



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D

**Résistance aux sulfates du béton: méthode d'essai améliorée
basée sur l'essai selon la norme SIA 262/1, appendice D**

**Sulfate resistance of concrete: improved method based on the
test according to SIA 262/1, appendix D**

Empa, Dübendorf
Roman Loser, dipl. Bauing. ETH
Andreas Leemann, Dr. sc. nat., dipl. geol. ETH

**Forschungsauftrag FGU 2010/001 auf Antrag der
Fachgruppe für Untertagbau (FGU)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D

**Résistance aux sulfates du béton: méthode d'essai améliorée
basée sur l'essai selon la norme SIA 262/1, appendice D**

**Sulfate resistance of concrete: improved method based on the
test according to SIA 262/1, appendix D**

Empa, Dübendorf
Roman Loser, dipl. Bauing. ETH
Andreas Leemann, Dr. sc. nat., dipl. geol. ETH

**Forschungsauftrag FGU 2010/001 auf Antrag der
Fachgruppe für Untertagbau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Roman Loser, Empa

Mitglieder

Andreas Leemann, Empa

Begleitkommission

Präsident

Georgios Anagnostou, ETH

Mitglieder

Felix Amberg, Amberg Engineering
Martin Bosshard, Basler & Hofmann
Manuel Alvarez, ASTRA
Werner Studer, Contec

Antragsteller

FGU, Fachgruppe für Untertagbau

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	8
Summary	9
1 Einleitung	11
1.1 Hintergrund	11
1.2 Projektziele	12
1.3 Projektablauf	12
2 Grundlagen	13
2.1 Mechanismen des Sulfatangriffes auf Beton	13
2.2 Bestehende Sulfatwiderstandsprüfung nach SIA 262/1	14
2.3 Entwicklung und Anwendung der bestehenden Sulfatwiderstandsprüfung	16
2.4 Grundlagenprojekt FGU 2007/002	17
2.4.1 Vorgehen und Projektziele	17
2.4.2 Resultate und Schlussfolgerungen aus Projekt FGU 2007/002	18
3 Untersuchungen	20
3.1 Materialien	20
3.2 Sulfatwiderstand	20
3.2.1 Allgemeines	20
3.2.2 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes	21
3.2.3 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1	21
3.2.4 Phase 3: Vergleichsversuche	22
3.3 Weitere Prüfungen	23
3.3.1 Würfeldruckfestigkeit	23
3.3.2 Wasserleitfähigkeit	23
3.3.3 Sauerstoffdiffusionskoeffizient	23
3.3.4 Dynamischer E-Modul	24
3.3.5 Änderung Druckfestigkeit während Sulfatprüfung	24
3.3.6 Sulfateindringfront	25
3.3.7 Mineralphasen	25
3.4 Versuchsmatrix	27
3.4.1 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes	27
3.4.2 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1	28
3.4.3 Phase 3: Vergleichsversuche	30
4 Resultate und Diskussion	31
4.1 Allgemeine Betoneigenschaften	31
4.2 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes	32
4.2.1 Sulfatwiderstandsprüfungen	32
4.2.2 Änderung der Druckfestigkeit	36
4.2.3 Änderung des dynamischen E-Moduls	37
4.2.4 Sulfateindringtiefe	39
4.2.5 Mineralphasen	41
4.2.6 Diskussion der Resultate	44
4.2.7 Folgerungen für den definitiven Prüfablauf	47
4.3 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1	47
4.3.1 Sulfatwiderstandsprüfungen	47
4.3.2 Änderung des dynamischen E-Moduls	50
4.3.3 Sulfateindringtiefe	51
4.3.4 Mineralphasen	52
4.3.5 Diskussion der Resultate	53
4.3.6 Schlussfolgerungen	57
4.4 Vergleichsversuche	58
4.4.1 Messwerte	58

4.4.2	Auswertung	61
4.4.3	Schlussfolgerungen	64
5	Schlussfolgerungen aus Phase 1 - 3	66
5.1	Prüfablauf.....	66
5.1.1	Vorbereitung der Prüfkörper	66
5.1.2	Durchführen der Prüfung	66
5.1.3	Prüfergebnisse	67
5.2	Auswertung	67
5.3	Grenzwert.....	68
5.4	Schlussbemerkung	70
	Anhänge	71
	Abkürzungen	80
	Literaturverzeichnis	81
	Projektabschluss.....	83
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	86

Zusammenfassung

Die Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton ist seit 2003 Bestandteil der Norm SIA 262/1. Aufgrund verschiedener Unklarheiten und Fragen, welche im Zuge der Anwendung der Prüfung in der Praxis aufgetreten sind, wurde in einem ersten Forschungsprojekt (FGU 2007/002, VSS-Bericht 1355, 2011) diese bestehende Prüfung systematisch untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass bei der Prüfung grundsätzlich Mechanismen ablaufen, welche mit den Erfahrungen aus der Auswertung verschiedener Schadenfälle in Tunneln übereinstimmen. Die angewendete Auswertungsformel führt hingegen insbesondere beim Normalbeton zu Resultaten, welche den Erfahrungen aus Langzeitversuchen widersprechen. Zudem wurde festgestellt, dass der Sulfateintrag in die Prüfkörper optimiert und eine längere Reaktionszeit für die Sulfatinteraktion zur Verfügung gestellt werden muss. Aus diesem Grund wurde das vorliegende Folgeprojekt gestartet. Dieses hatte zum Ziel, ein adaptiertes Verfahren zu entwickeln, welches zwar grundlegend auf dem bestehenden Verfahren basiert, aber eine bessere Aussagekraft ermöglicht.

In einer ersten Phase wurden dazu an einer beschränkten Matrix von Betonmischungen verschiedene Prüfvariationen durchgeführt und deren Auswirkung auf verschiedene Parameter wie Längenänderung, Sulfatlösungsaufnahme, Mineralphasenbildung, etc. untersucht. Basierend auf diesen Resultaten wurde das definitive Prüfverfahren festgelegt. Dieses unterscheidet sich zum bestehenden Verfahren im Wesentlichen darin, dass während den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen die Trocknungsphase verlängert und die Tränkungsphase verkürzt wird. Dadurch wird der Sulfateintrag erhöht. Zudem erfolgt im Anschluss an diese Zyklen eine Zusatzlagerung von 8 Wochen in Sulfatlösung ohne weitere Trocknungs- und Tränkungszyklen. Damit wird mehr Reaktionszeit zur Verfügung gestellt und die sulfatbedingten Dehnungen werden grösser. Als Beurteilungskriterium wird nur noch die gemessene Dehnung während der Zusatzlagerung verwendet. Es erfolgt keine weitere Auswertung mit einer Formel wie bei der bestehenden Prüfung.

Dieses adaptierte Verfahren wurde in einer zweiten Phase an einer grösseren Matrix verschiedener Betonmischungen unter Variation von Bindemitteltyp, w/b-Wert und Bindemittelmittelvolumen validiert. Dabei hat die Dehnung grundsätzlich mit zunehmendem w/b-Wert sowie zunehmendem Leimvolumen ebenfalls zugenommen, wobei sowohl diese Zunahme als auch die absolute Grösse der Dehnung stark vom Bindemitteltyp abhängt. Diese Resultate stimmen gut mit den Erfahrungen aus Untersuchungen bei Schadenfällen und mit Resultaten aus Langzeitversuchen aus der Literatur überein. Über die während der Prüfung an den Probekörpern gemessene Veränderung des dynamischen E-Moduls war es zudem möglich, einen Grenzwert für die Dehnung zu definieren, ab welcher eine signifikante Schädigung der Probekörper eintritt. Dieser Wert von 1.2 ‰ Dehnung während der Zusatzlagerung könnte auch als Beurteilungskriterium (Richtwert) bei der Anwendung der Prüfung in der Praxis verwendet werden.

In einer dritten Phase wurden mit vier Labors Vergleichsversuche an ausgewählten Betonmischungen durchgeführt, um einen ersten Anhaltspunkt über die Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Prüfung zu bekommen. Während die Wiederholbarkeit innerhalb der einzelnen Labors relativ gut war, ist eine Aussage über die Vergleichbarkeit schwierig. Der Grund liegt darin, dass bei einem Labor bei mehreren Messserien Messbolzen abgefallen sind und ein zweites Labor generell über alle Versuche eine deutlich geringere Sulfatlösungsaufnahme gemessen hat wie die übrigen drei Labors. Eine belastbare Verifikation der Prüfung in Bezug auf die Wiederhol- und Vergleichbarkeit ist somit noch ausstehend. Trotz dieser Einschränkungen dürfte die Vergleichbarkeit im Rahmen bekannter Dauerhaftigkeitsprüfungen (z. B. FT-Widerstand, Chloridwiderstand) liegen. Zunehmende Erfahrung und weitere Ringversuche sind aber notwendig, um die Vergleichbarkeit der Prüfung zu verbessern.

Résumé

L'essai de la résistance aux sulfates du béton est inclus dans la norme SIA 262/1 depuis 2003. Du fait de différentes incertitudes et questions qui sont apparues avec l'application de cet essai dans la pratique, un premier projet de recherche (FGU 2007/002, Rapport VSS 1355, 2011) a été consacré à une étude systématique de cet essai. Il est apparu que les mécanismes fondamentaux qui se déroulent lors de cet essai concordaient avec les expériences tirées de l'évaluation de différents cas de dommages dans des tunnels. La formule utilisée pour l'évaluation conduit par contre, en particulier pour le béton normal, à des résultats qui sont en contradiction avec les expériences tirées d'essai à long terme. De plus, on a constaté qu'il fallait optimiser l'apport de sulfate dans l'éprouvette et accroître la durée de réaction finale avec le sulfate. Ces constatations ont conduit au lancement du présent projet de recherche subséquent qui avait pour but de développer une méthode d'essai modifiée qui, bien que reposant sur la méthode existante, fournisse cependant des résultats plus pertinents.

Dans une première phase on a procédé à différentes variantes de l'essai sur une matrice limitée de mélanges de béton et examiné leurs effets sur différents paramètres tels que variation de la longueur, absorption de la solution de sulfate, formation des phases minérales, etc. A partir de ces résultats on a alors déterminé la méthode d'essai définitive. Celle-ci diffère pour l'essentiel de la méthode originelle en ceci que pour les quatre cycles d'immersion dans la solution de sulfate/séchage, la phase de séchage a été allongée et la phase d'immersion raccourcie, ce qui augmente l'absorption de sulfate. De plus, à la suite de ces cycles, on procède à un entreposage continu supplémentaire de 8 semaines dans la solution de sulfate sans autres cycles d'immersion/séchage. Ceci augmente la durée du temps de réaction et les allongements provoqués par le sulfate sont plus importants. Le critère d'appréciation est uniquement l'allongement mesuré après l'entreposage supplémentaire. On ne procède pas à d'autres évaluations comme dans la méthode d'essai originelle.

Dans une deuxième phase, cette méthode d'essai modifiée a été validée sur une matrice plus vaste de différents mélanges de béton en faisant varier le type de liant, le rapport eau/liant et le volume de la pâte de liant. Dans ces essais, l'allongement augmentait avec l'augmentation du rapport eau/liant ainsi qu'avec celle du volume de pâte de liant; aussi bien l'augmentation que la valeur absolue de l'allongement dépendaient fortement du type de liant. Ces résultats concordent bien avec les expériences tirées de l'étude de cas de dommages et avec les résultats d'essai de longue durée cités dans la littérature. De plus, la mesure des variations du module dynamique E au cours de l'essai, a permis de définir une valeur limite à partir de laquelle il se produit un endommagement significatif de l'éprouvette. Cette valeur d'un allongement de 1.2 ‰ au cours de l'entreposage supplémentaire pourrait aussi s'utiliser comme critère d'appréciation (valeur indicative) pour l'application de cet essai dans la pratique.

Dans une troisième phase, on a procédé avec quatre laboratoires à des essais comparatifs sur une sélection de mélanges de béton afin d'obtenir de premières indications sur la répétabilité et la reproductibilité de cet essai. Alors que la répétabilité à l'intérieur des différents laboratoires était relativement bonne, il est difficile d'émettre une difficile d'émettre une appréciation sur la reproductibilité. La raison à cela est que dans un laboratoire les repères de mesure s'étaient décollés lors de plusieurs séries de mesure et que dans un second laboratoire les valeurs de mesure de l'absorption de la solution de sulfate étaient nettement plus basses que dans les trois autres laboratoires. Une vérification robuste de l'essai en ce qui concerne sa répétabilité et sa reproductibilité reste encore à réaliser. Malgré ces restrictions, sa reproductibilité devrait être de l'ordre de celle des essais de durabilité connus (résistance au gel en présence de sels de déverglaçage, résistance au chlorure). Une expérience accrue ainsi que d'autres essais interlaboratoires demeurent toutefois nécessaires pour mieux assurer la répétabilité de l'essai.

Summary

A test for assessing the sulfate resistance of concrete is part of the standard SIA 262/1 since 2003. However, while applying this test in practice, different questions and ambiguities were arising and a first research project was launched to study the test systematically (FGU 2007/002, VSS-report 1355, 2011). It was found that the mechanisms basically are in agreement with the experience made with the analysis of different damages in tunnels. However, the assessment of the data with the proposed formula revealed results which were, in case of normal concrete, contradictory to the experience of long term tests. Additionally, it was found that the ingress of sulfates has to be increased and more time for the chemical reaction has to be provided. This was the basis for starting the present research project. The aim was to develop an adopted testing procedure, which should mainly be based on the existing procedure but improve the significance of the results.

In a first part, a limited matrix of concrete mixtures was used to apply different variables in the testing procedure and to study their effects on parameters like length change, uptake of sulfate solution, change of mineral phases, etc. Based on these results, the final testing procedure was defined. The main differences to the existing procedure is, that for the four drying and wetting cycles the drying period is extended while the wetting period is shortened. This increases the uptake of sulfate solution. Moreover, the drying and wetting cycles are followed by an 8 week storage in sulfate solution without further drying and wetting. As a result, the reaction time for the sulfates is increasing and the resulting expansions as well. The sulfate resistance is assessed using the expansion during the additional storage in solution without drying and wetting cycles. This value is used as decisive parameter without using a formula with correction factors for concrete mix design as in the former test.

In a second part, the adopted testing procedure was validated using an extended matrix of concrete mixtures by varying binder type, w/b-ratio and volume of paste. The measured expansion was generally increasing with increasing w/b-ratio and increasing volume of paste. This increase in expansion as well as the absolute value of expansion were strongly dependent on the type of binder. These results are in good agreement with experiences made in case studies of sulfate attack in tunnels and long term tests found in literature. By measuring the change of dynamic elastic modulus of the specimens during the test, it was possible to define a threshold value for expansion. Exceeding this threshold value of 1.2 ‰ during the additional storage in sulfate solution resulted in an increased risk of a significant deterioration of the specimen indicated by a decrease of elastic modulus. Therefore, this threshold value could also be a possible criteria for assessing the sulfate resistance of concrete in practice.

In a third part, comparability tests with four different laboratories were carried out using selected mixtures of the second part to get a first indication about the repeatability and the reproducibility of the test. While the repeatability in the different labs was reasonably good, a conclusion about the reproducibility remains difficult. While in one lab the cores lost most of the measuring plugs during the tests, a second lab measured a considerably lower sulfate uptake than the other labs for all series resulting in generally lower expansion. Therefore, a verification of repeatability and reproducibility is still missing. However, results are indicating, that reproducibility of the test is about in the range of known durability tests for concrete (e.g. chloride resistance, freeze-thaw-resistance). Nevertheless, increased experience in the labs and follow-up round robin tests are needed to improve the reproducibility of the test.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Tunnelbauwerke stellen zentrale verkehrstechnische Objekte im schweizerischen Strassennetz sowie wichtige Verbindungen in der Nutzung der Wasserkraft und im Schienenverkehr dar. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an solche Objekte während der Nutzungszeit und somit an die Dauerhaftigkeit der verwendeten Baumaterialien.

Bei Betonkonzepten im Tunnelbau muss davon ausgegangen werden, dass es zum Kontakt zwischen Bergwasser und Beton kommt. Bei Tunnels ohne Abdichtungsmassnahmen ist dieser Kontakt unumgänglich. Bei Tunnels mit Abdichtungen können undichte Stellen auftreten und in solchen Bereichen muss der Beton dem Bergwasser Widerstand bieten. Entsprechend ist der Gefährdung des Betons durch sulfathaltige Wässer oder Böden durch eine zweckmässige Tragwerksanalyse, Bemessung, konstruktive Durchbildung und insbesondere durch die Wahl geeigneter Baustoffe zu begegnen. Gleiches gilt auch für weitere Betonbauwerke, welche mit sulfathaltigen Wässern in Kontakt kommen können (z.B. Abwasserkanäle, Bauten in sulfathaltigen Grundwässern, etc.).

Untersuchungen der Schädigungsmechanismen bei der Interaktion zwischen Beton und Bergwasser in verschiedenen schweizerischen Tunnels durch die Empa haben gezeigt, dass in allen untersuchten Fällen ein Sulfatangriff präsent war [Romer und Lienemann, 1998 / Holzer, 1999 / Pfiffner und Holzer, 2001 / Romer et al., 2003]. Die Gefahr des Sulfatangriffes ist auch bei den Anforderungen und Betonkonzepten für die beiden neuen Alpentransversalen berücksichtigt worden. In der Phase der Eignungsprüfungen wurde die Sulfatprüfung nach AlpTransit Gotthard (ATG) eingesetzt, welche zwei Jahre dauert. Um den Sulfatwiderstand von Beton während der Ausführung in relativ kurzer Zeit prüfen zu können, wurde ein entsprechender Schnelltest mit Sulfateintrag durch Trocknungs- und Tränkungszyklen entwickelt [Studer, 2001], dessen Aussage mit der ATG-Prüfung teilweise korreliert. Diese verkürzte Prüfung wurde in leicht abgeänderter Form in die SIA 262/1 (2003) übernommen.

Nachdem dieses Prüfverfahren schon einige Jahre verwendet wurde, lagen ausreichend Erfahrungen vor. Es traten verschiedene Problempunkte auf, die in einem ersten Forschungsprojekt FGU 2007/002 [VSS1355, 2011] abgeklärt wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass verschiedene dieser Problempunkte direkt mit dem Verfahren selbst, insbesondere aber auch mit der Art der Auswertung der Messgrössen im Zusammenhang stehen. Die zentralen Erkenntnisse aus dem ersten Forschungsprojekt FGU 2007/002 waren:

- Es werden grundsätzlich die erwarteten Mineralphasen gebildet.
- Die aktuelle Sulfatprüfung nach SIA 262/1 führt bei Normalbeton zu keinen aussagekräftigen Werten, da sich die Dehnungen in der Sulfatlösung kaum von solchen Prüfkörpern unterscheiden, welche in reinem Wasser geprüft werden.
- Ein tiefer w/z-Wert wirkt sich tendenziell negativ auf den Sulfatwiderstand aus. Dies steht im Widerspruch zu den Ergebnissen von Langzeitversuchen.
- Das Zementleimvolumen wirkt sich stark auf die Dehnung aus.
- Die Lagerungszeit in der Sulfatlösung scheint für die Ettringitbildung zu kurz zu sein.
- Der Sulfateintrag bei dichten Betonsystemen ist sehr gering und führt zu starken Sulfatgradienten über den Querschnitt.

Die Schlussfolgerung aus diesen Erkenntnissen war, dass mit der aktuellen Prüfung das Ziel eines griffigen Werkzeugs zur Optimierung von Betonkonzepten und damit der Reduktion der Wahrscheinlichkeit von Sulfatschäden an Betonbauwerken zumindest für Normalbeton nicht erreicht werden kann. Während der experimentelle Teil der Prüfung in den Grundsätzen den Erwartungen entsprechende Resultate lieferte, führte insbesondere die anschliessende Auswertung beim Normalbeton zu widersprüchlichen Ergebnissen. Entsprechend bestand ein dringender Handlungsbedarf. Im Laufe des ersten Forschungsprojektes wurden bereits erste Versuche für eine Adaption des Prüfverfahrens

sowie auch der Auswertung durchgeführt. Im Wesentlichen wurde dabei nur noch die effektiv gemessene Dehnung beurteilt. Zusätzlich wurde zur Verlängerung der für die chemische Reaktion zur Verfügung stehenden Zeit nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen eine Zusatzlagerung vorgesehen. Dies bedeutet, dass wesentliche Bestandteile des experimentellen Verfahrens wie zum Beispiel die Prüfkörperdimension oder die Tränkungs- und Trocknungszyklen für den beschleunigten Sulfateintrag, sowie die Messgeräte für die Bestimmung der Expansion inkl. der weiteren notwendigen Laboreinrichtung übernommen werden könnten. Diese ersten Versuche haben vielversprechende Resultate geliefert.

Im vorliegenden Projekt wurden die Änderungsansätze des ersten Forschungsprojektes weiterentwickelt und das Verfahren in Bezug auf verschiedene Gesichtspunkte optimiert und anschliessend validiert. Mit einer breit abgestützten Versuchsmatrix an verschiedenen Betonmischungen wurde zudem die Grundlage geschaffen, um einen möglichen Grenzwert für die Prüfung vorschlagen zu können.

1.2 Projektziele

Wie das Grundlagenprojekt FGU 2007/002 (Bericht Nr. 1355) gezeigt hat, muss die bestehende Sulfatwiderstandsprüfung nach SIA 262/1, Anhang D für eine verbesserte Aussagekraft bei Normalbeton überarbeitet werden. Mit ersten Versuchen innerhalb des Projektes FGU 2007/002 wurden Wege aufgezeigt, wie das Verfahren adaptiert werden könnte.

Dieses adaptierte Verfahren ist nun in einem ersten Schritt unter Berücksichtigung folgender Faktoren zu optimieren:

- Optimierung des Sulfateintrages während der Prüfung.
- Reduktion des Sulfatgradienten im Prüfkörper.
- Vergrösserung der Dehnungsunterschiede zwischen verschiedenen Betonsorten.
- Einfluss verschiedener Prüflösungen abklären.
- Erfassen der chemischen und physikalischen Abläufe während der Prüfung.

In einem nächsten Schritt soll das so festgelegte optimierte Verfahren validiert werden, indem durch Variationen in der Betonzusammensetzung eine möglichst breite Basis von Prüfergebnissen entsteht. Diese Resultatbasis bildet die Grundlage für folgende Projektziele:

- Definition der Prüfanweisung und Auswertung als Vorschlag für eine potentielle Übernahme in die Norm SIA 262/1, Anhang D.
- Definition und Verifikation eines Grenzwertes für die Beurteilung der Resultate.
- Erarbeiten erster Erkenntnisse über die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfung.

1.3 Projektablauf

Basierend auf den obenstehenden Projektzielen wurde das Vorgehen wie folgt festgelegt:

Phase 1: Festlegung des definitiven Prüfverfahrens und der Prüflösung anhand von Versuchen mit zwei verschiedenen Zementen und zwei verschiedenen w/b-Werten.

Phase 2: Validierung des in Phase 1 festgelegten Prüfverfahrens mit einer erweiterten Prüfmatrix unter Variation der Betonzusammensetzung (Zementart, w/b-Wert, Zementleimvolumen).

Phase 3: Definitiver Prüfbeschrieb, Vergleichsversuch mit verschiedenen Labors und Vorschlag für einen Grenzwert.

2 Grundlagen

2.1 Mechanismen des Sulfatangriffes auf Beton

Bei einem Sulfatangriff auf Mörtel oder Beton können sich unter anderem die Sulfatminerale Ettringit, Gips und Thaumasit bilden. Die Bildung dieser Mineralien über Lösungs- und Ausfällungsprozesse können zu einem Kristallisationsdruck führen [Taylor, 1997b / Scherer, 2004]. Für die Ettringitbildung wird das im Zement vorhandene Aluminat benötigt (hauptsächlich $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, zementchemische Bezeichnung: C_3A). Entsprechend weisen die sogenannten "sulfatbeständigen" Zemente einen tiefen Gehalt an C_3A auf. In der Schweiz gelten nach der Norm SN EN 197-1 [SIA, 2000] aktuell Portlandzemente mit einem C_3A -Gehalt von ≤ 3.0 M-% sowie die Schlackenzemente CEM III/B und CEM III/C als Zemente mit hohem Sulfatwiderstand. Allerdings hat sich gezeigt, dass die "sulfatbeständigen" Zemente eine Sulfatschädigung nicht in allen Fällen verhindern können [Monteiro, 2003]. Es ist auch nicht klar, inwieweit das in den beiden Klinkerphasen C_3A und C_4AF vorhanden Aluminium der Reaktion zur Verfügung steht [Taylor, 1997a / Lothenbach, 2006]. Offenbar spielt das C_4AF eine weniger wichtige Rolle als das C_3A [Neubauer, 2002]. Die Gipsbildung kann zwar zu einer Expansion führen [Kollmann, 1978 / Kollmann, 1979a / Kollmann, 1979b], scheint jedoch nur bei einem schädigenden Sulfatangriff im Labor eine Rolle zu spielen, da dort die Sulfatkonzentrationen wesentlich höher sind als bei Bauwerken [Koch, 1960 / Wittekind, 1960]. Thaumasit kann sich in Beton mit tiefem und hohem Aluminatgehalt des Zementes bilden [Blanco-Varela, 2006 / Brown, 2002 / Nobst, 2003]. Wichtig ist, dass bei der Thaumasitbildung neben dem Sulfat auch eine Karbonatquelle vorhanden sein muss [Thaumasite Expert Group, 1999 / Bensted, 1999 / Crammond, 1985 / Bensted, 2000 / Crammond, 1995]. Diese Quelle kann entweder der im Zement vorhandene Kalksteinanteil, eine kalkhaltige Gesteinskörnung oder von aussen eindringendes, kalkhaltiges Wasser sein. Zur Bildung von Thaumasit bestehen zwei Theorien: entweder wird er direkt gebildet oder seiner Entstehung geht die Bildung von Ettringit voraus, welcher anschliessend zu Thaumasit umgewandelt wird ("Woodfordite-Bildung"). Neuste Ergebnisse weisen darauf hin, dass die erste Variante zutrifft [Schmidt, 2007 / Leemann, 2011]. Allerdings reagiert aus kinetischen Gründen zuerst alles verfügbare Aluminat zu Ettringit.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden Aspekte der Sulfatschädigung bei Laborprüfungen untersucht. Diese Laborprüfungen weisen jedoch zum Teil beträchtliche Unterschiede zum bestehenden Verfahren nach SIA 262/1 auf, weshalb die Übertragbarkeit der Resultate nicht gewährleistet ist. International existiert zudem keine Norm, in der die Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton geregelt ist.

Die Sulfatkonzentration, die für die Prüfung verwendet wird, hat einen erheblichen Einfluss auf die gebildeten Reaktionsprodukte. Bellmann et al., 2006 haben gezeigt, dass unterhalb einer bestimmten Sulfatkonzentration in der Lösung kein Gips in den Prüfkörpern entsteht. Bei einer Konzentration über diesem Grenzwert (über dem sich auch die Lösungskonzentration bei der SIA-Prüfung befindet) kann sich Gips bilden, welcher zu Expansion und Mikrorissbildung führt. In realen Bauwerken ist eine schädigende Gipsbildung bisher jedoch nicht bestätigt worden. Da auch bei der bestehenden Sulfatwiderstandsprüfung nach SIA 262/1 innerhalb des Grundlagenprojektes FGU 2007/002 keine Gipsbildung während der Prüfung beobachtet werden konnte, scheint die diesbezügliche Übertragbarkeit auf Bauwerke gegeben.

Sowohl bei Laborprüfungen als auch bei Bauwerken treten Schäden üblicherweise durch eine Bildung von expansivem Ettringit auf. Neben Ettringit kann auch Thaumasit gebildet werden [Schmidt, 2007]. Wie das Zusammenspiel zwischen Sulfateintrag und der Bildung von expansiven Sulfatmineralien abläuft, ist nicht vollständig bekannt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich die Mineralien bei einem Eindringen der Sulfatfront in der Reihenfolge Ettringit – Thaumasit – Gips bilden [Leemann, 2011]. Aus diesem Grund erscheint es als sinnvoll, den Sulfatwiderstand über die Dehnung zu charakterisieren, welche aufgrund des zuerst gebildeten Ettringits basiert. Aufgrund dieser unterschiedlichen Bildungsbedingungen der verschiedenen Mineralien müsste bei der Bildung

von Thaumasit und Gips während der Prüfung von einer Zonierung über den Prüfkörperquerschnitt ausgegangen werden, deren Auswirkung auf die Prüfergebnisse bei der Sulfatprüfung nach SIA abzuklären wäre. Eine allfällige Bildung von Thaumasit (anstatt Ettringit) würde zu einer geringeren Expansion aber einem erhöhten Kohäsionsverlust führen und der Zusammenhang zwischen Dehnung und Schädigungsgrad wäre unter Umständen nicht mehr gegeben.

In [Leemann, 2011] wird anhand eines praktischen Schadenfalles gezeigt, dass auch bei Zementen mit hoher Sulfatbeständigkeit massive Sulfatschäden auftreten können, wobei sich die Schäden aber praktisch ausschliesslich auf Zonen mangelhafter Betonqualität und entsprechend hoher Porosität beschränken. Dies bedeutet, dass die Porosität in-situ betreffend Sulfatschädigung offensichtlich ebenfalls eine Rolle spielt. Zudem konnte anhand dieses Falles gezeigt werden, dass sich das Ettringit nicht bevorzugt in den Poren bildet, sondern dort, wo das Aluminium verfügbar ist. Da dieses schlecht löslich und immobil ist, bleibt es innerhalb der Umrandung des ursprünglichen Zementkornes (inner product). Somit ist die Ettringitbildung in diesen Zonen lokal stärker ausgeprägt. Die Vorstellung, dass zuerst alle Poren mit Reaktionsprodukten gefüllt werden müssen, bis überhaupt eine Dehnung auftreten kann, ist somit nur teilweise gültig.

Bergwässer, welche in Kontakt mit Beton kommen, weist zwar typischerweise mehr Natriumsulfat auf, aber Magnesiumsulfat ist normalerweise ebenfalls enthalten. Es ist deshalb fraglich, ob reines Natriumsulfat als Prüflösung sinnvoll ist. Betone aus Hochofenzement oder Zement mit Mikrosilika können nämlich in Natriumsulfatlösung einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen, während sie in Magnesiumsulfat nicht beständig sind [Al-Amoudi, 1995].

2.2 Bestehende Sulfatwiderstandsprüfung nach SIA 262/1

Mit der in der aktuell gültigen Norm SIA 262/1 [SIA, 2003] beschriebenen Sulfatwiderstandsprüfung wird das Verhalten von Beton im Kontakt mit einer beschleunigt eingetragenen Natriumsulfatlösung beurteilt. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Schädigungspotential über eine Dehnung beurteilt werden kann, welche durch die Bildung von expansivem Ettringit ausgelöst wird. Der Prüfablauf und die Auswertung werden im Folgenden kurz beschrieben. Für weitere Details betreffend Prüfung sei auf die Norm SIA 262/1:2003, Anhang D verwiesen.

Bei der Prüfung werden mindestens sechs Betonbohrkerne ($\varnothing 28 \pm 2$ mm, Länge 150 ± 20 mm) verwendet, an denen zu Beginn der Prüfung (im Alter von 28 Tagen) die Ausgangslänge bestimmt wird. Anschliessend werden die Prüfkörper während 48 Stunden im Ofen bei 50°C getrocknet (Abb. 2.1, links) und danach für 120 Stunden (5 Tage) in einer 5 %igen Natriumsulfatlösung gelagert (Abb. 2.1, rechts). Nach der Sulfatlagerung wird die Länge erneut gemessen (Abb. 2.2). Vor und nach dem Trocknen wird zusätzlich die Masse der Prüfkörper bestimmt.

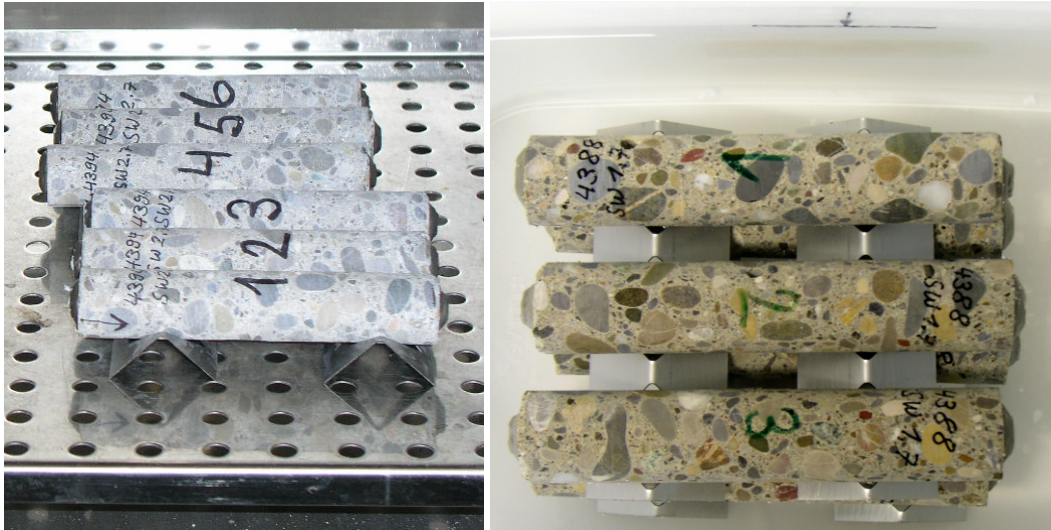


Abb. 2.1 Trocknen der Proben im Ofen nach jeder Sulfatlagerung (links) und lagern der Prüfkörper in der Sulfatlösung (rechts).



Abb. 2.2 Messapparatur zur Bestimmung der Längenänderung nach der Sulfatlagerung. Prüfkörper mit aufgeklebten Bolzen zur genauen Längenmessung.

Dieser sieben Tage dauernde Zyklus wird viermal durchgeführt (Prüfdauer insgesamt 28 Tage). Nach dem Prüfen werden folgende Zwischenergebnisse berechnet:

- Volumenbestimmung V_0 der Bohrkern (inkl. Messbolzen) durch Tauchwägung:

$$V_0 = \frac{m_o - m_u}{\rho_w} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

mit m_o : Masse des Prüfkörpers an der Luft [kg]
 m_u : Masse des Prüfkörpers unter Wasser [kg]
 ρ_w : Dichte des Wassers bei 20°C [kg/m³]

- Längenänderung Δl_n nach dem n-ten Zyklus:

$$\Delta l_n = \frac{l_n - l_0}{l} \quad n = 1 \div 4 \quad [\%] \quad (2)$$

mit l_n : Länge der Prüfstrecke zwischen den Messbolzen nach dem n-ten Zyklus [mm]
 l_0 : Länge der Prüfstrecke zwischen den Messbolzen vor dem ersten Zyklus [mm]
 l : Länge des Prüfkörpers ohne Bolzen [mm]

- Sulfatlösungsaufnahme Δm_{Sn} im n-ten Zyklus:

$$\Delta m_{Sn} = \frac{m_{Sn} - m_{Tn}}{V_0} \quad n = 1 \div 4 \quad [\text{kg/m}^3] \quad (3)$$

mit m_{Sn} : Masse nach Lagerung in Sulfatlösung im n-ten Zyklus [kg]
 m_{Tn} : Masse vor Lagerung in Sulfatlösung im n-ten Zyklus und nach Trocknung [kg]

Aus den Längenänderungen Δl_n und der Sulfatlösungsaufnahme Δm_{Sn} wird eine sogenannte **Sulfatdehnung Δl** nach Norm SIA 262/1 wie folgt berechnet:

$$\Delta l = \left(\Delta l_4 - \Delta l_1 \right) \frac{(z + ZS)}{\sum_{n=1}^4 \Delta m_{Sn}} \quad [\%] \quad (4)$$

mit z : Zementgehalt für Zemente gemäss Norm SN EN 197-1 [kg/m³]
 ZS : Zusatzstoffe des Typs II gemäss Norm SN EN 206-1 [kg/m³]: Flugasche gemäss Norm SN EN 450, Silikastaub gemäss Norm SN EN 13263

Gemäss Norm SIA 262/1:2003, Tab. 6 gilt aktuell als Richtwert für Beton mit hohem Sulfatwiderstand ein Serienmittelwert von $\Delta l \leq 0.5 \%$.

2.3 Entwicklung und Anwendung der bestehenden Sulfatwiderstandsprüfung

Die bestehende Prüfung des Sulfatwiderstandes nach Norm SIA 262/1 beruht im Wesentlichen auf der Korrelation zur zwei Jahre dauernden Prüfung nach der Methode ATG = AlpTransit Gotthard AG [Projektl. Gotthard, 1996]. Für diese Methode ATG wurde eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt, welche die möglichen Schadensmechanismen am Bauwerk mit der Prüfung auf theoretischer Basis vergleicht [Paglia, 2000]. Die Studie kommt zum Schluss, dass nur in wenigen Punkten Übereinstimmungen zwischen der ATG-Prüfung und den Verhältnissen am Bauwerk bestehen. Die Prüfergebnisse sind deshalb nur schwer interpretierbar und lassen auch nur beschränkte allgemeingültige Aussagen über den Sulfatwiderstand am Bauwerk zu.

Bei der Erarbeitung der Kurzprüfung, welche später in leicht abgeänderter Form in die Norm SIA 262/1 aufgenommen wurde, erfolgten bereits umfangreiche Versuche mit unterschiedlichen Betonsorten [Studer, 2001a / Holzer, 2001]. Allerdings wurde dabei das Augenmerk im Wesentlichen auf die Korrelation zur ATG-Prüfung gelegt und die entstehenden Reaktionsprodukte nur in ausgewählten Fällen und am Ende des Versuches untersucht. Erklärtes Ziel war es dabei, eine Schnellprüfung für die Bauzeit zu finden, mit der die Auswirkungen einer Anpassung der Betonrezeptur auf den Sulfatwiderstand abgeschätzt werden können. Die Untersuchung stützte sich somit primär auf die beim Gotthard-Basistunnel verwendeten Betonsorten ab, ohne dabei Anspruch auf Allgemeingültigkeit zu erheben. Generell konnte eine Korrelation zwischen Schnellprüfung und Me-

thode AlpTransit hergestellt werden, wobei aber schon bei diesen Untersuchungen erhebliche „Ausreisser“ aufgetreten sind.

Im Rahmen der Entwicklung der Schnellprüfung wurden 20 Betonmischungen hergestellt [Studer, 2001a], wobei es sich beim grössten Teil um Spritzbetonmischungen mit sehr hohem Zementleimvolumen handelte. Diese Spritzbetone wiesen mehrheitlich deutlich grössere sulfatbedingte Dehnungen auf als die Normalbetone. Die sulfatbedingte Dehnung war bei den Normalbetonen klein, teilweise im Bereich von 0.00 ‰. Aus diesem Vergleich konnte vermutet werden, dass die Validierung der Messmethode hauptsächlich auf den Resultaten der Spritzbetone beruhte und eine Übereinstimmung mit der Methode ATG im Falle der Normalbetone eher zufällig gewesen sein dürfte.

Die aus diesen Untersuchungen resultierende Sulfatwiderstandsprüfung wurde im Jahre 2003 mit leichten Abänderungen in die damals neu publizierte Norm SIA 262/1 übernommen. Die Prüfung kommt in der Praxis vor allem dann zur Anwendung, wenn Betone der Expositionsklasse XA2 oder XA3 gemäss SN EN 206-1 zugeordnet werden. Dabei handelt es sich jedoch in vielen Fällen nicht um Spritzbetone, sondern um Normalbetone mit einem Zementgehalt von etwa $320 \div 340 \text{ kg/m}^3$.

Da mit der Einführung der Norm SIA 262/1 mehrere Baustoffprüflabore die Sulfatwiderstandsprüfung in ihr Leistungssortiment aufnahmen, wurde Ende 2006 innerhalb des Vereins akkreditierter Baustoffprüflabors (VAB) ein Ringversuch zum „Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang D“ [VAB, 2007] durchgeführt, an dem 11 Labors teilnahmen. Es wurden zwei Normalbetone mit identischem Bindemittel (CEM I 42.5 N) aber unterschiedlichem w/b-Wert (0.40 und 0.60) geprüft. Dabei hat sich gezeigt, dass die Resultate, trotz vorgängig festgelegter ergänzender Spezifikationen, stark streuten. Der Vergleichsvariationskoeffizient war mit 55 % beim Beton mit dem tiefen w/b-Wert deutlich grösser als beim Beton mit dem hohen w/b-Wert (32 %), obwohl die ausgewertete Sulfatdehnung praktisch identisch war (0.31 ‰ resp. 0.29 ‰). Zusätzlich wurde deutlich, dass Messunsicherheiten durch die verwendete Auswertungsformel („Extrapolationsfaktor“), insbesondere bei dichtem Beton mit tiefem w/b, erheblich verstärkt werden können. Der Unterschied im Sulfatwiderstand zweier Betone mit deutlich unterschiedlichem w/b-Wert war also ein Vielfaches kleiner als der Vergleichbarkeitsvariationskoeffizient. Daraus muss geschlossen werden, dass die zwei Betone durch die Prüfung nicht unterschieden werden können, respektive den gleichen Sulfatwiderstand aufweisen. Dies widerspricht aber den Erfahrungen von Langzeitversuchen [Monteiro, 2003].

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde deshalb im Jahre 2008 ein Forschungsprojekt gestartet (FGU 2007/002), welches das Verständnis der während der Sulfatwiderstandsprüfung ablaufenden Prozesse verbessern sollte.

2.4 Grundlagenprojekt FGU 2007/002

2.4.1 Vorgehen und Projektziele

Die umfangreichen Erfahrungen mit der seit 2003 in der SIA 262/1 verankerten Prüfung des Sulfatwiderstandes zeigten, dass ein Bedürfnis besteht, das Wissen über die massgebenden Grössen bei diesem Verfahren zu erweitern. Hauptziel des Grundlagenprojektes FGU 2007/002 [VSS1355, 2011] war es deshalb, die während der Prüfung ablaufenden Mechanismen im Detail zu verstehen, um so die Grundlage zur Beantwortung verschiedener im Zuge der Anwendung aufgetauchter Fragen zu liefern. Dies erfolgte an Normalbeton und selbstverdichtenden Betonen mittels systematischer Variation von Betonzusammensetzung und Prüfbedingungen. Mit zusätzlichen Untersuchungen an den geprüften Bohrkernen wurde zudem das Verständnis der chemischen und physikalischen Abläufe während der Prüfung verbessert. Das Projekt umfasste die folgenden Ziele:

- Vertiefung der Kenntnisse über die Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf die Prüfergebnisse mittels Variation des Prüfablaufs sowie Art und Menge der Betonkomponenten.
- Erfassen der chemischen und physikalischen Abläufe während der Prüfung.

- Grundlegendes Verständnis der angewendeten Auswertungsformel erarbeiten und die Übertragbarkeit der daraus gewonnenen Resultate auf die Praxis zu überprüfen.
- Falls erforderlich Prüfanweisung und Auswertung anpassen.
- Beurteilung der Prüfergebnisse (Grenzwert) verifizieren.

2.4.2 Resultate und Schlussfolgerungen aus Projekt FGU 2007/002

Die innerhalb des Projektes FGU 2007/002 durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Prüfung grundsätzlich Mechanismen ablaufen, welche mit den Erfahrungen aus der Auswertung verschiedener Schadenfälle in Tunneln übereinstimmen (z.B. gebildete Mineralphasen). Die angewendete Auswertungsformel führt hingegen insbesondere beim Normalbeton zu Resultaten, welche nicht mit den Erfahrungen aus Langzeitversuchen übereinstimmen. Dies hängt im Wesentlichen mit dem Extrapolationsfaktor in der Auswertungsformel zusammen, welcher den Einfluss der Kinetik der ablaufenden Prozesse (Stofftransport und chemische Reaktionen) gegenüber dem Einfluss des reinen Reaktionspotentials stark reduziert. Eine Verwendung der reinen gemessenen Dehnung führt hingegen zu Resultaten, die wesentlich besser mit Resultaten von Langzeitversuchen in Einklang stehen.

Zudem wurde festgestellt, dass der Eintrag des Sulfates in die Prüfkörper zu optimieren ist, da während den vier Tränkungs- und Trocknungszyklen insbesondere bei tieferen w/b-Werten nur in einer dünnen Aussenschicht eine Anreicherung an Sulfat stattfindet. Dadurch entstehen einerseits grosse Sulfatgradienten über den Querschnitt und andererseits ist nur ein relativ kleiner Anteil des Betons überhaupt von einer Sulfatinteraktion betroffen, was bei der materialtechnologischen Beurteilung eigentlich nicht wünschenswert ist. Dies hängt damit zusammen, dass die Prüfkörper durch die zweitägige Trocknung im Kernbereich praktisch nicht austrocknen.

Weiter hat sich gezeigt, dass beim Normalbeton die zur Verfügung stehende Reaktionszeit zu kurz ist, um eine sulfatbedingte Dehnung zu erzeugen, die sich wesentlich von einer Dehnungen unterscheidet, welche an in reinem Wasser geprüften Probekörpern gemessen wird. Für eine Verbesserung der Aussagekraft ist somit während der Prüfung die Reaktionszeit, respektive die Lagerungszeit in der Sulfatlösung zu erhöhen. Erste Versuche haben gezeigt, dass eine Zusatzlagerung nach Abschluss der vier Trocknungs- und Tränkungszyklen in Sulfatlösung einen vielversprechenden Ansatz darstellt.

Eine Änderung der Prüfspezifikation drängte sich somit auf. Da die Prüfung in der Schweiz von verschiedenen Labors (12 akkreditierte Labors für die Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm SIA 262/1) bereits eingeführt wurde, sollten die Prüfspezifikationen wenn möglich so geändert werden, dass die Prüfung mit den vorhandenen Einrichtungen durchgeführt werden kann.

Die obenstehend vorgeschlagenen Änderungen betreffend Auswertung, Optimierung der Tränkungs- und Trocknungszyklen und Zusatzlagerung erfüllen diese Anforderungen, ihre Auswirkungen auf die Prüfergebnisse müssen jedoch im Detail noch weiter abgeklärt werden. Weitere Änderungen der Prüfung werden auf Basis der innerhalb von FGU 2007/002 durchgeführten Untersuchungen wie folgt beurteilt:

- **Prüfkörperlänge:** Die Prüfkörperlänge sollte nicht verkürzt werden, da mit möglichst langen Proben der Einfluss der Messgeräte auf die Dehnung reduziert wird. Eine Erhöhung der Länge ist infolge der in der Schweiz üblichen Würfelabmessung (150 mm) und zu hoher Schlankheit (Bildung von „Bananen“) ebenfalls nicht anzustreben.
- **Prüfkörperdurchmesser:** Der Durchmesser sollte so klein wie möglich gehalten werden, da sonst eine Sättigung der Prüfkörper mit Sulfat bis in die Prüfkörpermitte sehr schwierig wird. Eine weitere Reduktion des bis jetzt verwendeten Durchmessers ist jedoch nicht zu empfehlen, da einerseits die Bohrkernentnahme mit abnehmendem Durchmesser problematisch wird und andererseits das Verhältnis Grösstkorn / Prüfkörperabmessung jetzt schon unüblich gross ist. Die Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Verwendung des Mittelwertes aus sechs Prüfkörpern pro Serie zu einer

relativ guten Wiederholbarkeit betreffend Dehnung führt. Es wird somit empfohlen, den in der Norm angegebene Durchmesser von 28 mm beizubehalten. Allerdings führt die nach Norm SIA 262/1 zulässige Variation des Durchmessers (28 ± 2 mm) zu einer Variation der Querschnittsfläche von 33 %! Da der Kernbereich während der Trocknung jedoch nicht entwässert wird, ist ein relativ grosser Einfluss dieser Querschnittsvariation auf das Sulfatprofil zu erwarten. Aus diesem Grund ist eine genauere Spezifikation des Bohrkerndurchmessers zu empfehlen.

- **Anzahl Prüfkörper pro Serie:** Sollte nicht abgeändert werden (siehe Punkt oben).
- **Längenmessung:** Für die Längenmessung müssen auf den Stirnseiten der Bohrkern Messbolzen aufgeklebt werden. Da diese Messbolzen je nach gewähltem Typ und Befestigungsart eine unterschiedlich grosse Fläche der Stirnseite abdecken, haben diese auch einen Einfluss auf den Sulfateintrag im Bereich der Stirnseiten. Genauere Angaben über die abgedeckte Stirnfläche sind deshalb notwendig.
- **Trocknungstemperatur:** Eine Erhöhung der Trocknungstemperatur könnte die Stabilität der während der Zementhydratation gebildeten Mineralphasen beeinflussen. Zudem können die stärkeren Dehnungsschwankungen den Verbund zwischen Beton und Messbolzen schwächen. Eine Reduktion der Temperatur führt zu einer noch geringeren Austrocknung der Bohrkern. Die Trocknungstemperatur von 50°C erscheint somit zweckmässig, insbesondere auch deshalb, weil diese Temperatur auch bei anderen Normprüfungen angewendet wird (z.B. Wasserleitfähigkeit).
- **Trocknungsdauer:** Eine Verlängerung der Trocknungsdauer ist in Betracht zu ziehen, da dadurch der Kern der Probekörper stärker entwässert würde und somit eine grössere Sulfateindringtiefe erreicht werden könnte.
- **Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen:** Die Versuche haben gezeigt, dass eine Erhöhung der Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen nur zu einer Erhöhung der Schwefelkonzentration im Randbereich führen, jedoch nicht zu einer erhöhten Eindringtiefe. Eine Änderung der Anzahl Zyklen drängt sich auf Basis der vorliegenden Prüfergebnisse somit nicht auf.
- **Prüfdauer:** Durch die Zusatzlagerung im Anschluss an die Trocknungs- und Tränkungszyklen würde sich die Prüfdauer um 4 bis 8 Wochen verlängern.
- **Zusammensetzung der Prüflösung:** Innerhalb des Projektes FGU 2007/002 wurde nur eine einzige Variation der Lösungskonzentration geprüft (Gemisch aus Natriumsulfat und Hydrogenkarbonat), welche zu keinen signifikanten Unterschieden geführt hat. Der Einfluss weiterer Lösungszusammensetzungen, insbesondere der Einfluss von Magnesiumsulfat, sollte jedoch noch abgeklärt werden.
- **Messgrössen:** Die Messgrössen „Dehnung“ und „Sulfatlösungsaufnahme“ erscheinen weiterhin zweckmässig zu sein. Obwohl die Sulfatlösungsaufnahme nicht mehr in die Auswertung einfließen würde, wäre sie doch eine wichtige Zusatzinformation für die ganzheitliche Beurteilung der Messresultate.

In einem Folgeprojekt sollten nun die vorgeschlagenen Änderungen systematisch untersucht werden, um daraus eine mögliche neue Prüfspezifikation ableiten zu können. Dies ist die Basis für das vorliegende Folgeprojekt FGU 2010/001.

3 Untersuchungen

3.1 Materialien

Für die Untersuchungen wurden diverse verschiedene Betonsorten hergestellt. Als Gesteinskörnung wurde gut gerundeter Kiessand aus dem Schweizer Mittelland mit einem Grösstkorn von 22 mm für den Normalbeton und 16 mm für den selbstverdichtenden Beton (SCC) verwendet. Die Gesteinskörnung bestand aus den folgenden Gesteinsarten (in mengenmässig abnehmender Reihenfolge): dichte Sandsteine, Dolomite, Kieselkalke, sandige Kalke, Kalke, Quarzite und Gneise. Insgesamt wurden die folgenden fünf Zemente eingesetzt:

Zementbezeichnung gemäss SN EN 197-1:	Abkürzung im Bericht:
• CEM I 42.5 N HS	CEM I HS
• CEM I 32.5 R	CEM I
• CEM III/B 32.5 N HS	CEM III/B
• CEM II/A-LL 42.5 N	CEM II/A-LL
• CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R	CEM II/B-M

Der Portlandzement CEM I HS sowie der Schlackenzement CEM III/B gelten aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als Zemente mit hohem Sulfatwiderstand. Beim CEM I handelt es sich um einen normalen Portlandzement. Der CEM II/A-LL enthält neben Portlandzementklinker als Zusatzstoff Kalksteinmehl, während beim CEM II/B-M zum Portlandzementklinker zusätzlich Kalksteinmehl und Flugasche beigemischt sind.

Die chemische Zusammensetzung der Zemente kann der Abb. 3.3 entnommen werden.

Abb. 3.3 Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente (GV = Glühverlust).

Zement	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	GV
[–]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
CEM I 42.5 R HS	59.3	19.2	3.4	5.4	4.0	0.7	0.3	3.2	3.8
CEM I 32.5 R	64.1	20.7	4.7	3.0	2.2	0.9	0.2	2.4	0.9
CEM III/B 32.5 N HS	46.4	30.1	10.0	1.3	5.2	0.7	0.4	4.1	1.1
CEM II/A-LL 42.5 N	61.0	17.8	4.3	2.7	1.7	1.0	0.2	2.8	7.8
CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R	52.3	23.6	6.9	3.8	1.7	1.2	0.3	2.5	6.9

Um die Verarbeitbarkeit des Betons zu verbessern, wurde bei Betonmischungen mit tiefem w/b-Wert ein Fliessmittel auf Polycarboxylat-Basis eingesetzt. Um Entmischungen zu verhindern, wurde vor allem beim SCC aber teilweise auch bei Normalbetonmischungen (vgl. Abb. 3.11) ein Stabilisator auf Basis einer Polymerlösung verwendet.

3.2 Sulfatwiderstand

3.2.1 Allgemeines

Die Prüfung wurde an Bohrkernen mit Durchmesser 28 mm durchgeführt, welche aus Würfeln mit 150 mm Kantenlänge senkrecht zu einer seitlichen Schallfläche entnommen wurden. Die Würfelflächen wurden vorgängig geschliffen, so dass die Nettolänge der Bohrkern ca. 148 mm betrug. Die Probenahme erfolgte jeweils 2-3 Tage vor dem Prüfbeginn (28 Tage). Anschliessend wurden die Bohrkern ausgemessen (Länge und Durchmesser) und auf beiden Stirnseiten der Bohrkern Messbolzen für die Längenmessung aufgeklebt (Abb. 3.4). Dabei wurde darauf geachtet, dass der durch Bolzen und Kleber abgedeckte Teil der Stirnfläche immer etwa gleich gross war.



Abb. 3.4 Bohrkern mit Durchmesser 28 mm, Blick auf die Stirnfläche mit aufgeklebtem Messbolzen für die Längenmessung.

Eine Prüferie bestand aus jeweils 6 Bohrkernen, welche aus einem einzigen Würfel entnommen wurden. Sämtliche in diesem Bericht angegebenen Resultate sind Mittelwerte aus einer Prüferie. Jede Variation wurde üblicherweise nur einmal gemessen (keine Wiederholbarkeiten von gleichen Prüferien). Einzig in der Phase 2 sowie im Rahmen der Vergleichsversuche wurden bei ausgewählten Prüferien Doppelbestimmungen durchgeführt. Bei allen Serien, bei denen Prüfkörper vor dem Ende der vorgesehenen Prüfdauer für weitere Untersuchungen entnommen wurden (z. B. für die Bestimmung des Schwefelprofils oder der entstandenen Mineralphasen) wurde eine entsprechend grössere Anzahl Bohrkern hergestellt, so dass alle Resultate bis zum Messende auf mindestens 6 einzelnen Prüfkörpern beruhen.

3.2.2 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes

Grundlage für die Optimierung des Prüfablaufes war der bestehende Prüfbescrieb der Norm SIA 262/1:2003, Anhang D, welcher im Kap. 2.2 enthalten ist, sowie die Erkenntnisse des Grundlagenprojektes FGU 2007/002 (Kap. 2.4.2). Darauf basierend wurden in der Phase 1 folgende Variationen im Prüfablauf untersucht (detaillierte Prüfmatrix im Kap. 3.4.1):

- Zusatzlagerung in der gleichen Sulfatlösung nach Abschluss der Trocknungs- und Tränkungszyklen
- Unterschiedliche Trocknungs- und Tränkungsdauer während der Trocknungs- und Tränkungszyklen
- Unterschiedliche Trocknungstemperatur
- Erhöhte Sulfatkonzentration in der Lösung
- Verwendung verschiedener Sulfatlösungszusammensetzungen

Eine Auswertung nach der Formel (4) gemäss Kap. 2.2 wurde nicht durchgeführt. Es wurde lediglich die Längenänderung sowie die Sulfatlösungsaufnahme nach jedem Tränkungs- und Trocknungszyklus sowie alle sieben Tage während der Zusatzlagerung aufgenommen.

Ziel der Zusatzlagerung war es, die zur Verfügung stehende Reaktionszeit zwischen dem Sulfat und dem Zementstein zu erhöhen, um so die Dehnungsunterschiede zwischen verschiedenen Betonen zu vergrössern. Mit der längeren Trocknungszeit soll der Sulfatlösungseintrag vergrössert sowie der Gradient des Sulfatprofils im Querschnitt verkleinert werden. Mit der Verwendung der verschiedenen Prüflösungen soll abgeklärt werden, ob sich die Natriumsulfatlösung für die Normprüfung tatsächlich eignet.

3.2.3 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1

Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen in der Phase 1 (vgl. Kap. 4.2.6 und 4.2.7) wurden in der Phase 2 sämtliche Sulfatwiderstandsprüfungen nach folgendem Ablauf durchgeführt:

- Prüflösung: 5%ige Natriumsulfatlösung (wie bestehende Normprüfung)
- Trocknungstemperatur 50°C (wie bestehende Normprüfung)

- Vier Trocknungs- und Tränkungszyklen (*wie bestehende Normprüfung*)
- Pro Zyklus 5 Tage Trocknung mit anschliessender Lagerung in Natriumsulfatlösung während 2 Tagen (*Änderung gegenüber bestehender Normprüfung*)
- Zusatzlagerung von 8 Wochen nach Abschluss der Trocknungs- und Tränkungszyklen in der gleichen Sulfatlösung ohne weitere Trocknung (*Änderung gegenüber bestehender Normprüfung*).
- Bestimmung der Sulfatlösungsaufnahme während den Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss Formel (3) in Kap. 2.2 (*wie bestehende Normprüfung*) sowie während der Zusatzlagerung nach jeweils 1, 2, 4, 6 und 8 Wochen (*Änderung gegenüber bestehender Normprüfung*). Bemerkung: Während der Zusatzlagerung ist die Sulfatlösungsaufnahme klein, da praktisch keine kapillare Lösungsaufnahme stattfindet.
- Bestimmung der Längenänderung bezogen auf die Ursprungslänge während den Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss Formel (2) in Kap. 2.2 (*wie bestehende Normprüfung*) sowie während der Zusatzlagerung nach jeweils 1, 2, 4, 6 und 8 Wochen (*Änderung gegenüber bestehender Normprüfung*).
- Keine Auswertung nach der Formel (4) gemäss Kap. 2.2 (*Änderung gegenüber bestehender Normprüfung*).

Eine Prüfung dauert somit von der Betonherstellung bis zum Prüfende 16 Wochen (Prüfbeginn nach 4 Wochen, 4 Wochen Trocknungs- und Tränkungszyklen, 8 Wochen Zusatzlagerung).

3.2.4 Phase 3: Vergleichsversuche

An ausgewählten Mischungen wurden Vergleichsversuche mit vier verschiedenen Labors durchgeführt, welche bereits für die bestehende Sulfatwiderstandprüfung akkreditiert sind. Folgende Labors haben am Vergleichsversuch teilgenommen:

- Empa, Dübendorf
- Holcim, Eclépens
- TFB, Wildegg
- VSH, Flums

Bemerkung: Die Resultate dieses Vergleichsversuches sind in anonymer Form in diesem Bericht wiedergegeben. Die Labors sind obenstehend alphabetisch aufgelistet und es können daraus keine Rückschlüsse auf die Labornummer gezogen werden.

Gegenstand der Vergleichsversuche war der gleiche Prüfablauf, welcher auch in der Validierungsphase (Kap. 3.2.3) zur Anwendung kam. Jedem teilnehmenden Labor wurde vorgängig ein detaillierter Beschrieb des Prüfablaufes zugestellt. Zusätzlich wurden folgende ergänzende Festlegungen gemacht:

- Entnahme der Bohrkern aus den Würfeln im Alter von 26 Tagen
- Bohrkernentnahme senkrecht zu einer seitlichen Schalfläche der Würfel
- Bohrkernlänge 148 mm
- Bohrkerndurchmesser 28 mm $\pm$ 1 mm
- Durch Bolzen inkl. Kleber abgedeckter Anteil der Bohrkernstirnflächen muss einen Durchmesser von < 15 mm aufweisen

Die Prüfkörper (1 – 2 Würfel mit 150 mm Kantenlänge pro Betonmischung) für die Vergleichsversuche wurden an der Empa hergestellt und im Alter von 2-3 Wochen an die teilnehmenden Labors geliefert. Prüfbeginn war jeweils das Alter von 28 Tagen.

3.3 Weitere Prüfungen

3.3.1 Würfeldruckfestigkeit

Von jeder Betonsorte wurde die Druckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge als Mittelwert aus 4 Prüfkörpern nach Norm SN EN 12390-3 im Alter von 28 Tagen bestimmt.

3.3.2 Wasserleitfähigkeit

Das Saugverhalten der verschiedenen Betonsorten wurde mittels Prüfung der Wasserleitfähigkeit q_w nach der Norm SIA 262/1, Anhang A charakterisiert. Dabei wird der Wassergehalt von aus Würfeln entnommenen Bohrkernen mit $\varnothing = L = 50$ mm in verschiedenen Trocknungszuständen ermittelt. Aus dem Wassergehalt nach zweitägiger Trocknung bei 50°C (U_B), dem Gesamtwassergehalt nach Wasserlagerung (U_E) und der Steighöhe des Wassers (h_{24}) respektive der Wasseraufnahme der Bohrkern nach 24 Stunden (M_{24}) wird unter Anwendung folgender Formel die Wasserleitfähigkeit q_w berechnet:

$$q_w = \frac{M_{24}}{t_{24}} \frac{U_E}{2(U_E - U_B)} \frac{h_{24}}{400} \quad [\text{g/m}^2\text{h}] \quad (5)$$

mit M_{24} : Wasseraufnahme nach Zeit $t_{24} = 24$ Stunden [g/m^2]
 U_E : Gehalt an Hydratationsporen [Vol-%]
 U_B : Wassergehalt zu Beginn des Aufsaugversuches [Vol-%]
 h_{24} : Steighöhe der Wasserfront nach 24 Stunden [m]

Der Wert $U_E - U_B$ in Gleichung (5) entspricht näherungsweise dem durch kapillares Saugen füllbaren Porenraum. Genauere Angaben zur Bestimmung der einzelnen Parameter können der Norm SIA 262/1 entnommen werden.

3.3.3 Sauerstoffdiffusionskoeffizient

Als Mass für die Permeabilität der Betone wurde der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_O an jeweils drei aus Würfeln mit 150 mm Kantenlänge entnommenen Bohrkernen mit Durchmesser 100 mm und Höhe 50 mm bestimmt. Im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper 7 Tage bei 20°C und 35% relativer Feuchtigkeit (r.F.) 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 [Buenfeld, 1998] und [Lawrence, 1984]. Für diese Prüfung werden die Prüfkörper in eine Prü fzelle eingespannt. Durch Belastung der oberen Abdeckplatte wird diese auf einen Silikonring gedrückt (Abb. 3.5), welcher sich seitlich ausdehnt und somit die Probe in der Zelle abdichtet. Die Probe selber wird dabei nicht vertikal belastet.



Abb. 3.5 Probe in Prü fzelle mit Silikondichtring (links), Prü fanordnung für die Bestimmung des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten (rechts).

Anschliessend wird auf beiden Seiten des Prüfkörpers ein Gasstrom aufgebracht, wobei es sich auf der Oberseite um Sauerstoff und auf der Unterseite um Stickstoff handelt. Der Gasdruck ist auf beiden Prüfkörperseiten identisch (ca. 1.2 bar Absolutdruck, kein Druckgradient). Der Stickstoff wird nach dem Durchströmen der Prüfzelle in ein Sauerstoffanalyse-Gerät (Zirkonium Keramik Sensor) eingeleitet und der Gehalt an Sauerstoff im Stickstoff nach ca. einer Stunde Wartezeit bestimmt. Aus der Sauerstoffkonzentration im Stickstoff, dem Grundgehalt an Sauerstoff im Stickstoff, den Gasdurchflussraten und der Prüfkörpergeometrie kann anschliessend der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_0 berechnet werden. D_0 ist umso grösser, je grösser die Diffusivität der Probe ist.

Der Sauerstoffdiffusionskoeffizient ist sowohl von der Porenstruktur als auch vom Wassergehalt in den Poren abhängig. Je mehr Poren noch mit Wasser gefüllt sind, umso geringer ist die Gasdurchlässigkeit.

Im vorliegenden Fall wurden alle Proben nach einem identischen zeitlichen Ablauf getrocknet. Die Proben wurden nach jedem Trocknungsschritt gewogen. Nach der Prüfung wurden die Proben 7 Tage bei 110°C ausgetrocknet, um den Gesamtwassergehalt und den Wassergehalt zum Prüfzeitpunkt bestimmen zu können. Zu beachten ist, dass durch den gewählten zeitlichen Ablauf insbesondere bei den dichteren Proben bei den einzelnen Trocknungsschritten die Ausgleichsfeuchte jeweils nicht erreicht wurde.

3.3.4 Dynamischer E-Modul

Für die Phase 1 (Optimierung des Prüfablaufes) wurden zusätzlich zu den für die Sulfatwiderstandsprüfung notwendigen sechs Bohrkerne vier weitere Bohrkerne mit identischen Abmessungen (28 / 148 mm) entnommen. Diese wurden genau gleich gelagert wie die ordentlichen Bohrkerne für die Sulfatwiderstandsprüfung (d.h. vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gefolgt von der Zusatzlagerung). Der einzige Unterschied bestand darin, dass auf diese Bohrkerne keine Bolzen für die Längenmessung aufgeklebt wurden. An diesen Bohrkerne wurde der dynamische E-Modul vor Prüfbeginn an allen vier Bohrkerne bestimmt. Anschliessend wurde er erneut an den gleichen Bohrkerne nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen, nach vier Wochen Zusatzlagerung sowie nach acht Wochen Zusatzlagerung gemessen, wobei die Anzahl Prüfkörper pro Messzeitpunkt jeweils um 1 abnahm (Druckfestigkeitsbestimmung, vgl. Kap. 3.3.5).

Für die Phase 2 (Validierung) wurde der dynamische E-Modul vor Beginn der Sulfatwiderstandsprüfung, nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen sowie nach Abschluss der Zusatzlagerung in jeweils trockenem Zustand (Ofentrocknung bei 50°C) bestimmt. Es wurden dazu die gleichen Bohrkerne verwendet, an welchen anschliessend mikroskopische Untersuchungen durchgeführt wurden (vgl. Kap. 3.3.6 und 3.3.7). Aus diesem Grund standen pro Prüfzeitpunkt nur 1 - 2 Bohrkerne zur Verfügung, wobei für die verschiedenen Messzeitpunkte jeweils unterschiedliche Bohrkerne verwendet werden mussten. Durch die kleine Anzahl Prüfkörper wird die Material- und Prüfstreuung praktisch nicht gedämpft, was bei der Beurteilung der Resultate mit berücksichtigt werden muss.

Der dynamische E-Modul wurde mit einem Elastometer der Firma LABEK gemessen. Bei der Messung wird mit einem an den Bohrkerne angebrachten Sender respektive Empfänger eine Resonanzmessung über verschiedene Frequenzen vorgenommen und so die Eigenfrequenz bestimmt. Anschliessend kann aus Eigenfrequenz, Prüfkörperabmessung und Rohdichte der dynamische E-Modul berechnet werden. Für die Querkontraktionszahl wurde jeweils ein Wert $\nu = 0.20$ eingesetzt. Eine physikalische Bestimmung der Zahl wurde nicht durchgeführt, weil im Rahmen des Projektes nur die relative Veränderung des dynamischen E-Moduls zu verschiedenen Prüfzeitpunkten von Interesse war und nicht deren Absolutwerte.

3.3.5 Änderung Druckfestigkeit während Sulfatprüfung

In der Phase 1 wurden von den Bohrkerne, welche für die Bestimmung des

dynamischen E-Moduls verwendet wurden, nach jedem Prüfzeitpunkt (vor Prüfbeginn, nach vier Trocknungs- und Tränkungszyklen, nach vier Wochen Zusatzlagerung sowie am Prüfungsende) jeweils einer dieser Bohrkern weggenommen. Aus dem jeweiligen Bohrkern wurden vier Prüfkörper mit $d = h = 28$ mm geschnitten (Abb. 3.6), an welchen anschliessend die Druckfestigkeit nach SN EN 12504-1 bestimmt wurde. Dadurch nahm die Anzahl Prüfkörper für die E-Modulmessungen zu jedem Zeitpunkt um 1 ab.

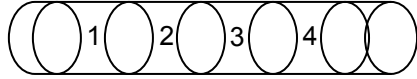


Abb. 3.6 Schematische Darstellung der Prüfkörperentnahme ($4 \times 28 \times 28$ mm) aus den Bohrkernen mit Durchmesser 28 mm.

3.3.6 Sulfateindringfront

Das Fortschreiten der Sulfateindringfront während der Sulfatwiderstandsprüfung wurde mittels Elektronenmikroskopie verfolgt. Dazu wurden ausgewählte Prüfkörper (jeweils 1 Bohrkern) entweder nach den Trocknungs- und Tränkungszyklen, nach vier Wochen Zusatzlagerung oder am Prüfende aus der Prüferie entnommen und daraus eine Bohrkernscheibe geschnitten. Diese wurde anschliessend drei Tage bei 50°C getrocknet, mit Epoxidharz imprägniert (Abb. 3.7), poliert und mit Kohlenstoff bedampft.

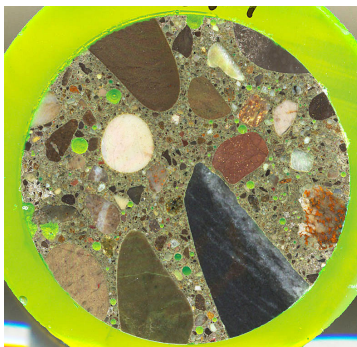


Abb. 3.7 Schnittfläche einer mit Epoxidharz imprägnierten Bohrkernscheibe ($d = 28$ mm) für die Untersuchungen im Elektronenmikroskop.

An diesen Probekörpern konnten mit dem Elektronenmikroskop (Philips ESEM-FEG XL30) in verschiedenen Abständen von der Oberfläche (direkt sulfatexponierte Fläche) die massenmässigen Anteile der vorhandenen Elemente mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) bestimmt werden. Dazu wurden in einem bestimmten Abstand von der Oberfläche zwei bis vier Linienscans vom Zementstein vorgenommen, so dass insgesamt zwischen 20 und 80 Analysepunkte pro Oberflächenabstand vorlagen, aus denen dann der Mittelwert gebildet wurde. Der prozentuale Anteil (Masse-%) der Schwefelatome in Funktion des Abstandes von der Oberfläche bis in die Prüfkörpermitte (14 mm) wurde hierbei als Mass für die Beurteilung der Sulfateindringfront verwendet.

Der Schwefelgehalt wurde üblicherweise in den Tiefen 1 mm, 3.5 mm, 7 mm, 10.5 mm, 14 mm bestimmt. Bei ausgewählten Proben wurden zusätzlich die Tiefen 0.2 mm und 2.2 mm analysiert.

3.3.7 Mineralphasen

An den gleichen Proben, an denen schon die Sulfateindringfront bestimmt wurde (Kap. 3.3.6), wurde zusätzlich auch die Mineralphasenzusammensetzung in Funktion des Abstandes von der Oberfläche mittels Elektronenmikroskopie (EDX) abgeschätzt. Dazu wurden die gleichen Datenpunkte verwendet, welche schon gemäss Beschrieb in Kap. 3.3.6 analysiert wurden. Von jedem Analysepunkt konnte die prozentuale Elementzusammensetzung (Mol-%) in einem Diagramm dargestellt werden. Die Achsen der Dia-

gramme wurden dabei so gewählt, dass die Mineralphasen bestimmten Punkten im Diagramm entsprechen.

Dies soll am Beispiel des Sulfatminerals Ettringit exemplarisch aufgezeigt werden:

Das Mineral Ettringit hat die chemische Zusammensetzung $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$. Das Verhältnis der Atome S/Ca beträgt dabei $3/6 = 0.5$, jenes der Atome Al/Ca = $2/6 = 0.33$. Werden diese Verhältnisse in einem Diagramm mit den Achsen S/Ca und Al/Ca aufgetragen, entsteht ein Punkt, mit dem sich Ettringit über sein spezifisches S/Ca- und Al/Ca-Verhältnis identifizieren lässt. Das Gleiche kann auch mit anderen Mineralien gemacht werden, die typischerweise im Zementstein mit Sulfatinteraktion vorkommen (Abb. 3.8). Es kann also von jedem Analysepunkt das Verhältnis S/Ca und Al/Ca gebildet und der Punkt im Diagramm eingezeichnet werden.

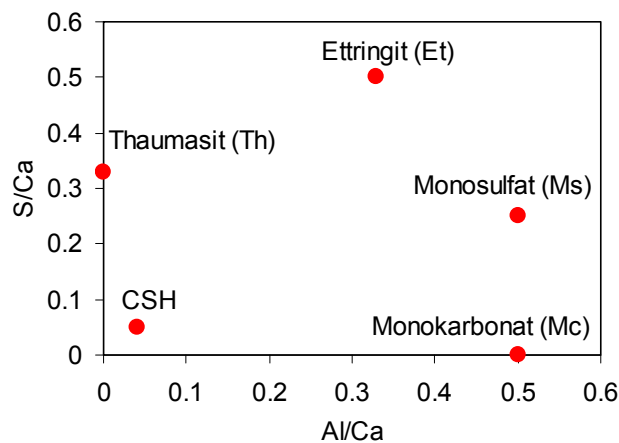


Abb. 3.8 Diagramm mit Achsen S/Ca und Al/Ca und Lage der typischen Mineralien, welche in einem Zementstein mit Sulfatinteraktion vorkommen (Gips fehlt: S/Ca = 1,0, Al/Ca = 0).

Aus der Position der entstehenden Wertepaare im Diagramm können die vorherrschenden Mineralphasen innerhalb der Prüffläche abgeschätzt werden. Zementstein mit Portlandzement ohne Sulfatinteraktion sollte dabei im Bereich des Punktes CSH liegen, dem hauptsächlich Reaktionsprodukt bei der Zementhydratation. Da aus einem Analysepunkt aufgrund seiner Ausdehnung („Anregungsbirne“ mit einem Durchmesser von 1-3 μm) immer eine Mischinformation aus verschiedenen Mineralen entsteht (vgl. Abb. 3.9), kann der Analysepunkt in den meisten Fällen nicht einer reinen Phase zugeordnet werden. Eine Verschiebung in Richtung einer bestimmten Mineralphase deutet jedoch darauf hin, dass im Analysepunkt neben CSH auch diese Mineralphase vorhanden war. Aufgrund der besseren Sichtbarkeit ist im Diagramm in Abb. 3.8 der Punkt für Gips nicht enthalten, welcher sich bei den Verhältnissen S/Ca = 1,0 und Al/Ca = 0 befinden würde.

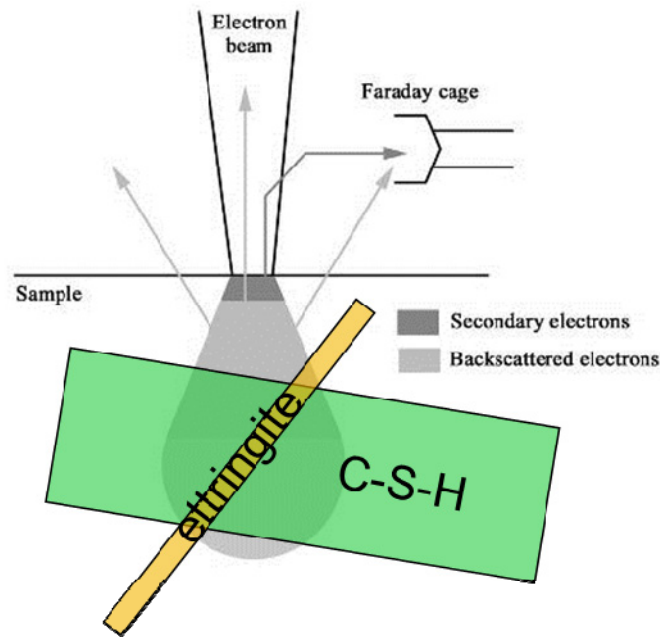


Abb. 3.9 Prinzip der Mischanalyse bei der Bestimmung der Mineralphasen mittels EDX.

3.4 Versuchsmatrix

3.4.1 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes

Für die Optimierung des Prüfablaufes wurde an einer reduzierten Anzahl Betonmischungen die Auswirkung unterschiedlicher Variationen im Prüfablauf auf die Resultate des Sulfatwiderstandes (insbesondere Längenänderung) untersucht. Folgende Betonmischungen und Variationen im Prüfablauf der Sulfatwiderstandsprüfung kamen zum Einsatz:

Betonmischungen

Um die Auswirkungen von Variationen im Prüfablauf untersuchen zu können, wurden vier Mischungen von Normalbeton gewählt, von denen deutliche Unterschiede im Sulfatwiderstand (Dehnung) erwartet wurden. Dazu wurden sowohl die Zementart (sulfatbeständig und nicht sulfatbeständig) als auch der w/b-Wert (tief und hoch) variiert. Das Bindemittelvolumen (Volumen von Bindemittel + Wasser) wurde bei allen Betonmischungen konstant gehalten. Das Grösstkorn der Gesteinskörnung betrug 22 mm.

Abb. 3.10 Betonmischungen für die Optimierung des Prüfablaufes (s/k: Sand/Kies-Verhältnis, FM: Fliessmittel)

Bez.	Gesteinsk.	s/k	Zement		Wasser	w/b	Zusatzmittel	
			Art	Menge			Art	Menge
[-]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]
1-I-45	1'929	0.54	CEM I	335	150	0.45	FM	1.3
1-I-60	1'930	0.54	CEM I	280	168	0.60	-	-
1-III-45	1'928	0.54	CEM III/B	325	146	0.45	FM	1.3
1-III-60	1'924	0.54	CEM III/B	275	165	0.60	-	-

Prüfablauf

An beiden Betonen mit normalem Portlandzement als Bindemittel (1-I-45 und 1-I-60) wurden die folgenden sieben Serien mit Variationen im Prüfablauf des Sulfatwiderstandes durchgeführt:

- **Serie 2/5:** Durchführen der Prüfung gemäss bestehendem Normbeschrieb (Kap. 2.2). Nach Ende der Normprüfung, das heisst im Anschluss an die letzte Längemessung im vierten Zyklus, die Bohrkern im nassen Zustand sofort wieder in die gleiche Sulfatlösung zurücklegen. Anschliessend während 8 Wochen alle 7 Tage die Länge und Masse erneut messen (ohne Trocknung im Ofen).
- **Serie 5/2:** Umkehrung der Tränkungs- und Trocknungszyklen, das heisst anstelle von 2 Tagen Trocknung und anschliessender Tränkung in Sulfatlösung während 5 Tagen neu 5 Tage Trocknung und 2 Tage Tränkung in Sulfatlösung. Ansonsten genau gleicher Prüfablauf wie beschrieben unter Serie 2/5.
- **Serie 12/2:** Vier Tränkungs- und Trocknungszyklen mit 12 Tagen Trocknung und 2 Tagen Tränkung und anschliessender Zusatzlagerung in der Sulfatlösung für vier Wochen. Ansonsten genau gleicher Prüfablauf wie beschrieben unter Serie 2/5.
- **Serie 12/2_40:** Genau gleicher Prüfablauf wie Serie 12/2, jedoch Trocknung der Bohrkern bei jeweils 40°C anstelle von 50°C.
- **Serie 5/2_10%:** Genau gleicher Prüfablauf wie Serie 5/2, jedoch mit Lagerung in Natriumsulfatlösung mit doppelter Konzentration (10% anstelle von 5%).
- **Serie 5/2_Mg:** Genau gleicher Prüfablauf wie Serie 5/2, jedoch mit Lagerung in Magnesiumsulfatlösung anstelle von Natriumsulfat. Die Lösung wurde dabei so zusammengesetzt, dass die SO_4 -Konzentration gleich gross war wie bei der Natriumsulfatlösung.
- **Serie 5/2_Mg+Na:** Genau gleicher Prüfablauf wie Serie 5/2, jedoch mit Lagerung in einem Lösungsgemisch von Magnesiumsulfat und Natriumsulfat anstelle von reinem Natriumsulfat. Die Lösung wurde dabei so zusammengesetzt, dass sie aus 1 Teil Magnesiumsulfat und 9 Teilen Natriumsulfat bestand und die totale SO_4 -Konzentration gleich gross war wie bei der 5%igen reinen Natriumsulfatlösung.

An den beiden Betonen mit dem sulfatbeständigen Schlackenzement als Bindemittel (1-III-45 und 1-III-60) wurden nur die folgenden drei der oben aufgelisteten Prüfserien durchgeführt:

- Serie 5/2
- Serie 5/2_Mg
- Serie 5/2_Mg+Na

Damit sollte abgeklärt werden, ob sich der Schlackenzement CEM III/B in einer Prüflösung mit Magnesiumsulfat grundsätzlich anders verhält als in Natriumsulfat, respektive ob Natriumsulfat als Prüflösung für alle Zementsorten geeignet ist.

3.4.2 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1

Mit dem in Phase 1 ermittelten optimierten Prüfablauf (vgl. Kap. 3.2.3) wurde in der 2. Phase eine erweiterte Matrix von verschiedenen Betonsorten geprüft. Folgende Betonmischungen und Variationen im Prüfablauf der Sulfatwiderstandsprüfung kamen zum Einsatz:

Betonmischungen

- **Zementart:** Es wurden die fünf in Kap. 3.1 beschriebenen Zementsorten verwendet
- **w/b-Wert:** Für jede Zementart wurden je drei konventionelle Betone mit einem Verhältnis Wasser / Bindemittel (w/b-Wert) von 0.45, 0.50 und 0.60 hergestellt. Die tiefere beiden w/b-Werte entsprechen dabei den Grenzen für den maximalen w/z-Wert gemäss Tabelle NA.3 der Norm SN EN 206-1 für den Grossteil der im Tiefbau verwendeten Expositionsklassen. Das Bindemittelvolumen wurde für alle Mischungen

- konstant bei ca. 260 l/m³ gehalten, was einem üblichen Wert für Normalbeton entspricht.
- Bindemittelleimvolumen: Von den Zementsorten CEM I und CEM III/B wurde zudem je eine Mischung mit w/b = 0.45 mit einem erhöhten Leimvolumen (Volumen von Bindemittel + Wasser) von 310 l/m³ hergestellt. Sie befinden sich somit an der oberen Grenze der für Schweizer Verhältnisse üblichen Bindemittelleimvolumina von Normalbeton.
 - SCC: Für jede Zementart wurde eine SCC-Mischungen mit einem w/b = 0.45 und einem Bindemittelleimvolumen von 350 l/m³ hergestellt. Mit diesen Mischungen soll der Einfluss eines noch höheren Bindemittelleimvolumens abgeklärt werden.

Insgesamt wurden somit 22 verschiedene Betonmischungen hergestellt, welche in der Abb. 3.11 zusammengefasst sind. Die Bezeichnung der Mischungen beinhaltet eine Abkürzung für den Zementtyp, eine Zahl für den w/b-Wert sowie spezielle Bezeichnungen für hohes Leimvolumen (h) und selbstverdichtenden Beton (S). Das Grösstkorn der Gesteinskörnung betrug 16 mm bei den SCC-Mischungen und 22 mm bei den übrigen Betonen.

Abb. 3.11 Betonmischungen (s/k: Sand/Kies-Verhältnis, FM: Fließmittel, VMA: Stabilisator)

Bez.	Gesteinsk.	s/k	Zement		Wasser	w/b	Zusatzmittel	
			Art	Menge			Art	Menge
[-]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]
I-HS-45	1'927	0.54	CEM I HS	335	150	0.45	FM	1.3
I-HS-50	1'927	0.54	CEM I HS	315	157	0.50	FM	0.6
I-HS-60	1'929	0.54	CEM I HS	280	168	0.60	-	-
I-HS-45-S	1'678	1.00	CEM I HS	450	200	0.45	FM+VMA	2.3 + 1.1
I-45	1'929	0.54	CEM I	335	150	0.45	FM	1.3
I-50	1'929	0.54	CEM I	315	157	0.50	FM	0.3
I-60	1'931	0.54	CEM I	280	168	0.60	-	-
I-45-h	1'799	0.54	CEM I	400	180	0.45	-	-
I-45-S	1'680	1.00	CEM I	450	200	0.45	FM+VMA	1.8 + 1.1
III-45	1'928	0.54	CEM III/B	325	146	0.45	FM	1.3
III-50	1'930	0.54	CEM III/B	305	152	0.50	FM	0.6
III-60	1'925	0.54	CEM III/B	275	165	0.60	-	-
III-45-h	1'794	0.54	CEM III/B	390	174	0.45	-	-
III-45-S	1'672	1.00	CEM III/B	440	195	0.45	FM+VMA	1.8 + 1.1
II-LV-45	1'924	0.54	CEM II/B-M	325	146	0.45	FM	1.0
II-LV-50	1'927	0.54	CEM II/B-M	305	152	0.50	FM	0.3
II-LV-60	1'922	0.54	CEM II/B-M	275	165	0.60	-	-
II-LV-45-S	1'677	1.00	CEM II/B-M	435	193	0.45	FM+VMA	2.2 + 1.1
II-L-45	1'930	0.54	CEM II/A-LL	330	148	0.45	FM	0.7
II-L-50	1'931	0.54	CEM II/A-LL	310	155	0.50	FM	0.3
II-L-60	1'923	0.54	CEM II/A-LL	280	168	0.60	-	-
II-L-45-S	1'679	1.00	CEM II/A-LL	445	197	0.45	FM+VMA	1.8 + 1.1

Prüfablauf

Bei allen fünf Mischungen mit normalem Portlandzement CEM I sowie bei den fünf Mischungen mit Schlackenzement CEM III/B wurde zusätzlich je eine Serie Sulfatwiderstandsprüfungen durchgeführt, bei welcher dejonisiertes Wasser anstelle von Natriumsulfatlösung als Prüfmedium verwendet wurde. Damit sollte abgeklärt werden, ob sich mit der neuen Prüfung in der Sulfatlösung Dehnungen erzeugen lassen, die sich wesentlich von denjenigen unterscheiden, welche in reinem Wasser gemessen werden.

Bei den beiden Mischungen I-60 und I-45-S mit normalem Portlandzement als Bindemittel sowie bei der Mischung III-45 mit Schlackenzement als Bindemittel wurde die Sulfatwiderstandsprüfung zweimal an der gleichen Mischung durchgeführt (Doppelbestimmung). Dazu wurde die doppelte Anzahl Bohrkerne aus zwei Betonwürfeln entnommen und zufällig in zwei Serien a je 6 Prüfkörper aufgeteilt. Diese Doppelbestimmung soll einen Hinweis auf die Wiederholstandardabweichung der Prüfung innerhalb eines Labors geben. Im Rahmen der Vergleichsversuche mit verschiedenen Labors wurde an den gleichen Mischungen auch in den anderen Labors eine Doppelbestimmung durchgeführt (vgl. Kap. 3.4.3).

3.4.3 Phase 3: Vergleichsversuche

Für die Vergleichsversuche zwischen den vier Labors wurden ausgewählte Betonmischungen aus der Tabelle Abb. 3.11 verwendet, wobei bei drei Mischungen in allen Labors eine Doppelbestimmung (zwei Messserien an der gleichen Betonmischung) erfolgte:

- I-HS-45
- I-45
- I-50
- I-60 (mit Doppelbestimmung)
- I-45-S (mit Doppelbestimmung)
- III-45 (mit Doppelbestimmung)
- III-45-S

4 Resultate und Diskussion

4.1 Allgemeine Betoneigenschaften

Eine Zusammenfassung der Messresultate der Frischbetonkontrolle, der Druckfestigkeit, des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten und der Wasserleitfähigkeit ist im Anhang in Abb. I.1 zu finden.

Die Druckfestigkeit der hergestellten Betone nimmt mit zunehmendem w/b-Wert ab (Abb. 4.12). Die Betone mit CEM II/B-M als Bindemittel führen bei gleichem w/b-Wert zu einer generell kleineren Festigkeit. Bei den übrigen Bindemitteln sind bei gleichem w/b-Wert ebenfalls Unterschiede vorhanden, wobei diese Abfolge nicht konstant ist, sondern sich mit änderndem w/b-Wert ebenfalls verändert. Die SCC-Betone weisen eine ähnliche oder leicht höhere Festigkeit auf wie die Normalbetone mit gleichem Bindemittel und w/b-Wert, während die Betone mit erhöhtem Leimvolumen zu einer deutlich tieferen Festigkeit führen.

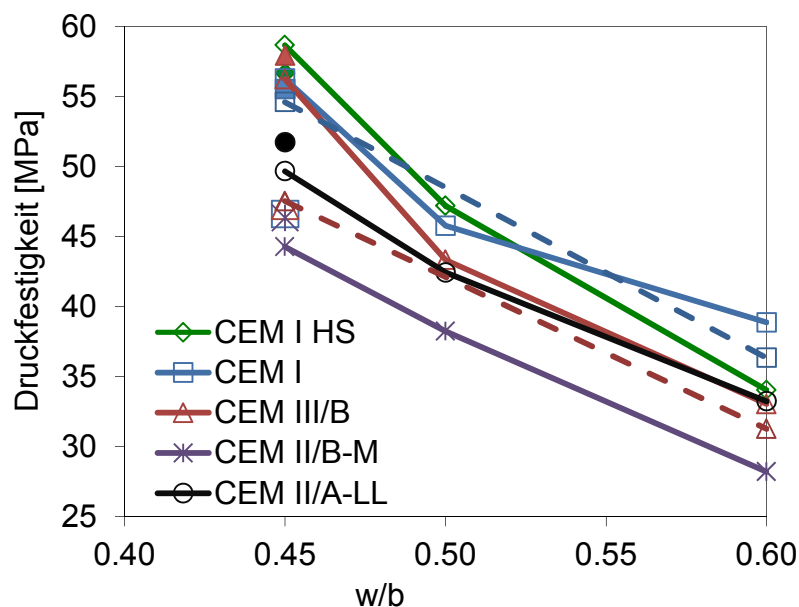


Abb. 4.12 Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit verschiedener w/b-Werte und verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen, gestrichelte Linien: Betone Phase 1 (CEM I und CEM III/B).

Sowohl die Wasserleitfähigkeit q_w als auch der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_o nehmen mit zunehmender Druckfestigkeit ab (Abb. 4.13). Die verschiedenen Bindemitteltypen führen insbesondere bei tieferen Festigkeiten zu deutlichen Unterschieden in den Permeabilitäten, wobei die Unterschiede bei D_o ausgeprägter sind als bei q_w . Der Beton mit CEM III/B als Bindemittel zeigt generell die geringste Permeabilität bei einer gegebenen Druckfestigkeit, während der Beton mit CEM I HS jeweils die höchste Permeabilität aufweist. CEM I, CEM II/B-M und CEM II/A-LL führen zu einem vergleichbaren Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und q_w respektive D_o . Die Betone mit erhöhtem Leimvolumen sowie die SCC-Betone weisen bei gleicher Druckfestigkeit eine tendenziell geringfügig höhere Wasserleitfähigkeit auf als die zugehörigen Normalbetone mit gleichem Bindemittel, während beim Sauerstoffdiffusionskoeffizienten keine wesentlichen Unterschiede bei variablem Leimvolumen festzustellen sind.

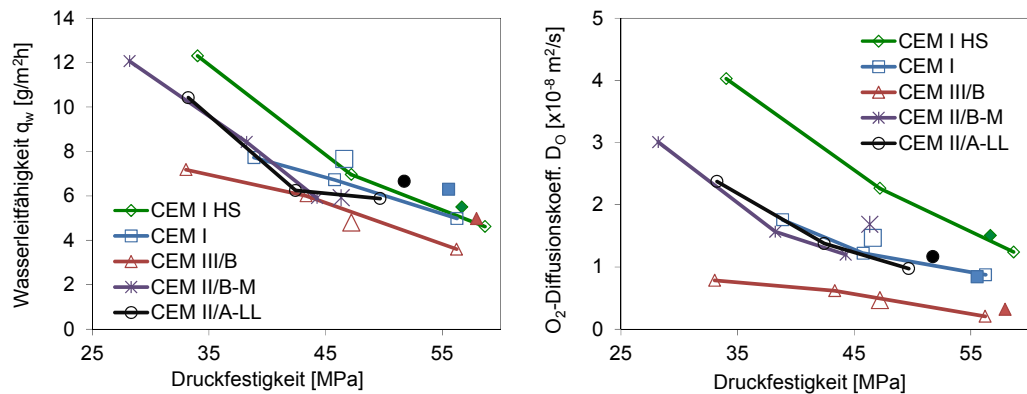


Abb. 4.13 Wasserleitfähigkeit q_w (links) und Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_O (rechts) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit sowie verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelvolumen.

4.2 Phase 1: Optimierung des Prüfablaufes

4.2.1 Sulfatwiderstandsprüfungen

Beton mit CEM I und $w/b = 0.45$ (1-I-45)

Die während den Sulfatwiderstandsprüfungen gemäss Kap. 3.4.1 gemessenen Dehnungen sind in Abb. 4.14 für die sieben verschiedenen Prüfvariationen dargestellt.

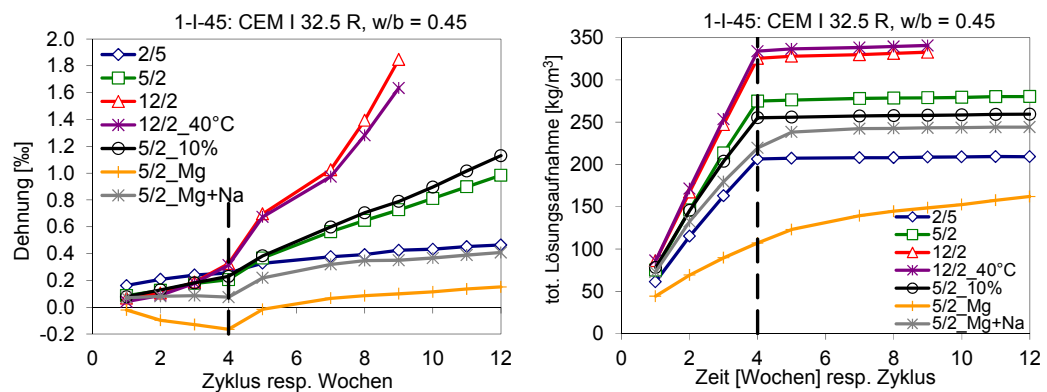


Abb. 4.14 Gemessene Dehnungen (links) sowie kumulierte Lösungsaufnahme (rechts) während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit verschiedenen Variationen des Prüfablaufes für den Beton 1-I-45. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

Bei der Serie 2/5 mit anfänglichen 4 Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss bestehender Norm (2 Tage Trocknung, 5 Tage Tränkung) führt die Zusatzlagerung zwar zu einer zusätzlichen Dehnung, welche aber nur ca. 80% grösser ist als die Dehnung nach den Trocknungs- und Tränkungszyklen.

Werden die Trocknungs- und Tränkungszyklen bei der Serie 5/2 umgekehrt (5 Tage Trocknung, 2 Tage Tränkung), führt dies zu einer um 33% höheren Sulfatlösungsaufnahme bei praktisch identischen Dehnungen am Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen. Allerdings ist die Dehnungszunahme während der anschliessenden Zusatzlagerung

rung wesentlich grösser, so dass am Ende eine Dehnung resultiert, welche ca. 5x grösser ist verglichen mit der Dehnung nach den Zyklen.

Wird die Trocknungszeit auf 12 Tage verlängert (Serie 12/2) erhöht sich die Sulfatlösungsaufnahme nochmals um 20% und die Dehnungen während der Zusatzlagerung werden nochmals deutlich grösser. Wird die Trocknungstemperatur 40°C gewählt anstelle von 50°C (Serie 12/2_40°C), ergeben sich hingegen weder bei der Sulfatlösungsaufnahme noch bei der Dehnung wesentliche Unterschiede.

Wird die Sulfatlösungskonzentration auf 10% erhöht (Serie 5/2_10%) nimmt die Lösungsaufnahme während der Trocknungs- und Tränkungszyklen im Vergleich zur Serie 5/2 leicht ab, während die Dehnungen während der Zusatzlagerung geringfügig grösser sind.

Alle fünf Serien mit Natriumsulfatlösung führen zu einer vergleichbaren Dehnung am Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen. Dehnungsunterschiede werden erst während der Zusatzlagerung sichtbar.

Bei Verwendung von Magnesiumsulfat als Prüflösung (Serie 5/2_Mg) schwinden die Prüfkörper während der Trocknungs- und Tränkungszyklen und erst bei der anschließenden Zusatzlagerung wird eine relativ kleine Dehnung gemessen. Die Lösungsaufnahme ist im Vergleich zur Natriumsulfatlösung deutlich reduziert. Im Magnesiumsulfat nehmen die Prüfkörper während der Zusatzlagerung weiter an Masse zu, während im Natriumsulfat die Masse praktisch konstant bleibt.

Bei Verwendung eines Gemisches aus Natriumsulfat und Magnesiumsulfat (Serie 5/2_Mg+Na) sind die Dehnungen und die Lösungsaufnahme im Vergleich zum reinen Natriumsulfat ebenfalls reduziert, jedoch deutlich weniger ausgeprägt wie beim reinen Magnesiumsulfat. Auch beim Lösungsgemisch findet während der Zusatzlagerung eine Massenzunahme statt, welche aber verglichen mit dem Magnesiumsulfat ebenfalls deutlich geringer ist.

Beton mit CEM I und w/b = 0.60 (1-I-60)

Sowohl die Sulfatlösungsaufnahme als auch die Dehnungen sind beim Beton mit w/b = 0.60 deutlich grösser als beim Beton mit w/b = 0.45 (Abb. 4.15 und Abb. 4.16). Die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Serien bleiben hingegen mehrheitlich ähnlich wie beim Beton mit w/b = 0.45, wodurch die obenstehenden Aussagen für den Beton mit w/b = 0.45 auch für den Beton mit w/b = 0.60 gelten. Insbesondere ist zu vermerken, dass durch die längere Trocknung (Serie 5/2) nach den vier Zyklen nach wie vor die gleiche Dehnung resultiert wie bei der Serie 2/5 mit Trocknung nach bestehender Norm, dass aber bei der anschliessenden Zusatzlagerung ein deutlicher Dehnungsunterschied entsteht.

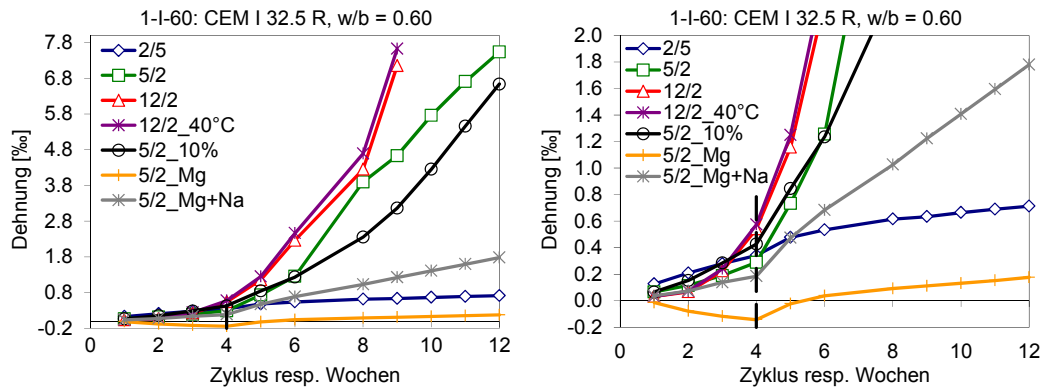


Abb. 4.15 Gemessene Dehnungen während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit verschiedenen Variationen des Prüfablaufes für den Beton 1-I-60. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen. Links: Gesamte Dehnungen, rechts: Detailansicht von Abbildung links.

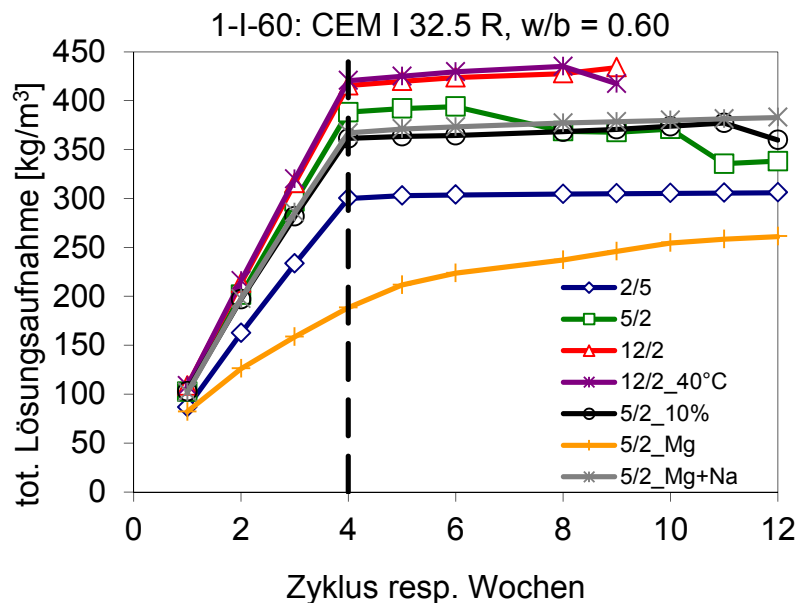


Abb. 4.16 Kumulierte Lösungsaufnahme während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit verschiedenen Variationen des Prüfablaufes für den Beton 1-I-60. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

Die Abnahme in der Lösungsaufnahme bei Serie 5/2 nach 8 und 11 Wochen hängt damit zusammen, dass aufgrund der grossen Dehnungen und der damit einhergehenden Bildung von Rissen Steine aus den Prüfkörpern gefallen sind, welche zu einer scheinbaren Abnahme der Lösungsaufnahme geführt haben.

Beton mit CEM III/B und $w/b = 0.45$ (1-III-45)

Der Beton mit $w/b = 0.45$ weist in Natriumsulfatlösung (Serie 5/2) während der Zusatzlagerung eine Dehnungszunahme auf, so dass die Dehnung am Prüfende etwa doppelt so gross ist wie nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen (Abb. 4.17). Bei der Prüfung in Magnesiumsulfat schwinden die Prüfkörper während der ersten vier Zyklen. Wäh-

rend der anschliessenden Zusatzlagerung nimmt die Dehnung zwar zu, bleibt aber bis zum Prüfende relativ klein. Beim Lösungsgemisch (Serie 5/2_Mg+Na) liegen die gemessenen Dehnungen etwa in der Mitte der übrigen beiden Serien. Die Lösungsaufnahme ist beim Lösungsgemisch vergleichbar mit derjenigen in Natriumsulfat. In reinem Magnesiumsulfat ist die Lösungsaufnahme deutlich reduziert und die Prüfkörper nehmen nach dem Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen noch an Masse zu.

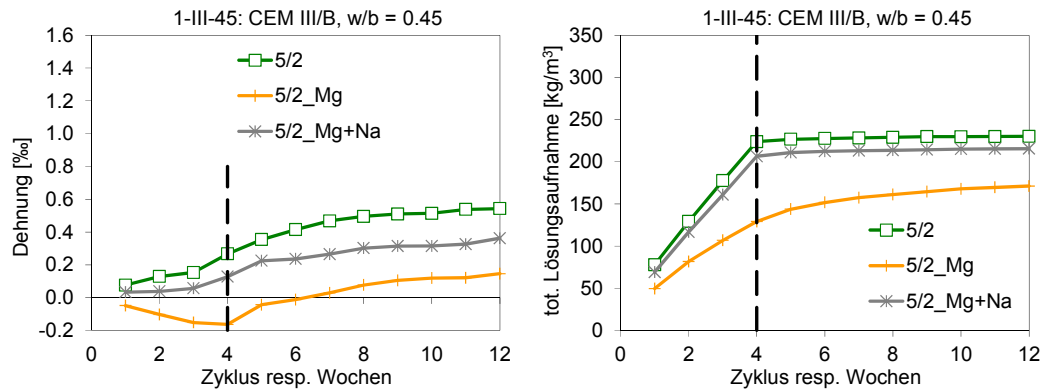


Abb. 4.17 Gemessene Dehnungen (links) sowie kumulierte Lösungsaufnahme (rechts) während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit verschiedenen Variationen des Prüfablaufes für den Beton 1-III-45. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

Beton mit CEM III/B und w/b = 0.60 (1-III-60)

Der Beton mit w/b = 0.60 (Abb. 4.18) weist generell grössere Dehnungen auf als derjenige mit w/b = 0.45. Die relativen Unterschiede in den Dehnungen am Prüfende zwischen den drei Prüflösungen werden jedoch kleiner. Beim Magnesiumsulfat ist während der Trocknungs- und Tränkungszyklen kein Schwinden mehr zu erkennen sondern nur noch eine relativ kleine, konstante Dehnung.

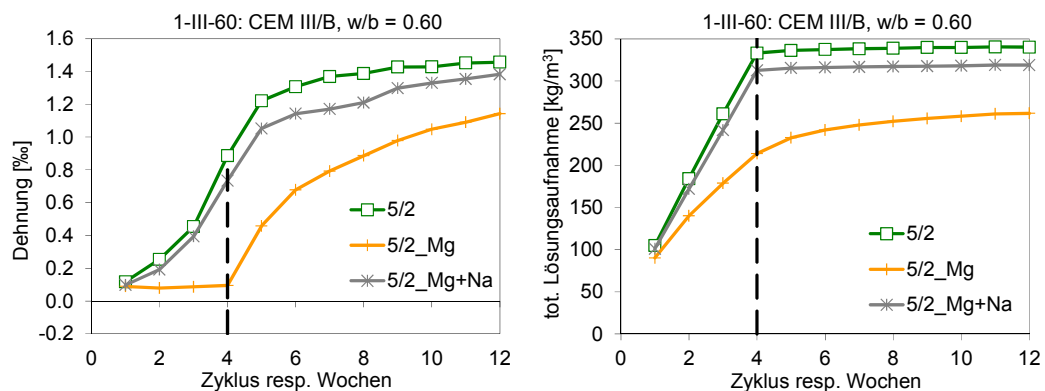


Abb. 4.18 Gemessene Dehnungen (links) sowie kumulierte Lösungsaufnahme (rechts) während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit verschiedenen Variationen des Prüfablaufes für den Beton 1-III-60. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

4.2.2 Änderung der Druckfestigkeit

Ziel der Druckfestigkeitsbestimmung an Bohrkernen während der Sulfatwiderstandsprüfung (vgl. Kap. 3.3.5) war es abzuklären, ob eine Korrelation zwischen der gemessenen Dehnung und einer mechanischen Eigenschaft des Betons (in diesem Fall der Druckfestigkeit) besteht. Es hat sich dabei schnell gezeigt, dass die gemessenen Festigkeiten der Einzelwerte relativ grosse Streuungen aufwiesen. Dies hängt im Wesentlichen damit zusammen, dass die Prüfkörperabmessung ($d = h = 28 \text{ mm}$) im Vergleich zum Grösstkorn sehr klein ist. Allerdings war es nicht möglich, die Prüfung an grösseren Prüfkörpern durchzuführen, da sonst der Vergleich zwischen mechanischer Eigenschaft und Dehnung nicht mehr möglich gewesen wäre.

Obwohl die Festigkeit pro Messzeitpunkt als Mittelwert aus bis zu vier Probekörpern (welche allerdings aus dem gleichen Bohrkern herausgeschnitten wurden) bestimmt wurde, wiesen die Resultate unterschiedlicher Messzeitpunkte derart grosse Streuungen auf, dass diese grösser waren als die Unterschiede zwischen den verschiedenen Prüflösungen. Eine sich abzeichnende Tendenz der Druckfestigkeit in Funktion des Prüffortes war somit eher zufällig und man konnte keine verlässlichen Schlussfolgerungen ziehen.

In Abb. 4.19 sind als Beispiel die Druckfestigkeitsergebnisse für den Beton mit CEM I als Bindemittel und $w/b = 0.60$ dargestellt. Die in reinem Wasser sowie dem Lösungsgemisch gelagerten Proben zeigen zwar einen relativ konstanten Verlauf der Druckfestigkeit. Bei den in Magnesiumsulfat gelagerten Proben ist aber nach einem anfänglichen Abfall der Festigkeit eine deutliche Zunahme nach vier Wochen Zusatzlagerung zu erkennen. In Natriumsulfat ist es genau umgekehrt und die Festigkeit nimmt nach der Zusatzlagerung ab, was mit den grossen Dehnungen der entsprechenden Prüfkörper während der Sulfatwiderstandsprüfung überein stimmen würde (vgl. Abb. 4.15). Allerdings ist in Abb. 4.19 auch zu erkennen, dass vor Prüfbeginn die verschiedenen Bohrkern eine Streuung von 34 bis 45 MPa aufweisen, obwohl vor Prüfbeginn eigentlich alle Bohrkern die gleiche Festigkeit aufweisen müssten. Daraus kann geschlossen werden, dass diese Art der Prüfung zu wenig sensitiv ist, um Veränderungen der Druckfestigkeit während der Sulfatwiderstandsprüfung aufzeigen zu können. Erst wenn die Druckfestigkeit sehr stark absinkt sind solche Einflüsse deutlich zu erkennen. Allerdings ist es dann wieder fast unmöglich, aus diesen stark geschädigten Bohrkernen Prüfkörper für die Druckfestigkeitsprüfung zu präparieren.

Aus diesen Gründen wurde in Abb. 4.19 darauf verzichtet, am Prüfungsende nach 8 Wochen Zusatzlagerung die Druckfestigkeit erneut zu bestimmen. Da beim Beton mit CEM I als Bindemittel und $w/b = 0.45$ die Festigkeiten vor Prüfbeginn ähnlich stark streuten (47 – 62 MPa), wurden keine weiteren Probekörper geprüft und bei den Betonen mit CEM III/B als Bindemittel auf diese Art der Druckfestigkeitsbestimmung gänzlich verzichtet.

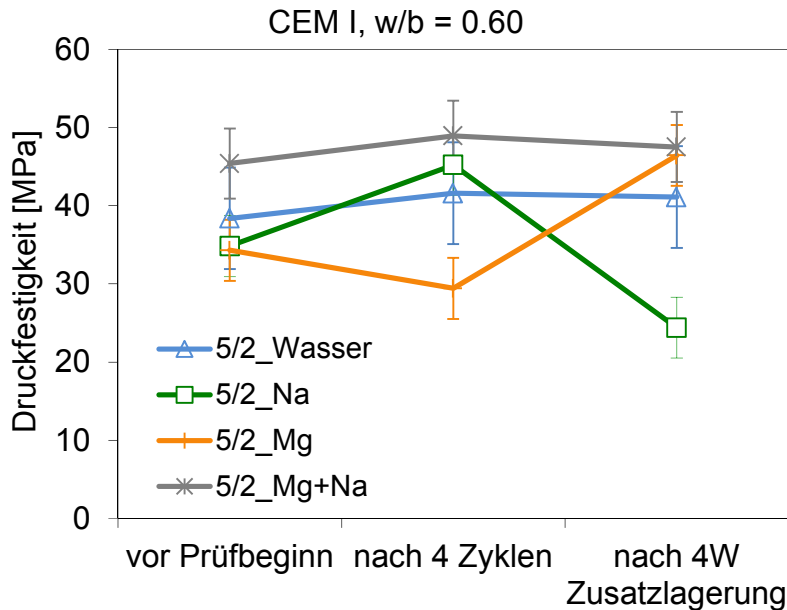


Abb. 4.19 Druckfestigkeit von Bohrkernen zu bestimmten Zeiten der Sulfatwiderstandsprüfungen (vor Prüfbeginn, nach den 4 Trocknungs- und Tränkungszyklen sowie nach 4 Wochen Zusatzlagerung) in Abhängigkeit der Prüflösung. Fehlerbalken = mittlere Standardabweichung der Einzelwerte.

4.2.3 Änderung des dynamischen E-Moduls

Ziel der Messung des dynamischen E-Moduls an Bohrkernen während der Sulfatwiderstandsprüfung (vgl. Kap. 3.3.4) war es abzuklären, ob eine Korrelation zwischen der gemessenen Dehnung und einer weiteren mechanischen Eigenschaft des Betons (in diesem Fall der dynamische Elastizitätsmodul) besteht.

Anmerkung: Beim CEM I (Abb. 4.20) wurde der dynamische E-Modul vor Prüfbeginn an vier Bohrkernen, nach vier Wochen an drei, nach vier Wochen Zusatzlagerung an zwei und am Prüfende nur noch an einem Probekörper bestimmt. Der Grund liegt darin, dass nach jedem Prüfzeitpunkt jeweils ein Prüfkörper für die Druckfestigkeitsbestimmung (vgl. Kap. 4.2.2) zerstört werden musste. Die Aussagekraft nimmt also mit zunehmendem Prüffortschritt tendenziell ab. Beim CEM III/B (Abb. 4.21) waren bis am Schluss vier Bohrkern vorhanden, da keine Druckfestigkeitsbestimmung erfolgte.

Beim Beton mit CEM I als Bindemittel und w/b = 0.45 nimmt der dynamische E-Modul am Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen für alle Prüflösungen geringfügig ab (Abb. 4.20, links). Während der Zusatzlagerung nimmt der dynamische E-Modul allerdings wieder zu, so dass er am Prüfende für alle Prüflösungen tendenziell grösser ist als vor Prüfbeginn. Die Zunahme ist beim Lösungsgemisch (Na+Mg) am stärksten ausgeprägt. Die im Wasser gelagerten Prüfkörper weisen einen ähnlichen Verlauf des E-Moduls auf wie die Bohrkern in Natrium- resp. Magnesiumsulfat.

Beim Beton mit CEM I als Bindemittel und w/b = 0.60 nimmt der dynamische E-Modul am Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen ebenfalls ab, wobei die Abnahme etwa doppelt so gross ist wie beim w/b = 0.45. Anschliessend nimmt der E-Modul bei den Bohrkernen im Wasser und im Magnesiumsulfat während der Zusatzlagerung wieder zu. Bei den in Natriumsulfat gelagerten Bohrkernen ist nach vier Wochen Zusatzlagerung resp. am Prüfungsende kein dynamischer E-Modul mehr messbar, weil die Bohrkern schon zu stark zerfallen sind (Änderung dyn. E-Modul = -100%). Beim Lösungsgemisch Na+Mg ist eine kontinuierliche Abnahme des E-Moduls während der Zusatzlagerung festzustellen, wobei die Abnahme am Prüfende -20% beträgt.

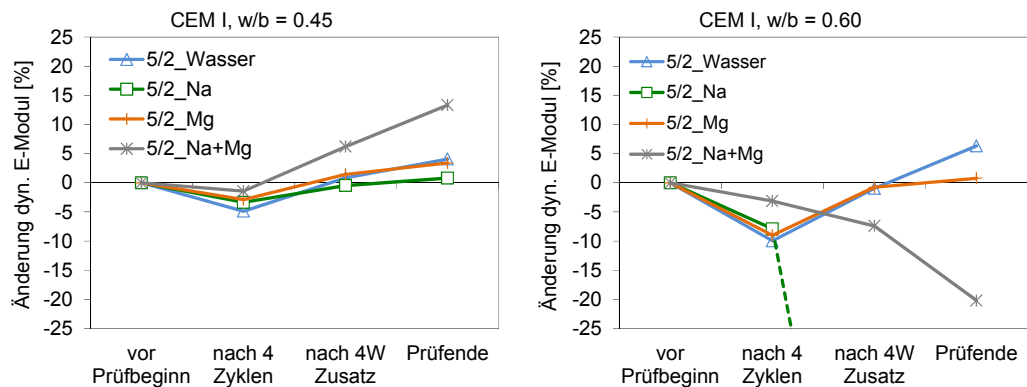


Abb. 4.20 Änderung des dynamischen E-Moduls von Bohrkernen von Prüfbeginn bis Prüfende in Abhängigkeit der Prüflösung. Betone mit CEM I als Bindemittel und $w/b = 0.45$ (links) sowie $w/b = 0.60$ (rechts).

Die Prüfkörper mit CEM III/B als Bindemittel und $w/b = 0.45$ verhalten sich ähnlich wie der entsprechende Beton mit CEM I als Bindemittel. Tendenziell ist auch hier eine leichte Abnahme des E-Moduls während der Trocknungs- und Tränkungszyklen feststellbar, gefolgt von einer kontinuierlichen leichten Zunahme während der Zusatzlagerung. Am Prüfende ist der dynamische E-Modul bei allen Prüflösungen zwischen 5 und 12% höher als beim Prüfbeginn.

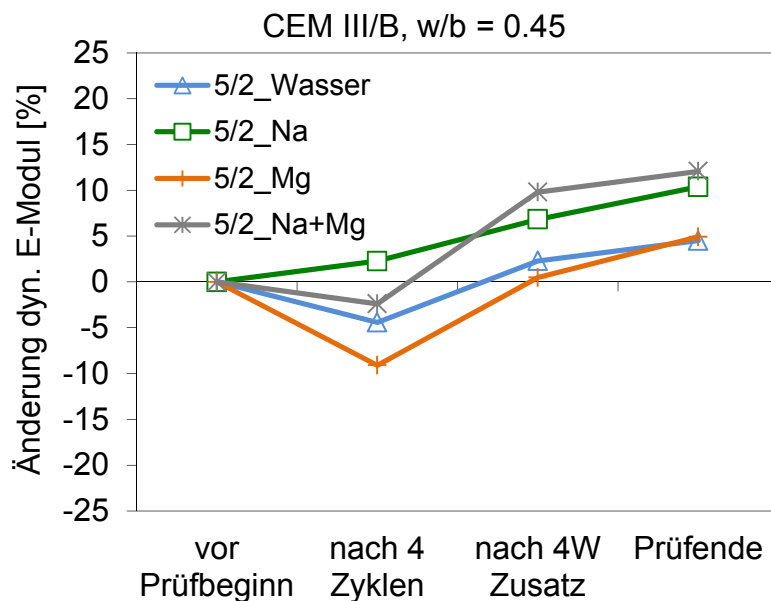


Abb. 4.21 Änderung des dynamischen E-Moduls von Bohrkernen von Prüfbeginn bis Prüfende in Abhängigkeit der Prüflösung. Beton mit CEM III/B als Bindemittel und $w/b = 0.45$.

4.2.4 Sulfateindringtiefe

Beton mit CEM I

Der Schwefelgehalt im Prüfkörper ist bei den Proben mit höherem w/b-Wert grundsätzlich in allen Tiefenlagen höher. Durch die Umkehrung der Trocknungs- und Tränkungszyklen (von 2/5 auf 5/2) nimmt der mittlere Schwefelgehalt zu, wobei dieser Effekt beim w/b = 0.60 etwas stärker ausgeprägt ist. Der Schwefelgehalt erhöht sich durch die längere Trocknung auch in Prüfkörpermitte und das Profil wird tendenziell etwas flacher.

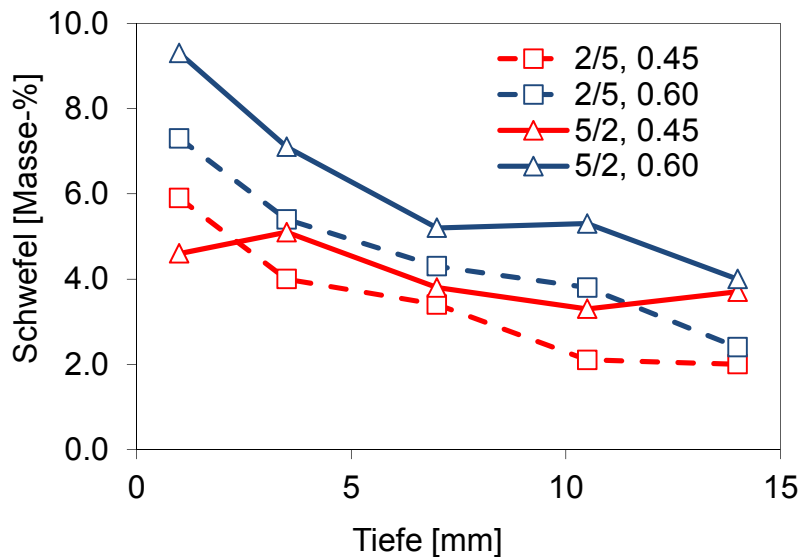


Abb. 4.22 Schwefelprofil nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen in Funktion der Tiefe ab Prüfkörperoberfläche bestimmt am Beton mit CEM I als Bindemittel. Vergleich der unterschiedlichen Trocknungsarten (2 Tage resp. 5 Tage) sowie der w/b-Werte (0.45 und 0.60).

Die Schwefelprofile, bestimmt nach den 4 Trocknungs- und Tränkungszyklen sowie nach 4 Wochen Zusatzlagerung (Abb. 4.23) unterscheiden sich beim w/b = 0.45 praktisch nicht. Beim w/b = 0.60 ist der Schwefelgehalt nach der Zusatzlagerung vor allem im Randbereich tendenziell kleiner, was mit Leachingeffekten zu tun hat (vgl. Kap. 4.2.5). Nach der Zusatzlagerung sind die Unterschiede zwischen den beiden w/b-Werten kleiner als nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen. Im Kernbereich des Bohrkerns weisen alle vier Proben den gleichen Schwefelgehalt auf.

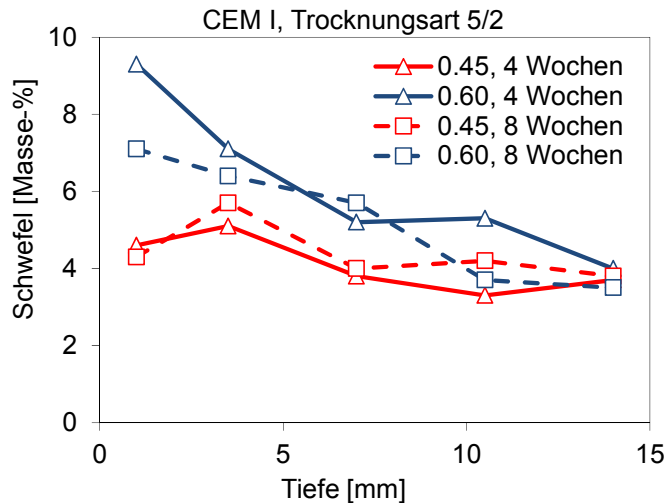


Abb. 4.23 Schwefelprofil nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen (Bez. „4 Wochen“) sowie nach vier Wochen Zusatzlagerung (Bez. „8 Wochen“) in Funktion der Tiefe ab Prüfkörperoberfläche bestimmt am Beton mit CEM I als Bindemittel und verschiedenen w/b-Werten.

Bei den Prüfserien mit unterschiedlichen Lösungen wurde das Schwefelprofil nur in ausgewählten Fällen bestimmt.

Beim $w/b = 0.45$ bestehen im Schwefelprofil nur geringfügige Unterschiede für die Prüflösungen mit Natriumsulfat und dem Gemisch aus Natrium- und Magnesiumsulfat (Abb. 4.24, links). Diese Unterschiede beschränken sich hauptsächlich auf den Randbereich, wo der Schwefelgehalt beim Lösungsgemisch deutlich erhöht ist.

Beim $w/b = 0.60$ weisen die Prüfkörper im Lösungsgemisch mit Ausnahme des Kernbereiches einen durchwegs geringeren Schwefelgehalt auf als in reinem Natriumsulfat (Abb. 4.24, rechts). Bei der Prüflösung mit reinem Magnesiumsulfat ist der Schwefelgehalt über den gesamten Prüfkörperquerschnitt noch stärker reduziert. Durch die Erhöhung der Natriumsulfat-Konzentration auf 10% nimmt der Schwefelgehalt im Vergleich zur Konzentration von 5% im Randbereich ab, während er im Kernbereich zunimmt. Die Abnahme des Schwefelgehaltes im Randbereich bei 10%iger Lösung dürfte damit zusammenhängen, dass bei höheren Sulfatgehalten Portlandit und CSH schneller destabilisiert werden. Dadurch sinkt der pH-Wert ab und die Bindekapazität von Schwefel in Etringit nimmt ab.

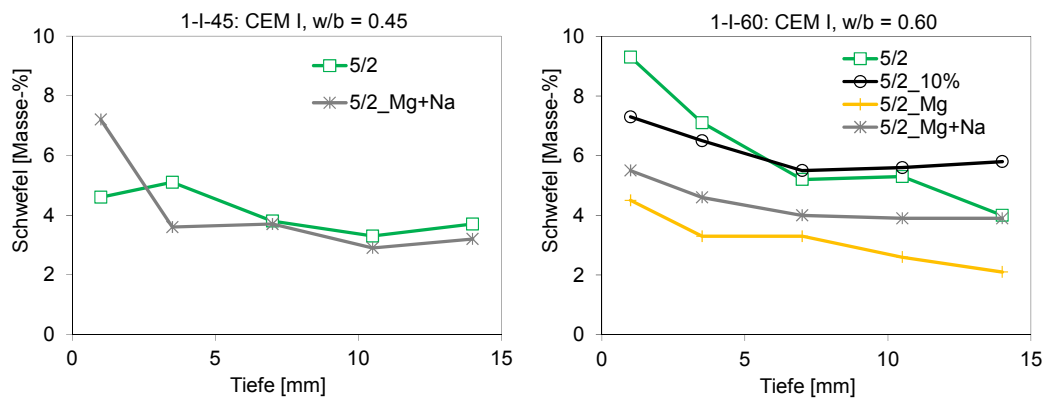


Abb. 4.24 Schwefelprofil nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen in Funktion der Tiefe ab Prüfkörperoberfläche bestimmt am Beton mit CEM I als Bindemittel: Einfluss verschiedener Prüflösungen. Links: $w/b = 0.45$, rechts: $w/b = 0.60$.

Beton mit CEM III/B

Die Sulfateindringtiefe ist beim $w/b = 0.45$ sowohl nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen als auch nach vier Wochen Zusatzlagerung deutlich weniger gross als beim $w/b = 0.60$, wobei bei beiden w/b -Werten im Kernbereich der Prüfkörper kein Sulfat eingetragen wird (Abb. 4.25). Beim $w/b = 0.60$ beträgt die maximale Sulfateindringtiefe ca. 4-5 mm, während sie beim $w/b = 0.45$ bei etwa 8-9 mm liegt. Diese grössere Sulfateindringtiefe bei höheren w/b -Werten ist auf die entsprechend höhere Porosität zurückzuführen. Allerdings ist der Abfall des Schwefelgehaltes im Randbereich bei höherem w/b -Wert stärker ausgeprägt als bei tieferem w/b . Dies hängt wiederum damit zusammen, dass es im Kontaktbereich zur Lösung bei höheren w/b -Werten zu einem stärkeren Leaching kommt, welches zu einer Reduktion des pH-Wertes und somit zu einer Instabilität von Ettringit führt (Schwefel geht wieder in Lösung). Während der Zusatzlagerung verändert sich das Schwefelprofil im Vergleich zum Zustand nach den Trocknungs- und Tränkungszyklen praktisch nicht.

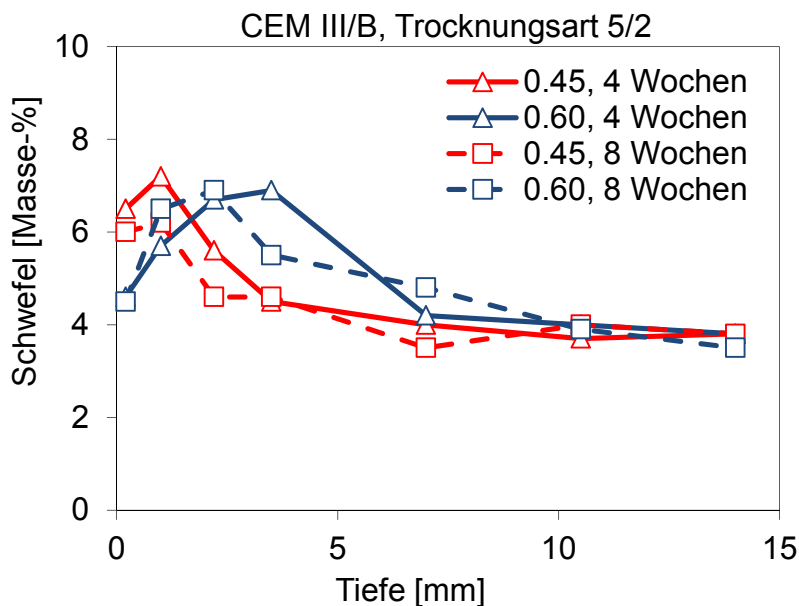


Abb. 4.25 Schwefelprofil nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen (Bez. „4 Wochen“) sowie nach vier Wochen Zusatzlagerung (Bez. „8 Wochen“) in Funktion der Tiefe ab Prüfkörperoberfläche bestimmt am Beton mit CEM III/B als Bindemittel und verschiedenen w/b -Werten.

4.2.5 Mineralphasen

In den nachfolgenden Diagrammen sind die in den Prüfkörpern vorherrschenden Mineralphasen gemäss Beschrieb in Kap. 3.3.7 für verschiedene Prüfvariationen dargestellt. Es sind jeweils drei Tiefen ab Oberfläche aufgezeichnet: 1.0 mm, 3.5 mm und 14.0 mm (Prüfkörpermitte). In den Legenden ist zusätzlich jeweils der mittlere Schwefelgehalt in den entsprechenden Tiefen angegeben.

Beton mit CEM I nach bestehender Prüfung

Nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss bestehender Prüfung ist beim Beton mit $w/b = 0.45$ im Randbereich eine Tendenz Richtung Ettringit zu erkennen (Abb. 4.26, links). Bereits in 3.5 mm Tiefe ist nur noch ein Shift Richtung Monosulfat vorhanden, während in Prüfkörpermitte keine Sulfatinteraktion stattgefunden hat. Der Gross-

teil der gemessenen Punkte befindet sich in allen Tiefen nach wie vor im Bereich von CSH. Ähnliche Aussagen gelten auch für den Beton mit $w/b = 0.60$, wobei hier auch in 3.5 mm Tiefe ein Shift Richtung Ettringit festgestellt werden kann (Abb. 4.26, rechts). Vergleichbare Resultate wurden auch im Grundlagenprojekt [VSS1355, 2011] gefunden.

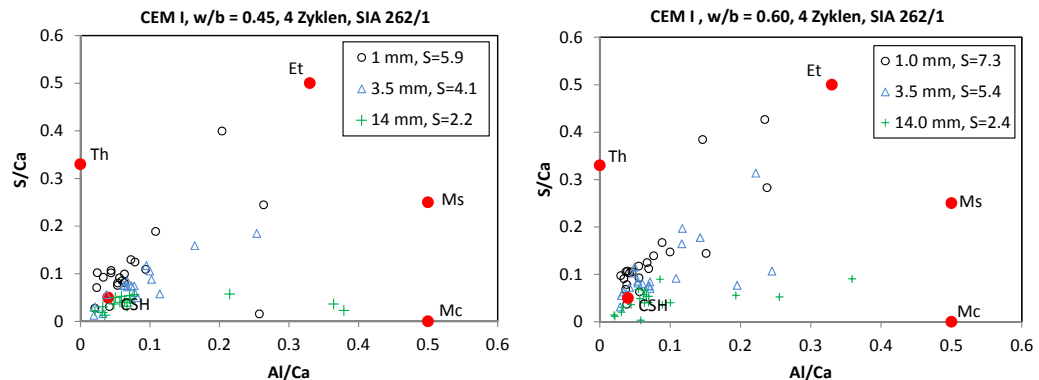


Abb. 4.26 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss der bestehenden Prüfung. Links: Beton mit $w/b = 0.45$, rechts: Beton mit $w/b = 0.60$.

Beton mit CEM I nach angepasster Prüfung

Nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss der neuen Prüfung ist beim Beton mit $w/b = 0.45$ in allen Tiefen ein Shift Richtung Ettringit vorhanden, wobei dieser mit abnehmender Tiefe immer weniger stark ausgeprägt ist (Abb. 4.27, links). Gleiches gilt für den Beton mit $w/b = 0.60$ (Abb. 4.27, rechts). Allerdings ist der Shift Richtung Ettringit im Randbereich weniger stark ausgeprägt als beim Beton mit $w/b = 0.45$, während es für die grösseren Tiefen genau umgekehrt ist. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass beim höheren w/b -Wert im Randbereich ein stärkeres Leaching stattfindet. Der damit einhergehende Abfall des pH-Wertes führt folglich zur Instabilität von Ettringit. Dadurch geht auch wieder etwas Schwefel in Lösung, was den geringeren Schwefelgehalt im Randbereich beim Beton mit $w/b = 0.60$ im Vergleich mit dem $w/b = 0.45$ erklärt.

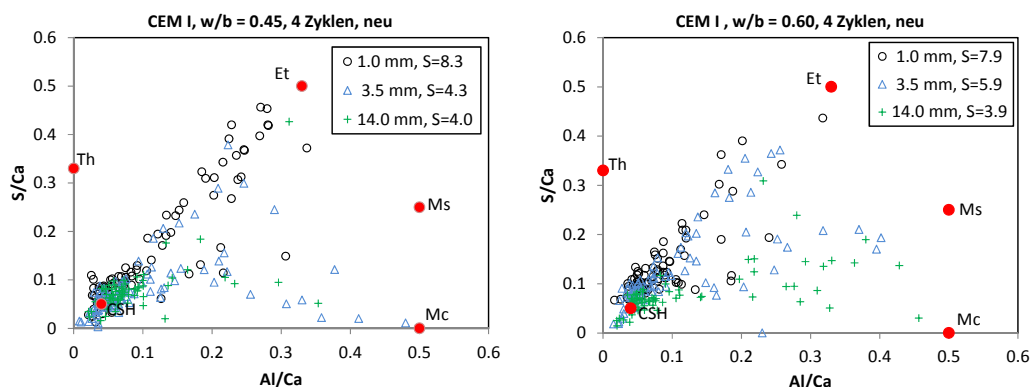


Abb. 4.27 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss der neuen Prüfung. Links: Beton mit $w/b = 0.45$, rechts: Beton mit $w/b = 0.60$.

Nach vier Wochen Zusatzlagerung ist beim Beton mit $w/b = 0.60$ der Shift Richtung Ettringit in Prüfkörpermitte deutlich ausgeprägter (Abb. 4.28, rechts) als nach den anfänglichen Zyklen. Dies deutet auf die gewünschte zusätzliche Bildung von Ettringit während

der Zusatzlagerung hin. Beim Beton mit $w/b = 0.45$ ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt. Dass beim Beton mit $w/b = 0.45$ trotzdem eine beträchtliche Dehnung während der Zusatzlagerung auftritt, hängt nicht nur mit der Menge an gebildetem Ettringit zusammen sondern auch mit der Grösse der Kristalle: während den Trocknungs- und Tränkungszyklen wachsen die Kristalle schnell, was zu vorwiegend kleinen Kristallen führt. Bei der Zusatzlagerung ist ein langsames Kristallwachstum zu erwarten, was zu grösseren Kristallen und einer entsprechend grösseren Dehnung führen kann.

Der Rückgang des Shiftes Richtung Ettringit im Randbereich und dem damit zusammenhängenden Abfall des Schwefelgehaltes ist bei beiden Proben wie oben beschrieben auf Leachingeffekte zurückzuführen.

Ein Shift Richtung Thaumasit und Gips ist weder in Abb. 4.27 noch in Abb. 4.28 zu erkennen, weshalb auch bei der angepassten Prüfung die gewünschten Mineralphasen entstehen. Im äussersten Randbereich bis ca. 0.2 mm ist zwar bei gewissen Proben eine Gipsbildung zu beobachten (Daten nicht gezeigt), diese hat aber aufgrund ihrer geringen räumlichen Ausdehnung keinen Einfluss auf die gemessene globale Dehnung.

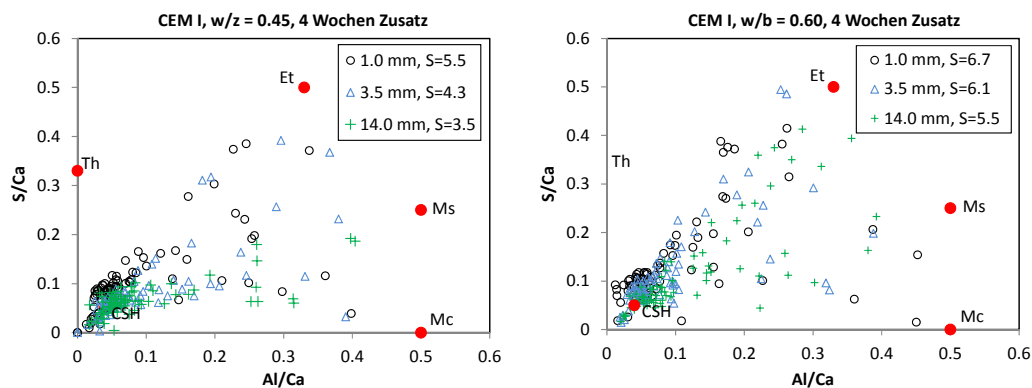


Abb. 4.28 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche nach vier Wochen Zusatzlagerung gemäss der neuen Prüfung. Links: Beton mit $w/b = 0.45$, rechts: Beton mit $w/b = 0.60$.

Beton mit CEM III/B nach angepasster Prüfung

Beim Schlackenzement ist der Ca-Gehalt im Vergleich zum Portlandzement tiefer, während der Schwefel- und Aluminium-Gehalt höher ist (Abb. 3.3). Aus diesem Grund liegt das CSH des Schlackenzementes in Abb. 4.29 nicht am gleichen Ort wie beim Portlandzement sondern ist Richtung höhere S/Ca- resp. Al/Ca-Verhältnisse verschoben (gestrichelter Kreis in Abb. 4.29).

Sowohl beim $w/b = 0.45$ als auch beim $w/b = 0.60$ ist nach vier Wochen Zusatzlagerung Ettringit zu finden, wobei der Shift Richtung Ettringit beim höheren w/b -Wert ausgeprägter und auch in grösserer Tiefe vorhanden ist. (Abb. 4.29). Es ist weder Thaumasit noch Gips enthalten. Es werden also auch beim Schlackenzement die angestrebten Mineralphasen gebildet.

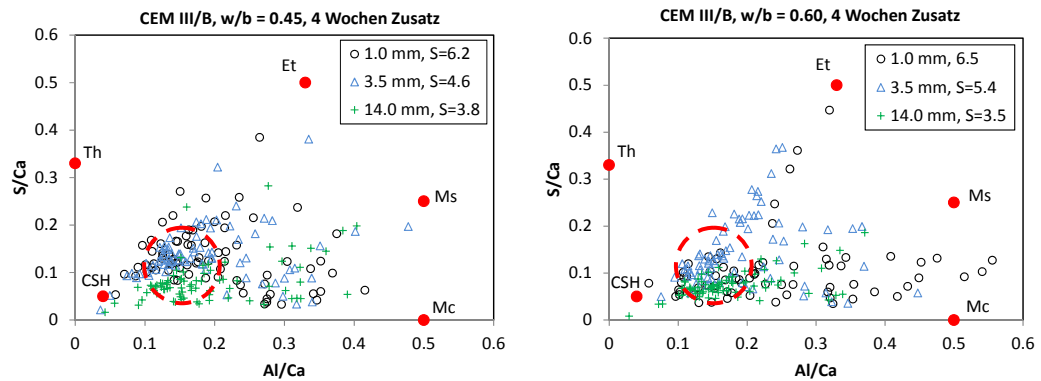


Abb. 4.29 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche nach vier Wochen Zusatzlagerung gemäss der neuen Prüfung. Links: Beton mit $w/b = 0.45$, rechts: Beton mit $w/b = 0.60$.

Prüfung in Magnesiumsulfat

Bei der Prüfung in Magnesiumsulfat ändert sich die Zusammensetzung der Mineralphasen der ausgewerteten Proben nicht grundlegend (Abb. 4.30). Einzig bei der Verteilung der Mineralphasen in der Tiefe ergeben sich Unterschiede im Vergleich zur Prüfung in Natriumsulfat, was aber hauptsächlich mit dem geringeren Schwefeleintrag im Falle der Prüfung in Magnesiumsulfat zusammenhängt.

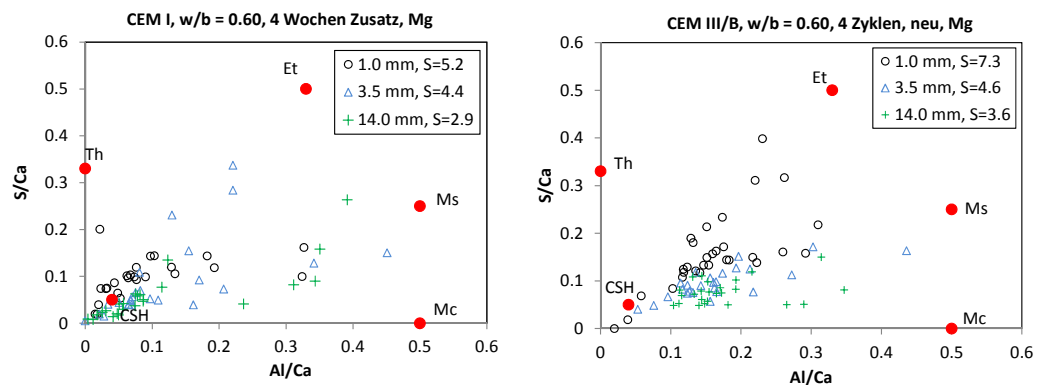


Abb. 4.30 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche für den Beton mit CEM I und $w/b = 0.60$ nach vier Wochen Zusatzlagerung (links) sowie für den Beton mit CEM III/B und $w/b = 0.60$ nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen gemäss der neuen Prüfung (rechts). Prüflösung = Magnesiumsulfat.

4.2.6 Diskussion der Resultate

Durch die Verlängerung der Trocknungsdauer während der Trocknungs- und Tränkungszyklen (5 Tage Trocknung, 2 Tage Tränkung) bleiben die Dehnungen am Ende der Zyklen im Vergleich zur ursprünglichen Trocknungsart (2 Tage Trocknung, 5 Tage Tränkung) etwa gleich gross. Während der anschliessenden Zusatzlagerung werden die Dehnungen im Falle der längeren Vortrocknung aber deutlich grösser (Abb. 4.15). Die Unterschiede sind bei höheren w/b -Werten ausgeprägter. Dies hängt damit zusammen, dass durch die längere Trocknung bei der anschliessenden Tränkung mehr Sulfatlösung aufgenommen wird (Abb. 4.16) und somit mehr Sulfat über den ganzen Prüfkörperquerschnitt (insbesondere auch im Bohrkernzentrum) in den Zementstein eingetragen wird (Abb. 4.22). Während der Zusatzlagerung ändern sich die Schwefelprofile nur geringfügig (Abb. 4.23

und Abb. 4.25), während die Dehnungen aber deutlich zunehmen. Die Sulfatminerale werden folglich zur Hauptsache erst während der Zusatzlagerung gebildet, wobei es sich bei diesen Mineralien wie angenommen um Ettringit handelt. Die Annahme aus dem Grundlagenprojekt [VSS1355, 2011], dass die zur Verfügung stehende Reaktionszeit während der Trocknungs- und Tränkungszyklen zu kurz war, hat sich somit bestätigt.

Durch diese generell grösseren Dehnungen treten am Ende der Zusatzlagerung auch deutliche Dehnungsunterschiede zwischen den verschiedenen Zementen und w/z-Werten auf, wobei die Abstufung im Falle von Natriumsulfat als Prüflösung den theoretischen Vorstellungen entspricht (Abb. 4.31). Wie Langzeitversuche in den USA gezeigt haben [Monteiro, 2003], ist der Einfluss des w/b-Wertes auf den Sulfatwiderstand mindestens gleich gross wie der Einfluss der Zementsorte, was sich in den Resultaten in Abb. 4.31 ebenfalls widerspiegelt. Die Ziele eines verbesserten Sulfateintrages in die Prüfkörper sowie eine Vergrösserung der Dehnungsunterschiede scheinen somit mit der Umkehrung der Trocknungs- und Tränkungszyklen sowie mit der anschliessenden Zusatzlagerung erreicht.

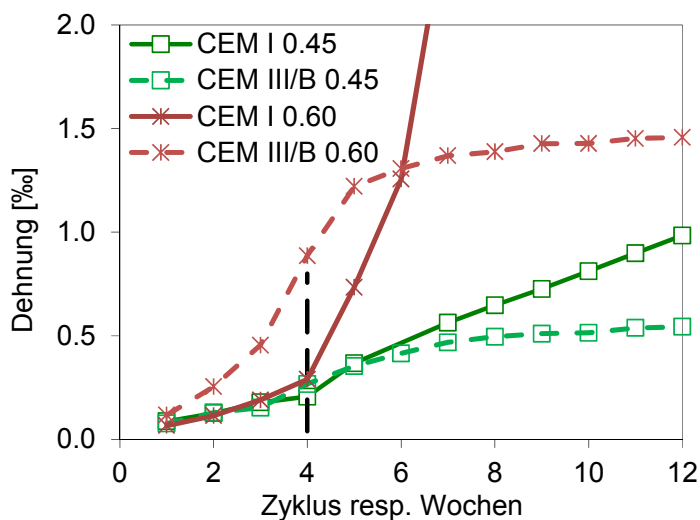


Abb. 4.31 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung in 5%-iger Natriumsulfatlösung mit 5 Tagen Trocknung und 2 Tagen Tränkung. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

Eine Erhöhung der Konzentration der Natriumsulfatlösung von 5% auf 10% führt nicht zu grundlegend anderen Dehnungen (Abb. 4.14 und Abb. 4.15). Eine Verlängerung der Trocknungsphase von 5 auf 12 Tage führt zwar zu einem noch grösseren Sulfatlösungseintrag in die Prüfkörper und somit zu noch grösseren Dehnungen während der Zusatzlagerung. Da aber bereits mit 5 Tagen Trocknung beträchtliche Dehnungsunterschiede entstehen (vgl. Abb. 4.31) und sich die Prüfungsdauer mit einer 12-tägigen Trocknung nochmals erheblich verlängern würde, scheint die Trocknungsdauer von 5 Tagen für eine Normprüfung praktikabler. Eine Änderung der Trocknungstemperatur auf 40°C wirkt sich weder auf die Lösungsaufnahme noch auf die Dehnungen massgeblich aus. Es scheint deshalb, dass bei 50°C keine ungewollte Veränderung der gebildeten Mineralien stattfindet, weshalb die aktuelle Trocknungstemperatur von 50°C beibehalten werden kann.

Bei einer Verwendung von Magnesiumsulfat resp. einem Gemisch aus Magnesiumsulfat und Natriumsulfat zeigt der CEM III/B bei hohen w/b-Werten eine grössere Dehnung als der CEM I, während beim tieferen w/b-Wert beide Zementsorten identische Dehnungen in diesen Prüflösungen ergeben (Abb. 4.32). In Natriumsulfat hingegen ist ein Unterschied bei beiden w/b-Werten erkennbar. Die Lösungsaufnahme ist beim Lösungsgemisch und vor allem beim Magnesiumsulfat reduziert (Abb. 4.14 bis Abb. 4.18) und entsprechend ist bei diesen Prüflösungen auch der Schwefelgehalt in den Prüfkörpern kleiner (Abb. 4.24). Wie Analysen gezeigt haben, bildet sich auf der Prüfkörperoberfläche ei-

ne Schicht aus Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), welche dichtend wirkt und den weiteren Sulfatlösungseintrag behindert. Somit ist bei Prüflösungen mit Magnesiumsulfat der Vorteil einer beschleunigten Lösungsaufnahme durch Trocknungs- und Tränkungszyklen nicht mehr gegeben.

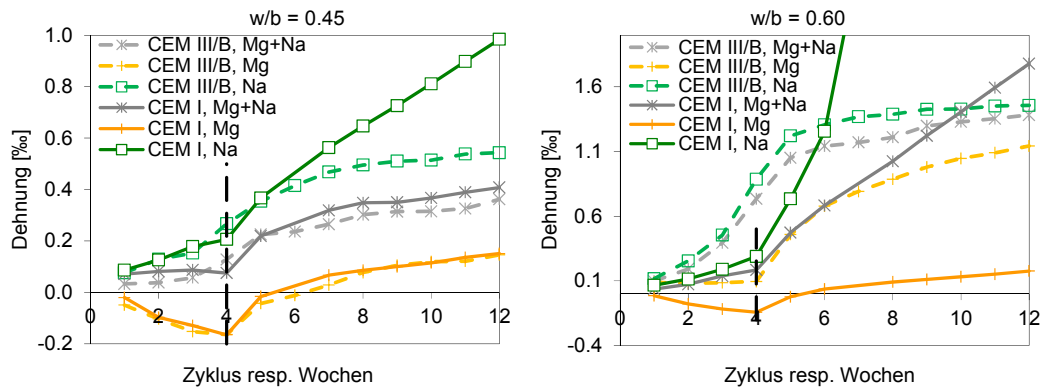


Abb. 4.32 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung in verschiedenen Prüflösungen mit 5 Tagen Trocknung und 2 Tagen Tränkung, Betone mit CEM I und CEM III/B als Bindemittel. Links: $w/b = 0.45$, rechts: $w/b = 0.60$. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

Beim dynamischen E-Modul sind beim tiefen w/b -Wert keine Unterschiede zwischen den Zementen sowie den verschiedenen Prüflösungen erkennbar (Abb. 4.20 und Abb. 4.21). Erst bei höheren w/b -Werten werden diese sichtbar, wobei der Abfall im Falle des CEM I als Bindemittel beim Natriumsulfat am stärksten ausgeprägt ist, gefolgt vom Lösungsgemisch. Genau diese zeigen aber auch in der Sulfatwiderstandsprüfung die grössten Dehnungen. Obwohl die Datengrundlage sehr beschränkt ist, ist doch eine Tendenz sichtbar, dass unabhängig von der Prüflösung ab einer bestimmten Grösse der Dehnung ein Zusammenhang zwischen Dehnung und Abfall des dynamischen E-Moduls bestehen könnte (Abb. 4.33). Falls dies tatsächlich der Fall ist, ist eine grosse Dehnung auch gleichbedeutend mit einer Reduktion der mechanischen Eigenschaften. Dieser Umstand muss jedoch in der Phase der Validierung an einer grösseren Datenbasis noch genauer untersucht werden.

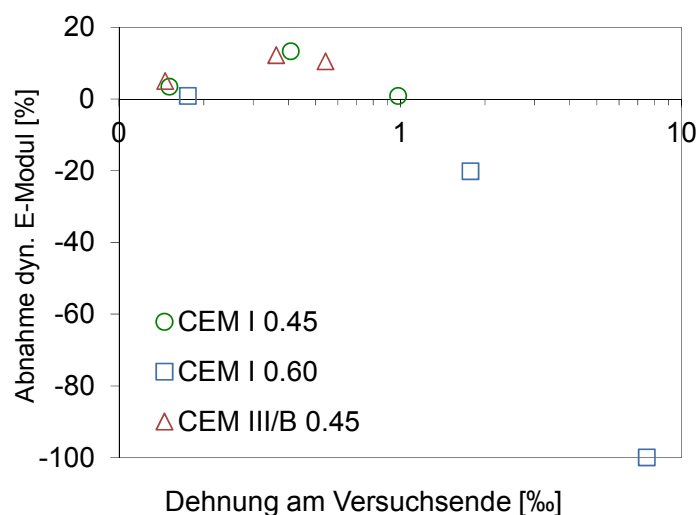


Abb. 4.33 Abfall des dynamischen E-Moduls der Probekörper während der Sulfatwiderstandsprüfung von Prüfbeginn bis Prüfende im Vergleich zur gemessenen Dehnung am Versuchsende für drei verschiedene Betonsorten. Jeder Punkt steht für eine unterschiedliche Prüflösung.

Aufgrund der obenstehenden Faktoren eignen sich Magnesiumsulfat sowie das Lösungsgemisch nicht, um innerhalb eines Standard-Normversuches verschiedene Betone bezüglich Dehnung zu unterscheiden. Zudem führt bei hohen w/b-Werten in reinem Natriumsulfat der CEM III/B trotz geringem Reaktionspotential ebenfalls zu relativ grossen Dehnungen, was für die Unterscheidung der w/b-Werte günstig ist. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, für den Standard-Normversuch weiterhin Natriumsulfat als Prüflösung zu verwenden.

4.2.7 Folgerungen für den definitiven Prüfablauf

Aufgrund dieser Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die Umkehrung der Trocknungs- und Tränkungszyklen (5 Tage Trocknung, 2 Tage Tränkung, 4 Zyklen) zu einem erhöhten Sulfateintrag führt, ohne dass sich der Prüfablauf in dieser ersten Phase für die Prüfinstitute massgeblich ändert. Durch die anschliessende Zusatzlagerung erhöht sich zwar die Prüfungsdauer insgesamt, jedoch ist dadurch gewährleistet, dass genügend Reaktionszeit zur Verfügung steht, um die notwendigen Sulfatmineralien zu bilden, bei welchen es sich nach wie vor um Ettringit handelt. Dadurch ergeben sich deutlich grössere Dehnungen und die Betone sind bezüglich Bindemittel sowie w/b-Wert besser unterscheidbar. Eine Beurteilung der gemessenen Dehnung erscheint als ausreichend, eine Auswertungsformel ist nicht mehr notwendig. Die Sulfatlösungsaufnahme während der vier Trocknungs- und Tränkungszyklen sollte allerdings informativ nach wie vor bestimmt werden, da diese bei der Interpretation der Resultate hilfreich sein kann. Wie sich gezeigt hat, sind eine 5%ige Natriumsulfatlösung sowie eine Trocknungstemperatur von 50°C zweckmässig, so dass sich diesbezüglich keine Änderung in Bezug auf die bestehende Normprüfung ergeben.

Daraus ergibt sich ein möglicher Ablauf für die Normprüfung, wie er in Kap. 3.2.3 beschrieben ist. Dieser Prüfablauf wurde in der 2. Phase des Projektes anhand einer vergrösserten Prüfmatrix verschiedener Betone validiert (Kap. 4.3). Vorteil dieses angepassten Prüfverfahrens ist es unter anderem, dass bestehende Prüfgeräte in den Labors weiterhin benutzt werden können und bis jetzt gemachte Erfahrungen aufgrund des ähnlichen Prüfablaufes nach wie vor von Bedeutung sein können.

4.3 Phase 2: Validierung des Prüfablaufes aus Phase 1

Der Prüfablauf für die Phase 2, welcher basierend auf den Resultaten der Phase 1 festgelegt wurde, ist in Kap. 3.2.3 definiert. Die Matrix der verwendeten Betonsorten kann Kap. 3.4.2 entnommen werden.

4.3.1 Sulfatwiderstandsprüfungen

Nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen weisen alle Betone mit CEM I als Bindemittel eine vergleichbare Dehnung auf (Abb. 4.34, rechts). Gleiches gilt für die in Wasser geprüften Bohrkerne, wobei die Dehnung im Wasser generell kleiner ist. Während der Zusatzlagerung werden die Dehnungen im Natriumsulfat deutlich grösser, wobei erhebliche Unterschiede zwischen den w/b-Werten und den verschiedenen Leimvolumina entstehen. Die Abstufung der verschiedenen Betone in Bezug auf die Dehnung entspricht dabei den Erwartungen: Mit zunehmendem w/b-Wert sowie zunehmendem Bindemittelleimvolumen nehmen auch die Dehnungen zu, wobei innerhalb der geprüften Betonmatrix der Einfluss des w/b-Wertes grösser ist als der Einfluss des Bindemittelleimvolumens. Die Dehnungen in Natriumsulfat unterscheiden sich für alle geprüften Betone deutlich von denjenigen in Wasser.

Von den beiden Betonen, an denen eine Doppelbestimmung durchgeführt wurde, weist der w/b = 0.60 bis fast am Prüfende eine praktisch identische Dehnung der beiden Serien

auf. Beim SCC mit $w/b = 0.45$ weisen die Dehnungen am Prüfende zwar eine Differenz von 44% des Mittelwertes auf, trotzdem ist diese Differenz aber kleiner als die Unterschiede zwischen den verschiedenen Betonen.

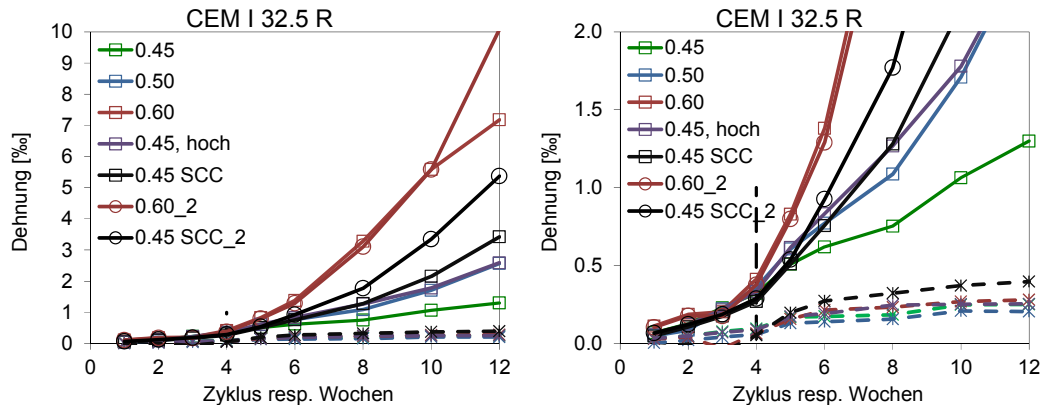


Abb. 4.34 Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung für die Betone mit CEM I als Bindemittel (unterschiedliche w/b -Werte und Bindemittelleimvolumina). Beton mit $w/b = 0.60$ und SCC mit $w/b = 0.45$ mit Doppelbestimmung. Gestrichelte Linien: Dehnungen bei Prüfung in Wasser. Links: Gesamtdehnungen, rechts: Detailausschnitt von Abbildung links.

Bei den Betonen hergestellt mit den als sulfatbeständig geltenden Zementen CEM III/B und CEM I HS sind die Dehnungen deutlich kleiner als bei den Betonen mit CEM I als Bindemittel (Abb. 4.35). Aufgrund des geringen Reaktionspotentials ist auch der Einfluss des w/b -Wertes und des Bindemittelleimvolumens nur noch klein.

Beim CEM I HS als Bindemittel weisen alle Betone eine vergleichsweise kleine Dehnungszunahme während der Zusatzlagerung auf und die Dehnungen am Versuchsende sind ähnlich gross (Abb. 4.35, rechts). Beim CEM III/B als Bindemittel ist die Dehnungszunahme in Natriumsulfat während der Zusatzlagerung ebenfalls relativ klein, wobei sie aber grösser ist als bei den entsprechenden Bohrkernen, welche in Wasser geprüft wurden (Abb. 4.35, links). Die grössten Dehnungen weisen dabei die Betone mit $w/b = 0.60$ sowie dem erhöhten Leimvolumen auf, wobei in diesen beiden Fällen der Hauptteil der Dehnungen während der Trocknungs- und Tränkungszyklen auftritt.

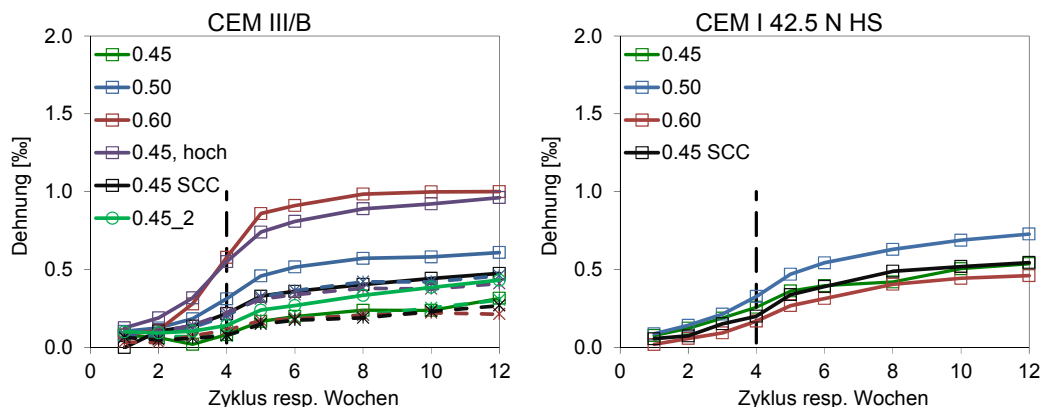


Abb. 4.35 Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung für die Betone mit CEM III/B (links) sowie CEM I HS (rechts) als Bindemittel (unterschiedliche w/b -Werte und Bindemittelleimvolumina). Beton mit $w/b = 0.45$ und CEM III/B als Bindemittel mit Doppelbestimmung. Gestrichelte Linien: Dehnungen bei Prüfung in Wasser.

Bei den Betonen mit CEM II/A-LL und CEM II/B-M als Bindemittel sind die Dehnungen nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen für alle Betone sehr ähnlich (Abb. 4.36). Erst während der Zusatzlagerung entstehen grosse Dehnungsunterschiede. Beim CEM II/B-M nimmt die Dehnung am Prüfende mit zunehmendem w/b-Wert sowie zunehmendem Bindemittelleimvolumen ebenfalls deutlich zu (Abb. 4.36, rechts). Ähnliches gilt auch für den CEM II/A-LL (Abb. 4.36, links) wobei hier der Einfluss des Bindemittelleimvolumens deutlich grösser ist als beim CEM II/B-M. Zudem weist der Beton mit w/b = 0.60 zwar zu Beginn eine grössere Dehnung auf als der Beton mit w/b = 0.50, durch die reduzierte Dehnungszunahme während der letzten vier Wochen der Zusatzlagerung ist die Dehnung am Versuchsende aber kleiner als beim w/b = 0.60. Dies bei insgesamt sehr grossen Dehnungen von 6 – 7 ‰.

Bemerkung zu Abb. 4.36: Die Enddehnung des Betons mit CEM II/B-M und w/b = 0.60 beträgt 17.07 ‰ und ist im Diagramm rechts nicht dargestellt, da sonst die Dehnung der weiteren Betone nicht mehr erkennbar wäre. Beim SCC-Beton mit CEM II/A-LL und w/b = 0.45 haben sich gegen Ende der Prüfung aufgrund der grossen Dehnungen und der damit zusammenhängenden Zerstörung des Betons sämtliche Messbolzen von der Oberfläche gelöst. Aus diesem Grund verläuft die entsprechende Dehnung im linken Diagramm nur bis 10 Wochen.

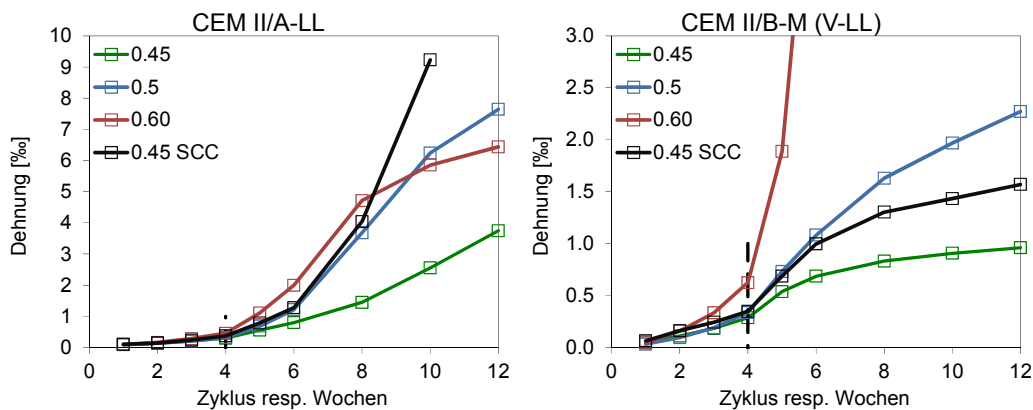


Abb. 4.36 Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung für die Betone mit CEM II/A-LL (links) sowie CEM II/B-M (rechts) als Bindemittel (unterschiedliche w/b-Werte und Bindemittelleimvolumina).

Die totale Sulfatlösungsaufnahme während der vier Trocknungs- und Tränkungszyklen nimmt mit zunehmendem w/b-Werte ebenfalls zu (Abb. 4.37). Die Betone mit CEM III/B als Bindemittel weisen generell die geringste Lösungsaufnahme auf, gefolgt von den Betonen mit CEM I. Bei den Betonen mit CEM I HS, CEM II/B-M und CEM II/A-LL ist die Lösungsaufnahme vergleichbar gross und generell deutlich höher als bei den anderen beiden Bindemitteltypen.

Die Betone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen sowie die SCC-Beton weisen bei gleichem w/b-Wert eine höhere Lösungsaufnahme auf als die zugehörigen Normalbetone mit gleichem Bindemitteltyp, da ein erhöhtes Bindemittelleimvolumen auch einen höheren prozentualen Anteil füllbaren Porenraum bedeutet.

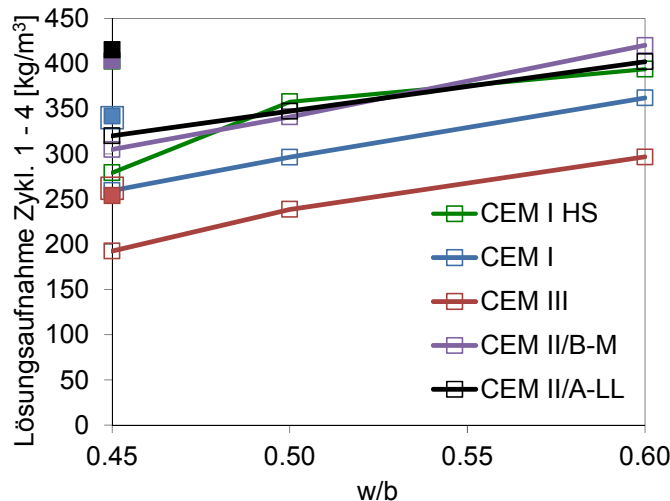


Abb. 4.37 Kumulierte Lösungsaufnahme während der vier Trocknungs- und Tränkungszyklen in Abhängigkeit des w/b-Wertes. Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

4.3.2 Änderung des dynamischen E-Moduls

Ziel der Messung des dynamischen E-Moduls an Bohrkernen während der Sulfatwiderstandsprüfung (vgl. Kap. 3.3.4) war es abzuklären, ob eine Korrelation zwischen der gemessenen Dehnung und einer weiteren mechanischen Eigenschaft des Betons (in diesem Fall der dynamische Elastizitätsmodul) besteht.

Nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen hat sich der E-Modul bei praktisch allen Betonen unabhängig von Bindemittel und Leimvolumen nicht mehr als ca. $\pm 15\%$ verändert (Abb. 4.38). Es gibt zudem keine Abhängigkeit zwischen der Änderung des E-Moduls und dem w/b-Wert. Einzig bei den Betonen mit CEM III/B als Bindemittel und w/b = 0.60 resp. hohem Leimvolumen zeigt sich eine Abnahme von 40-50 %.

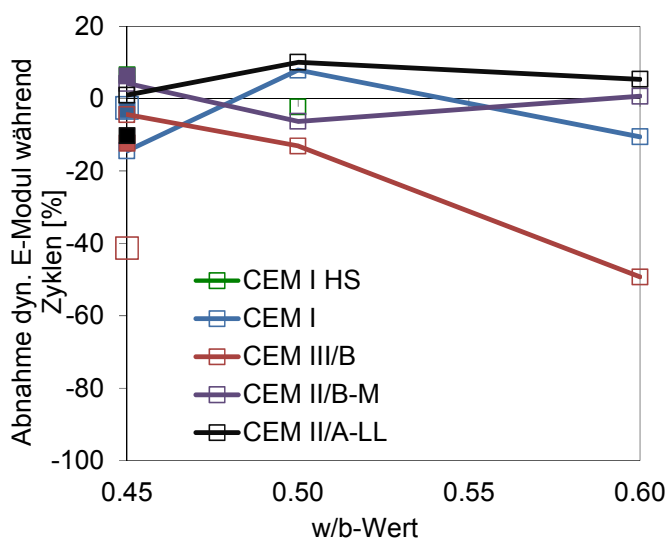


Abb. 4.38 Abnahme des dynamischen E-Moduls der Prüfkörper während der Sulfatwiderstandsprüfung von Prüfbeginn bis Ende der Trocknungs- und Tränkungszyklen in Abhängigkeit des w/b-Wertes. Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

Am Versuchsende sind deutliche Unterschiede in der Abnahme des dynamischen E-Moduls zwischen den verschiedenen Bindemitteltypen und den Leimvolumina vorhanden (Abb. 4.39, links). Die Betone mit erhöhtem Leimvolumen führen zu einer grösseren Abnahme des E-Moduls verglichen mit den zugehörigen Betonen mit geringerem Leimvolumen aber gleichem w/b-Wert. Beim SCC ist die Abnahme des E-Moduls ebenfalls grösser verglichen mit dem tiefen Leimvolumen, allerdings nur dann, wenn auch beim Normalbeton eine Abnahme des E-Moduls stattfindet (CEM II/A-LL und CEM I). In den Fällen, in denen der Normalbeton keinen Abfall des E-Moduls zeigt, ist auch beim SCC keine messbare Reduktion vorhanden.

Im Weiteren ist eine erhöhte Abnahme des E-Moduls mit zunehmendem w/b-Wert zu erkennen. Dies gilt insbesondere für die Betone mit CEM I und CEM II/B-M als Bindemittel. Die Betone mit CEM II/A-LL weisen unabhängig vom w/b-Wert generell einen hohen Abfall des E-Moduls auf. Bei den Betonen mit den Bindemitteln CEM I HS und CEM III/B weisen die Probekörper am Versuchsende grundsätzlich eine geringe Änderung des E-Moduls auf (maximal ca. +/- 10%). Wie schon beim E-Modul nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen zeigen auch am Prüfende die beiden Betone mit CEM III/B als Bindemittel und w/b = 0.60 resp. hohem Leimvolumen grössere Abnahmen des E-Moduls im Bereich von 30 – 40 %.

Bei den genau gleichen Betonen ergibt sich auch bei der Prüfung in Wasser anstelle von Natriumsulfat am Prüfende ein erhöhter Abfall des E-Moduls, während die übrigen Betone mit CEM III/B sowie mit CEM I praktisch keine Veränderung des E-Moduls zeigen (Abb. 4.39, rechts).

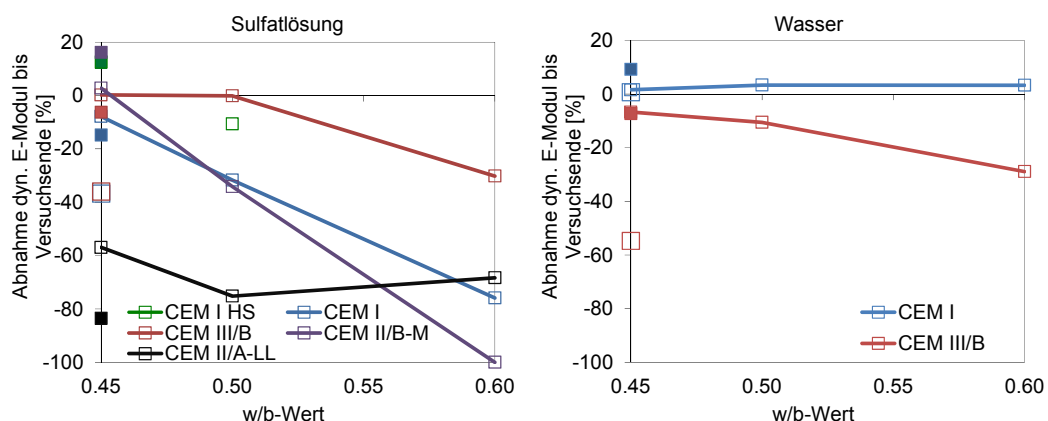


Abb. 4.39 Abnahme des dynamischen E-Moduls der Prüfkörper während der Sulfatwiderstandsprüfung von Prüfbeginn bis Prüfende in Abhängigkeit des w/b-Wertes. Links: Prüfung in Sulfatlösung, rechts: Prüfung in Wasser. Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

4.3.3 Sulfateindringtiefe

Das Schwefelprofil wurde innerhalb dieser Phase 2 nur noch von zwei Betonen mit CEM II/A-LL bestimmt (w/b = 0.45 und 0.60, normales Leimvolumen), welche Kalkstein im System enthalten. Dies deshalb, weil von den Betonen mit CEM I und CEM III/B bereits in der Phase 1 Schwefelprofile aufgenommen wurden und von den Betonen mit den restlichen Bindemitteln kein wesentlicher Erkenntnisgewinn mehr erwartet werden konnte.

Beim Beton mit w/b = 0.60 ist über den ganzen Prüfkörperquerschnitt ein höherer Schwefelgehalt vorhanden als beim Beton mit w/b = 0.45 (Abb. 4.40). Die Natriumgehalte sind

bei beiden Betonen relativ klein und es ist höchstens eine Tendenz zu höheren Gehalten im Randbereich des Betons mit $w/b = 0.60$ zu erkennen. Daraus kann gefolgert werden, dass das Natrium nicht in die Betonmatrix eingebunden wird. Gleiches wurde auch schon im Grundlagenprojekt [VSS1355, 2011] festgestellt.

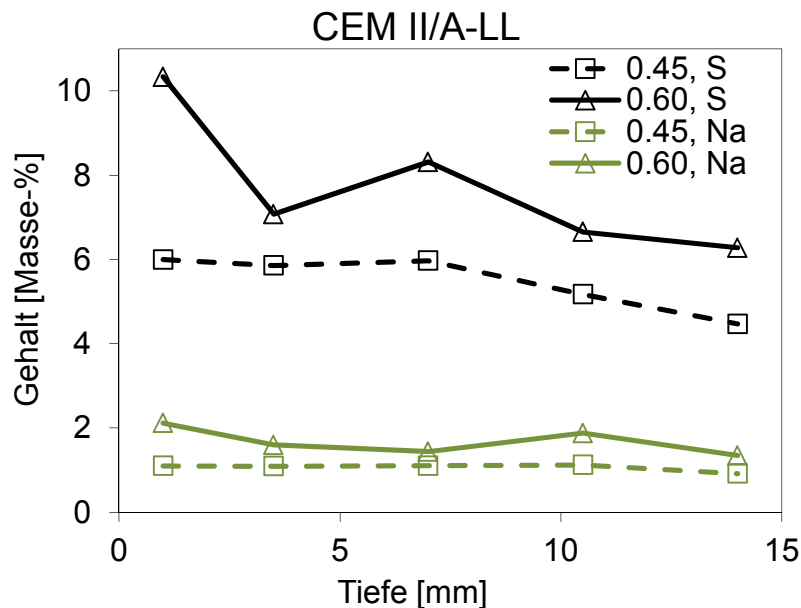


Abb. 4.40 Schwefel- und Natriumprofil nach Versuchsende in Funktion der Tiefe ab Prüfkörperoberfläche bestimmt am Beton mit CEM II/A-LL als Bindemittel und verschiedenen w/b -Werten.

4.3.4 Mineralphasen

Die Mineralphasenzusammensetzung wurde ebenfalls an den gleichen beiden Betonen bestimmt, an denen schon die Schwefelprofile aufgenommen wurden.

Sowohl beim Beton mit $w/b = 0.45$ als auch beim Beton mit $w/b = 0.60$ ist in allen Tiefen ein deutlicher Shift Richtung Ettringit zu erkennen (Abb. 4.41). Insbesondere beim $w/b = 0.60$ sind aber kaum mehr Unterschiede zwischen den verschiedenen Tiefen betreffend Mineralbildung vorhanden. Dies bedeutet, dass in diesem Fall die Bildung von Ettringit in allen Tiefen etwa ähnlich stark ausgebildet ist.

Obwohl der Zement gemahlenes Kalksteinmehl enthält, sind bei beiden Proben keine Anzeichen für eine Thaumasitbildung vorhanden. Zudem gibt es keine Indizien für eine Gipsbildung.

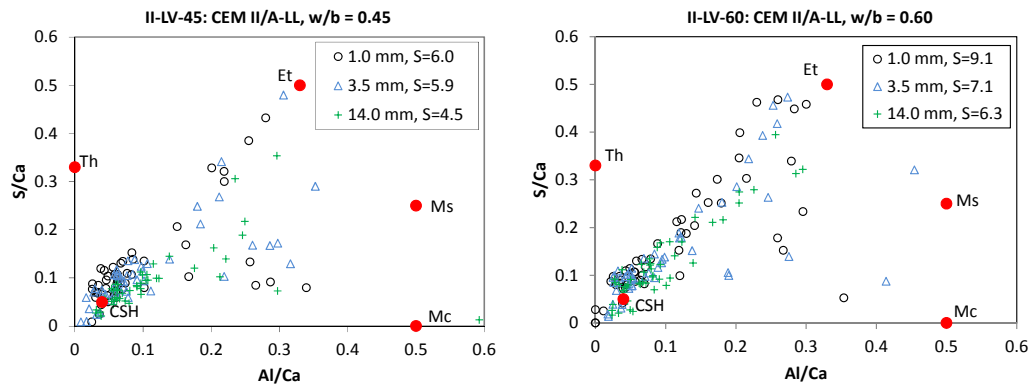


Abb. 4.41 Zusammensetzung der Analysepunkte in verschiedenen Tiefen ab Prüfkörperoberfläche nach Prüfende. Links: Beton mit $w/b = 0.45$, rechts: Beton mit $w/b = 0.60$.

4.3.5 Diskussion der Resultate

Nach vier Trocknungs- und Tränkungszyklen sind die Bindemittel und die verschiedenen w/b -Werte bezüglich Dehnung nicht zuverlässig unterscheidbar (Abb. 4.42, links). Insbesondere beim $w/b = 0.50$ führen alle Bindemittel zur gleichen Dehnung. Am Versuchsende nach der Zusatzlagerung sind hingegen deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Bindemitteln und, abhängig vom Bindemitteltyp, auch zwischen den verschiedenen w/b -Werten vorhanden (Abb. 4.42, rechts).

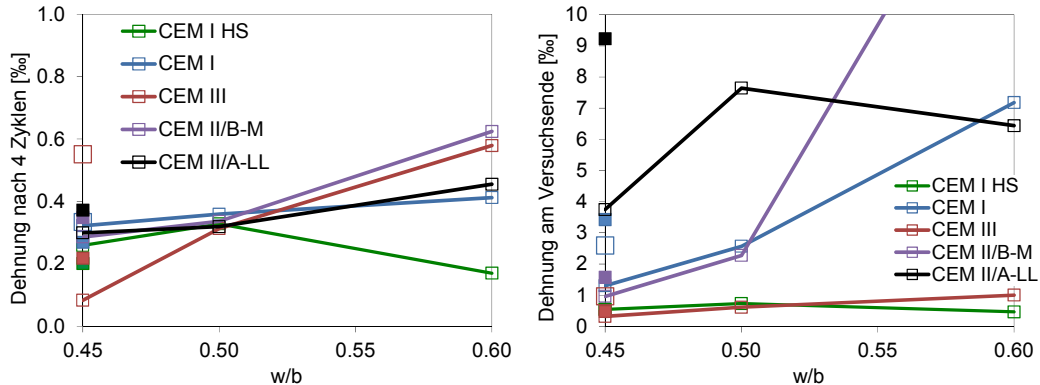


Abb. 4.42 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung in Abhängigkeit des w/b -Wertes, links: nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen, rechts: am Versuchsende. Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

Die Betone mit den sulfatbeständigen Zementen CEM I HS und CEM III/B zeigen im Vergleich mit den übrigen Zementen unabhängig vom w/b -Wert und Bindemittelleimvolumen kleine Dehnungen. Dies liegt daran, dass die Zemente aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung ein geringes Potential besitzen, um Ettringit zu bilden. Mit zunehmendem w/b -Wert nimmt zudem zwar die Permeabilität zu (Abb. 4.13) und somit auch die Sulfatlösungsaufnahme (Abb. 4.37), allerdings sinkt gleichzeitig auch der Zementgehalt und somit das Ettringitbildungspotential. Diese beiden Effekte überlagern sich und führen somit im Falle der sulfatbeständigen Zemente zu einer ähnlichen Dehnung am Versuchsende.

Bei den Zementen CEM I und CEM II/B-M ist in Abb. 4.42 eine deutliche Zunahme der

Dehnung mit zunehmendem w/b-Wert zu erkennen, wobei die Dehnungszunahme beim Beton mit CEM II/B-M und w/b = 0.60 überproportional gross ist. Dies dürfte allerdings damit zusammenhängen, dass die Bohrkern bei grossen Dehnungen allmählich Risse bekommen (Abb. 4.43) und somit auch die Streuung der Resultate zunimmt. Obwohl der CEM II/B-M einen reduzierten Klinkergehalt aufweist, sind die Dehnungen bei identischem w/b-Wert trotzdem ähnlich gross wie beim CEM I. Dies kann damit erklärt werden, dass die Betone mit CEM II/B-M bei gleichem w/b-Wert eine grössere Permeabilität aufweisen und somit auch eine grössere Sulfatlösungsaufnahme während der Trocknungs- und Tränkungszyklen (Abb. 4.37).



Abb. 4.43 Bohrkern mit einer Dehnung von $> 10\text{‰}$ nach Ende der Sulfatwiderstandsprüfung mit ausgeprägter Rissbildung.

Die Betone mit CEM II/A-LL als Bindemittel weisen bei den tieferen beiden w/b-Werten von allen hier geprüften Betonen die grössten Dehnungen auf (Abb. 4.42). Zwar ist die Permeabilität und somit die Sulfatlösungsaufnahme ebenfalls höher als bei den Betonen mit CEM I, jedoch nicht höher als bei den Betonen mit CEM II/B-M. Allerdings ist der Klinkergehalt im Fall des CEM II/A-LL höher als beim CEM II/B-M, wodurch die generell höheren Dehnungen erklärt werden können. Hingegen ist im Falle des CEM II/A-LL keine eindeutige Abhängigkeit vom w/b-Wert mehr zu erkennen. Im Verlauf der Dehnungen (Abb. 4.36) ist zu erkennen, dass der Beton mit w/b = 0.60 zu Beginn zwar die grösseren Dehnungen aufweist, im Verlaufe der Zusatzlagerung dann aber stärker abflacht als der Beton mit w/b = 0.50. Der Grund dürfte darin liegen, dass der w/b = 0.60 eine grössere Permeabilität und eine grössere Sulfatlösungsaufnahme aufweist als der w/b = 0.50 und deshalb zu Beginn grössere Dehnungen zeigt. Allerdings ist der Zementgehalt beim Beton mit w/b = 0.60 kleiner und somit auch das Ettringitbildungspotential, weshalb die Dehnung nach einer gewissen Zeit in der Zusatzlagerung abflacht. Darauf deutet auch das Mineralphasendiagramm hin (Abb. 4.41, rechts): Ettringit ist nach dem Prüfende auf dem ganzen Prüfkörperquerschnitt deutlich nachweisbar, was ein Indiz dafür ist, dass das Ettringitbildungspotential ausgeschöpft sein dürfte.

Mit zunehmendem Bindemittelleimvolumen nimmt die während der Sulfatwiderstandsprüfung gemessene Dehnung tendenziell ebenfalls zu, wobei diese Zunahme von der Grösse der Dehnung insgesamt abhängig ist. Bei geringen Dehnungen ist die Dehnungszunahme mit zunehmendem Leimvolumen ebenfalls klein und sie wird grösser bei zunehmenden Dehnungen. Somit können auch die verschiedenen Leimvolumina unterschieden werden, wobei der Einfluss des Leimvolumens wie erwartet zementspezifisch ist.

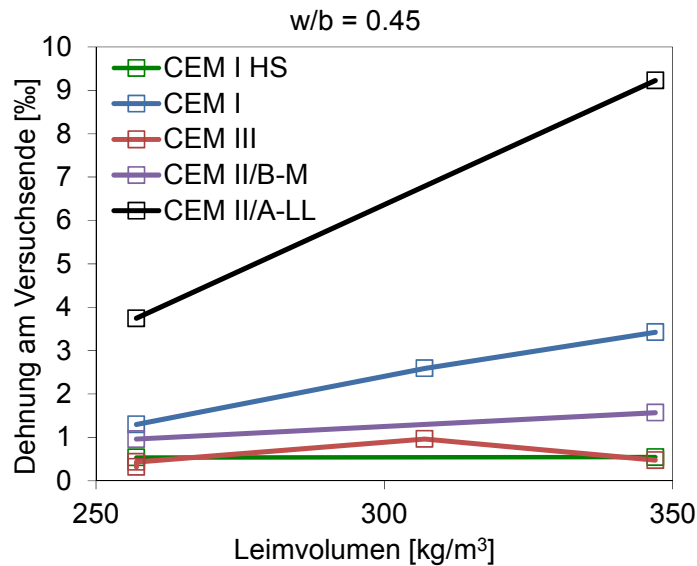


Abb. 4.44 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung in Abhängigkeit des Bindemittelleimvolumens und der Zementart, Betone mit $w/b = 0.45$.

Wie aus Abb. 4.45 ersichtlich ist, braucht es unabhängig von der Betonsorte während den Trocknungs- und Tränkungszyklen eine gewisse Lösungsaufnahme, bis überhaupt eine grössere Dehnung auftreten kann. Bei den geprüften Betonen wurde keine grössere Dehnung unterhalb einer Sulfatlösungsaufnahme von ca. 260 kg/m^3 gemessen. Oberhalb dieses Wertes treten mit zunehmender Lösungsaufnahme Unterschiede zwischen den verschiedenen Bindemittelsorten auf, wobei die Betone mit CEM III/B aufgrund ihrer geringen Permeabilität nie wesentlich über dieser Grenze liegen. Die in Wasser geprüften Bohrkerne zeigen unabhängig vom Bindemitteltyp auch bei grossen Lösungsaufnahmen nur kleine Dehnungen. Allerdings ist eine Tendenz zu geringeren Dehnungen bei gleicher Lösungsaufnahme im Falle von zunehmendem Leimvolumen zu erkennen. Wird die Dehnung jedoch gegen die Lösungsaufnahme pro m^3 Bindemittelleimvolumen aufgetragen, entsteht das gegenteilige Bild: mit zunehmendem Leimvolumen wird die Dehnung bei gleicher Lösungsaufnahme tendenziell grösser, was mit dem geringeren Behinderungsgrad durch die Gesteinskörnung zusammenhängen dürfte.

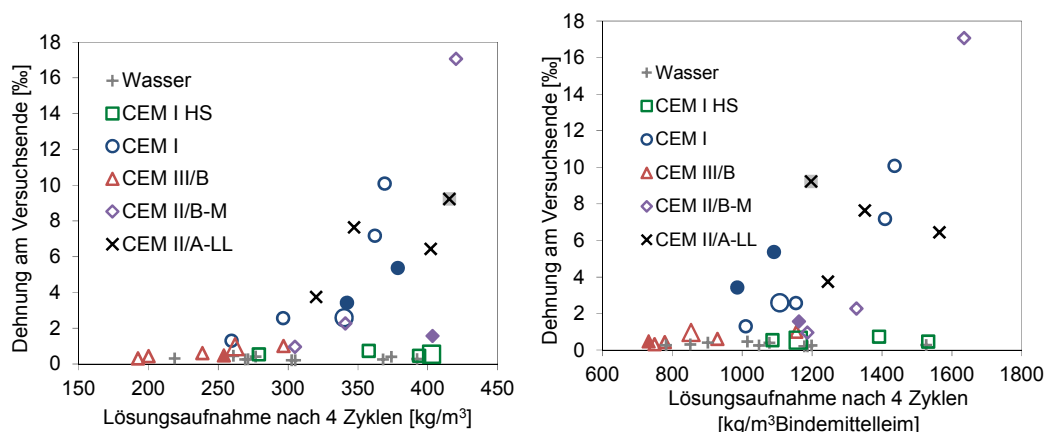


Abb. 4.45 Dehnung am Versuchsende in Abhängigkeit der totalen Lösungsaufnahme während den Trocknungs- und Tränkungszyklen für die untersuchten Betone, links: pro m^3 Beton, rechts: pro m^3 Bindemittelleimvolumen. Graue Kreuze: in Wasser geprüfte Serien (alle Betone), grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

Wird die Abnahme des dynamischen E-Moduls der Prüfkörper von Prüfbeginn bis Prüfende gegenüber der am Prüfende gemessenen Dehnung aufgetragen, ergibt sich das Bild gemäss Abb. 4.46, links. Dabei ist zu beachten, dass für den Ausgangswert nur 1 Bohrkern und für den Endwert 2 Bohrkern gemessen wurden, wobei die Bohrkern für den Anfangs- und Endwert nicht identisch waren. Aus diesem Grund ergibt sich eine relativ grosse Streuung der Messwerte. Diese Streuung dürfte auch der Grund sein, weshalb gewisse Betone eine Zunahme des E-Moduls von Prüfbeginn bis Prüfende von bis zu ca. 15 % aufweisen.

Grundsätzlich ist eine Tendenz einer grösseren Abnahme des E-Moduls mit zunehmender Dehnung zu erkennen, wobei der Grossteil der Betone erst ab einer Dehnung von etwa 1.5‰ einen zunehmenden Abfall des E-Moduls aufweisen. Einzig die Betone mit CEM III/B als Bindemittel und $w/b = 0.60$ resp. $w/b = 0.45$ und erhöhtem Leimvolumen zeigen sowohl bei der Prüfung in Natriumsulfat (schwarz eingekreiste Punkte in Abb. 4.46, links) als auch bei der Prüfung in Wasser (schwarz gestrichelt eingekreiste Punkte in Abb. 4.46, links) bei relativ geringen Dehnungen eine Abnahme des E-Moduls von 30 – 50%. Dies sind aber auch genau die beiden Betone, welche während den Trocknungs- und Tränkungszyklen in Natriumsulfat eine relativ grosse Dehnung (Abb. 4.35, links) sowie eine deutliche Abnahme des dynamischen E-Moduls zeigen (Abb. 4.38). Da auch die in Wasser geprüften Betone trotz geringen Dehnungen am Versuchsende einen deutlichen Abfall des E-Moduls zeigen, liegt die Vermutung nahe, dass bei gewissen Betonmischungen mit CEM III/B durch die Trocknungs- und Tränkungszyklen eine Schädigung des Betons verursacht wird unabhängig davon, welche Prüflösung verwendet wird. Der Grund dürfte darin liegen, dass das CSH dieses Zementsteines ein tieferes Ca/Si-Verhältnis aufweist und somit mehr Wasser im CSH gebunden werden kann. Beim Trocknungsprozess schwindet der Zementstein somit stärker was zu entsprechenden Schäden führen kann. Die Dehnungszunahme während der Zusatzlagerung liegt für diese beiden Betone trotz der potentiellen Vorschädigung jedoch im Bereich der übrigen Betone mit CEM III/B als Bindemittel (Abb. 4.35, links), was darauf hindeutet, dass diese Vorschädigung keinen signifikanten Einfluss hat.

Da die wesentlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen w/b -Werten und Bindemitteltypen bezüglich Dehnung erst während der Zusatzlagerung entstehen, wäre es deshalb sinnvoll, für eine Beurteilung nur die Dehnung während der Zusatzlagerung zu betrachten. Dadurch würde auch die Problematik der verhältnismässig grossen Dehnungen gewisser Betone mit CEM III/B während der anfänglichen Zyklen entschärft. Berücksichtigt man nur den Abfall des dynamischen E-Moduls während der Zusatzlagerung und trägt diesen gegen die Dehnung während der Zusatzlagerung auf, zeigen nun alle geprüften Betone unterhalb von ca. 1.0 - 1.5 ‰ keinen Abfall des dynamischen E-Moduls mehr (Abb. 4.46, rechts).

Unabhängig davon, ob die anfänglichen Trocknungs- und Tränkungszyklen mitberücksichtigt werden, zeigen die Betone mit zunehmendem Leimvolumen bei einer gegebenen Dehnung eine Tendenz zu geringerer Abnahme des E-Moduls (Abb. 4.46, links und rechts). Dies erscheint logisch, da mit zunehmendem Bindemittelleimvolumen die Behinderung durch die Gesteinskörnung abnimmt und somit Risse in der Zementsteinmatrix erst bei grösseren Dehnungen zu erwarten sind.

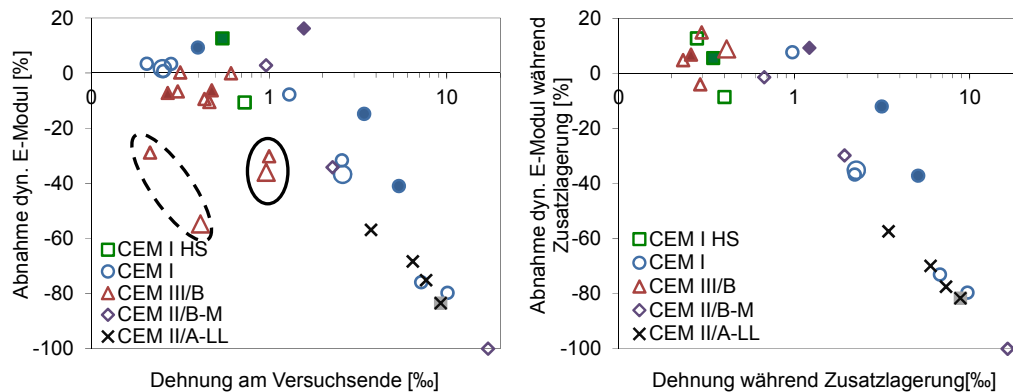


Abb. 4.46 Abnahme des dynamischen E-Moduls der Bohrkerne während der Sulfatwiderstandsprüfung im Vergleich mit der gemessenen Dehnung für verschiedene Bindemitteltypen. Eingezeichnet sind alle Betone pro Bindemittel, für die Messwerte des dynamischen E-Moduls vorliegen (inkl. Prüfungen im Wasser und Doppelbestimmungen). Links: von Versuchsbeginn bis Versuchsende, rechts: während Zusatzlagerung (hier fehlen die Resultate der Prüfungen in Wasser da in diesen Fällen nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen keine E-Modul-Messungen durchgeführt wurden). Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

4.3.6 Schlussfolgerungen

Aus dieser Validierung und der in diesem Zusammenhang geprüften Matrix an Betonen können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Mit dem vorgeschlagenen Prüfverfahren können Betone bezüglich Bindemitteltyp, w/b-Wert und Bindemittelleimvolumen plausibel bezüglich der gemessenen Dehnung am Versuchsende unterschieden werden.
- Es besteht ein Zusammenhang zwischen der gemessenen Dehnung und dem Schädigungsgrad der Prüfkörper, ausgedrückt durch den Abfall des dynamischen E-Moduls. Die Dehnung kann also als Beurteilungskriterium für den Sulfatwiderstand verwendet werden.
- Es wird während der Prüfung in allen untersuchten Fällen (auch Proben aus Phase 1) Ettringit als Hauptmineral gebildet und weder Gips noch Thaumasit. Somit kann auch bezüglich Mineralphasenbildung die Expansion durch Ettringit als Kriterium für die Schädigung verwendet werden.
- Mit zunehmendem Bindemittelleimvolumen nimmt die Dehnung bei gleicher Sulfatlösungsaufnahme pro m^3 Bindemittelleimvolumen ebenfalls zu, während die Schädigung (= Abnahme des dynamischen E-Moduls) bei gleicher Dehnung aber kleiner ist. Beides hängt mit dem kleineren Behinderungsgrad durch die Gesteinskörner zusammen. Dies bedeutet, dass die Betone bei dieser Prüfung bei zunehmendem Bindemittelleimvolumen zunehmend konservativ beurteilt werden.
- Bei gewissen Betonen mit CEM III/B als Bindemittel können die Tränkungs- und Trocknungszyklen zu einer Vorschädigung der Zementsteinmatrix führen. Die Erfahrungen lassen vermuten, dass dies schon bei der bestehenden Sulfatwiderstandsprüfung der Fall gewesen sein dürfte (vgl. z. B. unerklärlicher Ausreisser in Bericht Grundlagenprojekt, [VSS1355, 2011]). Werden nur die Dehnungen während der Zusatzlagerung berücksichtigt, hat diese Vorschädigung keinen Einfluss auf das Prüfergebn mehr.

Die Prüfung eignet sich somit grundsätzlich für eine Normierung und die materialtechnologische Überprüfung von Betonmischungen. Aus dem Zusammenhang Dehnung und Abfall des E-Moduls als Mass für die Schädigung lassen sich zudem Vorschläge für allfällige Grenzwerte ableiten.

4.4 Vergleichsversuche

4.4.1 Messwerte

In den nachfolgenden Diagrammen Abb. 4.47 bis Abb. 4.52 sind die von den verschiedenen Labors gemessenen Dehnungen für die sieben innerhalb des Vergleichsversuches geprüften Betone in Funktion der Zeit abgebildet.

Bei den drei Betonen mit den sulfatbeständigen Zementen CEM I HS und CEM III/B massen alle Labors eine verhältnismässig kleine Dehnung von maximal ca. 0.5 ‰ (Abb. 4.47 und Abb. 4.48). Die Dehnungen der Labore 3 und 4 sind tendenziell kleiner verglichen mit denjenigen der Labore 1 und 2. Zudem liegen die Dehnungen während den Trocknungs- und Tränkungszyklen bei den Laboren 3 und 4 im Bereich von 0 oder sind sogar negativ.

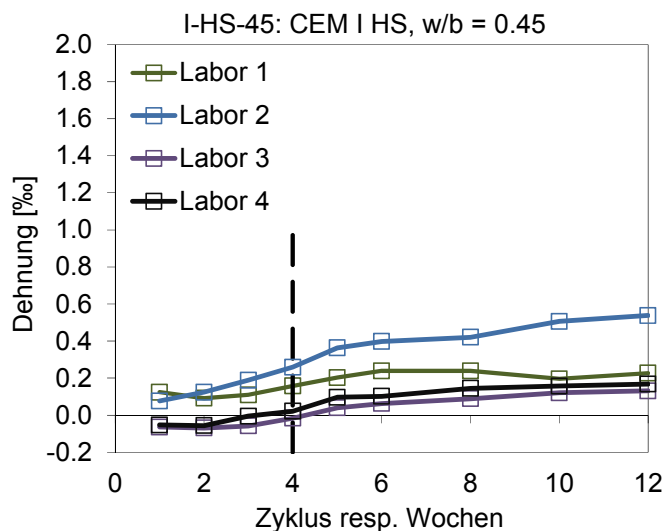


Abb. 4.47 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung am Beton I-HS-45 für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

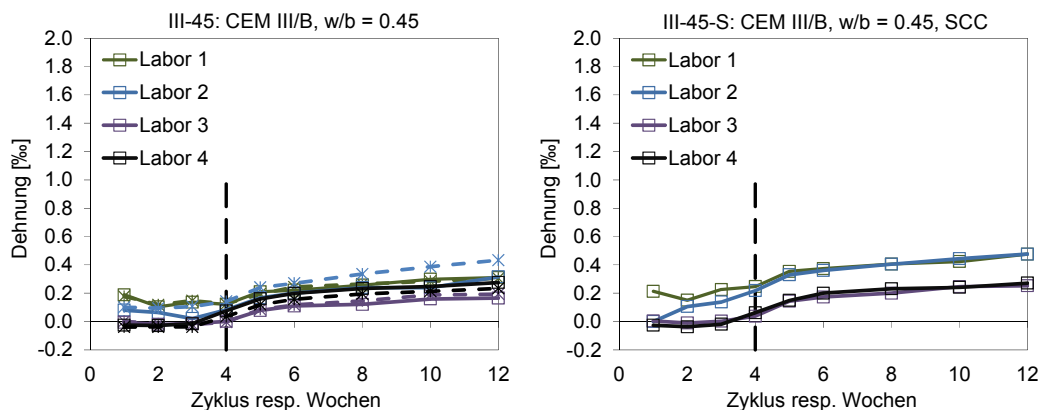


Abb. 4.48 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung an den Betonen III-45 (links) und III-45-S (rechts) für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen. Gestrichelte Linien im Diagramm links: Wiederholversuche.

Bei den Betonen mit CEM I als Bindemittel sind die gemessenen Dehnungen, abhängig von der Betonmischung, wesentlich grösser (Abb. 4.49 bis Abb. 4.52). Allerdings werden auch die Unterschiede zwischen den verschiedenen Labors deutlich grösser. Auch bei diesen Betonen ist eine generelle Tendenz zu höheren Dehnungen bei den Laboren 1 und 2 zu erkennen. Das Labor 4 hat bei allen Betonen die kleinsten Dehnungen gemessen. Insbesondere ist bei Labor 4 in allen Fällen mit CEM I als Bindemittel ein degressiver Verlauf der Dehnungen während der Zusatzlagerung zu erkennen, während die Dehnung bei den übrigen Labors progressiv verläuft.

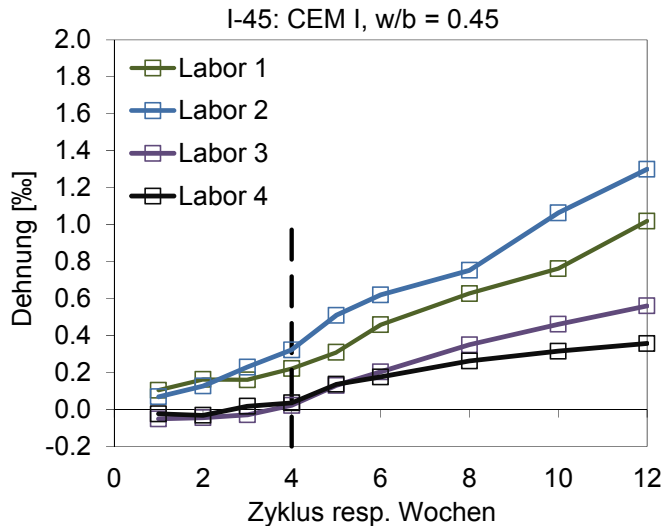


Abb. 4.49 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung am Beton I-45 für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen.

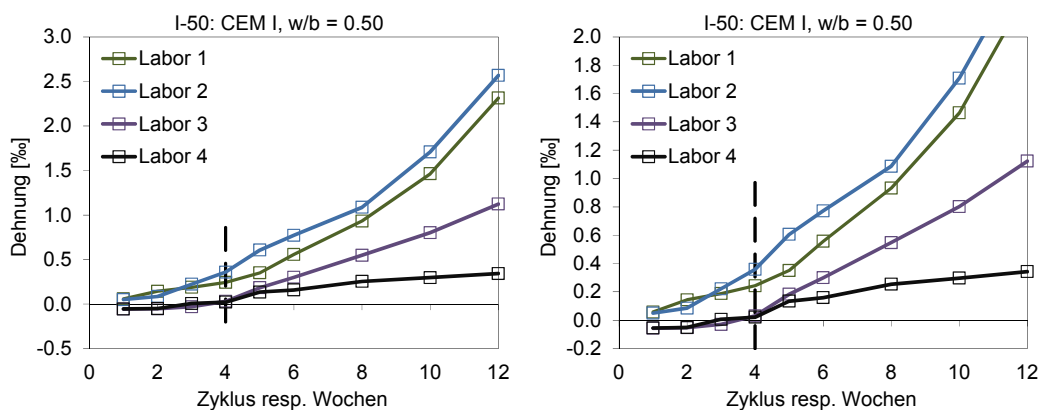


Abb. 4.50 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung am Beton I-50 für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen. Links: Gesamtdehnungen, rechts: Detailausschnitt von Abbildung links.

Bei den Betonen I-60 und I-45-S wurden Wiederholmessungen durchgeführt. Während die Wiederholbarkeit innerhalb der Labors bei der Mischung I-60 sehr gut ist (Abb. 4.51),

sind bei der Mischung I-45-S hingegen bei allen Labors grössere Unterschiede zwischen den zwei Serien vorhanden.

In der Spezifikation zum Vergleichsversuch wurden ergänzende Angaben zur maximalen Fläche der Stirnseite der Bohrkerns gemacht, welche durch Messbolzen und Leim abgedeckt werden darf. Da das Labor 1 grosse Messbolzen verwendet, wurde bei den ersten Versuchen wenig Leim verwendet, um diese Prüfspezifikation einzuhalten. Dadurch war jedoch die Haftung zwischen Bolzen und Prüfkörper nicht mehr optimal und die Messbolzen sind im Verlaufe der Prüfung abgefallen. Aus diesem Grund reichen die Messwerte von Labor 1 bei den Betonen I-60 und I-45-S nur bis 6 Wochen. Bis zu diesem Zeitpunkt ist immerhin ein ähnlicher Verlauf der Dehnungen wie bei Labor 2 und 3 zu erkennen. Für die übrigen Versuche wurde ein anderer Kleber mit besserer Haftung verwendet.

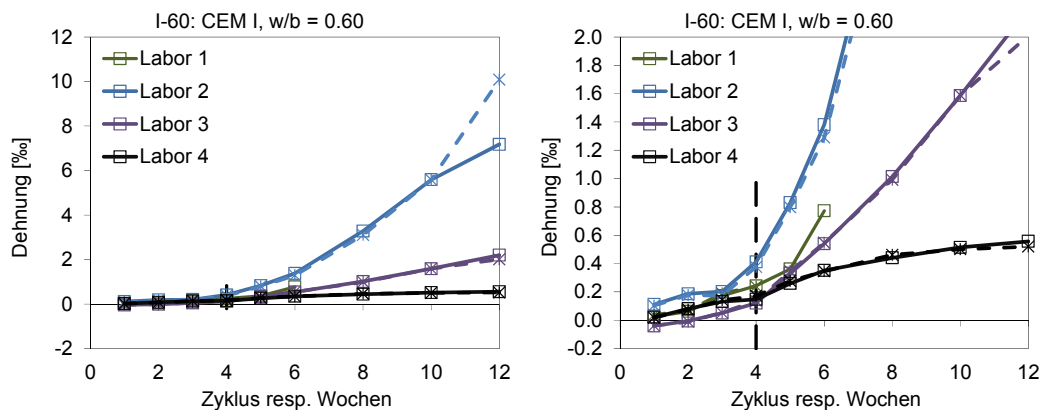


Abb. 4.51 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung am Beton I-60 für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen. Links: Gesamtdehnungen, rechts: Detailausschnitt von Abbildung links. Gestrichelte Linien: Wiederholversuche.

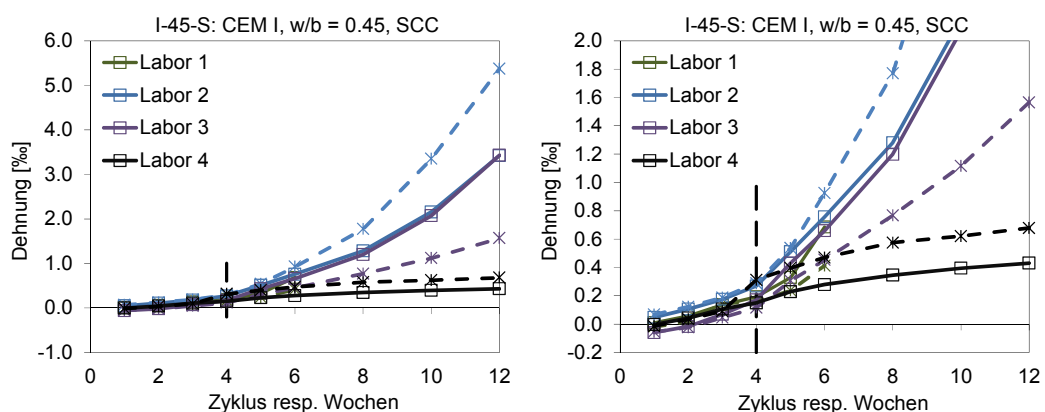


Abb. 4.52 Gemessene Dehnungen während der Sulfatwiderstandsprüfung am Beton I-45-S für die vier verschiedenen am Vergleichsversuch teilnehmenden Labors. 0 – 4 Zyklen resp. Wochen: Trocknungs- und Tränkungszyklen, anschliessend Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Zyklen. Links: Gesamtdehnungen, rechts: Detailausschnitt von Abbildung links. Gestrichelte Linien: Wiederholversuche.

Die Sulfatlösungsaufnahme während der Trocknungs- und Tränkungszyklen ist für die Labors 1, 2 und 3 für die meisten Betone ähnlich gross (Abb. 4.53). Einzig beim Beton I-45-S.1 weist das Labor 3 eine deutlich erhöhte Lösungsaufnahme auf. Beim Labor 4 ist die Lösungsaufnahme bei allen geprüften Betonen kleiner im Vergleich mit den anderen Laboren. Multipliziert man die Lösungsaufnahme des Labors 4 für alle Betone mit dem Faktor 1.2, liegen die Werte im Bereich der übrigen Labore. Dies bedeutet, dass die Lösungsaufnahme beim Labor 4 generell um einen relativ konstanten Faktor tiefer ist. Trotz Rückfrage beim entsprechenden Labor und dessen interner Nachforschung konnte kein plausibler Grund für die konstante Differenz in der Sulfatlösungsaufnahme gefunden werden.

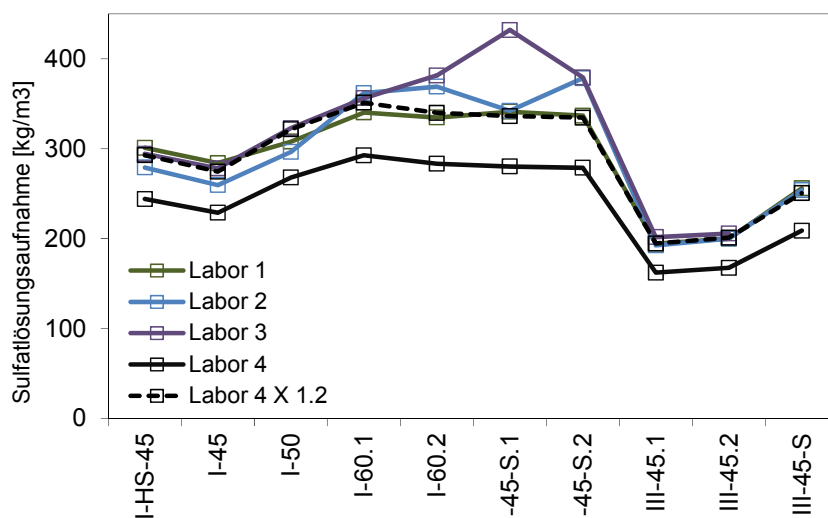


Abb. 4.53 Sulfatlösungsaufnahme während der Trocknungs- und Tränkungszyklen für alle Labors und alle innerhalb des Vergleichsversuches geprüften Betone (inkl. Doppelbestimmung, Bezeichnung mit .1 und .2). Schwarz gestrichelte Linie: Sulfatlösungsaufnahme des Labors 4 multipliziert mit 1.2.

4.4.2 Auswertung

Die Vergleichsstandardabweichung der Dehnung am Versuchsende unter den vier Labors ist generell sehr gross und liegt für die geprüften Betone zwischen 26 % und 122 % des Mittelwertes (Abb. 4.54). Der prozentuale Anteil der Standardabweichung vom Mittelwert ist umso grösser, je grösser die gemessenen Dehnungen sind (Abb. 4.55, rechts).

Abb. 4.54 Mittelwert und Vergleichsstandardabweichung der Dehnung am Versuchsende aller Labors. Standardabweichung in ‰ Dehnung sowie in % vom Mittelwert.

Mischung	Variation	Mittelwert Dehnung	Stabw. Dehnung	
			in ‰ Dehnung	in % vom Mittelwert
[-]	[-]	[‰]	[‰]	[%]
I-HS-45	-	0.266	0.186	69.8
I-45	-	0.809	0.428	53.0
I-50	-	1.587	1.041	65.6
I-60.1	-	3.311	3.447	104.1
I-60.2	Wiederholung	4.204	5.146	122.4
I-45-S.1	-	2.428	1.730	71.2
I-45-S.2	Wiederholung	2.538	2.492	98.2
III-45.1	-	0.267	0.070	26.1
III-45.2	Wiederholung	0.292	0.105	36.0
III-45-S	-	0.369	0.124	33.5

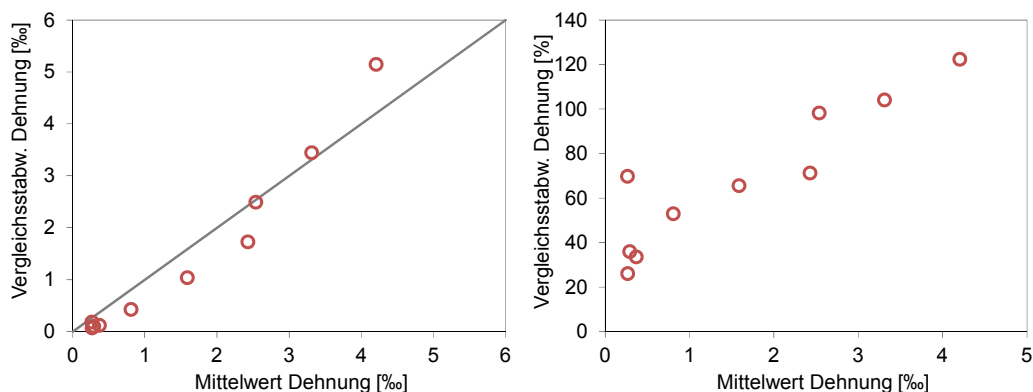


Abb. 4.55 Vergleichsstandardabweichung der Dehnung am Versuchsende in Abhängigkeit des Mittelwertes aller Labors. Links: Standardabweichung in ‰ Dehnung, rechts: Standardabweichung in % des Mittelwertes.

Die Wiederholstandardabweichung der Dehnung am Versuchsende ist deutlich besser und liegt für die drei geprüften Betone zwischen 12 % und 39 % des Mittelwertes. Es ist in diesem Fall keine eindeutige Abhängigkeit des prozentualen Anteils der Standardabweichung vom Mittelwert mehr zu erkennen.

Abb. 4.56 Mittelwert und Wiederholstandardabweichung der Dehnung am Versuchsende aller Labors für die Betone mit Doppelbestimmung. Standardabweichung in ‰ Dehnung sowie in % vom Mittelwert.

Mischung	Variation	Mittelwert Dehnung	Stabw. Dehnung	
			in ‰ Dehnung	in % vom Mittelwert
[-]	[-]	[‰]	[‰]	[%]
I-60	Doppelbestimmung	3.758	0.739	19.7
I-45-S	Doppelbestimmung	2.483	0.957	38.5
III-45	Doppelbestimmung	0.279	0.034	12.2

Bei den Betonen mit geringen Dehnungen am Versuchsende (Abb. 4.47 und Abb. 4.48) ist zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Labors vor allem während den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen entstehen. Betrachtet man nur die Dehnungen während der Zusatzlagerung, reduzieren sich die prozentualen Anteile der Standardabweichung vom Mittelwert der Betone mit CEM I HS und CEM III/B als Bindemittel von 26 – 70% (Abb. 4.56) auf 10 – 54 % (Abb. 4.57 und Abb. 4.58). Bei den Betonen mit CEM I als Bindemittel und entsprechend grosser Dehnung ergibt sich dadurch praktisch keine Änderung der Vergleichsstandardabweichung. Gleiches gilt auch für die Wiederholstandardabweichung, welche sich mit Zyklen zwischen 12 und 39 % bewegt und ohne Zyklen zwischen 9 und 40 %.

Abb. 4.57 Mittelwert und Vergleichsstandardabweichung der Dehnung während der 8 wöchigen **Zusatzlagerung** aller Labors. Standardabweichung in ‰ Dehnung sowie in % vom Mittelwert.

Mischung	Variation	Mittelwert Dehnung	Stabw. Dehnung	
			in ‰ Dehnung	in % vom Mittelwert
[-]	[-]	[‰]	[‰]	[%]
I-HS-45	-	0.161	0.087	54.3
I-45	-	0.659	0.288	43.8
I-50	-	1.424	0.887	62.3
I-60.1	-	3.084	3.295	106.9
I-60.2	Wiederholung	3.976	5.022	126.3
I-45-S.1	-	2.232	1.690	75.7
I-45-S.2	Wiederholung	2.299	2.470	107.4
III-45.1	-	0.197	0.028	14.4
III-45.2	Wiederholung	0.217	0.050	22.9
III-45-S	-	0.228	0.022	9.6

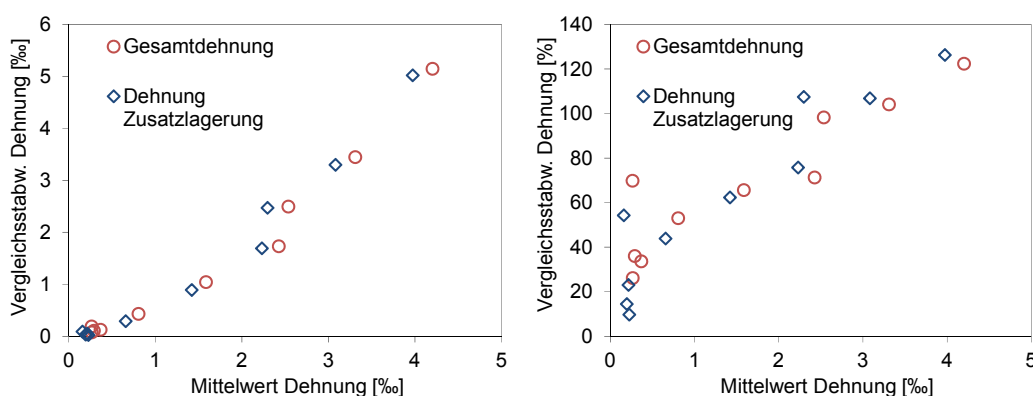


Abb. 4.58 Vergleichsstandardabweichung der Gesamtdehnung sowie der Dehnung während der Zusatzlagerung in Abhängigkeit des Mittelwertes aller Labors. Links: Standardabweichung in ‰ Dehnung, rechts: Standardabweichung in % des Mittelwertes.

Wird eine zusätzliche Auswertung der Dehnung während der Zusatzlagerung (ohne Trocknungs- und Tränkungszyklen!) ohne das Labor 4 durchgeführt, welches generell eine tiefere Sulfatlösungsaufnahme und dadurch auch eine tiefere Dehnung gemessen hat, ergeben sich die Werte gemäss Abb. 4.59. Allerdings gilt es dabei zu beachten, dass somit in der Auswertung nur noch drei Labors berücksichtigt sind, wobei ein Labor bei insgesamt vier Betonen keine Messwerte abgeliefert hat (abgefallene Bolzen). Dadurch basiert die Auswertung von I-60 und I-45-S nur noch auf den Resultaten von zwei Labors!

Abb. 4.59 Mittelwert und Vergleichsstandardabweichung der Dehnung während der 8 wöchigen **Zusatzlagerung ohne Labor 4**. Standardabweichung in ‰ Dehnung sowie in % vom Mittelwert.

Mischung	Variation	Mittelwert Dehnung	Stabw. Dehnung	
			in ‰ Dehnung	in % vom Mittelwert
[-]	[-]	[‰]	[‰]	[%]
I-HS-45	-	0.165	0.106	64.3
I-45	-	0.771	0.221	28.6
I-50	-	1.791	0.609	34.0
I-60.1	-	4.422	3.314	75.0
I-60.2	Wiederholung	5.790	5.540	95.7
I-45-S.1	-	3.207	0.074	2.3
I-45-S.2	Wiederholung	3.266	2.569	78.7
III-45.1	-	0.196	0.034	17.6
III-45.2	Wiederholung	0.223	0.059	26.5
III-45-S	-	0.234	0.022	9.4

Ohne die Werte des Labors 4 werden vor allem die Standardabweichungen bei den grossen Dehnungen kleiner, während sich bei den geringen Dehnungen praktisch keine Änderung ergibt (Abb. 4.60). Offensichtlich haben somit Unterschiede in der Sulfatlösungsaufnahme bei Zementen mit geringem Ettringitbildungspotential nur geringe Auswirkungen auf die Dehnungen.

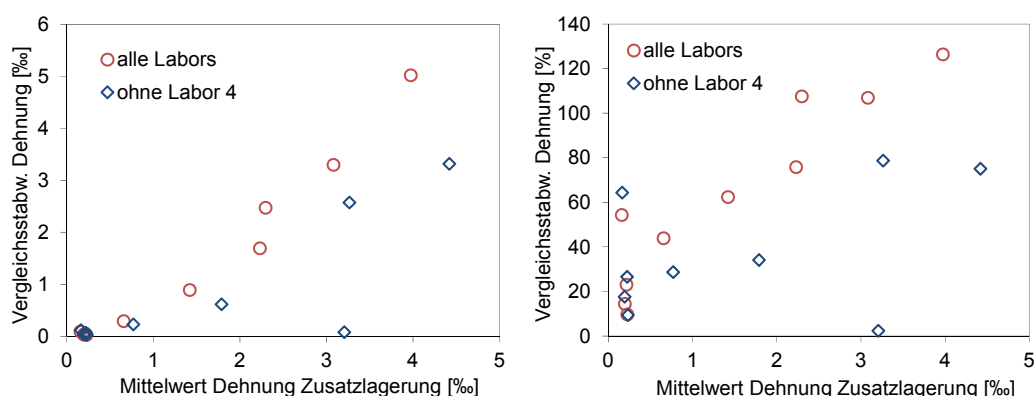


Abb. 4.60 Vergleichsstandardabweichung der Dehnung während der Zusatzlagerung in Abhängigkeit des Mittelwertes mit und ohne Labor 4. Links: Standardabweichung in ‰ Dehnung, rechts: Standardabweichung in % des Mittelwertes.

4.4.3 Schlussfolgerungen

Die Auswertung hat gezeigt, dass die Streuung unter den Labors verkleinert werden kann, wenn nur die Dehnungen während der Zusatzlagerung betrachtet werden. Dies gilt insbesondere für eher kleine Dehnungen bis ca. 1.0 - 1.5 ‰. Da bei der Anwendung der Prüfung vor allem Dehnungen von potentiell sulfatbeständigen Betonen mit entsprechend geringen Werten zuverlässig nachgewiesen werden sollten, macht es deshalb Sinn, nur die Dehnung während der Zusatzlagerung bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Eine Ableitung weiterer zuverlässiger Aussagen aus dem Vergleichsversuch ist schwierig, da von den vier Labors ein Labor bei allen Betonen eine deutlich tiefere Sulfatlösungsaufnahme mit entsprechend geringen Dehnungen gemessen hat und bei einem zweiten Labor bei fast der Hälfte der geprüften Betonmischungen Messbolzen abgefallen sind. Dadurch wird die Aussagekraft des Vergleichsversuches stark eingeschränkt.

Wird das Labor 4 bei den grösseren Dehnungen nicht berücksichtigt, sowie zusätzlich diejenigen Betone, bei denen das Labor 1 Messbolzen verloren hat, können zusammengefasst folgende Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen für die Dehnung während der Zusatzlagerung aus dem Vergleichsversuch abgeleitet werden:

Abb. 4.61 Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichungen für verschiedene Niveaus der Dehnung während der Zusatzlagerung ohne Berücksichtigung des Labors 4 sowie ohne Betone, bei denen das Labor 1 Messbolzen verloren hat.

Niveau Dehnung Zusatzlagerung	Anzahl Labors	Anzahl Betone	Wiederholstandar- dabweichung S_r	Vergleichsstandar- dabweichung S_R
[‰]	[-]	[-]	[‰]	[‰]
0.20	4	1	0.018	-
0.20	4	3	-	0.05
0.77	3	1	-	0.22
1.79	3	1	-	0.61

Die Wiederholstandardabweichung auf dem Niveau 0.20 ‰ beträgt somit ca. 10% vom Mittelwert. Die Vergleichsstandardabweichungen liegen zwischen 25 und 34% vom Mittelwert und nehmen mit zunehmendem Niveau der Dehnung zu. Werte der Vergleichsstandardabweichung im Bereich von 30% sind zwar relativ hoch, aber nicht unüblich für Dauerhaftigkeitsprüfungen an Betonen. Obwohl diese Prüfung auf den Grundlagen der bestehenden Sulfatwiderstandsprüfung basiert, ist es doch ein neues Verfahren mit entsprechend geringer Erfahrung der Prüflabore.

Nach einer allfälligen Einführung der Prüfung und entsprechender Erfahrung der Labors ist es notwendig, einen grösseren Ringversuch mit mehreren Teilnehmern zu organisieren, um eine aussagekräftige Basis für die Festlegung der Wiederhol- und Vergleichsstandardabweichung zu bekommen. Möglicherweise sind basierend auf den Erfahrungen aus einem solchen Ringversuch ergänzende Spezifikationen betreffend Prüfablauf notwendig.

Der vorliegende Vergleichsversuch hat deutlich gezeigt, dass die Durchführung der Prüfung nicht einfach und unproblematisch ist. Die entsprechenden Erfahrungen sind soweit möglich in den potentiellen Prüfbescrieb für die SIA 262/1 eingeflossen. Trotzdem ist es sicher zwingend, dass Labore, welche diese Prüfung anbieten, ein akkreditiertes Qualitätsmanagement besitzen und an einem entsprechenden Ringversuch teilnehmen.

5 Schlussfolgerungen aus Phase 1 - 3

Aus den Resultaten der einzelnen Projektphasen und deren Auswertung können für das Gesamtprojekt weitere folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

5.1 Prüfablauf

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen sowie der bestehenden Normprüfung wird für die allfällige Normierung der nachfolgende Prüfablauf vorgeschlagen. Er entspricht im Wesentlichen dem Prüfablauf, welcher in den Phasen 2 und 3 des vorliegenden Projektes verwendet wurde.

5.1.1 Vorbereitung der Prüfkörper

- Prüfkörper sind Bohrkerne mit einem Durchmesser d von 28 ± 1 mm und einer Länge l von 150 ± 10 mm; eine Prüfserie besteht aus mindestens sechs Prüfkörpern.
- Bestimmung der Prüfkörperlänge l mit einer Genauigkeit von 0,1 mm
- Bestimmung des Durchmessers d als Mittelwert aus zwei Messungen an verschiedenen Stellen des Prüfkörpers mit einer Genauigkeit von 0,1 mm
- Aufkleben von Messbolzen auf beide Stirnflächen der Prüfkörper. Einem guten Verbund zwischen Messbolzen und Prüfkörper ist besondere Beachtung zu schenken. Der durch Bolzen und Kleber abgedeckte Teil der Bohrkernstirnfläche darf einen Durchmesser von 15 mm nicht überschreiten.
- Nullmessung l_0 zwischen den Messbolzen mit einer Genauigkeit von 0,001 mm, relativ zum Referenzstab gemessen.

5.1.2 Durchführen der Prüfung

- Die Prüfung (ohne Vorbereitung) beginnt 28 Tage nach der Betonherstellung.
- Zyklus 1:
 - 1. Trocknung bei $50 \pm 2^\circ\text{C}$ während 120 ± 2 Stunden
 - 2. Während 1 Stunde kühlen die Prüfkörper im Exsikkator auf $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ab; anschliessend wird deren Masse (m_{T1}) bestimmt. Nach dem Abkühlen werden die Prüfkörper während 48 ± 1 Stunden vollständig in der Sulfatlösung eingetaucht gelagert, danach oberflächlich abgetrocknet und die Massen und Längen relativ zum Referenzstab mit Genauigkeiten von 0,01 g (m_{S1}) bzw. 0,001 mm (l_1) bestimmt.
- Zyklen 2 bis 4:
 - 1. Trocknung während 120 ± 2 h bei $50 \pm 2^\circ\text{C}$ mit nachfolgender Abkühlung der Prüfkörper im Exsikkator auf $20 \pm 2^\circ\text{C}$; anschliessend wird deren Masse ($m_{T2} \dots m_{T4}$) bestimmt.
 - 2. Nach dem Abkühlen werden die Prüfkörper während 48 ± 1 Stunden vollständig in der Sulfatlösung eingetaucht gelagert, danach oberflächlich abgetrocknet und deren Massen mit Genauigkeiten von 0,01 g ($m_{S2} \dots m_{S4}$) und Längen relativ zum Referenzstab mit Genauigkeiten von 0,001 mm ($l_2 \dots l_4$) bestimmt.
- Zusatzlagerung:
 - Im Anschluss an den 4. Zyklus werden die Bohrkerne nach der letzten Messung von Masse und Länge wieder in die gleiche Sulfatlösung gelegt. Nach jeweils 7, 14, 28, 42 und 56 Tagen dieser Zusatzlagerung werden die Bohrkerne aus der Sulfatlösung entnommen, oberflächlich abgetrocknet und deren Massen mit Genauigkeiten von 0,01 g ($m_{S5} \dots m_{S12}$) und Längen relativ zum Referenzstab mit Genauigkeiten von 0,001 mm ($l_5 \dots l_{12}$) bestimmt.

5.1.3 Prüfergebnisse

Es sind folgende Werte zu berechnen:

- Volumenbestimmung V_0 durch Ausmessen:

$$V_0 = \frac{d^2 \cdot \pi \cdot l}{4 \cdot 10^9} \quad \text{in m}^3$$

d: mittlerer Durchmesser in [mm]

l: Länge des Prüfkörpers ohne Messbolzen [mm]

- Längenänderung nach der n-ten Woche Δl_n , mit $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12$:

$$\Delta l_n = \frac{l_n - l_0}{l} \quad \text{in } \text{‰}$$

l_n : Messwert nach der n-ten Woche [mm]

l_0 : Messwert bei der Nullmessung [mm]

l: Länge des Prüfkörpers ohne Messbolzen [mm]

- Massenzunahme während der Tränkungs- und Trocknungszyklen (informativ):

$$\Delta m_{Sn} = \frac{m_{Sn} - m_{Tn}}{V_0} \quad \text{in kg/m}^3$$

m_{Sn} : Masse nach Lagerung in Sulfatlösung im n-ten Zyklus, $n = 1 \dots 4$ [kg]

m_{Tn} : Masse nach Trocknung im n-ten Zyklus, $n = 1 \dots 4$ [kg]

- Massenzunahme während der Zusatzlagerung (informativ):

$$\Delta m_{Sn} = \frac{m_{Sn} - m_{Sv}}{V_0} \quad \text{in kg/m}^3$$

m_{Sn} : Masse nach Lagerung in Sulfatlösung am Ende der n-ten Woche, $n = 5, 6, 8, 10, 12$ [kg]

m_{Sv} : Masse nach Lagerung in Sulfatlösung am Ende der jeweils vorangehenden Messung [kg]

5.2 Auswertung

Als Mass für den Sulfatwiderstand soll die gemessene Dehnung dienen. Die Sulfatlösungsaufnahme wird nur noch informativ aufgenommen. Es ist auch keine Auswertungsformel mehr vorgesehen. Durch die Dehnung alleine lassen sich im vorliegenden Projekt sowohl verschiedene w/b-Werte als auch Bindemitteltypen und Bindemittelmischmengen unterscheiden.

Sowohl bei der Validierung der Prüfung in Phase 2 als auch bei den Vergleichsversuchen hat sich allerdings gezeigt, dass es sinnvoll ist, nur die Dehnung während der Zusatzlagerung zu bewerten und die Dehnung während den anfänglichen Trocknungs- und Tränkungszyklen wegzulassen. Durch die relativ intensiven Trocknungszyklen kann die Dehnung in dieser Phase auf eine Art beeinflusst werden, welche nicht direkt mit einer Sulfatinteraktion zusammenhängt. Die Dehnung während der Zusatzlagerung und eine damit einhergehende Zerstörung der Prüfkörper scheint hingegen eine direkte Folge der Sulfatinteraktion zu sein. Dadurch wird sowohl die Aussagekraft der Prüfung als auch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Labors verbessert. Dies gilt insbesondere im Bereich von kleinen Dehnungen bis hin zum potentiellen Grenzwert (vgl. Kap. 5.3).

Es wird somit vorgeschlagen, den Sulfatwiderstand von Beton wie folgt zu beurteilen:

$$\Delta I_s = \Delta I_{12} - \Delta I_4 \quad [\text{‰}]$$

mit

$\Delta I_s =$ massgebende Sulfatdehnung während der Zusatzlagerung

$\Delta I_{12} =$ Längenänderung am Prüfende [‰]

$\Delta I_4 =$ Längenänderung nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen [‰]

5.3 Grenzwert

Ein möglicher Grenzwert lässt sich basierend auf dem vorliegenden Projekt unter Verwendung der gemessenen Änderung der E-Moduli während der Prüfung abschätzen.

Aus Abb. 4.46 lässt sich ablesen, dass die Abnahme des E-Moduls bei kleinen Dehnungen mit einer Streuung von ca. $\pm 15\%$ im Bereich von 0% liegt (horizontale, schwarz gestrichelte Linien in Abb. 5.62). Ab einer Gesamtdehnung von ca. 1.5% nimmt der E-Modul mit zunehmender Dehnung kontinuierlich ab (Abb. 5.62, links). Wird nur die Dehnung während der Zusatzlagerung betrachtet verschiebt sich dieser Wert unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Dehnung während der Tränkungs- und Trocknungszyklen relativ konstant bei etwa 0.3% lag (Abb. 4.42, links) zu einer Dehnung von 1.2% (Abb. 5.62, rechts).

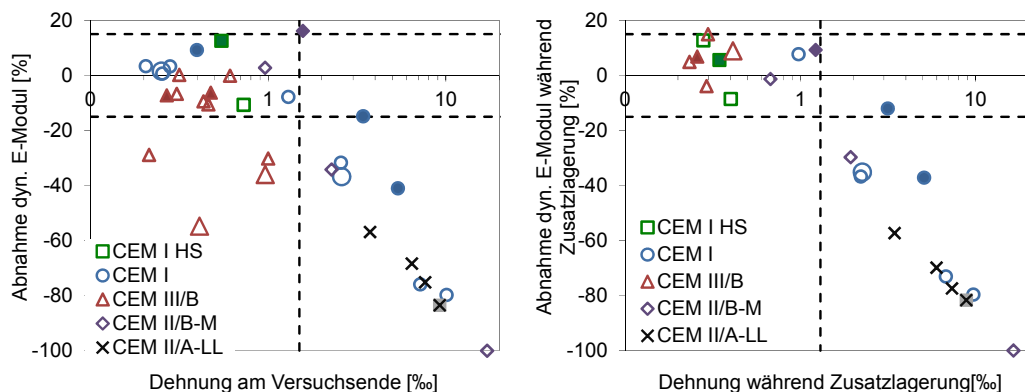


Abb. 5.62 Abnahme des dynamischen E-Moduls der Bohrkerne während der Sulfatwiderstandsprüfung im Vergleich mit der gemessenen Dehnung für verschiedene Bindemitteltypen. Links: von Versuchsbeginn bis Versuchsende, rechts: während Zusatzlagerung (hier fehlen die Resultate der Prüfungen in Wasser, da in diesen Fällen nach den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen keine E-Modul-Messungen durchgeführt wurden). Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone. Gleiche Diagramme wie Abb. 4.46 jedoch mit eingetragenen potentiellen Grenzwerten.

Somit kann festgehalten werden, dass im vorliegenden Projekt Dehnungen während der Zusatzlagerung von $\Delta I_s > 1.2\%$ mit einer zunehmenden Schädigung der Bohrkerne eingegangen sind. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, einen allfälligen Grenzwert für ΔI_s bei **1.2 ‰** festzulegen.

Im vorliegenden Projekt erfüllen die Betone mit den aktuell als sulfatbeständig geltenden Zementen CEM I HS und CEM III/B diesen Grenzwert unabhängig von w/b-Wert und Leimvolumen (Abb. 5.63). Bei den übrigen Zementen ist dies vom w/b-Wert und vom Bindemittelleimvolumen abhängig. Mit abnehmendem Bindemittelleimvolumen und ab-

nehmendem w/b-Wert wird die Wahrscheinlichkeit, den Grenzwert zu unterschreiten immer grösser. Betone mit einem w/b-Wert von 0.50 und grösser haben im vorliegenden Projekt den Grenzwert nur dann erfüllt, wenn ein CEM I HS oder CEM III/B eingesetzt wurde. Bei geringem Leimvolumen haben die Betone mit CEM I sowie CEM II/B-M und w/b = 0.45 den Grenzwert zwar unterschritten, sobald das Leimvolumen aber zugenommen hat, war dies nicht mehr der Fall. Diese Resultate stimmen relativ gut mit dem in der Tabelle F.1 der EN 206-1 angegebenen Höchstwert des w/b-Wertes von 0.45 für die Expositions-klasse XA3 überein. Der Grenzwert erscheint deshalb insbesondere für die Expositions-klasse XA3 als sinnvoll.

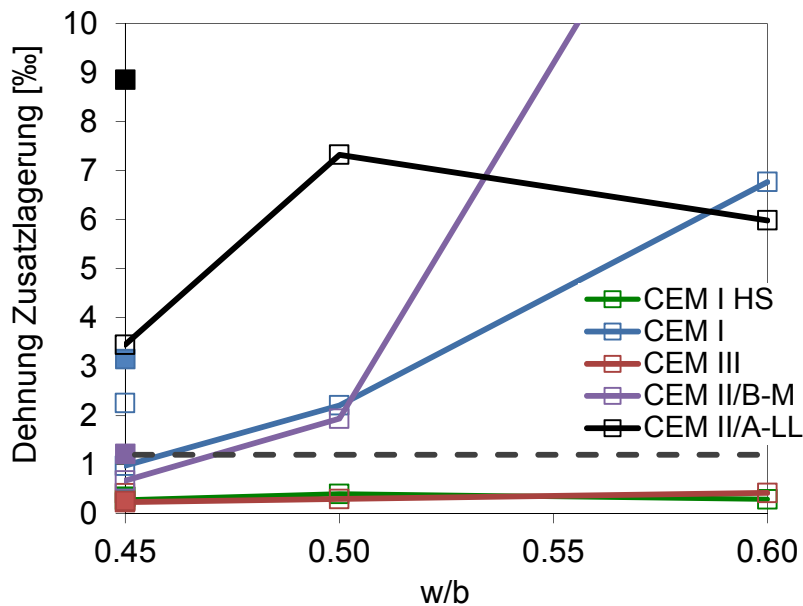


Abb. 5.63 Dehnungen während der Zusatzlagerung in Abhängigkeit des w/b-Wertes für alle in Phase 2 geprüften Betone. Gestrichelte Linie: potentieller Grenzwert von 1.2 ‰. Grosse Symbole: Betone mit erhöhtem Leimvolumen, ausgefüllte Symbole: SCC-Betone.

Für die Expositions-klasse XA2 gelten gemäss Tabelle 2 der SN EN 206-1 die Grenzwerte für den Sulfatgehalt im Grundwasser von > 600 mg/l und ≤ 3'000 mg/l. Dies ist ein relativ weiter Bereich, wobei Grundwasser mit einem Sulfatgehalt von 3'000 mg/l bereits als hoch sulfatisiert angeschaut werden muss. Entsprechend zeigten die in [Holzer, 2001] untersuchten Schweizer Tunnels teilweise erhebliche sulfatbedingte Betonschäden, obwohl die im Bergwasser während der Vortriebsphase gemessenen Sulfatgehalte grösstenteils im Bereich der Expositions-klasse XA2 lagen. Aus diesen Gründen wird deshalb vorgeschlagen, den Grenzwert von $\Delta I_s = 1.2 \text{ ‰}$ auch für die Expositions-klasse XA2 anzuwenden.

Unter Berücksichtigung der Vergleichsstandardabweichung aus dem Vergleichsversuch von ca. 30% im Bereich des Grenzwertes müssen in der laufenden Produktion zur sicheren Einhaltung des Grenzwertes Dehnungen für ΔI_s von deutlich unter 1.0 ‰ eingehalten werden können. Dies erscheint mit den Zementen CEM III/B und CEM I HS basierend auf den vorliegenden Ergebnissen gut möglich. Allerdings muss für den potentiellen Einsatz von Mischzementen die Vergleichsstandardabweichung im Bereich des Grenzwertes in Zukunft reduziert werden können.

Aus diesen Gründen und den Tatsachen, dass eine belastbare Verifikation von Wiederhol- und Vergleichbarkeit noch aussteht sowie praktische Erfahrungen mit der Prüfung noch fehlen, sollte vorderhand für die Beurteilung der Wert $\Delta I_s = 1.2 \text{ ‰}$ nicht als Grenzwert sondern nur als Richtwert definiert werden.

5.4 Schlussbemerkung

Das Verfahren wurde an Betonen mit $w/b = 0.45 - 0.60$, Zementleimvolumina von $250 - 350 \text{ l/m}^3$ und den Zementsorten CEM I, CEM I HS, CEM II/A-LL, CEM II/B-M (V-LL) und CEM III/B entwickelt. Bei Betonen mit sehr hoher Porosität und/oder geringem resp. sehr hohem Zementgehalt ist die Anwendbarkeit des Verfahrens vorgängig abzuklären. Bei Betonen mit hoher Porosität kann es sein, dass die Ettringitkristalle in den übermässig vorhandenen Porenraum wachsen und somit eine Schädigung des Betons nicht mehr unbedingt in direktem Zusammenhang mit einer globalen Dehnung des Betons stehen muss. Zudem hat sich gezeigt, dass bei zunehmendem Bindemittelleimvolumen eine Schädigung der Betonbohrkerne im Vergleich mit geringem Bindemittelleimvolumen erst bei tendenziell grösseren Dehnungen auftritt. Somit kann es sein, dass Betone mit sehr hohen Bindemittelleimvolumina den Grenzwert deutlich überschreiten, obwohl noch keine Schädigung des Betons eingetreten ist. In beiden Fällen kann es deshalb unter Umständen sinnvoll sein, neben der Dehnung zusätzlich eine mechanische Eigenschaft (z.B. Verlauf des dyn. E-Moduls) mitzumessen.

Wie bei jedem Standard-Normverfahren wird auch in diesem Fall eine materialtechnologische Eigenschaft des Betons unter Standardbedingungen geprüft. Es ist also in jedem Fall eine Interpretation der Resultate in Bezug auf die spezifische Anwendung notwendig. Im Weiteren ist durch die Prüfung das Verhalten des Betons im Bereich von Schwachstellen in der Betonkonstruktion (insbesondere Verdichtungsmängel) nicht genügend abgebildet. Eine positive Beurteilung des Betons in der Prüfung ist deshalb keine Garantie dafür, keine Sulfatschäden im Bereich von Schwachstellen am Bauwerk zu erhalten. Die Sulfatproblematik ist für die Sicherstellung einer genügenden Dauerhaftigkeit des Gesamtbauwerkes somit nach wie vor ganzheitlich zu betrachten (materialtechnologisches Verhalten unter Standardbedingungen, konstruktive Durchbildung, Qualität der Ausführung, etc.).

Anhänge

I	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	72
I.1	Allgemeine Betonkennwerte	72
I.2	Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen Phase 1	73
I.3	Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen Phase 2	75
I.4	Messwerte Sulfatwiderstandspr. Vergleichsversuche	77
I.5	Begriffe	79

I Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

I.1 Allgemeine Betonkennwerte

Abb. I.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse (RD: Rohdichte, LP: Luftporengehalt, AM: Ausbreitmass, f_c : Druckfestigkeit, D_o : Sauerstoffdiffusionskoeffizient, q_w : Wasserleitfähigkeit).

Bez.	Frischbetonwerte			f_c	D_o	q_w
	RD	LP	AM	28 d	28 d	28 d
[-]	[kg/m ³]	[vol.-%]	[cm]	[MPa]	[x10 ⁻⁸ m ² /s]	[g/m ² h]
1-I-45	2'433	2.1	52	54.6	-	-
1-I-60	2'435	1.0	52	36.3	-	-
1-III-45	2'428	2.0	38	47.5	-	-
1-III-60	2'407	1.5	43	31.3	-	-
I-HS-45	2'432	1.9	42	58.7	1.24	4.6
I-HS-50	2'428	1.7	46	47.2	2.26	7.0
I-HS-60	2'427	0.9	49	34.0	4.03	12.3
I-HS-45-S	2'335	3.8	50	56.7	1.51	5.5
I-45	2'444	1.5	59	56.3	0.87	5.0
I-50	2'439	1.8	51	45.8	1.22	6.7
I-60	2'436	1.1	52	38.9	1.76	7.7
I-45-h	2'422	1.2	62	46.6	1.47	7.7
I-45-S	2'357	1.6	70	55.5	0.84	6.3
III-45	2'415	2.2	45	56.2	0.21	3.6
III-50	2'417	1.6	43	43.3	0.62	6.0
III-60	2'389	1.4	46	33.0	0.78	7.2
III-45-h	2'371	2.0	43	47.2	0.47	4.8
III-45-S	2'318	2.8	53	57.9	0.32	5.0
II-LV-45	2'431	1.5	49	44.3	1.20	5.9
II-LV-50	2'419	1.3	48	38.2	1.57	8.4
II-LV-60	2'423	0.8	54	28.2	3.01	12.1
II-LV-45-S	2'315	2.3	66	46.3	1.69	5.9
II-L-45	2'435	1.8	42	49.7	0.97	5.9
II-L-50	2'426	1.7	50	42.4	1.38	6.2
II-L-60	2'418	0.8	56	33.2	2.37	10.4
II-L-45-S	2'324	2.6	55	51.7	1.17	6.7

I.2 Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen Phase 1

Abb. I.2 **Kumulierte Dehnung**, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit Variationen gemäss Beschrieb in Kap. 3.4.1. ΔI_1 bis ΔI_4 : Dehnungsmessung während Trocknungs- und Tränkungszyklen, ΔI_5 bis ΔI_{12} : Dehnungsmessung während der Zusatzlagerung.

Mischung	Variation	kumulierte Dehnung [‰]								
		ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3	ΔI_4	ΔI_5	ΔI_6	ΔI_8	ΔI_{10}	ΔI_{12}
1-I-45	2/5	0.162	0.208	0.240	0.257	0.328	-	0.393	0.432	0.464
1-I-45	5/2	0.087	0.126	0.178	0.206	0.367	-	0.647	0.811	0.984
1-I-45	12/2	0.067	0.106	0.188	0.325	0.696	-	1.394	-	-
1-I-45	12/2_40°C	0.042	0.089	0.179	0.314	0.673	-	1.282	-	-
1-I-45	5/2_10%	0.078	0.129	0.182	0.230	0.383	-	0.704	0.896	1.130
1-I-45	5/2_Mg	-0.020	-0.097	-0.129	-0.165	-0.016	-	0.086	0.115	0.151
1-I-45	5/2_Mg+Na	0.071	0.082	0.087	0.075	0.219	-	0.348	0.367	0.408
1-I-60	2/5	0.126	0.208	0.279	0.341	0.477	0.534	0.615	0.664	0.712
1-I-60	5/2	0.066	0.114	0.189	0.289	0.734	1.256	3.893	5.762	7.540
1-I-60	12/2	0.032	0.066	0.223	0.539	1.156	2.258	4.249	-	-
1-I-60	12/2_40°C	0.032	0.071	0.240	0.573	1.249	2.462	4.688	-	-
1-I-60	5/2_10%	0.065	0.152	0.284	0.427	0.845	1.235	2.353	4.255	6.638
1-I-60	5/2_Mg	-0.015	-0.078	-0.118	-0.143	-0.023	0.037	0.091	0.131	0.176
1-I-60	5/2_Mg+Na	0.036	0.073	0.138	0.184	0.473	0.683	1.025	1.407	1.779
1-III-45	5/2	0.076	0.129	0.153	0.267	0.354	0.415	0.495	0.514	0.543
1-III-45	5/2_Mg	-0.049	-0.103	-0.152	-0.164	-0.043	-0.012	0.077	0.119	0.146
1-III-45	5/2_Mg+Na	0.033	0.038	0.057	0.128	0.225	0.236	0.302	0.315	0.362
1-III-60	5/2	0.117	0.254	0.454	0.886	1.221	1.307	1.388	1.428	1.457
1-III-60	5/2_Mg	0.089	0.079	0.086	0.095	0.458	0.678	0.886	1.047	1.143
1-III-60	5/2_Mg+Na	0.098	0.192	0.394	0.734	1.052	1.142	1.210	1.330	1.383

Abb. I.3 **Lösungsaufnahme pro Zyklus**, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen mit Variationen gemäss Beschrieb in Kap. 3.4.1. Δm_{S1} bis Δm_{S4} : Lösungsaufnahme während Trocknungs- und Tränkungszyklen, Δm_{S5} bis Δm_{S6} : Massenänderung innerhalb einer Woche während der Zusatzlagerung, Δm_{S8} bis Δm_{S12} : Massenänderung innerhalb von zwei Wochen während der Zusatzlagerung. Negative Werte: Verlust von Material infolge Zerfall der Prüfkörper

Mischung	Variation	Lösungsaufnahme pro Zyklus [kg/m ³]								
		Δm_{S1}	Δm_{S2}	Δm_{S3}	Δm_{S4}	Δm_{S5}	Δm_{S6}	Δm_{S8}	Δm_{S10}	Δm_{S12}
1-I-45	2/5	61.3	53.9	47.8	43.5	0.9	-	0.7	0.9	0.2
1-I-45	5/2	75.1	71.0	67.6	61.1	1.4	-	2.3	0.9	0.9
1-I-45	12/2	86.0	81.4	79.8	78.3	2.5	-	3.3	-	-
1-I-45	12/2_40°C	86.3	85.2	82.2	80.2	2.7	-	2.9	-	-
1-I-45	5/2_10%	78.0	67.5	58.2	51.5	0.8	-	1.8	0.9	0.8
1-I-45	5/2_Mg	44.2	24.9	20.5	17.5	15.9	-	21.8	7.8	9.6
1-I-45	5/2_Mg+Na	72.9	59.7	47.0	39.9	18.8	-	4.4	0.8	0.6
1-I-60	2/5	86.4	75.9	71.0	66.9	2.7	0.8	0.9	0.9	0.6
1-I-60	5/2	102.5	99.0	95.3	91.5	3.8	2.0	-25.3	2.3	-32.9
1-I-60	12/2	108.5	104.7	102.4	99.8	4.5	3.7	4.1	-	-
1-I-60	12/2_40°C	108.2	107.5	104.1	100.7	4.4	4.5	5.6	-	-
1-I-60	5/2_10%	102.9	94.1	84.7	79.7	2.1	1.1	3.7	5.5	-13.8
1-I-60	5/2_Mg	81.9	44.0	32.6	29.7	23.3	12.2	13.4	17.4	6.7
1-I-60	5/2_Mg+Na	101.6	95.7	88.3	81.3	4.1	2.2	4.0	2.7	3.0
1-III-45	5/2	77.9	51.4	48.3	46.2	2.9	0.9	1.3	0.7	0.5
1-III-45	5/2_Mg	49.6	32.2	25.0	22.4	14.7	8.0	9.4	6.7	3.5
1-III-45	5/2_Mg+Na	69.2	47.6	44.1	45.7	4.5	1.4	1.3	1.4	0.5
1-III-60	5/2	104.8	79.4	76.9	72.1	3.1	1.0	1.5	1.0	0.4
1-III-60	5/2_Mg	90.2	50.0	38.7	35.1	18.8	9.2	10.2	6.0	3.4
1-III-60	5/2_Mg+Na	101.1	70.9	69.8	70.8	2.8	0.7	1.0	0.9	0.9

I.3 Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen Phase 2

Abb. I.4 **Kumulierte Dehnung**, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen gemäss Beschreibung in Kap.3.2.3 an den Betonen gemäss Abb. 3.11. ΔI_1 bis ΔI_4 : Dehnungsmessung während Trocknungs- und Tränkungszyklen, ΔI_5 bis ΔI_{12} : Dehnungsmessung während der Zusatzlagerung.

Mischung	Variation	kumulierte Dehnung [‰]									
		ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3	ΔI_4	ΔI_5	ΔI_6	ΔI_8	ΔI_{10}	ΔI_{12}	
I-HS-45	-	0.077	0.124	0.189	0.259	0.363	0.398	0.421	0.506	0.538	
I-HS-50	-	0.088	0.143	0.214	0.328	0.471	0.544	0.630	0.689	0.729	
I-HS-60	-	0.020	0.059	0.094	0.170	0.269	0.315	0.406	0.445	0.462	
I-HS-45-S	-	0.057	0.075	0.153	0.201	0.340	0.392	0.490	0.520	0.546	
I-45	-	0.069	0.126	0.229	0.322	0.509	0.620	0.753	1.064	1.299	
I-45	Prüfung in Wasser	0.033	0.048	0.077	0.096	0.169	0.174	0.184	0.248	0.251	
I-50	-	0.050	0.085	0.222	0.359	0.606	0.772	1.087	1.709	2.568	
I-50	Prüfung in Wasser	0.004	0.021	0.041	0.059	0.130	0.140	0.156	0.209	0.205	
I-60	-	0.112	0.187	0.203	0.412	0.830	1.381	3.282	5.588	7.177	
I-60	Wiederholung	0.104	0.177	0.175	0.377	0.798	1.290	3.102	5.582	10.08	
I-60	Prüfung in Wasser	0.029	0.041	-0.033	0.065	0.157	0.214	0.233	0.269	0.281	
I-45-h	-	0.059	0.123	0.216	0.334	0.616	0.833	1.268	1.779	2.591	
I-45-h	Prüfung in Wasser	0.032	0.049	0.071	0.089	0.174	0.192	0.247	0.252	0.254	
I-45-S	-	0.048	0.106	0.175	0.269	0.511	0.757	1.281	2.156	3.424	
I-45-S	Wiederholung	0.067	0.123	0.187	0.288	0.538	0.92	1.770	3.348	5.370	
I-45-S	Prüfung in Wasser	-0.024	-0.003	-0.059	0.053	0.198	0.273	0.323	0.372	0.397	
III-45	-	0.080	0.064	0.021	0.083	0.168	0.200	0.240	0.239	0.316	
III-45	Wiederholung	0.101	0.094	0.106	0.142	0.241	0.270	0.335	0.387	0.433	
III-45	Prüfung in Wasser	0.079	0.069	0.072	0.075	0.156	0.191	0.208	0.254	0.306	
III-50	-	0.104	0.126	0.185	0.313	0.460	0.517	0.573	0.582	0.610	
III-50	Prüfung in Wasser	0.072	0.080	0.129	0.203	0.324	0.365	0.422	0.422	0.461	
III-60	-	0.081	0.112	0.280	0.579	0.860	0.912	0.985	0.999	1.001	
III-60	Prüfung in Wasser	0.035	0.033	0.076	0.112	0.173	0.185	0.208	0.223	0.214	
III-45-h	-	0.127	0.191	0.319	0.551	0.741	0.810	0.891	0.922	0.963	
III-45-h	Prüfung in Wasser	0.088	0.101	0.143	0.223	0.312	0.340	0.381	0.376	0.411	
III-45-S	-	0.000	0.106	0.138	0.218	0.330	0.361	0.405	0.444	0.476	
III-45-S	Prüfung in Wasser	0.065	0.050	0.059	0.078	0.150	0.176	0.190	0.232	0.269	
II-LV-45	-	0.054	0.111	0.183	0.286	0.538	0.686	0.832	0.907	0.960	
II-LV-50	-	0.032	0.095	0.189	0.336	0.732	1.082	1.629	1.968	2.272	
II-LV-60	-	0.044	0.158	0.333	0.624	1.888	5.421	11.14	14.04	17.07	
II-LV-45-S	-	0.065	0.162	0.243	0.348	0.687	0.997	1.303	1.433	1.569	
II-L-45	-	0.091	0.136	0.206	0.299	0.557	0.798	1.447	2.555	3.745	
II-L-50	-	0.088	0.134	0.216	0.319	0.687	1.216	3.682	6.241	7.641	
II-L-60	-	0.097	0.162	0.284	0.455	1.107	1.994	4.713	5.851	6.438	
II-L-45-S	-	0.102	0.144	0.239	0.372	0.787	1.276	4.039	9.227	-	

Abb. I.5 **Lösungsaufnahme pro Zyklus**, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen gemäss Beschrieb in Kap.3.2.3 an den Betonen gemäss Abb. 3.11. Δm_{S1} bis Δm_{S4} : Lösungsaufnahme während Trocknungs- und Tränkungszyklen, Δm_{S5} bis Δm_{S6} : Massenänderung innerhalb einer Woche während der Zusatzlagerung, Δm_{S8} bis Δm_{S12} : Massenänderung innerhalb von zwei Wochen während der Zusatzlagerung. Negative Werte: Verlust von Material infolge Zerfall der Prüfkörper.

Mischung	Variation	Lösungsaufnahme pro Zyklus [kg/m ³]								
		Δm_{S1}	Δm_{S2}	Δm_{S3}	Δm_{S4}	Δm_{S5}	Δm_{S6}	Δm_{S8}	Δm_{S10}	Δm_{S12}
I-HS-45	-	82.9	77.4	72.9	46.0	1.1	0.2	0.9	-0.3	0.8
I-HS-50	-	95.5	90.8	87.0	84.5	1.9	0.7	1.0	0.3	0.4
I-HS-60	-	105.1	99.7	96.0	93.0	2.0	1.0	1.8	-0.1	0.8
I-HS-45-S	-	110.0	101.8	98.2	92.6	2.2	0.9	0.7	0.5	0.7
I-45	-	78.5	72.3	67.8	41.0	1.3	0.8	1.2	1.1	1.5
I-45	Prüfung in Wasser	73.0	73.0	72.7	50.5	1.4	0.6	0.9	0.9	0.1
I-50	-	87.2	82.4	78.0	48.9	2.2	1.0	2.1	2.4	3.1
I-50	Prüfung in Wasser	81.1	81.0	81.3	59.2	1.6	0.8	0.8	1.3	0.0
I-60	-	96.8	93.2	87.9	84.3	4.2	2.5	-3.7	6.5	5.9
I-60	Wiederholung	98.8	94.9	89.5	85.8	3.9	2.2	6.3	0.6	-1.5
I-60	Prüfung in Wasser	98.3	99.9	97.1	97.1	3.7	1.2	1.1	1.0	0.3
I-45-h	-	91.6	86.6	83.1	78.7	2.8	2.4	1.8	1.9	-4.1
I-45-h	Prüfung in Wasser	92.6	92.7	92.0	90.7	2.8	1.6	2.2	1.1	1.1
I-45-S	-	93.3	87.7	82.1	79.1	2.8	1.8	2.3	3.7	4.0
I-45-S	Wiederholung	103.0	96.9	91.3	87.3	3.6	2.1	3.7	5.1	6.1
I-45-S	Prüfung in Wasser	93.2	95.0	93.5	92.3	3.0	1.8	0.9	1.0	0.1
III-45	-	64.8	43.2	42.2	42.4	4.3	1.0	1.1	1.1	1.1
III-45	Wiederholung	66.3	44.7	45.2	43.9	4.3	0.4	1.1	1.3	0.9
III-45	Prüfung in Wasser	67.2	52.4	49.7	49.5	2.9	0.7	1.9	0.9	0.7
III-50	-	76.8	54.9	52.7	54.4	1.8	0.3	1.6	0.3	0.9
III-50	Prüfung in Wasser	77.5	63.2	59.9	60.2	2.8	1.4	0.4	0.7	0.9
III-60	-	91.2	69.3	69.7	66.6	2.2	1.1	0.9	0.6	0.4
III-60	Prüfung in Wasser	85.1	75.9	71.6	72.4	2.2	1.0	1.6	0.5	0.4
III-45-h	-	80.7	60.8	59.3	61.3	1.7	0.9	1.2	0.7	0.3
III-45-h	Prüfung in Wasser	82.0	67.0	64.4	63.4	2.6	1.0	1.0	0.9	0.3
III-45-S	-	83.5	56.5	56.5	57.5	3.2	0.5	1.0	0.8	0.8
III-45-S	Prüfung in Wasser	85.1	63.9	61.9	60.5	3.1	0.6	1.4	1.0	0.9
II-LV-45	-	87.9	80.1	71.4	65.4	3.4	0.8	1.9	0.8	0.0
II-LV-50	-	96.3	88.2	80.7	75.9	3.4	1.7	3.0	1.8	2.2
II-LV-60	-	115.8	109.5	100.0	94.9	3.9	3.9	-10.8	8.1	-30.6
II-LV-45-S	-	116.0	107.2	95.1	85.1	5.0	1.8	2.4	0.6	0.7
II-L-45	-	86.8	81.9	77.5	73.9	2.7	1.1	3.5	4.0	4.5
II-L-50	-	94.4	88.3	83.9	80.5	3.6	2.1	7.0	3.2	3.7
II-L-60	-	108.2	102.3	97.6	93.9	4.0	3.5	7.1	-9.7	3.0
II-L-45-S	-	111.9	106.1	101.1	96.3	2.8	2.3	8.1	-4.8	-21.8

I.4 Messwerte Sulfatwiderstandspr. Vergleichsversuche

Abb. I.6 **Kumulierte Dehnung**, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen gemäss Beschreibung in Kap.3.2.3 an den Betonen gemäss Kap. 3.4.3. Δm_1 bis Δl_4 : Dehnungsmessung während Trocknungs- und Tränkungszyklen, Δl_5 bis Δl_{12} : Dehnungsmessung während der Zusatzlagerung. * = Verlust der Messbolzen.

Mischung	Variation	kumulierte Dehnung [‰]								
		Δl_1	Δl_2	Δl_3	Δl_4	Δl_5	Δl_6	Δl_8	Δl_{10}	Δl_{12}
Labor 1										
I-HS-45	-	0.124	0.092	0.110	0.158	0.203	0.239	0.239	0.196	0.227
I-45	-	0.104	0.162	0.160	0.221	0.309	0.458	0.627	0.762	1.019
I-50	-	0.058	0.144	0.188	0.243	0.351	0.557	0.932	1.464	2.314
I-60	-	0.025	0.063	0.174	0.243	0.362	0.773	*	*	*
I-60	Wiederholung	0.038	0.066	0.190	0.238	*	*	*	*	*
I-45-S	-	0.010	0.059	0.136	0.192	0.329	0.685	*	*	*
I-45-S	Wiederholung	-0.019	0.020	0.144	0.162	0.237	0.413	*	*	*
III-45	-	0.189	0.104	0.137	0.122	0.210	0.221	0.257	0.299	0.311
III-45	Wiederholung	0.177	0.118	0.147	0.124	0.195	0.243	0.265	0.284	0.305
III-45-S	-	0.213	0.151	0.226	0.247	0.354	0.374	0.406	0.424	0.476
Labor 2										
I-HS-45	-	0.077	0.124	0.189	0.259	0.363	0.398	0.421	0.506	0.538
I-45	-	0.069	0.126	0.229	0.322	0.509	0.620	0.753	1.064	1.299
I-50	-	0.050	0.085	0.222	0.359	0.606	0.772	1.087	1.709	2.568
I-60	-	0.112	0.187	0.203	0.412	0.830	1.381	3.282	5.588	7.177
I-60	Wiederholung	0.104	0.177	0.175	0.377	0.798	1.290	3.102	5.582	10.08
I-45-S	-	0.048	0.106	0.175	0.269	0.511	0.757	1.281	2.156	3.424
I-45-S	Wiederholung	0.067	0.123	0.187	0.288	0.538	0.92	1.770	3.348	5.370
III-45	-	0.080	0.064	0.021	0.083	0.168	0.200	0.240	0.239	0.316
III-45	Wiederholung	0.101	0.094	0.106	0.142	0.241	0.270	0.335	0.387	0.433
III-45-S	-	0.000	0.106	0.138	0.218	0.330	0.361	0.405	0.444	0.476
Labor 3										
I-HS-45	-	-0.064	-0.069	-0.058	-0.016	0.040	0.063	0.089	0.121	0.131
I-45	-	-0.051	-0.045	-0.029	0.022	0.130	0.203	0.350	0.461	0.560
I-50	-	-0.056	-0.053	-0.030	0.031	0.184	0.300	0.548	0.802	1.123
I-60	-	-0.040	-0.005	0.051	0.121	0.332	0.541	1.014	1.587	2.199
I-60	Wiederholung	-0.038	-0.010	0.054	0.137	0.346	0.547	0.992	1.589	2.009
I-45-S	-	-0.060	-0.017	0.069	0.171	0.431	0.659	1.199	2.073	3.430
I-45-S	Wiederholung	-0.055	-0.023	0.046	0.116	0.306	0.454	0.767	1.116	1.565
III-45	-	-0.006	-0.020	-0.014	0.001	0.078	0.110	0.121	0.159	0.166
III-45	Wiederholung	0.001	-0.015	-0.022	-0.004	0.085	0.117	0.146	0.187	0.194
III-45-S	-	0.004	-0.010	0.003	0.038	0.144	0.173	0.200	0.246	0.253
Labor 4										
I-HS-45	-	-0.053	-0.056	-0.005	0.021	0.097	0.102	0.145	0.157	0.168
I-45	-	-0.024	-0.032	0.017	0.036	0.136	0.176	0.262	0.315	0.357
I-50	-	-0.055	-0.051	0.006	0.021	0.135	0.159	0.254	0.297	0.343
I-60	-	0.021	0.082	0.132	0.148	0.260	0.352	0.441	0.515	0.557
I-60	Wiederholung	0.019	0.075	0.142	0.172	0.278	0.346	0.462	0.501	0.520
I-45-S	-	-0.003	0.043	0.106	0.150	0.229	0.279	0.346	0.395	0.431
I-45-S	Wiederholung	-0.014	0.034	0.091	0.312	0.396	0.470	0.575	0.621	0.679
III-45	-	-0.025	-0.028	-0.015	0.075	0.161	0.199	0.233	0.247	0.276
III-45	Wiederholung	-0.039	-0.038	-0.038	-0.035	0.119	0.157	0.195	0.214	0.234
III-45-S	-	-0.026	-0.037	-0.019	0.062	0.149	0.200	0.231	0.241	0.271

Abb. I.7 Lösungsaufnahme pro Zyklus, gemessen während den Sulfatwiderstandsprüfungen gemäss Beschrieb in Kap.3.2.3 an den Betonen gemäss Kap. 3.4.3. Δm_{S1} bis Δm_{S4} : Lösungsaufnahme während Trocknungs- und Tränkungszyklen, Δm_{S5} bis Δm_{S6} : Massenänderung innerhalb einer Woche während der Zusatzlagerung, Δm_{S8} bis Δm_{S12} : Massenänderung innerhalb von zwei Wochen während der Zusatzlagerung. Negative Werte: Verlust von Material infolge Zerfall der Prüfkörper. * = Verlust der Messbolzen.

Mischung	Variation	Lösungsaufnahme pro Zyklus [kg/m³]								
		Δm _{S1}	Δm _{S2}	Δm _{S3}	Δm _{S4}	Δm _{S5}	Δm _{S6}	Δm _{S8}	Δm _{S10}	Δm _{S12}
Labor 1										
I-HS-45	-	84.0	76.8	71.2	69.1	2.8	-1.5	0.5	1.1	0.4
I-45	-	80.0	72.8	67.5	63.7	2.5	0.2	1.4	1.6	1.7
I-50	-	84.7	78.7	73.6	70.9	3.4	0.3	2.2	2.6	3.1
I-60	-	95.5	87.1	81.3	76.4	1.9	2.2	*	*	*
I-60	Wiederholung	93.8	86.4	79.8	74.8	*	*	*	*	*
I-45-S	-	97.4	89.2	78.8	75.8	1.7	1.9	*	*	*
I-45-S	Wiederholung	100.3	93.3	84.9	58.4	1.4	1.7	*	*	*
III-45	-	71.7	43.5	39.5	39.8	3.9	2.7	0.5	0.7	1.1
III-45	Wiederholung	74.9	44.2	40.8	40.1	3.5	2.4	0.8	0.6	0.9
III-45-S	-	88.8	57.1	54.4	55.6	3.2	2.3	0.8	0.4	0.5
Labor 2										
I-HS-45	-	82.9	77.4	72.9	46.0	1.1	0.2	0.9	-0.3	0.8
I-45	-	78.5	72.3	67.8	41.0	1.3	0.8	1.2	1.1	1.5
I-50	-	87.2	82.4	78.0	48.9	2.2	1.0	2.1	2.4	3.1
I-60	-	96.8	93.2	87.9	84.3	4.2	2.5	-3.7	6.5	5.9
I-60	Wiederholung	98.8	94.9	89.5	85.8	3.9	2.2	6.3	0.6	-1.5
I-45-S	-	93.3	87.7	82.1	79.1	2.8	1.8	2.3	3.7	4.0
I-45-S	Wiederholung	103.0	96.9	91.3	87.3	3.6	2.1	3.7	5.1	6.1
III-45	-	64.8	43.2	42.2	42.4	4.3	1.0	1.1	1.1	1.1
III-45	Wiederholung	66.3	44.7	45.2	43.9	4.3	0.4	1.1	1.3	0.9
III-45-S	-	83.5	56.5	56.5	57.5	3.2	0.5	1.0	0.8	0.8
Labor 3										
I-HS-45	-	80.8	74.0	70.9	68.7	2.2	1.4	-0.5	0.9	0.5
I-45	-	77.1	70.4	66.6	64.1	2.6	1.3	0.9	1.3	1.1
I-50	-	87.5	82.1	78.0	75.3	2.7	1.4	1.7	1.7	1.9
I-60	-	94.7	90.9	86.6	84.0	3.8	1.0	2.7	2.6	2.8
I-60	Wiederholung	101.9	97.7	92.4	89.6	3.2	0.8	3.0	2.7	2.6
I-45-S	-	117.0	110.6	104.1	100.5	3.7	0.9	3.2	3.7	4.4
I-45-S	Wiederholung	102.8	97.3	91.1	88.1	3.1	0.4	2.9	2.0	2.3
III-45	-	67.6	46.1	44.0	44.0	4.0	1.0	1.6	0.9	0.3
III-45	Wiederholung	68.5	47.6	44.6	45.0	3.8	1.2	1.4	1.0	0.5
III-45-S	-	-	59.7	58.1	58.6	3.3	0.9	1.3	0.7	0.2
Labor 4										
I-HS-45	-	64.1	63.4	60.5	56.2	1.9	0.6	0.2	0.2	0.2
I-45	-	60.9	59.1	56.6	52.2	1.9	0.9	0.7	0.7	0.5
I-50	-	74.1	69.7	64.1	60.0	1.6	0.4	0.5	0.5	0.2
I-60	-	76.7	77.3	71.4	67.4	2.4	1.1	1.0	0.7	0.3
I-60	Wiederholung	73.2	75.1	69.2	65.9	2.3	1.0	1.0	0.4	0.3
I-45-S	-	75.3	74.0	68.3	62.7	2.0	0.7	0.7	0.5	0.3
I-45-S	Wiederholung	73.0	73.9	68.3	63.6	1.8	0.9	0.4	0.7	0.4
III-45	-	47.9	38.2	37.1	39.1	4.2	1.3	2.0	1.1	0.6
III-45	Wiederholung	52.3	39.0	37.1	39.1	4.2	1.4	1.9	1.2	0.5
III-45-S	-	59.0	49.5	48.6	51.7	3.3	1.1	1.7	1.0	0.6

I.5 Begriffe

Begriff	Bedeutung
Bindemittelleimvolumen	Volumenanteil von Bindemittel + Wasser pro m ³ Beton
w/b-Wert	Wasser-Bindemittel-Wert, wobei die Bezeichnung „Bindemittel“ sowohl Zement (z) als auch Zusatzstoffe (ZS) umfasst: $w/b = w/(z + ZS)$
Brucit	Mg(OH) ₂
Calcium-Silikat-Hydrat	CSH, Hauptreaktionsprodukt beim Abbinden des Zementes
Ettringit	3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ ·32H ₂ O
Gips	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Hydrogenkarbonat	HCO ₃ ⁻
Magnesiumsulfat	MgSO ₄
Mirabilit	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Monokarbonat	3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaCO ₃ ·11H ₂ O
Monosulfat	3CaO·Al ₂ O ₃ ·CaSO ₄ ·12H ₂ O
Natriumsulfat	Na ₂ SO ₄
Portlandit	Ca(OH) ₂
Thaumasit	CaSiO ₃ ·CaSO ₄ ·CaCO ₃ ·15H ₂ O
Thenardit	Na ₂ SO ₄
Tricalciumsilikat	3CaO·SiO ₂ => C ₃ S (Zementnotation)
Bicalciumsilikat	2CaO·SiO ₂ => C ₂ S (Zementnotation)
Calciumaluminat	3CaO·Al ₂ O ₃ => C ₃ A (Zementnotation)
Ferrit	4CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃ => C ₄ AF (Zementnotation)

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
ATG	AlpTransit Gotthard AG
CSH	Calcium-Silikat-Hydrat: Hauptreaktionsprodukt beim Abbinden des Zementes
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EN	Europäische Norm
FGU	Fachgruppe für Untertagbau
FT	Frost-Tausalz
NEAT	Neue Eisenbahn-Alpentransversale
SCC	Selbstverdichtender Beton
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SN	Schweizer Norm
TFB	Technik und Forschung im Betonbau
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
w/b-Wert	Massenmässiges Verhältnis von Wasser zu Bindemittel (siehe auch Begriffe)
VSH	VersuchsStollen Hagerbach
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
XRD	Röntgendiffraktion
D _O	Sauerstoffdiffusionskoeffizient
q _w	Wasserleitfähigkeit
U _B	Wassergehalt nach zweitägiger Trocknung bei 50°C in der Wasserleitfähigkeitsprüfung
U _E	Gesamtwassergehalt nach Wasserlagerung in der Wasserleitfähigkeitsprüfung
CEM I 42.5 N HS	Sulfatbeständiger Portlandzement nach Norm SN EN 197-1 mit einer Normfestigkeit nach 28 Tagen von 42.5 MPa, normalabbindend
CEM I 32.5 R	Portlandzement nach Norm SN EN 197-1 mit einer Normfestigkeit nach 28 Tagen von 32.5 MPa, schnellabbindend
CEM III/B 32.5 N HS	Sulfatbeständiger Hochofenzement nach Norm SN EN 197-1 bestehend aus 20 – 34 % Portlandzementklinker und 66 – 80 % Hüttensand mit einer Normfestigkeit nach 28 Tagen von 32.5 MPa, normalabbindend
CEM II/A-LL 42.5 N	Portlandkalksteinzement nach Norm SN EN 197-1 bestehend aus 80 – 94 % Portlandzementklinker und 6 – 20 % Kalksteinmehl mit einer Normfestigkeit nach 28 Tagen von 42.5 MPa, normalabbindend
CEM II/B-M (V-LL) 32.5 R	Portlandkompositzement nach Norm SN EN 197-1 bestehend aus 65 – 79 % Portlandzementklinker und 21 – 35 % eines Gemisches von kieselsäurereicher Flugasche und Kalksteinmehl mit einer Normfestigkeit nach 28 Tagen von 32.5 MPa, schnellabbindend

Literaturverzeichnis

- | | |
|-----------------------|---|
| [Al-Amoudi, 1995] | Al-Amoudi O.S.B., Maslehuddin M., Saadi M.M. (1995) Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. <i>ACI Materials Journal</i> , 92, 15-24. |
| [Bellmann, 2006] | Bellmann, F., Möser, B., Stark, J. (2006): Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. <i>Cement and Concrete Research</i> , 36, 358-363. |
| [Bellmann, 2006] | Bellmann, F., Möser, B., Stark, J. (2006): Influence of sulfate solution concentration on the formation of gypsum in sulfate resistance test specimen. <i>Cement and Concrete Research</i> , 36, 358-363. |
| [Bensted, 1999] | Bensted, J. (1999): Thaumasite -- background and nature in deterioration of cements, mortars and concretes. <i>Cement Concrete Composites</i> , 21 (2), 117-121. |
| [Bensted, 2000] | Bensted, J. (2000): Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes. <i>Zement Kalk Gips</i> , 53, 704-709. |
| [Blanco-Varela, 2006] | Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J., Martinez-Ramirez, S. (2006): Effect of cement C3A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortars. <i>Cement Concrete Research</i> , 36 (4), 707-715. |
| [Brown, 2002] | Brown, P., Hooton, R.D. (2002): Ettringite and thaumasite formation in laboratory concretes prepared using sulfate-resisting cements. <i>Cement Concrete Composites</i> , 24 (3-4), 361-370. |
| [Buenfeld, 1998] | Buenfeld, NR., und Okundi, E. (1998): Effect of cement content on transport in concrete. <i>Magazine of Concrete Research</i> , 50, 339-351. |
| [Crammond, 1985] | Crammond, N.J. (1985): Quantitative x-ray diffraction analysis of Ettringite, Thaumasite and gypsum in concretes and mortars. <i>Cement Concrete Research</i> , 15 (3), 431-442. |
| [Crammond, 1995] | Crammond, N.J., Halliwell, M.A. (1995): The thaumasite form of sulfate attack in concretes containing a source of carbonate ions -- a microstructural Overview. In <i>International Symposium for Advances in Concrete Technology</i> . |
| [Holzer, 1999] | Holzer, L., (1999): Betonkorrosion durch aggressive Bergwässer und mikrobiologische Aktivität im Zugwaldtunnel (Vereina-Linie), p. 30. Empa Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf. |
| [Holzer, 2001] | Holzer, L., (2001): Untersuchung zu Aussagekraft von Sulfatbeständigkeitsprüfungen, Empa-Bericht Nr. 201'593/4. |
| [Koch, 1960] | Koch, A., Steinegger, H. (1960): Ein Schnellprüfverfahren für Zemente auf ihr Verhalten bei Sulfatangriff. <i>Zement-Kalk-Gips</i> , 7, 317-324. |
| [Kollmann, 1978] | Kollmann, H., Strübel G. (1978): Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen durch Sulfate Teil 1. <i>Betonwerk und Fertigteil-Technik</i> , 10, 609-613. |
| [Kollmann, 1979a] | Kollmann, H.(1979): Untersuchungen über Ausblühungs- und Treiberscheinungen durch Sulfate, Teil 2. <i>Betonwerk und Fertigteil-Technik</i> 11, 671-677. |
| [Kollmann, 1979b] | Kollmann, H. (1979): Untersuchungen über das Ausblühungs- und Treiberscheinungen durch Sulfate, Teil 3. <i>Betonwerk und Fertigteil-Technik</i> , 12, 741-746. |
| [Lawrence, 1984] | Lawrence, CD., (1984): Transport of oxygen through concrete. In: Glasser FP. (ed.): <i>The Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement</i> . British Ceramic Society Proceedings, 35, 277-293. |
| [Leemann, 2011] | Leemann, A., Loser, R. (2011): Analysis of concrete in a vertical ventilation shaft exposed to sulfate-containing groundwater for 45 years. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 33, 74-83. |
| [Lothenbach, 2006] | Lothenbach, B., Wieland, E. (2006): A thermodynamic approach to the hydration of sulphateresisting Portland cement. <i>Waste management</i> , 26 (7), 706-719. |
| [Neubauer, 2002] | Neubauer, J. Götz-Neunhoeffler, F. (2002): Efficiency of high sensitive heat flow calorimetry in examination of OPC hydration. <i>Proc 24th Int. Conf. Cement Microscopy</i> , San Diego, California. |
| [Monteiro, 2003] | Monteiro, P.J.M., Kurtis, K.E. (2003): Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack. <i>Cement and Concrete Research</i> , 33, 987-993. |
| [Nobst, 2003] | Nobst, P., Stark, J. (2003): Investigations on the influence of cement type on thaumasite formation. <i>Cement Concrete Composites</i> , 25 (8), 899-906. |
| [Paglia, 2000] | Paglia, C., und Studer, W. (2000): Reaktionsmechanismen und Beständigkeitsvorhersage bei Sulfatangriff auf Beton, AlpTransit Gotthard AG, Bericht Nr. 96110-16. |
| [Pfiffner, 2001] | Pfiffner, M., und Holzer L. (2001): Schädigungsmechanismen der Zementsteinkorrosion: Auslaugung und Sulfatangriff. In <i>Bergwasserproblematik in Tunnelbauwerken</i> , Symposium durchge- |

	führt durch die EMPA Akademie, Dübendorf, 30. November 2001, 9-33.
[Projektl. Gotthard, 1996]	Projektleitung Gotthard (1996): Prüfungssystem für Betonmischungen, Dokumentation für die Stufen 2 und 3: ATG Abschnitt Gotthard-Basistunnel.
[Romer, 1998]	Romer, M., und Lienemann, P. (1998): Versalzung und Korrosion von Spritzbeton (Sicherheitsstollen des Gotthard-Strassentunnels). <i>Chimia</i> , Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft, 52, 197-201.
[Romer, 2003]	Romer, M., Holzer, L., und Pfiffner, M. (2003): Swiss tunnel structures: concrete damage by formation of thaumasite. <i>Cement & Concrete Composites</i> , 25, 1111-1117.
[Scherer, 2004]	Scherer, G.W. (2004): Stress from crystallisation of salt. <i>Cement and Concrete Research</i> , 34 (9), 1613-1624.
[Schmidt, 2007]	Schmidt, T. (2007): Sulfate attack and the role of internal carbonate on the formation of thaumasite. PHD-thesis, EPFL Lausanne
[SIA, 2000]	SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2000), SIA 215.002: SN EN 197-1:2000 Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformität von Normalzementen.
[SIA, 2003]	SIA Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (2003), SIA 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen.
[Studer, 2001a]	Studer, W. (2001): Sulfat-Kurzprüfung Erste Ergebnisse und Bewertung des Verfahrens Vergleich mit der ATG-Prüfung, Fachkommission „Beton“ AlpTransitGotthard AG, Bericht Nr. 2/043-1.
[Studer, 2001b]	Studer, W. (2001): Prüfung der Sulfatbeständigkeit, In „Bergwasserproblematik in Tunnelbauwerken“, Symposium durchgeführt durch die EMPA Akademie, Dübendorf, 30. November 2001, 35-41.
[Taylor, 1997a]	Taylor, H.F.W. (1997): <i>Cement Chemistry</i> . London: Thomas Telford.
[Taylor, 1997b]	Taylor, H.F.W., Gollop, R.S. (1997): Some chemical and microstructural aspects of concrete durability. In <i>Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems</i> , K.L. Scrivener and J.F. Young, Editors. E & FN Spon: London, 177-184.
Thaumasite Expert Group, 1999]	The Thaumasite Expert Group (1999): The thaumasite form of sulfate attack: risks, diagnosis, remedial works and guidance on new constructions. London. p. 180.
[VAB, 2007]	VAB / ALA Vereinigung Akkreditierter Baustoffprüflabors (2007): VAB-Ringversuch Sulfatwiderstand nach SIA 262/1, Anhang D. Dokument Nr. 2-1-024-06.06a
[VSS1355, 2011]	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
[Wittekind, 1960]	Wittekindt, W. (1960): Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung. <i>Zement-Kalk-Gips</i> , 12.

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 30.01.2013 / 03.04.2013/ 09.04.2013

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2010/001
Projekttitel: Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D
Enddatum: 03.04.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton ist seit 2003 Bestandteil der Norm SIA 262/1. Aufgrund verschiedener Unklarheiten und Fragen, welche im Zuge der Anwendung der Prüfung in der Praxis aufgetreten sind, wurde in einem ersten Forschungsprojekt (FGU 2007/002, VSS-Bericht 1355, 2011) diese bestehende Prüfung systematisch untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass bei der Prüfung grundsätzlich Mechanismen ablaufen, welche mit den Erfahrungen aus der Auswertung verschiedener Schadenfälle in Tunneln übereinstimmen. Die angewendete Auswertungsformel führt hingegen insbesondere beim Normalbeton zu Resultaten, welche den Erfahrungen aus Langzeitversuchen widersprechen. Zudem wurde festgestellt, dass der Sulfateintrag in die Prüfkörper optimiert und eine längere Reaktionszeit für die Sulfatinteraktion zur Verfügung gestellt werden muss. Aus diesem Grund wurde das vorliegende Folgeprojekt gestartet. Dieses hatte zum Ziel, ein adaptiertes Verfahren zu entwickeln, welches zwar grundlegend auf dem bestehenden Verfahren basiert, aber eine bessere Aussagekraft ermöglicht.

In einer ersten Phase wurden dazu an einer beschränkten Matrix von Betonmischungen verschiedene Prüfvariationen durchgeführt und deren Auswirkung auf verschiedene Parameter wie Längenänderung, Sulfatlösungsaufnahme, Mineralphasenbildung, etc. untersucht. Basierend auf diesen Resultaten wurde das definitive Prüfverfahren festgelegt. Dieses unterscheidet sich zum bestehenden Verfahren im Wesentlichen darin, dass während den vier Trocknungs- und Tränkungszyklen die Trocknungsphase verlängert und die Tränkungsphase verkürzt wird. Dadurch wird der Sulfateintrag erhöht. Zudem erfolgt im Anschluss an diese Zyklen eine Zusatzlagerung von 8 Wochen in Sulfatlösung ohne weitere Trocknungs- und Tränkungszyklen. Damit wird mehr Reaktionszeit zur Verfügung gestellt und die sulfatbedingten Dehnungen werden grösser. Als Beurteilungskriterium wird nur noch die gemessene Dehnung während der Zusatzlagerung verwendet. Es erfolgt keine weitere Auswertung mit einer Formel wie bei der bestehenden Prüfung.

Dieses adaptierte Verfahren wurde in einer zweiten Phase an einer grösseren Matrix verschiedener Betonmischungen unter Variation von Bindemitteltyp, w/b-Wert und Bindemittelleimvolumen validiert. Dabei hat die Dehnung grundsätzlich mit zunehmendem w/b-Wert sowie zunehmendem Leimvolumen ebenfalls zugenommen, wobei sowohl diese Zunahme als auch die absolute Grösse der Dehnung stark vom Bindemitteltyp abhängt. Diese Resultate stimmen gut mit den Erfahrungen aus Untersuchungen bei Schadenfällen und mit Resultaten aus Langzeitversuchen aus der Literatur überein. Über die während der Prüfung an den Probekörpern gemessene Veränderung des dynamischen E-Moduls war es zudem möglich, einen Grenzwert für die Dehnung zu definieren, ab welcher eine signifikante Schädigung der Probekörper eintritt. Dieser Wert von 1.2 ‰ Dehnung während der Zusatzlagerung könnte auch als Beurteilungskriterium (Richtwert) bei der Anwendung der Prüfung in der Praxis verwendet werden.

In einer dritten Phase wurden mit vier Labors Vergleichsversuche an ausgewählten Betonmischungen durchgeführt, um einen ersten Anhaltspunkt über die Wiederholbarkeit und die Vergleichbarkeit der Prüfung zu bekommen. Während die Wiederholbarkeit innerhalb der einzelnen Labors relativ gut war, ist eine Aussage über die Vergleichbarkeit schwierig. Der Grund liegt darin, dass bei einem Labor bei mehreren Messserien Messbolzen abgefallen sind und ein zweites Labor generell über alle Versuche eine deutlich geringere Sulfatlösungsaufnahme gemessen hat wie die übrigen drei Labors. Eine belastbare Verifikation der Prüfung in Bezug auf die Wiederhol- und Vergleichbarkeit ist somit noch ausstehend. Trotz dieser Einschränkungen dürfte die Vergleichbarkeit im Rahmen bekannter Dauerhaftigkeitsprüfungen (z. B. FT-Widerstand, Chloridwiderstand) liegen. Zunehmende Erfahrung und weitere Ringversuche sind aber notwendig, um die Vergleichbarkeit der Prüfung zu verbessern.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Das Ziel, eine adaptierte Prüfung für den Sulfatwiderstand von Beton zu entwickeln, welche eine verbesserte Aussagekraft in Bezug auf die wesentlichen betontechnologischen Steuergrössen ermöglicht, wurde erreicht. Die Wiederholbarkeit der Prüfung innerhalb eines Labors ist generell gut. Allerdings steht eine belastbare Verifikation in Bezug auf die Vergleichbarkeit der Prüfung unter verschiedenen Labors noch aus.

Folgerungen und Empfehlungen:

Diese adaptierte Prüfung wurde bereits in die Norm SIA 262/1, welche sich zur Zeit in Überarbeitung befindet, als Ersatz für die bestehende Prüfung Anhang D integriert und sollte noch im Jahr 2013 in Kraft treten. Nach der Einführung der Prüfung und dem Sammeln entsprechender Erfahrungen in den Labors sind Vergleichsversuche notwendig, um belastbare Aussagen über die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Prüfung ableiten zu können. Ein entsprechender Ringversuch ist beim VAB (Verein akkreditierter Baustoffprüflabors) bereits eingeplant.

Publikationen:

- VSS-Schlussbericht
- Übernahme in die Norm SIA 262/1, Anhang D, Ausgabe 2013

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Loser

Vorname: Roman

Amt, Firma, Institut: Empa, Abteilung Beton/Bauchemie, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Arbeiten wurden sorgfältig vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. Die Interpretationen der Ergebnisse sind schlüssig.

Die bestehende Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton wurde so abgeändert, dass die Aussagekraft des Verfahrens verbessert werden konnte. Die sich daraus ergebenden Konsequenzen hinsichtlich Sulfataufnahme, Expansion und Reaktionsmechanismen wurden analysiert und die Prüfung an einer ausgedehnten Matrix verschiedener Betone validiert.

Die Begleitkommission beurteilt die Zielerreichung ähnlich wie die Forschungsstelle: Eine wesentliche Erkenntnis besteht darin, dass nur mit einer Zusatzlagerung materialtechnisch relevante Veränderungen auftreten. Deshalb ist es naheliegend, diese Zusatzlagerung als wesentliche Anpassung und Verbesserung der bisherigen Untersuchungen zu postulieren. Diese Annahme ist zwar plausibel, eine abschliessende experimentelle Verifikation steht jedoch noch aus.

Umsetzung:

Der Praxis steht mit der adaptierten Methode ein Verfahren zur Verfügung, mit dem Betonkonzepte unter Variierung der bekannten betontechnologischen Grössen (Zementart, Zementgehalt, w/z-Wert, etc.) optimiert werden können. Die Umsetzung der Resultate des Projektes in die Praxis ist durch die Berücksichtigung des adaptierten Prüfverfahrens in der Norm SIA 262/1 gewährleistet.

weitergehender Forschungsbedarf:

Eingehendere Verifikation des Verfahrens durch vergleichende Untersuchungen mehrerer Labors.

Einfluss auf Normenwerk:

Übernahme der Prüfung in die Norm SIA 262/1 "Betonbau - Ergänzende Festlegungen", Ausgabe 2013

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Anagnostou

Vorname: Georgios

Amt, Firma, Institut: ETH Zürich, IGT, Professur für Untertagebau, Wolfgang-Pauli-Strasse 15, 8093 Zürich

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Zürich, 09.04.2013

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel Acoustical guidance in road tunnels Guidage acoustique dans les tunnels routiers	2012
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining? New findings on the mobility behavior through Data Mining?	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und technologientransfer im Verkehrsbereich Know-how and technology transfer in the transport sector Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten Pronostics de trafic avec des données en temps réel Traffic forecast with real-time data	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften <i>Potentiel du covoiturage</i> <i>Potential of Car Pooling</i>	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schwiessnähte von KDB <i>Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité</i> <i>Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes</i>	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen <i>Signalisations dynamiques sur des routes principales</i> <i>Dynamic signalling at primary distributors</i>	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau <i>Expériences dans la construction de ponts en Suisse</i> <i>Experiences in Swiss Bridge Construction</i>	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems</i> <i>Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität <i>Mode of action and potential of combined mobility</i> <i>Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée</i>	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr <i>Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur</i> <i>Benefits of travel time savings in passenger traffic</i>	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel <i>Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg</i> <i>Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel</i>	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich <i>Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art</i> <i>Noise reflections on structures in the street</i>	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen <i>Data storage in tunnel process control systems</i> <i>Enregistrement ds données de systèmes de supervision de tunnels</i>	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen <i>Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons</i> <i>Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes</i>	2012
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen <i>Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables</i>	2012