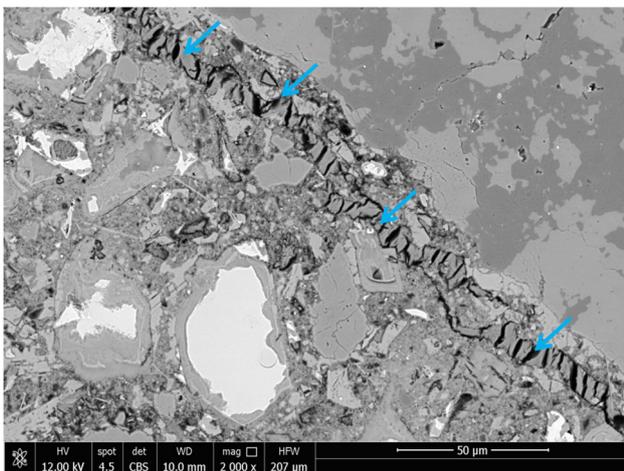
Empa
 Überlandstrasse 129
 CH-8600 Dübendorf
 T +41 58 765 11 11
 F +41 58 765 69 35
 www.empa.ch/abt308

Abteilung Beton / Bauchemie

Schlussbericht

cemsuisse-Projekt 201701

Validierung des Sulfatwiderstandes nach SIA 262/1 Anhang L



Andreas Leemann, Roman Loser, Frank Winnefeld, Stéphane Cuchet

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	6
1.1 Ausgangslage	6
1.2 Prüfung nach Anhang L	6
1.2.1 Prinzip	6
1.2.2 Potentielle Probleme	6
2. Projektziel	7
3. Materialien und Methoden	7
3.1 Materialien	7
3.2 Methoden	8
4. Resultate	10
4.1 Mörtel.....	10
4.1.1 Thermogravimetrie.....	10
4.1.2 Röntgendiffraktion	11
4.2 Beton	13
4.2.1 Übersicht	13
4.2.2 Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang D.....	13
4.2.3 Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang L	15
4.2.4 E-Modul	19
4.2.5 O ₂ -Diffusion.....	19
4.2.6 Mikroskopie	20
5. Diskussion	27
5.1 Vergleich der Sulfatdehnungen zwischen Anhang D und L.....	27
5.2 Auswirkungen der Trocknungstemperatur von 80 °C	29
6. Zusammenfassung	30
7. Umsetzung und Ausblick	30
8. Referenzen	31
Anhang	33
A1. TGA	33
A2. XRD	34
A3. Schwefelprofile	35

Für das cemsuisse-Projekt 201701:

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 1. Februar 2019

A handwritten signature in black ink, reading "Andreas Leemann". The signature is written in a cursive, flowing style.

Dr. Andreas Leemann

Zusammenfassung

Projektdauer: Mai 2017 - Dezember 2018

Autoren: Andreas Leemann, Roman Loser, Frank Winnefeld, Stephane Cuchet

Es wurden Betone aus drei verschiedenen CEM I und drei verschiedenen CEM II HS mit w/z 0.45 und 0.50 hergestellt. Zudem wurden ein CEM II/A-LL, ein CEM I SR und eine CEM III/B HS eingesetzt. Der Sulfatwiderstand dieser Betone wurde nach den Verfahren Anhang D (SN 505 262/1) und Anhang L (prSN 505 262/1) geprüft. Als Variante des Anhangs L wurde auch eine Trocknung mit 50 °C vorgenommen. Ausgewählte Betone wurden nach der Prüfung mittels Rasterelektronenmikroskopie, O₂-Diffusion und E-Modul untersucht. Zusätzlich wurden mit den CEM I Zementen Mörtel hergestellt, um die Änderungen der Hydratphasen durch die Trocknung und anschliessende Wasserlagerung zu untersuchen

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 80 °C werden durch vier verschiedene Prozesse und deren gegenseitigen Wechselwirkung verursacht: externer Sulfatangriff, interner Sulfatangriff, Freisetzen von Aluminium aus der Gesteinskörnung mit zusätzlicher Ettringitbildung und Alkali-Aggregat-Reaktion. Aus diesem Grund ist das Verfahren für die Prüfung des Widerstandes eines Betons gegen externen Sulfatangriff ungeeignet.

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 50 °C sind auf eine Ettringitbildung durch externen Sulfatangriff zurückzuführen. Allerdings sind die Werte klein (0.02-0.93 ‰) und sie erlauben es nur ungenügend, Betone mit tiefem oder hohem Widerstand gegen externen Sulfatangriff zu separieren. Aus diesem Grund ist das Verfahren für die Prüfung des Widerstandes eines Betons gegen externen Sulfatangriff ungeeignet.

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang D sind auf eine Ettringitbildung durch externen Sulfatangriff zurückzuführen. Die Werte liegen in einem Bereich (0.28-2.82 ‰), der es erlaubt, Betone mit hohem und tiefem Sulfatwiderstand zu identifizieren. Es ist deshalb sinnvoll, das Verfahren in der SIA 262/1 zu belassen und es anzuwenden.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sind bereits umgesetzt. Die Prüfung des Sulfatwiderstandes nach Anhang L wurde aus der prSN 505 262/1 und der SN EN 197-1 NB gestrichen und nicht in den NA der EN 206:2013 übernommen.

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Sulfatwiderstand durch einen externen Angriff auf Beton (Einwirkung von aussen durch sulfathaltiges Grundwasser) wird seit 2013 mit einem abgeänderten Verfahren nach SIA 262/1, Anhang D, geprüft. Dieses Verfahren ist das Ergebnis von zwei ASTRA-Projekten [1,2] und einem cemsuisse-Projekt [3], in dem das 2003 in die SIA 262/1 aufgenommene, leider mangelhafte Verfahren zur Prüfung des Sulfatwiderstandes verbessert wurde. Durch die umfangreichen Untersuchungen ist einerseits genau bekannt, welche Mineralphasen sich in Abhängigkeit des Sulfateintrages bilden und wie die Expansion mit der mechanischen Schwächung des Betons einhergeht.

Im letzten Jahr hat sich nun gezeigt, dass Betone aus CEM I (z. Bsp. Zementgehalt = 350 kg/m³ und w/z = 0.48) Anhang D bestehen können. Dies wurde durch einen Vergleichsversuch zwischen Holcim (Schweiz) AG, Holcim Group Support und Empa sowie einem VAB Ringversuch [4] bestätigt. Dieser Befund widerspricht der auf beschleunigten Prüfungen [z. Bsp. 5] von Zementstein und Mörtel fassenden Lehrbuchmeinung, dass Beton aus CEM I nicht sulfatbeständig sein sollte. Zudem hat eine Prüfung desselben Betons nach einem seit rund 20 Jahren angewandten und an der TFB entwickelten Verfahren ein anderes Resultat als der Anhang D gezeigt: der Beton wird danach als nicht sulfatbeständig klassiert. Die Schlussfolgerung daraus war, dass Anhang D ein "falsches" Resultat liefert und das TFB-Verfahren ein "richtiges" Resultat. Dem gilt anzumerken, dass Langzeitversuche in natürlicher Auslagerung gezeigt haben, dass Beton aus CEM I sulfatbeständig sein kann, wenn der w/z < 0.45 ist [5]. Auf der anderen Seite kann Bauwerksbeton aus SR-Zement sehr wohl Sulfatschäden aufweisen, wie die Beispiele vom Gotschna-Tunnel [7] und Belchen-Tunnel [8] zeigen.

An der Sitzung der AG SIA 262 "Beton" wurde im September 2016 diskutiert, ob das TFB-Verfahren neu als Anhang L in die SIA 262/1 aufgenommen werden soll (Protokoll vom 14.09.2016). Da kein Konsens gefunden werden konnte, wurde der Entscheid an die SIA 262 weitergeleitet, die sich für eine Aufnahme des Anhangs L entschied (s. Protokoll vom 23.09.2016). Die SIA hat der AG Revision 262/1 den Auftrag gegeben, die TFB Prüfung als Anhang L in die SIA 262/1 einzuarbeiten.

1.2 Prüfung nach Anhang L

1.2.1 Prinzip

Das Prüfprinzip des Anhang L besteht darin, dass zwei Serien von je drei Beton-Bohrkernen (Ø 50 mm, Länge 150 mm) in einem Alter von 28 Tagen für fünf Tage bei 80 °C getrocknet werden. Eine Serie wird danach mit Sulfatlösung druckimprägniert und für 24 Wochen wiederum in Sulfatlösung gelagert. Bei der zweiten Serie wird identisch vorgegangen mit dem Unterschied, dass anstatt Sulfatlösung Wasser verwendet wird. Der massgebende Parameter ist die Differenz der Längenänderung zwischen der sulfatgelagerten und der wassergelagerten Serie nach 24 Wochen.

1.2.2 Potentielle Probleme

Aus der Literatur ist bekannt, dass Beton, der Temperaturen von 70 °C oder höher ausgesetzt war, nachträglich expandieren kann. Grund dafür ist die verzögerte Ettringitbildung, ein interner Sulfatangriff. Dabei wird der durch die normale Hydratation gebildete Ettringit durch die hohen Temperaturen in Monosulfat und Monokarbonat umgewandelt. Abgekühlt auf Normaltemperatur beginnt sich das Monosulfat und das Monokarbonat langsam wieder in Ettringit umzuwandeln. Bei dieser Umwandlung und Umverteilung kann es zu Expansion und Rissbildung im Beton kommen [9,10]. Dieses Problem ist bereits seit Jahrzehnten bekannt. Aufsehen haben vor allem tausende von

betroffenen Eisenbahnschwellen verursacht [11-13]. Das Phänomen der verzögerten Ettringitbildung, deren Ausmass auch vom verwendeten Zement abhängig ist, lässt sich an Beton unterschiedlichen Alters im Labor relativ einfach nachstellen [14-18].

2. Projektziel

Die Prozesse, die zu der beobachteten Expansion der Prüfkörper im Verfahren nach Anhang L führen, wurden im Gegensatz zum Verfahren nach Anhang D bisher noch nie untersucht. So sind folgende Punkte ungeklärt:

- Schwefelprofil in den sulfatgelagerten Prüfkörpern
- Identifikation der zur Expansion führenden Mineralneubildungen und deren Verteilung im Prüfkörper
- Schädigung der Prüfkörper in Form von Mikrorissen durch die Trocknung bei 80 °C
- Ursache für die relative starke Expansion der wassergelagerten Prüfkörper
- Anhang L als Prüfung eines externen Sulfatangriffes vertretbar
- Grund für die abweichende Beurteilung hinsichtlich Sulfatwiderstand zwischen Anhang L und Anhang D

Folgernd aus der Abklärung dieser Punkte ist das übergeordnete Projektziel:

Die Empfehlung eines einzigen Verfahren zur Prüfung des Sulfatwiderstandes nach SIA 262/1.

3. Materialien und Methoden

3.1 Materialien

In Absprache mit der Projektbegleitgruppe wurde vereinbart, dass die im Projekt verwendeten Zemente verschlüsselt werden und nur wie unten notiert bezeichnet werden. Entsprechend werden auch keine Daten der chemischen Zusammensetzung und der Mineralogie präsentiert.

Mit CEM I und CEM II HS wurden jeweils Betone mit einem w/z von 0.45 und 0.50 mit einem Zementgehalt von 345 respektive 320 kg/m³ hergestellt (Tabelle 1). Zusätzlich wurde für jeweils einen Beton ein CEM II/A-LL, ein CEM I SR und CEM III/B eingesetzt. Als Gesteinskörnung kam Empa-Betriebsmaterial (Sand aus Gebenstorf, Kies aus Weiach) zum Einsatz. Bei zwei Betonen wurden Sand und Kies aus Brienz eingesetzt, weil sie reaktiv hinsichtlich AAR sind. Hier kamen ein CEM I und ein CEM II HS zum Einsatz. Zusätzlich zu den Ergebnissen dieser Betone wurden die Prüfergebnisse eines weiteren Betons integriert, die im Rahmen eines Vorprojektes erhoben wurden (Tabelle 1).

Bei der Betonherstellung wurde zuerst trocken gemischt, dann 90 Masse-% des Wassers und anschliessend das restliche Wasser zusammen mit dem Fließmittel zugegeben. Die Nassmischzeit nach Zugabe aller Komponenten betrug 90 s.

Zusätzlich zu den Betonen wurden mit allen vier CEM I Zementen Mörtel hergestellt. Der Zementgehalt betrug 600 kg/m^3 , der w/z lag bei 0.45. Als Gesteinskörnung wurde Sand 1.0-1.7 mm (60 Masse-%) und Sand 2.0-3.2 mm (40 Masse-%) verwendet. Es wurden jeweils zwei Würfeln ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) pro Mischung hergestellt.

Zement	Hersteller	w/z	Zement [kg/m^3]	Gesteinskörnung 0/22 mm
CEM I 42.5	A	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5	A	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5	B	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5	B	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5	C	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5	C	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II/A-LL		0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I SR		0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM III/B SR		0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	D	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	D	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	E	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	E	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	F	0.45	345	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM II HS	F	0.50	320	Alluvialkies (Gebenstorf/Weiach)
CEM I 42.5		0.45	345	Alluvialkies (Brienz)
CEM II HS		0.45	345	Alluvialkies (Brienz)
CEM I 42.5*		0.48	340	Westschweiz

*Beton aus Vorprojekt

Tabelle 1: Zusammensetzung der untersuchten Betone.

3.2 Methoden

Die Druckfestigkeit des Betons wurde nach SN EN 12390-3 in einem Alter von 28 Tagen an zwei Würfeln ($150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$) bestimmt.

Der Sulfatwiderstand wurde einerseits nach SIA 262/1, Anhang D, geprüft [19]. Hier werden sechs Bohrkerne ($\varnothing 28 \text{ mm}$, Länge 149 mm) beginnend im Alter von 28 Tagen vier Trocknungs/Tränkungszyklen (Sulfatlösung) unterzogen und danach acht Wochen in Sulfatlösung gelagert. Die massgebende Grösse ist die Sulfatdehnung in der achtwöchigen Zusatzlagerung. Um den Einfluss der Zusatzlagerung auf die Sulfatdehnung weiter abzuklären, wurde sie von den normgemässen acht Wochen auf 16 ausgedehnt. Hintergedanke war dabei auch, die bessere

Übereinstimmung mit dem Verfahren nach Anhang L zu erreichen. Andererseits kam zur Prüfung des Sulfatwiderstandes das Verfahren nach Anhang L zum Einsatz (s. Kapitel 2.1, [20]). Als Variante davon wurde bei der Mehrzahl der Betone zusätzlich zur fünftägigen Trocknung bei 80 °C eine weitere Prüfserie für drei Wochen bei 50 °C getrocknet. Danach erfolgte wie beim üblichen Verfahren die Druckimprägnierung mit Sulfatlösung respektive Wasser. Damit sollte der Einfluss der Trocknungstemperatur auf die erzielte Sulfatdehnung abgeklärt werden. Bei einer dreiwöchigen Trocknung mit 50 °C ist der Masseverlust der Prüfkörper etwas kleiner als bei der Trocknung mit 80 °C (Abbildung 1). Die durchschnittliche Differenz des Masseverlustes betrug 12%. Entsprechend ist auch ein etwas kleinerer Sulfateintrag zu erwarten.

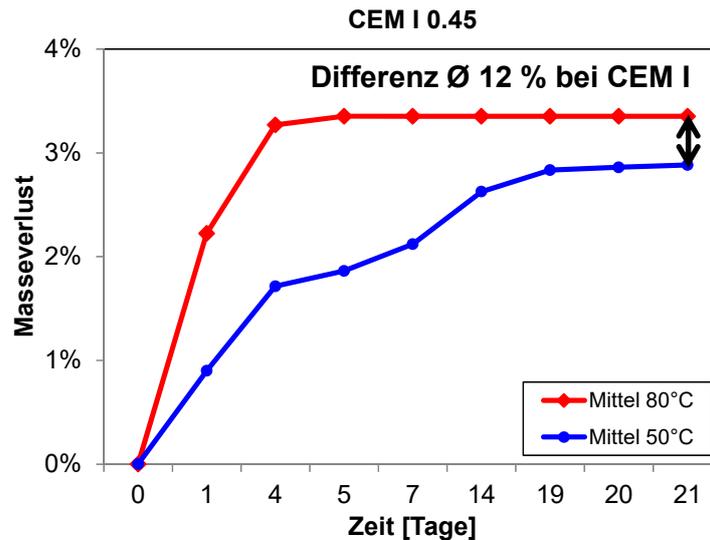


Abbildung 1: Masseverlust einer Prüfkörperserie bei einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C und einer dreiwöchigen Trocknung bei 50 °C. Beton aus CEM I mit w/z von 0.45.

Die Bestimmung des O₂-Diffusionskoeffizienten an ausgewählten Betonen erfolgte an zwei Bohrkernen (Ø 100 mm, H = 50 mm) entnommen aus Würfeln mit 150 mm Kantenlänge. Im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper 7 Tage bei 20 °C und 35% relativer Feuchtigkeit und anschliessend weitere 7 Tage bei 50 °C im Ofen getrocknet. Im Anschluss an diese Konditionierung wurde die Prüfung durchgeführt. Die Prüfung erfolgte gemäss Beschrieb in [21-23]. Zu der üblichen Konditionierung der Prüfkörper kamen zwei weitere Varianten zum Zug. Bei der einen wurde die Bestimmung des O₂-Diffusionskoeffizienten nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C und einer dreitägigen Wasserlagerung durchgeführt. Bei der anderen wurden die Prüfkörper ebenfalls fünf Tage bei 80 °C getrocknet, danach aber mit Wasser druckimprägniert und zusätzlich 168 Tage im Wasser gelagert. Das entspricht der Lagerungsdauer im Verfahren nach Anhang L. Danach erfolgte die übliche, oben beschriebene Konditionierung im Klimaraum und im Ofen.

An den Bohrkernen ausgewählter Betone geprüft mit dem Verfahren nach Anhang L wurden zum Vergleich der Auswirkungen der Trocknung bei 80 und 50 °C nach der Wasserlagerung der E-Modul nach SIA 262/1, Anhang G, bestimmt.

Aus den Mörtelwürfeln wurden im Alter von 28 Tagen jeweils vier Bohrkern (Ø 50 mm, Länge 150 mm) gezogen. Danach wurden vier Arten der Vorlagerung verwendet: 5 Tage bei 20 °C, 5 Tage bei 50 °C, 5 Tage bei 80 °C und 5 Tage bei 80 °C mit anschliessender Wasserlagerung für 91 Tage. Aus den Mörtel-Bohrkernen wurden nach den unterschiedlichen Vorlagerungen je eine Scheibe der Dicke ~ 5 mm mittig herausgeschnitten. Die Scheibe wurde in Stücke gebrochen, und die Hydratation durch doppelten Lösungsmittelaustausch erst mit Isopropanol, dann mit Diethylether abgestoppt und 5 min

bei 40 °C getrocknet [24]. Danach wurden diese Scheiben im Mörser zerdrückt und kleiner < 125 µm abgesiebt. Die abgestoppten Proben der Mörtel wurden von Hand mit einem Achatmörser < 63 µm gemahlen und mittels Röntgenbeugung (XRD) und Thermo-gravimetrie (TGA) auf ihren qualitativen Phasenbestand untersucht.

Die Röntgenbeugung erfolgte mittels eines PANalytical X'Pert Pro MPD Diffraktometers unter Verwendung von CoK α -Strahlung, einer Divergenzblende von 0.5°, eines rotierenden Probenhalters und eines ortsempfindlichen Detektors (X'Celerator). Die Messzeit betrug 45 min.

Die Thermogravimetrie erfolgte an ca. 50 mg Probe bei einer Heizrate von 20 K/min im Temperaturintervall 30-980°C mit dem Mettler Toledo TGA/SDTA 851e.

4. Resultate

4.1 Mörtel

4.1.1 Thermogravimetrie

Der Masseverlust bei unterschiedlichen Temperaturen in der TGA kann bestimmten Hydratphasen zugeordnet werden.

Die TGA zeigt, dass der Masseverlust des Mörtels hergestellt mit CEM I (C) durch die Entwässerung des C-S-H und des Ettringites durch eine Trocknung bei 50 °C leicht reduziert wird (Abbildung 2). Wird bei 80 °C getrocknet, verschwindet nicht nur der Ettringit-Peak vollständig, sondern auch der AFm-Peak ist nicht mehr erkennbar. Nach der Wasserlagerung ist der Ettringit-Peak wieder vorhanden, der AFm jedoch nicht. Der Masseverlust bei 450-500 °C (Portlandit) und bei 700-750 °C (Calcit) wird durch die unterschiedlichen Konditionierungen nicht tangiert.

Beim Mörtel hergestellt aus CEM I SR ist der Ettringit-Peak wegen der speziellen Klinkermineralogie (kleiner Anteil an C₃A) bei 20 °C weniger stark ausgeprägt als beim CEM I (C) (Abbildung 3). Danach ist aber bei den unterschiedlichen Arten der Konditionierung dasselbe Muster bezüglich der Präsenz/Absenz bestimmter Hydratphasen wie beim Mörtel aus CEM I (C) vorhanden.

Der Ettringit wird offensichtlich durch die Trocknung bei 80 °C zerstört und bildet sich während der Wasserlagerung wieder neu. Die Absenz des AFm nach der Wasserlagerung weist darauf hin, dass diese Phase nicht wieder neu gebildet wird.

Die Ergebnisse der weiteren Mörtel aus CEM I (A) und CEM I (B) werden im Anhang unter A1 präsentiert.

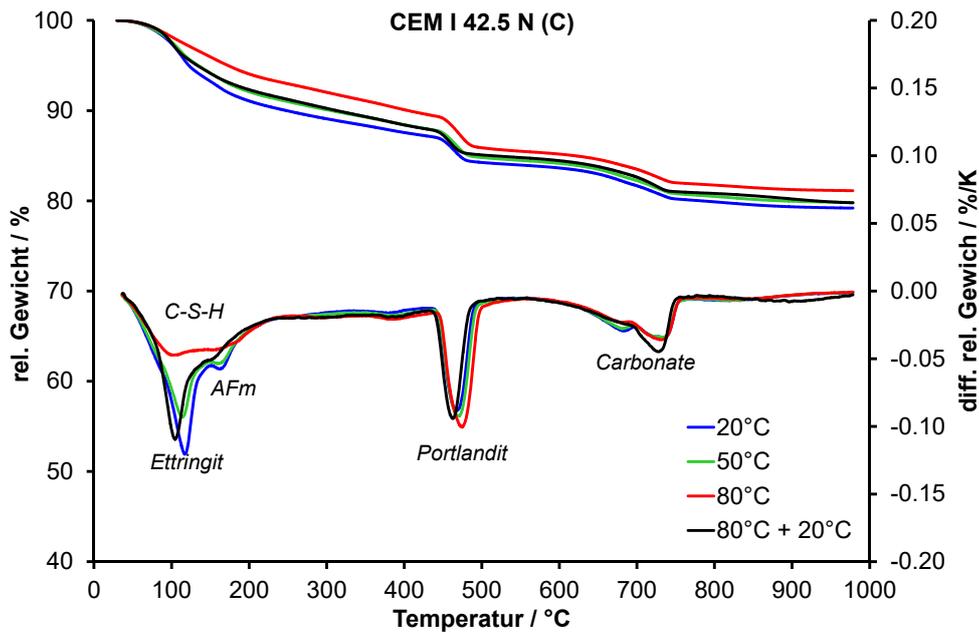


Abbildung 2: TGA von Mörtel hergestellt mit CEM I (C) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C mit anschliessender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

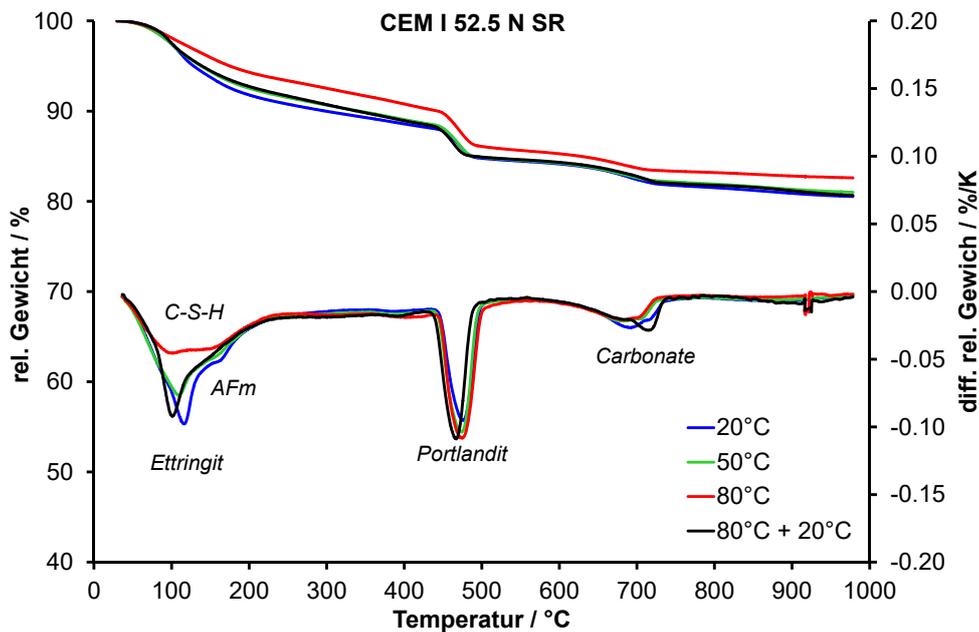


Abbildung 3: TGA von Mörtel hergestellt mit CEM I SR im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschliessender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

4.1.2 Röntgendiffraktion

Die Röntgendiffraktion des Mörtels aus CEM I (C) zeigt die gleichen temperaturbedingten Änderungen wie die TGA: Ettringit wird bei einer Trocknung von 50 °C leicht reduziert und verschwindet bei einer Trocknung mit 80 °C (Abbildung 4). Er wird bei der Wasserlagerung wieder neu gebildet. AFm

(Monocarbonat und Hemicarbonat) verschwindet ebenfalls, wird aber nicht mehr neu gebildet. Allerdings entsteht bei der Trocknung von 80 °C neu die AFm-Phase Monosulfat. Der Ettringit-Peak beim Mörtel aus CEM I SR ist weniger stark ausgebildet als beim Mörtel aus CEM I (C) und verschwindet ebenfalls bei der Trocknung mit 80 °C (Abbildung 5).

Die Ergebnisse der Mörtel aus CEM I (A) und CEM I (B) werden im Anhang unter A2 dargestellt.

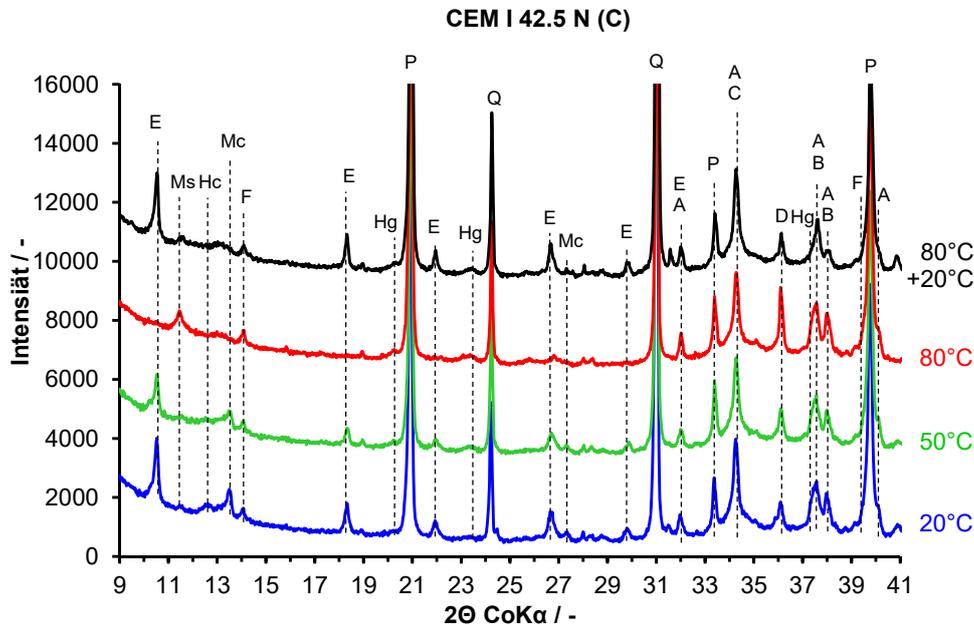


Abbildung 4: XRD von Mörtel hergestellt mit CEM I (C) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschließender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

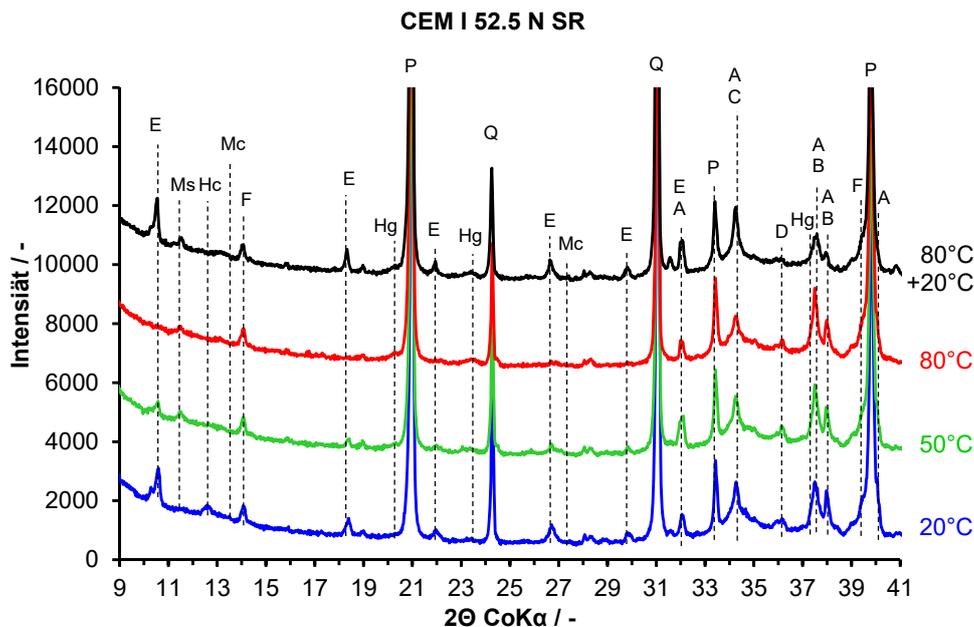


Abbildung 5: XRD von Mörtel hergestellt mit CEM I (C) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschließender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

4.2 Beton

4.2.1 Übersicht

Eine Übersicht der Resultate ist in Tabelle 4 dargestellt. Nicht eingeschlossen sind die Resultate von ausgewählten Betonen hinsichtlich ihrer O₂-Diffusionskoeffizienten und ihrer E-Module, die in Kapitel 3.2.4 respektive 3.2.5 präsentiert werden.

Zement	Hersteller	w/z	Zement	Rohdichte [kg/m ³]	LP [Vol.%]	AM [cm]	f _{c,28} [MPa]	Anhang D		Anhang L	
								ΔI _{s,8w} [%]	ΔI _{s,16w} [%]	ΔI _{s,80°C} [%]	ΔI _{s,50°C} [%]
CEM I 42.5	A	0.45	345	2'416	2.4	475	52.7	1.22	2.91	0.06	0.041
CEM I 42.5	A	0.50	320	2'417	2.0	500	46.2	2.82	9.67	0.27	0.054
CEM I 42.5	B	0.45	345	2'428	2.0	480	55.3	0.98	1.72	0.63	-
CEM I 42.5	B	0.50	320	2'437	1.7	510	46.7	1.16	2.31	0.64	0.057
CEM I 42.5	C	0.45	345	2'406	3.1	430	51.4	1.36	2.40	0.19	0.047
CEM I 42.5	C	0.50	320	2'397	2.7	420	45.2	1.88	3.99	0.90	0.047
CEM II/A-LL	-	0.45	345	2'427	2.0	495	48.1	0.73	1.08	0.36	0.031
CEM I HS	-	0.50	320	2'430	1.8	530	54.9	0.66	0.96	0.018	0.022
CEM III/B HS	-	0.50	320	2'364	3.2	450	40.7	0.46	0.56	0.011	0.002
CEM II HS	D	0.45	345	2'399	2.7	460	59.1	0.41	0.54	-0.004	0.004
CEM II HS	D	0.50	320	2'415	2.2	455	53.2	0.90	1.21	0.17	0.004
CEM II HS	E	0.45	345	2'393	3.1	420	51.3	0.55	0.73	0.018	-
CEM II HS	E	0.50	320	2'409	2.3	435	46.1	0.81	1.19	0.018	0.020
CEM II HS	F	0.45	345	2'430	1.7	515	59.0	0.65	0.90	0.015	0.002
CEM II HS	F	0.50	320	2'405	2.3	445	47.2	1.10	1.87	0.050	0.017
CEM I 42.5	-	0.45	345	2'450	1.4	480	50.4	1.70	5.24	0.27	0.093
CEM II HS	-	0.45	345	2'434	1.5	460	63.3	0.51	0.69	0.032	0.010
CEM I 42.5	-	0.48	340	-	-	-	-	0.28	0.47	0.34	-

LP = Luftgehalt, AM = Ausbreitmass, f_{c,28} = 28-Tage Druckfestigkeit, ΔI_{s,8w} = Sulfatdehnung nach 8 Wochen Zusatzlagerung (normgemäss), ΔI_{s,16w} = Sulfatdehnung nach 16 Wochen Zusatzlagerung (Variante), ΔI_{s,80°C} = Sulfatdehnung nach Trocknung bei 80 °C (normgemäss), ΔI_{s,50°C} = Sulfatdehnung nach Trocknung bei 50 °C (Variante).

Tabelle 4: Übersicht der Resultate. Sulfatdehnungen beim Sulfatwiderstand über dem Grenzwert (1 % beim Anhang D und 0.05 % beim Anhang L) sind in **rot** gekennzeichnet.

4.2.2 Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang D

Mit zwei Ausnahmen weisen alle Betone aus CEM I nach acht Wochen Zusatzlagerung Sulfatdehnungen über dem Grenzwert auf (Abbildung 6). Dabei sind die Werte der Betone hergestellt mit einem w/z von 0.50 höher als die Betone hergestellt mit einem w/z von 0.45. Nur zwei Betone liegen unter dem Grenzwert: Der Beton aus CEM I (B) und w/z 0.45 sowie der Beton aus CEM I mit w/z 0.48, der im Vorprojekt untersucht wurde. Bei diesem Beton wurde die Dauer in der Zusatzlagerung auf 48 Wochen ausgeweitet, ohne dass der Grenzwert erreicht wurde. Zudem wurde dieser Zement auch in einem Vergleichsversuch zwischen Holcim und Empa verwendet. Die untersuchten Betone lagen hier ebenfalls unter dem Grenzwert.

Die Verwendung der Gesteinskörnung aus Brienz führt zu einer höheren Ausdehnung als bei der bis auf die Gesteinskörnung identischen Betonrezeptur mit Empa Betriebsmaterial.

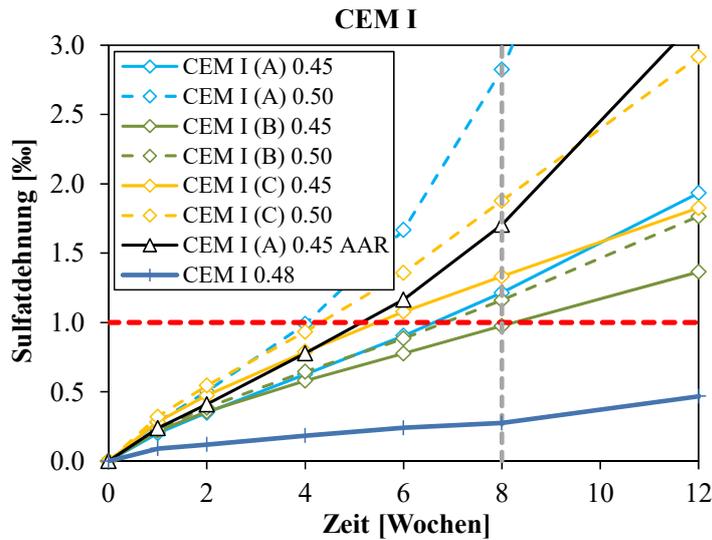


Abbildung 6: Sulfatdehnung nach Anhang D der Betone aus CEM I als Funktion der Dauer in der Zusatzlagerung. Der Grenzwert bezieht sich normkonform auf die Sulfatdehnung nach 8 Wochen Zusatzlagerung.

Die Betone hergestellt aus CEM II SR liegen nach acht Wochen Zusatzlagerung unter dem Grenzwert (Abbildung 7). Die einzige Ausnahme ist der Beton aus CEM II SR (G) und einem w/z von 0.50, der knapp darüber liegt. Die Verwendung der Gesteinskörnung aus Brienz führt zu einer minimal höheren Sulfatdehnung als der entsprechende Beton aus Empa Betriebsmaterial.

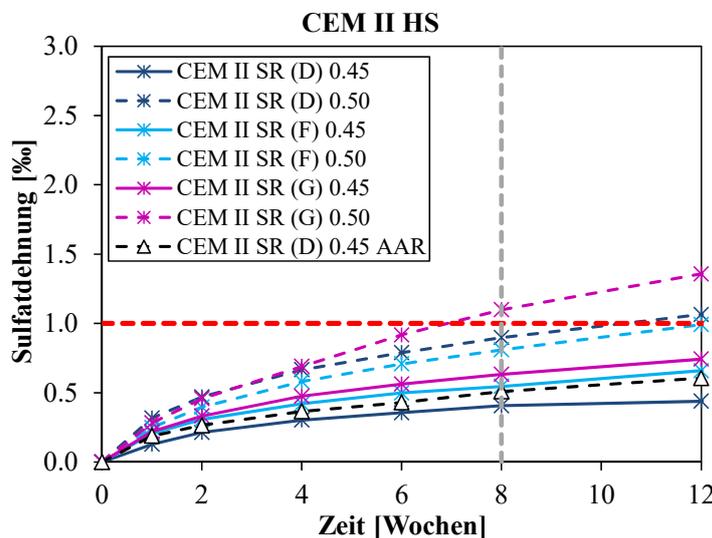


Abbildung 7: Sulfatdehnung nach Anhang D der Betone aus CEM II SR als Funktion der Dauer in der Zusatzlagerung. Der Grenzwert bezieht sich normkonform auf die Sulfatdehnung nach 8 Wochen Zusatzlagerung.

Die Sulfatdehnung der Betone aus CEM I SR, CEM II/A-LL und CEM III/B SR liegt unter dem Grenzwert (Abbildung 8).

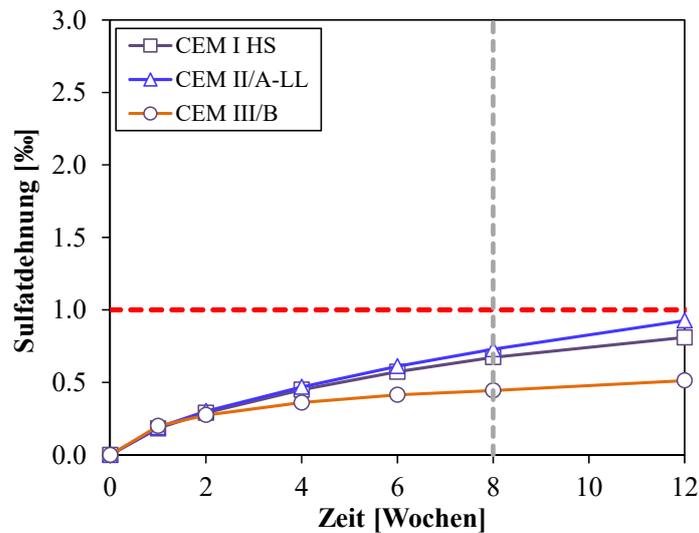


Abbildung 8: Sulfatdehnung nach Anhang D von Betonen aus verschiedenen Zementen als Funktion der Dauer in der Zusatzlagerung. Der Grenzwert bezieht sich normkonform auf die Sulfatdehnung nach acht Wochen Zusatzlagerung.

4.2.3 Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang L

Die Sulfatdehnungen aller Betone aus CEM I liegen über dem Grenzwert (Abbildung 9). Dabei sind die meisten der Werte signifikant höher.

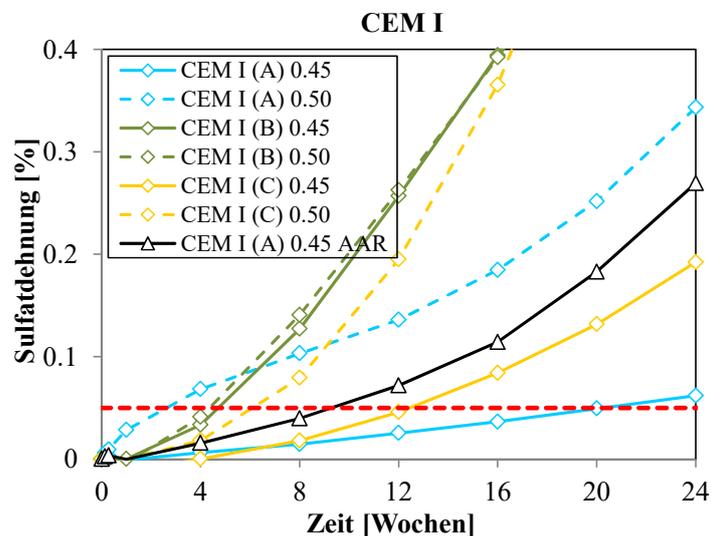


Abbildung 9: Sulfatdehnung nach Anhang L der Betone aus CEM I als Funktion der Dauer in den Lösungen.

Bei den Betonen aus CEM II SR erfüllen alle Beton ausser derjenige aus CEM II SR (A) und w/z 0.50 den Grenzwert (Abbildung 10). Die Verwendung der Gesteinskörnung aus Brienz führt wie auch beim Beton aus CEM I zu höheren Sulfatdehnungen als der Beton mit Empa Betriebsmaterial.

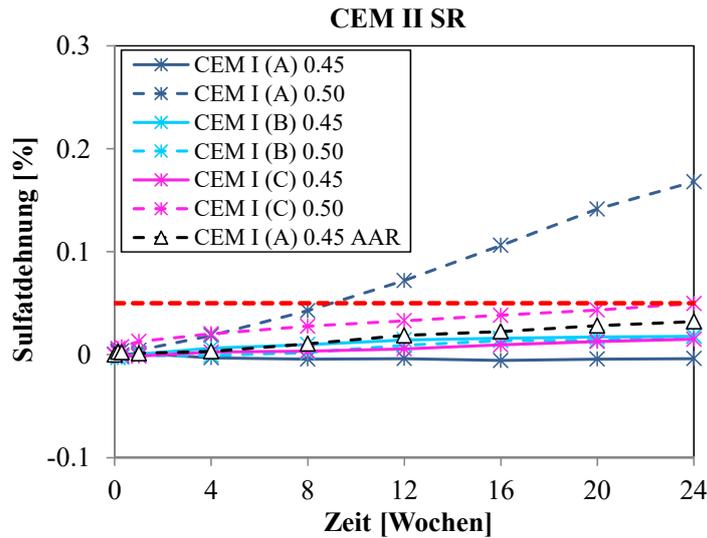


Abbildung 10: Sulfatdehnung nach Anhang L der Betone aus CEM II SR als Funktion der Dauer in den Lösungen.

Während die Betone aus CEM I SR und CEM III/B SR unter dem Grenzwert liegen, ist die Sulfatdehnung des Betons aus CEM II/A-LL deutlich höher (Abbildung 11).

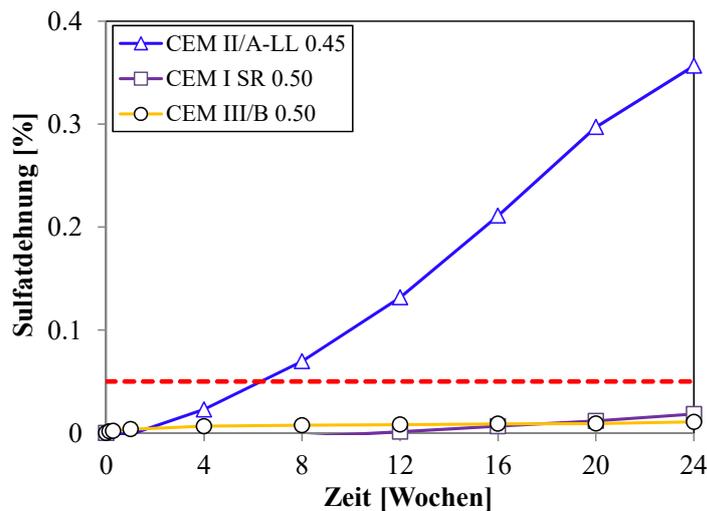


Abbildung 11: Sulfatdehnung nach Anhang L von Betonen aus verschiedenen Zementen als Funktion der Dauer in der Zusatzlagerung.

Der zeitliche Verlauf der Dehnung in der Sulfatlösung und der Dehnung im Wasser ist unterschiedlich (Tabelle 4). Die Dehnung im Wasser flacht nach einer Lagerungsdauer von 56-84 Tagen stark ab, während die Dehnung in der Sulfatlösung zumindest bei sich stark ausdehnenden Betonen weiter ansteigt (Abbildung 12). Da die Dehnung im Wasser schneller zunehmen kann als in der Sulfatlösung, sind die Werte der resultierenden Sulfatdehnung anfangs oft negativ.

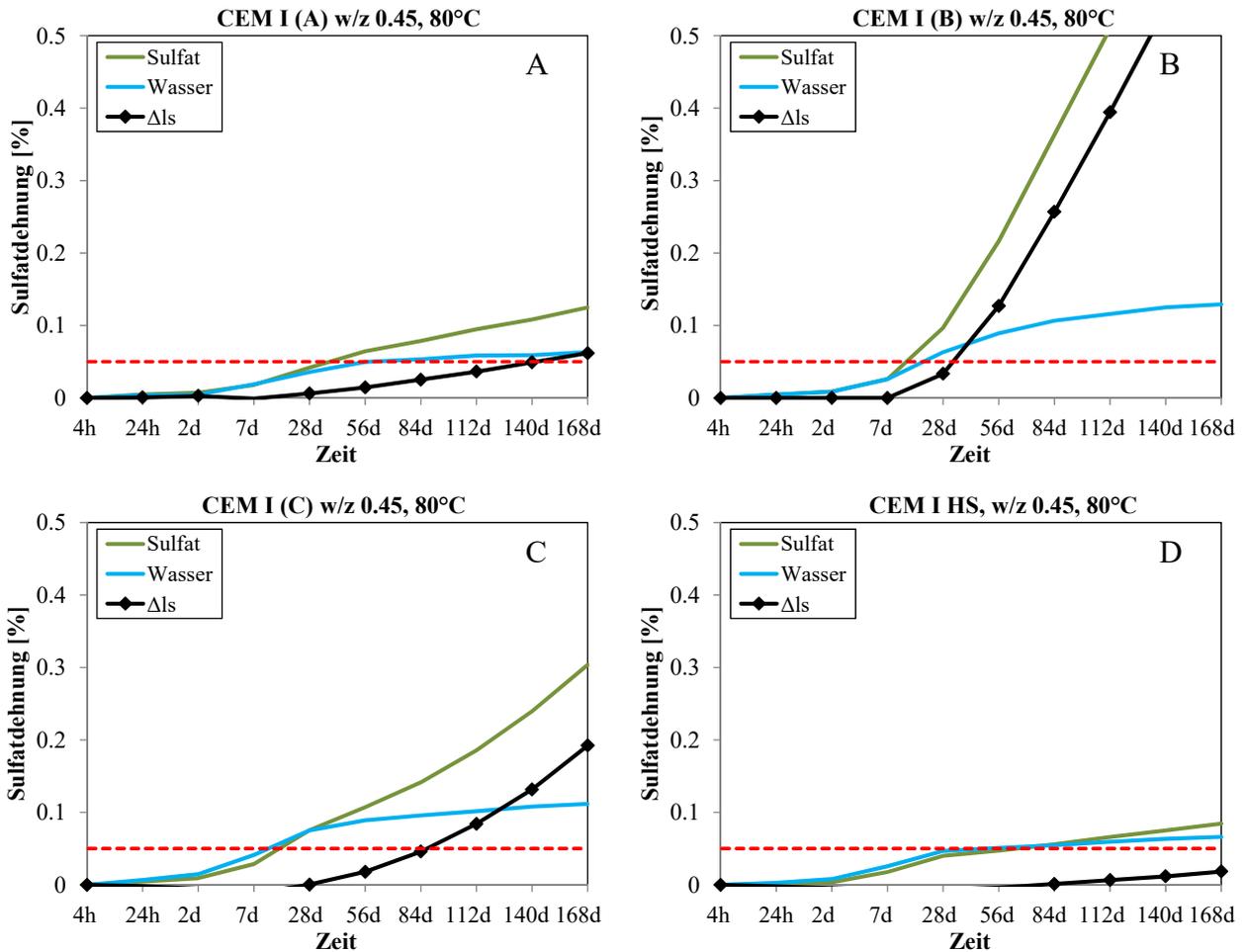


Abbildung 12: Dehnungen in der Sulfatlösung, im Wasser und die resultierenden Sulfatdehnung der vier verwendeten CEM I Zemente als Funktion der Zeit.

Wird nur bei 50 °C anstatt bei 80 °C getrocknet, ist die resultierende Sulfatdehnung wesentlich kleiner (Abbildung 13, Tabelle 4). Es liegen nur drei Betone (CEM I, w/z = 0.50 und CEM I, w/z 0.45 mit Gesteinskörnung aus Brienz) über dem Grenzwert. Auch hier sind die Sulfatdehnungen der Betone aus CEM I höher als diejenige der Betone aus CEM II SR. Allerdings ist die Differenz viel weniger stark ausgeprägt als bei einer Trocknungstemperatur von 80 °C. In der Abbildung 13 werden zwei Beispiele gezeigt.

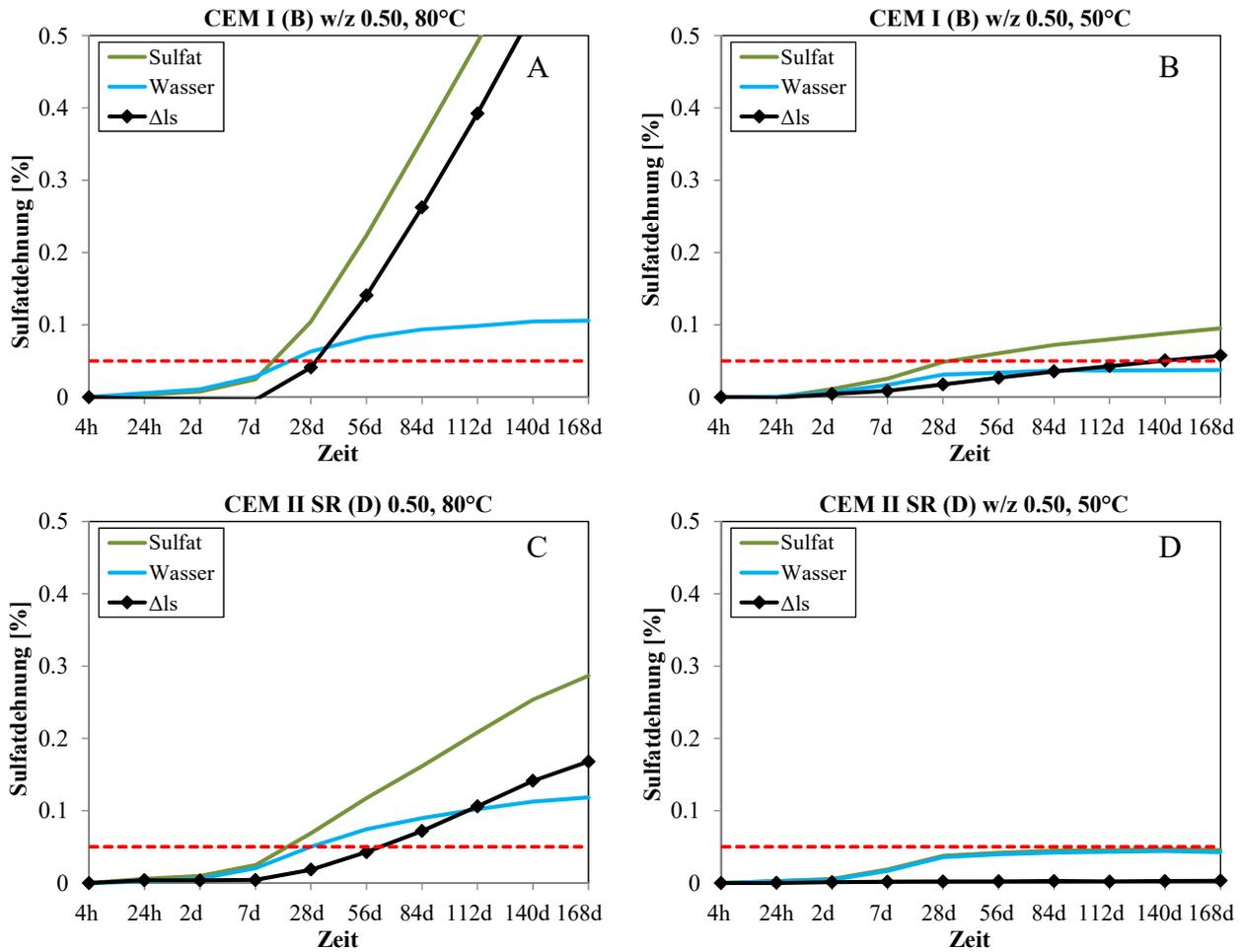


Abbildung 13: Sulfatdehnung als Funktion der Zeit jeweils eines aus CEM I (B) (A,B) und CEM II SR (D) (C, D) hergestellten Betons mit w/z 0.45 getrocknet bei 50 respektive 80 °C.

4.2.4 E-Modul

Der E-Modul der mit 50 respektive 80 °C getrockneten Betone liegt am Ende der 24-wöchigen Wasserlagerung bei zwei Betonen etwa gleich hoch und ist bei zwei weiteren Betonen im Fall der Trocknung bei 80 °C um 18-21 % reduziert (Abbildung 14).

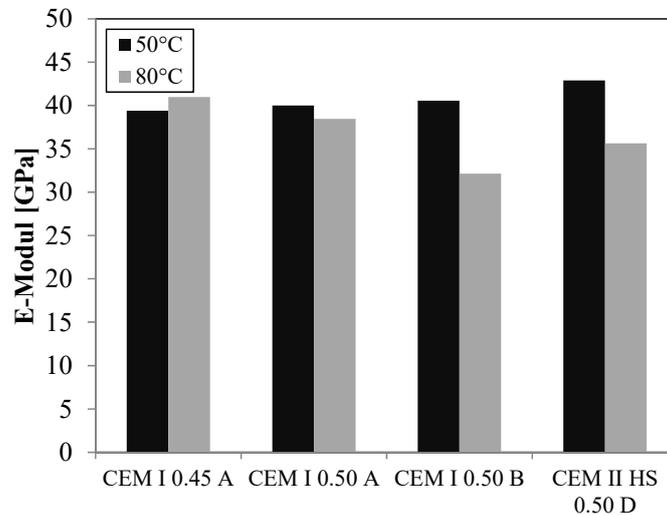


Abbildung 14: E-Module je eines Bohrkerns nach der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 50 respektive 80 °C.

4.2.5 O₂-Diffusion

Wird der Beton nicht wie üblich konditioniert (s. Kapitel 3.2) sondern bei 80 °C getrocknet, steigt der O₂-Diffusionskoeffizient bei drei der geprüften Betone an (Abbildung 15). Bei den beiden Betonen mit einem bereits sehr tiefen Wert < 0.50 · 10⁻⁸ m²/s ist nur eine geringe Änderung festzustellen. Nach der Trocknung bei 80 °C mit anschließender 24-wöchiger Wasserlagerung ist bei allen Betonen eine signifikante Reduktion des O₂-Diffusionskoeffizienten zu beobachten, was auf eine wesentliche Veränderung des Porensystems hinweist.

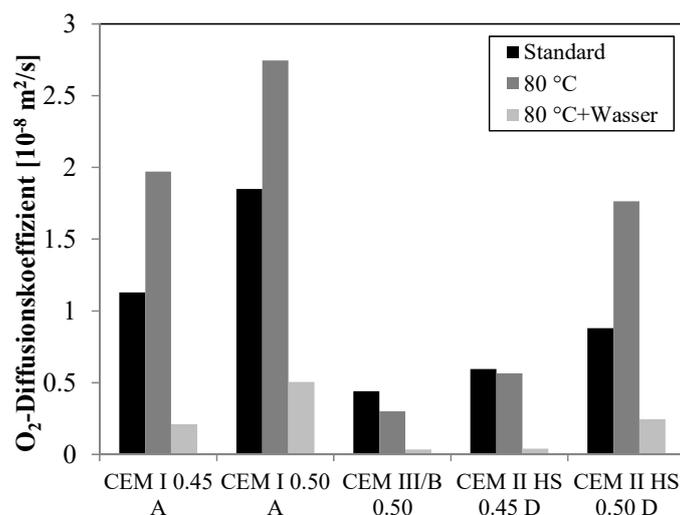


Abbildung 15: O₂-Diffusionskoeffizient von ausgewählten Betonen mit unterschiedlicher Lagerung vor der Prüfung (Standard = Standardkonditionierung (s. Kapitel 2.2), 80°C = Trocknung für fünf Tage bei 80 °C und drei Tagen Wasserlagerung und danach Standardkonditionierung, 80 °C + Wasser = Trocknung für fünf Tage bei 80 °C, anschließender Druckimprägnation mit Wasser mit 168 Tagen Wasserlagerung und danach Standardkonditionierung).

4.2.6 Mikroskopie

Bei verschiedenen Prüfkörpern wurden am Ende der Prüfung Schwefelprofile aufgenommen. Im folgenden werden bei einem Beton die Schwefelprofile zwischen Bohrkernen geprüft nach Anhang D respektive Anhang L inklusive Variante verglichen. Weitere Profile befinden sich im Anhang unter Kapitel A3.

Der Schwefelgehalt ist beim Beton CEM I (A) mit w/z 0.45 am Rand nach der Prüfung nach Anhang D mit fast 8 Masse-% relativ hoch und beträgt in der Mitte des Prüfkörpers noch rund 4 Masse-%. Aus der chemischen Zusammensetzung des Zementes kann der durchschnittliche Schwefelgehalt des Zementsteins vor dem Eintrag von externem Sulfat berechnet werden. Er beträgt 2.4 Masse-%. Zudem kann aufgrund der Lösungsaufnahme während den vier Trocknungs/Tränkungszyklen der Anstieg des durchschnittlichen Schwefelgehalts von 1.3 Masse-% berechnet werden (rote Linie in Abbildung 16). Der zusätzliche Schwefeleintrag über Diffusion während der 16-wöchigen Zusatzlagerung kann nicht quantifiziert werden. Die beiden Werte sind als Linien in der Abbildung eingetragen.

Der Schwefelgehalt ist beim nach Anhang L mit einer Trocknung bei 80 °C geprüften Bohrkern deutlich tiefer (Abbildung 17). Ein leicht erhöhter Schwefelgehalt kann nur bis in eine Tiefe von 9 mm festgestellt werden. Allgemein kann der Schwefelgehalt im nach Anhang L geprüften Beton stärker streuen als im Fall von Anhang D, weil die Verteilung des Ettringites lokal stärker schwankt (Ettringitbildung in Poren und Rissen). Wie beim Anhang D kann auch im Fall des Anhangs L ein Schwefeleintrag berechnet werden. Er ergibt sich durch den Masseverlust beim Trocknen und dem zusätzlichen Füllen der Luftporen bei der Drucksättigung. Der so berechnete, durchschnittliche Schwefelgehalt wird um 0.4 Masse-% erhöht und ist damit deutlich tiefer als die 1.3 Masse-% beim Anhang D. Wird anstatt mit 80 °C nur mit 50 °C getrocknet, ist das resultierende Schwefelprofil nach der Prüfung vergleichbar mit dem Schwefelprofil im mit 80 °C getrockneten Prüfkörper (Abbildung 18). Der Schwefelgehalt ist ebenfalls bis eine Tiefe von 9 mm erhöht.

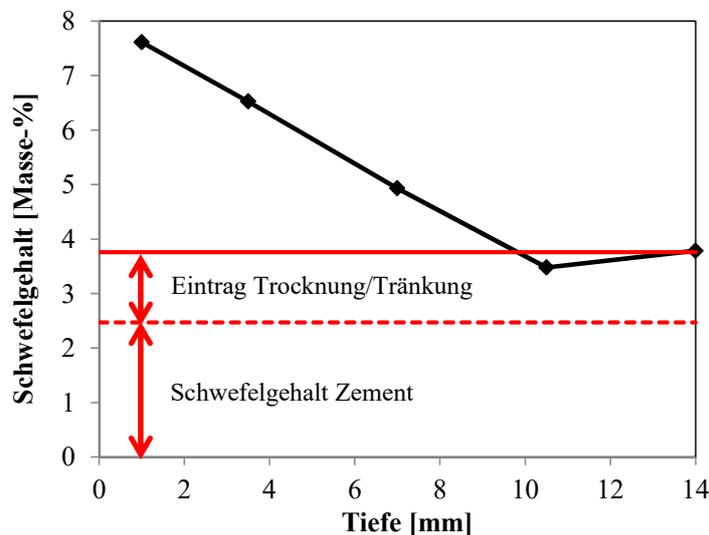


Abbildung 16: Schwefelgehalt in einem Prüfkörper des Betons CEM I (A) mit w/z 0.45 als Funktion der Tiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D.

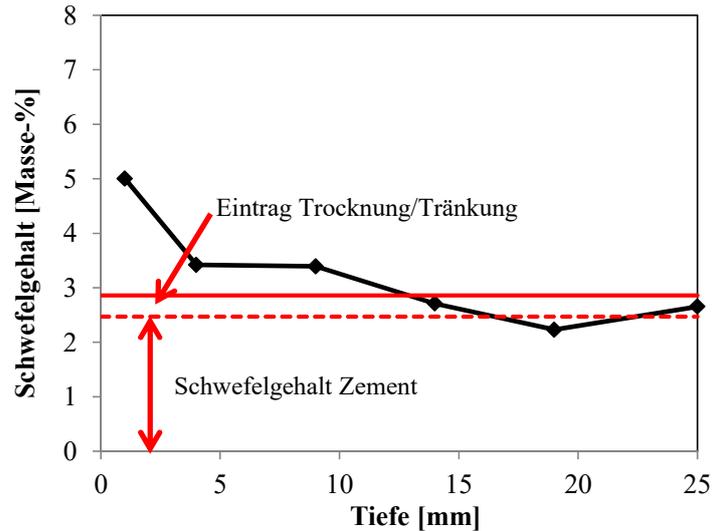


Abbildung 17: Schwefelgehalt in einem Prüfkörper des Betons CEM I (A) mit w/z 0.45 als Funktion der Tiefe am Ende der Prüfung nach Anhang L bei einer Trocknung von 50 °C.

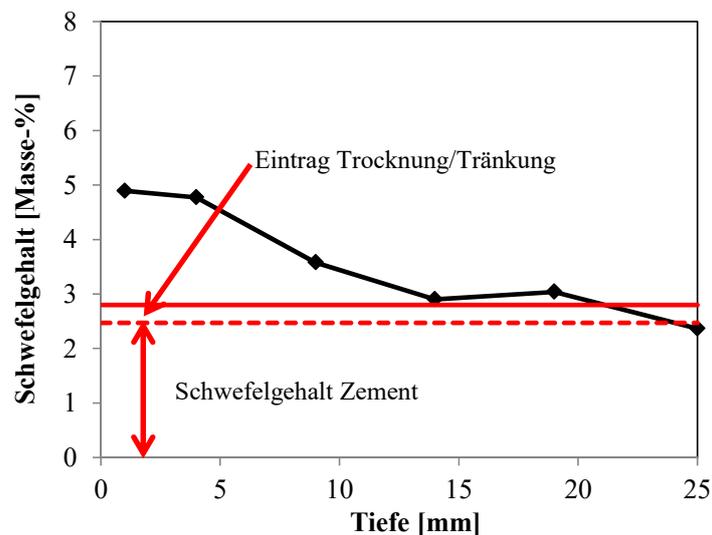


Abbildung 18: Schwefelgehalt in einem Prüfkörper des Betons CEM I (A) mit w/z 0.45 als Funktion der Tiefe am Ende der Prüfung nach Anhang L bei einer Trocknung von 50 °C.

Die Differenz im Schwefeleintrag in den Betonen resultierend aus der Anwendung der beiden Verfahren wird auch bei den in verschiedenen Tiefen vorgenommenen EDX-Punktanalysen ersichtlich (Abbildungen 19 und 20). Während beim nach Anhang D geprüften Bohrkern das molare S/Ca-Verhältnis bis in die Mitte (Tiefe von 14 mm) erhöht ist, trifft das beim nach Anhang L geprüften Bohrkern nur bis in eine Tiefe von 4 mm zu. Zudem ist die Verschiebung der Punkte Richtung Ettringit bei letzterem weniger stark ausgeprägt.

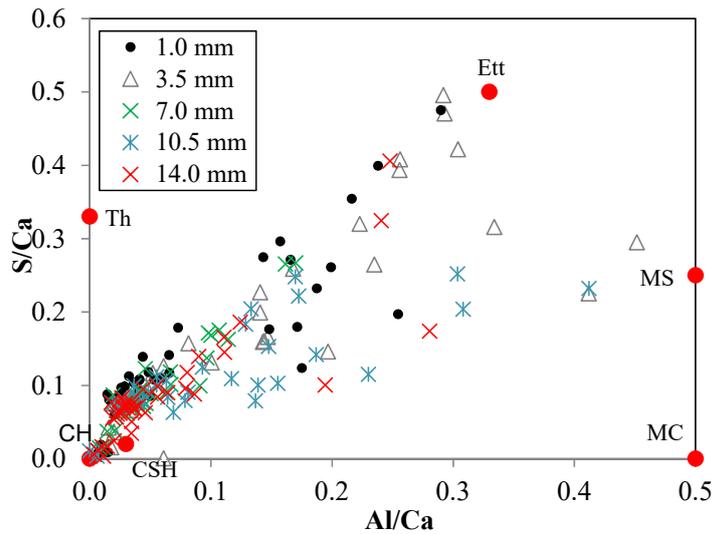


Abbildung 19: Molares S/Ca-Verhältnis als Funktion des molaren Al/Ca-Verhältnisses im Beton aus CEM I (A) mit w/z 0.50 geprüft nach Anhang D.

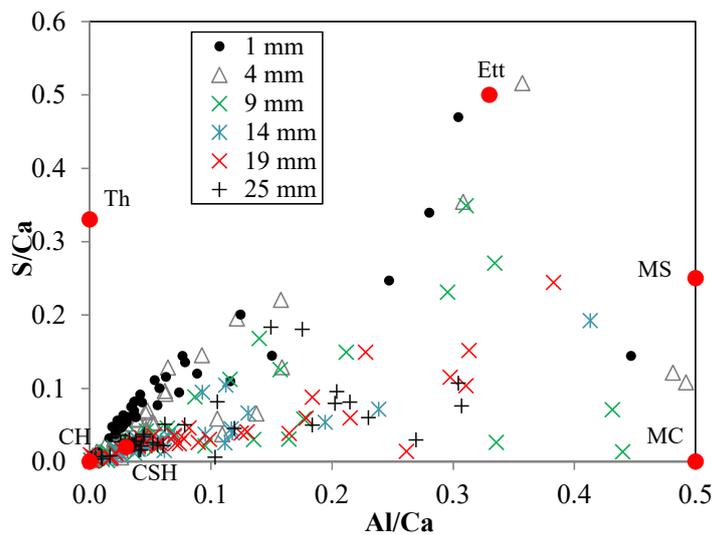


Abbildung 20: Molares S/Ca-Verhältnis als Funktion des molaren Al/Ca-Verhältnisses im Beton aus CEM I (A) mit w/z 0.50 geprüft nach Anhang L.

Die Verteilung des Ettringites in der Mikrostruktur zwischen dem nach Anhang D und Anhang L geprüften Betons unterscheidet sich massgeblich. Im nach Anhang D geprüften Beton bildet sich der Ettringit fein verteilt im Zementstein oder in „Taschen“, in denen sich ursprünglich C_3A -Klinker befand. Poren und Risse sind leer (Abbildung 21).

Im nach Anhang L geprüften Beton ist fein verteilter Ettringit nur in den äussersten Millimetern der Prüfkörper anzutreffen. Sonst bildet sich Ettringit bis in die Mitte des Bohrkerns in Rissen, porösen Bereichen des Zementsteins und in Luftporen (Abbildungen 22 und 23). Bei aus CEM I hergestelltem Beton können die mit Ettringit verfüllten Risse als Netzwerk den gesamten Prüfkörper durchlaufen. Nicht nur die sulfatgelagerten Prüfkörper weisen diese Ettringitverteilung auf. Die wassergelagerten Prüfkörper sind von dieser Ettringitbildung in Poren und Rissen genau gleich betroffen (Abbildung 24).

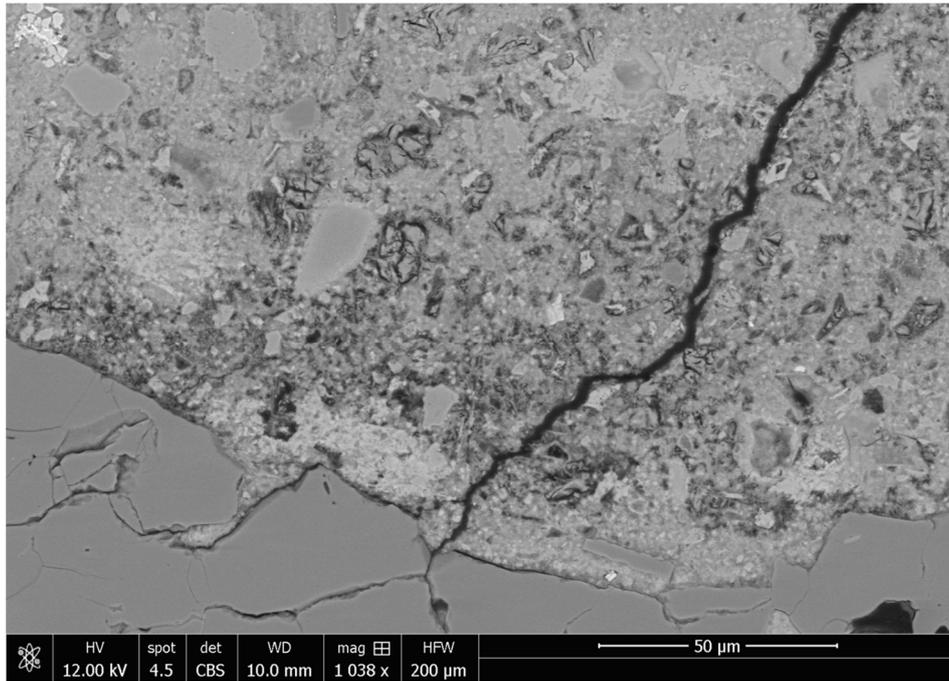


Abbildung 21: Leerer Riss im Beton aus CEM I (A) mit w/z 0.50. Anhang D.

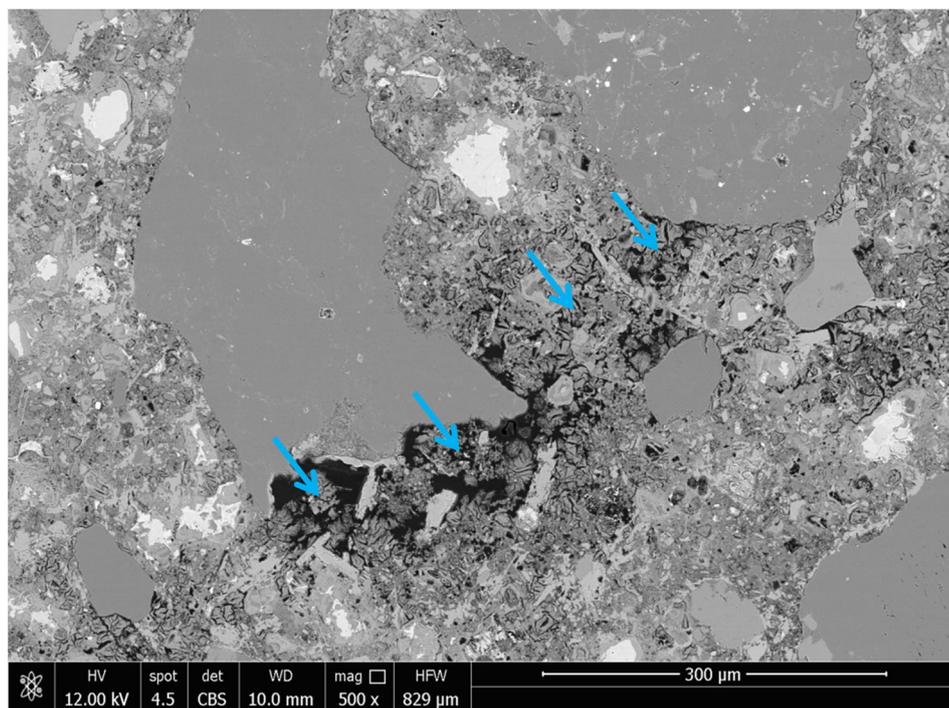


Abbildung 22: Ettringitbildung (blaue Pfeile) in einem porösen Bereich des Betons aus CEM I (A) mit w/z 0.50. Anhang L mit 80 ° C Trocknung und Sulfatlagerung.

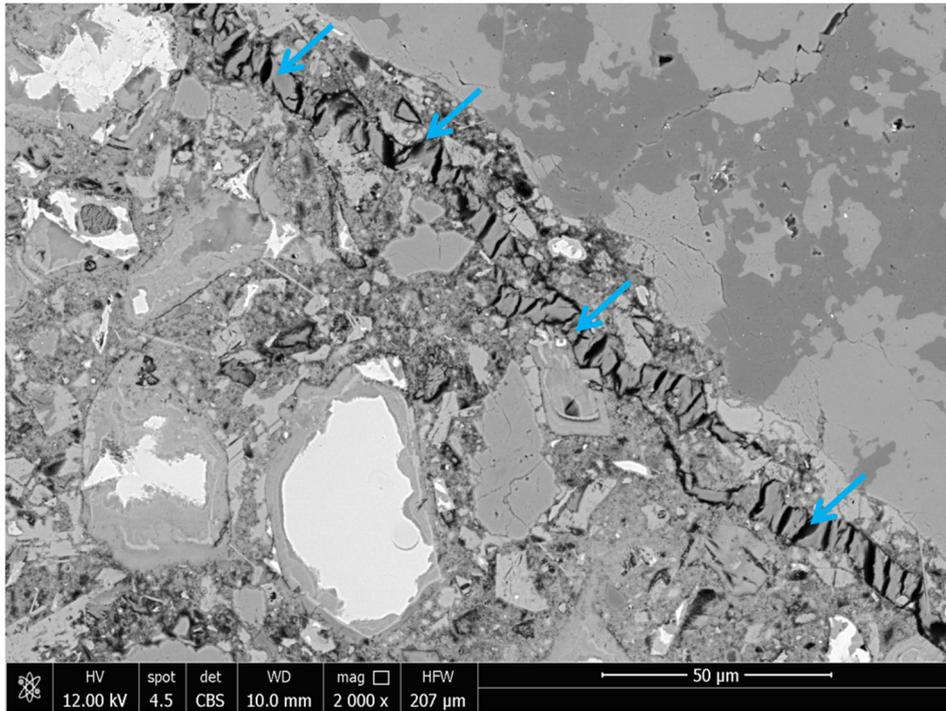


Abbildung 23: Ettringitbildung (blaue Pfeile) in einem Riss des Betons aus CEM I (B) mit w/z 0.45. Anhang L mit 80 ° C Trocknung und Sulfatlagerung.

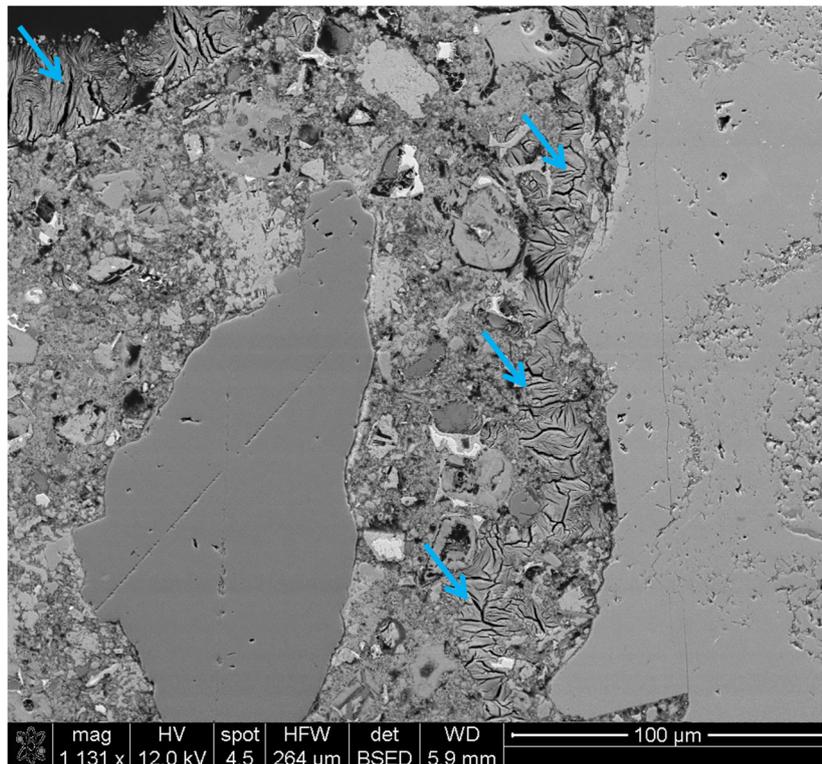


Abbildung 24: Ettringitbildung (blaue Pfeile) in einem Riss und in einer Luftpore des nach Anhang L geprüften Betons aus CEM I mit w/z 0.48. Anhang L mit 80 ° C Trocknung und Wasserlagerung.

In den sulfatgelagerten Prüfkörpern geprüft nach Anhang L mit 80 °C sind zudem zwei Besonderheiten vorhanden, die im nach Anhang D geprüften Beton nicht zu beobachten sind.

Bei der ersten Besonderheit handelt es sich um Gesteinskörner, die klare Anzeichen von AAR aufweisen. Dies trifft nicht nur auf die potentiell reaktive Gesteinskörnung aus Brienz sondern auch auf den Weiacher Kies zu (Abbildung 25). Die chemische Analyse der Reaktionsprodukte mit EDX zeigt einen ungewöhnlich hohen Natrium-Gehalt (Abbildung 26).

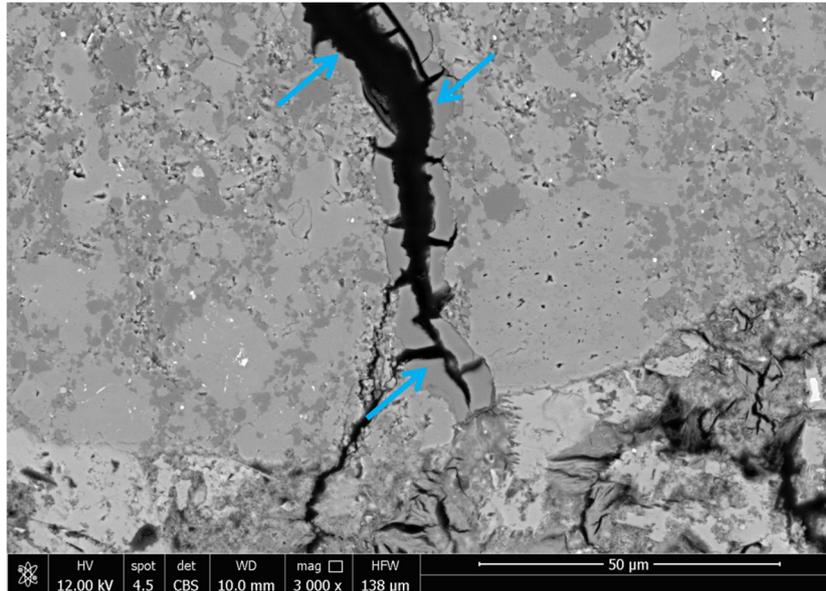


Abbildung 25: AAR Produkte (blaue Pfeile) in einem zerrissenen Kieselkalk (Empa Betriebsmaterial) in Beton aus CEM I (B) mit w/z 0.45. Anhang L mit mit 80 ° C Trocknung und Sulfatlagerung.

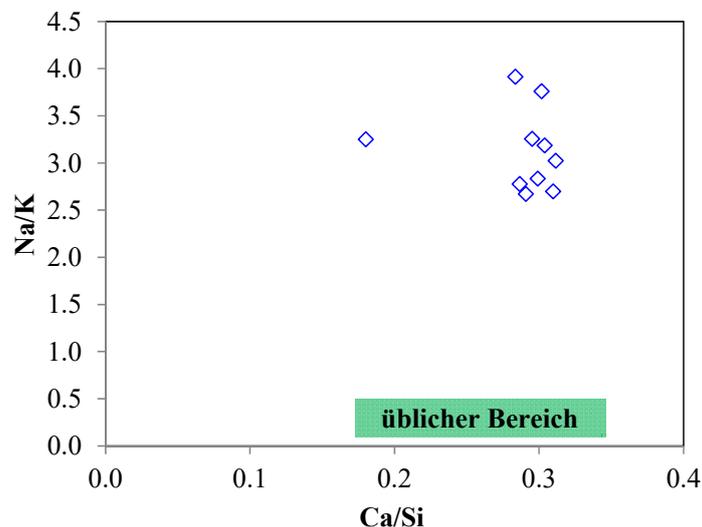


Abbildung 26: Molares Na/K-Verhältnis als Funktion des molaren Ca/Si-Verhältnisses des in Abbildung 25 gezeigten AAR Produktes. Der grüne Bereich zeigt seine übliche Zusammensetzung [25].

Bei der zweiten Besonderheit handelt es sich um die Bildung von Aluminium- und Aluminium-Silicium-Gelen. Diese treten im Zusammenhang mit Schichtsilikaten auf. Sie sind sowohl in den nach

Anhang L geprüften Proben mit Wasser- und Sulfatlagerung vorhanden. Sie werden im Fall der Sulfatlagerung oft von einer Ettringitbildung begleitet (Abbildung 27 und 28).

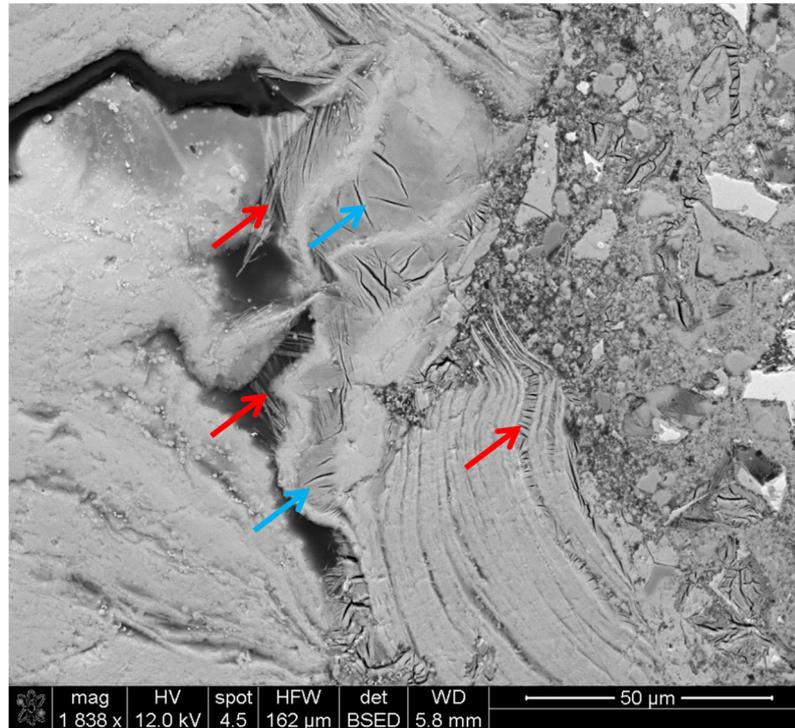


Abbildung 27: Aluminium-Gel (blaue Pfeile) und Ettringit (rote Pfeile) in einem Gesteinskorn mit Schichtsilikaten in Beton aus CEM I und w/z 0.48. Anhang L mit 80 ° C Trocknung und Sulfatlagerung.

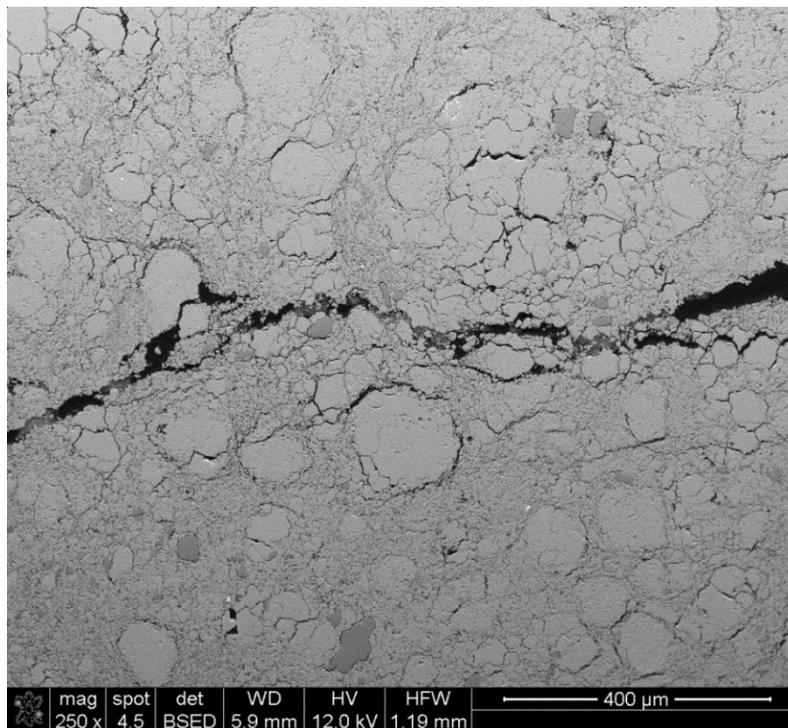


Abbildung 28: Gerissenes Gesteinskorn aus tonigem Kalkstein mit Ettringitbildung entlang den Calcit-Korngrenzen im Beton aus CEM I und w/z 0.48. Anhang L mit 80 ° C Trocknung und Sulfatlagerung.

5. Diskussion

5.1 Vergleich der Sulfatdehnungen zwischen Anhang D und L

Werden die Resultate der beiden Verfahren nur bezüglich des Grenzwertes („erfüllt“ und „nicht erfüllt“) betrachtet, ist die Übereinstimmung relativ gut (Abbildung 29). Drei Betone, die nach Anhang D die Anforderungen erfüllen, liegen nach Anhang L über dem Grenzwert. Sieben Betone liegen bei beiden Verfahren über dem Grenzwert und sechs bei beiden darunter.

Wird die Zusatzlagerung beim Anhang D von 8 auf 16 Wochen verlängert, kommen zwei zusätzliche Betone über den Grenzwert zu liegen (Abbildung 30). Der eine davon besteht die Anforderungen nach Anhang L, der andere nicht.

Wird bei Anhang L nur mit 50 °C anstatt mit 80 °C getrocknet, sind die Sulfatdehnungen relativ tief und es liegen nur drei Betone über dem Grenzwert, zwei davon sehr knapp (Abbildungen 29 und 30).

Werden die Sulfatdehnungen beim Anhang L mit den zwei verschiedenen Trocknungstemperaturen verglichen, sind die Werte bis zu einem Faktor 10 höher bei der Trocknung mit 80 °C (Abbildung 31).

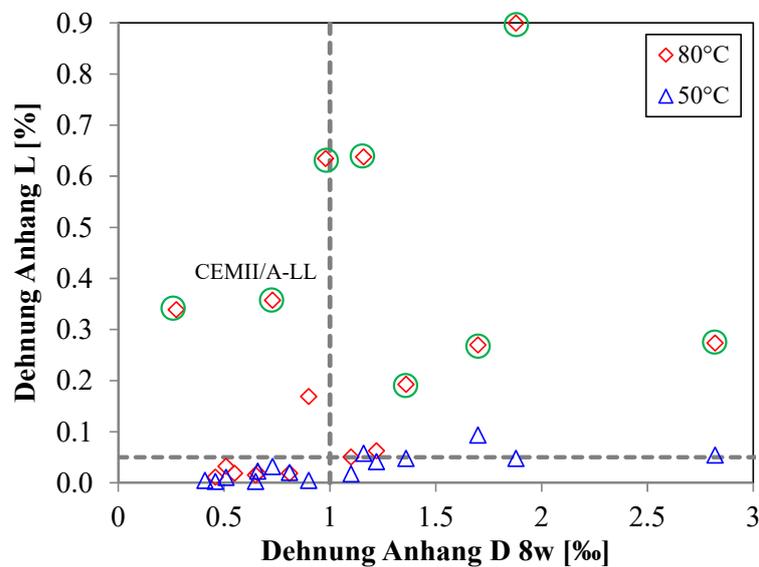


Abbildung 29: Sulfatdehnung nach Anhang L (Trocknung bei 80 respektive 50 °C) als Funktion der Sulfatdehnung nach Anhang D (normgemässe Zusatzlagerung von 8 Wochen). Die grünen Kreise kennzeichnen Betone aus CEM I und einen Beton aus CEM II/A-LL.

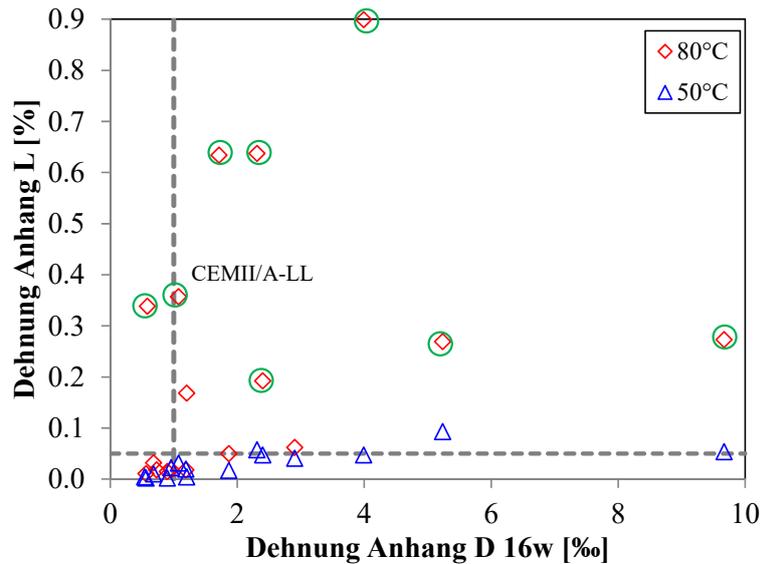


Abbildung 30: Sulfatdehnung nach Anhang L (Trocknung bei 80 resp. 50 °C) als Funktion der Sulfatdehnung nach Anhang D (verlängerte Zusatzlagerung von 16 Wochen). Die grünen Kreise kennzeichnen Betone aus CEM I und einen Beton aus CEM II/A-LL.

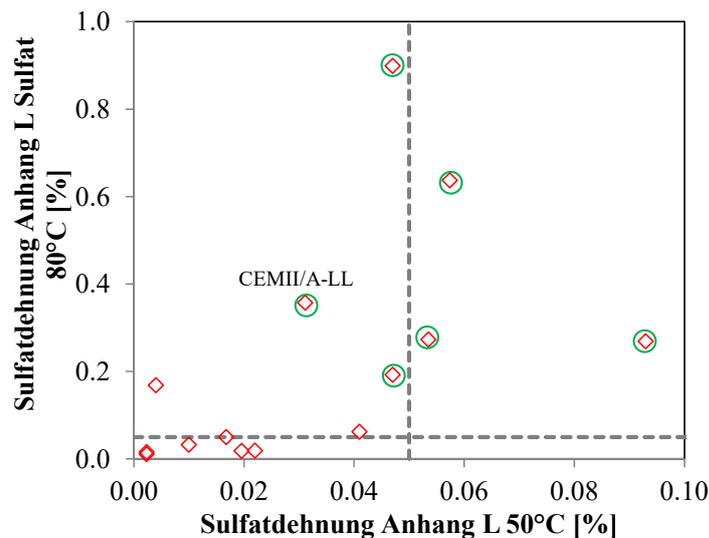


Abbildung 31: Sulfatdehnung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 80 °C als Funktion der Sulfatdehnung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 50 °C (Achtung: Achsenskalierung mit Differenz von Faktor 10 beachten). Die grünen Kreise kennzeichnen Betone aus CEM I und einen Beton aus CEM II/A-LL.

Wichtiger als nur eine Beurteilung nach den Grenzwerten ist der Vergleich der Sulfatdehnungen und der Schwefelprofile (respektive des Schwefeleintrags). Hier ergeben sich massive Widersprüche zwischen diesen beiden Größen, wenn vom klassischen, externen Sulfatangriff als Ursache für die beobachteten Dehnungen ausgegangen wird:

- Der Sulfateintrag bei einer Trocknung mit 50 °C und 80 °C ist vergleichbar, aber die resultierenden Sulfatdehnungen sind bei der Trocknungstemperatur von 80 °C bis zu einem Faktor von 10 höher.
- Der Sulfateintrag beim Anhang D ist grösser als beim Anhang L und erreicht im Gegensatz zum Anhang L auch das Zentrum der Prüfkörper. Trotzdem ist die resultierende Sulfatdehnung beim Anhang D generell kleiner.

5.2 Auswirkungen der Trocknungstemperatur von 80 °C

Wie mit den TGA und XRD Analysen beim Mörtel eindeutig gezeigt wird, werden der Ettringit und das Monocarbonat/Monosulfat bei einer Trocknung mit 80 °C vollständig zerstört. Der Ettringit bildet sich während der Wasserlagerung wieder neu. Dies verursacht die entsprechenden, relativ hohen Dehnungen im Wasser. In der Mikroskopie wird ersichtlich, dass diese Ettringitbildung in Kapillarporen und durch das Trocknen oder durch die Dehnung gebildeten Rissen stattfindet. Dies verändert die Mikrostruktur vollständig. Das Verfüllen der Kapillarporen reduziert den Sauerstoffdiffusionskoeffizienten massgeblich. Trotz der Schäden in der Mikrostruktur wird der E-Modul nicht massgeblich beeinflusst, weil Kapillarporen durch die Ettringitbildung verfüllt werden. Das Ausmass und die Auswirkungen dieses internen Sulfatangriffes sind stark vom Klinkergehalt des Zementes abhängig. Je höher der Klinkergehalt ist, um so grösser sind die Auswirkungen.

Diese Prozesse des internen Sulfatangriffes laufen auch bei den in der Sulfatlösung gelagerten Prüfkörpern parallel zum externen Sulfatangriff ab. Die signifikante, vom Klinkergehalt abhängige Änderung der Mikrostruktur durch den internen Sulfatangriff ist für die grossen Unterschiede der Sulfatdehnungen bei der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 50 und 80 °C verantwortlich. Dabei gilt es auch zu berücksichtigen, dass sich die Sulfatdehnung beim Anhang L aus der Differenz zwischen der Dehnung in der in Sulfatlösung und Wasser gelagerten Prüfkörpern ergibt. Offenbar führt der gleichzeitige interne und externe Sulfatangriff zu den, trotz relativ kleinem externen Sulfateintrag, sehr hohen Sulfatdehnungen beim Anhang L mit einer Trocknung von 80 °C. Damit ist es offensichtlich, dass die Resultate nach Anhang L mit einer Trocknung von 80 °C nicht den Widerstand des Betons bei einem externen Sulfatangriff widerspiegeln.

Die Mikroskopie zeigt zudem zwei weitere Aspekte, die zu einer Erhöhung der Sulfatdehnung beim Anhang L mit einer Trocknungstemperatur von 80 °C führen. Einerseits können, verbunden mit der hohen Temperatur, Schichtsilikate angelöst werden, was zu einer Freisetzung von Aluminium führt. In Kontakt mit der Sulfatlösung führt das freigesetzte Aluminium zu einer Ettringitbildung mit entsprechender Ausdehnung. Andererseits wird auch Quarz angelöst, was wiederum zu einer expansiven AAR führt. Neben der hohen Temperatur, welche die SiO₂ Löslichkeit erhöht, spielt auch das Binden von Sulfat durch Monosulfat/Monocarbonat eine Rolle. Durch das Binden des Sulfats, muss ein anderes Anion die Ladungsbilanz ausgleichen. Dies wird vom Hydroxid des Portlandites übernommen, wodurch der pH ansteigt [26]. Diese beiden Prozesse und die damit verbundenen Dehnungen haben nichts mit externem Sulfatangriff zu tun und sind gesteinskörnungsspezifisch. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb sich die Prüfung nach Anhang L nicht zur Bestimmung des Widerstandes von Beton gegen externen Sulfatangriff eignet.

6. Zusammenfassung

Es wurden Betone aus drei verschiedenen CEM I und drei verschiedenen CEM II HS mit w/z 0.45 und 0.50 hergestellt. Zudem wurden ein CEM II/A-LL, ein CEM I SR und eine CEM III/B SR eingesetzt. Der Sulfatwiderstand dieser Betone wurde nach den Verfahren Anhang D (SN 505 262/1) und Anhang L (prSN 505 262/1) geprüft. Als Variante des Anhangs L wurde auch eine Trocknung mit 50 °C vorgenommen. Ausgewählte Betone wurden nach der Prüfung mittels Rasterelektronenmikroskopie, O₂-Diffusion und E-Modul untersucht. Zusätzlich wurden mit den CEM I Zementen Mörtel hergestellt, um die Änderungen der Hydratphasen durch die Trocknung und anschliessende Wasserlagerung zu untersuchen

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 80 °C werden durch vier verschiedene Prozesse und deren gegenseitigen Wechselwirkung verursacht: externer Sulfatangriff, interner Sulfatangriff, Freisetzen von Aluminium aus der Gesteinskörnung mit zusätzlicher Ettringitbildung und AAR. Aus diesem Grund ist das Verfahren für die Prüfung des Widerstandes eines Betons gegen externen Sulfatangriff ungeeignet.

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang L mit einer Trocknung bei 50 °C sind auf eine Ettringitbildung durch externen Sulfatangriff zurückzuführen. Allerdings sind die Werte klein (0.02-0.93 ‰) und sie erlauben es nur ungenügend, Betone mit tiefem oder hohem Widerstand gegen externen Sulfatangriff zu separieren. Aus diesem Grund ist das Verfahren für die Prüfung des Widerstandes eines Betons gegen externen Sulfatangriff ungeeignet.

Die Dehnungen bei der Prüfung nach Anhang D sind auf eine Ettringitbildung durch externen Sulfatangriff zurückzuführen. Die Werte liegen in einem Bereich (0.28-2.82 ‰), der es erlaubt, Betone mit hohem und tiefem Sulfatwiderstand zu identifizieren. Es ist deshalb sinnvoll, das Verfahren in der SIA 262/1 zu belassen und es anzuwenden.

7. Umsetzung und Ausblick

Die Ergebnisse aus dem damals noch laufenden Projekt wurden an der Sitzung der SIA 262 Arbeitsgruppe Beton am 14. März 2018 vorgestellt. Dieselbe Präsentation mit den vorläufigen Ergebnissen wurde danach in der am 22. März 2018 folgenden Sitzung der AG Revision SIA 262/1 gezeigt. Daraufhin beschliesst die AG, den Anhang L prSIA 262/1:2017-11 ersatzlos aus der SIA 262/1 zu streichen. Zudem wurde der Anhang L auch nicht wie vorgesehen in den NA zur EN 206:2013 übernommen.

Am 4. September 2018 fand eine Sitzung der AG SN EN 197-1 NB der SIA 215 / BG TC 51 statt. Der Anhang L wird aus der SN EN 197-1 NB gestrichen.

Entsprechend wurde das Projektziel erreicht:

Es wird ein einziges Verfahren zur Prüfung des Sulfatwiderstandes nach SIA 262/1 eingesetzt: Anhang D.

8. Referenzen

- [1] Loser R, Leemann A, Niederhauser, R (2011) Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis. ASTRA Forschungsbericht Nr. 1355, Bern.
- [2] Loser R, Leemann A (2013) Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D. ASTRA Report FGU 2010/001, Bern.
- [3] Loser R, Leemann A (2013) Prüfverfahren: Sulfatwiderstand von Beton. cemsuisse-Projekt 201001, Bern.
- [4] Bericht Nr. 2-1-039-06.14b (2014) VAB-Ringversuch Sulfatwiderstand von Beton nach SIA 262/1, Anhang D
- [5] Wittekindt W (1960) Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung; Zement-Kalk-Gips 13 H. 2, S. 565-572.
- [6] Monteiro PJ, Kurtis KE (2003) Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 33(7), 987-993.
- [7] Pfiffner M, Holzer L (2001) Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken. Bundesamt für Strassen, Forschungsauftrag ASTRA 1999/145, Bern;
- [8] Leemann A, Loser R (2011) Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 74-83.
- [9] Sylla HM (1988) Reaktionen im Zementstein durch Wärmebehandlung Beton, 38 (11), 449-454.
- [10] Scrivener KL (1996) Delayed ettringite formation and concrete railroad ties. Proc. 18th Int. Conf. Cement Microscopy, International Cement Microscopy Association, Duncansville, TX, USA, 375-377.
- [11] Shayan A, Quick GW (1992) Microscopic features of cracked and uncracked concrete railway sleepers. *ACI Materials Journal*, 89 (4) 348-361.
- [12] Oberholster RE, Maree H, Brand JHB (1992) Cracked prestressed concrete railway sleepers: Alkali-silica reaction or delayed ettringite formation. *Int. Conf. Alkali-Aggregate React. Concr.*, 9th, vol. 2, London Concrete Society, Slough, UK, 739-747.
- [13] Sahu S, Thaulow N (2004) Delayed ettringite formation in Swedish concrete railroad ties. *Cement and Concrete Research* 34, S. 1675-1681.
- [14] Odler I, Chen Y (1995) Effect of cement composition on the expansion of heat-cured cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 25(4), 853-862.
- [15] Kelham S (1996) The effect of cement composition and fineness on expansion associated with delayed ettringite formation. *Cement and Concrete composites*, 18(3), 171-179.
- [16] Barbarulo R, Peycelon H, Prené S, Marchand J (2005) Delayed ettringite formation symptoms on mortars induced by high temperature due to cement heat of hydration or late thermal cycle. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 125-131.
- [17] Kchakech B, Martin RP, Omikrine-Metalssi O, Toutlemonde F (2016) Risk of delayed ettringite formation in concrete heated at a mature stage: experimental quantitative evidence. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, Vol. 711, 287-294.
- [18] Pavoine A, Brunetaud X, Divet L (2012) The impact of cement parameters on Delayed Ettringite Formation. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 521-528.
- [19] SN 505 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen, SIA, Zürich, 2013.

- [20] prSN 505 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen, SIA, Zürich, Version September 2017.
- [21] Lawrence C.D. (1984) Transport of oxygen through concrete, in: Glasser F.P. (Hrsg.): The chemistry and chemically-related properties of cement. Proceedings of the British Ceramic Society, 35, 277-293.
- [22] Buenfeld N.R., Okundi E. (1998) Effect of cement content on transport in concrete, Magazine of Concrete Research, 50, 339-351.
- [23] Villani C., Loser R., West M.J., Di Bella C., Lura P., Weiss J.W. (2014) An inter lab comparison of gas transport testing procedures: oxygen permeability and oxygen diffusivity, Cement and Concrete Composites, 53, 357-366.
- [24] Winnefeld F., Schöler A., Lothenbach B. (2016) Sample preparation, in: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Hrsg.): A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, CRC Press, Boca Raton (FL, USA), London (UK) und New York (NY, USA), 1-35.
- [25] Leemann A., Merz C. (2013) An attempt to validate the ultra-accelerated microbar and the concrete performance test with the degree of AAR-induced damage observed in concrete structures. Cement and Concrete Research, 49, 29-37.
- [26] Irbe L., Beddoe R. E., Heinz D. (2019) The role of aluminium in CASH during sulfate attack on concrete. Cement and Concrete Research, 116, 71-80.

Anhang

A1. TGA

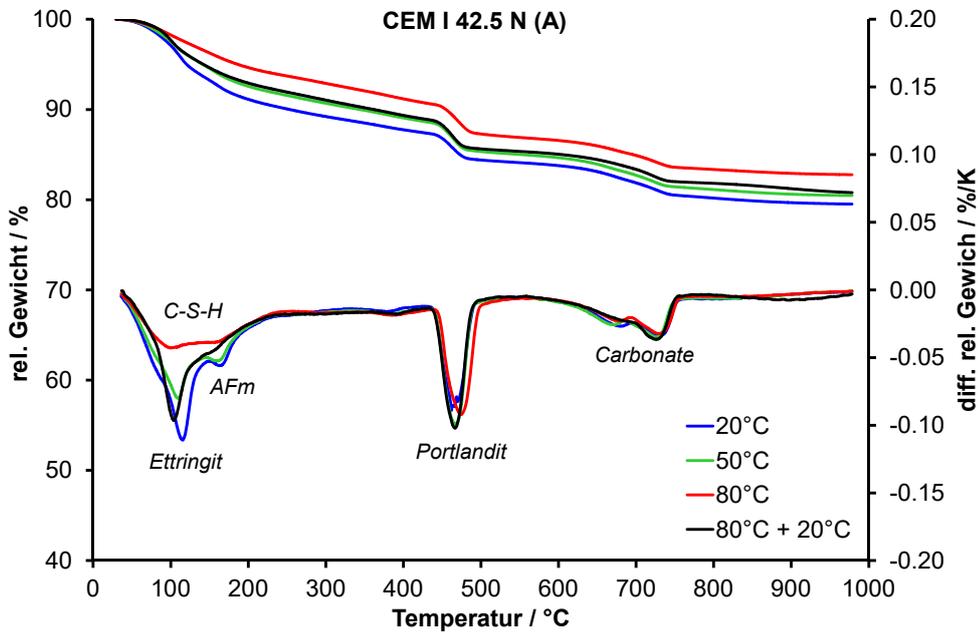


Abbildung A1.1: TGA von Mörtel hergestellt mit CEM I (A) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschließender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

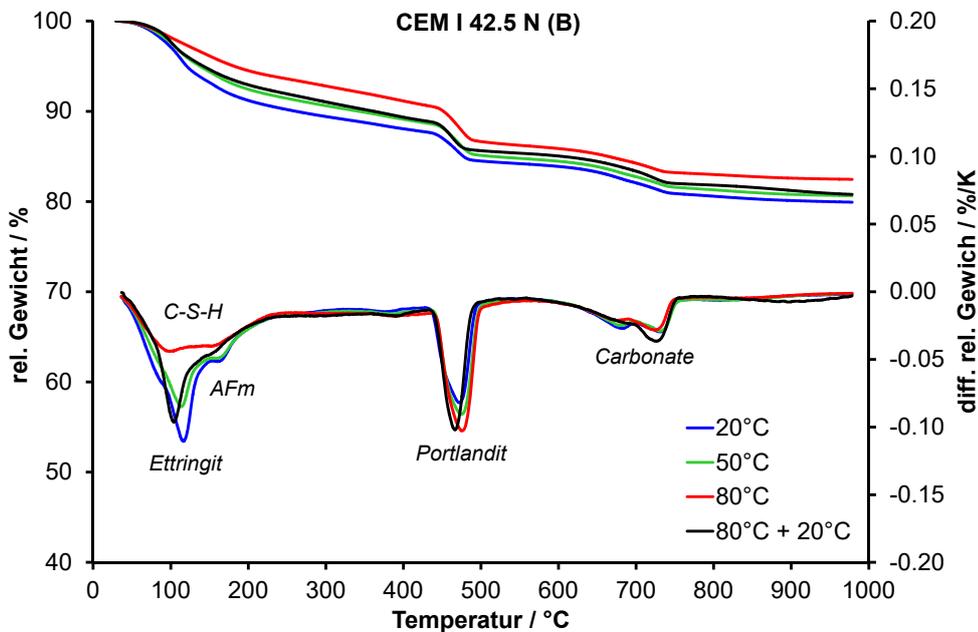


Abbildung A1.2: TGA von Mörtel hergestellt mit CEM I (B) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschließender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

A2. XRD

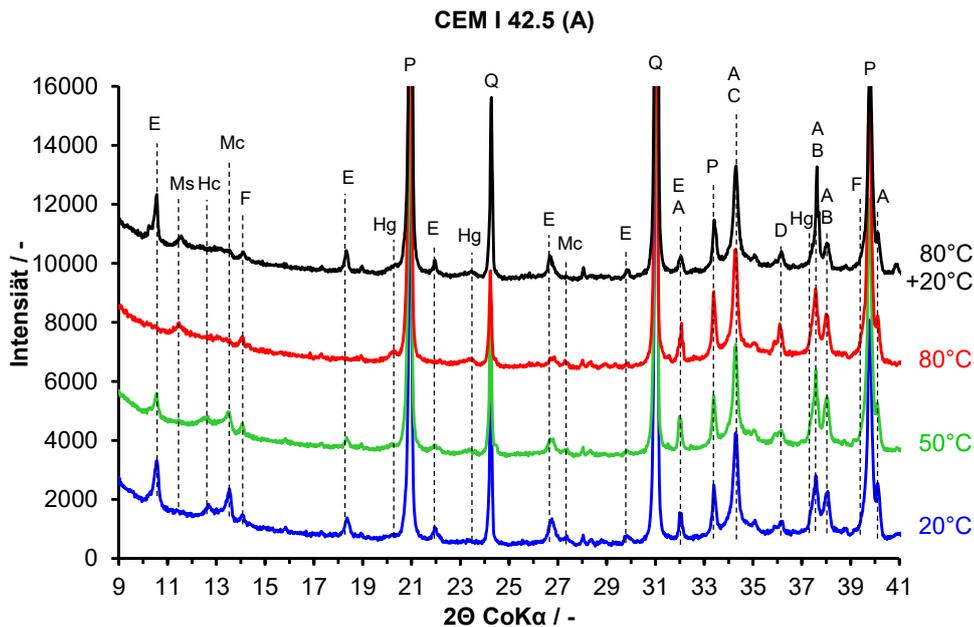


Abbildung A2.1: XRD von Mörtel hergestellt mit CEM I (A) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschliessender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

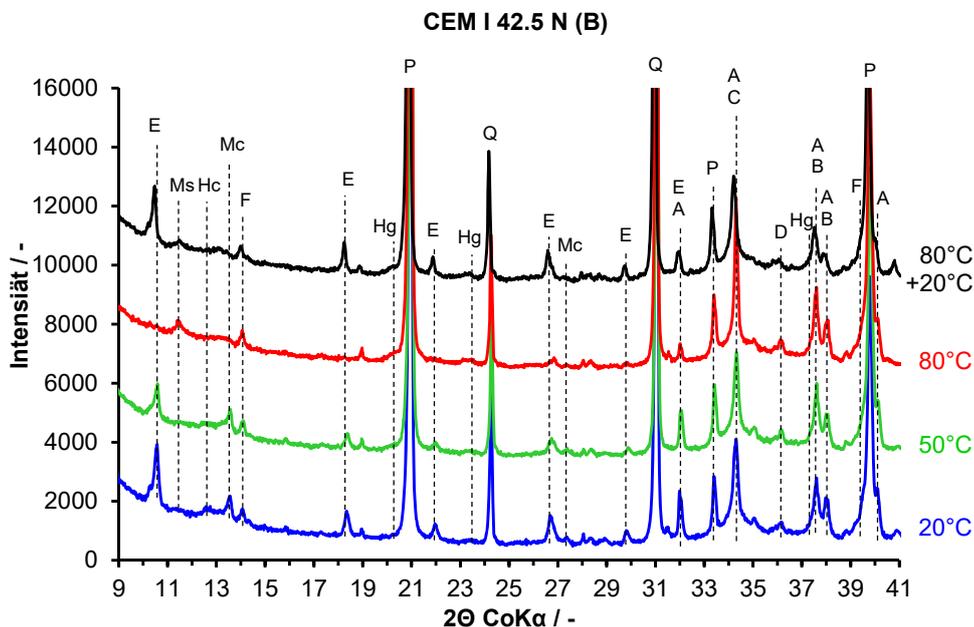


Abbildung A2.2: XRD von Mörtel hergestellt mit CEM I (B) im Alter von 28 Tagen ohne Trocknung („20°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 50 °C („50°C“), nach einer fünftägigen Trocknung bei 80 °C („80°C“) und nach einer fünftägigen Trocknung bei 80°C mit anschliessender Lagerung im Wasser für 91 Tage bei 20 °C („80°C + 20°C“).

A3. Schwefelprofile

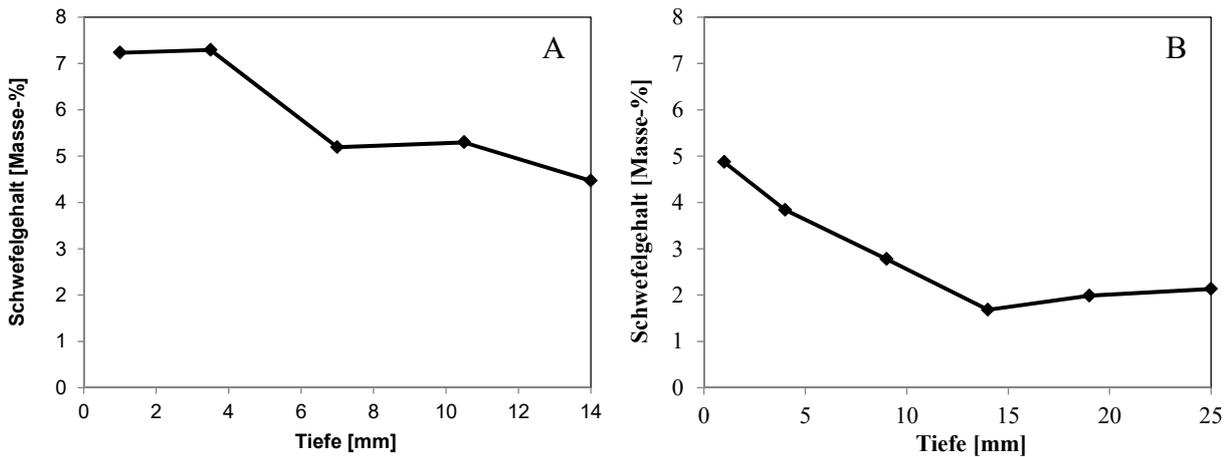


Abbildung A3.1: Schwefelgehalt des Betons aus CEM I (A) mit w/z 0.50 als Funktion der Betontiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D (A) und Anhang L (B).

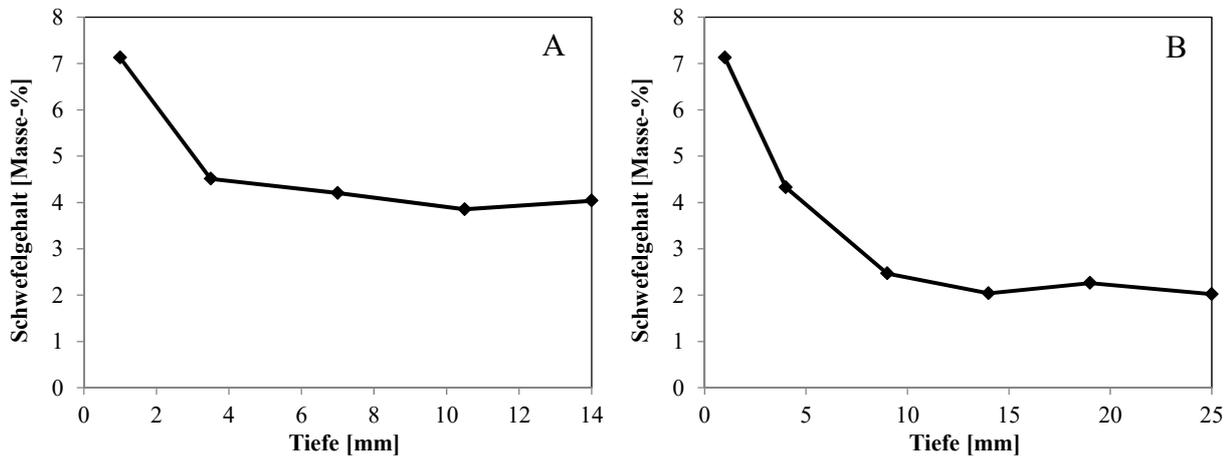


Abbildung A3.2: Schwefelgehalt des Betons aus CEM I (B) mit w/z 0.45 als Funktion der Betontiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D (A) und Anhang L (B).

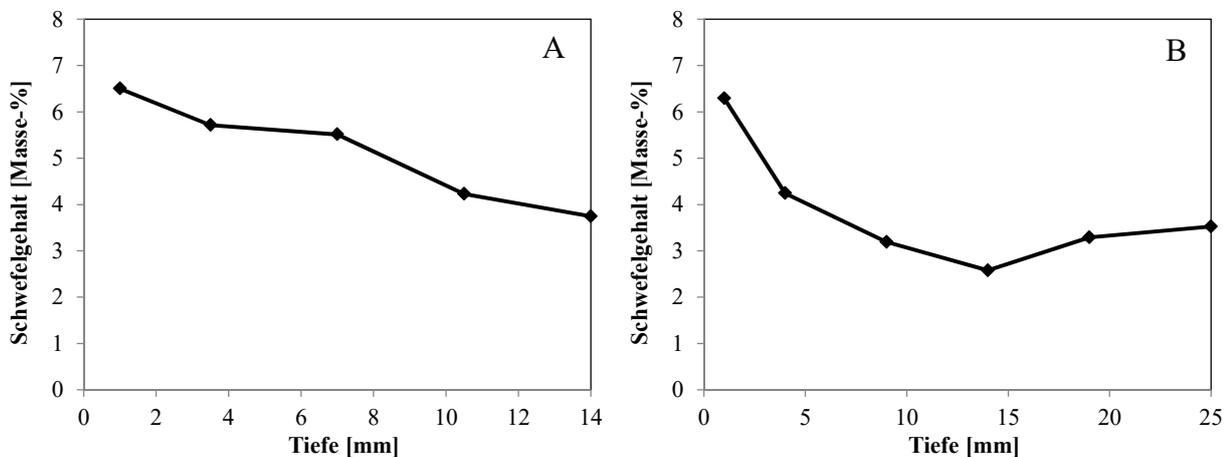


Abbildung A3.3: Schwefelgehalt des Betons aus CEM I (A) mit w/z 0.50 und Gesteinskörnung aus Brienz als Funktion der Betontiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D (A) und Anhang L (B).

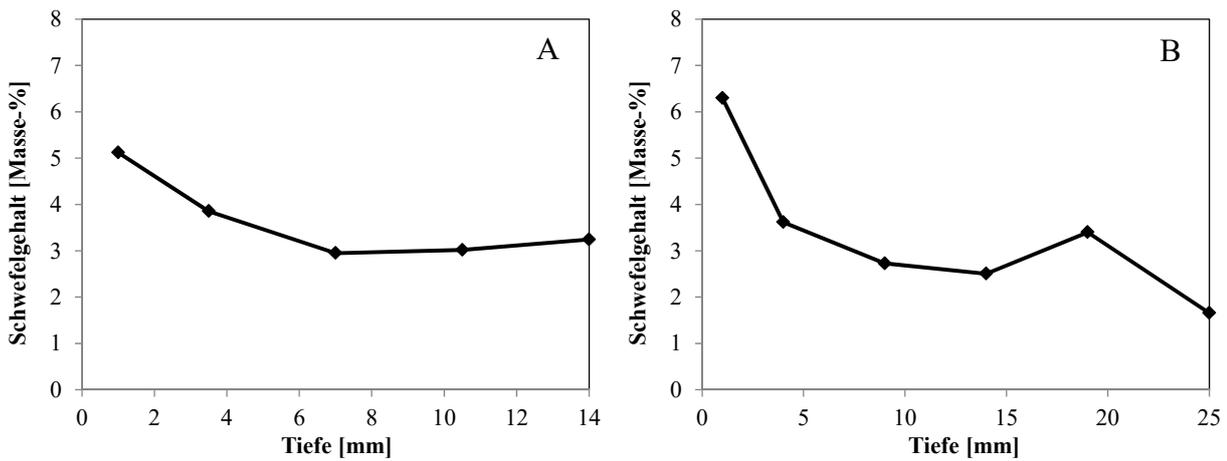


Abbildung A3.4: Schwefelgehalt des Betons aus CEM II (D) mit w/z 0.45 und Gesteinskörnung aus Brienz als Funktion der Betontiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D (A) und Anhang L (B).

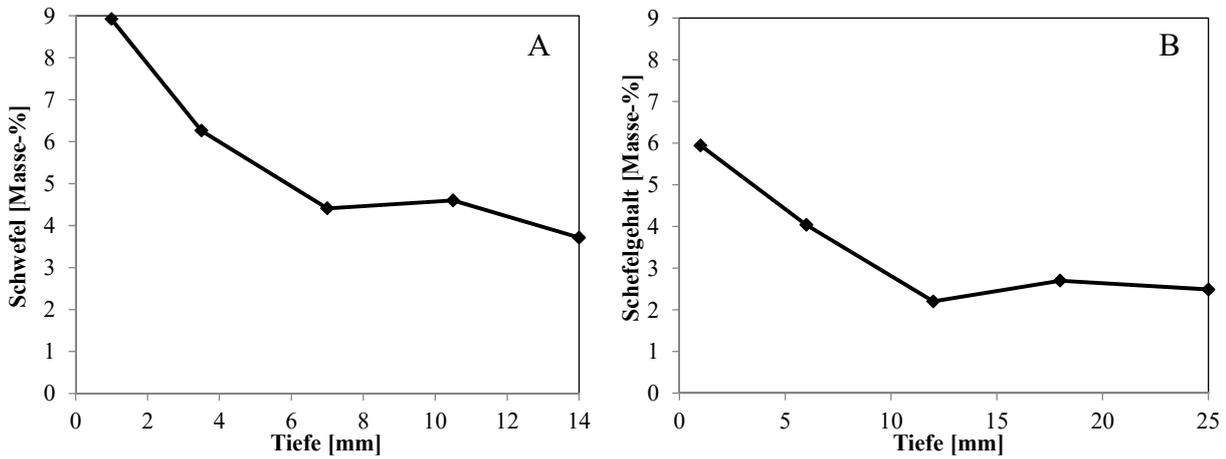


Abbildung A3.5: Schwefelgehalt des Betons aus CEM I mit w/z 0.48 als Funktion der Betontiefe am Ende der Prüfung nach Anhang D (A) und Anhang L (B).