



Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis

**Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1,
Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique**

**Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1,
appendix D: applicability and relevance for use in practice**

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

VSH VersuchsStollen Hagerbach AG
Reto Niederhauser, dipl. Bauing. ETH

**Forschungsauftrag FGU 2007/002 auf Antrag der
Fachgruppe für Unteragbau (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)



Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis

Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique

Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice

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

VSH VersuchsStollen Hagerbach AG
Reto Niederhauser, dipl. Bauing. ETH

**Forschungsauftrag FGU 2007/ auf Antrag der
Fachgruppe für Unteragbau (FGU)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Roman Loser, Empa

Mitglieder

Andreas Leemann, Empa

Reto Niederhauser, VSH

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://partnershop.vss.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	8
	Summary	9
1	Einleitung	11
1.1	Hintergrund	11
1.2	Projektziele	12
2	Grundlagen	13
2.1	Sulfatwiderstandsprüfung nach SIA 262/1	13
2.2	Stand der Forschung	15
2.3	Entwicklung und Anwendung der Schnellprüfung	16
3	Untersuchungen	19
3.1	Materialien	19
3.2	Methoden	19
3.2.1	Sulfatwiderstand	19
3.2.2	Festigkeit	20
3.2.3	Wasserleitfähigkeit	20
3.2.4	Sauerstoffdiffusionskoeffizient	20
3.2.5	Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)	21
3.2.6	Dynamischer E-Modul	21
3.2.7	Sulfateindringfront	21
3.2.8	Mineralphasen	22
3.3	Versuchsmatrix	24
3.3.1	Variation Betonmischungen	24
3.3.2	Variation Prüfablauf Sulfatwiderstandsprüfung	25
3.4	Zusatzlagerung	26
4	Resultate	28
4.1	Allgemeine Betoneigenschaften	28
4.2	Sulfatwiderstandsprüfungen	30
4.2.1	Einleitung	30
4.2.2	Normprüfungen	30
4.2.3	Würfelabmessung	32
4.2.4	Wasserlagerung	33
4.2.5	Lösungszusammensetzung	35
4.2.6	Lösungskonzentration	36
4.2.7	Prüfalter	37
4.2.8	Temperatur	38
4.2.9	Anzahl Zyklen	39
4.2.10	Leimvolumen	40
4.3	Dynamischer E-Modul	41
4.4	Sulfateindringtiefe	42
4.5	Mineralphasen	45
4.5.1	Experimentelle Bestimmung mittels Röntgendiffraktion (XRD)	45
4.5.2	Experimentelle Bestimmung mittels Elektronenmikroskopie (EDX)	46
4.5.3	Theoretische Bestimmung mittels thermodynamischer Modellierung	46
4.6	Zusatzlagerung	49
5	Diskussion	51
6	Schlussfolgerungen	56
	Anhänge	58
	Begriffe	64
	Abkürzungen	65
	Literaturverzeichnis	66
	Projektabschluss	68
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	70

Zusammenfassung

Beim Kontakt von Beton mit sulfathaltigen Wässern (z.B. Bergwasser im Tunnelbau) können Bestandteile des Zementes mit den Sulfationen unter einer Volumenzunahme zu neuen Mineralphasen reagieren und dadurch zu einer Expansion mit Rissbildung oder zu einem vollständigen Festigkeitsverlust des Betons führen. Mehrere solcher Sulfatschäden in Schweizer Tunnels sind in der Literatur dokumentiert. Im Zuge des Baus der beiden neuen Alpentransversalen (NEAT) wurde deshalb ein Schnelltest für die Prüfung der Sulfatbeständigkeit von Beton entwickelt, welcher im Jahr 2003 in die Norm SIA 262/1 übernommen wurde. Bei dieser Prüfung werden Betonbohrkerne vier Trocknungs- und Tränkungszyklen in Sulfatlösung ausgesetzt und jeweils die Längenänderung und die Lösungsaufnahme bestimmt. Mittels einer Auswertungsformel wird eine Sulfatdehnung berechnet, welche ein Mass für die Sulfatbeständigkeit des Betons darstellt.

Bei der Anwendung dieser Prüfung in der Praxis hat sich gezeigt, dass die Resultate insbesondere bei Normalbeton schwierig zu interpretieren sind, da sie sich nur bedingt durch die üblichen betontechnologischen Grössen wie z.B. w/b-Wert und Zementart steuern lassen. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es deshalb, das grundlegende Verständnis der ablaufenden Mechanismen während der Sulfatwiderstandsprüfung zu untersuchen und zu verstehen. Dazu wurden innerhalb einer systematischen Matrix verschiedener Betonmischungen sowohl Sulfatwiderstandsprüfungen nach den Normvorgaben als auch verschiedene Variationen davon durchgeführt und ausgewertet. Zusätzlich wurden das Eindringen der Sulfatfront in die Prüfkörper verfolgt sowie die gebildeten Mineralphasen analysiert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass bei der Prüfung grundsätzlich Mechanismen ablaufen, welche mit den Erfahrungen aus der Auswertung verschiedener Schadenfälle in Tunneln übereinstimmen (z.B. die gebildeten Mineralphasen). Die angewendete Auswertungsformel führt hingegen insbesondere beim Normalbeton zu Resultaten, welche den Erfahrungen aus Langzeitversuchen widersprechen. Dies hängt im Wesentlichen mit dem Extrapolationsfaktor in der Auswertungsformel zusammen, welcher den Einfluss der Kinetik der ablaufenden Prozesse (Schadstofftransport durch kapillares Saugen und Diffusion, chemische Reaktionen) gegenüber dem Einfluss des reinen Reaktionspotentials stark reduziert. Eine Verwendung der gemessenen Dehnung ohne Extrapolationsfaktor führt zu Resultaten, die wesentlich besser mit Erfahrungen aus Langzeitversuchen in Einklang stehen. Dennoch ist beim Prüfverfahren der Eintrag des Sulfates in die Prüfkörper zu optimieren, da während den vier Tränkungs- und Trocknungszyklen, insbesondere bei tieferen w/b- Werten, nur in einer dünnen Aussenschicht Sulfat eingetragen wird. 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 Dehnung zu erzeugen, die sich wesentlich von einer Dehnung im Falle von Wasser ohne Sulfatbeigabe als Prüfmedium unterscheidet. 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 drängt sich somit auf. Aktuell ist seitens Normenkommission SIA 262 die Überarbeitung der Norm SIA 262/1 in Angriff genommen worden. Es besteht somit die Möglichkeit, Änderungen des Beschriebs für die Sulfatwiderstandsprüfung in die überarbeitete Norm einfließen zu lassen. In einem Folgeprojekt sollten deshalb so schnell wie möglich die vorgeschlagenen Änderungen systematisch untersucht werden, um daraus eine neue Prüfspezifikation ableiten zu können.

Résumé

Lorsque le béton entre en contact avec des eaux sulfatées (p. ex. eaux souterraines dans les tunnels) certains composants du ciment réagissent avec les ions sulfates pour former une nouvelle phase minérale qui s'accompagne d'une augmentation de volume et provoque ainsi une expansion qui conduit à la formation de fissures ou même à une perte totale de la résistance du béton. Plusieurs cas de dommages dus aux sulfates dans des tunnels suisses sont documentés dans la littérature. Dans le cadre de la construction des nouveaux tunnels de la nouvelle ligne ferroviaire à travers les Alpes (NLFA), on a ainsi développé un essai accéléré pour la détermination de la résistance du béton aux sulfates qui a été repris dans la norme SIA 261/1 en 2003. Dans cet essai, des carottes de béton sont soumises à quatre cycles d'immersion dans une solution sulfatique suivie d'un séchage après lesquels on mesure la variation de longueur des éprouvettes et leur absorption de la solution. On calcule alors à l'aide d'une formule l'allongement provoqué par les sulfates qui représente la grandeur d'évaluation de la résistance du béton aux sulfates.

L'utilisation de cet essai dans la pratique a montré que ses résultats sont difficiles à interpréter, cela en particulier pour le béton normal, car ils ne sont que peu influencés par les grandeurs technologiques du béton, telles que le rapport E/C et le type de ciment. Le présent projet de recherche avait pour but d'élucider et de comprendre les mécanismes fondamentaux qui se déroulent au cours de cet essai de résistance aux sulfates. Pour cela on a réalisé et évalué aussi bien des essais de résistance aux sulfates selon la norme que des essais avec variation des paramètres d'essai selon une matrice systématique sur différents mélanges de béton. En plus de cela, on a suivi la progression du front des sulfates dans les éprouvettes et analysé les phases minérales que se formaient.

Cette étude a montré que les mécanismes fondamentaux qui se déroulent lors de l'essai accéléré concordent avec les résultats de l'évaluation de différents cas de dommages dans des tunnels (p. ex. pour ce qui est des phases minérales qui se forment). Par contre la formule d'évaluation conduit, en particulier pour le béton normal, à des résultats qui sont en contradiction avec les essais de longue durée. Ceci est dû principalement au facteur d'extrapolation de la formule d'évaluation qui provoque une diminution de la prise en compte de l'influence de la cinétique du processus (transport des sulfates par aspiration capillaire et diffusion, réactions chimiques) par rapport à celle du potentiel de réaction proprement dit. L'utilisation de l'allongement mesuré sans facteur d'extrapolation conduit à des résultats qui concordent notablement mieux avec ceux des essais de longue durée. Cependant il faut encore optimiser dans la méthode d'essai la pénétration des sulfates dans les éprouvettes car au cours des quatre cycles d'immersion/séchage, et en particulier pour les rapports E/C bas, les sulfates ne pénètrent que dans une mince couche superficielle, ce qui est en relation avec le fait qu'avec un séchage de deux jours, le cœur des éprouvettes ne sèche pratiquement pas.

De plus, il est apparu que, pour le béton normal, le temps de réaction est trop court pour provoquer un allongement qui diffère notablement de celui induit par de l'eau sans adjonction de sulfates dans le liquide d'essai. Pour améliorer la pertinence des résultats, il faudrait donc augmenter la durée de réaction ou, autrement dit, la durée d'immersion dans la solution de sulfates. Les premiers essais réalisés dans ce sens ont montré qu'une immersion supplémentaire dans la solution de sulfates à la suite des quatre cycles d'immersion/séchage est une approche prometteuse.

Une modification de la spécification d'essai s'impose donc. Actuellement la commission de la norme SIA 262 a entrepris la révision de la norme SIA 262/1. Ceci offre ainsi la possibilité de modifier la méthode de l'essai accéléré de la résistance aux sulfates dans la version révisée de cette norme. Un projet subséquent devrait s'attaquer aussi rapidement que possible à l'étude systématique des modifications proposées pour établir une nouvelle spécification d'essai.

Summary

When concrete is in contact with sulfate-bearing groundwater (e.g. in tunnels), parts of the cement can react with the sulfate ions to form voluminous minerals leading to an expansion and crack formation or to a complete loss of strength of the concrete. Several sulfate related damages in Swiss tunnels are reported in the literature. During planning and construction of the new transversal of the Alps (NEAT), an accelerated test for the sulfate resistance of concrete was developed, which was adopted into Swiss standard SIA 262/1 in 2003. For this accelerated test, concrete cores are subjected to drying and immersion cycles in sulfate solution and the change in length as well as the uptake of solution are determined. A "sulfate strain" is then calculated using an empirical formula, which is an indicator for the sulfate resistance of the concrete.

Using this test in practice, it was observed that results of normal concrete are difficult to interpret since there was no obvious relation between the well-known governing factors of sulfate resistance, like w/b-ratio and binder type, and the test results. Therefore, the aim of this research project was to improve the basic knowledge of the mechanisms going on during the test. In a systematic matrix of different concrete mixtures, the accelerated sulfate resistance test was performed according to the standard as well as according to different variations of the test procedure. On selected samples, the ingress of the sulfate into the specimens was analyzed and the formed minerals were determined.

It could be shown, that the mechanisms going on during the accelerated test are in good agreement with the experience collected during the analysis of case studies in damaged tunnels (e.g. the type of minerals which is formed). However, the use of the formula for calculating the "sulfate strain" creates results which are, especially for normal concrete, in contradiction to the experience made with long term tests. This is mainly a result of the extrapolation factor in the formula, which strongly reduces the influence of the kinetics of the processes (transport of sulfate by capillary suction and diffusion, chemical reactions) compared to the influence of the theoretical chemical reaction potential. If only the measured strain is assessed, the results are in much better accordance to the experiences of long term tests. Still, the ingress of sulfate into the specimens has to be optimized, since sulfate is only present in the outermost layer of the specimens after the four drying and wetting cycles, especially in case of concrete with low w/b-ratios. This is a result of only two days of drying that are insufficient to remove moisture from the center part of the cores.

Furthermore it was found, that for normal concrete, the time for the chemical reaction is too short to generate expansion strains that are considerably different from the strain measured in pure water. Therefore, it is necessary to increase the reaction time, e.g. by increasing the storage time in sulfate solution. Preliminary tests have shown, that an additional storage in sulfate solution after the four drying and wetting cycles is a promising approach.

As a result, a change of the test specifications is needed. At the moment, a revision of the standard SIA 262/1 is planned which opens the possibility to adapt the test specifications directly in the standard. Therefore, the proposed adaptations of the test procedure should be investigated systematically in a follow-up project, to provide test specifications for the revised standard SIA 262/1.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Tunnelbauwerke stellen zentrale verkehrstechnische Objekte im schweizerischen Strassen- und Schienennetz sowie wichtige Elemente in der Nutzung der Wasserkraft 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. In solchen Bereichen muss der Beton dem Bergwasser hinsichtlich Dauerhaftigkeit einen entsprechenden Widerstand entgegenbringen. Bergwasser enthält immer ein Gemisch von gelösten Ionen unterschiedlicher Konzentration. Dabei sind für den Beton vor allem die Sulfationen von Bedeutung. Sulfationen können mit Bestandteilen des Zementes unter einer Volumenzunahme zu neuen Mineralphasen reagieren (z.B. Ettringit oder Thaumasit) und dadurch zu einer Expansion mit Rissbildung oder zu einem vollständigen Festigkeitsverlust des Zementsteines führen. 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.

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 [Holzer, 1999 / Pfiffner, 2001 / Romer, 1998 / Romer, 2003]. Die Gefahr des Sulfatangriffes ist auch bei den Anforderungen und Betonkonzepten für die beiden neuen Alpentransversalen (NEAT) berücksichtigt worden. In der Phase der Eignungsprüfungen wurde die Sulfatprüfung nach AlpTransit Gotthard (ATG) eingesetzt, welche zwei Jahre dauert. Bei dieser Prüfung dringt das Sulfat über reine Diffusion in den Beton ein. Um den Sulfatwiderstand von Beton während der Ausführung in kürzerer Zeit prüfen zu können, wurde ein entsprechender Schnelltest mit Sulfateintrag durch Tränkungs- und Trocknungszyklen entwickelt [Studer, 2001a, / Studer 2001b]. Durch Verwendung der gleichen Betonsorten konnte damit eine teilweise Korrelation mit der ATG-Prüfung aufgezeigt werden. Diese verkürzte Prüfung wurde in leicht abgeänderter Form in die Norma SIA 262/1 (2003) [SIA, 2003] übernommen. Die Prüfung gemäss SIA 262/1 hat gegenüber der ATG-Prüfung neben der kürzeren Prüfdauer (28 Tage anstatt 2 Jahre) den weiteren Vorteil, dass die Sulfataufnahme während der Prüfung bekannt ist. Die Aussage der Sulfatprüfung ist - wie bei jedem anderen Performance-Test auch - dass bei einer positiven (guten) Beurteilung in der Prüfung die Wahrscheinlichkeit für einen grossen Schaden am Objekt gering ist.

Nachdem dieses Prüfverfahren nun schon einige Jahre verwendet wird, liegen weitreichende Erfahrungen vor. Diese Erfahrung brachte neben einer detaillierteren Spezifizierung des Prüfablaufes innerhalb der akkreditierten Baustoffprüflabors (VAB) auch einige offene Punkte und Fragen im Zusammenhang mit der Prüfung zu Tage:

- Weshalb werden zum Teil schlechte Wiederholbarkeiten und Vergleichbarkeiten erzielt?
- Wieso treten oft unerklärliche "Ausreisser" in der laufenden Produktionskontrolle auf?
- Wie wirken sich bekannte betontechnologische Steuergrössen (w/b-Wert, Zementart, Zementgehalt, etc.) auf die Prüfergebnisse aus?
- Welche Mechanismen (chemisch, physikalisch) laufen während der Prüfung ab und wie ist deren Vergleichbarkeit mit den am Bauwerk ablaufenden Mechanismen?
- Welche zusätzlichen Einflüsse gibt es und wie wirken sich diese auf die Prüfergebnisse aus?
- Wie wirken sich die Ausgangsstoffe und deren Zusammensetzung auf die Prüfergebnisse aus?

- Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Grenzwert und der Beurteilung

Aufgrund der bisher gesammelten Erfahrung und der sich daraus ergebenden offenen Fragen wurde das vorliegende Forschungsprojekt initiiert. Dabei sollen die Kenntnisse der Abläufe während der Sulfatprüfung und deren Auswertung vertieft und die allgemeine Übertragbarkeit der Prüfung auf Normalbeton validiert werden.

1.2 Projektziele

Die umfangreichen Erfahrungen mit der seit 2003 in der SIA 262/1 verankerten Prüfung des Sulfatwiderstandes zeigen, dass ein Bedürfnis besteht, das Wissen über die massgebenden Grössen bei diesem Verfahren zu erweitern. Hauptziel des vorliegenden Projektes ist es, die während der Prüfung ablaufenden Mechanismen im Detail zu verstehen, um so die Grundlage zur Beantwortung der aufgetauchten Fragen zu liefern. Dies soll an Normalbeton und selbstverdichtenden Betonen mittels systematischer Variation von Betonzusammensetzung und Prüfbedingungen erfolgen. Mit zusätzlichen Untersuchungen an den geprüften Bohrkernen soll zudem das Verständnis der chemischen und physikalischen Abläufe während der Prüfung verbessert werden. Das Projekt umfasst 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 Grundlagen

2.1 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, 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 Bohrkerns (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:

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

mit z: Zementgehalt für Zemente gemäss Norm SN EN 197-1 [kg/m^3]
 ZS: Zusatzstoffe des Typs II gemäss Norm SN EN 206-1 [kg/m^3]; Flugasche gemäss Norm SN EN 450, Silikastaub gemäss Norm SN EN 13263

Gemäss Norm SIA 262/1, Tab. 6 gilt als Richtwert für Beton mit hohem Sulfatwiderstand ein Serienmittelwert von $\Delta l \leq 0.5 \text{ ‰}$.

Neben der gemessenen Längenänderung vom 2. bis zum 4. Zyklus ($\Delta l_4 - \Delta l_1$) fliesst also noch die Summe der Sulfatlösungsaufnahme Δm_{Sn} während jedem Zyklus und der Gehalt des Zementes Z und des Zusatzstoffes ZS in die Auswertung ein. Bei diesem letzten Term handelt es sich um eine Art „**Extrapolationsfaktor**“. Er wird 1, wenn die aufgenommene Sulfatmenge der Masse entspricht, die notwendig ist, um einen theoretischen Aluminatgehalt von 3% im Bindemittel in Ettringit umzuwandeln. Ist die aufgenommene Sulfatmenge während der Prüfung kleiner, d.h. es handelt sich um einen Beton geringer Porosität, so wird der Extrapolationsfaktor grösser als 1 und die Sulfatdehnung Δl wird entsprechend grösser. Dadurch wird das maximal mögliche Potential des Betons bezüglich einer Sulfatschädigung beurteilt, jedoch nicht deren Geschwindigkeit. Ist der effektiv vorhandene Aluminatgehalt im Bindemittel grösser oder kleiner als 3%, sollte sich dies in einer Variation der während der vier Zyklen gemessenen Längenänderung auswirken.

2.2 Stand der Forschung

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 Aluminat auf. In der Schweiz gelten nach der Norm SN EN 197-1 [SIA, 2000] aktuell Portlandzemente mit einem C_3A -Gehalt von $\leq 3.0 \text{ M-\%}$ 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 vorhandene 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 muss zuerst alles verfügbare Aluminat zu Ettringit reagiert haben.

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden Aspekte der Sulfatschädigung bei Labor-

prüfungen untersucht. Diese Laborprüfungen weisen jedoch zum Teil beträchtliche Unterschiede zum Verfahren nach SIA 262/1 auf, weshalb die Übertragbarkeit der Resultate nicht gewährleistet ist. Entsprechend besteht bei der Prüfung des Sulfatwiderstandes nach SIA ein Forschungsbedarf. 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.

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]. Aufgrund dieser unterschiedlichen Bildungsbedingungen der verschiedenen Mineralien muss deshalb von einer Zonierung über den Prüfkörperquerschnitt ausgegangen werden, deren Auswirkung auf die Prüfergebnisse bei der Sulfatprüfung nach SIA abzuklären ist. Zudem ergibt eine vermehrte Thaumasitbildung (anstatt Ettringit) zwar eine verminderte Expansion, aber auch einen erhöhten Kohäsionsverlust.

Die Temperatur kann einen erheblichen Einfluss auf die Sulfatdehnung haben, wobei die Auswirkungen sehr stark vom verwendeten Zement und vom Zusatzstoff abhängen [Lipus, 2004]. Es stellt sich daher die Frage, ob durch die Prüftemperatur von 20°C die ablaufenden Reaktionen in einem Tunnel, in dem die Temperatur teilweise stark abweicht, richtig abgebildet werden.

Vermehrt werden Zemente mit Zusatzstoffen eingesetzt, die einen erheblichen, sowohl positiven als auch negativen Einfluss auf die Sulfatbeständigkeit haben können [Lipus, 2004]. Da diese Zusatzstoffe gleichzeitig dichtend wirken können, ist zu untersuchen, ob die Korrektur bei der Auswertung nach der Norm SIA 262/1 über die aufgenommene Sulfatmenge auch für diese Zusatzstoffe Gültigkeit hat. Zudem weicht bei der Verwendung von Zusatzstoffen der Aluminatgehalt oft stark von dem in der SIA-Prüfung angenommenen Wert ab. Dies kann zu einer falschen Beurteilung des Sulfatwiderstands aufgrund der Auswertung führen.

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 hauptsächlich auf Zonen mangelhafter Betonqualität und entsprechend hoher Porosität beschränken. Dies bedeutet, dass die Porosität in-situ betreffend Sulfatschädigung offensichtlich ebenfalls eine Rolle spielt. Es ist deshalb abzuklären, ob bei der Normprüfung durch den Extrapolationsfaktor in der Auswertungsformel, welcher den Einfluss des reinen Reaktionspotentials zu Lasten der Kinetik der ablaufenden Prozesse (Stofftransport und chemische Reaktionen) verstärkt, die Realität praxisrelevant abgebildet wird.

2.3 Entwicklung und Anwendung der Schnellprüfung

Die 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 Gott-hard-Basistunnel verwendeten Betonsorten ab, ohne dabei Anspruch auf Allgemeingültigkeit zu erheben. Generell konnte eine Korrelation zwischen Schnellprüfung und Methode 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 handelte (14 Spritzbetonmischungen, Bindemittelleimvolumen ca. $390 \div 420 \text{ l/m}^3$, $w/b = 0.40 \div 0.50$ sowie 6 Normalbetone, Bindemittelleimvolumen ca. $280 \div 305 \text{ l/m}^3$, $w/b = 0.38 \div 0.54$). Zusätzlich kamen weitere 8 Normalbetone zum Einsatz (Bindemittelleimvolumen ca. $270 \div 320 \text{ l/m}^3$, $w/b = 0.42 \div 0.50$), wovon schon Proben für die Langzeitprüfung verwendet wurden und die Betone deshalb ein Alter von ca. 3 bis 4 Jahren aufwiesen. Die Auswirkungen des stark unterschiedlichen Zementleimvolumens zwischen Spritzbeton und Normalbeton auf die Prüfergebnisse wurden nicht im Detail abgeklärt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden für jeden Beton die Dehnungen während den Tränkungs- und Trocknungszyklen sowohl in Wasser als auch in Sulfatlösung gemessen. Wird für die verschiedenen Betone die damals gemessene Differenz der Dehnung in Sulfatlösung minus Dehnung in Wasser jeweils vom 1. bis zum 4. Zyklus berechnet, ergibt sich ein Bild gemäss Abb. 2.3. Daraus ist ersichtlich, dass die Spritzbetone mehrheitlich deutlich grössere sulfatbedingte Dehnungen aufwiesen als die Normalbetone (Abb. 2.3). Die zusätzliche Dehnung in Sulfatlösung vom ersten bis zum vierten Zyklus im Vergleich zur Dehnung im Wasser war bei den Normalbetonen maximal 0.24‰ , lag jedoch bei den meisten Mischungen deutlich unterhalb dieses Wertes (teilweise bei 0.00‰). Aus diesem Vergleich kann vermutet werden, dass die Validierung der Messmethode hauptsächlich auf den Resultaten der Spritzbetone beruht und eine Übereinstimmung mit der Methode ATG im Falle der Normalbetone eher zufällig sein dürfte.

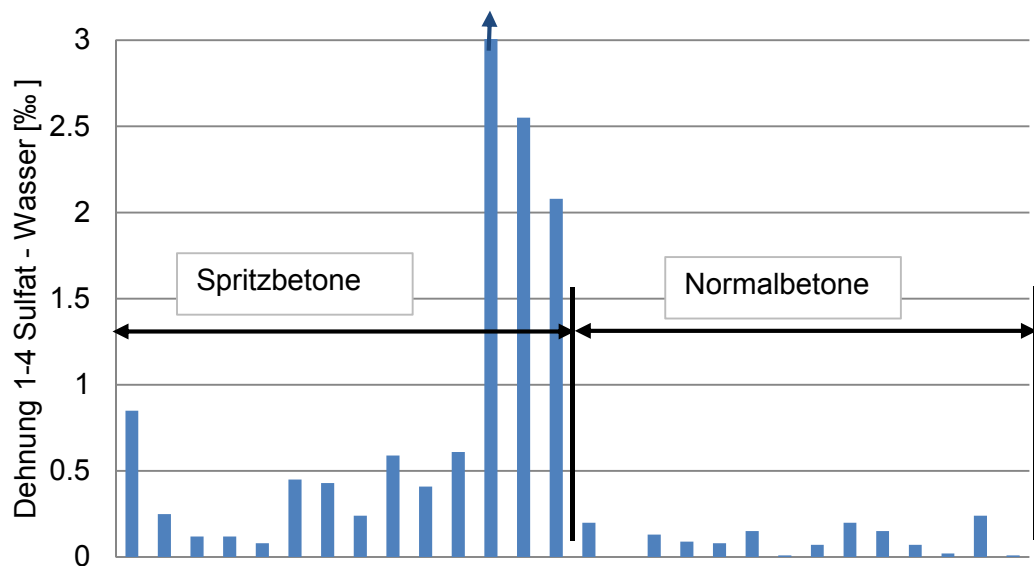


Abb. 2.3 Vergleich der Differenz Dehnung Sulfatlagerung minus Dehnung Wasserlagerung vom ersten bis zum vierten Zyklus für Spritzbetone und Normalbetone aus [Studer, 2001a]

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 XA 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 Baustoffprüflabors 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].

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:	Abkürzung:
• 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 I 32.5 R + 30% Flugasche	CEM I + V

Die chemische Zusammensetzung der Zemente kann der Abb. 3.4 entnommen werden.

Abb. 3.4 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	Blaine	GV	Dichte
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[cm ² /g]	[%]	[kg/m ³]
CEM I 42.5 N HS	59.8	17.9	4.3	5.9	2.4	0.8	0.6	3.1	4'050	3.7	3'150
CEM I 32.5 R	63.4	20.3	5.2	3.1	2.5	0.9	0.2	2.4	2'840	1.0	3'170
CEM III/B 32.5 N HS	47.6	29.9	9.4	1.6	4.3	0.7	0.1	4.5	5'080	0.7	2'940
CEM II/A-LL 42.5 N	60.8	17.5	4.2	2.5	1.8	0.9	0.1	2.7	3'810	7.3	3'040
Flugasche	5.6	50.6	23.9	6.3	2.4	3.9	1.0	0.9	3'140	3.8	2'250

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 auch bei zwei Normalbetonmischungen (vgl. Abb. 3.10) ein Stabilisator auf Basis von Polysacchariden verwendet.

3.2 Methoden

3.2.1 Sulfatwiderstand

Als Hauptuntersuchungsmethode wurde die Sulfatwiderstandsprüfung nach der Norm SIA 262/1, Anhang D eingesetzt. Der Beschrieb dieser Prüfmethode kann dem Kap. 2.1 entnommen werden. Zusätzlich wurden verschiedene Variationen davon untersucht, welche im Kap. 3.3.2 definiert sind.

Die Bohrkern mit Durchmesser 30 mm wurden normalerweise aus Würfeln mit 150 mm Kantenlänge senkrecht zu einer seitlichen Schalfäche entnommen. Von den Stirnflächen wurde anschliessend beidseits etwa 1 mm abgeschliffen, so dass die Nettolänge der Bohrkern jeweils ca. 148 mm betrug. Einzig bei den Bohrkernen, welche aus Würfeln mit 20 cm Kantenlänge entnommen wurden, wurden beidseits ca. 26 mm abgeschnitten, so dass die Nettolänge ebenfalls 148 mm betrug.

Die Sulfatwiderstandsprüfung wurde wie in der Norm vorgegeben an jeweils 6 Bohrkernen (= 1 Prüferie) durchgeführt. Auch die Variationen gemäss Kap. 3.3.2 wurden an Prüferien à je 6 Prüfkörpern durchgeführt. Jede Prüferie wurde jedoch nur einmal gemessen (keine Wiederholbarkeiten). Sämtliche in diesem Bericht angegebenen Resultate sind

Mittelwerte aus einer Prüfserie. 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 Festigkeit

Von jeder Betonsorte wurde die Biegezug- und Druckfestigkeit an Prismen (120 x 120 x 360 mm) als Mittelwert aus drei Prüfkörpern nach SN 640 461a im Alter von 28 Tagen bestimmt.

3.2.3 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 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 einer empirischen Beziehung die Wasserleitfähigkeit q_w nach folgender Formel berechnet:

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

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.

3.2.4 Sauerstoffdiffusionskoeffizient

Als Mass für die Permeabilität der Betone wurde der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_O an jeweils drei 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 Prüfzelle 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 Prüfzelle mit Silikondichtring (links), Prüfanordnung 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.

3.2.5 Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)

Mittels Quecksilberdruckporosimetrie wurde die Porengrössenverteilung im Zementstein der Betone bestimmt. Bei der Quecksilberintrusion (mercury intrusion porosimetry = MIP) wird das Quecksilber mit zunehmendem Druck in die Probe gepresst. Da jede Druckstufe einem Porenradius zugeordnet werden kann und die Menge des intrudierten Quecksilbers gemessen wird, kann eine Porengrössenverteilung berechnet werden. Das Resultat wird allerdings stark durch das Auftreten von isolierten grossen Poren, die nur über kleine Poren gefüllt werden können (sogenannte Flaschenhälse), beeinflusst [Diamond, 2000].

MIP wurde mit einem pascal 140/440 (Themo Fisher Scientific Inc.) bestimmt. Die Daten wurden mit der Washburn-Gleichung analysiert [Washburn, 1921]. Drei Bohrkernscheiben von ca. 7 mm Stärke und Durchmesser 50 mm wurden jeweils im Alter von 28 Tagen für 7 Tage in Isopropanol eingelegt und anschliessend bei 50°C für 7 Tage im Ofen getrocknet. Nach dem Trocknen wurden aus den drei Scheiben mit einer Zange Stücke so abgetrennt, dass keine Gesteinskörner grösser als 2 mm darin enthalten waren. Pro Beton wurden jeweils 2.5-3.0 g für eine Messung verwendet.

3.2.6 Dynamischer E-Modul

Bei ausgewählten Betonmischungen wurde während den Sulfatwiderstandsprüfungen der dynamische E-Modul nach jedem Trocknungs-Tränkungszyklus bestimmt (Mittelwert aus 6 Bohrkernen). Damit sollte untersucht werden, ob sich eine allfällige Sulfatschädigung während der Prüfung auch in einem Abfall des dynamischen E-Moduls zeigt.

Der dynamische E-Modul wurde nach dem Impulserreger-Verfahren mit einem Grindosonic MK5 "Industrial" ermittelt. Bei diesem Verfahren werden die Prüfkörper durch einen leichten, von aussen einwirkenden mechanischen Impuls zu einer körperspezifischen Grundschwingung angeregt. Von dieser Grundschwingung wird die Frequenz gemessen und angezeigt. Mittels Berechnung kann anschliessend aus Eigenfrequenz, Prüfkörperabmessung und Rohdichte der dynamische E-Modul bestimmt werden. Für die Querkontraktionszahl wurde jeweils ein Wert $\nu = 0.17$ eingesetzt. Eine physikalische Bestimmung der Zahl wurde nicht durchgeführt, weil im Rahmen des Projektes der Verlauf des dynamischen E-Moduls von Interesse war und nicht deren Absolutwerte.

Die Bestimmung des dynamischen E-Moduls wurde jeweils unmittelbar im Anschluss an die Messung der Längenänderung während der Prüfung des Sulfatwiderstandes nach SIA 262/1, Anhang D durchgeführt.

3.2.7 Sulfateindringfront

Das Fortschreiten der Sulfateindringfront während der Sulfatwiderstandsprüfung wurde mittels Elektronenmikroskopie verfolgt. Dazu wurden ausgewählte Prüfkörper (jeweils 1

Bohrkern) nach einer bestimmten Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen aus der Prüferie entnommen und daraus eine Bohrkernscheibe geschnitten. Diese wurde anschliessend drei Tage bei 50°C getrocknet, mit Epoxidharz imprägniert (Abb. 3.6), poliert und mit Kohlenstoff bedampft.

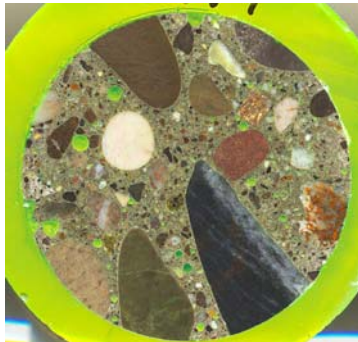


Abb. 3.6 Schnittfläche einer mit Epoxidharz imprägnierten Bohrkernscheibe ($d = 30\text{ mm}$) für die Untersuchungen im Elektronenmikroskop.

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 Atome mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) bestimmt werden. Dazu wurden in einem bestimmten Abstand von der Oberfläche vier Flächenscans (ca. $100 \times 100\ \mu\text{m}$) vom Zementstein vorgenommen und daraus der Mittelwert gebildet. Der prozentuale Anteil der Schwefelatome in Funktion des Abstandes von der Oberfläche bis in die Prüfkörpermitte (15 mm) wurde hierbei als Mass für die Beurteilung der Sulfateindringfront verwendet.

Um das Zusammenspiel zwischen Sulfateindringtiefe und Tränkungs- und Trocknungszyklen besser beurteilen zu können, wurde zusätzlich das Trocknungs- und Aufsaugverhalten von Prüfkörpern mit unterschiedlichem w/b-Wert abgeschätzt. Dazu wurden je zwei Prüfkörper der Betonmischungen mit CEM I 32.5 R als Bindemittel und w/b = 0.35, 0.45 und 0.60 (Mischungen I-35, I-45, I-60, vgl. Abb. 3.10) verwendet, an denen vorgängig schon die Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm durchgeführt wurde. Das Alter der Proben betrug zum Zeitpunkt der Trocknungsversuche ca. 1 Jahr.

Die Bohrkern wurden zuerst für zwei Tage in Wasser eingelegt und dann die Nullmasse im gesättigten Zustand bestimmt. Anschliessend wurden sie im Ofen bei 50 °C während 42 Tagen gelagert unter periodischer Bestimmung der Massenabnahme. Nach der Ofenlagerung wurden die Bohrkern erneut für 10 Tage ins Wasser gelegt und die Massenzunahme gemessen.

3.2.8 Mineralphasen

Bestimmung mittels Röntgendiffraktion (XRD)

Für die Bestimmung der gebildeten Mineralphasen in Funktion des Abstandes von der Oberfläche wurden ausgewählte Prüfkörper (jeweils 1 Bohrkern) nach einer bestimmten Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen aus der Prüferie entnommen und daraus eine Bohrkernscheibe geschnitten. Nach Trocknung bei 50°C während drei Tagen wurde von der Bohrkernscheibe Material ringförmig abgetrennt (Abb. 3.7), Gesteinskörner grösser als 2 mm entfernt und der verbleibende Rest auf eine Grösse von $63\ \mu\text{m}$ gemahlen. Die in diesem Material vorkommenden Mineralphasen wurden anschliessend mittels Röntgendiffraktion (XRD) bestimmt.

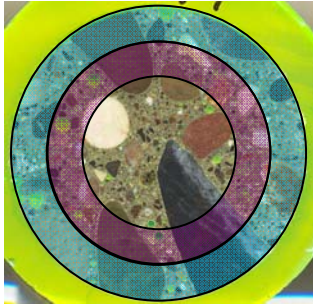


Abb. 3.7 Ringförmige Entnahme von Material aus Bohrkernscheiben nach einer bestimmten Anzahl Zyklen für die Bestimmung der Mineralphasen mittels XRD. Im Unterschied zur hier dargestellten Probe waren die Proben für die XRD-Messung nicht mit Harz imprägniert.

Abschätzung mittels Elektronenmikroskopie (EDX)

An den gleichen Proben, an denen auch die Sulfateindringfront bestimmt wurde (Kap. 3.2.7), wurde zusätzlich auch die Mineralphasenzusammensetzung in Funktion der Tiefe aus den vorhandenen chemischen Elementen und deren Anteilen wie folgt abgeschätzt:

An einer Schnittfläche eines Bohrkerns, der nach einer bestimmten Anzahl Zyklen während der Sulfatwiderstandsprüfung entnommen wurde, wurde in einem gewissen Abstand von der Oberfläche eine Prüffläche von ca. 150 x 150 µm festgelegt (Abb. 3.8).

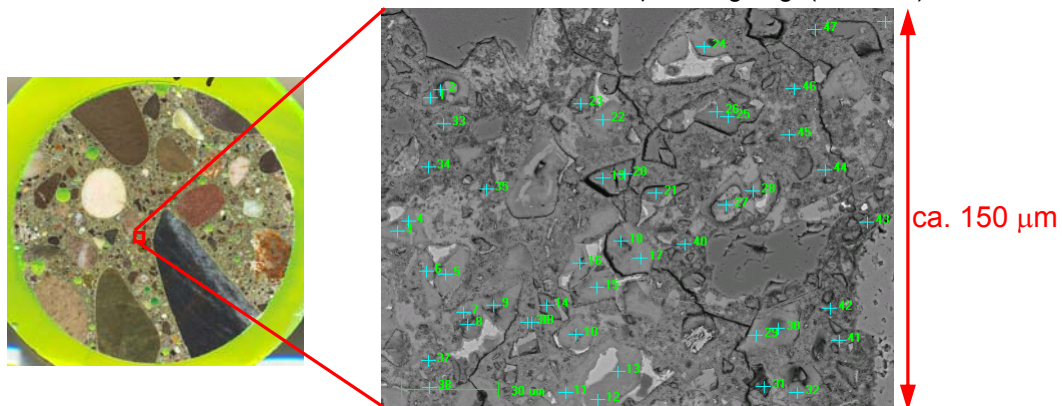


Abb. 3.8 Prüffläche mit Analysepunkten für die Bestimmung der Mineralphasen mittels EDX.

Innerhalb dieser Fläche wurden jeweils ca. 50 Punkte analysiert. Daraus resultierte für jeden Analysepunkt die prozentuale Elementzusammensetzung, welche in einem Diagramm dargestellt werden kann. Die Achsen der Diagramme 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. 3.9). Es kann also von jedem Analysepunkt das Verhältnis S/Ca und Al/Ca gebildet und der Punkt im Diagramm eingezeichnet werden.

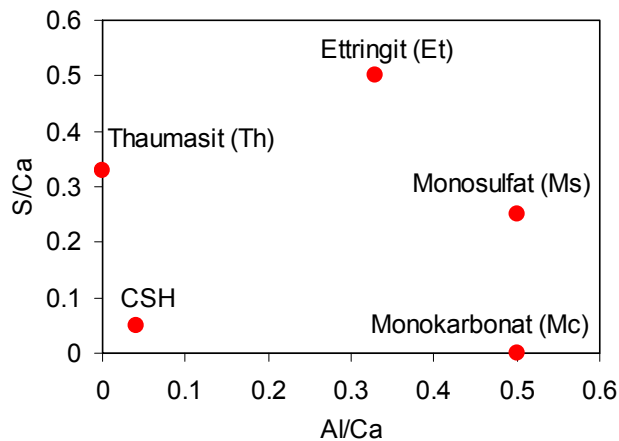


Abb. 3.9 Diagramm mit Achsen S/Ca und Al/Ca und Lage der typischen Mineralien, welche in einem Zementstein mit Sulfatinteraktion vorkommen.

Aus der Position der entstehenden Wertepaare im Diagramm können die vorherrschenden Mineralphasen innerhalb der Prüffläche abgeschätzt werden. Zementstein ohne Sulfatinteraktion sollte dabei im Bereich des Punktes CSH liegen, dem hauptsächlichsten 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, 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.

3.3 Versuchsmatrix

Zur Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren auf die Sulfatwiderstandsprüfung wurde eine Prüfmatrix mit verschiedenen Variablen aufgestellt. Es wurde sowohl die Betonmischung als auch der Prüfablauf variiert. Die Sulfatwiderstandsprüfung wurde dabei für alle Mischungen nach der bestehenden Norm SIA 262/1 Anhang D und bei ausgewählten Mischungen zusätzlich mit Variation im Prüfablauf durchgeführt.

3.3.1 Variation 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 0,35, 0,45 und 0,60 hergestellt. Das Bindemittelleimvolumen wurde dabei für alle Mischungen konstant bei 260 l/m^3 gehalten, was einem üblichen Wert für Normalbeton entspricht.
- Von den Zementsorten CEM I 32,5 R und CEM III/B 32,5 R wurde zudem je eine Mischung mit w/b = 0,45 mit einem erhöhten Leimvolumen von 310 l/m^3 hergestellt. Sie befinden sich somit an der oberen Grenze der für Schweizer Verhältnisse üblichen Bindemittelleimvolumina von Normalbeton.
- SCC: Mit Ausnahme des CEM II/A-LL wurden aus allen übrigen Zementen SCC-Mischungen mit einem w/b = 0,45 hergestellt. Aus den Zementen CEM I HS und CEM III/B wurde zusätzlich je eine SCC-Mischung mit w/b-Wert = 0,35 betoniert. Für alle sechs SCC-Mischungen wurde das Bindemittelleimvolumen konstant bei 350 l/m^3 gehalten.

Insgesamt wurden somit 23 verschiedene Betonmischungen hergestellt, welche in der Abb. 3.10 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), Einsatz von Luftporenbildner (LP) und selbstverdichtenden

Beton (S).

Abb. 3.10 Betonmischungen (s/k: Sand/Kies-Verhältnis, FM: Fließmittel, VMA: Stabilisator)

Bez.	Gesteinsk.	s/k	Zement		Zusatzstoff		Wasser	w/b	Zusatzmittel	
			Art	Menge	Art	Menge			Art	Menge
[-]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[kg/m ³]
I-HS-35	1'934	0.54	CEM I HS	380	-	-	131	0.35	FM	4.6
I-HS-45	1'927	0.54	CEM I HS	335	-	-	150	0.45	FM	1.3
I-HS-60	1'929	0.54	CEM I HS	280	-	-	168	0.60	-	-
I-35	1'936	0.54	CEM I	380	-	-	131	0.35	FM	6.1
I-45	1'929	0.54	CEM I	335	-	-	150	0.45	FM	1.3
I-60	1'931	0.54	CEM I	280	-	-	168	0.60	-	-
III-35	1'930	0.54	CEM III/B	370	-	-	128	0.35	FM	4.4
III-45	1'928	0.54	CEM III/B	325	-	-	146	0.45	FM	1.6
III-60	1'924	0.54	CEM III/B	275	-	-	164	0.60	-	-
I-V-35	1'935	0.54	CEM I	252	V	108	124	0.35	FM	5.4
I-V-45	1'933	0.54	CEM I	222	V	95	142	0.45	FM	1.3
I-V-60	1'934	0.54	CEM I	187	V	80	160	0.60	VMA	0.8
II-35	1'932	0.54	CEM II/A-LL	375	-	-	129	0.35	FM	5.3
II-45	1'927	0.54	CEM II/A-LL	330	-	-	148	0.45	FM	1.0
II-60	1'933	0.54	CEM II/A-LL	275	-	-	165	0.60	-	-
I-45-h	1'798	0.54	CEM I	400	-	-	180	0.45	-	-
III-45-h	1'792	0.54	CEM III/B	390	-	-	175	0.45	VMA	0.8
I-HS-35-S	1'679	1.00	CEM I HS	515	-	-	177	0.35	FM	6.2
I-HS-45-S	1'678	1.00	CEM I HS	450	-	-	200	0.45	FM+VMA	3.2 + 1.1
I-45-S	1'680	1.00	CEM I	450	-	-	200	0.45	FM+VMA	3.2 + 1.1
III-35-S	1'675	1.00	CEM III/B	500	-	-	172	0.35	FM	6.0
III-45-S	1'672	1.00	CEM III/B	440	-	-	195	0.45	FM+VMA	3.1 + 1.1
I-V-45-S	1'671	1.00	CEM I	303	V	130	192	0.45	FM+VMA	3.0 + 1.1

3.3.2 Variation Prüfablauf Sulfatwiderstandsprüfung

Neben der Normprüfung nach SIA 262/1, Anhang D wurden für ausgewählte Betonmischungen die nachfolgend beschriebenen Variationen im Prüfablauf untersucht. Es handelt sich hierbei immer um Einzelbestimmungen (Mittelwerte aus jeweils 6 Bohrkernen) ohne Berücksichtigung der Wiederholbarkeit. Die betroffenen Betonmischungen sind in der Abb. 3.11 zusammengestellt.

- Anzahl Trocknungs-/Tränkungszyklen: Bei den Mischungen mit w/b = 0.45 (Ausnahme CEM II/A-LL) wurde nach den vier Normzyklen zwar eine normale Auswertung nach Norm vorgenommen, die Prüfkörper wurden aber vier weiteren Trocknungs- und Tränkungszyklen ausgesetzt. Nach acht Zyklen wurde eine weitere Auswertung vorgenommen.
- Lösungskonzentration: Bei den Mischungen mit w/b = 0.45 (Ausnahme CEM II/A-LL) wurde die Prüfung zusätzlich mit der halben Sulfatlösungskonzentration (2.5% NaSO₄) ausgeführt.
- Lösungszusammensetzung: Die Mischung mit CEM I 42.5 N HS und w/b = 0.45 (I-HS-45) wurde zusätzlich mit einem Lösungsgemisch 5% Natriumsulfat (Na₂SO₄) + 3% Natriumhydrogencarbonat (NaHCO₃) geprüft.
- Wasserlagerung: Als Referenz wurde bei allen Betonmischungen mit w/b = 0.45 mit Ausnahme der SCC-Mischungen eine zusätzliche Prüfung in reinem Wasser anstatt Sulfatlösung durchgeführt. Der Prüfablauf war hingegen identisch mit dem Prüfablauf nach Norm.

- Lösungstemperatur: Bei den Mischungen mit $w/b = 0.45$ (Ausnahme CEM II/A-LL) wurde die Prüfung zusätzlich bei einer Lösungstemperatur von 10°C anstelle der üblichen 20°C ausgeführt.
- Prüfwürfel: Die beiden Mischungen mit CEM I 42.5 N HS resp. CEM III/B 32.5 N und $w/b = 0.45$ (I-HS-45 und III-45) wurden zusätzlich im Alter von 90d im Normverfahren geprüft.
- Prüfwürfel: Bei den drei Mischungen mit CEM I HS (I-HS-35, I-HS-45, I-HS-60) wurden Bohrkerne sowohl aus einem Würfel mit 148 mm Kantenlänge als auch einem Würfel mit 200 mm Kantenlänge entnommen. Während beim Würfel mit 200 mm für die erforderliche Prüfkörperlänge von 150 mm beidseits ca. 26 mm abgeschnitten werden mussten, wurden die Endflächen der Bohrkerne aus dem kleineren Würfel nur angeschliffen. Dadurch sollte der Einfluss von Randeffekten im Bereich der Schallfläche abgeklärt werden. Die Probekörper für sämtliche übrigen Prüfungen wurden wie in der Praxis üblich aus Würfeln mit 150 mm Kantenlänge entnommen.

Abb. 3.11 Übersicht über die durchgeführten Prüfvariationen bei den verschiedenen Betonmischungen.

Bez. [-]	Anzahl Zyklen	Konz. Lösung	Zusammensetzung Lösung	Wasser- lagerung	Temp. Lösung	Prüf- alter	Würfel 20 cm
I-HS-35	-	-	-	-	-	-	X
I-HS-45	X	X	x	X	X	X	X
I-HS-60	-	-	-	-	-	-	X
I-35	-	-	-	-	-	-	-
I-45	X	X	-	X	X	-	-
I-60	-	-	-	-	-	-	-
III-35	-	-	-	-	-	-	-
III-45	X	X	-	X	X	X	-
III-60	-	-	-	-	-	-	-
I-V-35	-	-	-	-	-	-	-
I-V-45	X	X	-	X	X	-	-
I-V-60	-	-	-	-	-	-	-
II-35	-	-	-	-	-	-	-
II-45	-	-	-	X	-	-	-
II-60	-	-	-	-	-	-	-
I-45-h	-	-	-	X	-	-	-
III-45-h	X	-	-	X	-	-	-
I-HS-35-S	-	-	-	-	-	-	-
I-HS-45-S	-	-	-	-	-	-	-
I-45-S	-	-	-	-	-	-	-
III-35-S	-	-	-	-	-	-	-
III-45-S	-	-	-	-	-	-	-
I-V-45-S	-	-	-	-	-	-	-

3.4 Zusatzlagerung

Im Laufe der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die zur Verfügung stehende Reaktionszeit zwischen eingetragendem Sulfat und Zementstein eine entscheidende Grösse darstellt. Aus diesem Grund wurde an bereits geprüften Bohrkernen weiter untersucht, inwieweit sich eine Verlängerung der Reaktionszeit im Anschluss an die Normprüfung über eine Lagerung in Sulfatlösung ohne weitere Tränkungs- und Trocknungszyklen auf die gemessene Dehnung auswirkt.

Da der grösste Teil der vorgesehenen Prüfungen bereits abgeschlossen war, hätten neue Proben betoniert werden müssen, an denen zuerst die Normprüfung durchgeführt und unmittelbar anschliessend die Zusatzlagerung hätte angehängt werden müssen. Da es jedoch nur um die Abklärung ging, ob eine Zusatzlagerung überhaupt eine Unterscheidung der Bindemitteltypen möglich machen könnte, wurde darauf verzichtet und stattdessen auf Prüfkörper zurückgegriffen, bei denen die Normprüfung schon mehrere Wochen abgeschlossen war.

Für diese Zusatzlagerung wurden von folgenden Normalbetonen jeweils zwei Bohrkerne ausgewählt (vgl. auch Abb. 3.10):

- I-HS-60 CEM I HS, w/b = 0.60
- I-60 CEM I , w/b = 0.60
- III-60 CEM III/B, w/b = 0.60
- I-V-60 CEM I + V, w/b = 0.60
- II-35 CEM II, w/b = 0.35
- II-45 CEM II, w/b = 0.45
- II-60 CEM II, w/b = 0.60
- I-45-h CEM I, w/b = 0.45, hohes Leimvolumen

An diesen Bohrkernen wurde bereits die Normprüfung mit 4 Tränkungs- und Trocknungszyklen durchgeführt. Nach der Prüfung waren die Prüfkörper in Plastik luftdicht eingeschweisst. Nach mehreren Wochen Lagerung wurden sie ausgepackt und die Zusatzlagerung wie folgt durchgeführt:

- Bohrkerne 48 Stunden bei 50°C trocknen und im Exsikkator abkühlen lassen.
- Bestimmen von Masse und Länge (Nullwerte).
- Einlegen der Prüfkörper in Sulfatlösung mit gleicher Konzentration wie im Normverfahren.
- Nach 5, 7, 14, 21 und 28 Tagen Prüfkörper aus der Lösung nehmen, mit einem feuchten Lappen abtrocknen und jeweils Masse sowie Länge bestimmen.
- Prüfkörper anschliessend wieder in die Sulfatlösung legen.

Für die Auswertung wurde die Dehnung während der ersten 5 Tage der Zusatzlagerung, während denen die Bohrkerne durch kapillares Saugen noch Sulfatlösung aufgenommen haben, nicht berücksichtigt. Die Dehnung von 5 bis 28 Tagen (total 23 Tage) während der Zusatzlagerung wurde anschliessend zur gemessenen Dehnung während der Normzyklen addiert.

Bei den SCC-Mischungen wurde diese Zusatzlagerung ebenfalls durchgeführt. Da diese Betone im Projektablauf deutlich später hergestellt wurden, wurde hingegen im Unterschied zu den obenstehenden Mischungen die vierwöchige Zusatzlagerung unmittelbar im Anschluss an die Sulfatlagerung im 4. Zyklus der Normprüfung begonnen (ohne Ofentrocknung). Deshalb wurde im Falle der SCC-Mischungen die Dehnung aus der gesamten Zusatzlagerung (28 Tage) zur gemessenen Dehnung während der Normzyklen addiert.

Dabei gilt es zu beachten, dass bei den erstgenannten Mischungen ein zusätzlicher Sulfateintrag (5. Tränkungszyklus) durch kapillares Saugen stattgefunden hat, während dies bei den SCC-Mischungen nicht der Fall war.

4 Resultate

4.1 Allgemeine Betoneigenschaften

Eine Zusammenfassung der Messresultate der Frischbetonkontrolle, der Druckfestigkeit, der Biegezugfestigkeit, des Sauerstoffdiffusionskoeffizienten, der totalen Porosität aus MIP 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 Variation des Bindemittelleimvolumens hat bei konstantem w/b-Wert keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit. Die verschiedenen Bindemittel führen zudem nur zu verhältnismässig geringen Differenzen in der Druckfestigkeit.

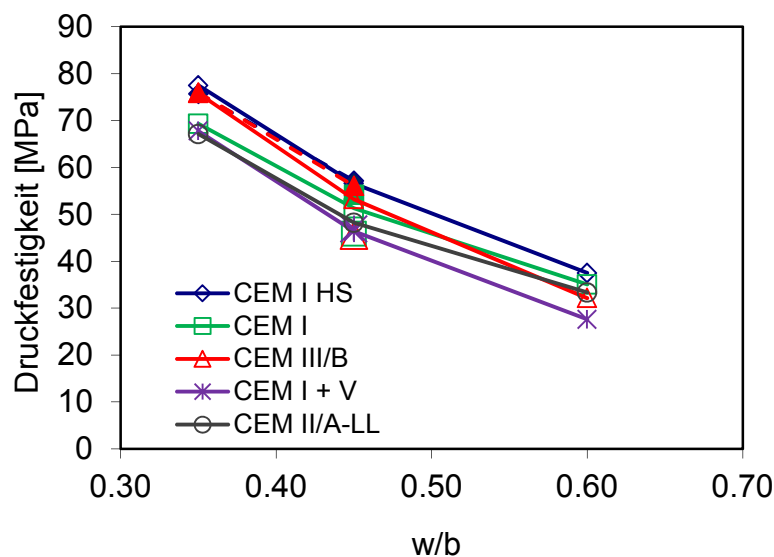


Abb. 4.12 Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen in Abhängigkeit verschiedener w/b-Werte und verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen.

Sowohl die Wasserleitfähigkeit q_w als auch der Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_o nehmen mit zunehmender Druckfestigkeit ab (Abb. 4.13). Die verschiedenen Bindemitteltypen führen vor allem 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. Während die Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen sowie die SCC-Mischungen zu einem ähnlichen q_w führen wie beim jeweiligen Normalbeton des gleichen Zementtyps, sind die Sauerstoffdiffusionskoeffizienten des SCC insbesondere beim CEM I und CEM I HS deutlich erhöht. Dies führt zu einem vergleichbaren Zusammenhang zwischen q_w und D_o für alle Bindemittel- und Betontypen, wobei einzig die bereits erwähnten SCC-Mischungen eine Abweichung dieser Beziehung zeigen (Abb. 4.14).

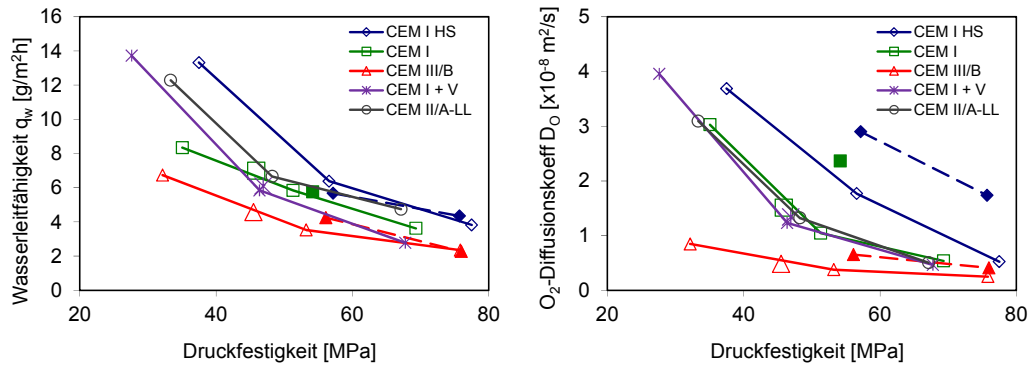


Abb. 4.13 Wasserleitfähigkeit q_w (links) und Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_O (rechts) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit sowie verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen.

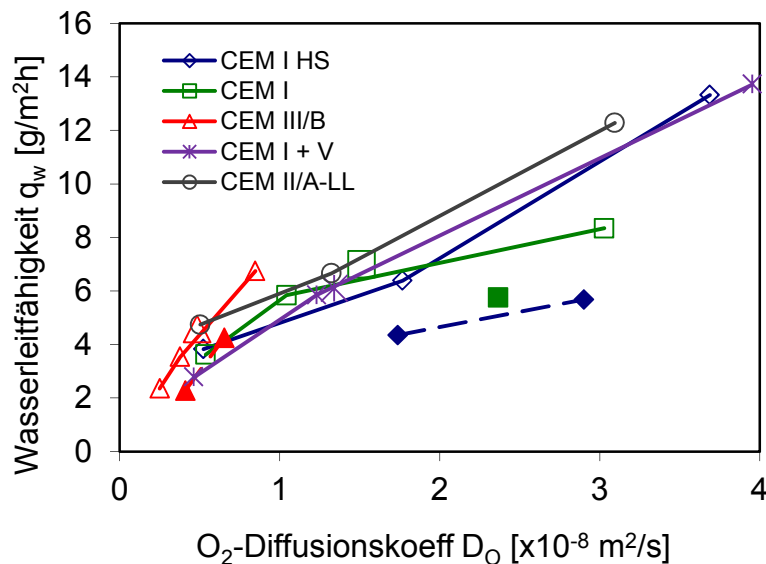


Abb. 4.14 Wasserleitfähigkeit q_w versus Sauerstoffdiffusionskoeffizient D_O für alle untersuchten Betone. Ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen.

Die Gesamtporosität im Zementstein bestimmt mit MIP nimmt mit zunehmender Druckfestigkeit ab (Abb. 4.15, links). Es bestehen kaum einheitliche Unterschiede in dieser Beziehung für die verschiedenen Zemente. Tendenziell ist die Gesamtporosität bei den Betonen mit CEM II/A-LL und CEM I HS insbesondere bei den tieferen Festigkeiten etwas kleiner. Zudem führen die Betone mit erhöhtem Leimvolumen zu einer etwas höheren Gesamtporosität bei gleicher Druckfestigkeit als die entsprechenden Normalbetone mit geringerem Zementleimvolumen. Zu beachten ist, dass aus der Gesamtporosität nur bedingt Aussagen über die Permeabilität abgeleitet werden können. So weist z.B. der Normalbeton hergestellt mit CEM III/B im Vergleich mit den übrigen Zementen eine relativ hohe Gesamtporosität auf, der Anteil an feinen Poren ist jedoch deutlich grösser als bei den übrigen Zementen (Abb. 4.15, rechts). Dies führt zu der tiefen Permeabilität des Betone aus CEM III/B in Abb. 4.13.

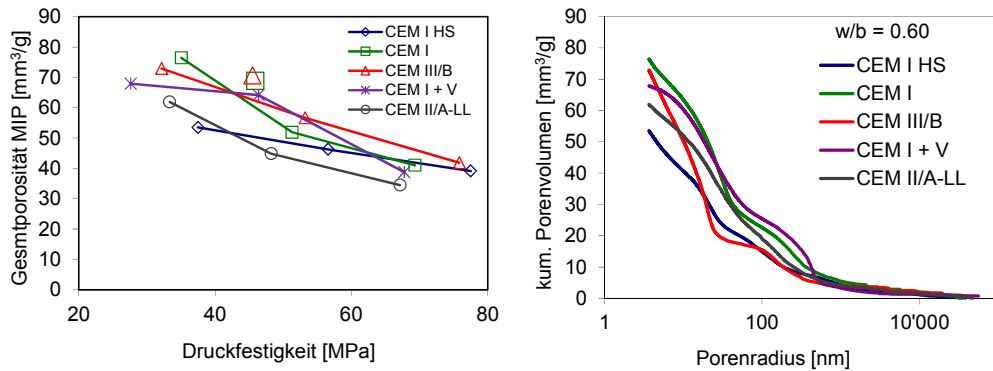


Abb. 4.15 Links: Gesamtporosität gemessen mit MIP in Abhängigkeit der Druckfestigkeit sowie verschiedener Bindemittel. Grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen. Rechts: Porengrössenverteilung für die Normalbetone mit $w/b = 0.60$.

4.2 Sulfatwiderstandsprüfungen

4.2.1 Einleitung

Für jede Betonmischung wurde eine Sulfatwiderstandsprüfung gemäss Norm SIA 262/1 durchgeführt. Diese Resultate sind in Kap.4.2.2 beschrieben. In den nachfolgenden Kapiteln 4.2.4 bis 4.2.8 sind Resultate aus den Variationen der Normprüfung gemäss Beschreibung in Kap. 3.3.2 abgehandelt. Dabei wird im Wesentlichen der Einfluss der jeweiligen Variablen auf die ausgewertete Sulfatdehnung Δl sowie auf die beiden Hauptmesswerte „Dehnung“ und „Lösungsaufnahme“ über einen Vergleich der Messwerte unter der Parametervariation mit den Messwerten aus der Normprüfung untersucht. Dehnung und Sulfatlösungsaufnahme werden dabei als Summenkurven in Abhängigkeit der Zyklenzahl aufgezeichnet. Bei den Dehnungen wird die Summenkurve jedoch in Anlehnung an die Norm ohne die Dehnung im ersten Zyklus gebildet.

4.2.2 Normprüfungen

Die Resultate der nach Norm SIA 262/1 durchgeführten und ausgewerteten Sulfatwiderstandsprüfungen für die Betone mit verschiedenen Bindemitteln sowie unterschiedlichen w/b -Werten und Bindemittelleimvolumina sind in Abb. 4.16 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass der aktuelle empfohlene Richtwert für die Sulfatdehnung Δl von 0.5 ‰ mit Ausnahme von einem einzigen Messwert nie überschritten wird. Die verschiedenen Zementtypen unterscheiden sich generell nur wenig und es ist eine Tendenz zu erkennen, dass die Sulfatdehnung mit zunehmendem w/b -Wert abnimmt.

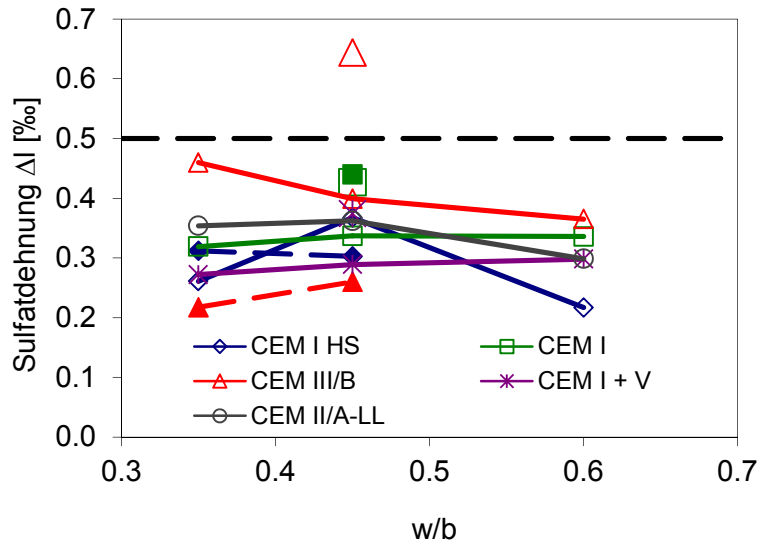


Abb. 4.16 Sulfatdehnungen ΔI , ausgewertet nach Formel (4) in Abhängigkeit verschiedener w/b-Werte und verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelvolumen. Schwarz gestrichelte Linie: aktueller Grenzwert für Beton mit hohem Sulfatwiderstand

Aus diesen Resultaten lässt sich ableiten, dass für Normalbeton ein höherer w/b-Wert zu gleich bleibenden oder tendenziell sogar zu grösseren Sulfatwiderständen führt. Weiter führen in der Prüfung diejenigen Zemente, welche als sulfatbeständig gelten (CEM I HS und CEM III/B) vor allem bei tieferen w/b-Werten zu tendenziell geringeren Sulfatwiderständen. Der normale Portlandzement CEM I führt bei allen w/b-Werten zu einem mit den übrigen Zementen vergleichbaren Sulfatwiderstand. Somit haben die unterschiedlichen Bindemittel beim Normalbeton auf die Prüfergebnisse keinen messbaren Einfluss.

Bei erhöhtem Leimvolumen (ausgefüllte (SCC) sowie grosse Symbole (Normalbeton) in Abb. 4.16) ist beim CEM I keine signifikante Erhöhung der Sulfatdehnung festzustellen und der aktuelle Grenzwert bleibt nach wie vor unterschritten. Dies bedeutet, dass mit einem normalen Portlandzement, welcher nach EN 197-1 als nicht sulfatbeständig gilt, jede innerhalb des Projektes geprüfte Betonrezeptur zu einem hohen Sulfatwiderstand führt. Bei den als sulfatbeständig geltenden Bindemitteln CEM III/B und CEM I HS hat das erhöhte Leimvolumen tendenziell sogar eine Abnahme der Sulfatdehnung zur Folge. Nur bei einem einzigen Beton wird der Grenzwert überschritten (CEM III/B mit erhöhtem Bindemittelvolumen).

Werden nur die gemessenen Werte beurteilt (Dehnung vom 2. bis zum 4. Zyklus und kumulierte Sulfatlösungsaufnahme in Abb. 4.17) so ist zu erkennen, dass beide Messwerte mit zunehmendem w/b-Wert ebenfalls zunehmen. Bei erhöhtem Leimvolumen (SCC und Normalbeton) nehmen generell sowohl die Dehnung als auch die kumulierte Sulfatlösungsaufnahme zu. Einzige Ausnahme bildet die Dehnung des SCC mit CEM III/B als Bindemittel, welche kleiner ist als beim Normalbeton. Allerdings sind auch die Absolutwerte der gemessenen Dehnungen mit maximal 0.15 ‰ generell sehr klein.

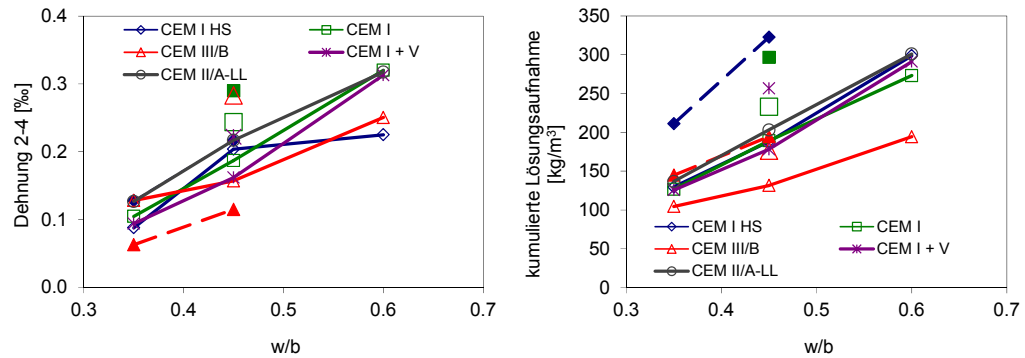


Abb. 4.17 Dehnung vom 2. bis zum 4. Zyklus (links) sowie kumulierte Sulfatlösungsaufnahme (rechts) in Abhängigkeit verschiedener w/b-Werte und verschiedener Bindemittel. Ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen.

4.2.3 Würfelabmessung

Die Abmessung des Würfels, aus welchem die Prüfkörper entnommen werden, hat im vorliegenden Fall bei $w/b = 0.45$ und 0.60 keinen Einfluss auf die ausgewertete Sulfatdehnung (Abb. 4.18). Bei $w/b = 0.35$ ist die ausgewertete Sulfatdehnung bei Prüfkörpern aus dem Würfel mit 20 cm Kantenlänge jedoch wesentlich grösser als beim Würfel mit 15 cm Kantenlänge. Wie aus Abb. 4.19 zu erkennen ist, resultieren diese Unterschiede hauptsächlich aus der Dehnung und nicht aus der Sulfatlösungsaufnahme. Allerdings sind die gemessenen Dehnungen insgesamt klein. Beim tiefen w/b-Wert ist die totale Sulfatlösungsaufnahme ebenfalls sehr gering, was zu einem grossen Extrapolationsfaktor führt (2.9 bei $w/b = 0.35$ versus 1.0 bei $w/b = 0.60$). Dieser verstärkt auch die Unterschiede in den gemessenen Dehnungen um den entsprechenden Faktor.

Bei tiefen w/b-Werten scheint somit der Extrapolationsfaktor einen sehr grossen Einfluss auf die ausgewertete Sulfatdehnung zu haben, der die eher zufälligen Unterschiede in den Dehnungen zwischen den beiden Würfelabmessungen verstärkt. Bei höheren w/b-Werten ist der Extrapolationsfaktor deutlich kleiner und es sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Würfelabmessungen mehr festzustellen. Die in der Praxis übliche Entnahme der Proben aus Würfeln mit 15 cm Kantenlänge führt somit nicht zu einer generellen Beeinflussung der ausgewerteten Sulfatdehnung und kann somit beibehalten werden.

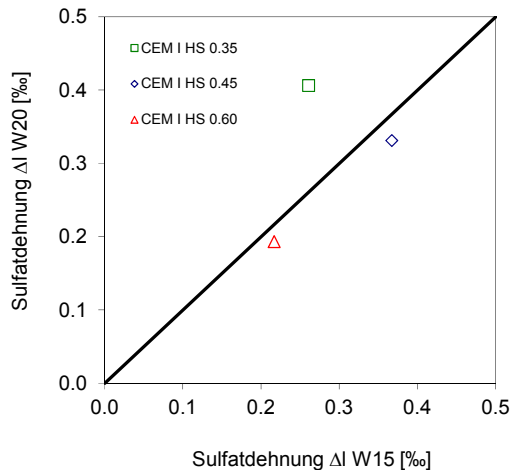


Abb. 4.18 Einfluss der Würfelabmessung, aus welchem die Bohrkerns entnommen wurden (20 oder 15 cm Kantenlänge), auf die nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI bei unterschiedlichen w/b -Werten.

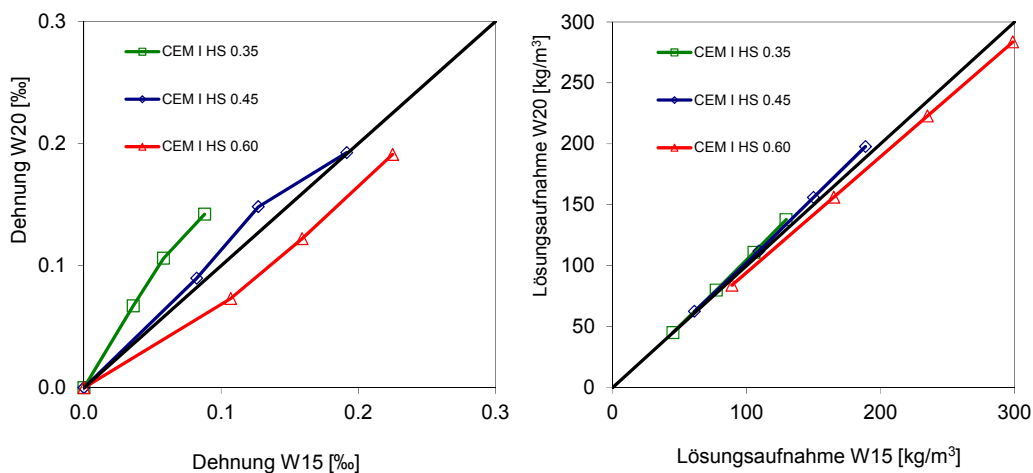


Abb. 4.19 Einfluss der Würfelabmessung, aus welchem die Bohrkerns entnommen wurden (20 oder 15 cm Kantenlänge), auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

4.2.4 Wasserlagerung

Werden die Prüfkörper während der Normprüfung anstatt in einer 5%-igen Natriumsulfatlösung in deionisiertem Wasser gelagert, wird die Lösungsaufnahme in der Sulfatlösung mit zunehmender Anzahl Zyklen tendenziell kleiner als bei der Lagerung in Wasser (Abb. 4.20, rechts). Dies dürfte mit Reaktionsprodukten und Ausfällungen zusammenhängen, welche im Falle der Sulfatlösung die oberflächennahen Poren verkleinern und somit die Lösungsaufnahme reduzieren. Bei den Dehnungen ist innerhalb der vier Normzyklen eine Tendenz zu höheren Dehnungen im Falle der Sulfatlösung zu erkennen (Abb. 4.20, links). Dies gilt allerdings nur für den Normalbeton mit CEM II/A-LL sowie für die Betone mit erhöhtem Zementleimvolumen, wo die Differenz zwischen Sulfat- und Wasserlagerung nach vier Zyklen bei $0.08 \div 0.14\text{‰}$ liegt. Diese erhöhten Dehnungen widerspiegeln sich auch in einer höheren Sulfatdehnung (Abb. 4.22). Bei den übrigen Betonen ist praktisch kein Unterschied zur Wasserlagerung zu erkennen (Differenz zwischen Sulfat- und Wasserlagerung nach vier Zyklen $-0.02 \div +0.03\text{‰}$). Dies bedeutet, dass die

Dehnung innerhalb der vier Normzyklen in den meisten Fällen nicht mit der Sulfatinteraktion zusammenhängt. Dies deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus Kap. 2.3. Entsprechend ergeben sich in diesen Fällen auch für die ausgewertete Sulfatdehnung Δl nur geringe Unterschiede zwischen sulfat- und wassergelagerten Prüfkörpern (Abb. 4.22).

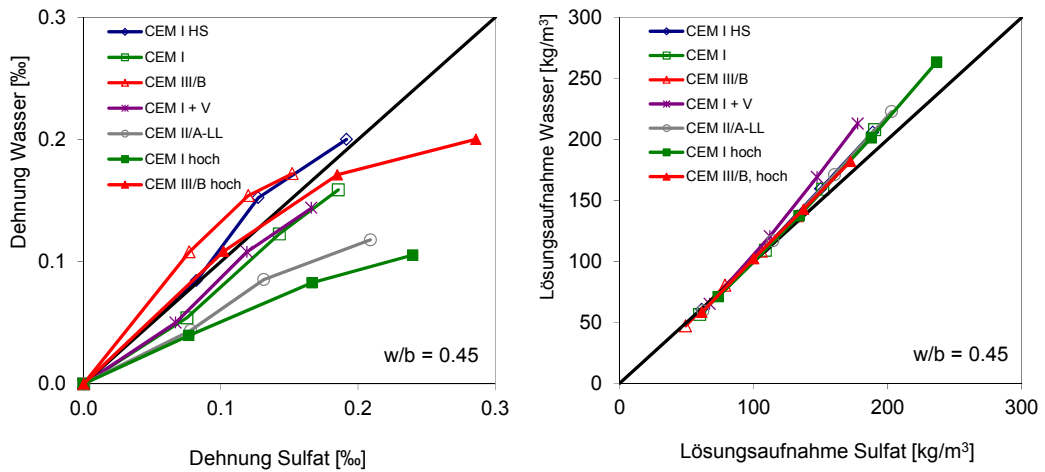


Abb. 4.20 Vergleich der kumulativen Dehnung (links) und der kumulativen Lösungsaufnahme (rechts) von in Wasser und Sulfatlösung gelagerten Proben.

Bei den Betonmischungen mit CEM I und CEM III/B als Bindemittel wurden sowohl im Wasser als auch in der Sulfatlösung insgesamt 8 Trocknungs- und Tränkungszyklen durchgeführt (Abb. 4.21). Die Tendenz zu abnehmender Lösungsaufnahme bei Sulfatlagerung im Vergleich zur Wasserlagerung setzt sich dabei fort. Während nach vier Zyklen die Dehnungen in Wasser und Sulfatlösung noch keine Unterschiede aufweisen (ausgefüllte Symbole), ist nach acht Zyklen insbesondere beim CEM I eine deutliche Tendenz zu grösseren Dehnungen bei der Sulfatlagerung zu erkennen. Entsprechend ist auch bei der ausgewerteten Sulfatdehnung nach 8 Zyklen eine Tendenz zu grösseren Werten bei der Sulfatlagerung im Vergleich zur Wasserlagerung feststellbar (Abb. 4.22).

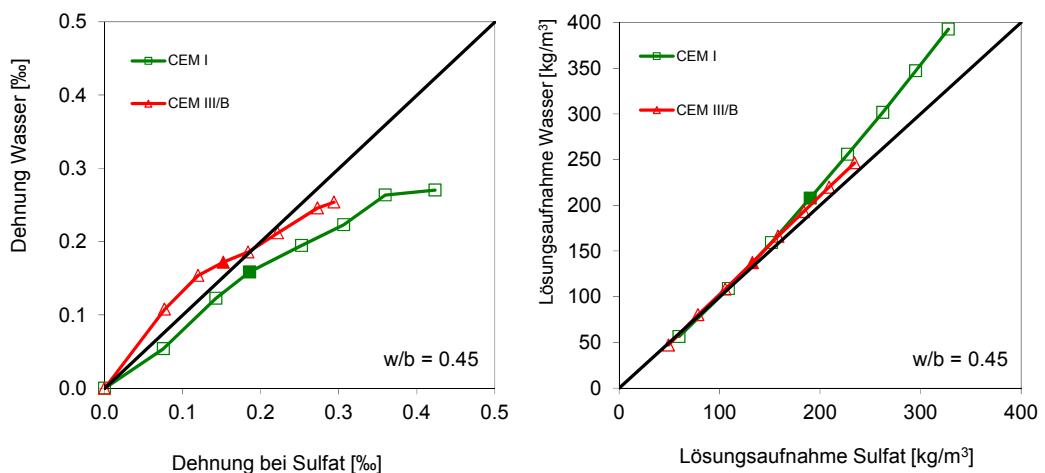


Abb. 4.21 Vergleich der der kumulativen Dehnung (links) und der kumulativen Lösungsaufnahme (rechts) während 8 Zyklen von in Wasser und Sulfatlösung gelagerten Proben. Ausgefüllte Symbole: Dehnung resp. Lösungsaufnahme nach vier Zyklen.

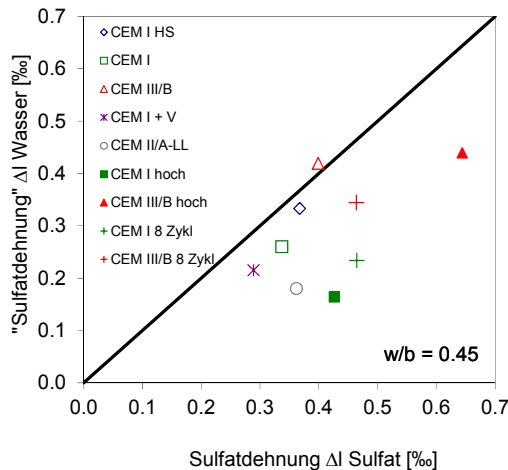


Abb. 4.22 Vergleich der nach Norm ausgewerteten Sulfatdehnung Δl von in Wasser und Sulfatlösung gelagerten Proben mit $w/b = 0.45$. Ausgefüllte Symbole: Normalbeton mit erhöhtem Leimvolumen. + - Zeichen: Auswertung nach 8 Tränkungs- und Trocknungszyklen.

4.2.5 Lösungszusammensetzung

Durch die Verwendung von Natriumsulfat als Prüflösung werden Sulfationen zur Verfügung gestellt, welche die Bildung von Ettringit im Zementstein ermöglichen. Die weiteren notwendigen Ionen sind bereits im Zementstein vorhanden (Ettringit: $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$). Für die Bildung des Minerals „Thaumasit“, welches bei Sulfatinteraktion am Bauwerk ebenfalls häufig im Beton zu finden ist (vgl. z.B. [Leemann, 2011]) ist neben Sulfat zusätzlich Karbonat notwendig (Thaumasit: $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$). Dieses Karbonat kann am Bauwerk entweder aus der Gesteinskörnung im Beton gelöst werden, in Zusatzstoffen enthalten sein (z.B. Kalksteinmehl) oder es ist ebenfalls im Bergwasser enthalten. Aus diesem Grund wurde mit einem Lösungsgemisch, bei dem die Karbonate bereits in der Lösung enthalten und somit frei verfügbar sind (5 % Na_2SO_4 + 3 % NaHCO_3), der Einfluss einer eventuellen Thaumasitbildung auf die Prüfergebnisse abgeklärt.

Der Einfluss des Lösungsgemisches wurde nur an einer Mischung (I-HS-45) untersucht. Dabei wurde bewusst eine Mischung gewählt, deren Zement einen geringen C_3A -Gehalt (CEM I HS) und somit ein geringes Ettringitbildungspotential aufweist. Wie z.B. in [Leemann, 2011] gezeigt wird, können Betone mit solchen Zementen unter Einwirkung einer Kombination von Sulfaten und Karbonaten nämlich trotz geringem C_3A -Gehalt des Zementes eine erhebliche Sulfatschädigung zeigen, die hauptsächlich auf der Bildung von Thaumasit anstelle von Ettringit beruht. Bei der gewählten Mischung müsste also am ehesten eine Schädigung infolge Thaumasitbildung erfolgen.

Innerhalb der vier Normzyklen konnte bei der geprüften Mischung sowohl bei der Dehnung als auch bei der Sulfatlösungsaufnahme kein wesentlicher Unterschied zur reinen Na_2SO_4 -Lösung festgestellt werden (Abb. 4.23). Entsprechend sind auch die ausgewerteten Sulfatdehnungen Δl mit 0.37 ‰ für die reine Sulfatlösung und 0.39 ‰ mit dem Lösungsgemisch praktisch gleich gross. Da Thaumasit zwar weniger voluminös ist als Ettringit, jedoch zu einer Auflösung des Zementsteines führen kann, müsste sich eine allfällige Thaumasitschädigung in einem Abfall des E-Moduls bemerkbar machen. Jedoch hat sich der dynamische E-Modul während der vier Zyklen nur geringfügig verändert (- 0.5 %).

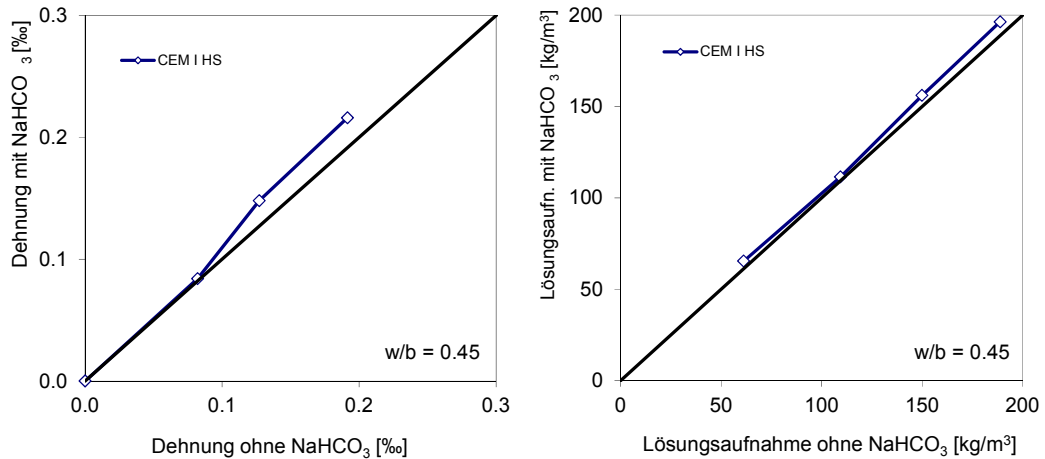


Abb. 4.23 Einfluss der Lösungszusammensetzung (mit oder ohne Natriumhydrogencarbonat) auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

Obwohl nur ein Beton mit dem Lösungsgemisch geprüft wurde kann aufgrund der Resultate vermutet werden, dass auch bei der Präsenz von Karbonaten während der Prüfung hauptsächlich Ettringit gebildet wird und der Einfluss allfälliger Thaumasitbildungen trotz geringem C_3A -Gehalt des Zementes klein ist. Der Grund dürfte darin liegen, dass einerseits die Kinetik der Thaumasitbildung verglichen mit der Prüfzeit zu langsam ist. Andererseits kann aus thermodynamischen Gründen die Thaumasitbildung erst einsetzen, wenn das verfügbare Aluminium mit Sulfat zu Ettringit reagiert hat [Schmidt, 2008]. Die Prüfung ist somit in der vorliegenden Form eher ungeeignet, um eine Thaumasitbildung als massgebenden Schadensmechanismus nachzuweisen.

4.2.6 Lösungskonzentration

Die Halbierung der Sulfatlösungskonzentration von 5.0 % auf 2.5 % hat bei den geprüften Betonmischungen weder auf die Dehnung noch auf die Lösungsaufnahme einen signifikanten Einfluss (Abb. 4.24). Einzig beim CEM I ist innerhalb der vier Normzyklen eine tendenzielle Zunahme der Dehnung bei 5.0 %-iger Lösungskonzentration festzustellen. Entsprechend sind auch die Unterschiede in der ausgewerteten Sulfatdehnung ΔI nur klein. Die höhere Lösungskonzentration führt bei allen Bindemitteltypen in ähnlichem Masse zu tendenziell grösseren Sulfatdehnungen (Abb. 4.25). Aufgrund dieser Resultate drängt sich eine Änderung der Konzentration der Prüflösung nicht auf.

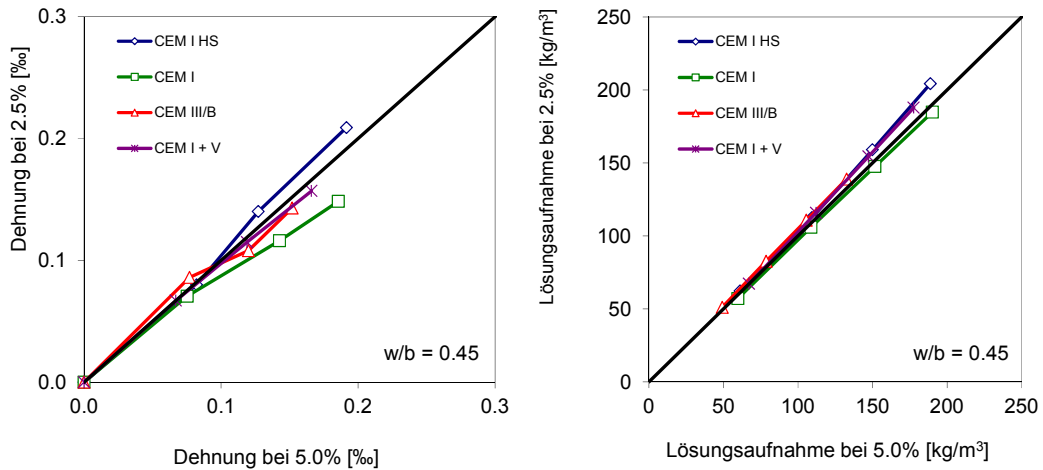


Abb. 4.24 Einfluss der Lösungskonzentration (2.5 % oder 5.0 % Na_2SO_4) auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

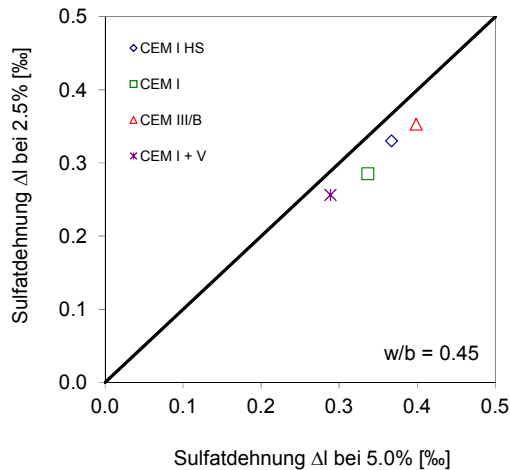


Abb. 4.25 Einfluss der Lösungskonzentration (2.5 % oder 5.0 % Na_2SO_4) auf die nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI für Normalbetone mit $w/b = 0.45$.

4.2.7 Prüfalter

Die Dehnung wird durch das spätere Prüfalter (90 d anstelle 28 d) generell reduziert (Abb. 4.26). Allerdings ist die Reduktion nur zu Beginn der Zyklen erkennbar, während die Dehnungszunahme ab dem 3. Zyklus bei beiden Prüfaltern etwa gleich gross ist. Die Reduktion der Dehnung durch den späteren Prüfbeginn ist beim CEM III/B etwas stärker ausgeprägt als beim CEM I HS. Beim CEM I HS hat der spätere Prüfbeginn zudem praktisch keinen Einfluss auf die Sulfatlösungsaufnahme. Beim CEM III/B wird die Sulfatlösungsaufnahme durch den späteren Prüfbeginn reduziert, allerdings nur im ersten Zyklus. Anschliessend ist die Lösungsaufnahme für die beiden Prüfalter identisch. Die ausgewertete Sulfatdehnung ΔI nimmt mit zunehmendem Prüfalter für beide geprüften Betone in ähnlichem Masse von ca. 0.4 ‰ auf ca. 0.3 ‰ ab (Abb. 4.27), obwohl die Dehnung beim CEM III/B stärker reduziert wird als beim CEM I HS. Der Grund liegt darin, dass beim CEM III/B auch die Sulfatlösungsaufnahme kleiner ist und somit der Extrapolationsfaktor grösser wird als beim CEM I HS.

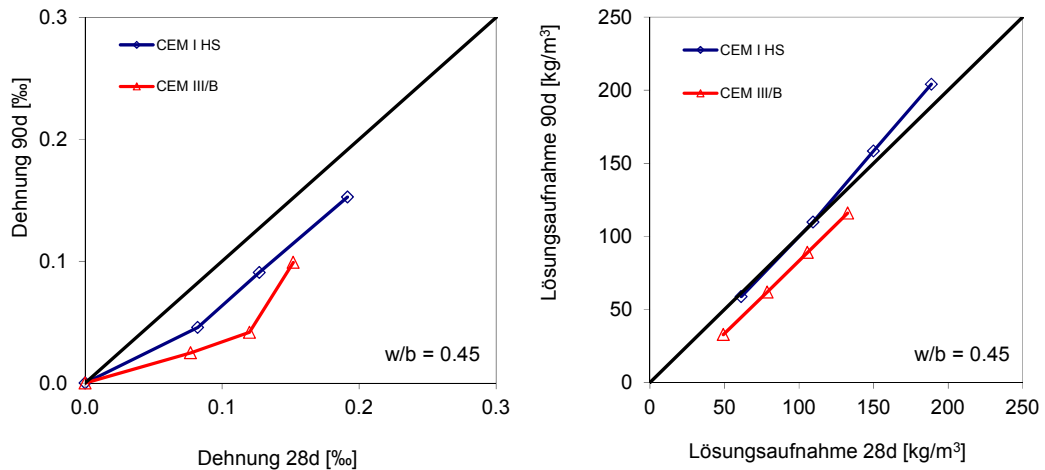


Abb. 4.26 Einfluss des Prüfalters (28 d oder 90 d) auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

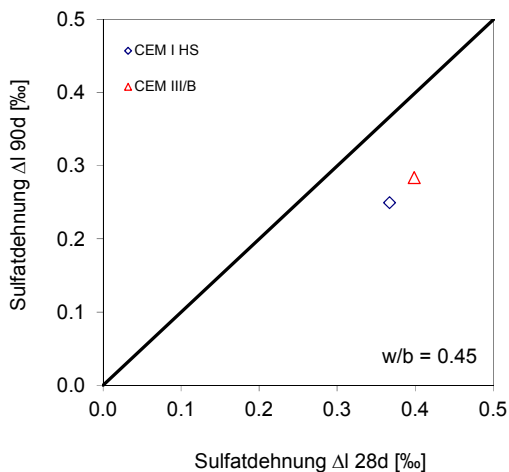


Abb. 4.27 Einfluss des Prüfalters (28 d oder 90 d) auf die nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI .

4.2.8 Temperatur

Die Lösungstemperatur hat keinen einheitlichen Einfluss auf die gemessenen Dehnungen (Abb. 4.28), weshalb es sich bei den Abweichungen hauptsächlich um Prüfstreuungen handeln dürfte. Einzig beim CEM I HS ist vom 3. Zyklus an eine Tendenz zu erhöhten Dehnungen bei 10 °C zu erkennen. Entsprechend sind auch die Auswirkungen auf die ausgewertete Sulfatdehnung ΔI unterschiedlich (Abb. 4.29). Während beim CEM I kein Einfluss erkennbar ist, wird die Sulfatdehnung ΔI beim CEM III/B und CEM I + V bei 10 °C Lösungstemperatur kleiner. Beim Beton mit CEM I HS ist es jedoch genau umgekehrt.

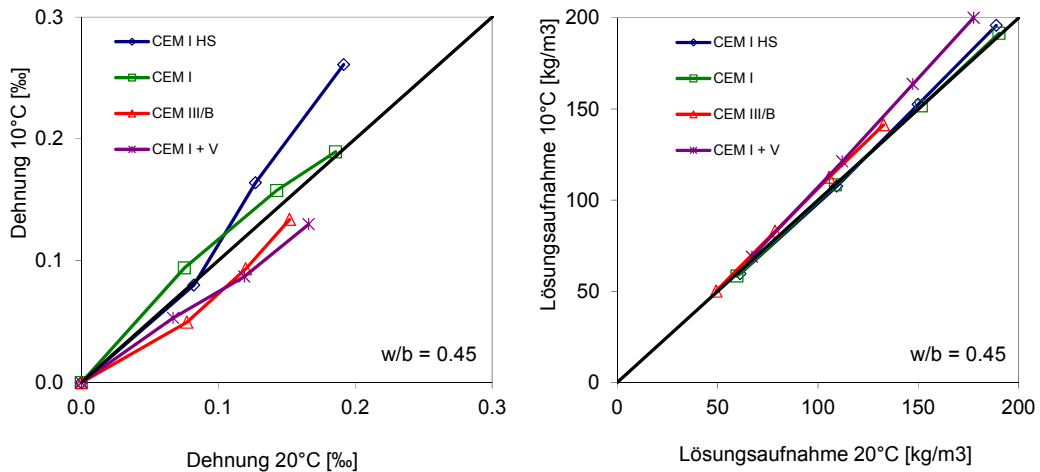


Abb. 4.28 Einfluss der Lösungstemperatur (20 °C oder 10 °C) auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

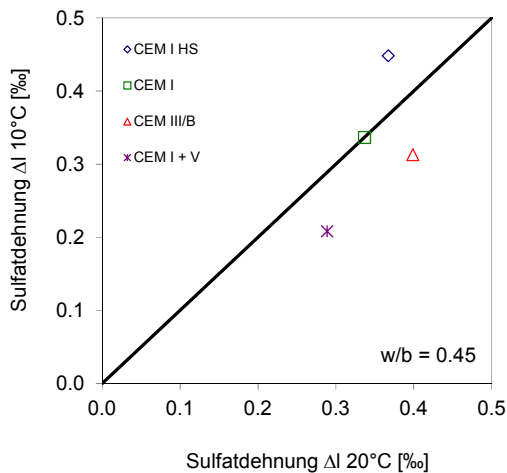


Abb. 4.29 Einfluss der Lösungstemperatur (20 °C oder 10 °C) auf die nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI .

4.2.9 Anzahl Zyklen

Nach den vier Normzyklen ist die Dehnung bei den Mischungen mit $w/b = 0.45$ für alle vier Bindemitteltypen praktisch identisch (gestrichelte Linie in Abb. 4.30). Nach acht Zyklen weist der Beton mit CEM I jedoch deutlich höhere Dehnungen auf als die übrigen Betone. Die aufgenommene Menge Sulfatlösung nimmt mit zunehmender Anzahl Zyklen zu. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zementen ändern sich zwischen vier und acht Zyklen jedoch kaum. Einzig der CEM I + V weist nach vier Zyklen eine mit dem CEM I und CEM I HS vergleichbare Lösungsaufnahme auf, nach acht Zyklen hingegen eine etwas tiefere.

Der Beton mit CEM III/B und hohem Bindemittelmittelvolumen weist nach acht Zyklen eine sehr grosse Dehnung auf (1.43 ‰). Bereits nach vier Zyklen ist diese deutlich höher als bei den übrigen Betonen (Abb. 4.30, links). Die kumulative Sulfatlösungsaufnahme ist grösser als beim Beton mit CEM III/B und tiefem Leimvolumen, jedoch etwa in einer ähnlichen Grössenordnung wie die Lösungsaufnahme der Betone mit den weiteren Bindemitteltypen und tiefem Leimvolumen (Abb. 4.30, rechts).

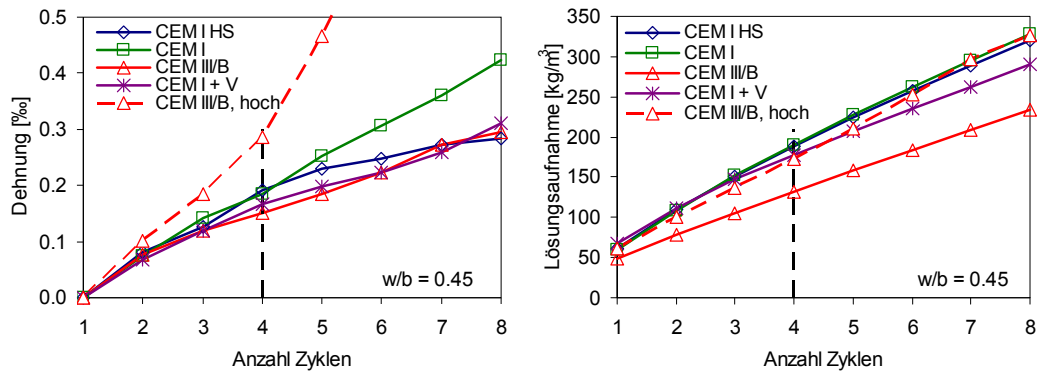


Abb. 4.30 Kumulative Dehnung ab dem 2. Zyklus (links) und kumulative Sulfatlösungsaufnahme (rechts) in Abhängigkeit der Anzahl Zyklen für die Mischungen, bei denen acht Trocknungs- und Tränkungszyklen durchgeführt wurden. Gestrichelte Linie: Mischung III-45-h mit hohem Leimvolumen

4.2.10 Leimvolumen

Der Einfluss des Zementleimvolumens auf die Dehnung und die Sulfatlösungsaufnahme wird anhand des Vergleichs zwischen selbstverdichtendem Beton (SCC, Leimvolumen ca. 350 l/m^3) und Normalbeton (Leimvolumen ca. 260 l/m^3) mit jeweils gleichem w/b-Wert abgeklärt (Abb. 4.31). Während die Lösungsaufnahme beim SCC für alle Mischungen vom 1. Zyklus an grösser ist als beim Normalbeton, ist bei der Dehnung keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Bei den Betonen mit CEM I und CEM I + V ist die Dehnung beim SCC von Beginn an grösser als beim Normalbeton, wobei die Unterschiede mit zunehmender Anzahl Zyklen zunehmen. Bei den Betonen mit CEM I HS und CEM III/B sind die Dehnungen beim Normalbeton zumindest zu Beginn der Zyklen kleiner als beim SCC, zeigen dann aber eine Tendenz zu überproportional zunehmenden Dehnungen beim SCC. Allerdings bleiben für diese Betone die totalen Dehnungen beim SCC innerhalb der vier Normzyklen kleiner oder zumindest vergleichbar mit den Dehnungen des Normalbeton. Entsprechend ist auch die Auswirkung auf die ausgewertete Sulfatdehnung ΔI unterschiedlich (Abb. 4.32). Während bei Betonen mit CEM III/B und CEM I HS die Sulfatdehnung des SCC teilweise deutlich kleiner ist als beim Normalbeton ist es bei den Betonen mit CEM I und CEM I + V genau umgekehrt.

Mit zunehmendem Leimvolumen führt die ausgewertete Sulfatdehnung also tendenziell eher zu einer erwartungsgemässen Abstufung der Bindemitteltypen, während dies beim Normalbeton mit geringem Leimvolumen nicht der Fall ist.

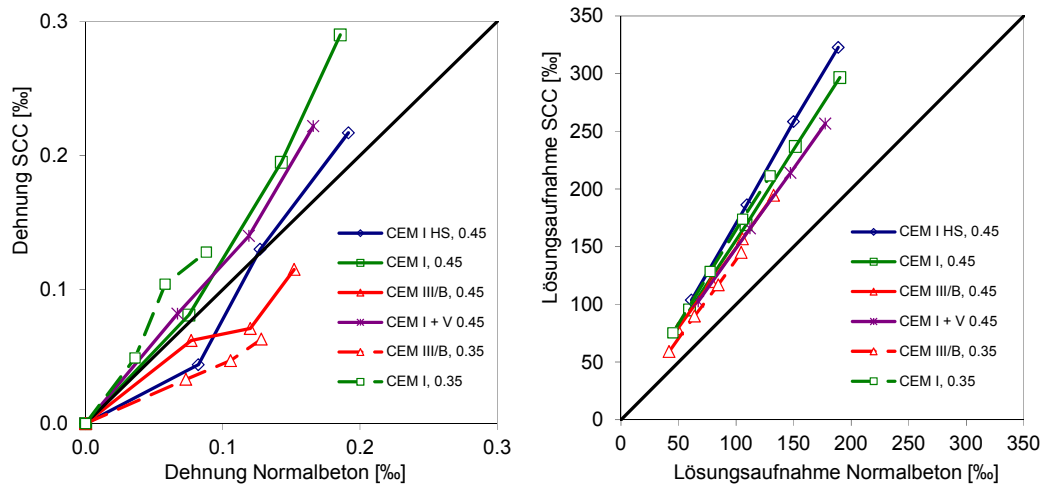


Abb. 4.31 Einfluss des Leimvolumens (SCC = hohes Leimvolumen, Normalbeton = normales Leimvolumen) auf die kumulative Dehnung (links) und auf die kumulative Lösungsaufnahme (rechts).

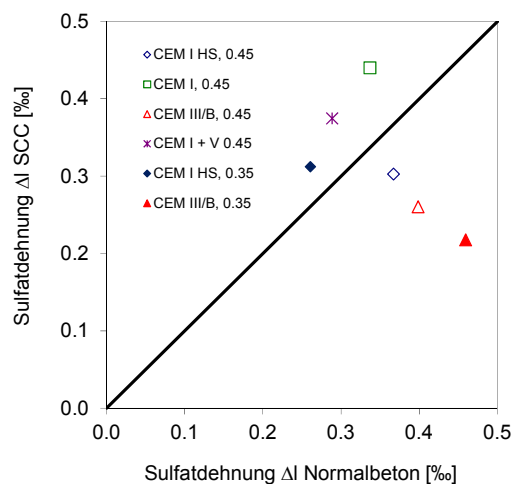


Abb. 4.32 Einfluss des Leimvolumens (SCC = hohes Leimvolumen, Normalbeton = normales Leimvolumen) auf die nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI .

4.3 Dynamischer E-Modul

Während der dynamische E-Modul während den Tränkungs- und Trocknungszyklen im Wasser wie erwartet praktisch konstant bleibt (Abb. 4.33, rechts), nimmt er in der Sulfatlösung bei allen Zementtypen tendenziell zu (Abb. 4.33, links). Die Zunahme beträgt bis zu 10 % des Ausgangswertes und ist für die verschiedenen Zementtypen unterschiedlich stark ausgeprägt. Erst nach 5 bis 6 Zyklen ist wieder eine abnehmende Tendenz festzustellen.

Die einzige Betonmischung, welche sich davon unterscheidet, ist der Normalbeton mit CEM III/B und hohem Bindemittelleimvolumen. Der E-Modul dieser Bohrkerns nimmt anfänglich stärker zu als bei den übrigen Betonen, zeigt jedoch ab drei Zyklen einen ausgeprägten Abfall von bis zu -40 % nach acht Zyklen (Abb. 4.33, links).

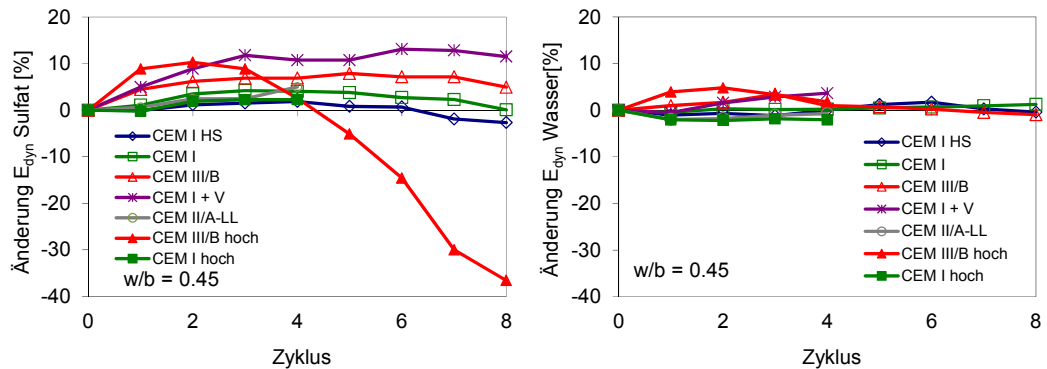


Abb. 4.33 Veränderung des dynamischen E-Moduls bezogen auf den Ausgangswert in Funktion der Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen bei Lagerung in Sulfatlösung (links) und in Wasser (rechts), Normalbetone mit $w/b = 0.45$.

4.4 Sulfateindringtiefe

Die Sulfateindringtiefe wurde an ausgewählten Proben über die Aufnahme eines Schwefelprofils verfolgt. Generell hat sich dabei gezeigt, dass bei allen untersuchten Proben nach vier Tränkungs- und Trocknungszyklen ein nach innen abnehmender Schwefelgehalt vorhanden ist und im Kernbereich, selbst bei den hohen w/b -Werten, praktisch kein Sulfat eingedrungen ist. Exemplarisch wird dies am Beispiel des Betons mit CEM I 32.5 R als Bindemittels gezeigt (Abb. 4.34). Die Mischung mit $w/b = 0.60$ weist bis in eine Tiefe von ca. 8 mm einen relativ konstanten hohen Schwefelgehalt auf, welcher ab ca. 10 mm Tiefe jedoch auf den Anfangsgehalt abnimmt. Die Mischungen mit $w/b = 0.35$ und 0.45 sowie die SCC-Mischung weisen ein praktisch identisches Schwefelprofil auf. Die Gehalte sind generell deutlich kleiner als bei der Mischung mit $w/b = 0.60$ und der Anfangsgehalt ist bereits in einer Tiefe von ca. 5 mm erreicht. Die Natriumgehalte sind generell relativ klein und es ist höchstens eine Tendenz zu höheren Gehalten im Randbereich zu erkennen. Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Der Kernbereich der Prüfkörper wird während der zweitägigen Trocknung selbst bei hohen w/b -Werten praktisch nicht entwässert, weshalb bei der anschliessenden Tränkung der Schwefel nur über Diffusion in den Kernbereich gelangen kann. Dieser Prozess ist aber zu langsam, um innerhalb der Prüfdauer Schwefel in den Kernbereich zu bringen.
- Der Schwefeleintrag ist bei tiefen w/b -Werten sehr gering und beschränkt sich nur auf die oberflächliche Zone. Entsprechend sind die Unterschiede im Schwefelprofil für alle in Abb. 4.34 gezeigten Betone mit $w/b \leq 0.45$ sehr klein.
- Das Natrium wird nicht in der Matrix eingebunden und scheint bei einem nachfolgenden Tränkungszyklus eher die Tendenz zu haben, wieder vom Bohrkern in die Lösung zu gelangen.

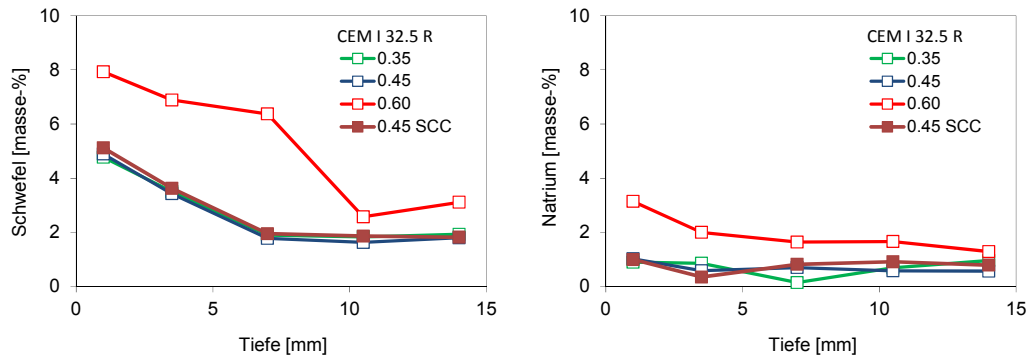


Abb. 4.34 Eindringtiefe von Schwefel (links) resp. Natrium (rechts) nach vier Norm-Tränkungs- und Trocknungszyklen. Beton mit CEM I als Bindemittel, Normalbeton mit drei verschiedenen w/b-Werten sowie SCC mit w/b = 0.45.

Die Betone mit CEM III/B als Bindemittel weisen aufgrund des höheren SO_3 -Gehaltes im Zement (Abb. 3.4) generell einen höheren Nullgehalt an Schwefel auf (Abb. 4.35). Der zusätzliche Schwefeleintrag während der vier Normzyklen ist noch kleiner als bei den Betonen mit CEM I (Abb. 4.34) und die verschiedenen w/b-Werte sind betreffend Schwefeleintrag kaum zu unterscheiden (Abb. 4.35). Der Schwefel wird in diesem Fall kaum weiter als 3 mm eingetragen. Der Beton mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen weist nach 8 Tränkungs- und Trocknungszyklen ebenfalls keine wesentlichen Unterschiede im Schwefelprofil im Vergleich mit den übrigen Betonmischungen auf.

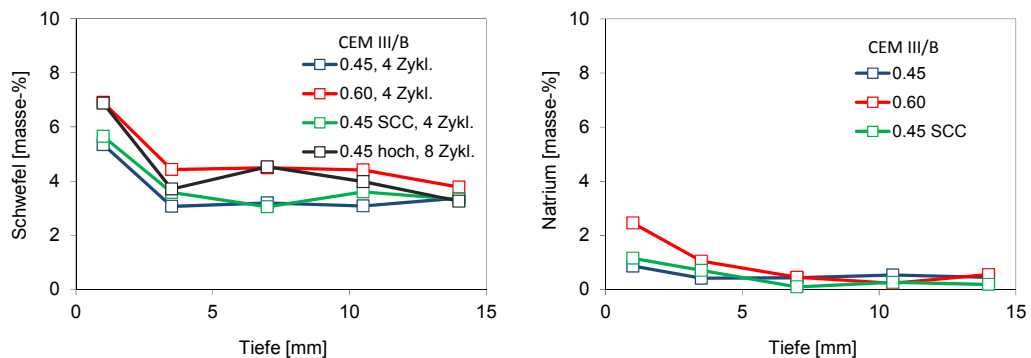


Abb. 4.35 Eindringtiefe von Schwefel (links) resp. Natrium (rechts) nach vier resp. acht Tränkungs- und Trocknungszyklen. Beton mit CEM III/B als Bindemittel, Normalbeton mit w/b-Wert 0.45 und 0.60, Normalbeton mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen und w/b = 0.45 sowie SCC mit w/b = 0.45.

Der Einfluss der Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen sowie der Zusatzlagerung ist in den Abb. 4.36 und Abb. 4.37 dargestellt. Beim Beton mit w/b = 0.60 ist vom 1. bis zum 4. Zyklus eine Erhöhung der Schwefeleintrittstiefe festzustellen (Abb. 4.36). Durch die anschließende Zusatzlagerung wird der Schwefelgehalt im Bohrkern insgesamt nur geringfügig erhöht, es findet jedoch eine gewisse Umverteilung des Schwefels in der Tiefe statt. Zu beachten ist, dass die drei Messungen in Abb. 4.36 an drei unterschiedlichen Bohrkernen durchgeführt wurden und somit auch die Materialstreuung enthalten.

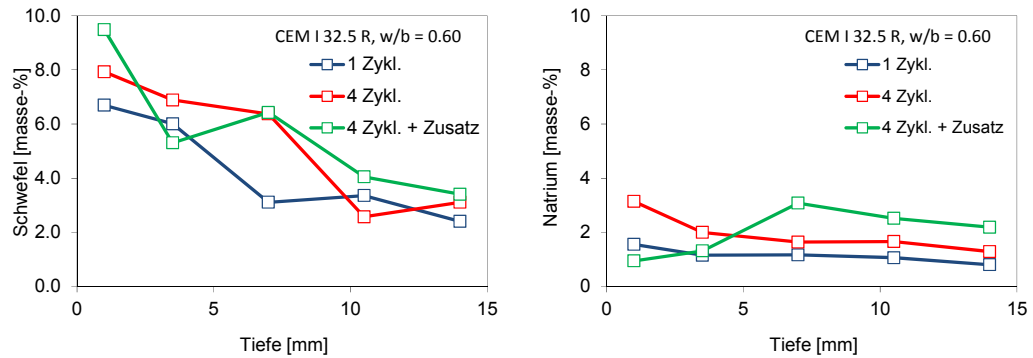


Abb. 4.36 Eindringtiefe von Schwefel (links) resp. Natrium (rechts) in Funktion der Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen und Zusatzlagerung in Sulfatlösung während vier Wochen. Normalbeton mit $w/b = 0.60$ und CEM I als Bindemittel.

Eine Erhöhung der Anzahl Tränkungs- und Trocknungszyklen von vier auf acht Zyklen führt nur im unmittelbaren Randbereich zu einer Erhöhung der Schwefelkonzentration (Abb. 4.37). Auch dies deutet darauf hin, dass der Kern bei der zweitägigen Trocknung bei 50°C nicht entwässert wird und über Diffusion während der zur Verfügung stehenden Zeit (8 x 5 Tage Sulfatlösungslagerung) bei einem Beton mit relativ tiefem w/b -Wert nur ein äusserst geringer Schwefeleintrag in den Kernbereich stattfindet.

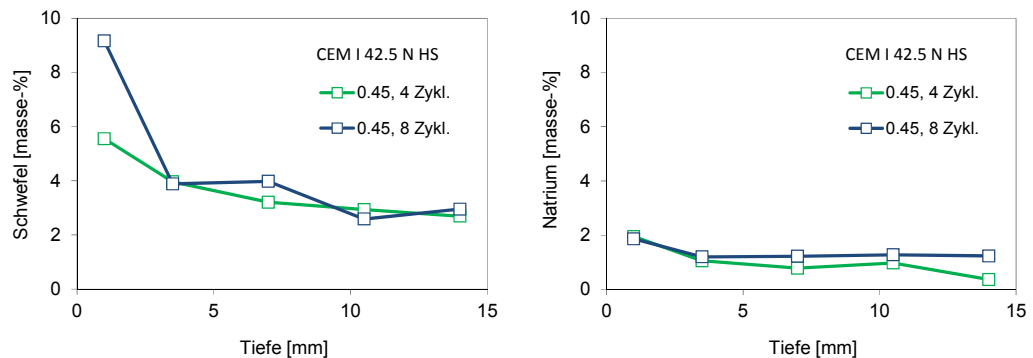


Abb. 4.37 Eindringtiefe von Schwefel (links) resp. Natrium (rechts) nach vier und nach acht Tränkungs- und Trocknungszyklen. Normalbeton mit CEM I HS als Bindemittel und $w/b = 0.45$.

Der an Bohrkernen mit unterschiedlichem w/b -Wert aufgenommene Trocknungsverlauf bei 50°C in Funktion der Zeit (Abb. 4.38) bestätigt die Vermutung, dass die Kernzone der Bohrkerns kaum entwässert wird. Beim Beton mit $w/b = 0.60$ sind nach zwei Tagen erst 64 % der Ausgleichsfeuchte erreicht. Die Bohrkerns befinden sich in diesem Fall nach ca. 14 Tagen in der Ausgleichsfeuchte. Bei den Mischungen mit den tieferen w/b -Werten dauert das Erreichen dieses Zustandes sogar noch deutlich länger (≥ 42 Tage). Beim Beton mit $w/b = 0.45$ sind so nach zwei Tagen 41 % der Ausgleichsfeuchte erreicht und beim Beton mit $w/b = 0.35$ sogar nur 34 %. Nach fünf Tagen Trocknung ist der Massenverlust bei $w/b = 0.35$ und 0.45 ca. 40 % grösser als nach zwei Tagen, während diese Differenz bei $w/b = 0.60$ ca. 25 % beträgt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die „Trocknungstiefe“ bei jedem Zyklus immer etwa die Selbe ist und somit das Sulfat insbesondere bei tiefen w/b -Werten über kapillares Saugen nicht bis in den Kern transportiert wird.

Das anschliessende Aufsaugen hingegen geht deutlich schneller. Innerhalb von zwei Tagen wird bei $w/b = 0.60$ und 0.45 praktisch wieder die ursprüngliche Masse erreicht (96 resp. 94 %) und beim $w/b = 0.35$ mit 62 % etwas weniger. Nach fünf Tagen im Wasser

sind bei $w/b = 0.60$ und 0.45 dann bereits 98 % der ursprünglichen Masse erreicht und bei $w/b = 0.35$ sind es ca. 75 %.

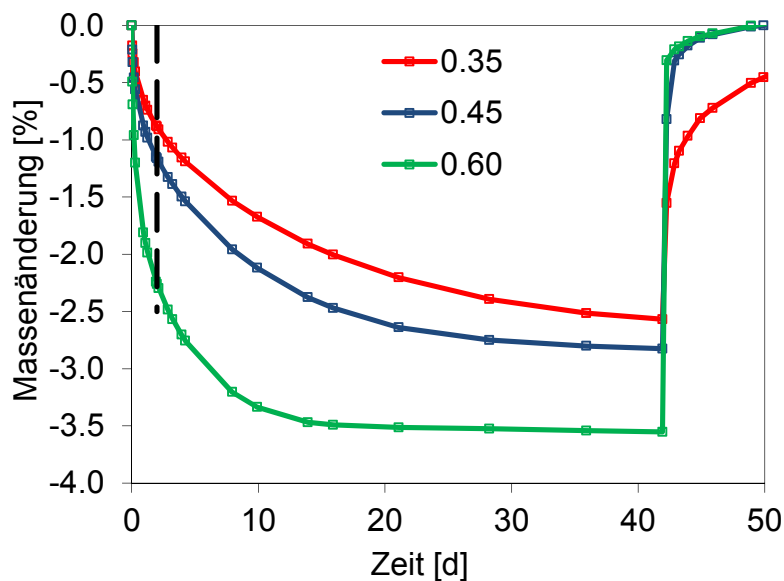


Abb. 4.38 Trocknungsverlauf im Ofen bei 50 °C sowie Aufsaugverhalten im Wasser in Abhängigkeit des w/b -Wertes. Bohrkern \varnothing 30 mm nach Sulfatwiderstandsprüfung, Normalbeton mit CEM I als Bindemittel. Schwarze gestrichelte Linie: 2 Tage.

4.5 Mineralphasen

4.5.1 Experimentelle Bestimmung mittels Röntgendiffraktion (XRD)

In Abb. 4.39 sind die XRD-Resultate für zwei Betone dargestellt, die deutlich unterschiedliche Resultate bei den Reaktionsprodukten liefern sollten. Es sind dies der Beton mit CEM I HS, $w/b = 0.45$ mit Wasserlagerung und der Beton mit CEM I, $w/b = 0.60$ nach 4 Normzyklen in der Sulfatlösung. Während die erste Probe durch die Lagerung im Wasser ohne Sulfatinteraktion als Referenzprobe dient, soll die zweite Probe mit normalem Portlandzement und hohem w/b -Wert nach 4 Zyklen in der Sulfatlösung die obere Grenze der möglichen Mineralneubildungen infolge Sulfatinteraktion darstellen.

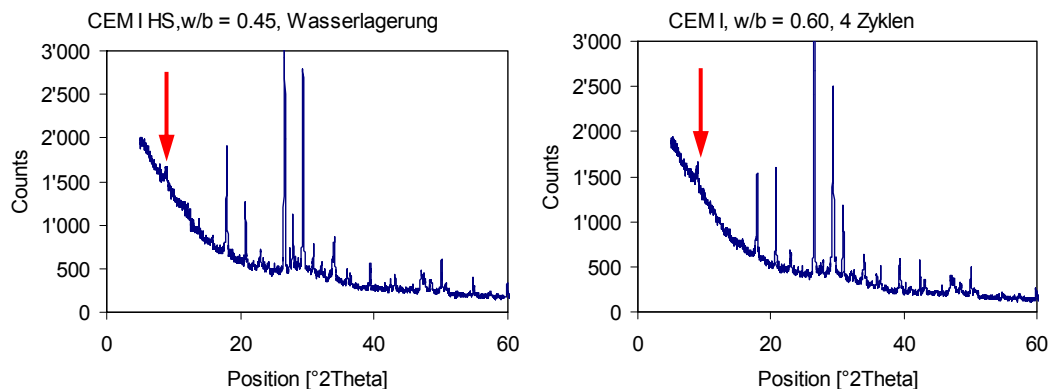


Abb. 4.39 Resultate der Röntgendiffraktion zweier Proben (äusserster Ring) mit Markierung des Ettringit-Peaks (roter Pfeil).

In Abb. 4.39 ist der Ettringit-Peak mit einem roten Pfeil markiert. Es ist zu erkennen, dass

bei der Nullprobe eine geringe Menge Ettringit nachgewiesen werden kann, welche Abhängig vom Gipsgehalt im Zement ist. Bei der Probe mit Sulfatinteraktion ist dieser Peak ebenfalls zu erkennen, wobei er selbst im äussersten Ring mit der grössten Sulfatbelastung nur unwesentlich stärker ausgeprägt ist als bei der Referenzprobe.

Daraus lässt sich schliessen, dass XRD als Methode zu wenig sensitiv ist, um die Menge der entstehenden Mineralphasen während der Sulfatlagerung in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung unterscheiden zu können.

4.5.2 Experimentelle Bestimmung mittels Elektronenmikroskopie (EDX)

Beim Beton mit CEM I und $w/b = 0.60$ nach einem Zyklus in der Sulfatlösung ist in Prüfkörpermitte (14 mm vom Rand) vor allem CSH und etwas Monokarbonat zu finden (Abb. 4.40, links), eine Zusammensetzung wie sie von einem Zementstein ohne Sulfatinteraktion erwartet werden kann. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Prüfkörpermitte nach einem Zyklus noch nicht mit Sulfat belastet ist. Im Randbereich zeigen jedoch schon einzelne Punkte eine Tendenz Richtung Ettringit.

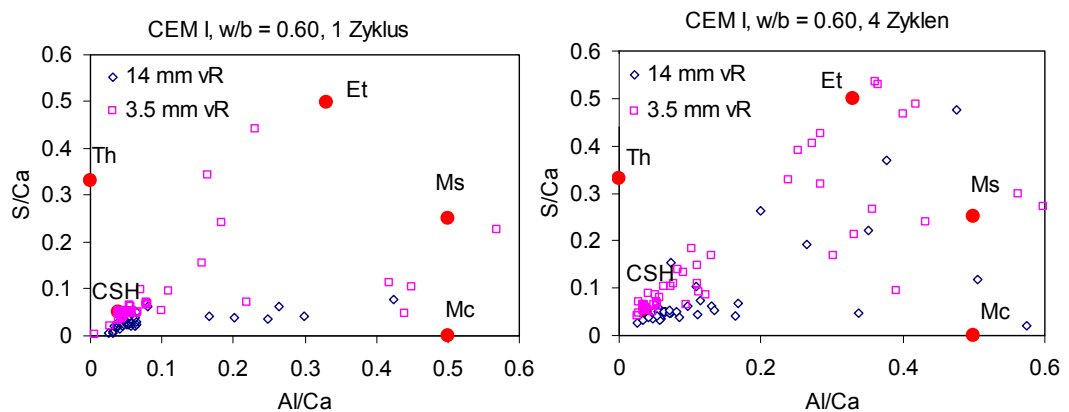


Abb. 4.40 Zusammensetzung der Analysepunkte einer Prüffläche in Prüfkörpermitte und 3.5 mm vom Rand (vR) nach einem Zyklus (links) und nach vier Zyklen (rechts) in Sulfatlösung. Beton mit CEM I, $w/b = 0.60$.

Wird der gleiche Beton nach Prüftiefe (4 Zyklen) analysiert, ist im Randbereich eine deutliche Verschiebung Richtung Ettringit zu finden (Abb. 4.40, rechts), während in Prüfkörpermitte eine Verschiebung der Punkte Richtung Monosulfat und höchstens ganz schwach ausgeprägt Richtung Ettringit stattgefunden hat. Eine Bildung von Gips (Verhältnis von $S/Ca = 1$) kann jedoch ausgeschlossen werden.

4.5.3 Theoretische Bestimmung mittels thermodynamischer Modellierung

Das Eindringen des Sulfates bewirkt eine Phasenänderung im hydratisierten Zement. Diese Phasenveränderungen können mit einer thermodynamischen Modellierung berechnet werden [Lothenbach, 2010]. Dabei können auch die thermodynamisch stabilen Mineralphasen bei Sulfatkonzentrationen berechnet werden, die höher liegen als die experimentell am Prüfkörper bestimmten Konzentrationen.

In Abhängigkeit der eingedrungenen Menge an Natriumsulfatlösung werden AFm-Phasen wie Monosulfat oder Hemikarbonat in Ettringit umgewandelt. Bei sehr hohen Sulfatgehalten wird Portlandit durch die Natriumsulfatlösung destabilisiert und Gips fällt aus. An der Oberfläche der Bohrkerne wird eine Auslaugung erwartet. Diese berechneten Resultate sind für den CEM I ($w/b = 0.45$) in Abb. 4.41a) und für den CEM III/B ($w/b = 0.45$) in Abb. 4.41b) dargestellt.

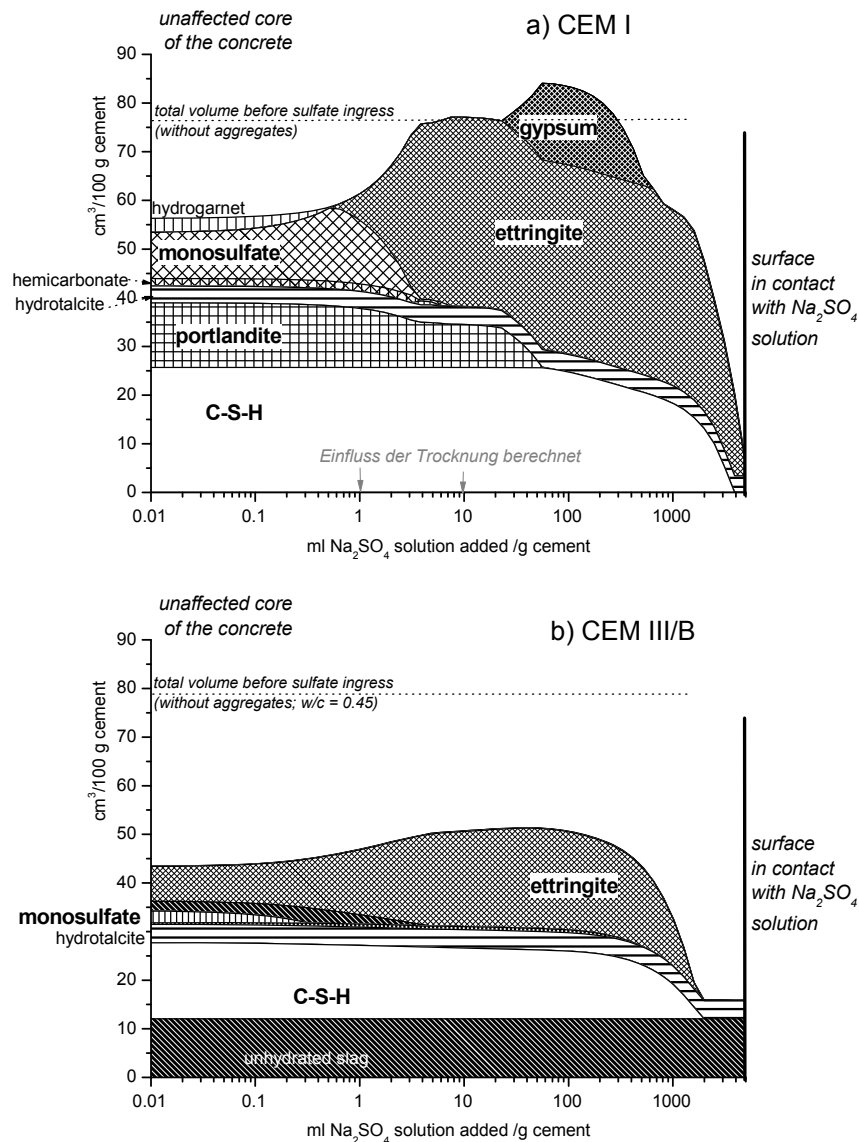


Abb. 4.41 Berechnete Änderung der Phasenzusammensetzung a) des CEM I (vollständig hydratisiert) und b) des CEM III/B (Portlandzement vollständig reagiert, Schlacke 50%) während der Sulfatprüfung (5% Na_2SO_4). Links ist die Phasenzusammensetzung ohne Na_2SO_4 dargestellt, während der Einfluss des Natriumsulfats nach rechts zunimmt, so dass rechts die Oberfläche im Kontakt mit einer sehr grossen Menge an Natriumsulfatlösung ist. Die X-Achse repräsentiert die Menge an Na_2SO_4 -Lösung, welche mit 1 g Zement interagiert.

Es wird erwartet, dass sich im CEM III/B weniger Ettringit bildet, da die verfügbare Menge an Al_2O_3 signifikant tiefer ist (der totale Al_2O_3 Gehalt ist zwar höher, das Al_2O_3 ist aber nur teilweise verfügbar, da der Hüttensand sehr langsam hydratisiert).

Bei der untersuchten Wechsellagerung bleibt allerdings die Konzentration der Natriumsulfatlösung während der Prüfung nicht konstant, sondern erhöht sich während der Trocknungszyklen, da das Wasser verdunstet während das Natriumsulfat zurückbleibt. Thermodynamische Modellierungen zeigen auf, dass sich während der Trocknungszyklen kein zusätzliches Ettringit bilden kann, da die Menge an Aluminium (und möglicherweise Eisen), die Ettringitbildung begrenzt (Abb. 4.42 und Abb. 4.43). Bei fortschreitender Trocknung kann sich allerdings Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) und bei sehr starker Trocknung auch Thenardit (Na_2SO_4) an der Oberfläche der Bohrkern bilden. Sehr starke Trocknung und der resultierende hohe pH kann zudem zur Destabilisierung von Ettringit führen (solche Bedingung werde allerdings bei einer 5-tägigen Trocknung der Bohrkern bei 50°C kaum anzutreffen sein). Die gebildete Menge an Mirabilit hängt zudem sehr stark von der

Menge von Sulfatlösung ab, welche ursprünglich mit dem Zement interagiert hatte. Während an der Oberfläche der Bohrkerne grosse Mirabilitmengen ausfallen können (Abb. 4.42), können sich näher zum Zentrum der Bohrkerne nur sehr geringe Mengen an Mirabilit bilden (Abb. 4.43). Mirabilit und Thenardit lösen sich beim darauffolgenden Tränkungszyklus wieder vollständig auf.

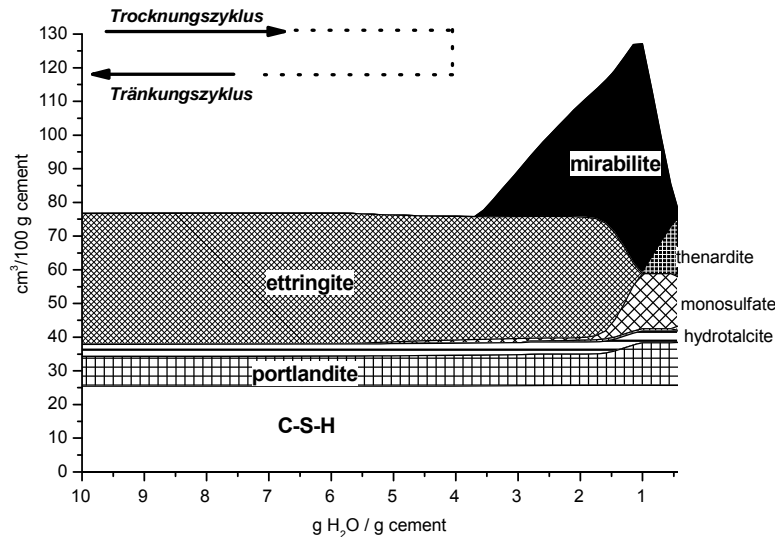


Abb. 4.42 Berechnete Änderung der Phasenzusammensetzung an der **Oberfläche der Bohrkerne** (CEM I 32.5 R) während der Trocknungszyklen der Sulfatprüfung (Konzentration 50g/l Na_2SO_4 ; 10 mL/g Zement). Die Konzentration an Natriumsulfat steigt während der Trocknungszyklen bis die Löslichkeit von Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) überschritten ist.

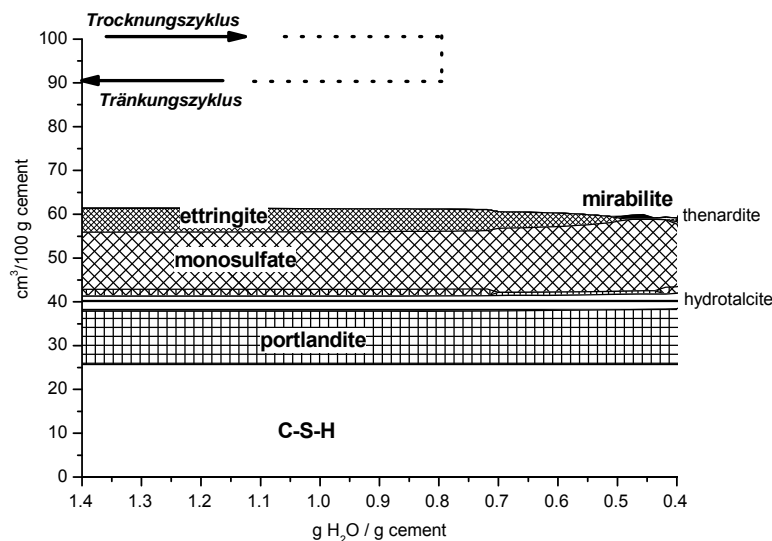


Abb. 4.43 Berechnete Änderung der Phasenzusammensetzung im **Innern der Bohrkerne** (CEM I 32.5 R) während der Trocknungszyklen der Sulfatprüfung (Konzentration 50g/l Na_2SO_4 ; 10 mL/g Zement). Die Konzentration an Natriumsulfat steigt während der Trocknungszyklen bis die Löslichkeit von Mirabilit ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) überschritten ist.

Für die anderen Zemente ergibt sich ein ähnliches Bild. In allen untersuchten Fällen nimmt die Menge an Ettringit während der Trocknung nicht zu, da die Menge Ettringit durch den Anteil an verfügbarem Al_2O_3 und Fe_2O_3 begrenzt wird.

Die thermodynamische Modellierung zeigt somit, dass die Ettringitmenge durch die

Trocknungs- und Tränkungszyklen nur dann verändert wird, wenn der Sulfatgehalt ansteigt. Das Trocknen kann theoretisch zu Mirabilitausfällung vor allem in Oberflächennähe führen. Allfälliges Mirabilit würde allerdings beim darauffolgenden Tränkungszyklus wieder aufgelöst. Wie die experimentellen Daten aber zeigen, sind keine stark erhöhten Natriumgehalte an der Oberfläche vorhanden (Abb. 4.34 bis Abb. 4.37). Eine Mirabilitbildung ist entsprechend beim vorhandenen Trocknungsgrad der Prüfkörper und den vorhandenen Sulfatgehalten nicht wahrscheinlich.

Die maximal gemessenen Schwefelgehalte im Randbereich der Prüfkörper liegen bei 8 – 9 Masse-% (Abb. 4.34 bis Abb. 4.37). In Abb. 4.41 entspricht dies einer Menge an Natriumsulfat-Lösung von 10-20 ml. Wird von einer homogenen Verteilung des Schwefels ausgegangen, liegt dieser Gehalt deutlich unter dem Bereich, in dem Gips stabil ist. Die Ettringitbildung als für die Expansion verantwortlicher Mechanismus kann also nicht nur experimentell sondern auch indirekt über die thermodynamische Modellierung bestätigt werden.

4.6 Zusatzlagerung

Am Ende der Zusatzlagerung sind die Dehnungen im Mittel über alle Betone ca. doppelt so gross wie am Ende der Normzyklen (ohne 1. Zyklus), welches durch die schwarz gestrichelte Linie in Abb. 4.44 und Abb. 4.45 gekennzeichnet ist. Beim Normalbeton mit CEM I ist die Dehnungszunahme während der Zusatzlagerung hingegen stärker ausgeprägt (insbesondere beim Beton mit hohem Bindemittelleimvolumen) als z.B. beim Beton mit CEM III/B (Abb. 4.44). Beim Normalbeton ergibt sich am Ende der Zusatzlagerung eine den Erfahrungen aus Langzeitversuchen entsprechende plausible Abstufung der Dehnungen betreffend Bindemitteltyp, wobei der Beton mit CEM I die höchsten und die Betone mit CEM III/B und CEM I HS die kleinsten Dehnungen aufweisen. Die generelle Abfolge der Betone verändert sich zwar zwischen dem Ende der Normzyklen und dem Ende der Zusatzlagerung mit Ausnahme des Betons mit hohem Bindemittelleimvolumen praktisch nicht. Durch die generell grösseren Dehnungen werden die Unterschiede aber besser erkennbar. Die relativen Unterschiede zwischen verschiedenen w/b-Werten bei identischem Bindemittel (CEM II/A-LL in Abb. 4.44) bleiben zwischen Ende Normzyklen und Ende Zusatzlagerung in etwa konstant.

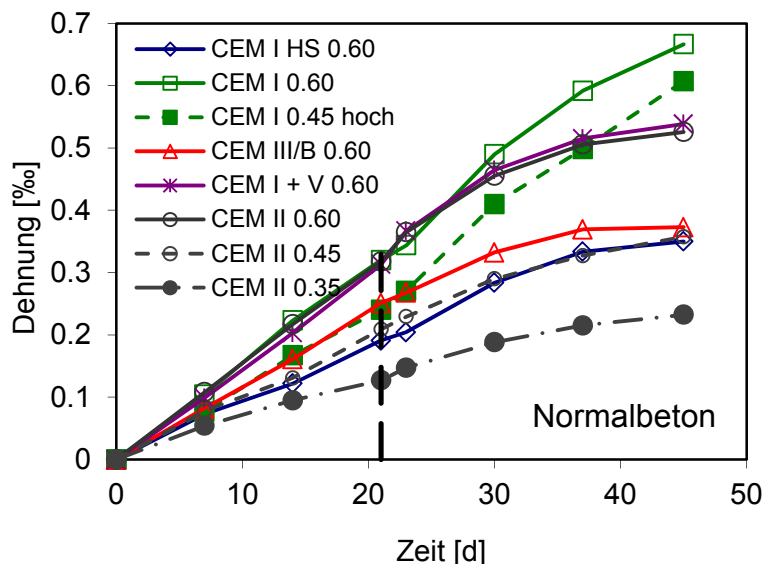


Abb. 4.44 Dehnungen vom 2. bis zum 4. Zyklus während der Normprüfung und Dehnungen während der Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne weitere Tränkungs- und Trocknungszyklen (ab schwarz gestrichelter Linie) für Normalbetone mit unterschiedlichen w/b-Werten (CEM I und CEM II) und unterschiedlichem Bindemittelleimvolumen (CEM I).

Bei den SCC-Betonen mit erhöhtem Leimvolumen ergibt sich am Ende der Zusatzlagerung ebenfalls keine Änderung in der Abfolge der Dehnungen in Bezug auf die verschie-

denen Bindemitteltypen. Die sich am Ende der Normzyklen abzeichnenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Betonmischungen sind am Ende der Zusatzlagerung aufgrund der generell grösseren Dehnungen jedoch wesentlich deutlicher zu erkennen. Während die SCC-Betone mit tieferem w/b-Wert erwartungsgemäss zu geringeren Dehnungen führen, entsprechen auch die Dehnungen der verschiedenen Bindemitteltypen in weiten Teilen den Erwartungen (grösste Dehnung für CEM I, kleinste Dehnungen für CEM III/B).

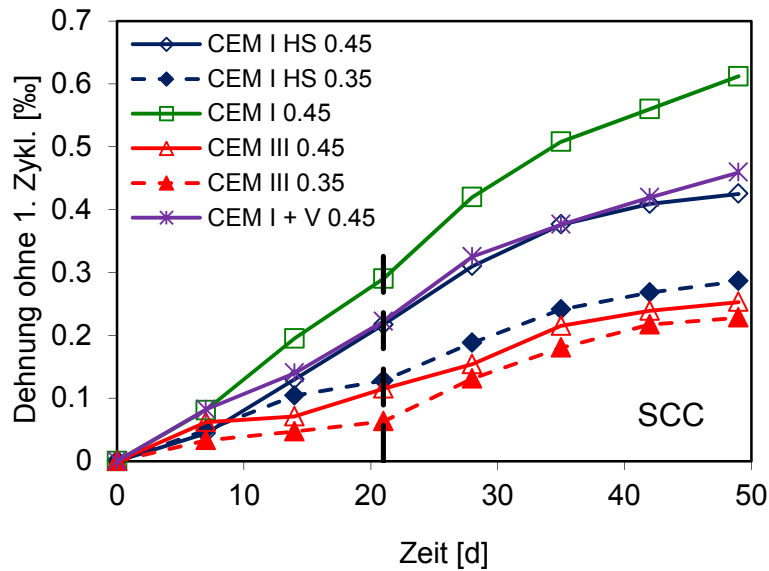


Abb. 4.45 Dehnungen vom 2. bis zum 4. Zyklus während der Normprüfung und Dehnungen während der Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne weitere Tränkungs- und Trocknungszyklen (ab schwarz gestrichelter Linie) für SCC mit unterschiedlichen Bindemitteln und w/b-Werten.

5 Diskussion

Für die im vorliegenden Projekt untersuchten Normalbetone hat sich gezeigt, dass die nach Norm SIA 262/1 ausgewertete Sulfatdehnung mit zunehmendem w/b-Wert entweder konstant bleibt oder tendenziell sogar abnimmt (Abb. 4.16). Der Grund liegt im sogenannten „Extrapolationsfaktor“ der Gleichung (4), welcher den Einfluss des w/b-Wertes reduziert. Bei zunehmendem w/b-Wert und konstantem Leimvolumen nimmt der Zementgehalt gemäss Rezeptur ab (Abb. 3.10) und die Sulfatlösungsaufnahme während der Prüfung infolge der grösseren Kapillarporosität zu (Abb. 4.17, rechts und Abb. 5.46). Beides reduziert den Extrapolationsfaktor im Vergleich zu Betonen mit tieferem w/b-Wert, wodurch der Einfluss des reinen Reaktionspotentials des Bindemittels gegenüber der Kinetik des Stofftransportes und der chemischen Reaktionen erhöht wird.

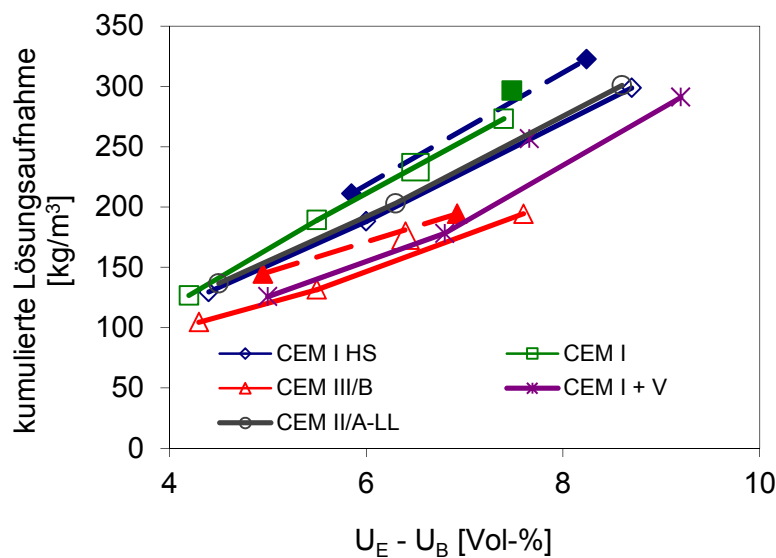


Abb. 5.46 Kumulierte Lösungsaufnahme während der Normprüfung in Abhängigkeit des während der Wasserleitfähigkeitsprüfung bestimmten Wertes $U_E - U_B$, welcher näherungsweise dem Kapillarporengehalt entspricht. Dargestellt sind sämtliche innerhalb des Projektes geprüften Betone. Leere Symbole und ausgezogene Linie: Normalbetone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen, ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone.

Wie aus Abb. 5.47 ersichtlich ist, bestehen zwar erhebliche Unterschiede in den gemessenen Dehnungen vom 2. bis zum 4. Zyklus. Allerdings folgen praktisch alle Messwerte einer einheitlichen Kurve (schwarz gestrichelte Linie in Abb. 5.47), welche zu identischen Produkten „Dehnung x Extrapolationsfaktor“ führt und somit zu identischen Sulfatwiderständen.

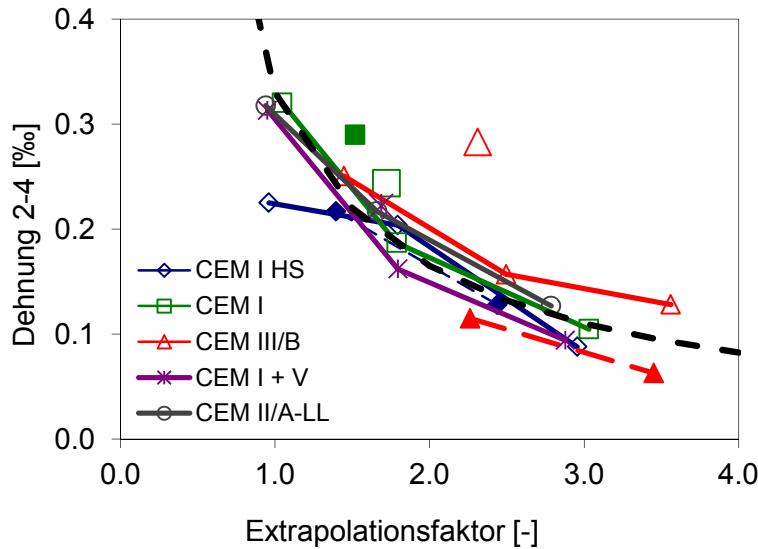


Abb. 5.47 Dehnung vom 2. bis zum 4. Zyklus in Abhängigkeit des Extrapolationsfaktors gemäss Gleichung (4) für verschiedene w/b -Werte und verschiedene Bindemittel. Leere Symbole und ausgezogene Linie: Normalbetone, grosse Symbole: Normalbetone mit erhöhtem Bindemittelleimvolumen, ausgefüllte Symbole und gestrichelte Linie: Selbstverdichtende Betone. Schwarze, gestrichelte Linie: konstantes Produkt „Dehnung x Extrapolationsfaktor“.

Bei tiefen w/b -Werten kann der Extrapolationsfaktor Werte von 3.5 erreichen (Abb. 5.47). Dies gilt insbesondere für den CEM III/B, welcher eine geringe Sulfatlösungsaufnahme zeigt und häufig für sulfatbeständigen Beton eingesetzt wird. Bei einem Extrapolationsfaktor von 3.5 führt eine gemessene Dehnung vom 2. – 4. Zyklus von 0.14 ‰ bereits zu einem Überschreiten des Grenzwertes von 0.5 ‰. Dehnungen im Bereich von 0.14 ‰ werden jedoch in den meisten Fällen auch an Proben gemessen, welche nur in reinem Wasser gelagert werden (Abb. 4.20).

Zusätzlich werden durch den hohen Extrapolationsfaktor bei tiefen w/b -Werten auch die Streuungen in den gemessenen Dehnungen verstärkt. Werden die Variationskoeffizienten (Standardabweichung geteilt durch Mittelwert) der jeweils sechs einzelnen Bohrkerne pro Serie sowohl für die Dehnung vom 2. bis zum 4. Zyklus als auch für die totale Sulfatlösungsaufnahme einander gegenübergestellt (Abb. 5.48), ist zu erkennen, dass die Dehnungen eine deutlich grössere Streuung aufweisen als die Sulfatlösungsaufnahmen. Dies ist insbesondere bei tiefen w/b -Werten der Fall, wo das Verhältnis Variationskoeffizient Dehnung zu Variationskoeffizient Lösungsaufnahme 3.9 beträgt. Es ist zu erwarten, dass auch bei den Mittelwerten einer Serie der Wiederholvariationskoeffizient für die Dehnung deutlich grösser sein dürfte als bei der totalen Sulfatlösungsaufnahme. Bei identischen Sulfatdehnungen ist somit bei tiefem w/b -Wert eine deutlich höhere mess- und materialbedingte Streuung zu erwarten als bei hohen w/b -Werten. Dies dürfte insbesondere auch einen negativen Einfluss auf den Wiederholvariationskoeffizienten beim Vergleich verschiedener Laboratorien haben.

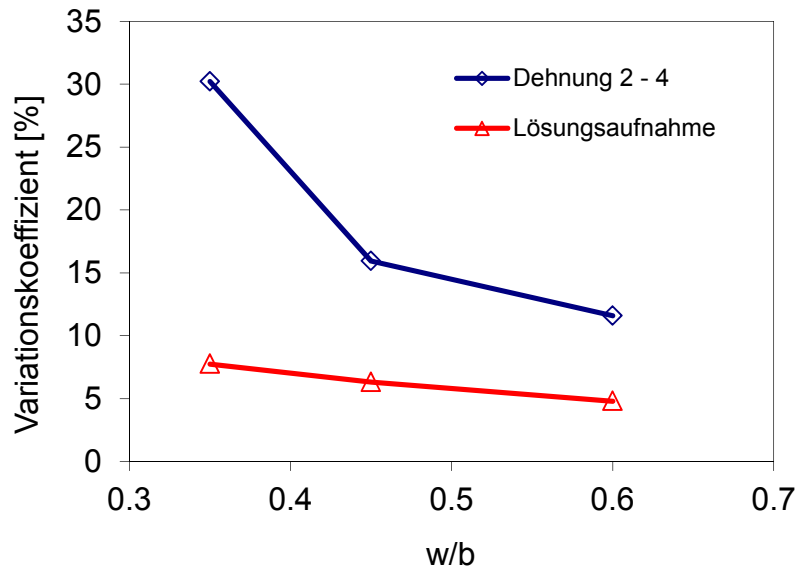


Abb. 5.48 Variationskoeffizient (Standardabweichung / Mittelwert) der jeweils 6 einzelnen Bohrkern pro Serie in Funktion des w/b-Wertes. Mittelwert pro w/b aus allen Bindemitteltypen.

Wie im ersten Abschnitt dieses Kapitels beschrieben wurde, wird durch den Extrapolationsfaktor der Einfluss des w/b-Wertes reduziert. Diverse Untersuchungen [z.B. Monteiro, 2003 / Lee, 2005] haben jedoch gezeigt, dass der Einfluss des w/b-Wertes auf den Sulfatwiderstand mindestens gleich gross ist wie das Reaktionspotential des Bindemittels aufgrund seiner chemischen Zusammensetzung. In [Leemann, 2011] wird zudem am konkreten Beispiel eines 40-jährigen Tunnel-Entlüftungsschachtes gezeigt, dass trotz Verwendung eines sulfatbeständigen Zementes im Tunnelschacht hauptsächlich dort massivste Sulfatschäden auftraten, wo die Porosität aufgrund mangelnder Betonqualität lokal grösser und somit die Zugänglichkeit für sulfathaltiges Wasser gegeben war, während in Bereichen mit sauberer Verarbeitung des Betons keine Schäden sichtbar waren. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Porosität des Betons (auch bei fachgerechter Ausführung der Betonierarbeiten) einen Einfluss auf die Sulfatbeständigkeit des Betons haben muss. Aus diesem Grund muss davon ausgegangen werden, dass die Sulfatwiderstandsprüfung für Normalbeton die Realität nicht den Erwartungen entsprechend abbildet. Dies wird verstärkt durch die Tatsache, dass auch die verschiedenen Bindemittel bei konstantem w/b-Wert in Abb. 4.16 kaum zu unterscheiden sind und insbesondere nicht so, wie man dies aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung erwarten würde.

Bei erhöhtem Bindemittelleimvolumen (SCC) nimmt der Sulfatwiderstand in Abb. 4.16 im Vergleich zum Normalbeton mit geringem Leimvolumen bei den Betonen mit CEM I und CEM I + V geringfügig ab, während er bei den Betonen mit CEM III/B und CEM I HS sogar zunimmt. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass das Leimvolumen nicht nur einen Einfluss auf das vorhandene Reaktionspotential des Bindemittels mit der Sulfatlösung hat, sondern auch auf die mechanischen Eigenschaften des Betons [z.B. Leemann, 2005]. Da innerhalb des Prüfkörpers keine homogene Sulfatverteilung vorhanden ist (vgl. Kap. 4.4), werden die Dehnungen durch Eigenspannungen behindert, wobei der Behinderungsgrad von den mechanischen Eigenschaften des Betons abhängig ist. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften wirkt sich bei Betonen mit geringem Reaktionspotential (CEM III/B und CEM I HS) offensichtlich zumindest zu Beginn der Trocknungs- und Tränkungszyklen stärker aus als das erhöhte Reaktionspotential infolge erhöhtem Bindemittelleimvolumen. Dadurch ergibt sich beim SCC eine aufgrund der chemischen Zusammensetzung zu erwartende Abstufung der verschiedenen Bindemittel, während dies beim Normalbeton nicht der Fall ist.

Offensichtlich führt somit ein erhöhtes Bindemittelleimvolumen in der Normprüfung zu ei-

ner besseren Separation der Bindemitteltypen betreffend Sulfatwiderstand. Da bei der Entwicklung der Schnellprüfung eine grössere Anzahl Spritzbetone mit sehr hohem Bindemittelleimvolumen verwendet wurde, war es damals auch möglich, Unterschiede bei diesen Betonen durch die Schnellprüfung abzubilden. Bei Normalbeton mit geringem Bindemittelleimvolumen ist die Normprüfung jedoch nicht in der Lage, Unterschiede im w/b-Wert und im Bindemitteltyp verlässlich abzubilden, respektive die Tendenzen widersprechen den Erfahrungen aus Langzeitversuchen.

Werden nur die gemessenen Dehnungen vom 2. bis zum 4. Zyklus betrachtet (Abb. 4.17), so sind zumindest die Unterschiede im w/b-Wert gut zu erkennen. Bei der Auswertung werden diese Unterschiede jedoch durch den Extrapolationsfaktor wieder kompensiert. Es wäre somit in einer ersten Näherung sinnvoller, nur die gemessenen Dehnungen vom 2. bis zum 4. Zyklus für die Beurteilung des Sulfatwiderstandes zu verwenden. Wird jedoch die gemessene Dehnung während allen Zyklen in Funktion der Lösungsaufnahme für ausgewählte Mischungen dargestellt (Abb. 5.49) ergibt sich zwar ein unterschiedliches Verhalten von in Wasser gelagerten Proben und von in Sulfatlösung gelagerten Proben (insbesondere beim CEM I). Hingegen ist der Zusammenhang zwischen Dehnung und Lösungsaufnahme der sulfatgelagerten Proben praktisch unabhängig von Bindemittelart und w/b-Wert. Dadurch bleibt die Beurteilung der reinen Dehnung in der vorliegenden Form der Prüfung nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten behaftet.

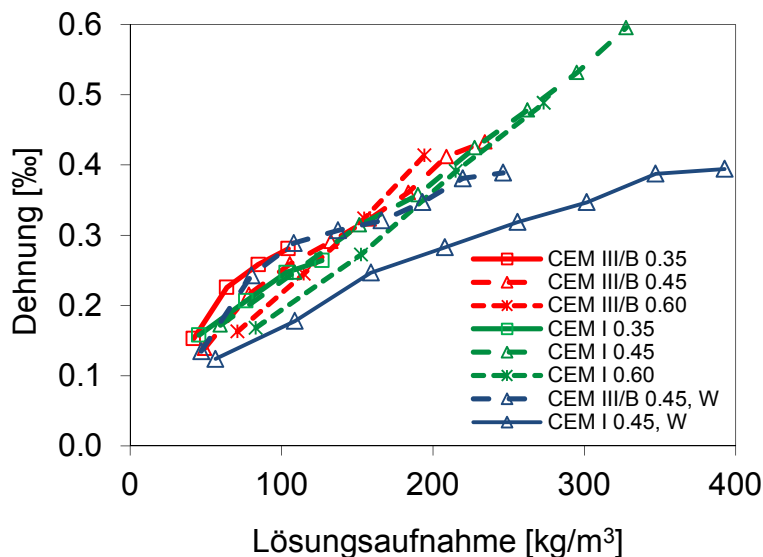


Abb. 5.49 Kumulierte Dehnung in Abhängigkeit der Lösungsaufnahme. Normalbetone mit CEM I resp. CEM III/B und unterschiedlichen w/b-Werten. Blaue Kurven: Lagerung in Wasser anstelle von Sulfatlösung.

Zudem sind die in Sulfatlösung gemessenen Dehnungen im Vergleich zu denjenigen in reinem Wasser insgesamt nur geringfügig grösser (Kap. 4.2.4). Entsprechend konnte auch im dynamischen E-Modul, mit Ausnahme von einer einzigen Mischung, für keine der geprüften Betonrezepturen ein Abfall mit zunehmender Anzahl Tränkungs- und Tränkungszyklen festgestellt werden (Abb. 4.33). Die geringen Dehnungen nach vier Tränkungs- und Tränkungszyklen sind darauf zurückzuführen, dass die Tränkungs- und Tränkungszyklen selbst beim hohen w/b = 0.60 nicht zu einem homogenen Sulfateintrag in den Prüfkörper führen. Bei noch tieferen w/b-Werten beschränkt sich der Sulfateintrag sogar nur auf die äussersten 3 bis 5 mm. Aufgrund der generell hohen Dichtigkeit der Betone mit CEM III/B als Bindemittel (Abb. 4.13) ist der Sulfateintrag bei diesen Mischungen sogar noch kleiner. Somit beschränkt sich die Sulfatinteraktion auf einen äusseren Ring

des Probekörpers. Der geringe Sulfateintrag hängt vor allem mit dem Austrocknungsgrad der Prüfkörper zusammen, welcher nach der zweitägigen Trocknung in Abhängigkeit des w/b-Wertes während jedem Zyklus nur einen beschränkten Anteil der Ausgleichsfeuchte erreicht (Abb. 4.38). Entsprechend ändert sich an der Eindringtiefe des Sulfates auch kaum etwas, wenn die Anzahl Zyklen erhöht wird. Einzig im bereits mit Sulfat angereicherten Aussenring wird die Konzentration noch stärker erhöht (Abb. 4.37). Der Sulfateintrag während der Tränkungs- und Trocknungszyklen sollte somit so optimiert werden, dass innerhalb des Prüfkörpers ein kleinerer Gradient im Sulfatprofil entsteht und das Sulfat generell tiefer in den Prüfkörper eindringen kann.

Zudem scheint die zur Verfügung stehende Reaktionszeit des Bindemittels mit dem eingetragenen Sulfat innerhalb der vier Tränkungs- und Trocknungszyklen zu kurz zu sein, um unterschiedliche Dehnungen für die verschiedenen Bindemitteltypen zu erhalten. Wie oben beschrieben wurde, verändern zusätzliche Tränkungs- und Trocknungszyklen das Schwefelprofil nicht wesentlich. Aus diesem Grund kann die Reaktionszeit vereinfacht mit einer Zusatzlagerung in Sulfatlösung ohne Tränkungs- und Trocknungszyklen, welche unmittelbar an die vier Normzyklen anschliesst, erhöht werden. Bei den stichprobenartig durchgeführten Zusatzlagerungen nehmen die Dehnungen während der Zusatzlagerung noch verhältnismässig stark zu (Abb. 4.44 und Abb. 4.45), obwohl sich die Gesamtkonzentration an Schwefel kaum ändert (Abb. 4.36). Durch diese zusätzliche Dehnung während der Zusatzlagerung werden die einzelnen Bindemittel teilweise besser unterscheidbar. Dies gilt insbesondere für den Beton mit dem nicht sulfatbeständigen Portlandzement CEM I.

Aus den Untersuchungen zu den gebildeten Mineralphasen (Kap. 4.5.2) kann gefolgert werden, dass während der Prüfung tatsächlich wie beabsichtigt Ettringit entsteht. Ein Kristallisationsdruck durch die Bildung von Gips kann somit ausgeschlossen werden. Da bei Sulfatschäden in der Praxis nie eine Gipsbildung als hauptsächlicher Schadensmechanismus festgestellt werden konnte [Romer, 2003 / Leemann, 2011] und zudem der Thaumasilbildung immer eine Ettringitbildung vorangeht [Schmidt, 2008], scheinen bei der Prüfung tatsächlich diejenigen Reaktionsprodukte zu entstehen, die auch bei in-situ Sulfatschäden beobachtet werden können.

Die grossen Dehnungen der Betonmischung III-45-h mit CEM III/B und hohem Leimvolumen (Abb. 4.30, links), sowie der damit einhergehende starke Abfall des E-Moduls (Abb. 4.33) innerhalb der durchgeführten acht Tränkungs- und Trocknungszyklen, können mit den durchgeführten Untersuchungen nicht erklärt werden. Das Schwefelprofil ist vergleichbar mit den übrigen Mischungen aus CEM III/B (Abb. 4.35). Der SCC mit CEM III/B und gleichem w/b-Wert aber noch höherem Leimvolumen weist sogar eine geringere Dehnung auf als der zugehörige Normalbeton mit gleichem w/b-Wert (Abb. 4.31, links). Somit kann die grosse Dehnung auch nicht mit dem höheren Leimvolumen erklärt werden. Die Sulfatlösungsaufnahme von III-45-h ist zwar grösser als beim entsprechenden Beton mit CEM III/B und tiefem Leimvolumen (Abb. 4.30, rechts), was jedoch beim SCC auch der Fall ist (Abb. 4.31, rechts). Aus diesem Grund dürfte es sich bei diesem Resultat um einen Ausreisser handeln.

6 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Auswertungsformel beim Normalbeton zu Resultaten führt, 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. Beim Prüfverfahren ist zudem der Eintrag des Sulfates in die Prüfkörper zu optimieren, da während den vier Tränkungs- und Trocknungszyklen insbesondere bei tieferen w/b- Werten nur in einer dünnen Aussenschicht eine Anreicherung an Sulfat stattfindet. 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 Wasser gelagerten Prüfkörpern 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 drängt 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 vorliegenden 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. Aus die-

sem Grund ist der Einfluss der Messbolzen auf die Resultate noch abzuklären. Es sind im Prüfbeschriftung allenfalls genauere Angaben über die zu verwendenden Messbolzen notwendig.

- **Trocknungstemperatur:** Eine Erhöhung der Trocknungstemperatur könnte die Stabilität der 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 Bohrkerne. 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 vorliegenden Projektes wurde nur eine einzige Variation der Lösungskonzentration geprüft (Gemisch aus Natriumsulfat und Hydrogencarbonat), welches zu keinen signifikanten Unterschieden geführt hat. Der Einfluss weiterer Lösungszusammensetzungen, insbesondere der Einfluss von Magnesiumsulfat, sollte jedoch in Zukunft noch abgeklärt werden. Betone aus Hochofenzement oder Zement mit Mikrosilika können in Natriumsulfatlösung einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen, während sie in Magnesiumsulfat nicht beständig sind [Al-Amoudi, 1995]. Sulfathaltiges Grundwasser weist zwar typischerweise mehr Natriumsulfat auf, aber Magnesiumsulfat ist normalerweise ebenfalls enthalten.
- **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.

Aktuell ist seitens Normenkommission SIA 262 die Überarbeitung der Norm SIA 262/1 in Angriff genommen worden. Es besteht somit die Möglichkeit, Änderungen des Prüfbeschriftung für die Sulfatwiderstandsprüfung in die überarbeitete Norm einfließen zu lassen. In einem Folgeprojekt sollten deshalb so schnell wie möglich die vorgeschlagenen Änderungen systematisch untersucht werden, um daraus eine neue Prüfspezifikation ableiten zu können. Weiter sollten mittels Vergleichsversuchen mit verschiedenen Laboratorien die Wiederholbarkeit sowie die Vergleichbarkeit der Prüfung abgeklärt und ein Vorschlag für einen Grenzwert ausgearbeitet werden.

Anhänge

	I Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	59
I.1	Allgemeine Betonkennwerte	59
I.2	Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen	60
I.3	Messwerte dynamischer E-Modul	63

I Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

I.1 Allgemeine Betonkennwerte

Abb. I.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse (RD: Rohdichte, LP: Luftporengehalt, AM: Ausbreitmass, f_c : Druckfestigkeit, f_{ct} : Biegezugfestigkeit, D_o : Sauerstoffdiffusionskoeffizient, MIP: totale Porosität aus MIP, q_w : Wasserleitfähigkeit).

Bez.	Frischbetonwerte			f_c	f_{ct}	D_o	MIP	q_w
	RD	LP	AM	28 d	28 d	28 d	28 d	28 d
[-]	[kg/m ³]	[vol.-%]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[x10 ⁻⁸ m ² /s]	[%]	[g/m ² h]
I-HS-35	2'466	1.8	38	77.5	8.3	0.52	39.2	3.8
I-HS-45	2'443	1.6	51	56.6	5.6	1.77	46.3	6.4
I-HS-60	2'435	1.1	57	37.5	4.3	3.69	53.5	13.3
I-35	2'480	1.4	35	69.3	8.5	0.54	41.0	3.6
I-45	2'452	1.4	47	51.3	6.0	1.04	51.9	5.8
I-60	2'429	1.1	57	35.1	4.8	3.03	76.4	8.3
III-35	2'441	2.1	53	75.8	9.3	0.25	41.9	2.4
III-45	2'444	1.5	50	53.2	7.2	0.38	56.7	3.5
III-60	2'419	1.0	43	32.2	4.5	0.85	72.9	6.7
I-V-35	2'435	1.8	38	67.8	8.2	0.46	38.8	2.8
I-V-45	2'410	2.0	48	46.4	5.5	1.23	64.2	5.8
I-V-60	2'452	0.7	60	27.6	4.4	3.95	67.9	13.7
II-35	2'478	1.5	48	67.1	8.9	0.50	34.5	4.7
II-45	2'460	1.5	49	48.2	6.1	1.32	44.9	6.7
II-60	2'444	1.2	58	33.3	4.9	3.09	61.9	12.3
I-45-h	2'419	0.9	58	45.9	5.6	1.51	68.9	7.0
III-45-h	2'405	1.5	45	45.5	6.0	0.48	70.7	4.6
I-HS-35-S	2'363	3.5	60	75.7	8.6	5.9	-	4.4
I-HS-45-S	2'344	2.5	67	57.2	6.6	8.2	-	5.7
I-45-S	2'353	2.7	58	54.2	6.9	7.5	-	5.8
III-35-S	2'350	3.0	67	76.0	9.0	5.0	-	2.3
III-45-S	2'350	2.0	60	56.1	7.6	6.9	-	4.3
I-V-45-S	2'338	1.8	69	46.9	6.6	7.7	-	6.1

I.2 Messwerte Sulfatwiderstandsprüfungen

Abb. I.2 Kumulierte Dehnung, gemessen während der Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm und deren Variationen. SCC: „Zyklen“ 5 bis 8 nur Zusatzlagerung in Sulfatlösung (ohne Trocknungs- und Tränkungszyklen).

Mischung	Variation	kumulierte Dehnung [‰]							
		ΔI_1	ΔI_2	ΔI_3	ΔI_4	ΔI_5	ΔI_6	ΔI_7	ΔI_8
I-HS-35	Norm, Würfel 15 cm	0.103	0.139	0.161	0.191	-	-	-	-
I-HS-35	Norm, Würfel 20 cm	0.091	0.158	0.197	0.233	-	-	-	-
I-HS-45	Norm, Würfel 15 cm	0.043	0.125	0.170	0.234	0.274	0.290	0.315	0.326
I-HS-45	Norm, Würfel 20 cm	0.091	0.180	0.239	0.283	0.311	0.355	0.377	0.378
I-HS-45	Wasserlagerung	0.036	0.120	0.188	0.236	0.262	0.301	0.352	0.359
I-HS-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.049	0.129	0.189	0.258	-	-	-	-
I-HS-45	Lsg. Na ₂ SO ₄ + NaHCO ₃	0.080	0.164	0.228	0.296	-	-	-	-
I-HS-45	Temp. Lösung 10°C	0.000	0.080	0.164	0.261	-	-	-	-
I-HS-45	Prüfalter 90d	0.142	0.187	0.233	0.294	-	-	-	-
I-HS-60	Norm, Würfel 15 cm	0.196	0.303	0.355	0.421	-	-	-	-
I-HS-60	Norm, Würfel 20 cm	0.115	0.188	0.237	0.306	-	-	-	-
I-35	Norm	0.158	0.207	0.247	0.264	-	-	-	-
I-45	Norm	0.172	0.247	0.315	0.358	0.425	0.478	0.532	0.595
I-45	Wasserlagerung	0.124	0.178	0.247	0.283	0.319	0.347	0.388	0.394
I-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.139	0.210	0.255	0.287	-	-	-	-
I-45	Temp. Lösung 10°C	0.036	0.130	0.194	0.226	-	-	-	-
I-60	Norm	0.168	0.273	0.391	0.488	-	-	-	-
III-35	Norm	0.153	0.226	0.258	0.281	-	-	-	-
III-45	Norm	0.139	0.216	0.259	0.291	0.323	0.361	0.412	0.433
III-45	Wasserlagerung	0.135	0.243	0.289	0.307	0.321	0.347	0.381	0.389
III-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.121	0.207	0.229	0.264	-	-	-	-
III-45	Temp. Lösung 10°C	0.042	0.091	0.135	0.176	-	-	-	-
III-45	Prüfalter 90d	0.101	0.126	0.143	0.200	-	-	-	-
III-60	Norm	0.163	0.245	0.324	0.414	-	-	-	-
I-V-35	Norm	0.142	0.197	0.216	0.236	-	-	-	-
I-V-45	Norm	0.144	0.211	0.263	0.310	0.342	0.368	0.402	0.454
I-V-45	Wasserlagerung	0.095	0.145	0.203	0.239	-	-	-	-
I-V-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.121	0.188	0.236	0.278	-	-	-	-
I-V-45	Temp. Lösung 10°C	0.070	0.123	0.157	0.200	-	-	-	-
I-V-60	Norm	0.207	0.306	0.410	0.520	-	-	-	-
II-35	Norm	0.072	0.127	0.168	0.199	-	-	-	-
II-45	Norm	0.065	0.143	0.196	0.274	-	-	-	-
II-45	Wasserlagerung	0.052	0.095	0.137	0.170	-	-	-	-
II-60	Norm	0.091	0.199	0.308	0.408	-	-	-	-
I-45-h	Norm	0.185	0.262	0.352	0.425	-	-	-	-
I-45-h	Wasserlagerung	0.142	0.182	0.225	0.247	-	-	-	-
III-45-h	Norm	0.210	0.312	0.395	0.496	0.676	0.885	1.267	1.620
III-45-h	Wasserlagerung	0.130	0.238	0.301	0.330	-	-	-	-
I-HS-35-S	Norm + Zusatzlagerung	0.461	0.510	0.565	0.589	0.649	0.702	0.729	0.747
I-HS-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.237	0.281	0.367	0.454	0.547	0.613	0.646	0.662
I-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.248	0.329	0.443	0.538	0.668	0.756	0.808	0.860
III-35-S	Norm + Zusatzlagerung	0.176	0.209	0.223	0.239	0.307	0.356	0.393	0.404
III-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.200	0.262	0.271	0.315	0.354	0.415	0.439	0.453
I-V-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.300	0.382	0.440	0.522	0.625	0.676	0.719	0.759

Abb. I.3 Lösungsaufnahme pro Zyklus, gemessen während der Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm und deren Variationen. SCC: „Zyklen“ 5 bis 8 nur Zusatzlagerung in Sulfatlösung (ohne Trocknungs- und Tränkungszyklen).

Mischung	Variation	Lösungsaufnahme pro Zyklus [kg/m ³]							
		Δm_{S1}	Δm_{S2}	Δm_{S3}	Δm_{S4}	Δm_{S5}	Δm_{S6}	Δm_{S7}	Δm_{S8}
I-HS-35	Norm, Würfel 15 cm	45.1	32.4	28.2	23.9	-	-	-	-
I-HS-35	Norm, Würfel 20 cm	45.1	34.9	31.0	26.8	-	-	-	-
I-HS-45	Norm, Würfel 15 cm	61.2	48.1	40.6	38.9	35.2	33.4	31.9	30.6
I-HS-45	Norm, Würfel 20 cm	62.6	49.4	44.0	41.8	38.2	36.2	34.5	33.3
I-HS-45	Wasserlagerung	60.6	51.5	47.5	46.3	42.9	40.4	39.3	38.9
I-HS-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	62.3	50.2	46.5	45.3	-	-	-	-
I-HS-45	Lsg. Na ₂ SO ₄ + NaHCO ₃	65.4	46.0	44.6	40.3	-	-	-	-
I-HS-45	Temp. Lösung 10°C	59.6	48.0	44.9	43.3	-	-	-	-
I-HS-45	Prüfalter 90d	58.9	50.9	48.6	45.7	-	-	-	-
I-HS-60	Norm, Würfel 15 cm	89.2	76.0	69.9	63.7	-	-	-	-
I-HS-60	Norm, Würfel 20 cm	84.0	72.2	66.7	60.7	-	-	-	-
I-35	Norm	45.4	31.3	26.6	23.6	-	-	-	-
I-45	Norm	59.6	49.1	42.8	38.7	37.3	34.9	32.7	32.6
I-45	Wasserlagerung	56.4	52.5	50.2	48.8	48.0	45.8	45.5	45.6
I-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	57.1	48.9	41.5	37.4	-	-	-	-
I-45	Temp. Lösung 10°C	58.3	50.0	43.3	39.9	-	-	-	-
I-60	Norm	83.1	69.6	62.6	58.1	-	-	-	-
III-35	Norm	41.9	21.9	20.8	19.9	-	-	-	-
III-45	Norm	49.2	29.4	27.0	27.0	25.5	25.7	25.1	25.4
III-45	Wasserlagerung	47.0	33.2	28.0	29.1	28.8	27.0	26.6	26.7
III-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	51.1	31.5	28.2	28.1	-	-	-	-
III-45	Temp. Lösung 10°C	50.1	32.8	29.6	28.7	-	-	-	-
III-45	Prüfalter 90d	32.9	29.0	27.2	26.9	-	-	-	-
III-60	Norm	70.9	43.7	40.0	39.8	-	-	-	-
I-V-35	Norm	51.4	30.0	23.4	20.9	-	-	-	-
I-V-45	Norm	67.1	45.0	35.2	30.3	29.0	28.2	27.6	28.1
I-V-45	Wasserlagerung	65.0	55.5	48.6	43.9	-	-	-	-
I-V-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	67.3	48.5	38.7	33.4	-	-	-	-
I-V-45	Temp. Lösung 10°C	68.9	52.3	42.4	36.4	-	-	-	-
I-V-60	Norm	100.6	76.2	60.6	53.7	-	-	-	-
II-35	Norm	45.4	34.3	29.4	27.6	-	-	-	-
II-45	Norm	62.1	52.2	46.1	42.5	-	-	-	-
II-45	Wasserlagerung	59.4	57.4	54.4	51.6	-	-	-	-
II-60	Norm	87.9	77.8	68.6	66.5	-	-	-	-
I-45-h	Norm	73.5	60.4	53.9	48.7	-	-	-	-
I-45-h	Wasserlagerung	70.8	66.3	64.1	62.2	-	-	-	-
III-45-h	Norm	61.3	38.7	37.2	35.0	38.4	41.8	43.6	29.8
III-45-h	Wasserlagerung	58.1	44.0	40.5	39.4	-	-	-	-
I-HS-35-S	Norm + Zusatzlagerung	75.2	53.2	45.4	37.5	1.2	1.0	0.8	0.4
I-HS-45-S	Norm + Zusatzlagerung	103.6	82.7	72.1	64.3	0.6	0.4	0.6	0.5
I-45-S	Norm + Zusatzlagerung	95.0	74.0	67.8	59.8	0.6	0.7	0.5	0.5
III-35-S	Norm + Zusatzlagerung	59.1	30.7	27.1	28.0	2.0	1.2	1.1	-1.0
III-45-S	Norm + Zusatzlagerung	78.7	40.9	37.1	37.8	1.5	1.2	1.2	-0.8
I-V-45-S	Norm + Zusatzlagerung	102.4	63.4	48.2	42.7	2.3	1.4	0.8	-1.0

Abb. I.4 Dehnungszunahme vom 2. bis zum 4. Zyklus ($\Delta I_4 - \Delta I_1$) resp. vom 2. bis zum 8. Zyklus ($\Delta I_8 - \Delta I_1$), kumulierte Lösungsaufnahme vom 1. bis zum 4. Zyklus ($\sum \Delta m_{S4}$) resp. vom 1. bis zum 8. Zyklus ($\sum \Delta m_{S8}$) sowie nach Norm ausgewertete Sulfatdehnung ΔI gemessen während der Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm und deren Variationen. SCC: „Zyklen“ 5 bis 8 nur Zusatzlagerung in Sulfatlösung (ohne Trocknungs- und Tränkungszyklen).

Mischung	Variation	Dehnungszunahme		Lösungsaufnahme		Sulfatd.
		$\Delta I_4 - \Delta I_1$ [‰]	$\Delta I_8 - \Delta I_1$ [‰]	$\sum \Delta m_{S4}$ [kg/m ³]	$\sum \Delta m_{S8}$ [kg/m ³]	ΔI [‰]
I-HS-35	Norm, Würfel 15 cm	0.088	-	130	-	0.261
I-HS-35	Norm, Würfel 20 cm	0.142	-	138	-	0.406
I-HS-45	Norm, Würfel 15 cm	0.204	0.297	188	317	0.367
I-HS-45	Norm, Würfel 20 cm	0.192	0.288	198	340	0.331
I-HS-45	Wasserlagerung	0.200	0.323	206	367	0.333
I-HS-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.201	-	206	-	0.330
I-HS-45	Lsg. Na ₂ SO ₄ + NaHCO ₃	0.221	-	195	-	0.388
I-HS-45	Temp. Lösung 10°C	0.258	-	196	-	0.448
I-HS-45	Prüfalter 90d	0.149	-	204	-	0.249
I-HS-60	Norm, Würfel 15 cm	0.225	-	299	-	0.217
I-HS-60	Norm, Würfel 20 cm	0.190	-	284	-	0.193
I-35	Norm	0.105	-	127	-	0.319
I-45	Norm	0.187	0.440	189	323	0.337
I-45	Wasserlagerung	0.159	0.270	208	393	0.260
I-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.153	-	182	-	0.285
I-45	Temp. Lösung 10°C	0.189	-	192	-	0.336
I-60	Norm	0.320	-	273	-	0.336
III-35	Norm	0.128	-	104	-	0.460
III-45	Norm	0.157	0.318	132	227	0.399
III-45	Wasserlagerung	0.172	0.254	137	247	0.419
III-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.145	-	136	-	0.353
III-45	Temp. Lösung 10°C	0.134	-	141	-	0.313
III-45	Prüfalter 90d	0.099	-	116	-	0.284
III-60	Norm	0.251	-	194	-	0.365
I-V-35	Norm	0.094	-	126	-	0.272
I-V-45	Norm	0.162	0.301	178	293	0.289
I-V-45	Wasserlagerung	0.144	-	213	-	0.215
I-V-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	0.152	-	189	-	0.256
I-V-45	Temp. Lösung 10°C	0.130	-	200	-	0.208
I-V-60	Norm	0.313	-	291	-	0.298
II-35	Norm	0.127	-	137	-	0.354
II-45	Norm	0.217	-	203	-	0.362
II-45	Wasserlagerung	0.118	-	223	-	0.180
II-60	Norm	0.318	-	301	-	0.299
I-45-h	Norm	0.244	-	233	-	0.427
I-45-h	Wasserlagerung	0.106	-	263	-	0.164
III-45-h	Norm	0.283	1.431	176	319	0.644
III-45-h	Wasserlagerung	0.200	-	182	-	0.439
I-HS-35-S	Norm + Zusatzlagerung	0.128	0.286	211	215	0.312
I-HS-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.217	0.425	323	325	0.303
I-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.290	0.612	297	299	0.440
III-35-S	Norm + Zusatzlagerung	0.063	0.228	145	148	0.217
III-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.115	0.253	195	198	0.260
I-V-45-S	Norm + Zusatzlagerung	0.222	0.459	257	260	0.374

I.3 Messwerte dynamischer E-Modul

Abb. I.5 Dynamischer E-Modul pro Zyklus, gemessen an ausgewählten Mischungen während der Sulfatwiderstandsprüfung nach Norm und deren Variationen.

Mischung	Variation	Dynamischer E-Modul pro Zyklus [GPa]									
		E ₀	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	
I-HS-35	Norm, Würfel 15 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-35	Norm, Würfel 20 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-45	Norm, Würfel 15 cm	43.1	43.0	43.6	43.7	43.9	43.4	43.4	42.2	41.9	
I-HS-45	Norm, Würfel 20 cm	39.8	39.8	40.7	40.2	40.7	41.1	40.8	39.2	38.9	
I-HS-45	Wasserlagerung	41.6	41.2	41.3	41.1	41.6	42.1	42.3	41.7	41.4	
I-HS-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	42.2	41.5	42.2	42.8	42.2	-	-	-	-	
I-HS-45	Lsg. Na ₂ SO ₄ + NaHCO ₃	43.1	42.7	43.0	43.2	42.9	-	-	-	-	
I-HS-45	Temp. Lösung 10°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-45	Prüfalter 90d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-60	Norm, Würfel 15 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-60	Norm, Würfel 20 cm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-35	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-45	Norm	41.8	42.3	43.3	43.6	43.5	43.4	42.9	42.8	41.8	
I-45	Wasserlagerung	41.1	40.9	41.2	41.2	41.2	41.3	41.4	41.5	41.6	
I-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	41.5	41.8	42.4	43.4	44.4	-	-	-	-	
I-45	Temp. Lösung 10°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-60	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-35	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-45	Norm	40.6	42.4	43.1	43.4	43.4	43.8	43.5	43.5	42.6	
III-45	Wasserlagerung	41.3	41.7	42.0	42.7	41.7	41.6	41.4	41.1	40.9	
III-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	40.8	42.1	42.4	43.0	42.8	-	-	-	-	
III-45	Temp. Lösung 10°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-45	Prüfalter 90d	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-60	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-V-35	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-V-45	Norm	38.2	40.1	41.6	42.7	42.3	42.3	43.2	43.1	42.6	
I-V-45	Wasserlagerung	38.4	38.2	39.0	39.5	39.8	-	-	-	-	
I-V-45	Lsg. 2.5% Na ₂ SO ₄	39.3	40.2	41.5	42.2	43.2	-	-	-	-	
I-V-45	Temp. Lösung 10°C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-V-60	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II-35	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
II-45	Norm	41.2	41.4	42.2	42.2	43.2	-	-	-	-	
II-45	Wasserlagerung	40.8	39.9	40.0	40.3	40.4	-	-	-	-	
II-60	Norm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-45-h	Norm	38.8	38.7	39.6	39.7	39.7	-	-	-	-	
I-45-h	Wasserlagerung	38.2	37.4	37.4	37.5	37.4	-	-	-	-	
III-45-h	Norm	35.0	38.1	38.6	38.1	35.9	33.2	29.9	24.5	22.2	
III-45-h	Wasserlagerung	35.7	37.1	37.4	36.9	36.3	-	-	-	-	
I-HS-35-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-HS-45-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-45-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-35-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
III-45-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
I-V-45-S	Norm + Zusatzlagerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Begriffe

Begriff	Bedeutung
AFm-Phasen	Überbegriff für Monosulfat / Monokarbonat / Hemikarbonat
Calciumcarbonat	CaCO_3
Calcium-Silikat-Hydrat	CSH
Ettringit	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$
Gips	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Hydrogenkarbonat	HCO_3^-
Magnesiumsulfat	MgSO_4
Mirabilit	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Monokarbonat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Monosulfat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Natriumsulfat	Na_2SO_4
Portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
Thaumasit	$\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$
Thenardit	Na_2SO_4
Tricalciumsilikat	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ => C_3S (Zementnotation)
Bicalciumsilikat	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ => C_2S (Zementnotation)
Calciumaluminat	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ => C_3A (Zementnotation)
Ferrit	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ => C_4AF (Zementnotation)

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
ATG	AlpTransit Gotthard AG
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
NEAT	Neue Eisenbahn-Aplentransversale
SCC	Selbstverdichtender Beton
w/b-Wert	Massenmässiges Verhältnis von Wasser zu Bindemittel
XRD	Röntgendiffraktion
D _O	Sauerstoffdiffusionskoeffizient
Δl	Sulfatdehnung, ausgewertet nach Formel (4)
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
V	Kieselsäurereiche Flugasche nach Norm EN 450 als Zusatzstoff für die Betonherstellung

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.
[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> .
[Diamond, 2000]	Diamond, S., (2000): An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. <i>Cement and Concrete Research</i> , 30, 1517-1525.
[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.
[Lee, 2005]	Lee, S.T., Moon, H.Y., Swamy, R.N. (2005): Sulfate attack and role of silica fume in resisting strength loss. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 27, 65-76.
[Leemann, 2005]	Leemann, A., Hoffmann, C. (2005): Properties of self-compacting and conventional concrete - differences and similarities. <i>Magazine of Concrete Research</i> , 57(6), 315-319.
[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.
[Lipus, 2004]	Lipus, K., und Punktke, S. (2004): Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone. <i>Betontechnische Berichte 2001-2003</i> , Verein Deutscher Zementwerke e.V., 169-179, ISBN 3-7640-0461-4.
[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.
[Lothenbach, 2010]	Lothenbach, B, Bary, B, Le Bescop, P, Schmidt, T, Leterrier, N. (2010): Sulfate ingress in Portland cements. <i>Cement and Concrete Research</i> , 40(8), 1211-1225.
[Monteiro, 2003]	Monteiro, P.J.M., Kurtis, K.E. (2003): Time to failure for concrete exposed to severe sulfate

[2003]	attack. Cement and Concrete Research, 33, 987-993.
[Neubauer, 2002]	Neubauer, J. Götz-Neunhoeffler, F. (2002): Efficiency of high sensitive heat flow calorimetry in examination of OPC hydration. Proc 24th Int. Conf. Cement Microscopy, San Diego, California.
[Nobst, 2003]	Nobst, P., Stark, J. (2003): Investigations on the influence of cement type on thaumasite formation. Cement Concrete Composites, 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.
[Pffner, 2001]	Pffner, M., und Holzer L. (2001): Schädigungsmechanismen der Zementsteinkorrosion: Auslaugung und Sulfatangriff. In <i>Bergwasserproblematik in Tunnelbauwerken</i> , Symposium durchgeführt 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). Chimia, Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft, 52, 197-201.
[Romer, 2003]	Romer, M., Holzer, L., und Pffner, M. (2003): Swiss tunnel structures: concrete damage by formation of thaumasite. Cement & Concrete Composites, 25, 1111-1117.
[Scherer, 2004]	Scherer, G.W. (2004): Stress from crystallisation of salt. Cement and Concrete Research, 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
[Schmidt, 2008]	Schmidt, T., Lothenbach, B., Romer, M., Scrivener, K., Rentsch, D., Figi, R. (2008): A thermodynamic and experimental study of the conditions of thaumasite formation. Cement and Concrete Research, 38 (3), 337-349.
[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): Cement Chemistry. London: Thomas Telford.
[Taylor, 1997b]	Taylor, H.F.W., Gollop, R.S. (1997): Some chemical and microstructural aspects of concrete durability. In <i>Mechansisms 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
[Washburn, 1921]	Washburn, EW., (1921): Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 7, 115-116.
[Wittekind, 1960]	Wittekindt, W. (1960): Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung. Zement-Kalk-Gips, 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

ARAMIS SBT

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 11.08.2011

Grunddaten

Projekt-Nr.: FGU 2007/002

Projekttitel: Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis

Enddatum: 11.08.2011

Texte:

Zusammenfassung der
Projektresultate:

Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, das grundlegende Verständnis der ablaufenden Mechanismen während der Sulfatwiderstandsprüfung an Beton nach SIA 262/1, Anhang D, zu verstehen. Dazu wurden innerhalb einer systematischen Matrix verschiedener Betonmischungen sowohl Sulfatwiderstandsprüfungen nach den Normvorgaben als auch verschiedene Variationen davon durchgeführt. Zusätzlich wurden das Eindringen der Sulfatfront in die Prüfkörper verfolgt sowie die gebildeten Mineralphasen analysiert.

Die Untersuchungen haben 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. Eine Verwendung der gemessenen Dehnung ohne Auswertungsformel führt zu Resultaten, die wesentlich besser mit Erfahrungen aus Langzeitversuchen in Einklang stehen. Dennoch ist beim Prüfverfahren der Eintrag des Sulfates in die Prüfkörper zu optimieren, da während den vier Tränkungs- und Trocknungszyklen meist nur in einer dünnen Aussenschicht Sulfat eingetragen wird.

Weiter hat sich gezeigt, dass beim Normalbeton die zur Verfügung stehende Reaktionszeit zu kurz ist, um eine Dehnung zu erzeugen, die sich wesentlich von einer Dehnung in reinem Wasser unterscheidet. Für eine Verbesserung der Aussagekraft ist somit während der Prüfung die Reaktionszeit, respektive die Lagerungszeit in der Sulfatlösung zu erhöhen.

Zielerreichung:

Das Ziel, die ablaufenden Mechanismen während der Prüfung sowie den Einfluss der Materialien und deren Zusammensetzung zu erkennen, wurde erreicht. Zudem konnten Vorschläge für eine Anpassung des Prüfablaufes eingebracht werden, welche die Aussagekraft des Verfahrens in Zukunft verbessern sollten. Diese Anpassungen sind jedoch noch zu verifizieren, wozu ein Folgeprojekt notwendig ist.

Folgerungen und
Empfehlungen:

Die Prüfung muss überarbeitet werden. Dazu sind in einem Folgeprojekt mittels systematischen Untersuchungen neue Prüfspezifikationen festzulegen, welche in die aktuelle Überarbeitung der Norm SIA 262/1 einfließen sollen.

Publikationen:

Schlussbericht



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Beurteilung der Begleitkommission:

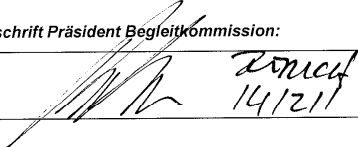
Diese Beurteilung der Begleitkommission ersetzt die bisherige separate fachliche Auswertung.

Beurteilung:	Die Begleitkommission ist einverstanden mit der Forschungsstelle betreffend Schlussfolgerungen, Zielerreichung, Folgerungen und Empfehlungen des Projektes. Die Kommentare und Anregungen der Mitglieder der BK wurden in der Endfassung des Berichtes berücksichtigt.
Umsetzung:	Noch nicht, weil zusätzliche Untersuchungen erforderlich sind (s. unten)
weitergehender Forschungsbedarf:	Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Prüfspezifikationen der SIA 262/1 revidiert werden müssen. Ansätze einer neuen Spezifikation liegen vor, müssen aber im Rahmen weiterführender Untersuchungen näher definiert und überprüft werden.
Einfluss auf Normenwerk:	Ja (SIA 262/1), aber erst nach den o.g. weiterführenden Untersuchungen.

Präsident Begleitkommission:

Name:	Anagnostou	Vorname:	Georgios
Amt, Firma, Institut:	ETH Zürich, Professur für Untertagebau, Institut für Geotechnik		
Strasse, Nr.:			
PLZ:	8093	Email:	georg.anagnostou@igt.baug.ethz.ch
Ort:	Zürich	Telefon:	044 633 31 80
Kanton, Land:	ZH	Fax:	044 633 10 97

Unterschrift Präsident Begleitkommission:

 2011 14/2/11
--

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginernen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht <i>Influence of In-Vehicle Information Systems on Driver Behaviour and Road Safety</i> <i>Report part of traffic psychology</i> <i>Influence des systèmes d'information embarqués sur le comportement de conduite et la sécurité routière</i> <i>Rapport partiel de la psychologie de circulation</i>	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers <i>Entwurf und Gestaltung von Unter- und Überführungen für Fussgänger und leichte Zweiräder</i> <i>Conception and disposition of lower and upper crossings for pedestrians and cyclists</i>	2008
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt <i>Développement des mélanges bitumineux optimaux et sélection des liants appropriés;</i> <i>D-A-CH - projet initial</i> <i>Development of Optimal Bituminous Mixtures and Selection of Appropriate Binders;</i> <i>D-A-CH - Initiation Project</i>	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung <i>Profit et coûts, bilans écologiques des systèmes d'évacuation de l'eau de ruissellement des routes</i> <i>Cost and Benefits, ecological balances of different concepts of management and treatment of road run-off</i>	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten <i>Banque de données pour taux de génération de trafic</i> <i>Database for trip generation rates</i>	2008
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen <i>Modélisation d'objets et de processus pour le système d'information routier</i> <i>Modeling of objects and processes for the road information system</i>	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen <i>Impact of traffic calming measures on noise immissions</i> <i>Impacts des mesures de modération du trafic sur les immissions sonores</i>	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen <i>Functional requirements for traffic collection systems relating to traffic lights</i> <i>Exigences fonctionelles en matière de systèmes de détection du trafic en rapport avec les installations de feux de circulation</i>	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen <i>Profil géométrique type pour tous les types de véhicules</i> <i>Standard profile of cross sections for all vehicle types</i>	2010
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts <i>Validierung des CRS-Oedometers mittels intakter Proben</i> <i>Validation of Constant Rate of Strain oedometer on intact samples</i>	2010
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit <i>Coûts horaires du trafic des personnes:</i> <i>Dépendance de la perception et de la distance</i> <i>Willingness to pay in passenger transportation:</i> <i>Perception and distance dependence</i>	2008
1286	VSS 2000/338	Verkehrssqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung <i>Niveau de service et capacité pour les routes à deux voies sans séparation des sens de circulation</i> <i>Level of Service and capacity for undivided two-lane streets</i>	2010
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure: ponts à culées intégrales <i>Tragwerk-Baugrund Interaktion:</i> <i>Brücken mit Integralen Widerlagern</i> <i>Soil-Structure interaction:</i> <i>bridges with integral abutments</i>	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz <i>La circulation du point de vue des enfants:</i> <i>Les trajets scolaires des élèves du primaire en Suisse</i> <i>Traffic and children: Primary school children's routes to school in Switzerland</i>	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement <i>Coordination entre information de trafic individuelle et gestion de trafic</i> <i>Coordination between individual traffic information and traffic management</i>	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen <i>Essais de gonflement de longue durée sur roches anhydrites</i> <i>Long-term swelling tests on anhydritic rock</i>	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet <i>Entretien des infrastructures routières dans les zones bâties: caractéristiques et conséquences</i> <i>Special features and consequences of road facility maintenance in built-over areas</i>	2009
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme <i>Control of effectiveness of road restraint systems</i> <i>Contrôle de l'efficacité des dispositifs de retenue de véhicules</i>	2011
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel <i>Détection d'incidents dans les tunnels routiers</i> <i>Incident Detection in Road Tunnels</i>	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen <i>Prévision de gel et de brouillard pour les routes</i> <i>Prediction of frost and fog for roads</i>	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten <i>Principes pour la quantification des effets des déficits de la sécurité</i> <i>Basis for the quantification of the effects of safety deficits</i>	2011
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen <i>Alternatives aux passages pour piétons dans les zones 30</i> <i>Alternatives to zebra crossings in 30km/h zones</i>	2010
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln; Systemevaluation <i>Energy extraction from urban tunnels, evaluation of systems</i> <i>Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains; évaluation de systèmes</i>	2010
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau <i>Analyse inverse pour la construction routière</i> <i>Inverse analysis in Road Geotechnics</i>	2011