

# ENDBERICHT

<b>FFG Projektnummer</b>	[839199	<b>eCall Antragsnummer</b>	3411991
<b>Kurztitel</b>	EDKSG	<b>FörderungsnehmerIn</b>	ÖBV GmbH
<b>Bericht Nr.</b>		<b>Berichtszeitraum</b>	1.10.2012-31.8.2014
<b>Bericht erstellt von</b>	Ao.Univ.Prof. Dr.Josef Tritthart, DI Michael Pauser		

**Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten**

## 1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht?
- Ja  
Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch?
- Ja  
Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG.
- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

>Text<

## 2. Arbeitspakete und Meilensteine

### 2.1 Übersichtstabellen

**Erläuterung:**

Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut.

Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan

Aktuelle Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

Die zu erbringenden Leistungen waren für den Zeitraum 09/12 bis 06/13 angeboten. Da sich herausgestellt hat, dass bis zum geplanten Ende des Vorhabens keine sichtbaren Schäden an den bei Raumtemperatur im Labor in Sulfatlösungen ausgelagerten Proben entstanden sind, wurde um Verlängerung der Laufzeit angesucht. Dem Ansuchen wurde stattgegeben und der Fertigstellungstermin mit 31. 8. 2014 festgesetzt.

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Untersuchung der Proben nach Auslagerung im Labor und dem Abwasser-Kanalsystem von Linz	100%	1. 10. 2012	Juni 2013	1. 10. 2012	August 2014	Gewünscht Ergebnisse weitgehend erreicht. Bei Ettringit leider auch nach 4,5 Jahren Lagerung trotz hohen Sulfatgehaltes der Proben keine makroskopisch feststellbaren Schäden vorhanden. Daher nur bedingt Aussagen hinsichtlich des kritischen Sulfatgehaltes möglich.

**Tabelle 2: Meilensteine**

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basis-termin	Aktuelle Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	s. angebotene Leistungen				

Nachstehende Leistungen waren angeboten (Arbeitspaket):

- **TVFA TU Graz**

1. Bestimmung von Masse und Abmessung der neu hergestellten Probewürfel nach 3,5 Jahren Auslagerung in den Lösungen.
2. Spalten der zu prüfenden 4 cm-Würfel und Zerkleinern je einer Hälfte auf Analysenfeinheit sowie Bestimmung des Gehaltes an Sulfat und säurelöslicher SiO<sub>2</sub>. Aus dem SiO<sub>2</sub>-Gehalt wird der Zementgehalt bestimmt und dann der Sulfatgehalt, bezogen auf den Zementgehalt jeder Probe berechnet. Angabe ob bzw. wie stark der Sulfatgehalt der Proben den zulässigen Sulfatgehalt von Zement übersteigt (insgesamt 58 Würfelproben nach 2,5 Jahren Lagerung im Kanalsystem bzw. im Labor).

Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit der Mörtelprismen sowie nachfolgendes Auspressen der Porenlösung. Analyse der Porenlösung auf OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> und Ca<sup>+2</sup>.

- **Institut für angewandte Geowissenschaften TU Graz**

Bestimmung des Sulfatprofils an den von der TVFA überstellten Proben mittels Mikrosonde zur Untersuchung einer allfälligen Zunahme der

1. Sulfataufnahme.
2. Morphologische Untersuchung mit Hilfe der Polarisations- und Rasterelektronenmikroskopie zur Feststellung des Fortschritts der Schädigung im Besonderen in Hinblick auf die Bildung von Ettringit
3. Untersuchung mittels der Röntgendiffraktometrie sowie röntgenfluoreszenzspektrometrische Analysen zur Identifikation der vorhandenen Hydratationsprodukte mit besonderer Berücksichtigung der sulfathaltigen Phasen.
4. Bestimmung der Spurenelementgehalte der Porenlösungen mit Hilfe eines ICP-OES/MS Spektrometers.

**2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten**

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.

**Ergebnisse der an der TVFA und dem Institut für angewandte Mineralogie der Technischen Universität Graz erhaltenen Untersuchungen**

**1. Mörtelproben (hergestellt mit Normensand) nach 4,5 Jahren Auslagerung in Sulfatlösungen bei 20°C im Labor (Sulfatangriff durch Ettringitbildung)**

Die Untersuchungen von den Laborproben hinsichtlich des Sulfatgehaltes sind nach 4,5 Jahren Auslagerung zur Gänze fertig gestellt worden. Die erhaltenen Ergebnisse des Sulfatgehaltes sind in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt [in Abbildung 2 sind die Ergebnisse des CEM I zwecks direkter Vergleichbarkeit (unterschiedliche Ordinatenkalierung) auch enthalten]. Wie ersichtlich hat der Sulfatgehalt im Berichtszeitraum (2,5- 4,5 Jahre) überall zugenommen, jedoch am stärksten beim CEM I mit W/Z-Wert 0,70. Bei dieser Probe betrug der auf den Zementgehalt bezogene Sulfatgehalt schon über 10 % SO<sub>3</sub>. Aus dem Umstand, dass der Anstieg des Sulfatgehaltes bei Wechsellagerung zwischen 600 und 6000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l (Mittelwert 3300 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l) vergleichbar war mit dem bei konstant 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l gelagerten Proben, geht eindeutig hervor, dass zur Beurteilung der Expositionsklasse bei schwankenden Konzentrationen der mittlere Sulfatgehalt des angreifenden Wassers relevant ist.

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, ist der Sulfatgehalt beim Fluamix bei Lagerung bei 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l (in Abbildung 2 als Mix bezeichnet) deutlich weniger stark angestiegen (Zunahme 1,68 %) als beim CEM I mit W/Z-0,70 (Zunahme 2,78%). Der puzzolanische Zumahlstoff des Fluamix hat eine so dichte Struktur bewirkt, dass das Sulfat nur sehr langsam eindringen konnte. Bei CEM III weisen die Ergebnisse in dieselbe Richtung, können aber derzeit nicht belegt werden, weil sie keinen Sinn ergeben und kontrolliert werden müssen. Offenbar hat hier die Bestimmung des Zementgehaltes über die lösl. SiO<sub>2</sub> als Leitelement nicht funktioniert. Aus Abbildung 2 ist auch ersichtlich, dass die Ergebnisse bei Lagerung in gesättigter Gipslösung (max. 1400 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l) dieselbe Tendenz zeigen, dass der Sulfatgehalt aber deutlich weniger stark angestiegen ist als bei 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l.

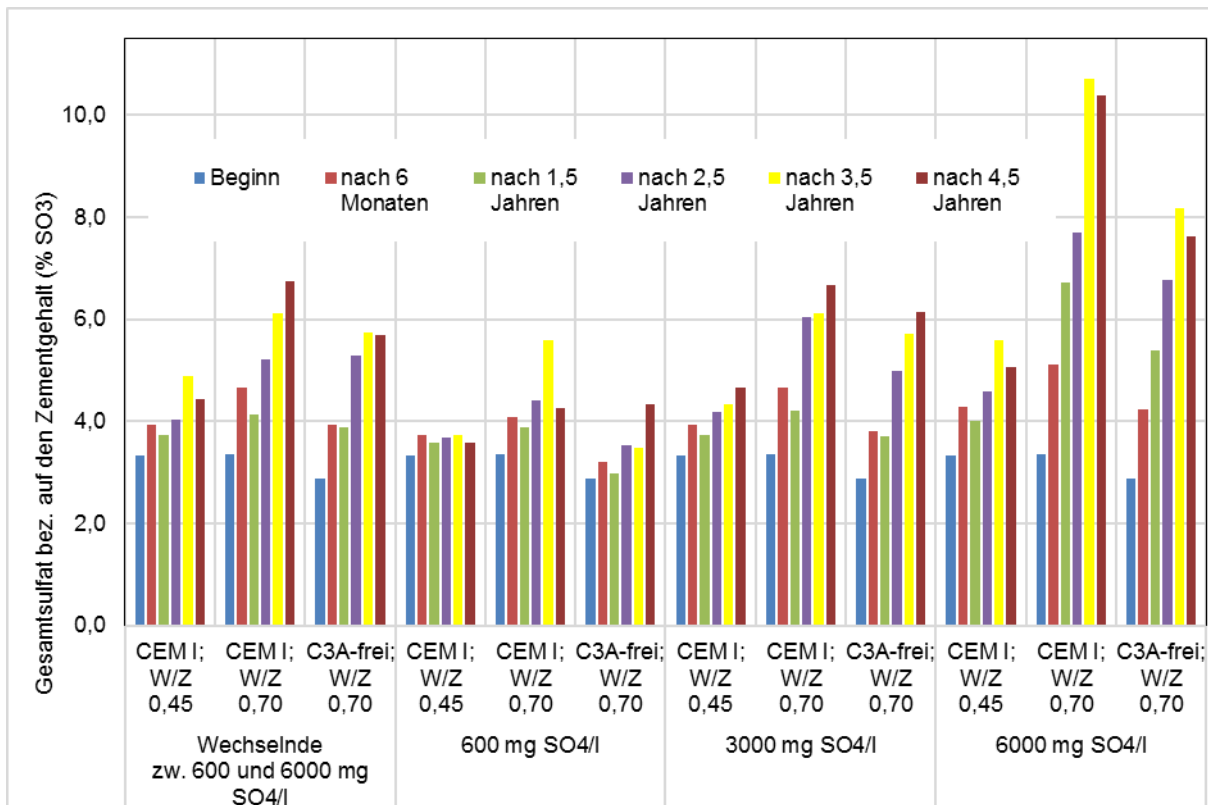


Abbildung 1: Veränderungen des Gesamtsulfatgehaltes der im Labor bei Raumtemperatur gelagerten Proben

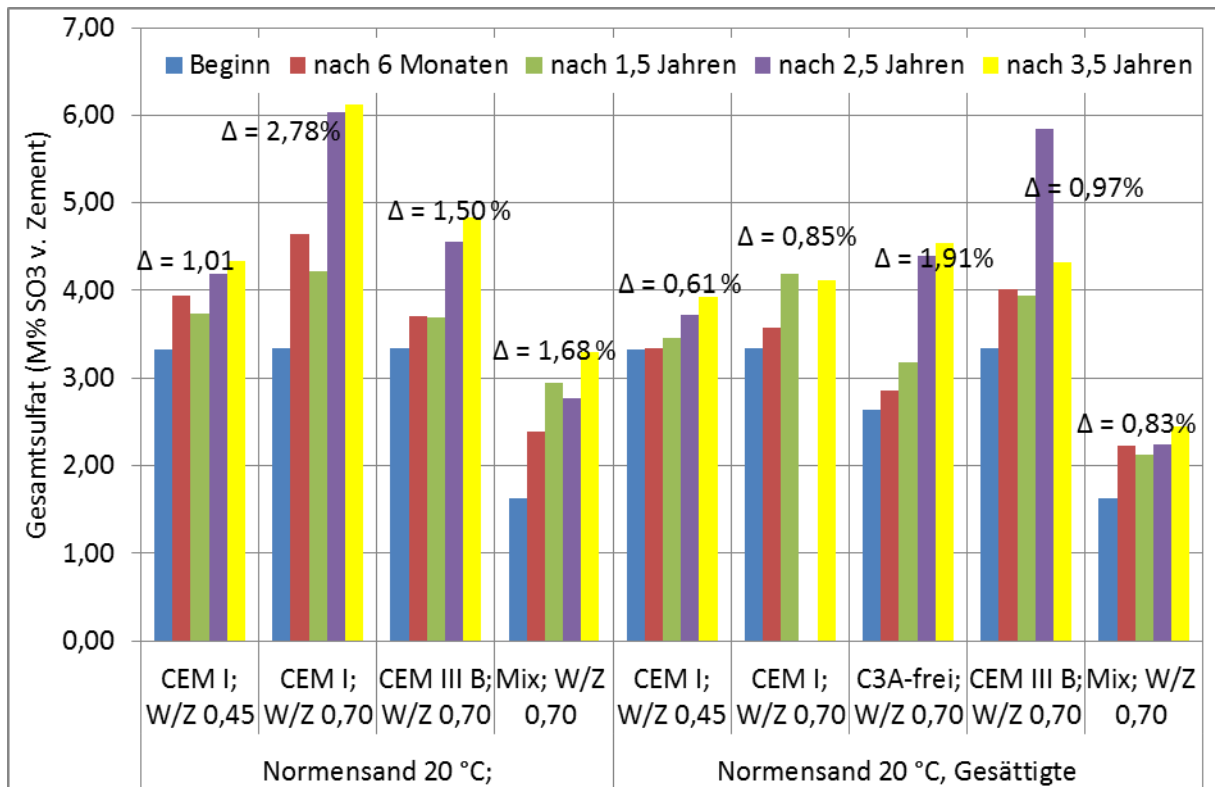


Abbildung 2: Veränderungen des Gesamtsulfatgehaltes der im Labor bei Raumtemperatur gelagerten Proben

Bei den bei Raumtemperatur gelagerten Proben, die Kalksteinmehl anstelle des Normen-Feinsandes enthielten, waren die Ergebnisse vergleichbar, weshalb darauf nicht näher eingegangen wird

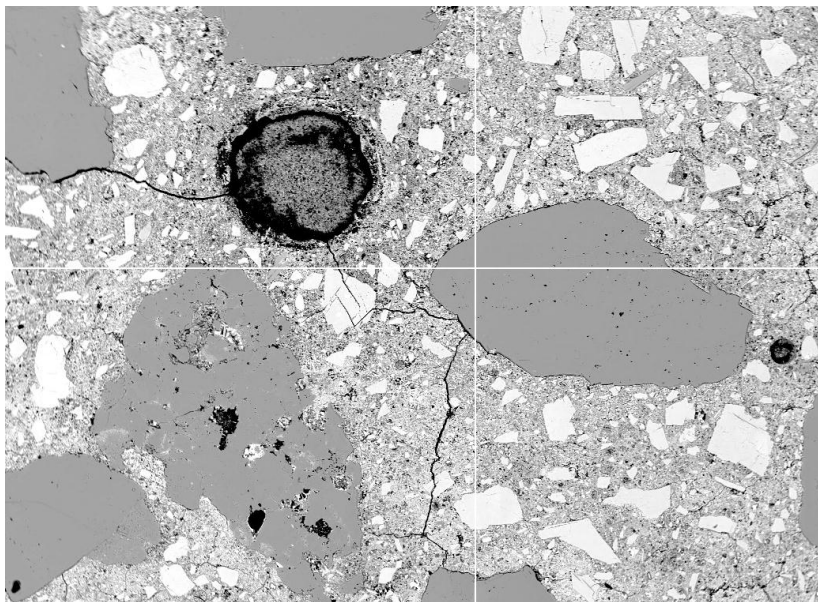


Abbildung 3: Risse innerhalb einer Probe (CEM I; W/Z 0.70; Lagerung: 3000 mg SO<sub>4</sub>-2/l; 20°C)

Leider ist es bei Lagerung in der Sulfatlösung mit 6000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l bei der Probe aus CEM I mit W/Z-Wert 0,70 trotz des eingetretenen Anstieges des Sulfatgehaltes auf über 10% der Zementmasse im gesamten Versuchszeitraum von 4,5 Jahren zu keinen sichtbaren Schäden gekommen. Dieses Ergebnis macht aber deutlich, dass es einen bestimmten Sulfatgehalt, der auf alle Fälle der Praxis übertragbar ist, bei dessen

Überschreitung es zu einem Schaden kommt, nicht geben kann. Ein Dehnprozess kann ja nur dort erfolgen, wo kein Platz vorhanden ist, in den der entstehende Ettringit hinein wachsen kann. Bei W/Z-Wert 0,50 ist die Porosität wesentlich niedriger als bei W/Z-0,70, daher wird auch der kritische Sulfatgehalt bei niedrigeren Werten liegen. Eine direkte Beziehung zwischen Porosität und kritischen Sulfatgehalt kann aber auch nicht hergestellt werden, weil auch die Porengeometrie und-verteilung von Bedeutung ist. Die Gesamtsituation ist dermaßen komplex und schwer überblickbar, dass nur die Aussage gemacht werden kann, dass es keinen einheitlichen Sulfatgehalt von Beton gibt, ab dem mit einer Schadensbildung gerechnet werden muss.

**2. Mörtelproben (hergestellt mit Kalksteinmehl statt Normensand-fein) nach 3,5 Jahren Auslagerung in Sulfatlösungen bei 5°C im Labor (Sulfatangriff durch Thaumasitbildung)**

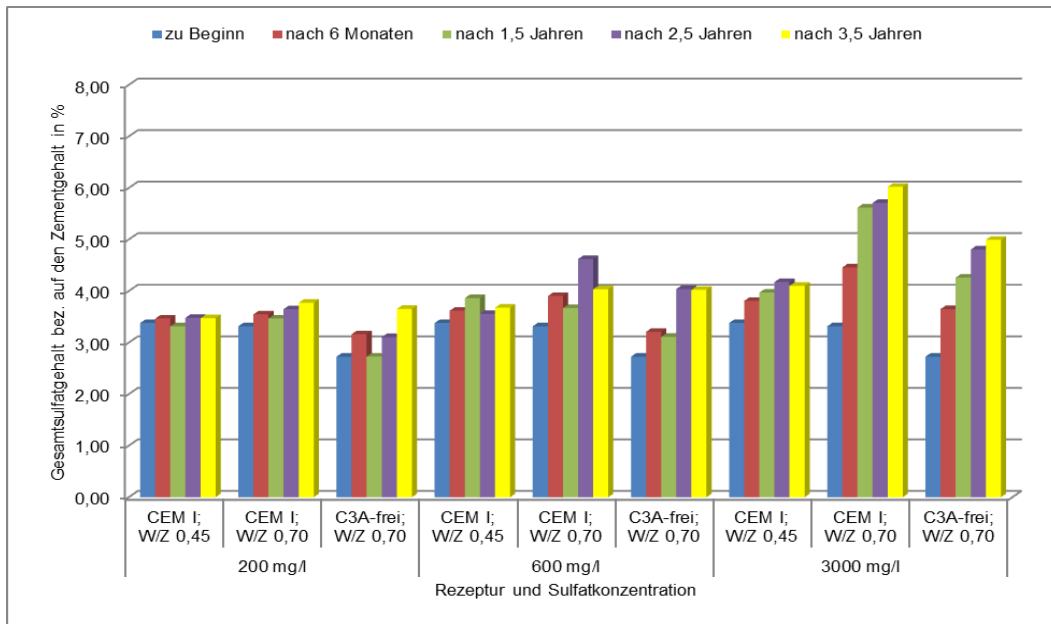


Abbildung 4: Veränderungen des Gesamt-Sulfatgehaltes während der Lagerung bei 5 °C

Da die Proben nach 3,5 Jahren schon so stark geschädigt waren, dass die Prüfung der Druckfestigkeiten bzw. der Porenlösungszusammensetzung nicht mehr möglich war bzw. nicht sinnvoll erschien, wurden an diesen Proben keine Untersuchungen mehr vorgenommen (wie sich im Verlauf des Forschungsprojektes herausgestellt hat, beginnt die Thaumasitschädigung wie ein lösender Angriff an der Probenoberfläche und setzt sich ins -innere fort, sodass die Untersuchung des nicht schadhaften Probenteils keine schadigungsrelevanten Erkenntnisse ergibt). Wohl aber wurden von den Würfelproben die lose anhaftenden Reaktionsprodukte abgebürstet und der verbliebene Probenteil hinsichtlich des Sulfatgehaltes untersucht.

Abbildung 4 zeigt die Veränderungen des Sulfatgehaltes nach 3,5 Jahren Lagerung. Interessant ist, dass die Zunahme des Sulfatgehaltes bei 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l gut mit den bei Raumtemperatur eingetretenen Veränderungen (Abbildung 1) korrelierte. Die Lagerungstemperatur oder die Art des Zuschlags haben somit auf die Geschwindigkeit der Sulfataufnahme (erwartungsgemäß) keinen Einfluss.

Die an den Proben in der Lagerlösung mit 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l und in der gesättigten Gipslösung entstandenen Schäden sind aus Abbildung 5 ersichtlich (bei 200 und 600 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l sind keine Schäden entstanden). Bei den Proben mit Normensand und Kalkstein als Zuschlag (oberste Bilder) wirkt die Probe mit Kalkstein etwas stärker geschädigt. Diese Probe lagerte aber länger, weshalb eine direkte Vergleichbarkeit nicht gegeben ist. Es hat aber nicht den Anschein, dass kalksteinhaltiger Zuschlag eine stärkere Schädigung bewirkt. Interessant ist der Umstand, dass bei Lagerung in gesättigter Gipslösung eine deutlich stärkere Schädigung eintrat als bei 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l obwohl die Sulfatkonzentration in der gesättigten Gipslösung wesentlich geringer ist (max. 1400 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l). Offensichtlich hat die Anwesenheit des für die Thaumasitbildung auch benötigten Calciums im Sulfat-Salz (Gips: CaSO<sub>4</sub>) einen wesentlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Schädigung. Aus der Abbildung geht auch klar hervor, dass die Proben mit Fluamix bzw. CEM III-B als Bindemittel unvergleichlich weniger angegriffen waren, wobei an der Probe mit CEM III-B überhaupt keine Angriff stattgefunden hat. Durch ein geeignetes Bindemittel kann also die Thaumasitschädigung vermieden bzw. stark reduziert werden.



 <p>CEM I: Prismen mit Normensand - W/Z-0,45 (unten) bzw. 0,70 (oben) nach ca. 2 Jahren Lagerung bei 5°C in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung mit 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l</p>	 <p>CEM I: CaCO<sub>3</sub>-Zuschlag; W/Z-0,50 (unten) und 0,70 (oben) nach ca.3,5 Jahren Lagerung bei 5°C in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung mit 3000 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l</p>
 <p>CEM I: Kalkstein-Zuschlag; W/Z-0,50 (unten) und 0,70 (oben) nach ca.3,5 Jahren Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>	 <p>CEM I C<sub>3</sub>A-frei, W/Z-0,70 nach ca.3,5 Jahren (oben) und 4,5 Jahren (unten) Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>
 <p>FluaMix: Kalkstein-Zuschlag; W/Z-0,70 nach ca.3,5 Jahren Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>	 <p>CEM III-B: Kalkstein-Zuschlag; W/Z-0,70 nach ca.3,5 Jahren Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>
 <p>FluaMix: Kalkstein-Zuschlag; W/Z-0,70 nach ca. 4,5 Jahren Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>	 <p>CEM III-B: Kalkstein-Zuschlag; W/Z-0,70 nach ca.4,5 Jahren Lagerung bei 5°C in gesättigter Gipslösung</p>

Abbildung 5: Thaumasischäden an den Prismen

### 3. Im Linzer Kanalsystem ausgelagerte Proben

Abbildung 6 zeigt die festgestellten Änderungen des Sulfatgehaltes der im Kanalsystem von Linz ausgelagerten Proben. Wie ersichtlich, wurden an einigen der Proben nach 1,5 Jahren Lagerung Werte erhalten, die weit abseits des Trends der übrigen Werte liegen, sodass wohl davon ausgegangen werden kann, dass sie zu hoch sind. Die Ursachen dafür sind unklar und müssen noch erkundet werden (Wiederholung der Bestimmungen mit anderem Leitelement zur Zementgehaltsbestimmung). Bei allen Auslagerungsstellen und allen übrigen Terminen lag der Sulfatgehalt unter 4 % SO<sub>3</sub> - bezogen auf den

Zementgehalt.

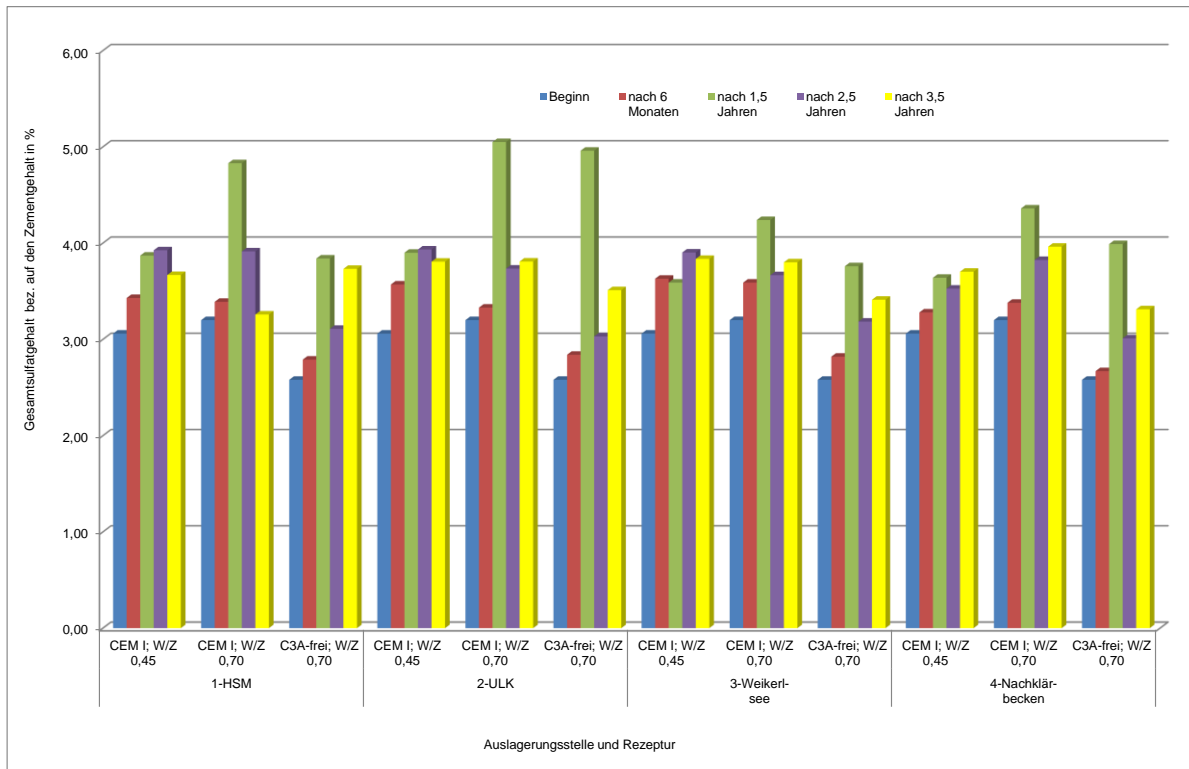


Abbildung 6: Veränderungen des Gesamtsulfatgehaltes

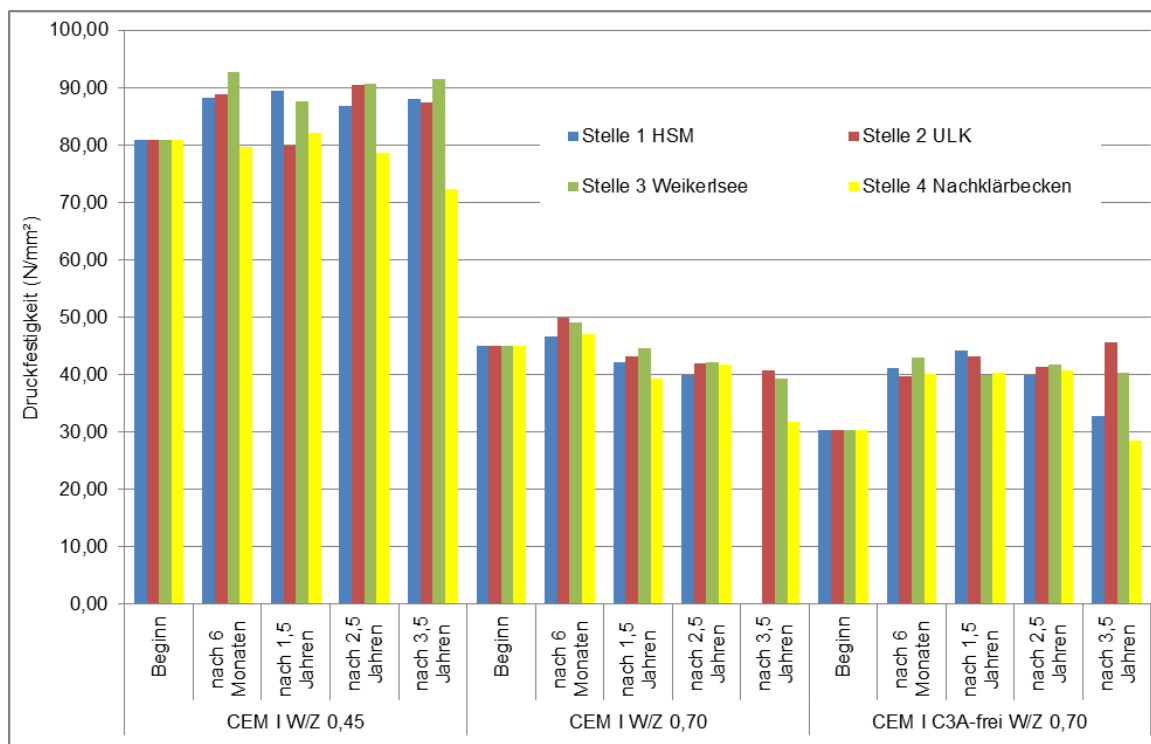


Abbildung 7: Veränderungen der Druckfestigkeiten

In den Abbildungen 7 und 8 sind die Veränderungen der Druck- bzw. Biegezugfestigkeiten dargestellt. Bei den Druckfestigkeiten der im Nachklärbecken gelagerten Proben ist auffällig, dass sie nach 3,5 Jahren unabhängig von der Rezeptur deutlich geringer war als zu Beginn. Beim CEM I mit W/Z-Wert 0,45 war eine solche Abnahme schon nach 2,5 Jahren vorhanden. Bei allen übrigen Auslagerungsstellen waren kein derartiger Abfall vorhanden, jedoch sind die Messwertdifferenzen zu den unterschiedlichen Terminen recht hoch (etwa bei CEM I, W/Z-Wert 0,45 nach 1,5 Jahren). Dies mag daran liegen, dass die Prüfung insofern

nicht normengemäß war, als hier nur eine Probe je Rezeptur und Auslagerungsstelle für die Messung zur Verfügung stand und nicht der Mittelwert von 3 Prismen, wie das zu Beginn vor der Auslagerung gemacht werden konnte. Besonders eigenartig ist dies beim CEM I mit W/Z-0,45 und ist sicher nicht durch die Sulfataufnahme begründet, der bei dieser Probe nach 3,5 Jahren 3,7% SO<sub>3</sub>, bezogen auf den Zementgehalt betrug. Dass die vorhandene Tendenz allerdings nur von Messunsicherheiten herrührt, erscheint auch eher unwahrscheinlich, weil er im Nachklärbecken bei allen Proben vorhanden war. Dies korreliert auch mit den Biegezugfestigkeiten der im Nachklärbecken gelagerten Proben mit W/Z-0,70, nicht aber mit W/Z-0,45. Da eine solche Tendenz bei den anderen Lagerungsstellen nicht vorliegt, können auch die mit der Zeit vor sich gehenden Änderungen der Biegezugfestigkeiten zufolge veränderter Mikrostruktur des Zementsteingefüges dafür nicht der Grund sein. Hier bestehen somit Unklarheiten, deren Ursache nicht bekannt ist. Denkbar wäre, dass sich die Wasserzusammensetzung des Nachklärbeckens von den übrigen Stellen stärker unterscheidet. Das müsste aber Inhaltsstoffe betreffen, die nicht untersucht wurden, denn auch am Beton des Nachklärbeckens waren keinerlei Auffälligkeiten vorhanden [der Sulfatgehalt lag in allen Tiefen unter 4% SO<sub>3</sub> der Zementmasse, bei den Inhaltsstoffen der Porenlösung (OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, etc.) bestand der durch „Auswaschen“ entstandene Gradient mit von außen nach innen abfallenden Werten.

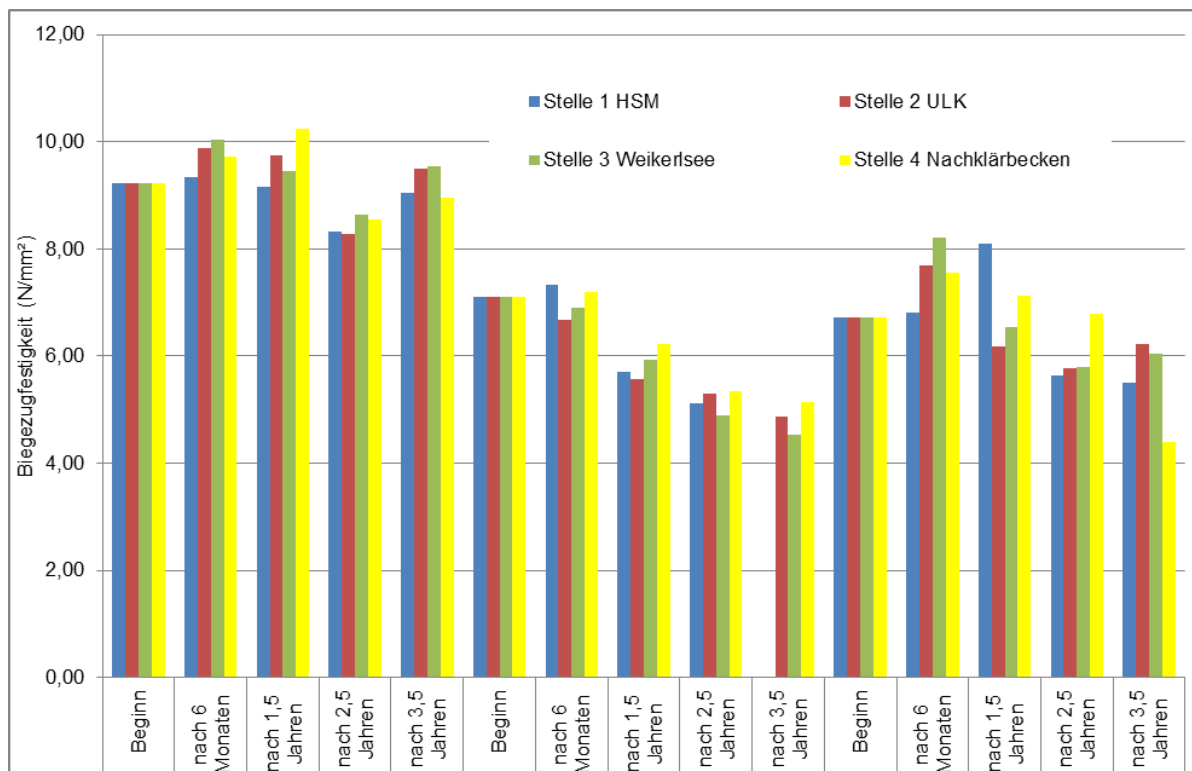


Abbildung 8: Veränderungen der Biegezugfestigkeiten

Die Veränderungen der Konzentration der Inhaltsstoffe der ausgelagerten Proben sind aus Abbildung 9 ersichtlich. Die Konzentration der vom Zement stammenden Inhaltsstoffe (OH<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) war zu Beginn bei W/Z-0,45 viel höher als bei W/Z-0,70 und hat über die Zeit abgenommen, weil diese Stoffe durch Diffusion in die Lagerlösung ausdiffundierten. Beim Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) liegen die Dinge anders, weil Sulfat im Zement gebunden wird, daher auch eingedrungenes Sulfat der Porenlösung größtenteils entzogen wurde und die Sulfatkonzentration daher generell nur sehr gering war. Die Chlorid Konzentration war im Gegensatz zu den übrigen Ionen zu Beginn gering und ist im Verlauf der Lagerung angestiegen. Das bedeutet, dass die Cl<sup>-</sup> Konzentration der Lösung in der die Proben eintauchten, geringer war als die der Porenlösung und daher Chlorid in die Proben hineindiffundierte.

Insgesamt ergibt sich aus den Untersuchungen, dass es als sehr als sehr unwahrscheinlich erscheint, dass es in überschaubarer Zukunft zu einer gefährlichen Anreicherung von Sulfat im Beton kommen wird. Dies zumal die Laborergebnisse zeigten, dass bei wechselnden Sulfat Konzentrationen im angreifenden Wasser die mittlere Konzentration relevant ist (s. Kapitel 1) und dass an den im Labor gelagerten Proben - die mit derselben Rohstoffen und derselben Rezeptur hergestellt wurden - trotz eines Anstieges des Sulfatgehaltes auf ~10% SO<sub>3</sub>, bezogen auf Zementgehalt, lediglich erste Anzeichen beginnender Schädigung durch Ettringitbildung festzustellen waren. Da die Temperatur im Kanalsystem so hoch ist, dass es dort offenbar zu keinem Angriff durch Thaumasil kommt (es müssten an der Betonoberfläche sichtbare Veränderungen wie



bei einem lösenden Angriff vorhanden sein), wird darauf nicht näher eingegangen. Klärungsbedürftig sind allerdings die Ursachen der abfallenden Druckfestigkeiten der im Nachklärbecken ausgelagerten Proben (nicht erfasste aggressive Inhaltsstoffe?, Messunsicherheiten?).

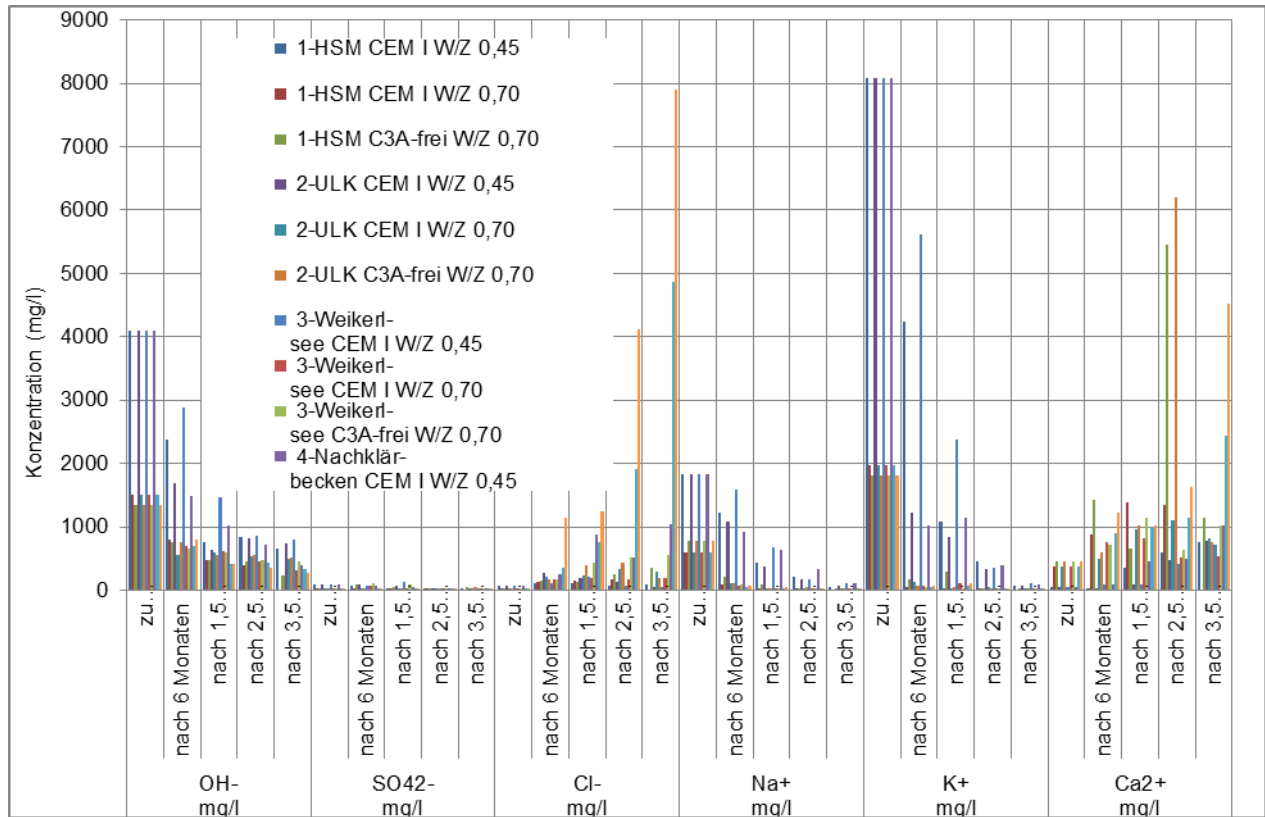


Abbildung 9: Veränderung der Konzentration der Inhaltsstoffe der Porenlösung

Abgesehen von den Untersuchungen an den ausgelagerten Mörtelproben ist auch der Beton des Nachklärbeckens anhand eines entnommenen Bohrkerns mit 20 cm Durchmesser untersucht worden. Von dem Bohrkern wurden im Labor vier je 1 cm dicke Scheiben abgetrennt. Diese wurden chemisch analysiert und der ungefähre Zementgehalt bestimmt. In Tabelle 1 sind die zu Beginn und nach 3,5 Jahren erhaltenen Sulfatgehalte der aus dem Nachklärbecken entnommenen Bohrkern gegenübergestellt.

Tabelle 1: Sulfatgehalt des Betons (Nachklärbecken)

Entnahmetiefe (cm)	SO <sub>3</sub> in % bez. auf Zementgehalt	
	Beginn	nach 3,5 Jahren
0 - 1,0	~3,8	~3,0
1,5 - 2,5	~3,13	~3,8
3,0 - 4,0	~3,2	~2,8
4,5 - 5,5	~3,3	~3,0

Wie aus der Tabelle ersichtlich, wurde nach 3,5 Jahren nur in 1,5-2,5 cm Tiefe ein höherer Sulfatgehalt ermittelt als zu Beginn. Sicherlich spielen dabei Bestimmungsunsicherheiten oder der Umstand eine Rolle, dass die Bohrkern nicht unmittelbar nebeneinander entnommen wurden (zu Beginn fand die Entnahme im Beisein des Sachbearbeiters der TVFA statt, nach 3,5 Jahren nicht, und der Firma, die mit der Entnahme beauftragt war, war die Stelle der Erstentnahme nicht genau bekannt). Die in den beiden äußeren Zonen festgestellten Differenzen beruhen aber sicherlich nicht nur darauf. Dass in 0-1 cm Tiefe nach 3,5 Jahren deutlich weniger Sulfat gefunden wurde als zu Beginn, kann damit erklärt werden, dass die Karbonatisierungstiefe etwas zugenommen und der Sulfatgehalt daher abgenommen hat, weil Ettringit im

karbonatisierten Bereich nicht beständig ist und zersetzt wurde. Das freigesetzte Sulfat ist aber nicht nur aus dem Beton hindurchdiffundiert sondern auch weiter in ihn hinein so dass der Sulfatgehalt in 1,5-2,5 cm Tiefe stärker zugenommen hat. Die in den beiden anderen, aus größeren Tiefen stammenden Abschnitten, festgestellten Unterschiede dürfte auf den leider nicht geringen Bestimmungsunsicherheiten in der Bestimmung des Zementgehaltes des Betons beruhen.

Auch nach 3,5 Jahren war der Sulfatgehalt des Betons aber nicht besonders hoch und ist somit jedenfalls als unauffällig anzusehen. Leider konnte aber keine Information erhalten werden ob der Sulfatgehalt während des Beobachtungszeitraums überhaupt zugenommen hat oder ob die oberflächlich gebildete Karbonatschicht das Eindringen von Sulfat weitgehend unterbunden hat.

### **Ergebnisse der am Institut für Material Technologie der Universität Innsbruck durchgeführten Untersuchungen**

Da es keine in einem Regelwerk verankerte Prüfmethode zum Sulfatangriff gibt, wurden Untersuchungen hinsichtlich der Sulfatverteilung in Beton durchgeführt. Dabei wurden Betone unterschiedlicher Zusammensetzung (W/B-Werte 0,45, 0,50 und 0,55), drei verschiedene Zemente [CEM I, 52,5 R; CEM I 42,4 N C<sub>3</sub>A-frei (HS) und eine Mischung aus 70% Cem I N 42,5 N C<sub>3</sub>A-frei mit 30 % Flumix C (HS + AHWZ)] verwendet. Aus den erhärteten Betonkörpern wurden Bohrkern (Ø 70 mm) entnommen, von ihnen 25 mm dicke Scheiben abgetrennt, danach planparallel geschliffen und danach in einer gesättigten Gipslösung mit Gips-Bodensatz gelagert. Nach 33, 66, 99 und 152 Tagen Lagerung wurden je Rezeptur zwei Scheiben entnommen, nach Trocknung bei 80°C Betonproben abgefräst und die aus 0,4-0,6 mm, 1,0-1,2 mm und 1,4-1,6 mm Tiefe stammenden Probenmehle untersucht. Die für eine so feinfühlig Tiefenabstufung erforderliche Entnahmetechnik wurde erfolgreich entwickelt. Bei den Ergebnissen kam der Einfluss der Zementsorte klar zum Ausdruck, wobei der Sulfatgehalt am stärksten beim CEM I-Beton, gefolgt vom HS-Beton und am wenigsten stark beim HS+AHWZ-Beton angestiegen ist. Beispielsweise hat der Sulfatgehalt in 0,4-0,6 mm Tiefe innerhalb von 152 Tagen im Beton „CEM I/W/Z-0,45“ von 0,5 auf 1,6 % SO<sub>3</sub> zugenommen, beim „HS/0,45“ von 0,42% auf 1,19 % SO<sub>3</sub> und beim „HS+AHWZ/0,45 von 0,44% auf 0,90 % SO<sub>3</sub>. Dies steht in Übereinstimmung mit den in Graz erhaltenen Ergebnissen hinsichtlich des Einflusses der Zementsorte. Hinweise auf Treiberscheinungen wurden auch bei CEM I-Beton nicht festgestellt (der SO<sub>3</sub>-Gehalt ist in % der Probenmasse angegeben; bei Umrechnung mit dem Faktor 10 ergibt sich CEM I/W/Z-0,45 in 0,4-0,6 mm Tiefe ein Sulfatgehalt von ca. 16 % SO<sub>3</sub>, bezogen auf den Zementgehalt). Zusammenfassend ist angemerkt, dass es keine klare Antwort auf die Frage gibt, weshalb es bislang zu keinen Treiberscheinungen gekommen ist, dass es weiterer Untersuchungen zur Klärung der beteiligten Mechanismen bedarf und dass es nach wie vor schwierig ist „eine zuverlässige Aussage über die Beständigkeit von Festbeton gegen einen Sulfatangriff zu tätigen“.

### **Folgerungen für die Praxis**

Die Untersuchungen der in den Tunneln vorhandenen Thaumasischäden haben ergeben, dass das mit dem Beton in Kontakt stehende Gebirgswasser für einen Angriff zu wenig Sulfat enthielt und dass der Schadensbildung eine Aufkonzentrierung der Inhaltsstoffe des Gebirgswassers durch Verdunstung vorausgegangen ist. Da in den aus den geschädigten Betonproben ausgepresste Lösungen aber Sulfatkonzentrationen bis hin zur Sättigungskonzentration von Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> von etwa 30.000 SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l enthielten, die Sättigungskonzentration von Gips aber nur ca. 1400 mg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>/l beträgt, mussten die Calciumionen im angreifenden Wasser durch Reaktionen in unlösliche Verbindungen umgewandelt worden und durch Alkaliionen ersetzt worden sein. Letztere stammen aus dem Zement. Noch nicht ganz klar ist die Rolle, die karbonatischen Zuschläge zukommt. Vornehmlich beim Calcit ist gibt es verschiedene Hinweise, das calzitische Zuschlag an der Schadensbildung nicht beteiligt ist. Bei Dolomit wurde eine Umwandlung des Dolomits in Beton nachgewiesen, der aus einem Tunnel stammte, jedoch fehlen Laboruntersuchungen zur genauen Erfassung der Zusammenhänge. Daher sind in nachstehenden Empfehlungen, in der die aus den Ergebnissen für die Praxis abgeleiteten Empfehlungen für die Betonbestandteile enthalten sind, karbonatische Zuschläge als nach Möglichkeit zu vermeiden angeführt.

Nachstehend sind die aus den bisherigen Ergebnissen abgeleiteten Maßnahmen hinsichtlich a) der Bestandteile von Beton und b) Betontechnologie bzw. Bauausführung zusammengefasst.

### **Empfehlungen für die Beton-Bestandteile**

Schädigung durch Ettringit $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$	Schädigung durch Thaumasit $CaSiO_3 \cdot CaCO_3 \cdot CaSO_4 \cdot 15H_2O$
<b>Bindemittel</b> C <sub>3</sub> A-freier Klinker	
<u>angestrebt:</u> Erschwerung der Sulfatkonzentrierung, Verringerung des Ca(OH) <sub>2</sub> -Anteils im erhärteten Bindemittel durch Zumahl- bzw. Zusatzstoffe verbunden mit erschwerem Eindringen von Sulfat (reduzierter Porendurchmesser der Bindemittelmatrix)	
<u>Zumahlstoffe:</u> puzzolanische bzw. latent hydraulische günstig; welche günstiger sind, kann derzeit nicht gesagt werden (Hüttensand, Flugasche, Mischungen verschiedener, kein Gesteismehl (Typ I))	wie bei Ettringit arm an Alkalien keine karbonatischen Bestandteile!
<b>Gesteinskörnung (GK)</b>	
<u>angestrebt:</u> soll sich gegenüber Sulfat bei jeder Außentemperatur inert verhalten	
alle für Beton geeignete GK's können verwendet werden (ÖN B 3136; ÖN EN 12620)	wie bei Ettringit aber keine karbonatischen GK's; (wenn nicht möglich: geringer karbonatischer Anteil im Feinbereich und so wenig als möglich dolomitische Bestandteile)
<b>Zusatzstoffe</b>	
<u>angestrebt:</u> Zusatzstoffe sollen das Eindringen von Sulfat erschweren; Zusatzstoffe von Typ I sind daher zu vermeiden	
<b>Zusatzmittel</b>	
<u>angestrebt:</u> soll die Eigenschaften des Zementsteines (phys./chem.-Eigenschaften, Porenverteilung, etc.) möglichst nicht verändern (Luftporen zulässig)	
alle für Beton geeignete Zusatzmittel können verwendet werden  (ÖN EN 934 I und II)	wie bei Ettringit; Zusatzmittel dürfen keine Alkalien enthalten;  (ob reaktionsfähige (lösl.) SiO <sub>2</sub> ungünstig ist, kann nicht gesagt werden (erscheint wahrscheinlich))

Betontechnologische und bautechnische Maßnahmen

Hinsichtlich betontechnologischer Maßnahmen sind bei Gefahr von Sulfatschädigung alle Maßnahmen anzustreben, die das Eindringen von Sulfationen erschweren (Verwendung von puzzolanischen bzw. latent hydraulischen Zumahl- bzw. Zusatzstoffen und Herstellung eines dichten Betons (gute Verdichtung, sorgfältige Nachbehandlung, etc.)). Der Beton muss die in der Richtlinie für Innenschalen- bzw. Spritzbeton enthaltenen Anforderungen erfüllen (Abdecken der Expositionsklassen XC4, XF3 und XA1). Zudem sind im Zuge der Bauausführung Maßnahmen vorzusehen, die eine Konzentrierung der Inhaltsstoffe und damit eine Erhöhung der Aggressivität des mit dem Beton in Kontakt stehenden Wassers durch Verdunstung verhindern (Abdichtung von Fugen und Fehlstellen wie Rissen, etc.).

- Konnten die Arbeitsschritte und -pakete gemäß Plan erarbeitet werden?

Gab es wesentliche Abweichungen?

Die angebotenen Leistungen wurden erbracht. Es gab einige kleine Änderungen bei der Versuchsdurchführung. So stellte es sich heraus, dass die Messung der Masse und der Abmessungen der Prüfkörper mit der erforderlichen Genauigkeit nicht möglich war. Damit ging aber kein wichtiger Informationsgehalt verloren, weil sich gezeigt hat, dass sich die Probenmasse durch

Ausdiffusion von Inhaltsstoffen (NaOH, KOH, etc.) einerseits und der Aufnahme von CO<sub>2</sub> aus der Luft andererseits nicht konstant blieb und daher Änderungen der Probenmasse nicht nur auf die Ettringitbildung zurückzuführen waren. Außerdem musste die Proben zum Entfernen der gebildeten Kalkschicht immer wieder abgeätzt werden. Dafür wurde an anderer Stelle, wie den Tunneluntersuchungen, die im Angebot gar nicht enthalten waren, sehr viel Mehrarbeit geleistet.

- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik.  
Keine Änderung

### 3. Projektteam und Kooperationen

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Partner/Dritteleister)? Nein
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.  
Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?  
Es wurde mehr Leistung erbracht aber die bewilligten Kosten nicht verändert. Der Überhang ist als Eigenleistung der ausführenden Stellen zu verstehen.

>Text<

### 4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten.  
Ist eine Verwertung möglich?  
Die Ergebnisse der Praxisuntersuchungen hinsichtlich Thaumasischäden ergaben ein klares Bild hinsichtlich des Mechanismus der entstandenen Schäden. Damit wurde die Grundlage geschaffen um angeben zu können, wie in Zukunft solche Schäden vermieden werden können und welche Reparaturmaßnahmen zielführend sind.
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.

1. Dietzel, M., F. Mittermayr, D. Klammer, D. Höllen, S. Köhler, and A. Leis, *What do Stable Isotopes tell us about Deterioration of Concrete*, in *Cementing a sustainable future 13<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Á. Palomo, A. Zaragoza, and J. C. López Agüí, Editors, 2011, CSIC: Madrid. p. No. 274: 1-6
2. Mittermayr, F., D. Klammer, D. Höllen, M. Dietzel, C. Kurta, A. Leis, and M.E. Böttcher, *Concrete damage in underground structures*, in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, M.G. Alexander, et al., Editors, 2012, Taylor & Francis Group: London,UK. p. 580-584.
3. Mittermayr, F., D. Klammer, D. Höllen, S. Köhler, M. Böttcher, A. Leis, and M. Dietzel, *Deterioration of Concrete: Application of Stable Isotopes*, in *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*, M.A.T.M. Broekmans, Editor 2012, Springer Berlin Heidelberg. p. 435-443.
4. Mittermayr, F., D. Klammer, S. Köhler, A. Leis, D. Höllen, and M. Dietzel, *Dissolution of Dolomite in alkaline cementitious media*, in *Cementing a sustainable future 13<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Á. Palomo, A. Zaragoza, and J. C. López Agüí, Editors, 2011, CSIC: Madrid. p. No. 278: 1-6
5. Tritthart, J., D. Klammer, F. Mittermayr, and A. Brunsteiner, *A Casestudy of Thaumassite Formation in an Austrian Tunnel*, in *Cementing a sustainable future 13<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement*, Á. Palomo, A. Zaragoza, and J. C. López Agüí, Editors, 2011, CSIC: Madrid. p. No. 126: 1-6
6. Dietzel, M., D. Klammer, and F. Mittermayr, *Alteration von historischen und modernen Baustoffen – Mineralogie und stabile Isotope*, in *Bauphysiktagung 2012*, Graz University of Technology: Graz. p. 1-11.
7. Klammer, D., J. Tritthart, F. Mittermayr, and A. Brunsteiner, *Deterioration of concrete caused by the*

- thaumasite form of sulfate attack (TSA) - A case study*, in *8th International Conference: Concrete in the Low Carbon Era*, M.R. Jones, Editor 2012, University of Dundee – Concrete Technology Unit: Dundee, UK. p. 1572-1580.
8. Klammer, D., J. Tritthart, F. Mittermayr, and A. Brunensteiner, *Sulfatbeständigkeit - aktuelle Forschungsergebnisse*, in *1. Grazer Betonkolloquium : Die Vielseitigkeit eines Baustoffes*, P. Maydl and B. Freytag, Editors, 2012, Verlag der Technischen Universität Graz: Graz, Austria. p. 57-68.
  9. Mittermayr, F., T. Rinder, D. Klammer, A. Leis, and M. Dietzel, *A Carbon Isotope Study of Thaumasite and Calcite Sinter Formation in Underground Construction*, in *International Congress on Durability of Concrete*, H. Justnes and S. Jacobsen, Editors, 2012, NTNU: Trondheim. p. No. C6-1: 1-14.
  10. Tritthart, J., F. Mittermayr, D. Klammer, and A. Brunensteiner, *Schädigung von Beton durch Thaumasit*, in *Spritzbeton - Tagung 2012*, W. Kusterle, Editor 2012: Alpach. p. 77 - 83.
  11. Mittermayr, F., A. Baldermann, D. Klammer, A. Leis, J. Tritthart, and M. Dietzel, *Sulfate attack - Reaction mechanisms revealed by a multi proxy approach*. Civil and Environmental Research, 2013. **5**: p. 96-100.
  12. Mittermayr, F., A. Baldermann, C. Kurta, T. Rinder, D. Klammer, A. Leis, J. Tritthart, and M. Dietzel, *Evaporation - A key mechanism for the thaumasite form of sulfate attack*. Cement and Concrete Research, 2013. **49**: p. 55-64.
  13. Mittermayr, F., C. Bauer, D. Klammer, M.E. Böttcher, A. Leis, P. Escher, and M. Dietzel, *Concrete under Sulphate Attack: An Isotope Study on Sulphur Sources* Isotopes in Environmental & Health Studies, 2012. **48**(1): p. 105-117.
  14. Mittermayr, F., A. Leis, and M. Dietzel, *Reaction mechanisms of concrete attack revealed by stable isotopes*. Central European Geology, 2013. **56**(2-3): p. 99-100.
  15. Dietzel, M., D. Klammer, and F. Mittermayr, *Concrete Attack – Evidence from Stable Isotopes* in *TU Graz Research2010*, Graz University of Technology: Graz. p. 22 - 24.
  16. Mittermayr, F., C. Bauer, D. Klammer, M.E. Boettcher, A. Leis, P. Escher, and M. Dietzel, *Concrete under sulphate attack: an isotope study on sulphur sources*. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2012. **48**(1): p. 105-117.
  17. F. Mittermayr, PhD thesis: Why thaumasite is forming in concrete structures, in: IAG, TU Graz, Graz, 2012, pp. 120.

Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant? Im Rahmen des gegenständlichen Projektes werde keine weiteren F&E Aktivitäten durchgeführt, weil die Laufzeit des Projektes beendet ist. Aufbauende weitere Anträge könnten eingereicht werden.

- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?

Es wurden kein Prototypen geschaffen.

## 5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den FFG Kostenleitfaden ([www.ffg.at/kostenleitfaden](http://www.ffg.at/kostenleitfaden)) bzw. Ausschreibungsdokumente.
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

>Text<

## 6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.



Keine Sonderbedingungen

## 7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt

Es gibt keine besonderen Ereignisse rund um das geförderte Projekt und keine weiteren Förderungen für das Projekt.