

BUNDESAMT FÜR STRASSEN

Forschungsauftrag ASTRA 1999 / 145
auf Antrag der Kommission für Forschung im Strassenwesen

Schädigungsmechanismen der Betonkorrosion in Tunnelbauwerken

EMPA Dübendorf
Abteilung Beton / Bauchemie

Dr. M. Pfiffner
Dr. L. Holzer

Dezember 2001



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	II
Résumé	IV
Summary	V
1. Einleitung	1
2. Probenentnahme und Untersuchungsmethoden	5
2.1 Probenentnahme	5
2.2 Untersuchungsmethoden	5
3. Theoretische Grundlagen zur Interaktion von Beton mit Wasser	7
3.1 Einleitung	7
3.2 Zusammensetzung von Zement-Hydrat-Phasen und Porenlösungschemie	7
3.3 Pufferkapazität von Portlandit und Stabilitätsbereich von C-S-H	8
3.4 Diffusionskontrollierte Auslaugung – Beispiel Wasserreservoir	9
3.5 Klassischer Sulfatangriff – Beispiel Sulfatbeständigkeitsprüfung	11
4. Beispiele zu Schädigungen in der Tunnelrealität	15
4.1 Makroskopische Schadensphänomene im Tunnelbauwerk	16
4.2 Mikroskopische Charakterisierung	18
4.2.1 Advektions-kontrollierte Auslaugung	18
4.2.2 Sulfatangriff und Thaumasitproblematik	22
5. Diskussion der Schädigungsmechanismen	25
5.1 Mechanismen bei der Auslaugung von Zementstein	25
5.2 Mechanismen der Thaumasit-Bildung	27
6. Konsequenzen für die Praxis im Tunnelbau	31
Referenzen	33
Anhang	35
A.1 Harderband-Tunnel, Bauenstrasse (Kanton UR)	35
A.2 San Bernardino-Tunnel, Nationalstrasse A3 (Kanton GR)	36
A.3 Gotschna-Tunnel, A28a Prättigauerstrasse, Umfahrung Klosters (Kanton GR)	38

Zusammenfassung

Tunnelbauwerke stellen wichtige Elemente im heutigen Verkehrssystem und bei der Nutzung der Wasserkraft dar, in welchen die Interaktion mit unterschiedlich stark mineralisiertem Grundwasser (dem sog. Bergwasser) verschiedentlich zu schwerwiegenden Schädigungen an der Tunnelauskleidung geführt hat. Ziel des vorliegenden Forschungsprojektes war es, diese beobachteten Schadensphänomene auf die zugrundeliegenden schädigungswirksamen Mechanismen zurückzuführen. Dazu sind drei Tunnelbauten sehr detailliert und zahlreiche weitere Tunnelobjekte übersichtsmässig hinsichtlich der Art und dem Grad der Schädigung an der Betonauskleidung untersucht worden.

Im Laufe dieser Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich in den meisten Tunnelbauwerken unabhängig vom Mineralisierungsgrad des Bergwassers oder der Baustoffzusammensetzung Schädigungen besonders in Zusammenhang mit primären und sekundären Inhomogenitäten (Risse, Fugen, Kiesnester, Kontaktflächen etc.) finden, welche als Wegsamkeiten für das zirkulierende Bergwasser dienen. Diese Schadensphänomene lassen sich grundsätzlich auf die folgenden zwei, sich oftmals gegenseitig überlagernden Schädigungsprozesse zurückführen: 1) Auslaugung des Zementsteins entlang dieser Inhomogenitäten und 2) Sulfatangriff in Zusammenhang mit der Bildung von Thaumasit.

Im Falle der Auslaugung werden chemische Bestandteile der Zementmatrix durch das zirkulierende Bergwasser gelöst und schnell abtransportiert. Der Auslaugungsprozess läuft dabei normalerweise über zwei Stufen ab: in einem ersten Schritt bildet sich entlang der Inhomogenitäten eine Auslaugungszone, in welcher die Alkalien aus dem Zementstein entfernt und der Gehalt an Calcium durch die Auflösung von Portlandit zusehends reduziert werden. Dabei bleiben die C-S-H-Phasen der Zementmatrix im noch alkalischen Milieu zunächst noch stabil, während die Zementsteindichte infolge des Lösungsvorganges abnimmt. Mit fortschreitender Auslaugung wird in einem zweiten Schritt der Portlandit schliesslich gänzlich aufgelöst, wobei die alkalische Pufferkapazität im Zementstein verlorengelht und der pH-Wert in der Porenlösung von über 12 auf unter 10 sinkt. Dies führt zur Destabilisierung und somit zur inkongruenten Lösung des Ettringits und der C-S-H-Phasen im Zementstein. Im fortgeschrittenen Stadium entsteht auf diese Weise eine sehr permeable Korrosionszone mit stark reduzierter Dichte, welche mehrheitlich aus einem amorphen Kieselgel besteht. Die Erhöhung der Porosität und der Permeabilität während des Auslaugungsprozesses führt zu einer Abnahme der Zementsteinfestigkeit und erleichtert die Bergwasserzirkulation, was eine Beschleunigung des Schadensverlaufes nach sich zieht.

Bei sulfathaltigem Bergwasser ist in praktisch allen untersuchten Tunnelobjekten neben der Auslaugung auch der Sulfatangriff wesentlich am Schadensbild beteiligt. In der Tunnelrealität tritt dabei hauptsächlich Thaumasit und höchstens untergeordnet Ettringit in Erscheinung. Thaumasit kann sich sowohl im intakten wie auch im ausgelaugten Zementstein entweder direkt auf Kosten der C-S-H-Phasen und des Portlandits oder aber indirekt ausgehend von Ettringit bilden, wobei lediglich Sulfat- und Karbonationen durch das zirkulierende Bergwasser zugeführt werden müssen. Auf diese Weise können bei fortschreitender Umwandlung des Zementsteins grosse Mengen an Thaumasit entstehen, was zu vollständigem Festigkeitsverlust und zur Bildung einer weichen lehmartigen Masse führt, da Thaumasit kein Bindevermögen aufweist. In der Korrosionszone kommt Thaumasit demgegenüber normalerweise in eher geringen Mengen als Riss- und Porenfüllung vor und ersetzt das amorphe Kieselgel nur untergeordnet. Der limitierende Faktor ist dabei nicht das intern vorhandene Silicium, sondern das Calcium, das neben Sulfat und Karbonat ebenfalls durch das Bergwasser zugeführt werden muss.

Diese beiden Schädigungsprozesse resp. -mechanismen weichen grundlegend von der gängigen Lehrmeinung wie auch von den üblichen Labor-Prüfverfahren bei Beständigkeitsprüfungen ab: im Labor wird hauptsächlich mit stehenden Lösungen, also nach statischen Methoden geprüft, bei welchen der Stofftransport durch Diffusionsprozesse kontrolliert ist. Bei diesem Sulfatangriff bildet sich Ettringit und nicht Thaumasit. In der Tunnelrealität treten Schädigungen dagegen vorwiegend in Zusammenhang mit fliessendem Bergwasser auf. Es handelt sich demzufolge um ein dynamisches System, in welchem der Stoffaustausch neben der

Diffusion besonders durch schnell ablaufende Advektionsprozesse stattfindet. Bei sulfathaltigem Bergwasser bildet sich hauptsächlich Thaumasit und höchstens untergeordnet Ettringit. In Zusammenhang mit der Bergwasser-Problematik müssen somit künftig dynamische Prüfanordnungen gefördert werden, wobei durch Sicherstellung der Karbonatzufuhr auch der Thaumasitbildung Rechnung getragen werden sollte. Resultate aus der herkömmlichen Sulfatbeständigkeitsprüfung sollten nur mit entsprechendem Vorbehalt auf die Tunnelrealität übertragen werden. Insbesondere bieten im Gegensatz zum klassischen Sulfatangriff auch HS-Zemente mit reduziertem Aluminatgehalt nicht à priori einen ausreichenden Schutz vor einem Thaumasit-Angriff, da Aluminium nicht zwingend an der Reaktion beteiligt ist.

Die festgestellten Schädigungsmechanismen haben weiter in allen untersuchten Tunnelobjekten: sowohl bei einschaliger Spritzbeton- wie auch bei mehrschaliger Ortsbetonbauweise oder bei Fertigelementen schwerwiegende und tiefgreifende Schädigungen an der Tunnelauskleidung nach sich gezogen. Sie haben besonders bei einschaliger Spritzbetonbauweise oftmals zu einem grossflächigen Verbundverlust mit dem Felsuntergrund und zu anschliessendem Abbrechen von Spritzbetonteilen vom Tunnelgewölbe geführt. In mehrschaligem Ortsbeton finden sich massive Schädigungen dagegen besonders bei höher mineralisiertem, aggressivem Bergwasser in Form von tiefgreifender Aufweichung und Festigkeitsverlust des Betons.

Résumé

Les bétons modernes présentent d'une manière générale d'excellentes qualités de durabilité. Toutefois, dans certains cas, une interaction avec l'eau peut conduire à de graves altérations chimiques qui réduisent la durée de vie des constructions. Pour les tunnels et les autres ouvrages souterrains, les coûts de réparation de tels dommages sont extrêmement élevés. La compréhension des mécanismes qui conduisent à ces détériorations est ainsi importante pour la prise de mesures efficaces contre ces dommages de corrosion.

Bien que la corrosion du béton puisse prendre différents aspects, on observe toutefois certains phénomènes généraux communs à tous les cas de détérioration de béton. Les mécanismes d'action à court et à long terme de l'eau conduisant à ces détériorations ont été étudiés sur des tunnels choisis à cet effet. Les textures macro- et microscopiques et les altérations chimiques observées permettent de postuler l'existence d'une succession de réactions corrosives.

Les relations texturales observées indiquent que l'attaque de corrosion se déclenche à partir d'inhomogénéités perméables qui servent de voie de cheminement à l'eau de percolation. La dissolution et le lessivage de la pâte de ciment semblent être limités aux zones avoisinant ces voies de cheminement. Les inhomogénéités, la perméabilité, la porosité et le débit de l'eau sont à considérer comme les paramètres de premier ordre qui déterminent l'apparition ou non de détériorations sérieuses. Au lessivage vient souvent encore se superposer la formation de minéraux sulfatés et cela indépendamment de la concentration en sulfate de l'eau souterraine. Au contraire de ce qui se passe dans les essais de détermination de la résistance au sulfate où il se forme de l'ettringite, c'est la thaumasite qui domine davantage dans le béton détérioré des tunnels.

Pour la prévention de la détérioration du béton par interaction chimique avec l'eau, il est important de relever que les paramètres physiques, tels que la perméabilité ou les inhomogénéités du béton, sont au moins aussi importants que les paramètres chimiques que sont la composition de la pâte de ciment durcie, le pH et la composition de l'eau ou de la solution présente dans les pores. En relation avec l'attaque du béton par le sulfate, il est nécessaire de développer de nouveaux essais de performance qui tiennent compte des mécanismes de détérioration conduisant à la formation de thaumasite.

Summary

Modern concrete materials are generally characterized by durability qualities. However, under certain circumstances the interaction with water may lead to serious chemical alterations which shorten the service life of constructions. In the case of tunnels and other underground constructions the costs for renovations are extremely high. In order to initiate effective countermeasures against corrosive damages it is important to understand the underlying deterioration processes.

Although concrete corrosion has many different faces, there are some general phenomena, which are observed in most field studies of deteriorated concrete. The underlying mechanisms of short and long term concrete water interactions in selected tunnels which lead to these deterioration phenomena have been investigated. Based on the description of macro- and microscopic textures and the chemical alterations, a succession of corrosive reactions can be postulated.

The observed textural relationships indicate that chemical attack is triggered by permeable inhomogeneities which serve as pathways for the percolating water. Leaching and dissolution of the cement paste seems to be restricted to the neighborhood of these pathways. Inhomogeneities, permeability, porosity and the flow rate of water are considered as first order parameters which determine whether or not serious deterioration occurs. Leaching is often superimposed by the formation of sulfate minerals regardless of the concentration of sulfate in the ground water. In contrast to performance tests against sulfate attack where ettringite is formed, thaumasite is much more predominate in deteriorated concrete of tunnels.

For the prevention of concrete deterioration due to chemical interactions with water it is important to note that physical parameters like permeability or inhomogeneities are at least as important as chemical parameters such as the composition of the hardened cement paste, pH-value and composition of the interacting water or the pore solution. In relation to sulfate attack new performance tests have to be developed which take into account the deterioration mechanisms leading to the formation of thaumasite.

1. Einleitung

Moderne Betonbauten und -rezepturen zeichnen sich durch allgemein gute Qualitätseigenschaften und eine hohe Beständigkeit aus. Trotzdem stellt die chemische Veränderung und Zersetzung der zementären Baustoffe bei der Interaktion mit Wasser nach wie vor ein ernstzunehmendes Problem dar, welches die «Lebensdauer» eines Bauwerkes stark beeinflussen kann. Um vorbeugende Massnahmen gegen derartige Korrosionsschäden ergreifen resp. schwerwiegende Schädigungen verhindern zu können, müssen die Schädigungsmechanismen und -prozesse bekannt sein.

Tunnelbauwerke stellen zentrale Elemente im heutigen Verkehrssystem, sowohl im Strassen- als auch im Schienennetz, sowie wichtige Verbindungen bei der Nutzung der Wasserkraft (Druckleitungsstollen, Wasserfassungen, etc.) dar. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen, welche an die Dauerhaftigkeit und Korrosionsbeständigkeit der Bauteile und der verwendeten Baumaterialien gestellt werden müssen (im Fall der Alpentransversalen NEAT sind z.B. 100 Jahre gefordert). Spätere Unterhalts- und Sanierungsarbeiten sind meist sehr aufwendig und kostspielig, da die Bauteile nach Inbetriebnahme des Tunnels nur noch beschränkt zugänglich sind. Die Berücksichtigung der Grundwasserverhältnisse und der Wasserchemie spielt deshalb bei der Planung und Realisierung neuer Tunnelbauten sowie bei der Sanierung bestehender Tunnelobjekte eine entscheidende Rolle (Wegmüller & Chabot, 1997; Wegmüller, 2001).

Im Rahmen der vorliegenden Projektstudie, die in den vergangenen zweieinhalb Jahren im Auftrag des Bundesamtes für Strassenbau (ASTRA) an der EMPA (Abt. Beton/Bauchemie) durchgeführt wurde, sowie einiger weiterer Forschungsarbeiten sind verschiedene Tunnelbauten hinsichtlich der Art und dem Grad der Schädigungen an der Betonauskleidung untersucht worden (vgl. Figur 1; z.B. Romer & Lienemann, 1998; Romer, 1999; Holzer & Romer, 1999; Romer et al., 2001). Dabei sind zu Beginn dieses Projektes alle kantonalen Tiefbauämter nach möglichen Studienobjekten mit unterschiedlichen Schädigungsphänomenen angefragt worden. Aus den zahlreichen, von verschiedenen Kantonen (u.a. Graubünden, Uri, Tessin, Bern, Baselland) zur Verfügung gestellten Tunnelbauwerken sind schliesslich drei Objekte für detaillierte Untersuchungen ausgewählt worden (vgl. Tabelle 1 und Figur 1):

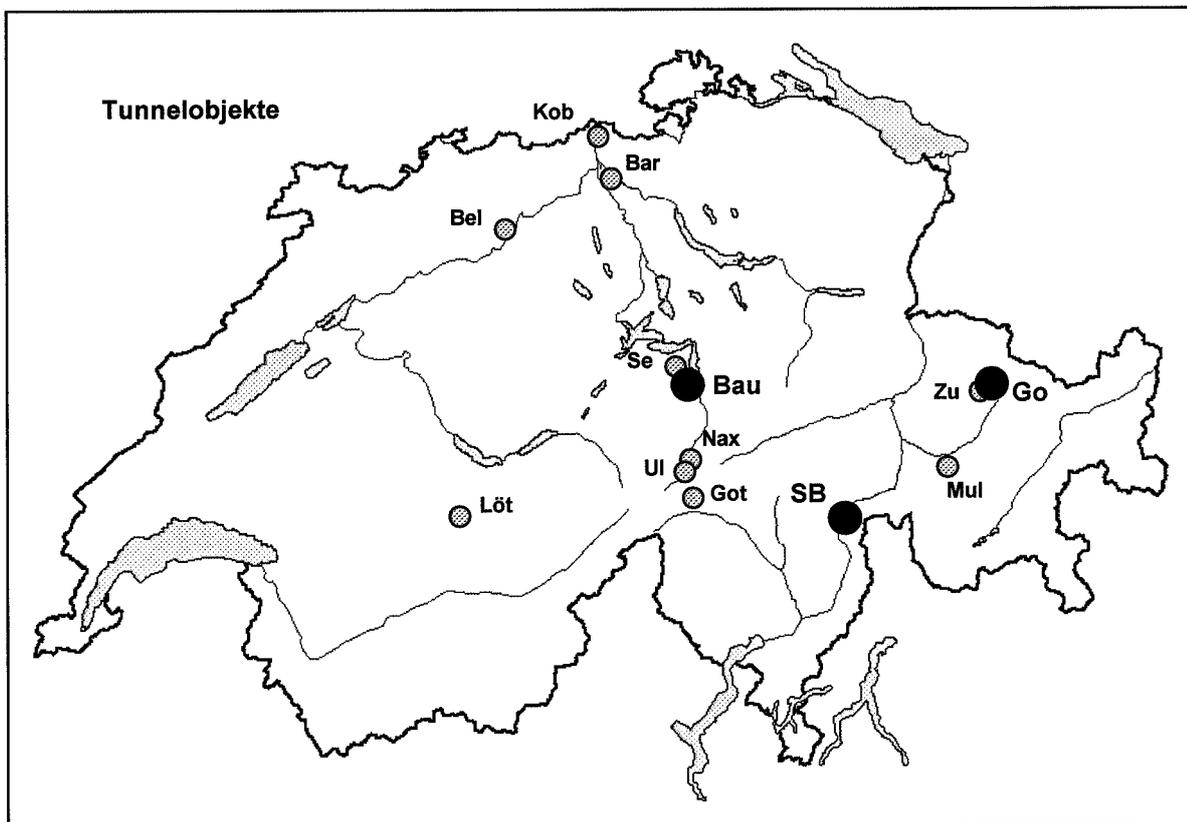
- *San Bernardino-Tunnel* (A13, Kanton GR): ca. 33–38 Jahre alter Ortsbeton mit erhöhtem Sulfatwiderstand; hochmineralisiertes Sulfat-Hydrogenkarbonat-Wasser.
- *Harderband-Tunnel* (Bauenstrasse, Kanton UR): kurzes Tunnelbauwerk am Westufer des Vierwaldstättersees mit ca. 28 Jahre alter Gunitauskleidung am Gewölbe, schwach mineralisiertes Sulfat-Hydrogenkarbonat-Wasser.
- *Gotschna-Tunnel* (Umfahrung Klosters, Kanton GR): gegenwärtig im Bau befindlicher Tunnel mit max. 3 Jahre alter Spritzbetonauskleidung (Felssicherung), Spritzbeton mit erhöhtem Sulfatwiderstand und Microsilica-Zusatz (erhöhte Dichte des Betons); z.T. extrem hochmineralisiertes Sulfat-Hydrogenkarbonat-Wasser.

Neben diesen drei Tunnelobjekten wurden zahlreiche weitere Tunnelbauwerke inspiziert und vor Ort makroskopisch auf ihre Schädigungen beurteilt (Figur 1; z.B. A2: Seelisberg, Belchen und Naxberg; A1: Baregg; Kanton UR: Urnerloch).

Ziel dieser Studien war es, die beobachteten Schadensphänomene, welche bei der Interaktion mit unterschiedlich stark mineralisierten Grundwässern (dem sog. Bergwasser) zur chemischen und mineralogischen Zersetzung und Umwandlung des zementösen Bindemittels geführt haben, auf ihre schädigungswirksamen Mechanismen zurückführen zu können. Dabei sind die Tunnelbauwerke als komplexe Systeme zu betrachten, in welchen die Schadensmechanismen sowohl durch interne, bauwerksspezifische Parameter (Konstruktion, Materialeigenschaften, Wasserdichtigkeit, chemische Beständigkeit) wie auch durch externe Faktoren (Umgebungseinflüsse: Hydrologie, Hydrochemie, Geologie, Mikrobiologie etc.) beeinflusst werden. Die meisten dieser Faktoren sind voneinander abhängig und variieren sowohl zeitlich wie auch örtlich entlang eines Tunnelprofils. Dementsprechend vielfältig können sich die Schadensphänomene auch präsentieren. **Im Laufe der Untersuchungen hat sich aber gezeigt, dass in den meisten Tunnelobjekten weitgehend unabhängig vom Mineralisierungsgrad des Bergwassers oder von der Baustoffzusammensetzung**

grundsätzlich zwei Schädigungsprozesse verbreitet auftreten, welche sich oftmals überlagern. Dabei handelt es sich einerseits um die Auslaugung des Zementsteins entlang von Inhomogenitäten und andererseits um den sog. «Sulfat-Angriff» im weiteren Sinn. Bei ersterem werden in erster Linie chemische Bestandteile der Zementmatrix durch das Bergwasser gelöst und abtransportiert. Bei letzterem führt die Interaktion mit sulfathaltigem Wasser zur chemischen und mineralogischen Umwandlung des Zementsteins unter Bildung von Sulfatmineralien wie Gips, Ettringit und/oder Thaumasit, ein Prozess, der mit teilweise grosser Volumenzunahme verbunden ist und zu Rissbildung, Ablösung, Aufweichung und Festigkeitsverlust führen kann (Review in St. John et al., 1998; Lawrence, 1990; Cohen & Mather, 1991; Mehta, 1983; Mehta, 1993; Hime & Mather, 1999; Taylor et al., 2001).

Nach einer kurzen Vorstellung der Untersuchungsmethodik (Kapitel 2) sollen in Kapitel 3 zunächst die grundlegenden Prozesse der Auslaugung und des Sulfatangriffes gemäss der gängigen Lehrmeinung diskutiert werden. Anhand von ausgewählten Beobachtungen – vor allem aus den detailliert untersuchten Studienobjekten Harderband-Tunnel, San Bernardino-Tunnel und Gotschna-Tunnel (Tabelle 1, Figur 1) – werden nachfolgend in Kapitel 4 die Schadensphänomene an realen Tunnelbauwerken beschrieben. Dabei kann vorweggenommen werden, dass sich diese Schädigungen abweichend von der vereinfachenden Lehrmeinung präsentieren. Deshalb sollen in Kapitel 5 sodann die grundlegenden Schädigungsmechanismen, die zu den beobachteten Schadensphänomenen geführt haben, modellhaft diskutiert werden. Abschliessend sollen daraus in Kapitel 6 die wichtigsten Schlussfolgerungen gezogen sowie Konsequenzen für die Praxis aufgezeigt werden.



Figur 1: Übersicht der Tunnelbauwerke, welche in den letzten Jahren im Rahmen von EMPA-Forschungsstudien untersucht worden sind. Die drei hervorgehobenen Bauwerke Gotschna/ Umfahrung Klosters (Go), San Bernardino/ A13 (SB) und Harderband-Tunnel/ Bauenstrasse (Bau) sind in Tabelle 1 genauer charakterisiert. Weitere Abkürzungen: Bar = Baregg (A2); Bel = Belchen (A2); Got = Gotthard (A2); Kob = Koblenz (SBB); Löt = Lötschberg (NEAT/SBB); Mul = Mulegg (Fensterstollen ZKW); Nax = Naxberg (A2); Se = Seelisberg (A2); UI = Urnerloch (Kt. Uri); Zu = Zugwald (RhB).

Tabelle 1: Zusammenstellung der wichtigsten Parameter und Kennwerte zu den drei im Detail untersuchten Tunnelbauwerken (siehe Figur 1 für Lokalitäten).

Bauwerk	Harderband-Tunnel (Bauenstrasse, Kt. Uri)	San Bernardino-Tunnel (Nationalstrasse A3, Kt. GR)	Gotschna-Tunnel (A28a Prattigauerstrasse, Umfah- rung Klosters, Kt. GR)
Kennwert			
Alter (bei Probe- nahme)	ca. 28 Jahre (1972 als Zubringer beim Bau des Seelisberg-Tunnels erstellt)	ca. 33–38 Jahre (Bau zwischen 1961 und 1967; seit 1.12.1967 in Betrieb)	< 2 bis max. 3 Jahre (Tunnel seit 3.10.1997 im Bau, Inbetriebnahme voraussichtlich 2005)
Allgemeines	- Länge: 805 m - Überdeckung: max. wenige 100 m	- Länge: 6596 m (tot. 2640 Betonelemente à 2.5 m) - Tunnelkote: 1600 m.ü.M - Überdeckung: max. 500 m	- Länge: 4207 m - Überdeckung max. 300 bis 400 m
Konstruktion	meist nicht armierte Spritzbeton- schale am Gewölbe, 5–20 cm dick, seitlich 1–1.5 m über Fahrbahnniveau ansetzend	stahlarmierter Ortsbeton, Scha- lenbauweise, meist > 50 cm dick Entwässerung: Sickerleitung alle 100 m, Entlastungsbohrungen, Rigolen beidseits	mehrlagige Gunitschicht, 12 cm dick, aussen stahlfaserverstärkt; Entwässerung: z.Zt. durch Ca- nelletti; Regenschirm- resp. Vollabdichtung geplant; Ortsbeton-Innenring geplant
Betonzusammen- setzung und - eigenschaften	weitgehend unbekannt! Zuschläge: alluvial, 0–8 mm allg. geringer Hydratationsgrad	- P300 mit Zementdosierung 300–350 kg/m ³ - WZ-Wert 0.55–0.6 (ca. 180 l/m ³ Wasserzugabe) - erhöhter Sulfatwiderstand - Zuschläge: Flusssedimente aus Hinterrhein und Moesa, 0–32 mm, z.T. gebrochen - hoher Glimmeranteil	- CEM I HS, Zementdosierung 350 kg/m ³ - WZ-Wert < 0.5 - erhöhter Sulfatwiderstand - hohe Frostbeständigkeit - bis 10% Microsilica (erhöhte Dichte) - Zuschläge: alluvial, 0–16 mm, hoher Rundungsgrad
Hydrologie, Wasserchemie	- Wasserführung gering, unter- liegt jahreszeitl. Schwankun- gen - schwach mineralisiert (Na/Ca- Sulfat-Hydrogen-karbonat- Wasser; Lf < 1000 µS/cm, pH 7.5–9, Sulfat < 200 mg/l)	- Wasserführung gering - hoch mineralisiert, zu Portalen hin abnehmend (Ca-Sulfat-Hydrogenkarb.- Wasser; Lf < 2500 µS/cm, pH 7.5–8, Sulfat < 2000 mg/l, HCO ₃ < 250 mg/l, Ca bis 500 mg/l)	- Wasserführung variabel - mittel bis extrem hoch minera- lisiert (Na-Ca-Mg-Sulfat- Hydrogenkarb.-Wasser; Lf bis 10000 µS/cm, pH 7.5–9, Sulfat < 5000 mg/l, HCO ₃ < 1000 mg/l)
Geologie	Kalke und Mergel, wenig Sand- stein (Axen-Decke, Helvetikum)	kristalline Gesteine der Adula- Decke (Gneise, Schiefer), Meta- sedimente der Misoxer-Zone; Gesteine verfaltet und zerklüftet; Gipsbildung auf Klufflächen	bankige und phyllitische Bünd- nerschiefer mit Kalk-/ Dolomit- schuppen; viele Störungszonen, Scherflächen und Adern; z.T. Gipsinseln und Gips auf Klüften
Schäden	- Sulfatangriff: Auslaugung, Lösung, Umwandlung - Ausblüfung, Sinterbildung - Rissbildung ev. durch Ge- birgsbewegung	- Sulfatangriff: Auslaugung, Lösung, Umwandlung - Aufweichung des Betons - Ausblüfung, Sinterbildung	- Sulfatangriff: v.a. Lösung - Feuchtstellen mit Biofilmen (Oberflächenkorr.) - Ausblühungen

2. Probennahme und Untersuchungsmethoden

2.1 Probennahme

Die Probennahmen haben anlässlich von Begehungen zusammen mit visuellen Schadensaufnahmen in den entsprechenden Tunnelbauwerken stattgefunden. Dabei waren sowohl Personen seitens der EMPA wie auch Vertreter der jeweiligen kantonalen Tiefbauämter resp. Bauunternehmungen anwesend. Das Vorgehen wurde vorgängig jeweils anlässlich eines Treffens zwischen den verschiedenen Parteien abgesprochen.

Aufgrund der visuellen Schadensaufnahme wurden entlang dem Tunnelprofil verschiedene Lokalitäten ausgewählt, an welchen jeweils mehrere Betonproben (Bohrkerne, Handstücke und Ablagerungen; vgl. Tabellen im Anhang) von unterschiedlichen Stellen am Gewölbe entnommen worden sind. Dabei sind besonders Stellen bevorzugt worden, wo eine Korrosion des Betons anhand von Ausblühungen und Rissen an der Oberfläche sichtbar oder aufgrund von Feuchtstellen und aufgeweichtem Beton zu vermuten war. Zusätzlich wurde in jedem untersuchten Tunnelbauwerk eine Stelle ohne erkennbare Schädigung als Referenz beprobt. Im weiteren sind auch Proben von Ausblühungen, Versinterungen und falls vorhanden auch von Biofilmen auf der Betonoberfläche sowie Proben von aufgeweichtem und alteriertem Beton zwecks Identifizierung der mineralogischen resp. mikrobiologischen Zusammensetzung gesammelt worden.

Proben des austretenden Bergwassers konnten nur im Gotschna-Tunnel direkt während der Probennahme gemäss Anleitung des Institutes Bachema resp. gemäss Standard-Arbeitsanweisung der Abteilung für anorganische Analytik der EMPA (SOP-Nr. V-3813) entnommen werden. Dabei mussten die wässrigen Lösungen sowohl im Original entnommen wie auch jeweils mit Schwefelsäure, Salpetersäure und Zinkacetatlösung stabilisiert werden. Zahlreiche weitere Wasseranalysen aus der laufenden Vortriebsüberwachung des Gotschna-Tunnels wurden vom kantonalen Tiefbauamt Graubünden zur Verfügung gestellt (Tabelle A.7 im Anhang). In allen anderen Tunnelbauwerken war fliessendes Bergwasser nicht in ausreichenden Mengen vorhanden oder konnte eine Verunreinigung durch die Baustoffe nicht a priori ausgeschlossen werden. Dementsprechend musste die Zusammensetzung des Bergwassers in diesen Fällen aus verfügbaren Publikationen und Berichten entnommen werden (z.B. San Bernardino-Tunnel: Lardelli, 1993; Wegmüller & Chabot, 1997; Hartmann, 1998; Harderband-Tunnel: Schneider, 1984).

2.2 Untersuchungsmethoden

Neben einer visuellen Schadensaufnahme im entsprechenden Tunnelbauwerk selber sind die entnommenen Bohrkerne, Handstücke und Ausblühungen makroskopisch nach dem Grad ihrer Schädigung beurteilt worden. Zur weiteren Charakterisierung der Korrosionsphänomene sind von ausgewählten Bohrkerne und Handstücken imprägnierte Dünnschliffe hergestellt und unter dem Polarisationsmikroskop untersucht worden. Zur Identifizierung von Mineralphasen in Ausblühungen und Versinterungen sowie von sekundären Mineralneubildungen in Rissen, Poren, Hohlräumen und im Zementstein des Betons selber gelangte die Röntgendiffraktions-Analyse (XRD) sowie die Rasterelektronenmikroskopie (Umwelt-Rasterelektronenmikroskop ESEM der EMPA) zum Einsatz (vgl. Tabellen im Anhang). Mit letzterer konnten auch Gefügeveränderungen im submikroskopischen Bereich untersucht sowie Elementverteilungen und chemische Zonierungen im geschädigten Beton beurteilt werden.

Die chemischen Analysen an den Bergwasserproben aus dem Gotschna-Tunnel sind einerseits intern durch die Abteilung für anorganische Analytik der EMPA und andererseits durch das Institut Bachema in Zürich durchgeführt worden.

Die Biofilm-Proben wurden durch die Abteilung Biologie an der EMPA St. Gallen auf die Anwesenheit von verschiedenen Mikroorganismengruppen untersucht (aerobe und anaerobe, chemoorganotrophe und chemolithotrophe Organismen). Für die Kultivierung der verschiedenen Organismenpopulationen wurden dem jeweiligen Metabolismus (Stoffwechsel) entsprechende Nährstoffmischungen als Wachstumsgrundlage verwendet (vgl. z.B. Holzer, 1999a; Holzer, 1999b; Kaiser, 1999; Kaiser & Raschle, 2000).

3. Theoretische Grundlagen zur Interaktion von Beton mit Wasser

3.1 Einleitung

In vielen Tunnelobjekten führt die Interaktion mit Bergwasser zu gravierenden Schädigungen. Die Schädigungsart und der Schadensverlauf sind dabei abhängig von folgenden Parametern:

- **Konstruktion:** Einschalige oder mehrschalige Bauweise, mit oder ohne Abdichtung, Entwässerung und deren Dimensionsierung/Versinterungshohlraum.
- **Baustoffeigenschaften:** Rezepturen mit unterschiedlichen Zementsorten (Chemismus, Mineralogie), unterschiedliche W/Z-Verhältnisse, Porosität, Permeabilität, Homogenität, Festigkeit usw. Diese Parameter sind auch vom Betontyp (Gunit, Ortsbeton, Tübbing) abhängig.
- **Physikalische Parameter:** Temperatur und Wassermenge – beides variiert örtlich und zeitlich sehr stark.
- **Chemisches Milieu:** Aggressivität und Mineralisierungsgrad des Bergwassers. Die Hydrochemie ist stark von der Geologie abhängig und kann ebenfalls örtlich und zeitlich schwanken.
- **Zeitlicher Faktor:** Dauer der Interaktion zwischen Bauwerk resp. Baustoff und Bergwasser.
- **Örtlicher Faktor:** Flächenmässige Ausdehnung, Dimensionierung und Verteilung der Bergwasser-Interaktion am Bauwerk.

Das Zusammenspiel dieser Vielzahl von Parametern führt dazu, dass die Schädigungsmechanismen in der Realität sehr vielfältig und kompliziert sind.

In diesem Abschnitt sollen deshalb die grundlegenden Mechanismen an Beispielen mit stark vereinfachten Verhältnissen und bekannten Parametern diskutiert werden. Bezüglich chemischer und mineralogischer Veränderungen im Zementstein müssen dabei immer zwei Prozesse unterschieden werden:

- **Transport** von gelösten Stoffen zwischen der Porenlösung und dem Wasser ausserhalb des Porenraumes und umgekehrt. Je nach Milieu ist der Transport durch Diffusion oder durch Advektion kontrolliert.
- **Chemische Reaktion** zwischen der Porenlösung und den Festphasen des Zementsteines. Dabei kommt es zur Auflösung von Zementphasen und auch zur Neubildung von Mineralien (Lösung und Ausfällung).

3.2 Zusammensetzung von Zement-Hydrat-Phasen und Porenlösungschemie

Feststoffzusammensetzung: In Tabelle 2 ist exemplarisch die chemische Zusammensetzung eines Zementes (CEM I 42.5) wiedergegeben. Der Gesamtchemismus des Zementes verteilt sich in einem Zementstein auf folgende Zement-Hydrat-Phasen (Diamond, 1976):

70% C-S-H-Phasen

20% Portlandit

7% Aluminium- und Schwefel-haltige Phasen (Ettringit, Monosulfat, C-A-H)

3% übrige Phasen, z.B. unhydrat. Klinkerrelikte oder Eisen- und Magnesium-haltige Phasen.

Porenlösungschemie: Eine typische Porenlösung in einem ausgehärteten Zementstein beinhaltet vor allem Natrium-, Kalium- und Hydroxid-Ionen (Na_2O 80–160 mmol/l, K_2O 240–550 mmol/l, OH^- 320–710 mmol/l). Dadurch erreichen Porenlösungen hohe pH-Werte zwischen 12.5 und 13.5. Die Konzentration von CaO (< 25 mmol/l) und SO_3 (< 250 mmol/l) in der Porenlösung schwankt sehr stark in Abhängigkeit des Alters und der Zusammensetzung des Zementsteins. Der Gehalt an SiO_2 und Al_2O_3 ist aufgrund der geringen Löslichkeiten immer unter 2 mmol/l (Diamond, 1981).

3.3 Pufferkapazität von Portlandit und Stabilitätsbereich von C-S-H

In einem intakten Beton, welcher mit einem niedrig mineralisierten Wasser interagiert, wird die chemische Zusammensetzung der Porenlösung durch Lösungsprozesse dominiert und neigt dazu, sich stark mit Natrium, Kalium und (weniger ausgeprägt) mit Calcium anzureichern. Die prozentuale Zusammensetzung des Zementsteins und der Porenlösung ist also stark unterschiedlich, was auf eine selektive (inkongruente) Auflösung der Zement-Hydrat-Phasen zurückzuführen ist.

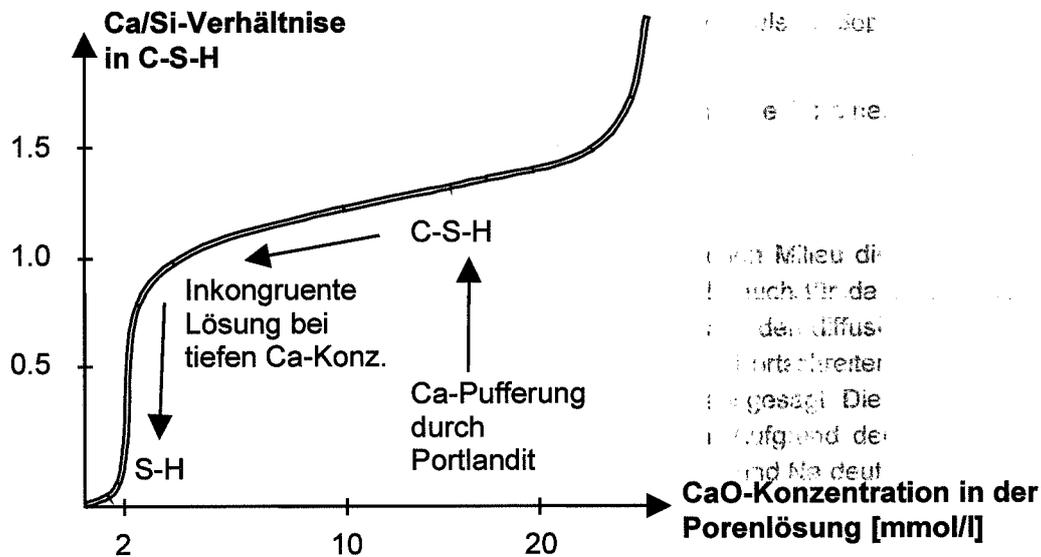
60 Mol-% des Zementsteines bestehen aus Calcium, welches sich mehrheitlich auf die Hauptphasen des Zementsteines (Portlandit und C-S-H) verteilt. Bei der kapillaren Aufnahme von schwach mineralisiertem Wasser wird der Calciumgehalt in der Porenlösung primär durch die Löslichkeit von Portlandit gepuffert, wobei Konzentrationen bis zu 20 mmol/l gemessen werden können (Holzer, 2003). Wie Figur 2 zeigt, bleibt das Ca/Si-Verhältnis der C-S-H-Phasen sehr stabil (zwischen 1.1 und 1.5), während in den entsprechenden Porenlösungen die Calcium-Konzentrationen zwischen 2 und 20 mmol/l variieren können. Erst wenn die Calcium-Konzentrationen in der Porenlösung unter 2–4 mmol/l sinken, beginnt die inkongruente Lösung von C-S-H. Die Calcium-Pufferung durch die Portlandit-Löslichkeit ist also sehr wesentlich für die Stabilität von C-S-H und damit auch für die Stabilisierung des Zementsteines schlechthin.

	CEM	C-S-H**		Portlandit		C-A-H		Ettringit		Monosulfat		Thaumasit		
		Nicht stöchiometrisch!!		Ca(OH) ₂		3CaO*Al ₂ O ₃ *6H ₂ O		3CaO*Al ₂ O ₃ *3CaSO ₄ *32H ₂ O		3CaO*Al ₂ O ₃ *CaSO ₄ *12H ₂ O		CaO*SiO ₂ *CaCO ₃ *CaSO ₄ *15H ₂ O		
Gew.-%		Mit H ₂ O	Ohne H ₂ O	mit H ₂ O	ohne H ₂ O	mit H ₂ O	ohne H ₂ O	mit H ₂ O	ohne H ₂ O	mit H ₂ O	Ohne H ₂ O	Mit H ₂ O	ohne H ₂ O	Gew.-%
CaO	63.00	37.00	61.67	75.70	100.00	44.44	62.25	26.79	49.56	36.01	55.17	27.01	47.73	CaO
SiO ₂	20.00	19.82	33.04									9.65	17.04	SiO ₂
Al ₂ O ₃	6.00	2.02	3.37			26.98	37.75	8.13	15.04	16.40	25.12	--	--	Al ₂ O ₃
SO ₃	3.00	0.53	0.88					19.14	35.40	12.86	19.71	12.86	22.73	SO ₃
K ₂ O+Na ₂ O	1.10	0.62	1.04											K ₂ O+Na ₂ O
Fe ₂ O ₃	2.75													Fe ₂ O ₃
MgO	2.00											7.07	12.50	MgO
rest	2.15													CO ₂
H ₂ O	0.00	40.00	--	24.30	--	28.57	--	45.94	--	34.73	--	43.41	--	H ₂ O
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	
Mol.-%														Mol.-%
CaO	67.10	20.35	64.50	50.00	100.00	30.00	75.00	14.29	60.00	22.22	66.66	14.29	50.00	CaO
SiO ₂	19.88	10.18	32.31									4.76	16.67	SiO ₂
Al ₂ O ₃	3.51	0.61	1.90			10.00	25.00	2.38	10.00	5.55	16.66	--	--	Al ₂ O ₃
SO ₃	2.24	0.20	0.65					7.14	30.00	5.55	16.66	4.76	16.67	SO ₃
K ₂ O+Na ₂ O	0.70	0.20	0.65											K ₂ O+Na ₂ O
Fe ₂ O ₃	1.03													Fe ₂ O ₃
MgO	2.98													MgO
rest	2.56											4.76	16.67	CO ₂
H ₂ O	0.00	68.45	--	50.00	--	60.00	--	76.19	--	66.66	--	71.43	--	H ₂ O
	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	

* Bsp. CEM I 42.5 Jurazement

** Daten aus Taylor (1990).

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzungen von Zementklinker und seinen wichtigsten Hydratationsprodukten im Zementstein.



Figur 2: Metastabiles Gleichgewicht von C-S-H: Die Kurve zeigt den Zusammenhang zwischen dem Ca/Si-Verhältnis von C-S-H und der Ca-Konzentration in der Porenlösung (Steinour, 1954).

3.4 Diffusionskontrollierte Auslaugung – Bsp. Wasserreservoir

Die Randbedingungen in Wasserreservoirs sind verhältnismässig einfach und konstant. Deshalb kann die diffusionskontrollierte Auslaugung an diesem Beispiel diskutiert werden. Vergleichbare Bedingungen findet man beispielsweise auch in Tunnelbauwerken im Mittelland, welche mit schwach mineralisiertem Grundwasser in Kontakt stehen, oder bei Staumauern. Folgende Parameter sind dabei herauszuheben:

- Konstruktion und Baustoff: i.d.R. handelt es sich um einen homogenen Ortsbeton aus CEM I mit niedriger Permeabilität. Dank der Dauerfeuchte wird ein hoher Hydratationsgrad erreicht, und es bilden sich verhältnismässig wenig Schwindrisse.
- Physikochemisches Milieu: stehendes Wasser mit einem niedrigen Mineralisationsgrad.

➤ Reaktion:

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt diskutiert, kommt es in der wassergesättigten Zone zu einem Stoffaustausch zwischen der Porenlösung und dem Zementstein. Dabei gehen vor allem die Alkalien (K, Na) bevorzugt in Lösung. Ca wird durch die Portlandit-Löslichkeit gepuffert. Es resultiert eine Porenlösung mit hohem pH, mit welcher C-S-H, Portlandit und Ettringit bzw. Monosulfat stabil sind. Wie weiter unten beschrieben, bilden sich in unterschiedlichen Zonen aber auch neue, sog. sekundäre Mineralien (Calcit, Ettringit, Portlandit).

➤ Transport:

Durch die Lösungsprozesse baut sich ein starker Konzentrationsgradient zwischen der Porenlösung und dem schwach mineralisierten Wasser im Reservoir auf. Nach dem ersten Fick'schen Diffusionsgesetz (vgl. Spear, 1993 und Literaturangaben darin) kommt es aufgrund dieses Konzentrationsgradienten (dC/dX) zu einem Stofffluss (J):

$$\text{Erstes Fick'sches Diffusionsgesetz: } J = -D \cdot (dC/dX)$$

Der Diffusionskoeffizient (D) kann gemäss der Arrhenius-Gleichung experimentell bestimmt werden, wobei E die Aktivierungsenergie, R die Gaskonstante und T die Temperatur darstellen:

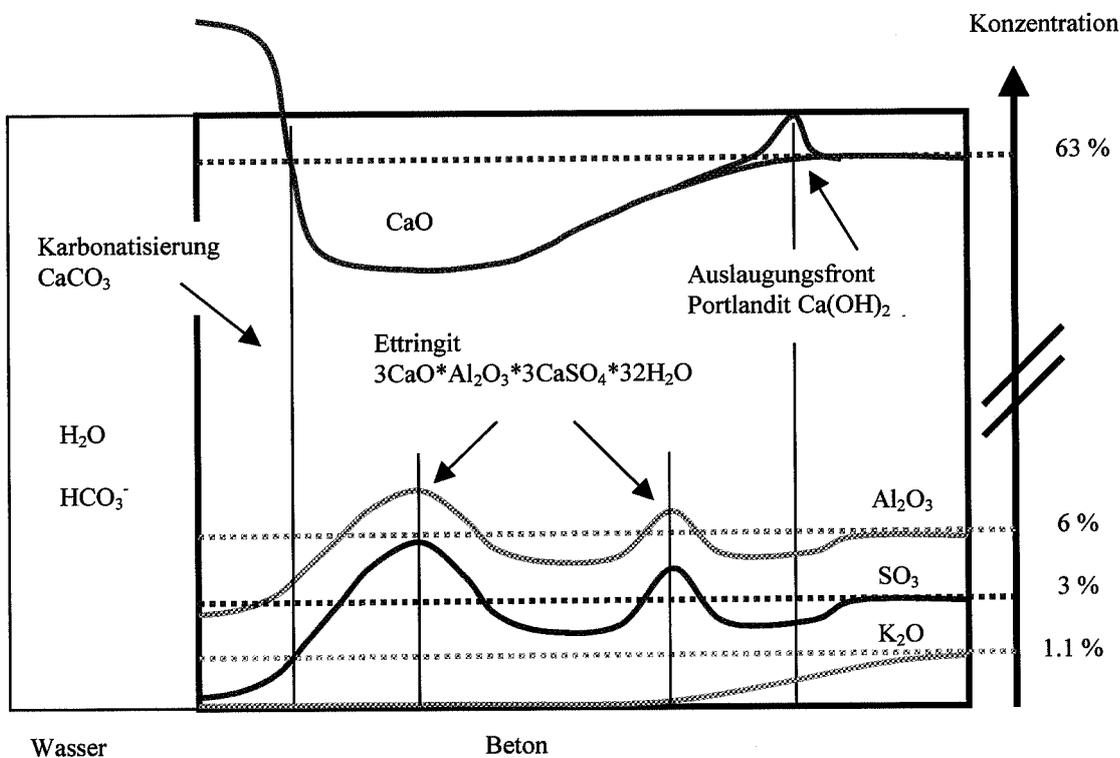
$$\text{Arrhenius-Gleichung: } D = D_0 \cdot e^{-E/RT}$$

Für schädigende Diffusionsprozesse in Tunnelobjekten ist zu berücksichtigen, dass die Diffusionskoeffizienten exponentiell von der Temperatur abhängen. Vom Portalbereich bis ins Innere der grossen Alpentunnel kann sich die Diffusionsgeschwindigkeit aufgrund der Temperaturzunahme (bis > 20°C) mehr als verdoppeln.

Häufig wird für die zeitliche Entwicklung eines Diffusionsprofils die charakteristische Eindringtiefe (h) einer Diffusionsfront betrachtet (z.B. Grube & Rechenberg, 1989):

$$\text{Charakteristische Eindringtiefe: } h = \sqrt{D \cdot t}$$

Das Vordringen der Diffusionsfront verlangsamt sich mit der Zeit (\sqrt{t}), weil in einem statischen Milieu die Konzentrationsgradienten abflachen. Dies gilt sowohl für die Auslaugung von Elementen als auch für das Eindringen von Stoffen bei umgekehrten Konzentrationsgradienten. Mit Modellierungen, welche den diffusionskontrollierten Stofftransport und die Löslichkeiten von Portlandit miteinbeziehen, wird ein Fortschreiten der Auslaugungsfront von Ca nach 100 Jahren bis in eine Tiefe von ca. 1 bis über 10 cm vorausgesagt. Diese Berechnungen sind abhängig von Diffusions-, Gleichgewichts- und Baustoffparametern. Aufgrund der höheren Löslichkeit und der geringeren Menge im Zementstein schreitet die Auslaugung von K und Na deutlich schneller voran als jene von Ca.



Figur 3: Beispiel eines schematischen Auslaugungsprofils in einem 90 Jahre alten Wasserreservoir. Die Auslaugungsfront befindet sich in einer Tiefe von ca. 1 cm.

In Zusammenhang mit der Endlagerung von radioaktiven Abfällen wurde das Langzeit-Auslaugungsverhalten in ca. 100 Jahre alten Wasserreservoirs und Staudämmen untersucht. Figur 3 zeigt ein typisches Auslaugungsprofil aus einem 90 Jahre alten Wasserreservoir (nach Trägårdh and Lagerblad, 1998). Die Auslaugungsfront von Calcium ist dabei nur bis in eine Tiefe von ca. 1 cm fortgeschritten. Bei allen leicht löslichen Elementen (v.a. Ca, Na, K) kann eine deutliche Tendenz zur Abreicherung festgestellt werden. Diese Ca-Abreicherung ist aber nicht so stark, dass sich die C-S-H-Phasen aufzulösen beginnen (vgl. Fig. 2). Die Porenlösung scheint also durch den vorhandenen Portlandit ausreichend gepuffert zu sein, so dass trotz Auslaugungserscheinungen genügend hohe Ca-Konzentrationen zur Stabilisierung der C-S-H-Phasen beibehalten werden.

Aufgrund von Mineralneubildungen entstehen aber auch Zonierungen, in welchen die mobilisierten Elemente wieder angereichert worden sind. In der Aussenzone hat sich Calcit gebildet, im Bereich der Auslaugungszone sind Al und S in Form von Ettringit gebunden worden, und an der Auslaugungsfront ist sekundärer Portlandit zu beobachten. Auch die Neubildung von Ettringit, welcher nur bei einem pH über 10 stabil ist, weist darauf hin, dass trotz vollständiger Auslaugung von Na und K die Alkalinität dank der Ca-Pufferung durch Portlandit zumindest teilweise aufrechterhalten ist.

Trotz der relativ einfachen Verhältnisse in den untersuchten Wasserreservoirs ist die Auslaugung des Betons bei realen Bauwerken viel komplexer, als dies aufgrund der Modelle mit rein diffusivem Transport zu erwarten wäre. Grund dafür sind die schwer vorhersagbaren Mineralneubildungen, welche allenfalls auf chemische Inhomogenitäten im Baustoff zurückzuführen sind. Gegenüber Modellrechnungen ist der Auslaugungsprozess im beschriebenen statischen Milieu von Wasserreservoirs und Staumauern eher noch verlangsamt, was eventuell durch Mineralneubildungen und die damit verbundene Abdichtung erklärt werden kann. Noch kompliziertere Auslaugungs- und Mineralneubildungszonierungen werden beobachtet, wenn der Zementstein mit stark mineralisierten Wässern in Kontakt kommt (z.B. Andac & Glasser, 1999).

3.5 Klassischer Sulfatangriff – Beispiel «Sulfatbeständigkeitsprüfung»

Sobald das in Kontakt mit dem Beton stehende Wasser einen hohen Mineralisationsgrad aufweist, kommt es nicht nur zur Auslaugung des Zementsteins, sondern oftmals auch zu schädigenden Mineralneubildungen. Diese sind stark von den gelösten chemischen Stoffen abhängig. Dabei stellt der Sulfatangriff zweifellos eine der schwerwiegendsten und häufigsten Schädigungsformen dar. Allerdings können an den realen Bauwerken verschiedene Formen von Sulfat-Schädigungen beobachtet werden, weil neben dem Sulfat auch andere gelöste Stoffe (z.B. Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^-) in unterschiedlichen Konzentrationen und Spezifikationen vorkommen (z.B. Hime & Mather, 1999). Für die allgemeine Diskussion des klassischen Sulfatangriffes beschränken wir uns in diesem Abschnitt auf Bedingungen und Schädigungsmechanismen, wie sie bei der Prüfung des Sulfatwiderstandes («Sulfatbeständigkeitsprüfung») auftreten, weil hier die Milieuparameter relativ einfach und gut definiert sind:

- Physikochemische Parameter: Bei der Sulfatbeständigkeitsprüfung werden die Proben während einer bestimmten Zeit in einer gesättigten Natrium-Sulfat-Lösung gelagert. Ähnlich wie beim Beispiel des Wasserreservoirs ist auch hier die Lösung nicht bewegt – es handelt sich also um eine statische Versuchsanordnung.
- Die Baustoffparameter sind in Abhängigkeit von den Prüfkörpern sehr variabel. Es zeigt sich, dass sowohl der Aluminatgehalt des Zementes als auch physikalische Eigenschaften (Porosität, Permeabilität, Festigkeit u.a.) für die Sulfatbeständigkeit wichtig sind.

➤ Transport:

Die diffusive Aufnahme von Sulfat (und Natrium) überlagert die oben beschriebene Auslaugung von Alkalien und Calcium. Grund für den Transport in die entgegengesetzte Richtung sind die unterschiedlichen Konzentrationsgradienten (vgl. Fick'sches Diffusionsgesetz). Allerdings ist die Aufnahme von Sulfat (und Natrium) wesentlich schneller als die Auslaugung. Letztere ist durch die (beschränkte) Löslichkeit von Zementphasen deutlich gehemmt (vgl. obige Diskussion zur Pufferkapazität von Portlandit). Bei dieser Prüfanordnung wird der noch alkalische und Calcium-reiche Zementstein (pH=11–13.5) mit Sulfat angereichert.

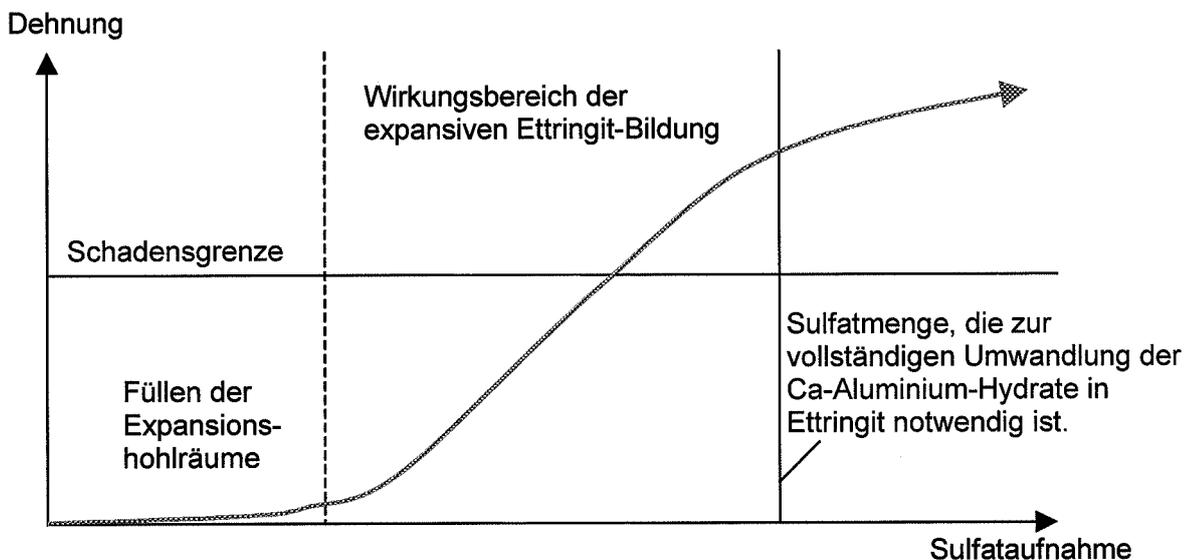
➤ Reaktionen:

Bei externer Sulfatzufuhr neigt Portlandzement dazu, Ettringit ($3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$) und Gips zu bilden. Dabei wird das im Zementstein vorhandene Aluminium umgesetzt. Für das Ettringitwachstum sind also die aufgenommene Sulfatmenge und der Aluminium-Gehalt im Zementstein wesentliche Faktoren. Die sogenannten HS-Zemente weisen dank reduziertem Aluminatgehalt einen erhöhten Sulfatwiderstand auf. Das allgemein alkalische Milieu im Zementstein begünstigt die Ettringitbildung, da dieser nur bei einem pH-Wert grösser als 10 stabil ist.

Die Ettringitbildung führt zu einer starken Volumenzunahme. In Abhängigkeit davon, welche aluminiumhaltige Phase als Edukt an der Reaktion beteiligt ist, variiert das Expansionspotential für die Ettringitbildung bei externem Sulfateintrag wie folgt (zur Ettringitbildung vgl. auch Stark & Wicht, 1995 und Literaturangaben darin):

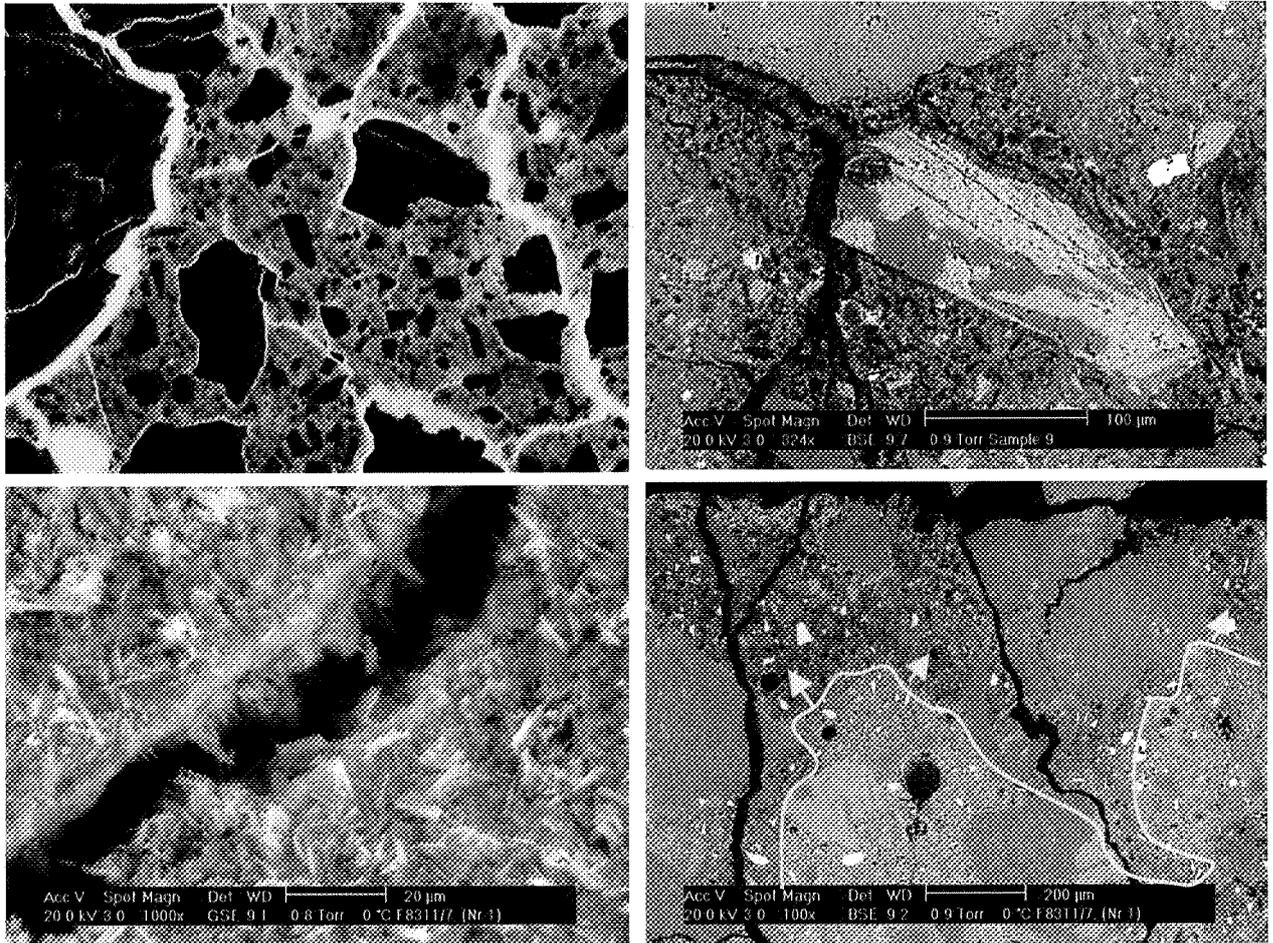
<u>Edukt/Aluminiumquelle:</u>	<u>Expansionspotential bei der Ettringitbildung:</u>
C ₃ A	800 %
C ₄ AF	570 %
C ₃ AH ₆	480 %
Monosulfat (Afm)	230 %

Figur 4 stellt schematisch den theoretischen Zusammenhang zwischen Sulfataufnahme und Dehnung dar, gemäss dem für den klassischen Sulfatangriff postulierten Schadensmodell (z.B. Studer, 2001). Daraus ist ersichtlich, dass in der Anfangsphase trotz deutlicher Sulfataufnahme noch kaum Dehnungen messbar ist, da der Ettringit in den vorhandenen Poren ungehindert wachsen kann. Nach dem Füllen der Expansionshöhlräume folgt eine Phase, bei der sich ein direkter Zusammenhang zwischen Sulfataufnahme und Dehnung ergibt. Nachdem der gesamte Aluminiumgehalt in der Probe aufgebraucht ist, kann sich theoretisch kein weiterer Ettringit mehr bilden, und die expansiven Reaktionen kommen trotz weiterer Sulfataufnahme weitgehend zum Erliegen. Die Kristallisation von Gips kann jedoch weitergehen, was mit weiterer, gegenüber der Ettringitbildung jedoch geringerer Volumenzunahme verbunden sein kann.



Figur 4: Theoretischer Schadensverlauf bei der Sulfatprüfung.

Durch die starke Volumenzunahme (bis zu 800%) bei der Ettringitbildung kommt es ab einer bestimmten Höhe der Sulfataufnahme zu massiven Schädigungen (Fig. 5). Diese Treibreaktionen sind also die Ursache für die bekannten Sulfatschädigungen, welche vor allem durch intensive Rissbildung aber auch durch Gefügeflockungen charakterisiert sind und zu einem deutlichen Abfall der Biegezugfestigkeiten führen.

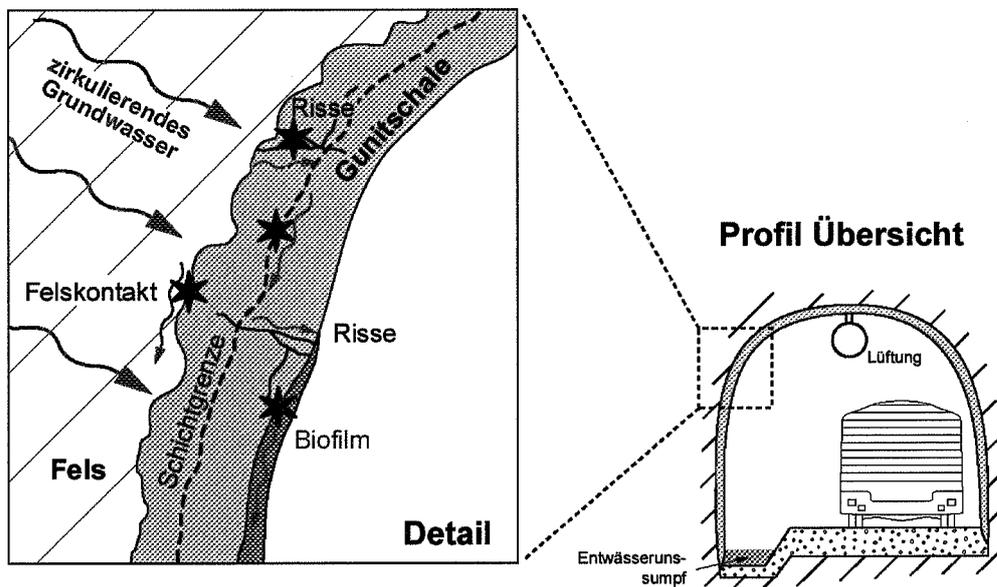


Figur 5: Beispiele von Schadensphänomenen bei klassischem Sulfatangriff (Sulfatbeständigkeitsprüfung). Oben links ist eine starke Rissbildung entlang von Zuschlagskörnern erkennbar (Dünnschliff im fluoreszierendem Auflicht). Oben rechts ist bei höherer Vergrößerung innerhalb der Risse eine Füllung von feinfaserigem Ettringit feststellbar. Unten links zeigt sich, dass sich auf den Riss- und Bruchflächen bis zu 10 µm grosse Ettringitprismen gebildet haben. Unten rechts hat die expansive Ettringit-Bildung neben Rissen auch zu einer Gefügauflockerung geführt: die dunkleren Domänen repräsentieren geschädigten Zementstein mit einer geringeren Dichte (mit Pfeilen und Grenze markiert). Das Bild oben rechts sowie die unteren Bilder stellen Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop dar.

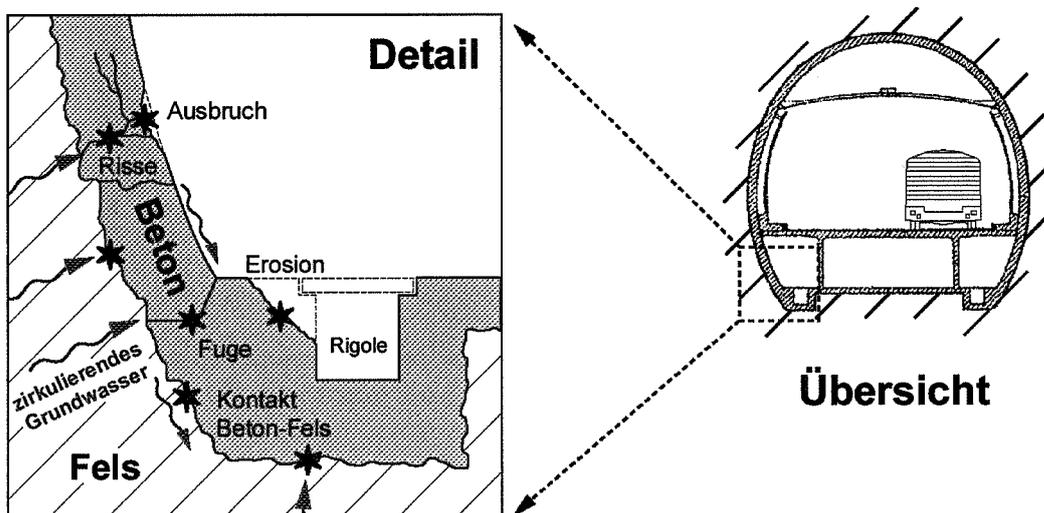
4. Beispiele zu Schädigungen in der Tunnelrealität

Innerhalb der Betonauskleidung eines Tunnels kann das Bergwasser insbesondere entlang von primären und sekundären Inhomogenitäten wie Rissystemen, Fugen, Kiesnestern und Kontaktflächen (Felskontakt, Schichtgrenzen, Oberfläche) zirkulieren (Figur 6). Diese sind oftmals auf mangelhafte Betonarbeiten und/oder ungenügende Nachbehandlung des Betons zurückzuführen und stellen somit potentielle Schadenslokalitäten dar, wo die Korrosion der zementösen Baustoffe ansetzen kann. Die meisten Schadensphänomene an der Betonauskleidung von Tunnelbauten finden sich dementsprechend sowohl bei Spritzbeton- wie auch bei Ortsbeton- oder Tübbingausbau im Bereich derartiger Wegsamkeiten für das Bergwasser (in Figur 6 mit roten Sternen gekennzeichnet).

a) Spritzbetonauskleidung (z.B. Gotschna- und Harderband-Tunnel, einschalig):



b) Ortsbetonauskleidung (z.B. San Bernardino-Tunnel, mehrschalig):

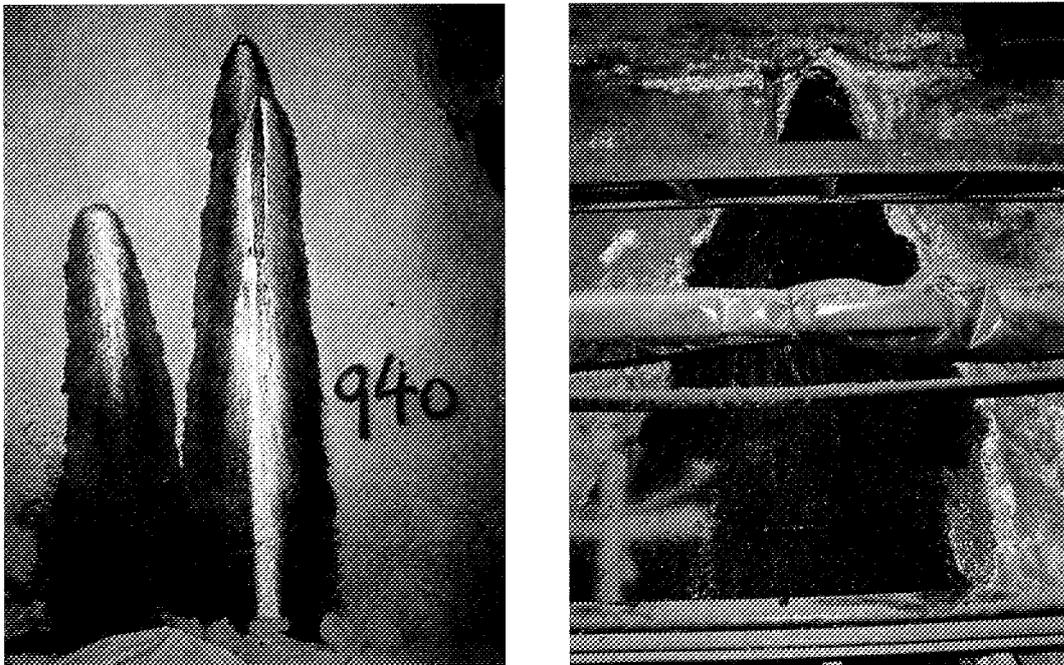


Figur 6: Schematische Tunnelquerschnitte mit a) Spritzbeton- und b) Ortsbetonauskleidung, mit Darstellung der Schadenslokalitäten (mit Sternen gekennzeichnet). Diese konzentrieren sich v.a. entlang von Inhomogenitäten wie Kontaktflächen, Rissen, Fugen, Kiesnestern oder der Betonoberfläche selber, welche als Wegsamkeiten für das Bergwasser dienen.

Nachfolgend sollen diese Schadensphänomene anhand von ausgewählten Beispielen aus den detailliert untersuchten Tunnelbauwerken charakterisiert werden (vgl. Fig. 1 und Tab 1). Dazu werden zunächst die Schadensbilder vorgestellt, wie sie sich makroskopisch im Tunnel selbst präsentieren. Anschliessend werden die Korrosionsphänomene und -produkte sowohl mikroskopisch (anhand von Dünnschliffen) wie auch sub-mikroskopisch, mineralogisch und chemisch (anhand von Untersuchungen mittels Röntgendiffraktion XRD und Umwelt-Rasterelektronenmikroskopie ESEM bestimmt) charakterisiert.

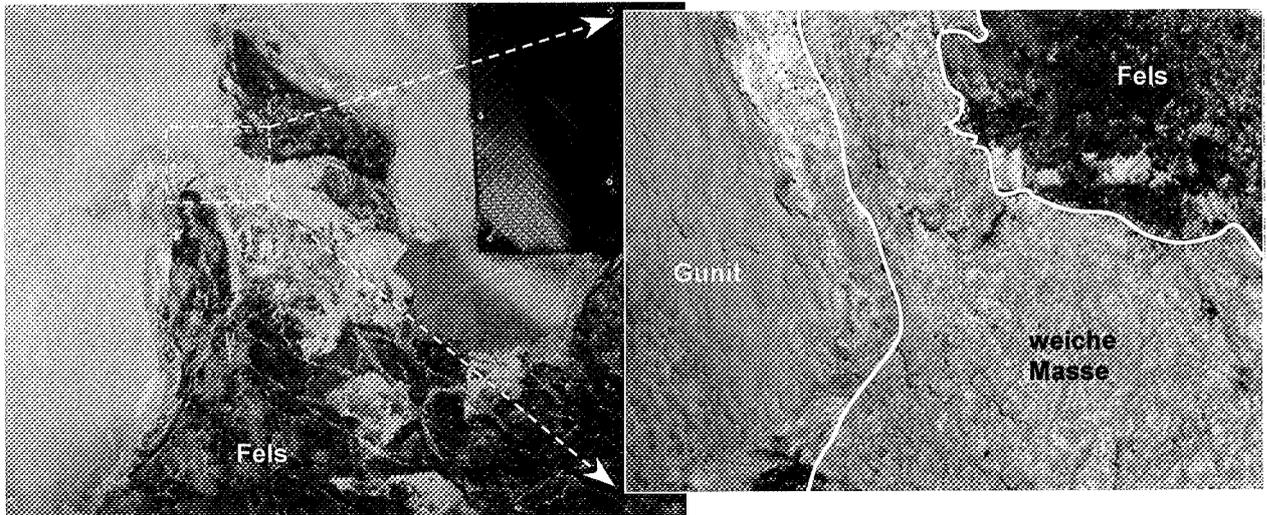
4.1 Makroskopische Schadensphänomene im Tunnelbauwerk

Viele Schädigungen lassen sich während einer Tunnelbegehung und einer visuellen Schadensaufnahme bereits makroskopisch an der Gewölbeauskleidung, am Entwässerungssystem (v.a. an den Rigolen) oder im Widerlagerbereich erkennen. Besonders bei einschaliger Spritzbetonauskleidung (Figur 6a), seltener aber auch bei mehrschaliger Ortsbetonbauweise (Figur 6b) dringt das Bergwasser entlang von Inhomogenitäten oder über Entwässerungsbohrungen durch die Betonschale und fliesst oberflächlich ab (Figur 7). Auf der nassen Betonoberfläche können sich dabei bereits nach kurzer Zeit bis zu mehrere cm dicke Ablagerungen, Sinterkrusten und wie im Beispiel des Gotschna-Tunnels auch Biofilme ausbilden. Oberflächliche Feuchtstellen ohne erkennbare Inhomogenitäten weisen weiter darauf hin, dass das Bergwasser hinter der Betonschale aufgestaut wird und die Betonauskleidung stellenweise unter Druck durchdringen kann.



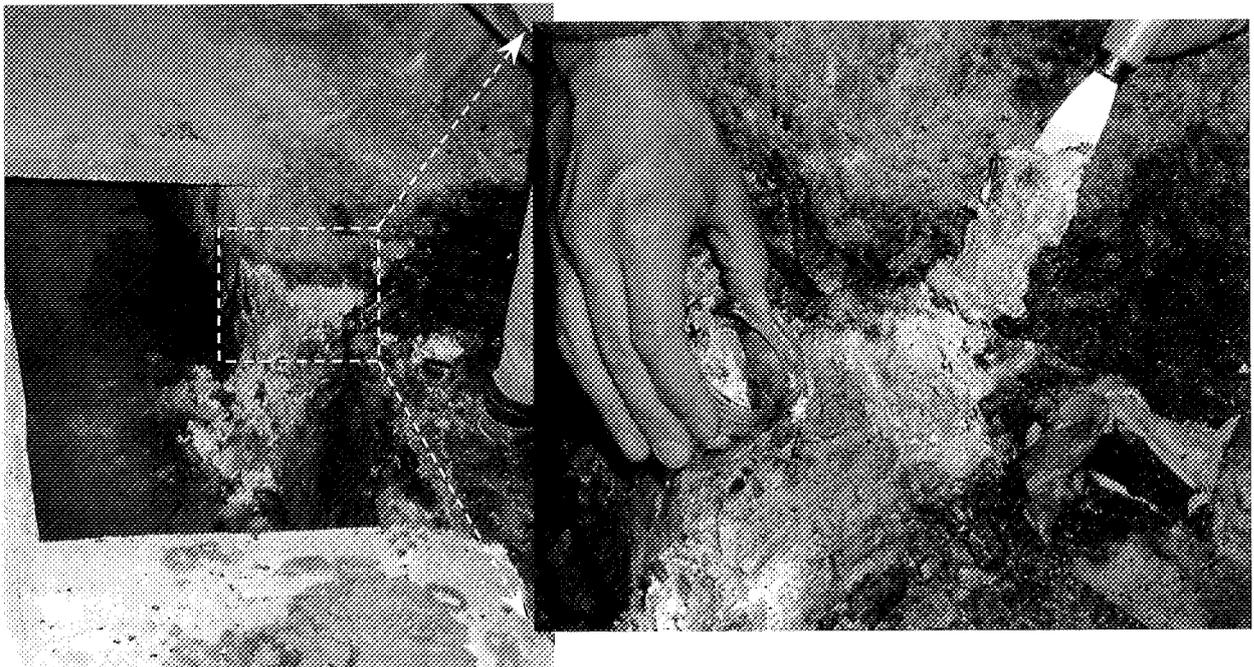
Figur 7: Stark mineralisiertes Bergwasser durchdringt den lediglich 2 Jahre alten Spritzbeton des Gotschna-Tunnels (links) sowie den rund 33 jährigen Ortsbeton im San Bernardino-Tunnel (rechts) entlang von Rissen resp. Entlastungsbohrungen und fliesst oberflächlich ab. Infolgedessen haben sich auf der nassen Betonoberfläche massive Sinterkrusten und Biofilme (Gotschna links) resp. dicke rostrote, thixotrophe Ablagerungen (San Bernardino rechts) gebildet.

Wie in Figur 8 gezeigt, können sich Teile einer einschaligen Spritzbetonauskleidung zudem gänzlich vom Felsuntergrund lösen und entlang von Rissen vom Tunnelgewölbe herunterbrechen. Die Felsoberfläche ist an diesen Ausbruchstellen stellenweise von einer weissen, weichen Masse bedeckt, welche hauptsächlich aus dem Mineral Thaumasit zusammen mit etwas Gips besteht und in welcher die Zuschlagskörner noch erhalten sind. Es handelt sich hierbei um umgewandelten Spritzbeton, welcher auf dem Felsuntergrund haften geblieben ist.



Figur 8: Ansicht einer Lokalität im Harderband-Tunnel (Bauenstrasse, vgl. Fig. 1 und Tab. 1), wo sich die Spritzbetonschale vom Felsuntergrund gelöst hat und herausgebrochen ist (links Übersicht, rechts Detailausschnitt). Die freiliegende Felsoberfläche ist teilweise von einer weissen, weichen Masse bedeckt, welche noch Zuschlagskörner enthält und somit ehemaligen Spritzbeton darstellt. Diese Masse hat sich infolge einer vollständigen Umwandlung des Zementsteins in Thaumasit zusammen mit etwas Gips gebildet.

Auf ähnliche Weise können auch Bauteile aus Ortsbeton oder Fertigelemente tiefgreifend aufgeweicht und zerstört werden, insbesondere dort, wo sie über längere Zeiträume mit hochmineralisiertem Berg- oder Rigolenwasser in Kontakt stehen (z.B. Bergwasserabfluss über die Oberfläche, Rigolenwände). Figur 9 zeigt eine stark beschädigte Rigolenwand aus dem San Bernardino-Tunnel. Der Ortsbeton ist hier bis in eine Tiefe von mehreren dm gänzlich in eine weiche, lehmartige Masse aus Thaumasit, Gips sowie etwas Calcit, Ettringit und Brucit umgewandelt, welche sich mit einem Spatel leicht ausstechen lässt und bisweilen noch Zuschläge aller Grössenfraktionen enthält. In der Rigole selber findet sich oftmals ein Schuttfächer aus eingewaschenen alterierten Betonbestandteilen.



Figur 9: Stark beschädigte Rigolenwand aus dem San Bernardino-Tunnel, mit Schuttfächer aus abgetragenen Betonbestandteilen in der Rigole selber (links Übersicht, rechts Detailausschnitt; Lokalität SB 1, TM 2952). Der Ortsbeton ist tiefgreifend von einer weichen, lehmartigen Masse ersetzt worden, entstanden infolge von vollständiger in-situ-Umwandlung des Zementsteins in sekundäre Mineralphasen, zur Hauptsache Thaumasit und Gips.

Aber auch an oberflächlich trocken aussehenden Stellen kann sich der äusserlich intakt erscheinende Gewölbebeton als tiefgreifend zermürbt erweisen, so dass er sich mit einer Spitzhacke leicht ausschlagen lässt (Figur 10). Die Zermürbung des Zementsteins und der damit einhergehende Festigkeitsverlust hängt hier mit langsam durch die Betonschale migrierendem Bergwasser zusammen, das im Bereich der Betonoberfläche verdunstet. Dies führt einerseits zu wechselnden Feuchteverhältnissen im oberflächennahen Beton und andererseits zu einer Aufkonzentration von schädigenden sekundären Mineralphasen. Diese wirken oftmals expansiv und ersetzen wiederum die Zementmatrix zumindest teilweise.



Figur 10: Äusserst mürber oberflächennaher Gewölbebeton mit stark reduzierter Festigkeit aus dem San Bernardino-Tunnel, mit einer Spitzhacke leicht ausschlagbar (Leitungskanal bei Block 1205, TM 3016).

4.2 Mikroskopische Charakterisierung

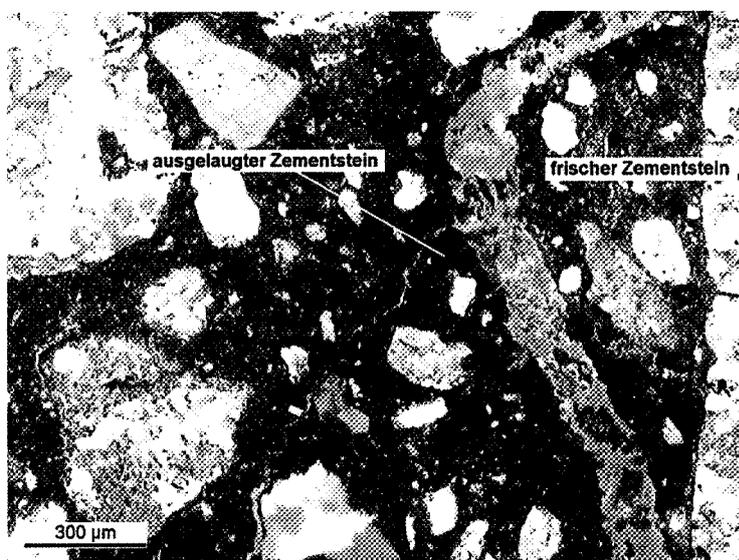
Wie einleitend bereits erwähnt, lassen sich die beobachteten Schadensphänomene zur Hauptsache auf zwei Schädigungsprozesse zurückführen. Dabei handelt es sich einerseits um eine advektions-kontrollierte Auslaugung des Zementsteins entlang von primären und sekundären Inhomogenitäten (siehe auch Figur 6) und andererseits um eine Umwandlung des Zementsteins in Thaumasit bei einem Sulfatangriff. Auf diese Prozesse zurückzuführende Schädigungen sollen nachfolgend noch detaillierter charakterisiert werden.

4.2.1 Advektions-kontrollierte Auslaugung

Besonders entlang von Inhomogenitäten lassen sich als Folge der Interaktion des Betons mit dem zirkulierenden Bergwasser häufig unterschiedlich starke Auslaugungsphänomene feststellen. Dabei sind die kristallinen Komponenten (v.a. Portlandit und Ettringit) in der ausgelaugten Zone im Vergleich zur unveränderten Zementmatrix im Dünnschliff kaum mehr erkennbar (vgl. Fig. 11 und 14); der ausgelaugte Zementstein erscheint oftmals als diffuse, mehrheitlich amorphe oder aphanitische Masse. Die Konzentration an Alkalien und Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hat bisweilen stark abgenommen, und Grösse und Anzahl an unhydratisierten Klinker-Relikten sind im Vergleich zum frischen Beton stark reduziert (Fig. 12). Die Auslaugung des Zementsteins führt somit zu einer Schwächung des Betons und kann besonders bei Gunitauskleidungen einen Verlust des Verbundes mit dem unterliegenden Fels bis hin zu einem Abbrechen von ganzen Gunitplatten nach sich ziehen. Ausserdem geht die Alkalinität des Zementsteins verloren, wodurch das Wachstum von neuen schädigenden Mineralphasen wie beispielsweise Thaumasit begünstigt wird, was mit einem totalen Festigkeitsverlust einhergehen kann (vgl. auch nachfolgendes Kapitel 4.2.2).

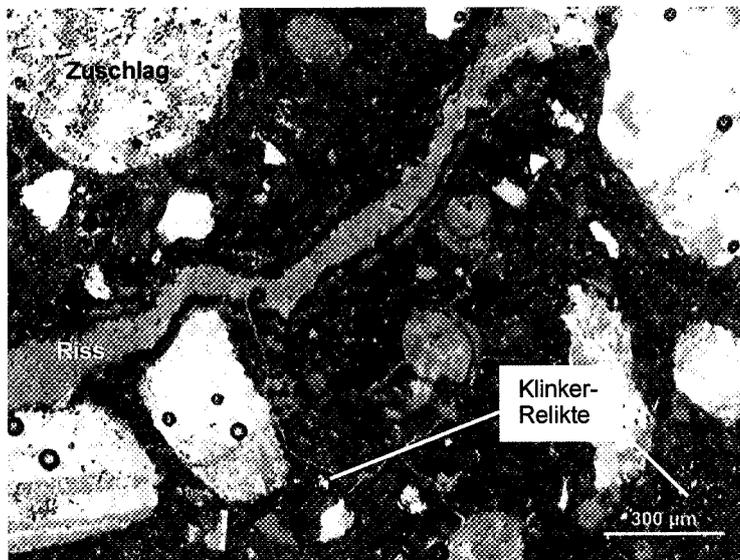
Im Detail läuft der Auslaugungsprozess grundsätzlich über zwei Stufen ab: in einem frühen Stadium werden die Alkaliionen Na^+ und K^+ rasch aus dem den Inhomogenitäten anliegenden Zementstein entfernt. Der Gehalt an Portlandit nimmt zusehends ab, während die C-S-H- und C-A-H-Phasen der Zementmatrix im alkalischen Milieu zunächst noch stabil bleiben (Fig. 11). Ca^{2+} , Na^+ und K^+ werden dabei durch das in den Porenraum migrierende Bergwasser gelöst und diffundieren entlang einem Konzentrationsgradienten in Richtung der Inhomogenitäten, aus welchen sie sodann schnell abgeführt werden. Bei fortschreitender Auslaugung (spätes Stadium) wird der Portlandit schliesslich gänzlich aus der Auslaugungszone entfernt, wobei die alkalische Pufferkapazität der Porenlösung verlorengeht und der pH-Wert derselben von über 12 auf unter 10 sinkt. Als Folge davon sind auch die C-S-H- und C-A-H-Phasen des Zementsteins nicht länger stabil und unterliegen einer inkongruenten Auflösung unter Bildung eines weitgehend amorphen Kieselgels (Fig. 12), während das Ca^{2+} in Lösung weggeführt wird. Durch diese zweistufige Auslaugung bildet sich häufig eine Zonierung, wobei die sogenannte **Auslaugungszone** noch C-S-H, Ettringit und Portlandit enthalten kann, während die sogenannte **Korrosionszone** ausschliesslich aus einem amorphen Kieselgel besteht.

Der Auslaugungsprozess ist zusätzlich mit einer Abnahme der Zementsteindichte und -festigkeit verbunden. Die erhöhte Porosität in der ausgelaugten Zone begünstigt in der Folge die Bergwasserzirkulation, wodurch mehr Ca^{2+} und Alkalien in Lösung gehen können, und die ausgelaugte Zone infolgedessen zusehends verbreitert wird.



Figur 11: Leicht ausgelaugter Zementstein entlang von Rissen, im Vergleich zum frischen Zementstein deutlich dunkler erscheinend. Die **Auslaugungszone** ist an Portlandit und Alkalien (Na, K) verarmt, die C-S-H- und C-A-H-Phasen sind dagegen noch weitgehend erhalten. 2 Jahre alter Spritzbeton aus dem Gotschna-Tunnel, Umfahrung Klosters, GR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen).

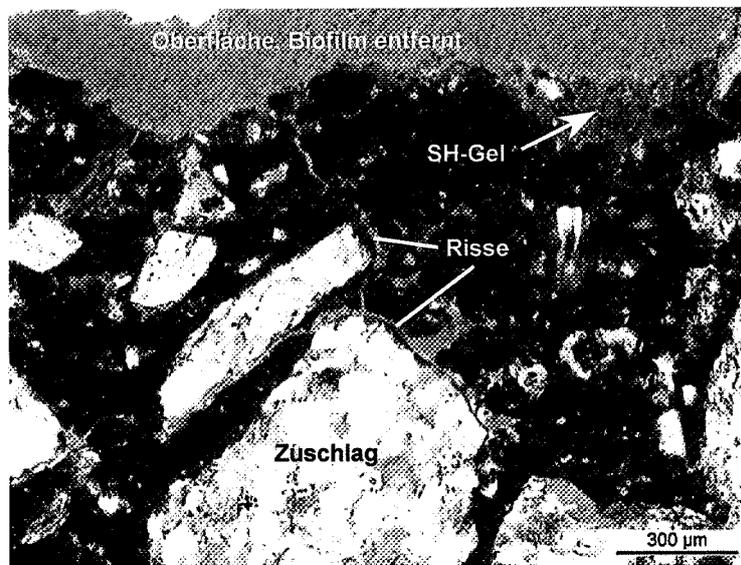
Die Auslaugung des Zementsteins läuft bei fliessendem Wasser viel effizienter als bei reiner Diffusion ab (siehe vorangehendes Kapitel), da die gelösten Stoffe (v.a. Ca^{2+} , Na^+ , K^+) entlang dem Konzentrationsgradienten in Richtung der Wegsamkeiten diffundieren (Diffusion = langsamer Prozess) und dort durch das Bergwasser schnell und permanent entfernt werden können (Advektion = schneller Prozess). Das Konzentrationsgefälle wird dabei aufrechterhalten. Dieser Mechanismus kann sowohl bei niedriger (z.B. Harderband-Tunnel, Tab. 1) wie auch bei extremer Mineralisation des Bergwassers (z.B. Gotschna-, San Bernardino-Tunnel, Tab. 1) beobachtet werden und ist somit weitgehend unabhängig von der Wasserchemie. Saure Wässer mit tiefen pH-Werten, wie sie beispielsweise bei kristallinen Gesteinen oder unter Biofilmen (bei den Stoffwechselprodukten der Mikroorganismen handelt es sich vorwiegend um organische und anorganische Säuren) vorkommen, sind jedoch aggressiver und führen in der Regel schneller zu gravierenderen Auslaugungs- und Auflösungs-schäden am Zementstein (vgl. Fig. 13). Ebenso lassen sich Auslaugungsphänomene in allen Betontypen feststellen, allerdings in unterschiedlichem Ausmass: in Gunitschalen sind sie wesentlich



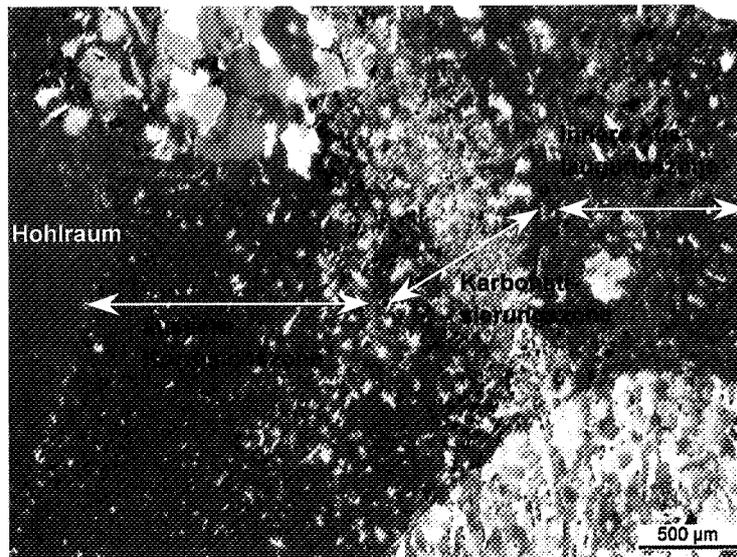
Figur 12: Stark ausgelaugter Zementstein (sog. **Korrosionszone**) entlang einem Riss. Portlandit ist gänzlich abwesend, Klinker-Relikte sind nur noch vereinzelt erhalten. Der Zementstein besteht lediglich noch aus einer diffusen, weitgehend amorphen Masse, wobei es sich mehrheitlich um ein reines S-H-/A-H-Gel handelt. Man beachte zudem die feinen Risschen parallel zum Hauptriss, welche sich als Folge der Korrosion gebildet haben. Rund 30-jähriger Spritzbeton aus dem Harderband-Tunnel, Bauenstrasse, UR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen).

häufiger als in Massen- oder Ortsbetonauskleidungen, was damit zusammenhängt, dass Spritzbeton stärkere interne Inhomogenitäten aufweist. Neben der Verfügbarkeit von Wegsamkeiten für das Bergwasser stellen die Wassermenge einerseits und die Interaktionsdauer andererseits wesentliche Kriterien dar: je grösser die Wassermenge bzw. die Durchflussrate, desto schneller kann das Porenwasser ausgetauscht werden und desto früher können erste Schädigungen infolge Advektions-kontrollierter Auslaugung auftreten – im Extremfall bereits nach wenigen Jahren, wie das Beispiel Gotschna-Tunnel zeigt (vgl. Fig. 11 und 13). Dementsprechend ist es besonders bei grossen Wassermengen wichtig, die Entstehung von Inhomogenitäten bereits beim Einbau des Betons möglichst zu verhindern.

Ähnlich wie bei reiner Diffusion können die Auslaugungsphänomene ausserdem von sekundären Mineralneubildungen wie z.B. Calcit, Gips, Ettringit, Thaumasit oder Brucit überlagert sein. Diese sind stark von der chemischen Zusammensetzung des Bergwassers abhängig und führen, wie in Figur 14 gezeigt, oftmals zu Zonierungen in den korrodierten Bereichen entlang der Inhomogenitäten oder randlich von Hohlräumen.



Figur 13: Bis in eine Tiefe von mehreren mm ausgelaugter Zementstein unterhalb eines Biofilmes. Der Auslaugungsprozess ist im Vergleich zu Figur 6 deutlich weiter fortgeschritten und hat im Bereich der Oberfläche bereits zur Zersetzung der C-S-H-Phasen und zur Bildung eines amorphen Kieselgels geführt (**Korrosionszone**). Dies hängt mit den Stoffwechselprodukten der Mikroorganismen, hauptsächlich organischen und anorganischen Säuren, zusammen, welche den pH-Wert des Porenwassers reduzieren und den Auslaugungsprozess beschleunigen. Die zahlreichen feinen Risse erleichtern das Eindringen dieser Säuren zusätzlich. 2 Jahre alter Spritzbeton aus dem Gotschna-Tunnel, Umfahrung Klosters, GR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen).



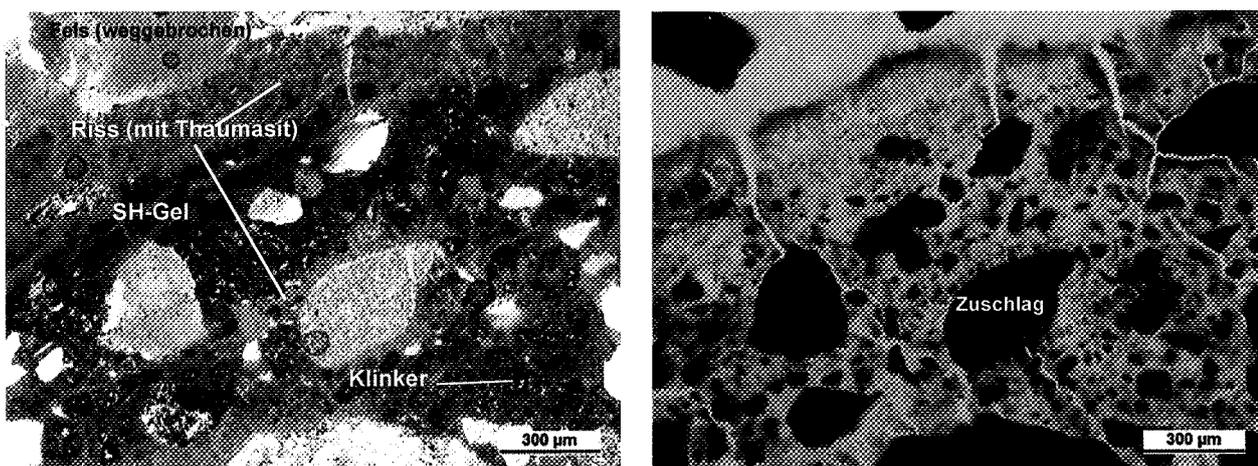
Figur 14: Zonierung randlich eines Hohlraumes, hervorgerufen durch eine Überlagerung zwischen Auslaugung des Zementsteins und sekundärer Mineralneubildung. Zwischen einer inneren und einer äusseren, stark ausgelaugten Zone bestehend aus einem amorphen Kieselgel findet sich eine Lage aus partiell karbonatisiertem Zementstein. Die korrodierte Zone ist zudem von mehreren Rissen durchzogen. Rund 34-jähriger Ortsbeton aus dem San Bernardino-Tunnel, Nationalstrasse A13, GR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen).

4.2.2 Sulfatangriff und Thaumasitproblematik

Wie vorgängig bereits erwähnt, kann der Auslaugungsprozess von unterschiedlich ausgeprägter sekundärer Mineralneubildung überlagert sein. Bei sulfathaltigem Bergwasser tritt dabei im Gegensatz zur Lehrmeinung und zur Sulfatprüfung im Labor, wo zur Hauptsache Ettringit gebildet wird (vgl. dazu auch Kapitel 3.5), meist das Mineral Thaumasit auf, ein Ca-Si-Sulfat-Karbonat-Hydrat mit der chemischen Zusammensetzung $\text{Ca}_6[\text{Si}(\text{OH})_6]_2(\text{CO}_3)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, welches sich bevorzugt bei tiefen Temperaturen unter 10°C bildet (siehe Tab. 2; Bensted, 2000; Hartshorn et al., 1999). Dieses bildet mit Ettringit eine unvollständige Mischreihe mit Woodfordit als Zwischenglied. Thaumasit lässt sich wie Ettringit (vgl. Fig. 5) sowohl als meist feinfaserige Füllung in Rissen und Hohlräumen wie auch als kryptokristallines Alterationsprodukt im Zementstein selber nachweisen und kann im fortgeschrittenen Schädigungsstadium zur Bildung einer weichen Masse führen, da das Mineral im Unterschied zu den C-S-H- und C-A-H-Phasen des Zementsteins kein Bindevermögen aufweist (Bensted, 2000). Dieser Umwandlungsprozess geht somit in Spritzbeton, in Massenbeton und auch in Tübbing-Elementen mit einem vollständigen Festigkeitsverlust und oftmals auch mit einem Verlust des Verbundes mit dem Felsuntergrund einher (besonders bei Gunitauskleidungen, vgl. Fig. 8).

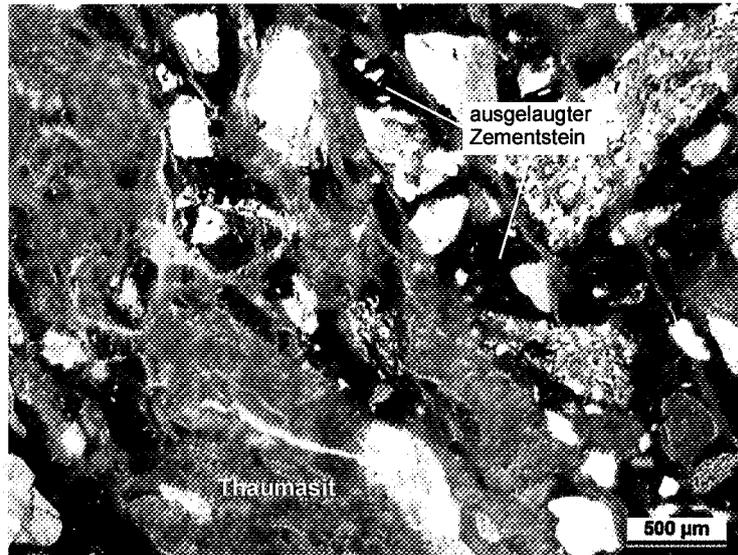
Analog zu Auslaugungsphänomenen findet sich Thaumasit wiederum besonders im Bereich von Inhomogenitäten, wo das Bergwasser zirkulieren kann und die für dessen Kristallisation notwendigen Stoffe (v.a. Sulfat und Karbonat) in Lösung leicht zugeführt werden können. Er tritt aber nicht nur in ausgelaugten Zonen entlang von Inhomogenitäten, sondern auch als in-situ Umwandlung von frischem Zementstein auf. Die verschiedenen Formen der Thaumasit-Bildung sollen nachfolgend anhand von drei exemplarischen Beispielen veranschaulicht werden:

1. In stark ausgelaugten Zonen, hier als Korrosionszonen bezeichnet, kommt Thaumasit normalerweise in geringen Mengen als Riss- und Porenfüllung vor und ersetzt das amorphe S-H-Gel ausgehend von feinen Rissen nur stellenweise (Fig. 15). Dies hängt damit zusammen, dass dabei neben dem Sulfat und dem Karbonat auch das benötigte Ca^{2+} entweder über das Bergwasser allein zugeführt oder in nahegelegenen frischeren Zementsteinzonen gelöst und durch den Porenraum diffusiv zugetragen werden muss. Die beschränkte Verfügbarkeit von Calcium kontrolliert somit die entstehende Menge an Thaumasit in der Korrosionszone. Die ausgeprägte Rissbildung sowohl parallel wie auch senkrecht zum Felskontakt weist ausserdem auf einen Spannungsaufbau infolge Volumenausdehnung im Beton hin, welcher mit diesem Prozess einhergehen dürfte.



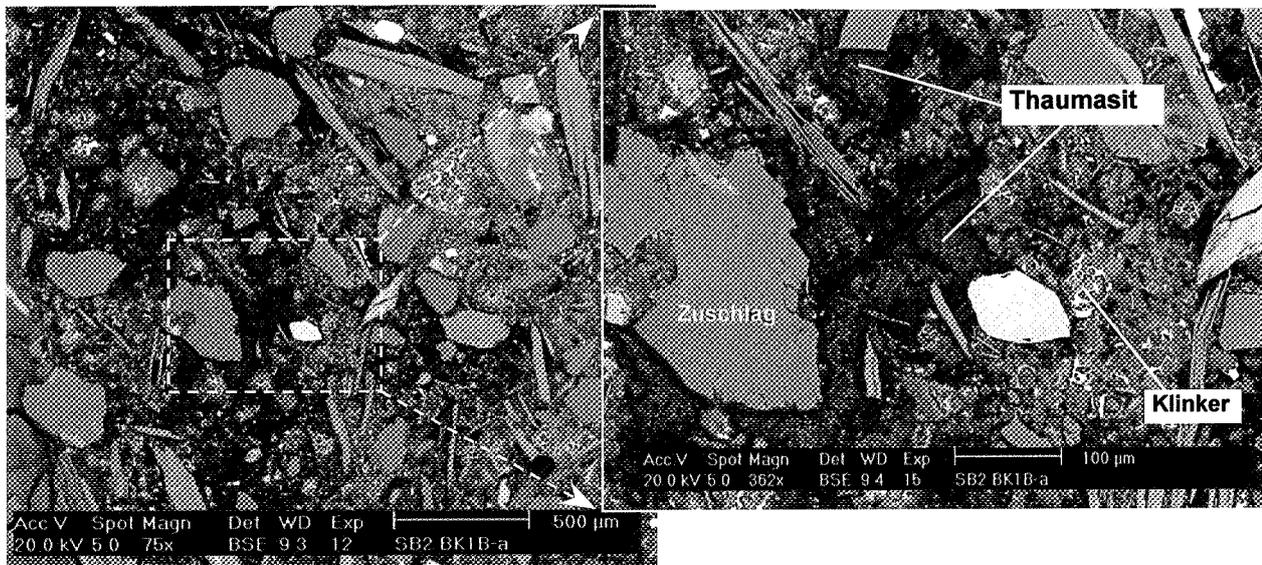
Figur 15: Stark ausgelaugte Korrosionszone am Kontakt zum Fels (oben anschliessend im Bild, weggebrochen), von zahlreichen Rissen durchzogen. Thaumasit findet sich einerseits als Füllung innerhalb dieser Risse und hat andererseits das amorphe S-H-Gel randlich derselben teilweise ersetzt, was sich im fluoreszierenden Auflicht (rechtes Bild) auch in einer erhöhten Zementsteindichte entlang der Risse äussert. Dieser Spritzbeton aus dem Harderband-Tunnel (Bauenstrasse, UR; vgl. Fig. 1 und Tab. 1) ist durch schwach mineralisiertes Bergwasser derart stark umgewandelt worden, dass es zu verkehrsgefährdenden Schädigungen (Verbundsverlust mit dem Felsuntergrund und Abbrechen von m^2 -grossen Gunitplatten) gekommen ist (links Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen, rechts fluoreszierendes Auflicht).

2. In weniger stark ausgelaugten Bereichen (sog. Auslaugungszonen) sind die C-S-H-Phasen des Zementsteins zumindest teilweise noch erhalten. Hier kann sich Thaumasit direkt aus einer Umkristallisation von C-S-H auch in grösseren Mengen bilden (Fig. 16), da Calcium und Silizium bereits vorhanden sind und lediglich Sulfat und Karbonat zugeführt werden müssen. Dies stellt besonders bei höher mineralisiertem Bergwasser kein Problem dar, kann aber selbst bei schwach mineralisierten Grundwässern über längere Zeiträume infolge einer Aufkonzentration der entsprechenden Stoffe zu massiven Schädigungen führen, wie aus Fig. 16 ersichtlich ist. Die Umwandlung des Zementsteins und die Thaumasit-Bildung sind dabei ausgehend von kontaktparallel verlaufenden Rissen fortgeschritten, wobei der Zementstein zum Kontakt hin zusehends ersetzt worden und nur noch reliktmässig zwischen den Zuschlägskörnern erhalten ist.



Figur 16: Grosse Mengen von Thaumasit ersetzen den ausgelaugten Zementstein zum Felskontakt hin zusehends (unten links unmittelbar an das Bild anschliessend), ausgehend von kontaktparallel entstandenen Rissen. Der ausgelaugte Zementstein ist zwischen den Zuschlägen noch teilweise erhalten. Spritzbeton bei niedrig mineralisiertem Bergwasser aus dem Harderband-Tunnel, Bauenstrasse, UR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Dünnschliff mit gekreuzten Polarisatoren und Gips-Plättchen).

3. Schliesslich kann Thaumasit ausgehend von Inhomogenitäten auch mehr oder weniger intakten Zementstein in-situ ersetzen (Fig. 17), wobei die C-S-H-Phasen und Portlandit direkt zu Thaumasit umkristallisiert werden. Obschon dabei neben Si und Ca je nach Zementart auch Al (C-A-H-Phase, C_3A , Monosulfat etc.) in ausreichender Menge verfügbar wäre, lässt sich in derart geschädigten Zonen im allgemeinen nur wenig Ettringit zusammen mit viel Thaumasit beobachten. Dies dürfte unter anderem darin begründet sein, dass neben Sulfat- (SO_4^{2-}) auch Hydrogenkarbonat-Ionen (HCO_3^-) durch das Bergwasser zugeführt werden. Wie aus Fig. 17 weiter ersichtlich ist, schreitet diese in situ-Umwandlung der Zementsteinphasen entlang einer sehr unregelmässig verlaufenden Reaktionsfront fort. Dies hängt damit zusammen, dass die Umwandlung zunächst den lokal schwächeren und durchlässigeren Zonen mit geringerer Dichte resp. erhöhter Kapillarporosität folgt, wie sie beispielsweise entlang von Zuschlägen infolge von lokal erhöhten W/Z-Werten auftreten. Die bei diesem Prozess nicht benötigten beziehungsweise nicht umgesetzten Stoffe (wie z.B. K und Na, sowie überschüssiges Ca) gehen in Lösung und werden mit dem Bergwasser advektiv rasch abgeführt. Dieser zugleich ablaufende Lösungsvorgang resultiert in Analogie zur Auslaugung sowohl in einer zusätzlichen Erhöhung der Porosität (in Fig. 17 erkennbar anhand der dunkleren Tönung der alterierten Bereiche) und einer Abnahme der Festigkeit als auch in einer Reduktion des pH-Wertes. Dadurch wird der Thaumasit gegenüber Ettringit zusätzlich stabilisiert, da Ettringit bei einem pH unter 10 nicht mehr stabil ist (siehe auch Ausführungen unter Kapitel 3.5). Die erhöhte Porosität begünstigt ausserdem die Stoffzu- und Abführung durch das Bergwasser, womit die Reaktion aufrechterhalten wird und bis zur vollständigen Umwandlung des Zementsteins fortschreiten kann. Dabei geht die Festigkeit des Betons schliesslich unter der Bildung einer weichen, kohäsionslosen Masse, in welcher die Zuschläge nur noch lose «schwimmen», vollständig verloren (vgl. Fig. 8 und 9).



Figur 17: In-situ Umwandlung von mehr oder weniger intaktem Zementstein zu feinfaserigem Thaumassit bei der Interaktion mit hoch mineralisiertem Bergwasser (sowohl hohe Sulfat- wie auch Karbonatkonzentrationen; links Übersicht, rechts Detailausschnitt). Die Umwandlung findet entlang einer sehr unregelmässig strukturierten Reaktionsfront statt und ist mit einer Dichtereduktion verbunden, erkennbar an der dunkleren Tönung der alterierten Bereiche. Ortsbeton aus dem San Bernardino-Tunnel, A13, GR (vgl. Fig. 1 und Tab. 1; Rückstreuerelektronenbilder unter dem Rasterelektronenmikroskop).

Das Vorkommen von Thaumassit-Nadeln in Rissen, Poren und Lunkern in grösserer Distanz zu den Inhomogenitäten belegt zudem, dass die schädigenden Stoffe über Diffusionsprozesse mit der Feuchtigkeit durch den Porenraum weit ins Innere des Betons getragen werden können und dort zu Mineralneubildungen führen.

Wie zuvor schon in Zusammenhang mit Auslaugungsprozessen diskutiert, ist auch die Umwandlung des Zementsteins zu Thaumassit nur indirekt vom Baustofftyp und vom Mineralisierungsgrad des Bergwassers, jedoch stark von der Art der darin gelösten Stoffe, dh. von der Wasserchemie, abhängig. Denn diese bestimmt, welche Mineralien überhaupt als sekundäre Neubildungen in Frage kommen. Im Falle von Thaumassit stellen somit die Gehalte an gelösten SO_4^{2-} - und HCO_3^- -Ionen im Wasser wichtige Faktoren dar, während Ca und Si – mit Ausnahme von vorangehender sehr starker Auslaugung – in ausreichender Menge im Baustoff vorhanden sind. Bei einem höheren Mineralisierungsgrad und/oder einer grösseren Wassermenge kann der Umwandlungsprozess allerdings bedeutend schneller ablaufen, da dadurch die Verfügbarkeit der notwendigen Ionen besser gewährleistet wird.

Massive Schadensphänomene in Zusammenhang mit der Thaumassitbildung lassen sich teilweise bereits nach kurzer Zeit auch bei Verwendung von Betonrezepturen mit erhöhtem Sulfatwiderstand (HS-Zement) resp. bei vorfabrizierten Tübbing-Elementen aus HS-Beton (z.B. Zugwald-Tunnel, vgl. Holzer, 1999) beobachten. Diese stehen in Kontakt mit einem hochmineralisierten Bergwasser, welches neben hohen Sulfat- und Karbonat-Konzentrationen auch Gehalte an Mg, Na und Chlorid aufweist. Demnach bieten auch HS-Zemente mit tiefen Al-Gehalten, welche allgemein als sulfatresistent gelten, keinen ausreichenden Schutz vor einem Sulfatangriff infolge Thaumassitbildung, da das im Baustoff enthaltene Al am Schädigungsprozess nicht zwingend beteiligt ist. Dagegen kann sich eine Erhöhung der Zementsteindichte, beispielsweise infolge Microsilica-Zugabe (z.B. Gotschna-Tunnel, vgl. Tab. 1), durchaus positiv auswirken, da die Reaktion dank der geringeren Wassereindringtiefe und dem reduzierten Stoffaustausch langsamer fortschreitet.

5. Diskussion der Schädigungsmechanismen

Die in Kapitel 4 beschriebenen Schädigungsphänomene aus ausgewählten Tunnelobjekten weichen in vielen Belangen von den in Kapitel 3 diskutierten «statischen» Beispielen (Wasserreservoir und Sulfatprüfung) ab. Offensichtlich sind die Verhältnisse am Bauwerk viel komplizierter, was auch zu einem komplexeren Schadensverlauf führt. In diesem Kapitel sollen diese Unterschiede erläutert und darauf aufbauend entsprechend verfeinerte Modelle für die Schädigungsmechanismen diskutiert werden.

5.1 Mechanismen bei der Auslaugung von Zementstein

In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Aspekte der Auslaugung in Wasserreservoirs und in Tunnelbauwerken einander gegenübergestellt. Es ist qualitativ ersichtlich, dass die Auslaugung im Tunnelmilieu schneller fortschreitet und auch intensivere Schädigungen hervorruft. Diese beschleunigte Auslaugung tritt immer dort auf, wo Wasser geeignete Wegsamkeiten (v.a. Inhomogenitäten) für die Zirkulation findet und daher der Stofftransport nicht nur durch Diffusion, sondern auch durch Advektion zustande kommt.

Auslaugung in Wasserreservoirs	Auslaugung in Tunnelbauwerken		
Milieu stehendes Wasser (statisch) niedriger Mineralisationsgrad i.d.R. dichter Ortsbeton	fliessendes Bergwasser (dynamisch) stark und schwach mineralisiertes Wasser sowohl in Ortsbeton als auch im Spritzbeton		
Schadenslokalität oberflächlich am Kontakt Beton - Wasser	entlang von Fliesswegen: auf Oberfläche, an Felskontakt und entlang von inneren Inhomogenitäten wie Rissen, Fugen, Lunkersystemen und v.a. auch entlang von Schichtgrenzen im Spritzbeton		
Schadensverlauf wenige cm nach 100 J. kaum Probleme	bis mehrere cm schon nach 2 Jahren relativ rasches Fortschreiten der Auslaugungsfront, welche mit der Zeit zu Zonierungen führt		
Mechanismus rein diffusiver Transport $J = -D \cdot (dC/dX)$ Verlangsamung mit der Zeit ($t^{1/2}$) wegen Abflachen von Konz.-gradient Weglösen v.a. von Alkalien Ca-Pufferung durch Portlandit pH nur stellenweise reduziert CSH und Ettringit bleiben stabil	Phase I (Na, K, Portlandit) kombinierter Transport: Diffusion langsam, kurze Distanz Advektion schnell und entlang von Wegsamkeiten Alkalien und Portlandit weggelöst Portlandit = 20% v. Zementstein dadurch erhöhte Permeabilität	Phase II (Übergangsphase) Das vollständige Weglösen von Alkalien und Portlandit führt zu: a) pH-Reduktion: Ettringit instabil b) Ca-Reduktion: C-S-H instabil c) hohe Permeabilität: Advektion Selbstbeschleunigung	Phase III (C-S-H-breakdown) nur noch amorphes S-H stabil > 60% von Zementstein weg Stark permeable Zone begünstigt Advektion (=Selbstbeschleunigung) Vollständiger Verlust von Festigkeit und Kohäsion, z.T. Thaumassinubildungen
	Phase I > II > III: zeitliches und räumliches Fortschreiten der Auslaugung		

Tabelle 3: Gegenüberstellung von Parametern und Phänomenen im Zusammenhang mit der Auslaugung von Zementstein bei statischen Bedingungen (z.B. Wasserreservoirs) und in dynamischen Milieus (häufig in Tunnelbauwerken).

In statischen Milieus von Wasserreservoirs oder Staudämmen gleichen sich die Konzentrationsgradienten mit der Zeit aus, so dass die Diffusionsgeschwindigkeit und das Fortschreiten der Auslaugungsfront zunehmend verlangsamt wird. Im Tunnelmilieu mit fliessendem Bergwasser überlagert der advective Stofftransport die Diffusion. Durch den effizienten Wegtransport von gelösten Stoffen mit den migrierenden Wässern kommt es auch zu einer Vergrößerung der Permeabilität, weil Bestandteile der Zementmatrix aufgelöst werden. Dadurch wird die Wassermigration ihrerseits wieder begünstigt. Die advektionskontrollierte Auslaugung weist also zumindest während bestimmten Phasen des Schadensverlaufes eine Tendenz zur Selbstbeschleunigung auf. Weil der advective Stofftransport viel effizienter als die Diffusion ist, kommt es bei fliessendem Wasser nicht nur zu einem rascheren Fortschreiten der Auslaugungsfront. Auch die Intensität der Auslaugung ist viel stärker, so dass oft nur noch ein korrodiertes Relikt des ursprünglichen Zementsteins zurückbleibt. Dieses Relikt besteht mehrheitlich aus amorphem Siliciumoxid (SiO_2) und Wasser.

Schädigungsmodell für die advektionsdominierte Auslaugung:

(vgl. auch Holzer & Romer, 1999)

➤ Phase 1: Auslaugung von Alkalien, Auflösung von Portlandit

Das Bergwasser findet Wegsamkeiten durch die Betonauskleidung entlang von kleinen Inhomogenitäten (z.B. Rissen). Aus dem unmittelbar angrenzenden Zementstein (**Auslaugungszone**) diffundieren gelöste Stoffe nur langsam in diese Zonen mit migrierenden Wässern. Zusätzlich kommt es aber auch zu einem Austausch zwischen dem nachfliessenden Bergwasser in den Fließwegen und dem Porenwasser in der angrenzenden Auslaugungszone. Wegen dieses Austausches werden die Löslichkeitsgleichgewichte zwischen dem Zementstein und dem Porenwasser immer wieder gestört. Dadurch wird das nachfliessende Wasser fortlaufend neu mit Alkalien (z.B. durch inkongruente Lösung aus der C-S-H-Phase) und mit Calcium (durch Auflösung von Portlandit) angereichert. Diese Auflösungsprozesse sind in der Anfangsphase nur auf schmale Auslaugungszonen beschränkt, welche die Wasserwegsamkeiten (Risse, auch Mikrorisse, Kontaktflächen, Fugen, poröses Interface entlang von Zuschlagskörnern) umsäumen. Obschon in dieser Phase bereits alle Alkalien aus der Auslaugungszone wegtransportiert werden können, wird der hohe pH dank der Ca-Pufferung durch den Portlandit noch aufrechterhalten, was z.B. für die Stabilität von Ettringit und der C-S-H-Phasen wichtig ist. Dank dieser Pufferung bleibt auch die Ca-Konzentration in der Porenlösung höher als 2–4 mmol/l, so dass sich das entsprechende Ca/Si-Verhältnis in den C-S-H-Phasen noch nicht wesentlich verändert (vgl. Fig. 2).

➤ Phase 2: «Übergangsphase»

Durch die teilweise Auflösung von Portlandit in der ersten Phase erhöht sich die Porosität im Zementstein bereits um einige Vol.-%. Dies begünstigt den Austausch von Wasser zwischen der Auslaugungszone (mit Porenlösung) und den Wasserwegsamkeiten mit nachfliessendem Bergwasser. Die in der Phase 1 beschriebenen Advektions-Effekte werden also verstärkt, was sowohl eine Intensivierung als auch eine räumliche Ausweitung der Auslaugung nach sich zieht. Im fortgeschrittenen Auslaugungsstadium wird der verbleibende Portlandit vollständig aufgebraucht, und es kommt zu einem chemischen Milieuwechsel, weil Calcium nicht mehr durch die Portlanditlöslichkeit gepuffert wird. Dadurch verringert sich der pH-Wert in der Porenlösung, was zu einer Destabilisierung von Ettringit führt. Mit der Auflösung von Ettringit werden nun auch Schwefel und Aluminium mobilisiert.

Das Aufbrauchen der Portlanditreserve durch den advektionskontrollierten Stofftransport kann mit einer stark vereinfachten Modellrechnung veranschaulicht werden. Dabei wird die Annahme getroffen, dass jeweils die ganze Porenlösung in der Auslaugungszone mit nichtmineralisiertem Bergwasser aus den Fließwegen ausgetauscht werden kann. Daraufhin stellt sich durch Lösungsprozesse eine Calciumsättigung in der Porenlösung ein. Anschliessend wird wiederum das Wasser ausgetauscht und der Lösungsprozess beginnt von neuem usw. Wir betrachten nun dieses Auslaugungsverhalten bezogen auf den Ca-Gehalt in einem Zementsteinwürfel mit 1 cm Kantenlänge. Der Ca-Gehalt beträgt zu Beginn ca. 28.1 mmol/cm³ (ca. 60% in Portlandzement), wobei 6.8 mmol in Form von Portlandit (20% des Zementsteins) vorliegen, und der Rest zum grössten Teil in der C-S-H-Phase (70% des Zementsteins) gebunden ist. Bei einem Porenvolumen von 10% enthält dieser Würfel im gesättigten Zustand 0.1 ml Porenlösung. Um die Porenlösung mit Calcium zu sättigen (ca. 20 mmol/l) müssen ca. 2 µmol Ca in Lösung gehen. Um nun durch den beschriebenen Prozess die gesamte Menge an Portlandit wegzulösen, müsste die Porenlösung 3400 mal ausgetauscht werden. In Zonen, in welchen dieser Austausch stündlich stattfindet, dauert es nur gerade 140 Tage, bis die gesamte Portlanditreserve aufgebraucht ist.

In der Realität hängt dieser Prozess natürlich von vielen verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. Porosität und Permeabilität, Portlanditgehalt, Temperatur und Kinetik der Lösungsprozesse. Da es sich um dynamische und kontinuierliche (nicht schrittweise) Prozesse handelt, variieren diese Faktoren zeitlich und räumlich. Mit dem Fortschreiten der Auslaugung und der damit verbundenen vollständigen Auflösung von Portlandit erhöht sich z.B. das Porenvolumen in der Auslaugungszone auf ca. 30 Vol.-%, was den advektiven Stoffaustausch stark begünstigt und die Auslaugung in der Phase 3 tendenziell beschleunigt.

➤ Phase 3: Umwandlung von C-S-H zu S-H

Im fortgeschrittensten Stadium der Auslaugung bildet sich eine sehr permeable **Korrosionszone** aus, welche fast nur noch aus Siliciumoxid und Wasser besteht. Es kommt also in der dritten Phase zu einer inkongruenten Lösung der C-S-H-Phasen, wobei sich ein amorphes S-H-Gel bildet (vgl. Fig. 2). Nach der vollständigen Auflösung der Portlandreserve in der zweiten Phase ist die Ca-Konzentration in der Porenlösung nicht mehr gepuffert. Mit der Reduktion von Calcium in der Lösung sinkt auch das Ca/Si-Verhältnis in der C-S-H-Phase, wobei diese Abhängigkeit nicht linear ist. Der Stabilitätsbereich von relativ hohen Ca/Si-Verhältnissen (1.1–1.6) in der C-S-H-Phase erstreckt sich über einen grossen Bereich der Ca-Konzentration von ca. 4 bis > 20 mmol/l. Bei einer weiteren Abnahme der Ca-Konzentration unter 3 mmol/l wird der C-S-H-Phase praktisch alles Calcium durch inkongruente Lösung entzogen. Dieser Übergang findet also schon bei kleinen Konzentrationsänderungen statt. Dies ist die Ursache, warum man zwischen der Auslaugungszone mit noch intakten C-S-H-Phasen und der Korrosionszone aus praktisch reinem S-H-Gel einen relativ scharfen Übergang beobachtet.

In Portlandzement beträgt der Gehalt an Silicium nur ca. 20 Gew-%. Die Korrosionszone enthält also nur noch ein reliktsches Silicium-Gerüst (in Form von amorphem Siliciumdioxid-Hydrat: S-H-Gel). Alle übrigen Bestandteile des ursprünglichen Zementsteins sind weggelöst worden. Die Korrosionszone bildet somit eine sehr permeable Zone zwischen den beschriebenen Fliesswegen (z.B. Mikrorisse) und der fortschreitenden Auslaugungszone. Durch die hohe Permeabilität ist der Wasseraustausch weiterhin leicht möglich, wodurch der advective Stofftransport auch bei einer weiteren Ausweitung der Auslaugungszone (Phasen 1 und 2) stattfinden kann. Das nachfliessende Wasser wird in der Korrosionszone seinen Chemismus durch Interaktion mit dem Zementstein praktisch nicht verändern, weil alle wesentlichen reaktiven Stoffe schon weggeführt worden sind. Das Silicium-Gerüst ist gegenüber chemischen Angriffen sehr stabil, weil bei dem sich einstellenden niedrigen pH-Wert die Löslichkeit sehr gering ist. Allerdings kann sich in der Korrosionszone Thaumasil bilden, wenn das Bergwasser sulfat- und karbonathaltig ist. Durch die Thaumasilbildung kann es letztlich zu einem vollständigen Festigkeits- oder Kohäsionsverlust kommen. Die Thaumasilproblematik wird im nachfolgenden Kapitel 5.2 ausführlich diskutiert.

5.2 Mechanismen der Thaumasil-Bildung

Neben der Auslaugung des Zementsteins stehen die beobachteten Bergwasser-Schädigungen in praktisch allen untersuchten Tunnelobjekten (vgl. Fig. 1, Tab. 1) auch mit der Bildung von Sulfatmineralien in Zusammenhang. Dabei stellt jedoch der klassische Sulfatgriff durch die expansive Ettringitbildung (vgl. Kapitel 3.5) nie das Hauptproblem dar. Hingegen kann die Thaumasilbildung, welche bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen und in verschiedenen Schädigungsformen auftritt, fast immer beobachtet werden. Im folgenden Abschnitt sollen die Bildungsmechanismen von Thaumasil und die damit verbundenen Einflussfaktoren diskutiert werden.

In Tabelle 4 sind die wichtigsten Unterschiede zwischen der Ettringit- und der Thaumasilbildung zusammengefasst. Während die maximale Ettringitmenge bei externer Sulfatzufuhr durch den Aluminiumgehalt des Zementsteins (3–6%) beschränkt ist, kann sich Thaumasil auf Kosten von silikatischen Zementkomponenten, insbesondere der C-S-H-Phasen (ca. 70% des Zementsteins), bilden. Der klassische Sulfatgriff ist wahrscheinlich auch wegen der beschränkteren Stabilität von Ettringit seltener im Tunnelmilieu anzutreffen. Ettringit ist nämlich nur in alkalischem Milieu stabil und zerfällt daher bei starker Auslaugung, selbst wenn das Bergwasser sehr hohe Sulfatkonzentrationen aufweist. Thaumasil ist hingegen auch bei niedrigem pH stabil und wird zusätzlich besonders bei tiefen Temperaturen gegenüber Ettringit bevorzugt gebildet. Hat sich Thaumasil ausserdem erst einmal entwickelt, so ist er ganz allgemein stabiler als Ettringit: während die Zersetzung von Ettringit bereits bei 50–60°C einsetzt, bis dieser bei rund 90°C gänzlich zerfällt, bleibt Thaumasil bis zu 110°C unverändert erhalten (Bensted, 2000).

klassischer Sulfatgriff	Thaumasitproblematik in Tunnelbauwerken	
expansive Ettringitbildung $\{Ca_2[Al(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(2H_2O) \cdot (SO_4)_2]$	$\{Ca_6[Si(OH)_6]_2 \cdot 24H_2O\} \cdot [(CO_3)_2 \cdot (SO_4)_2]$	
Milieu Ettringit braucht Aluminium aus Zementstein externe Zufuhr von SO_4^{2-} Ettringit ist oberhalb von 50°C instabil Ettringit ist unterhalb von pH 10 instabil stehendes Wasser (statisch)	Thaumasit braucht v.a. Silicium aus dem Zementstein, Aluminium als Auslöser bei indirekter Bildung (siehe unten). externe Zufuhr von SO_4^{2-} , CO_3^{2-} und z.T. Ca → Thaumasitbildung bereits bei tiefen Sulfatkonzentrationen möglich! tiefe Temperaturen (<<15°C) begünstigen Thaumasit gegenüber Ettringit, Thaumasit bleibt aber bis >100°C stabil. Thaumasit ist auch bei tiefem pH stabil und kann deshalb in Auslaugungszonen gebildet werden oftmals im Zusammenhang mit fließendem Bergwasser (dynamisch) und Auslaugungsphänomenen.	
Mechanismus Sulfataufnahme in wassergesättigter Zone Reaktion mit Aluminium im Zementstein Expansionspotential von Ettringitbildung ist abhängig davon, welche aluminiumhaltige Phase beteiligt ist (Monosulfat, C-A-H, C ₃ A)	<u>indirekte Thaumasitbildung aus Ettringit</u> Substitution von Al durch Si Einbau von CO_3^{2-} Die Mischreihe Ettringit-Thaumasit ist unvollständig, es bildet sich ein Zwischenprodukt: Woodfordit.	<u>direkte Thaumasitbildung aus C-S-H</u> Umwandlung von C-S-H in Thaumasit benötigt kein Aluminium. → Thaumasitbildung ist auch bei Zement mit erhöhtem Sulfatwiderstand möglich.
Schadensverlauf Risse und Gefügauflockerungen Dehnung proportional zur Sulfataufnahme Messbare Dehnung (bei Schnelltest 28 Tage)	Thaumasit aus Ettringit ist nicht expansiv, führt aber zu einem Festigkeitsverlust. Die vorausgehende Ettringitbildung führt zu Schäden wie beim klassischen Sulfatgriff (Risse und Auflockerung). Meistens laufen beide Mechanismen (direkte und indirekte Thaumasitbildung) kombiniert miteinander ab.	Bei der direkten Thaumasitbildung kommt es zu Expansion und Festigkeitsverlust. Da die Thaumasitmenge nicht durch den Aluminatgehalt beschränkt ist, kann sich der Zementstein praktisch vollst. in Thaumasit umwandeln → vollst. Festigkeitsverl.
Schadensiokalität v.a. in porösen Schwächezonen wie z.B. am Interface von Zuschlagskörnern Ettringit ist nie mit Auslaugung assoziiert.	Je nach Mechanismus bildet sich Thaumasit in Auslaugungszonen (aus C-S-H oder aus S-H, z.B. am Felskontakt) oder in-situ im intakten Zementstein (direkte und indirekte Bildung möglich). Im fortgeschrittenen Stadium beobachtet man häufig eine Umwandlung in eine weiche Masse.	

Tabelle 4: Gegenüberstellung von Mechanismen, Parametern und Phänomenen im Zusammenhang mit der Sulfatproblematik: klassischer Sulfatgriff mit expansiver Ettringitbildung (z.B. bei der Sulfatbeständigkeitsprüfung) vs. Thaumasitproblematik in Tunnelbauwerken.

➤ Theoretische Thaumasitbildung durch direkten und indirekten Reaktionsverlauf

Grundsätzlich kann Thaumasit durch zwei unterschiedliche Reaktionen – «direkt» und «indirekt» – gebildet werden (Bensted, 2000; Grijalvo et al., 2000). Die «direkte» Thaumasitbildung stellt eine Umwandlung auf Kosten der C-S-H-Phasen dar. Da der hydratisierte Portlandzement über 70% C-S-H enthält, kann sich praktisch der ganze Zementstein bei idealen Bedingungen direkt in Thaumasit umwandeln. Um die gesamte SiO_2 -Reserve aus der C-S-H-Phase umzusetzen, muss allerdings mit dem Bergwasser neben Karbonat und Sulfat auch eine gewisse Menge an Calcium zugeführt werden. Wenn diese Reaktion so weit fortschreitet, dass 20–50% des Zementsteins in Thaumasit umgewandelt wird, kommt es zu einem vollständigen Festigkeitsverlust, da Thaumasit nicht erhärtungsfähig ist und kein Bindevermögen aufweist (Bensted, 2000). Wegen der externen Zufuhr von Calcium, Sulfat, Karbonat und Wasser ist die Thaumasitbildung auf Kosten der C-S-H-Phasen mit einer grossen Volumenänderung verbunden (1.5–4-fache Volumenzunahme), ähnlich wie die expansive Ettringitbildung. Zusätzlich zum Festigkeitsverlust kommt es also auch zu einem Aufquellen des Zementsteins.

Bei der «indirekten» Thaumasitbildung kommt es zu einer Umwandlung ausgehend von Ettringit:



Dabei wird das Aluminium im Kristallgitter von Ettringit durch Silicium substituiert. Zusätzlich wird auch Karbonat eingebaut (Stark & Wicht, 1995). Da diese Mischreihe von Ettringit zu Thaumasit nicht vollständig ist, bildet sich als Zwischenprodukt das Mineral Woodfordit (Bensted, 2000). Die indirekte Thaumasitbildung kann also kombiniert mit dem klassischen Sulfatangriff vorkommen, wobei die expansive Ettringitbildung mit den häufig beobachteten Rissen eine Vorstufe darstellt. Die eigentliche Umwandlung von Ettringit zu Thaumasit weist selber keine expansive, ja allenfalls sogar eine kontraktive Wirkung auf, da beide Mineralien ähnliche molare Volumina aufweisen.

➤ Thaumasitbildung im Tunnelmilieu

Die aus der Literatur bekannten Bildungsmechanismen müssen aufgrund der in Kapitel 4 beschriebenen Beispiele aus Tunnelbauwerken noch weiter differenziert werden. Thaumasit kann sich in-situ auf Kosten von noch gesundem Zementstein bilden. Er kann aber auch in Auslaugungszonen durch eine Umwandlung der C-S-H-Phasen und in Korrosionszonen durch eine Umwandlung von amorphem S-H-Gel entstehen:

• In-situ Thaumasit-Bildung:

Thaumasit kann sich in einem noch kaum alterierten Zementstein in-situ ausbilden. Weil hier der Zementstein keine Auslaugungsphänomene aufweist, ist das Milieu noch alkalisch. Der Zementstein enthält auch noch genügend Aluminium, so dass sich bei externer Sulfatzufuhr zunächst Ettringit bilden kann. Durch die damit verbundene Volumenzunahme kann es zu einer Gefügearauflockerung und ev. auch zu Rissbildungen kommen. Dadurch wird die Nachfuhr von sulfatreichem Wasser begünstigt. Da aber stark mineralisiertes Bergwasser in den meisten Fällen neben Sulfat auch Hydrogenkarbonat und andere aggressive Stoffe (z.B. Magnesium, Natrium oder Chlorid) enthält, verläuft der Sulfatangriff nicht nur über die Ettringitbildung, wie dies beispielsweise bei den Laborprüfungen der Fall ist. In Abhängigkeit vom Wasserchemismus kann sich eine Vielzahl von weiteren Sulfatmineralien bilden (z.B. Thaumasit, Gips, Bassanit oder Thenardit). Die meisten natürlichen Wässer enthalten eine gewisse Konzentration an gelöster Kohlensäure. Durch die Zufuhr von Kohlensäure (respektive Hydrogenkarbonat HCO_3^-) scheint die Bildung von Thaumasit auch im alkalischen Milieu gegenüber Ettringit bevorzugt zu werden. Dabei kann sich Thaumasit sowohl direkt auf Kosten der C-S-H-Phasen als auch indirekt auf Kosten von Ettringit entwickeln. Diese in-situ Umwandlungen konnten insbesondere bei hohen Sulfat- und Karbonat-Konzentrationen beobachtet werden.

• Thaumasit-Bildung in der Korrosionszone:

In den stark ausgelaugten Zonen (sog. Korrosionszone, vgl. Phase 3 der advektionskontrollierten Auslaugung, Kapitel 5.1) kommt es nach dem Aufbrauchen des Portlandit-Puffers zu einem chemischen Milieuwechsel, wobei praktisch alle Stoffe ausser Siliciumdioxid wegtransportiert werden. Der verbleibende Zementstein ist sehr porös und besteht fast ausschliesslich aus einem amorphen S-H-Gel. Durch die damit verbundene pH-Reduktion wird Ettringit instabil, so dass auch das an sich immobile Aluminium abgereichert wird. In der Korrosionszone verbleibt also nur noch Silicium als interner Reaktionspartner für extern zugeführte Stoffe.

In vielen Fällen findet man in der Korrosionszone Thaumasit-Neubildungen, wobei die Menge der sekundären Mineralien stark variiert. Limitierende Faktoren sind nicht intern vorhandenes Silicium, sondern extern mit dem Bergwasser zugeführtes Sulfat, Karbonat und besonders Calcium. Die Menge dieser Stoffe, welche während einer längeren Zeitdauer eingetragen werden können, hängt dabei sowohl von der Konzentration als auch von der Durchflussrate ab. Da Korrosionszonen eine sehr hohe Permeabilität aufweisen und somit hohe Durchflussraten ermöglichen, kann sich Thaumasit schon bei Wässern mit einem niedrigen Mineralisationsgrad bilden (z.B. Harderband-Tunnel, vgl. Tab. 1).

- **Thaumasit-Bildung in der Auslaugungszone:**

Bei der advektionskontrollierten Auslaugung ist die Zersetzung des Zementsteins in den Phasen 1 und 2 (Kapitel 5.1) noch nicht so weit fortgeschritten, dass die C-S-H-Phasen durch inkongruente Lösung in ein S-H-Gel umgewandelt worden sind. Das Ca/Si-Verhältnis im Zementstein schwankt zwischen 3 und 1.5, je nachdem wie weit die Auslaugung schon fortgeschritten ist. Im Anfangsstadium der Auslaugung sind auch Ettringit und andere aluminiumhaltige Phasen im Zementstein noch stabil. Durch die beginnende Auslaugung ist aber die Permeabilität bereits erhöht und damit die advektive Zufuhr von Sulfat und Karbonat begünstigt worden.

Stöchiometrisch besteht Thaumasit aus $3 \text{ CaO} : 1 \text{ SiO}_2 : 1 \text{ SO}_3 : 1 \text{ CO}_3 : 15 \text{ H}_2\text{O}$. Auf je ein mol Sulfat und Karbonat aus dem Bergwasser kann ein mol Siliciumdioxid aus der C-S-H-Phase umgesetzt werden. Die entsprechenden 3 mol Calciumoxid können sowohl aus dem Zementstein (aus der C-S-H-Phase oder solange vorhanden aus Portlandit) stammen als auch extern über das Bergwasser zugeführt werden. Bei den untersuchten Tunnelobjekten zeigt es sich, dass sehr viele Bergwässer ausreichend Sulfat und Karbonat enthalten, um mit einem mässig ausgelaugten Zementstein grosse Mengen an Thaumasit zu bilden. Dabei kann Thaumasit zumindest im Anfangsstadium der Auslaugung auch indirekt auf Kosten von Ettringit entstehen. Wie in der Korrosionszone ist auch hier die erhöhte Permeabilität und die infolgedessen begünstigte Stoffzufuhr mindestens ebenso wichtig, wie der Mineralisationsgrad des Bergwassers. Bei entsprechend hoher Durchflussrate kann sich der Zementstein auch bei niedrigen Sulfatkonzentrationen vollständig in Thaumasit umwandeln, was zur Bildung der häufig beobachteten weichen Masse führt (vgl. Fig. 8 und 9).

6. Konsequenzen für die Praxis im Tunnelbau

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass die beiden grundsätzlichen Schädigungsprozesse – Auslaugung des Zementsteins entlang von Inhomogenitäten und Sulfatangriff in Zusammenhang mit Thaumasit-Bildung – praktisch in allen untersuchten Tunnelbauwerken nachgewiesen werden konnten und somit in der Schweiz wie auch im benachbarten Ausland sehr verbreitet sein dürften. Sie stellen besonders bei einschaliger Spritzbetonbauweise eine erhebliche Gefährdung für den Verkehr dar, indem der Verbund mit dem Felsuntergrund grossflächig verloren gehen kann und ganze Teile der Spritzbetonauskleidung vom Tunnelgewölbe herunterbrechen können (z.B. Harderband-Tunnel – Figur 8, Koblenz-Tunnel – Holzer & Romer, 1999). Bei mehrschaligem Ortsbeton oder bei Fertigelementen treten massive Schädigungen demgegenüber eher lokal und besonders in Zusammenhang mit hochmineralisierten, aggressiven Bergwässern auf. Wo der Beton über längere Zeiträume mit dem Bergwasser in Kontakt steht (z.B. Entwässerungssystem: Rigolen, Oberflächen bei ausfliessendem Wasser), kann es zu einer tiefgreifenden Aufweichung des Zementsteins und zu vollständigem Festigkeitsverlust kommen.

Abschliessend sollen die wichtigsten Konsequenzen für die Praxis im Tunnelbau aufgezeigt werden, welche sich aus den beobachteten Schadensphänomenen und den daraus abgeleiteten Schädigungsmechanismen ergeben. Diese sollen helfen, bei laufenden und zukünftigen Tunnelbauprojekten Schädigungen infolge der Interaktion zwischen dem Beton und dem Bergwasser durch geeignete Planung und Projektierung zu minimieren oder möglichst langfristig zu verhindern, sowie bei Sanierungsarbeiten in bestehenden Tunnelbauwerken geeignete Massnahmen ergreifen zu können.

Konsequenzen für die Tunnelkonstruktion:

- Einschalige Auskleidungen mit Spritzbeton beinhalten das Risiko, dass bereits geringfügige Veränderungen des Betons im Übergang zur Auflage durch die Interaktion mit dem Bergwasser zu reduzierter Haftung führen. Dadurch können Stücke der Auskleidung abgelöst werden und letztlich abstürzen.
- Im allgemeinen gilt, dass Gunitauskleidungen gegenüber Ortsbeton- oder Fertigbetonbauteilen anfälliger sind auf schädigende Bergwasserinteraktionen. Dies hängt mit dem lagigen Aufbau des Spritzbetons und seiner Durchlässigkeit zusammen.
- Beim Einbau, der Verdichtung und letztlich der Nachbehandlung des Betons ist zu beachten, dass eine möglichst gleichmässige Verteilung der Betonqualität erreicht wird. Risse jeder Art, aber auch Kiesnester, unregelmässig intensive Verdichtung oder Anschlüsse (Fugen) stellen primäre Inhomogenitäten dar und sind bevorzugt von schädigenden Einflüssen des Bergwassers betroffen (Wasserwegsamkeiten).
- Das Drainage- und Entwässerungssystem des Tunnels muss möglichst langfristig gewährleisten, dass das Bergwasser nicht auf unvorhergesehene Weise gezwungen ist, den Beton unter Druck zu durchdringen.

Konsequenzen für die verwendeten Baustoffe:

- In Zusammenhang mit der Sulfat-Problematik hat sich gezeigt, dass hauptsächlich Thaumasit und nur untergeordnet Ettringit als schädigende Mineraleubildungen auftreten. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zur gängigen Lehrmeinung über den klassischen Sulfatangriff dar.
- Die Schädigungen infolge von Thaumasit-Bildung können viel weitreichender sein als jene von Ettringit, da dabei der Zementstein praktisch vollständig in eine weiche Masse umgewandelt werden kann.
- Im Gegensatz zum klassischen Sulfatangriff bieten HS-Zemente mit reduziertem Aluminatgehalt keinen ausreichenden Schutz vor einem Thaumasit-Angriff, da Aluminium nicht zwingend an der Reaktion beteiligt ist.

- Es muss angestrebt werden, möglichst dichten Beton herzustellen, damit die Migration des Bergwassers und damit der Stofftransport gehemmt ist.
 - Bei der Optimierung der verwendeten Baustoffe ist zu berücksichtigen, dass die meisten Schädigungen infolge von Auslaugungsprozessen und durch Neubildungen von Sulfatmineralien oder aber einer Kombination derselben hervorgerufen werden.
- Die Entwicklung eines sulfatbeständigen Baustoffes für die Tunnelrealität, im Sinne der Thumasit-Problematik, stellt eine grosse Herausforderung für die Zukunft im Tunnelbau dar.

Konsequenzen für die Sulfatbeständigkeitsprüfung:

- Die meisten festgestellten Schädigungsphänomene in der Tunnelrealität stehen in Zusammenhang mit fließendem Wasser (dynamisches Milieu, advektiver Stoffaustausch). Demgegenüber werden Beständigkeitsprüfungen im Labor allgemein in stehenden Lösungen durchgeführt (statisches Milieu, Diffusions-kontrollierter Stofftransport). In Zusammenhang mit der Bergwasser-Problematik müssen künftig dynamische Prüfanordnungen gefördert werden.
- Da in der Tunnelrealität bei der Interaktion mit sulfathaltigen Bergwässern hauptsächlich Thumasit und nur untergeordnet Ettringit gebildet wird, sollten die Prognosen aufgrund der herkömmlichen Sulfatbeständigkeitsprüfung mit entsprechendem Vorbehalt betrachtet werden.
- Da in der Tunnelrealität neben Sulfat auch andere Stoffe an den schädigenden Prozessen beteiligt sind, sollten die Laborprüfungen ebenso mit entsprechenden Lösungen durchgeführt werden. Um die Beständigkeit gegenüber einem Thumasit-Angriff prüfen zu können, muss bei der Versuchsanordnung insbesondere auch die Zufuhr von Karbonat sichergestellt werden.
- Eine spezifische Prüfung auf das Potential der Thumasitbildung existiert (noch) nicht. Die zur Zeit angewendeten Sulfatprüfungen basieren auf der Bildung von Ettringit. Weil sich dabei auch die Dichtigkeit des Baustoffes auf das Prüfergebnis auswirkt, soll diese Prüfung sinnvollerweise bis auf weiteres angewendet werden.

Referenzen

- Andac, M., and Glasser, F.P. (1999): Long-term leaching mechanisms of Portland cement-stabilized municipal solid waste fly ash in carbonated water. *Cement and Concrete Research*, 29, 179-186.
- Bensted, J. (2000): Mechanism of thaumasite sulphate attack in cements, mortars and concretes. *ZKG International Zement Kalk Gips*, 53, 704-709.
- Bothe, J.V., and Brown, P.W. (1998): Phase equilibria in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ at $23 \pm 1^\circ\text{C}$. *Advances in Cement Research*, 10 (3), 121-127.
- Cohen, M.D., and Mather, B. (1991): Sulfate Attack on Concrete – Research Needs. *ACI Materials Journal*, 88 (1), 62-69.
- Diamond, S. (1976): Cement paste microstructure. *Hydraulic cement pastes: their structure and properties – an overview at several levels*, p. 2-30. Cement and Concrete Association, Slough, UK, Sheffield.
- Diamond, S. (1981): Concrete pore solutions. *Cement and Concrete Research*, 11, 383-392.
- Grijalvo, J.A., Blanco-Varela, M.T., Maroto, F.P., Sanchez, A.P., and Moreno, T.V. (2000): Thaumasite Formation in Hydraulic Mortars and Concretes. aus V.M. Malhotra: *Durability of Concrete*. Proc. of 5th Int. Conf., Barcelona, Spain, Vol. II, 1173-1192.
- Grube, H., and Rechenberg, W. (1989): Durability of concrete structures in acidic water. *Cement and Concrete Research*, 19, 783-792.
- Hartmann, P. (1998) *Mineralwasservorkommen im nördlichen Bündnerschiefergebiet mit Schwerpunkt Valseral*. Geologisches Institut. ETH, Zürich.
- Hartshorn, S.A., Sharp, J.H., and Swamy, R.N. (1999): Thaumasite formation in Portland-limestone cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 29, 1331-1340.
- Hime, W.G., and Mather, B. (1999): «Sulfate attack», or is it? *Cement and Concrete Research*, 29, 789-791.
- Holzer, L. (1999a): Betonkorrosion durch aggressive Bergwässer und mikrobiologische Aktivität im Zugwald-Tunnel (Vereina-Linie), p. 30. EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf.
- Holzer, L. (1999b) *Mikrobielle Korrosion von Baustoffen im AlpTransit Sondierstollen Lötschberg Nord*, p. 44. EMPA Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf.
- Holzer, L., and Romer, M. (1999): Corrosion of concrete: Assessing the mechanisms. In H.S. Pietersen, J.A. Larbi, and H.A. Janssen, Eds. *7th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*, p. 67-79. Technical University of Delft, The Netherlands, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, NL.
- Holzer, L., Winnefeld, F., Kägi, R., and Zampini, D. (in prep.): Towards an integral understanding of the early cement hydration. Part II: Microstructure, Microanalysis and pore solution chemistry. 11th International Congress on the Chemistry of Cement ICCC, Durban, Rep. of South Africa, 2003.
- Kaiser, J.P. (1999) *Mikrobiell induzierte Biodeterioration von Baustoffen*, p. 20 pp. EMPA Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt.
- Kaiser, J.P., and Raschle, P. (2000) *Mikrobielles Wachstum in Biofilmpollen des Gotschna-Tunnels*. Interner FE-Bericht Nr. 840271/2, EMPA St. Gallen, 8 pages.
- Lardelli, T. (1993) *Nationalstrasse N13c – San Bernardino Tunnel: Chemie des Berg- und Rigolenwassers (Lüftungsschacht Sasso, Herbst 1992)*, p. 10, div. Beilagen. Büro für Technische Geologie und Hydrogeologie; TBA Graubünden, Chur.
- Lawrence, C.D. (1990): Sulfate attack on concrete. *Magazine of Concrete Research*, 42(153), 249-264.
- Mehta, P.K. (1983): Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete – Another Look. *Cement and Concrete Research*, 13, 401-406.
- Mehta, P.K. (1993): Sulfate attack on concrete – A critical review. In J. Skalny, Ed. *Materials Science in Concrete III*, p. 105-130. American Ceramic Society.
- Romer, M. (1999): Chemische Interaktion von Bergwasser mit Beton. In S. Löw, and R. Wyss, Eds. *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg, Tagungsband zum Symposium Geologie AlpTransit*, 15.-17. Februar 1999, p. 279-289. AA. Balkema, Rotterdam, Zürich.

- Romer, M., Holzer, L., and Pfiffner, M. (2001): Interaction of water with concrete: Deterioration Mechanisms. Consec' 01, Vancouver, 18.6.-20.6.2001.
- Romer, M., and Lienemann, P. (1998): Versalzung und Korrosion von Spritzbeton (Sicherheitsstollen des Gotthard-Strassentunnels). *Chimia*, Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft, 52, 197-201.
- Schneider, T.R. (1984) Geologischer Schlussbericht Seelisbergtunnel, Zusammenfassung. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, Nr. 65, 88 pages.
- Spear, F.S. (1993): Metamorphic phase equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths. Mineralogical Society of America, Washington D.C.
- St. John, D.A., Poole, A.B., and Sims, I. (1998): Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques. Arnold Verlag, London.
- Stark, J., and Wicht, B. (1995): Dauerhaftigkeit von Beton. Finger-Institut für Baustoffkunde FIB, Weimar.
- Steinour, H.H. (1954): C-S-H-stability and pore solution chemistry. 3rd ISCC, p. 261-270.
- Studer, W. (2001): Sulfat-Kurzprüfung: Untersuchungsergebnisse und Bewertung des Verfahrens. AlpTransit Gotthard AG, Luzern.
- Taylor, H.F.W. (1990): Cement Chemistry. Academic Press Inc.
- Taylor, H.F.W., Famy, C., and Scrivener, K.L. (2001): Delayed ettringite formation – Review. *Cement and Concrete Research*, 31, 683-693.
- Trägårdh, J., and Lagerblad, B. (1998): Leaching of 90-year old concrete mortar in contact with stagnant water. SKB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
- Wegmüller, M., and Chabot, J.D. (1997): Einflüsse des Bergwassers auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Institut für Bauplanung und Baubetrieb IBB, ETH Zürich, 132 pages.
- Wegmüller, M.C. (2001): Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau / Tunnelbau. Stäubli AG, Zürich, 215 pages.

Anhang

Die nachfolgenden Tabellen geben Aufschluss über die Probenentnahmelokalitäten in den drei detailliert untersuchten Tunnelbauwerken (Harderband-Tunnel, San Bernardino-Tunnel, Gotschna-Tunnel, vgl. auch Tabelle 1), über die an den jeweiligen Proben durchgeführten Arbeiten und Untersuchungsmethoden, über die Resultate der Röntgendiffraktions-Analysen (XRD) resp. der Umwelt-Rasterelektronenmikroskopie (ESEM) zur Identifizierung von Mineralphasen sowie, falls vorhanden, über die Zusammensetzung des Bergwassers (nur Gotschna- und San Bernardino-Tunnel). Die Zusammenstellung erfolgt nach den jeweiligen Tunnelobjekten.

A.1 Harderband-Tunnel, Bauenstrasse (Kanton UR)

Tabelle A.1: Zusammenstellung der entnommenen Proben aus dem Harderband-Tunnel und deren Lokalitäten (Einteilung nach Bezugspunkten, gemessen in 100 m-Schritten vom Beginn der Bauenstrasse in Altdorf oder Seedorf: z.B. Bezugspunkt 83 = 8.3 km).

Lokalität (Tunnelseite mit Blick nach Süden)	Tunnelmeter (gem. Bezugspunkt 83)	Bohrkerne (jeweils 10 cm Durchmesser)	Handstücke	Ablagerungen, Versinterungen
Bau 2 rechts Bau 2 links	Bez. 83 + 70 m		Bet 1, Bet 3 Bet 2	Vs 1, Vs 2
Bau 3 (rechts)	Bez. 83 + 75 m	Bk 1, Bk 2, Bk 3, Bk 4	Hs 1, Hs 2	Vs 1, Vs 2
Bau 4 (rechts)	Bez. 83 + 50 m	Bk 1, Bk 2, Bk 3, Bk 4, Bk 5	Hs 1, Hs 2, Hs 3	Aus 1, Aus 2
Bau 5 (links)	Bez. 83 + 60 m	Bk 1, Bk 2		

Bezeichnungen: Methoden: fett = Dünnschliff; kursiv = XRD; fett + kursiv = Dünnschliff und XRD
Abkürzungen: Bk = Bohrkern; Hs, Bet = Handstück; Vs = Versinterung; Aus = Ausblühung

Tabelle A.2: Resultate der Röntgendiffraktions-Analysen (XRD) an Ablagerungen und Versinterungen auf der Gunit-Oberfläche sowie von sekundären Mineralneubildungen.

Mineral	chemische Formel	Ablagerung auf Gunit-Oberfläche (Sinter, Ausblühungen)	Alterations-Produkte des Zementsteins	Neubildungen in Rissen und Poren
Calcit	CaCO ₃	xxx (Sinterkruste)	xx (v.a. Karb.-Zone)	xx (v.a. Karb.-Zone)
Gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O	xx (v.a. randlich von Ausbruchstellen)		x
Bassanit («Hemihydrat»)	CaSO ₄ · 0.5H ₂ O	x (dünne Kruste auf Oberfläche)		
Brucit	Mg(OH) ₂	x		x (?)
Thaumasit	Ca ₃ Si(OH) ₆ (SO ₄)(CO ₃) · 12H ₂ O		xxx (v.a. Kontaktzone)	xxx (besonders direkt am Kontakt)
Ettringit ¹⁾	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₂ · 26H ₂ O		x (?)	x (?)
sek. Portlandit	Ca(OH) ₂		x (Innenzone)	xx (Innen- und seltener Kontaktzone)
Zuschläge: ²⁾				
Quarz	SiO ₂	x	xxx	x
Calcit	CaCO ₃	x	xxx	x
Feldspäte	diverse		xxx	

Mengenanteile: xxx = viel; xx = mittel; x = wenig; x (?) = unsicher

¹⁾ unsicher, nur in kleinen Mengen

²⁾ infolge Aufbereitung immer zumindest in geringen Mengen vorhanden

A.2 San Bernardino-Tunnel, Nationalstrasse A3 (Kanton GR)

Tabelle A.3: Zusammenstellung der entnommenen Proben aus dem San Bernardino-Tunnel (A3) und deren Lokalitäten; Tunnelmetrierung resp. Nummerierung der Blöcke ab Südportal.

Lokalität (west- oder ostseitiger Leitungskanal)	Block- Nr.	Tunnel- meter	Bohrkerne (jeweils 5 resp. 10 cm Durchmesser)	Handstücke, Betonproben	Ablagerungen, Versinterungen
SB 1 (Westkanal)	1181	2952	Bk 1, Bk 2, Bk 3, Bk 4	Bet 1, Bet 2, Bet 3	Aus 1, Bet 4, Bet 5
SB 2 (Westkanal)	1184	2960	<u>Bk 1</u> , Bk 2, Bk 3, Bk 4		Aus 1, Aus 2, Aus 3
SB 3 (Ostkanal)	1206	3020			Aus 1
SB 4 (Ostkanal)	1685	4213		HS 1	
SB 5 (Westkanal)	1185	2963	Bk 1, Bk 2, Bk 3		Aus 1, Aus 2, Aus 3, Sin 1
SB 6 (Westkanal)	1146	2865	Bk 1, Bk 2, Bk 3		Aus 1, Aus 2, Aus 3
SB 7 (Ostkanal)	1226	3065		HS 1	Aus 1, Aus 2
SB 8 (Westkanal)	1469	3675	Bk 1, Bk 2, Bk 3		Aus 1, Aus 2, Aus 3

Bezeichnungen: Methoden: fett = Dünnschliff; kursiv = XRD; fett + kursiv = Dünnschliff und XRD; unterstrichen = ESEM
Abkürzungen: Bk = Bohrkern; Hs = Handstück; Bet = Betonprobe; Sin = Versinterung; Aus = Ausblüfung

Tabelle A.4: Vorkommen und Mineralogie von sekundären Mineralneubildungen im Ortsbeton sowie von Ablagerungen und Ausblüfungen auf der Betonoberfläche des San Bernardino-Tunnels, bestimmt mittels XRD und ESEM.

Mineralphasen (bestimmt mit XRD, EDX)	Chemische Formel	Oberflächen-Zone (< 5 cm von der Oberfläche)			Inneres der Betonausklei- dung (im Bereich von Inhomogenitäten)			Kontaktzone Fels – Beton (< 5 cm vom Kontakt)		
		Oberfläche ss. (inkl. Krusten, Ausblüfungen etc.)	Poren, Risse, Hohlräume (pri- mär und sekundär)	Zementstein (Alterationsprodukte, Ersatz von Zementphasen)	entlang von Arbeitsfugen, "Ar- beitskontakten"	Poren, Risse, Hohlräume (pri- mär und sekundär)	Zementstein (Alterationsprodukte, Ersatz von Zementphasen)	direkt am Kontakt, auf Felsoberfläche	Poren, Risse, Hohlräume (pri- mär und sekundär, kontaktnah)	Zementstein (Alterationsprodukte, Ersatz von Zementphasen)
Karbonatisierung:										
Calcit	CaCO ₃	xxx	xx	xx	x	xx	x	xx	xx	x
Aragonit	CaCO ₃					x		(x)		(x)
Vaterit (?)	CaCO ₃			(x)						
Sulfat-Angriff:										
Thaumasit	Ca ₃ Si(OH) ₆ (SO ₄) (CO ₃) · 12H ₂ O	xx	xx	xx	xxx	xxx	x	xx	xx	xx
Ettringit ¹⁾	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₂ · 26H ₂ O	x	x	x	x	x	(x)		x	x
Gips	CaSO ₄ · 2H ₂ O	x	xx	xx					xx	(x)
Bassanit	CaSO ₄ · 0.5H ₂ O			x						
Brucit	Mg(OH) ₂	x		x		xx	x	xx	x	(x)
Epsomit	MgSO ₄ · 7H ₂ O	x (?)		x (?)						
Evaporation:										
Thenardit/Mirabilit	Na ₂ SO ₄ · xH ₂ O	xx	x		x					
Halit	NaCl	x								
Trona	Na ₃ H(CO ₃) ₂ · 2H ₂ O	(x)								
Aphtitalit	K ₃ Na(SO ₄) ₂	(x)								
Konyait	Na ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 5H ₂ O	(x) (?)								
Zuschläge ²⁾:										
Quarz	SiO ₂	x	xx	xxx	xx	xx	xxx	x	x	xxx
Feldspäte	diverse			x			x			x
Hellglimmer	diverse		x (?)	xx	x (?)	x (?)	xx			xx

Mengenanteile: xxx = viel; xx = mittel; x = wenig; (x) = Spuren; x (?) = unsicher

¹⁾ mittels XRD oft nur schwer von Thaumasit zu unterscheiden, nur untergeordnet vorkommend

²⁾ infolge Aufbereitung immer zumindest in geringen Mengen vorhanden

Tabelle A.5: Repräsentative chemische Analysen von Berg- und Rigolenwässern aus dem San Bernardino-Tunnel (A3) sowie von Mineralwässern der Mineralquelle San Bernardino.

Chemische Analysen des Berg- und Rigolenwassers, San Bernardino-Tunnel sowie der Mineralquelle San Bernardino													
Quellenangabe	Bergwasser (z.T. während dem Vortrieb entnommen)							Rigolenwasser (meist stehend)				Mineralquelle San Bernardino	
	1)	2)	1)	3)	2)	1)	1)	2)	2)	2)	4)	4)	5)
Entnahmedatum	04.09.62	15.10.92	13.02.63	31.07.69	16.10.92		25.03.62	16.10.92	15.10.92	16.10.92			19.10.95
Ort (TM ab Portal Süd) [m]	722	840	851	2982	5833	5856	6290	2250	2887	3996	4385		
Fluss [l/min]		Westkanal 0.03			Ostkanal 30			Sasso 343 rinnend	Westkanal Rigole	Westkanal Rigole	Ostkanal Rigole		20
Feldmessungen:													
Temperatur [°C]		10.8		12.2	8.4			11.1	16.1	12.6			9.3
pH		7.97			7.89			7.27	8.63	9.3	8.01		6.4
Leitfähigkeit [µS/cm]		1460			369			2330	12800	26700	7440		2960
Analytik:													
Karbonathärte [°fH]	11.8	13	20.5	16.5	7	8.5	9						79.1
Gesamthärte [°fH]	44	97.6	148	176.8	20.6	97.5	45.1	150.4	338.4	50.1			213.1
Resthärte [°fH]	32.2	84.6	127.5	160.3	13.6	89	36.1	150.4	338.4	50.1			134
Härte (nach Käss, 1965)	hart	sehr hart	sehr hart	sehr hart	mittelhart	sehr hart	hart	sehr hart	sehr hart	sehr hart			sehr hart
Calcium (gelöst) Ca [mg/l]	173	381		269	76		174	490	481	30	381	717	721
Magnesium (gelöst) Mg [mg/l]	2	6		266	4		4	68	530	103	219	75	80
Natrium (gelöst) Na [mg/l]		4			4			81	2015	8206	1560	16	17
Kalium (gelöst) K [mg/l]		2			1			6	194	1052	108	7	9.9
Eisen Fe [mg/l]								0.12				11	8.3
Hydrogenkarbonat HCO ₃ [mg/l]	143	158.6	250	201	85.4	104	110	195.3	201	1007		1123	964
Chlorid Cl [mg/l]		2.1		9	0.8			1.8	120	594	399	5	4.4
Nitrat NO ₃ [mg/l]		0.5			1.8			0.2	30.2	263	15		
Sulfat SO ₄ [mg/l]	395	825	1212	1855	128	942	363	1500	7110	14550	4590	1201	1175
Silikate (gelöst) SiO ₂ [mg/l]											12.1	35	26.79
Berechnete Grössen:													
Calcit-Sättigung (Langellier) LI		0.62			-0.26			0.01	0.89	0.25			
Calcit-Sättigung (Wateq) SI=IAP/Kc		6.5			0.82			1.66	26.7	23			0.01
Ionensumme [mg/l]	713	1380		2601	300		651	2342	10681	25805	7272	3155	2979
Betonaggressivität DIN 4030	schwach	stark	stark	stark		stark	schwach	stark	sehr stark	sehr stark			

Quellenangaben: 1) Cadisch (1961-1963): laufende Aufnahmen während des Vortriebs; vgl. Lardelli (1993)
 2) Lardelli (1993)
 3) EMPA (1969); vgl. Lardelli (1993)
 4) Wegmüller & Chabot (1997)
 5) Hartmann (1998)

A.3 Gotschna-Tunnel, A28a Prättigauerstrasse, Umfahrung Klosters (Kanton GR)

Tabelle A.6: Zusammenstellung der entnommenen Proben aus dem Gotschna-Tunnel und deren Lokalitäten; Tunnelmetrierung ab Westportal Drostobel (totale Tunnellänge 4207 m).

Lokalität (s = steigender und f = fallender Vortrieb)	Tunnelmeter	Spritzbetonproben (jeweils 5 cm Durchmesser)	Bergwasserproben ¹⁾	Ablagerungen, Biofilmp Proben ²⁾
Go1s	1345	Bk 1, Bk 2, Bk 3		Bio 1
Go2s	950	Bk 1, Bk 2, Bk 3	<u>Bw 1, Bw 2, Bw 3</u>	Bio 1, Bio 2, Bio 3
Go3s	770	Bk 1	<u>Bw 1, Bw 2</u>	Bio 1
Go4s	215	Bk 1, Bk 2, Bk 3		Bio 1
Go5f	4157	Bk 1, Bk 2	<u>Bw 1, Bw 2</u>	
Go6f	4057	Bk 1, Bk 2	<u>Bw 1</u>	<i>Sin 1</i> ³⁾
Go7f	4027		<u>Bw 1, Bw 2</u>	
Go8s	770	Bk 1		
Go9s	1345	Bk 1, Bk 2		
Go10s	2070	Bk 1, Bk 2		
Go11s	2415	Bk 1, Bk 2, Bk 3, Bk 4		Bio 1, Bio 2

Bezeichnungen: Methoden: fett = Dünnschliff; kursiv = XRD
Abkürzungen: Bk = Bohrkern; Sin = Versinterung; Bw = Bergwasser; Bio = Biofilm

- 1) Analysen der Wasserproben durch die Abteilung für anorganische Analytik der EMPA sowie durch das Institut Bachema in Zürich (unterstrichen).
- 2) Untersuchung auf die Anwesenheit von verschiedenen Mikroorganismengruppen durch die Abteilung Biologie an der EMPA St. Gallen (Kaiser & Raschle, 2000).
- 3) Sinterablagerung zur Hauptsache aus Calcit bestehend.

Tabelle A.7: Repräsentative chemische Analysen von Bergwasser aus dem Gotschna-Tunnel (A28a, Prättigauerstrasse, Umfahrung Klosters). Teil 1: steigender Vortrieb:

Chemische Analysen des Bergwassers, Gotschna-Tunnel (Teil 1 steigender Vortrieb)												
Probenbezeichnung	GR ¹⁾	GR ¹⁾	Go3s.Bw1	Go3s.Bw2	GR ¹⁾	Go2s.Bw1	Go2s.Bw2	Go2s.Bw3	GR ¹⁾	GR ¹⁾	GR ¹⁾	GR ¹⁾
Entnahmedatum	24.03.98	09.06.98	26.01.00	26.01.00	13.10.98	26.01.00	26.01.00	26.01.00	22.03.99	17.12.99	21.06.00	25.07.00
Ort (ab Portal Drostobel)	226	670	770	775	948	950	950	945	1345	1886	2135	2210
Feldmessungen:												
Temperatur [°C]	8.7	11.6	10	10		10.6	10.6	11.8	12.6	12.9		13.5
pH			9.3	9.3		9.5	9.5	9.4				6.8
Leitfähigkeit [µS/cm]	1087		1700	1700		2100	2100	2600	7419	9070	8979	6800
Analytik:												
Labor	Kt GR	Kt GR	EMPA	EMPA	Kt GR	EMPA	Bachema	EMPA	Kt GR	Kt GR	Kt GR	Kt GR
Leitfähigkeit (20°C) [µS/cm]	1041	1210			2261		2420		7200	8810	9030	6260
pH (Labor)	8.15	9.41	8.6	8.9	9.21	9.1	9.18	8.9	8.25	7.11	6.57	6.8
pH-Messtemperatur [°C]	10	10	21	21	13	21	11.6	21	13	12	22	15
Karbonathärte [°fH]	23.3	56.1	43.3	44	66.9	45	46.19	45.6	55	51	157.2	95.4
Gesamthärte [°fH]	64	1.4	1.78	1.6	0.8	1.1	1.4	0.7	30.4	184.8	202.4	183.1
Resthärte [°fH]	40.7	0	0	0	0	0	0	0	0	133.8	45.2	87.7
Calcium (gelöst) Ca [mg/l]	92.2	4.6	2.9	4.8	2.1	2.3	3.7	1.5	56.7	381.8	422.6	404.3
Magnesium (gelöst) Mg [mg/l]	99.6	0.6	2.2	2.3		0.76	1.1	0.67	39.5	217.7	235.7	199.7
Natrium (gelöst) Na [mg/l]	27.6	289.2	430	400	633.8	680	616	710	2164	2190	2183	1320
Kalium (gelöst) K [mg/l]	14.8	3	6.2	6.4	2.6	2.9	3.2	2.5	19.9	59.2	58.7	23.6
Lithium (gelöst) Li [mg/l]		0.46	0.39			0.62		0.62				
Silizium Si [mg/l]		3.9	4.4			3.7		3.6				
Strontium Sr [mg/l]		0.76	0.58			0.4		0.38				
Eisen Fe [mg/l]		0.1	1.6			0.2		0.1				
Hydrogenkarbonat HCO ₃ [mg/l]	284.3	684.6	620	640	816.2	510		510	671.6	622.4	1918.5	1164.3
Karbonat CO ₃ [mg/l]			<1	<1		26		26				
Chlorid Cl [mg/l]	7.7	1.1	3.3	3.6	8.2	1.5	1.3	1.9	39.5	305.6	211	88.7
Fluorid F [mg/l]			4.4	4.7		5.2		5.8				
Sulfat SO ₄ [mg/l]	467.3	151.5	590	490	634.9	1050	929	1030	4063	5331.1	4874.8	3313.7
Sulfid S [mg/l]		5	10.2	14	10.2	1.5	14.2	1.5	14.2		3.5	7
Ammonium NH ₄ [mg/l]	3.15	1.3	1.5	1.5	1.48	1.8	1.3	1.7	6.9	5.03	8	5.3
Silikate (gelöst) SiO ₂ [mg/l]							7.9					
TOC C [mg/l]	0.99	0.14	0.1	0.9	28.1	0.3		0.2	3.25	0.31	0.21	0.53
TIC C [mg/l]	64.8	135.4			151.2				130.7	113.6	504.6	305.9
Berechnete Größen:												
freie Kohlensäure CO ₂ [mg/l]	3.8								9.4	76.3	1128.1	289.6
aggressive Kohlensäure CO ₂ [mg/l]	-15.3								0	0	-1331	0
Calciumkarbonat-Si Si	0.71								0.98	0.53	0.34	0.53
Sättigungsindex Ionensumme [mg/l]	997	1136	1670	1570	2113	2295	1565	2308	7061	9114	9916	6527

¹⁾ Analysendaten durch den Kanton Graubünden zur Verfügung gestellt.

Tabelle A.7 (Fortsetzung): Repräsentative chemische Analysen von Bergwasser aus dem Gotschna-Tunnel (A28a, Prätigauerstrasse, Umfahrung Klosters). Teil 2: fallender Vortrieb:

Chemische Analysen des Bergwassers, Gotschna-Tunnel (Teil 2 fallender Vortrieb)												
Probenbezeichnung		GR ¹⁾	Go6f.Bw1	Go6f.Bw2	GR ¹⁾	Go6f.Bw1	Go7f.Bw1	Go7f.Bw2	GR ¹⁾	GR ¹⁾	GR ¹⁾	GR ¹⁾
Entnahmedatum		02.02.99	27.01.00	27.01.00	22.10.98	27.01.00	27.01.00	27.01.00	08.12.98	07.12.99	22.02.00	01.10.98
Ort (ab Portal Drostobel)		4170	4157	4157	4069	4057	4027	4027	4009	3984	3662	
Feldmessungen:												
Temperatur	[°C]	6.2	7.8	7.8	12	6.1	7.3	7.3	6.8	8.2	7.8	7.8
pH			7.8	7.8		8.5	7.7	7.7				
Leitfähigkeit	[µS/cm]	1550	1500	1500	2277	1200	1500	1500	1129	1794	1179	952
Analytik:												
Labor		Kt GR	EMPA	Bachema	Kt GR	EMPA	EMPA	Bachema	Kt GR	Kt GR	Kt GR	Kt GR
Leitfähigkeit (20°C)	[µS/cm]	1492		1390	1795			1290	1041	1881	1358	1027
pH (Labor)		7.48	7.6	7.72	7.28	8	7.5	7.7	7.8	7.34	7.47	7.91
pH-Messtemperatur	[°C]	11	21	11.2	17	21	21	12.3	13	14	13	10.4
Karbonathärte	[°FH]	10.7	11.57	11.65	117.9	13.4	10.7	11.01	12.1	9	16.8	54.7
Gesamthärte	[°FH]	117.3	96.1	101	127.8	73	83.7	83.4	71.3	130.7	76	67.1
Resthärte	[°FH]	106.6	84.6	89.4	9.9	59.6	73	72.4	59.2	121.7	59.2	12.4
Calcium (gelöst)	Ca [mg/l]	419.6	350	364	443.1	250	280	296	234.1	472.1	248.6	211.2
Magnesium (gelöst)	Mg [mg/l]	30.6	23	25	42	19	23	23	31.4	31.4	34	35
Natrium (gelöst)	Na [mg/l]	3.4	4.7	4.9	24	3.3	27.8	29	6.8	24	49.5	5
Kalium (gelöst)	K [mg/l]	2.3	2.1	1.7	7.6	3.9	3	2.6	2.6	3	4.6	2.3
Lithium (gelöst)	Li [mg/l]		<0.1			<0.1	<0.1					
Silizium	Si [mg/l]		5.4			5.9	4.1					
Strontium	Sr [mg/l]		9.1			8.5	10.5					
Eisen	Fe [mg/l]		0.6			0.1	0.6					
Hydrogenkarbonat	HCO ₃ [mg/l]	130.6	160		121.4	160	150		147.7	109.8	205	151.3
Karbonat	CO ₃ [mg/l]		<1			<1	<1					
Chlorid	Cl [mg/l]	2.3	3.4	2.7	13.9	1.1	6.1	5	2	11.1	8.3	1.4
Fluorid	F [mg/l]		0.08			0.15	0.23					
Sulfat	SO ₄ [mg/l]	946.8	910	871	1200.5	600	790	765	583.6	1303.3	700.9	556.4
Sulfid	S [mg/l]		<0.1			<0.1	<0.1					
Ammonium	NH ₄ [mg/l]	0.09	0.1		1	0.1	0.3	0.32	0.22	1.11	0.57	0.12
Silikate (gelöst)	SiO ₂ [mg/l]			11.6				8.7				
TOC	C [mg/l]	0.5	0.2		0.58	0.8	0.1		0.46	0.43	0.3	0.31
TIC	C [mg/l]	26.1			26.3				30.2	23.4	46.1	29.8
Berechnete Größen:												
freie Kohlensäure	CO ₂ [mg/l]	8.2		4.62	10.5			4.53	4.5	9	13.1	3.5
Gleichgewichts-Kohlensäure	CO ₂ [mg/l]			16.01				12.75				
aggressive Kohlensäure	CO ₂ [mg/l]	0		-11.38	-1.8			-8.23	0	0	0	-8
Gleichgewichts-pH				7.18				7.25				
Calciumkarbonat-Sättigungsindex	SI	0.23		0.54	0.09			0.45	0.43	0.07	0.28	0.53
Ionensumme	[mg/l]	1536	1468	1280	1854	1052	1295	1129	1008	1956	1251	963

¹⁾ Analysendaten durch den Kanton Graubünden zur Verfügung gestellt.

