

Versinterung von Tunnel drainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung

G. Girmscheid, T. Gamisch, Th. Klein, A. Meinschmidt

Zusammenfassung Bauherrn fokussieren heute verstärkt auf die Unterhaltskosten und Betriebsbereitschaft ihrer baulichen Anlagen. Dem Bauelement „Tunnel drainage“ wurde bis heute in Planung und Bau zu geringe Beachtung gewidmet. Da die Ursachen-Wirkungs-Beziehungen der Versinterungen bisher wenig erforscht sind, werden bei der Planung und Bauausführung oft falsche Entscheidungen getroffen. Deshalb kommt es bei vielen Tunneln zu nachträglichen Bauschäden, erhöhten Unterhaltskosten und Beeinträchtigungen der Betriebsbereitschaft. In diesem Beitrag werden wissenschaftlich fundiert, für Praktiker in der Planung, Bau und Betrieb, die Grundlagen zusammengestellt, um die bei der natürlichen Anreicherung deszendenter, oberflächennaher Sicker- und/oder Grundwässer mit Kohlendioxid und der einhergehenden Calciumaufnahme aus dem Gestein wirksamen Mechanismen besser zu verstehen. Weiterhin wird dargestellt, dass die heute im Tunnelbau verwendeten Baustoffe teilweise erhebliche Calciumpotenziale enthalten und wie sie den pH-Wert des zuströmenden Bergwassers bei Kontakt oder Durchdringung erheblich erhöhen können. Anhand einer einfachen Simulation wird gezeigt, dass eine große Menge an Kalk in die Tunnel drainage transportiert werden kann, die wegen der dort herrschenden atmosphärischen Verhältnisse in Form von Calcit ausfällt und zu Versinterungen in den Drainagen führt. Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ein Kosten- und Entscheidungsmodell für Unterhaltstrategien von Tunnel drainagesystemen entwickelt. Die Ursachen-Wirkungs-Beziehungen der Versinterungsentstehung in Tunnel drainagen wurden als Basis zu diesem Modellansatz analysiert und werden in diesem Beitrag zusammengefasst dargestellt, die ausführlicher als PDF-Dokument unter www.ibb.baug.ethz.ch heruntergeladen werden können.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorsteher des Instituts für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, Hönggerberg, CH-8093 Zürich
E-Mail: girmscheid@ibb.baug.ethz.ch

Dipl.-Ing. Tobias Gamisch

Assistent am Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich
E-Mail: gamisch@ibb.baug.ethz.ch

Dr. Thomas Klein

Bayer AG
Geschäftsbereich Chemikalien
51368 Leverkusen
E-Mail: Thomas.Klein.TK1@bayer-ag.de

Dipl.-Ing. Alfred Meinschmidt

Deutsche Bahn AG
Arbeitsgebietsleiter – Geotechnischer Ingenieurbau
Konstruktiver Ingenieurbau (TZF 62)
Theodor-Heuss-Allee 7, 60468 Frankfurt/Main
E-Mail: Alfred.Meinschmidt@bahn.de

Scale sintering in tunnel drainages - Mechanisms of scale formation

Abstract Today clients focus especially on the maintenance costs and operational reliability of their structural works. Till today, in design and construction insufficient attention has been given to the component "tunnel drainage". Due to the hardly researched cause-and-effect-relationships of sintering often incorrect decisions in design and construction are made. For these reason subsequent damages, increased maintenance costs and impairment of serviceability has been caused in many tunnels. In this article scientifically funded basics for design, construction and service practitioners are compiled to understand the mechanisms, which occur when seepage and/or ground water absorb carbon dioxide and leach out calcium from the rock. Further, some building materials used at present for tunneling contain high calcium potentials and increase the pH-value of the ground water by contact or by percolating. A simple simulation shows that a transport of a huge amount of lime is possible, which, due to the atmospheric conditions in the drainage system, precipitates as calcite.

Within the scope of a research project at the Institute for Construction Engineering and Management of the Swiss Federal Institute of Technology Zurich a model of costs and decision for maintenance strategies of tunnel-drainage systems will be developed. As a basis of this model the cause-and-effect relationships of deposit forming in tunnel drainages were analyzed and will be shown shortly in this paper. A detailed report is available as a pdf-file at www.ibb.baug.ethz.ch.

1 Einleitung

Kalkablagerungen in Entwässerungssystemen von Tunnelbauwerken erfordern von den Betreibern in vielen Fällen erhebliche Instandhaltungsaufwendungen. Aufgrund von zahlreichen differierenden Wasserzutritten, die teilweise drastische Wechsel in der Wasserchemie bewirken, wäre zu erwarten, dass sich die Versinterungsproblematik auf einzelne Abschnitte des Entwässerungssystems beschränkt. In versinterungsgefährdeten Tunneln ist jedoch oft eine weitgehend durchgängige Bildung von harten bis sehr harten Ablagerungen unterschiedlicher Stärke festzustellen. Aus diesem Grund haben sich verschiedene Tunnelbetreiber, darunter auch die Deutsche Bahn AG, entschlossen, das gesamte Tunnel drainagesystem in regelmäßigen Abständen zu reinigen.

Eine Reinigung ist unerlässlich, um die Funktionstüchtigkeit der Entwässerung aufrecht zu erhalten. Durch das Anwachsen nicht rechtzeitig entfernter Versinterungen kann es zum Vollverschluss der Rohrleitungen kommen. Im besten Fall tritt dann das Wasser aus der Sohle aus und fließt über den Fahrbahnoberbau ab. Sind diese, eigentlich unerwünschten Wasserwegsamkeiten blockiert, kommt es zum Aufbau eines Wasserdrucks. Dieser bedeutet eine zusätzliche Belastung

des Tunnelgewölbes, für die es im Allgemeinen nicht bemessen ist und gefährdet so die Standsicherheit des Tunnels.

Die Deutsche Bahn AG bestimmt die Erfordernis nach regelmäßiger Drainagereinigung in der Richtlinie 853 [1] wie folgt: „Zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit und Verfügbarkeit von Tunneln sind diese und ihre Einbauten regelmäßig zu warten.“ (Richtlinie 853 [1], Abs. 2, Nr. 2)

Aufgrund von verschiedenen Einflüssen, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden, versintern die Entwässerungsleitungen in den Tunneln verschieden stark. In den meisten Fällen genügt ein jährliches Spülintervall, um die Funktionstüchtigkeit aufrecht zu erhalten. Es gibt jedoch auch Tunnel, in deren Rohren sich Versinterungsdicken im Dezimeterbereich je Monat aufbauen (Bild 1).

In Deutschland besitzen, bis auf wenige Einzelfälle, ausschließlich die deszendente Sickerwasser Einfluss auf die Sinterbildung in den Tunnel drainagen. Daher behandelt dieser Aufsatz lediglich deszendente Wässer. Aszendente Wässer sind vorwiegend im alpinen Raum maßgeblich an der Ablagerungsbildung in den Tunnelentwässerungen beteiligt. Eine ausführliche Darstellung und Gliederung entsprechend dem Vorkommen von Tiefengrundwässern kann in der detaillierteren Version dieses Aufsatzes unter www.ibb.baug.ethz.ch nachgelesen werden.



Bild 1. Versinterung im Drainagerohr vor der Reinigung
Fig. 1. Sintering in a drainage pipe before cleaning

2 Deszendentes Wasser als Versinterungsursache

2.1 Grundlegende Vorgänge der Kohlendioxid-Anreicherung

In tagwasserabhängigen Tunneln wird die Bildung der Versinterungen in den Drainagen grundsätzlich von den biologischen und chemischen Vorgängen im Sicker- und Grundwasser der oberen Bodenschichten beeinflusst. Das Niederschlagswasser versickert im wasserungesättigten Boden (Bodenwasser) und erreicht nach unterschiedlich langer Sickerzeit den Grundwasserspiegel bzw. den Tunnel. Die Sickerzeit ist abhängig von der Sickergeschwindigkeit und der Tiefenlage des Tunnels. Die Sickergeschwindigkeit wird wiederum von der Art des Wasserleiters bestimmt. Dabei ist zwischen Poren- und Kluftwasserleitern zu unterscheiden. Kluftwasserleiter treten vorwiegend in Kalk- und Dolomitformationen sowie in metamorphen und (untergeordnet) magmatischen Gesteinen auf und können extrem hohe Sickergeschwindigkeiten aufweisen. Bei Porenwasserleitern

ist dagegen die Permeabilität (Durchlässigkeit der Gesteine), definiert durch die Nutzporosität, entscheidend. Porenwasserleiter sind für klastische Sedimentgesteine (Sand-, Schluffstein) charakteristisch. In sandigen Sedimentgesteinen lassen sich Sickergeschwindigkeiten von einigen Metern pro Tag, in sandig-lehmigem Material von einigen Metern pro Jahr feststellen.

Der wasserungesättigte Bereich umfasst alle Boden- und darunter liegenden Gesteinsschichten bis zum Grundwasserspiegel. Da dieser Bereich nicht wasserungesättigt ist, werden die Poren durch Boden- bzw. Grundluft ausgefüllt. Diese Luft enthält aufgrund der Bodenatmung und des behinderten Konzentrationsausgleichs weniger Sauerstoff und mehr Kohlendioxid als die Luft der Atmosphäre. Beim Durchsickern dieser Boden- und der darunter liegenden Gesteinsschichten kommt es zu wesentlichen Konzentrationsanreicherungen in den deszendente Wässern. Neben der Lösung von nicht unerheblichen Mengen an Kohlendioxid und Mineralsalzen werden zahlreiche weitere Substanzen wie Humussäuren, Ammoniumverbindungen, Nitrite, Nitrate etc. aus dem Boden aufgenommen. Die chemische Zusammensetzung des Sicker- und Grundwassers wird durch die Mineralisation organischer Wasserinhaltsstoffe bestimmt sowie unmittelbar und mittelbar durch biologische Vorgänge beeinflusst. Im Grundwasser werden im Wesentlichen drei Gruppen von Mikroorganismen wirksam.

- Bakterien (wurden bis in Tiefen von 2700 m und bei Drücken bis ca. 300 bar nachgewiesen und sind deshalb auch für aszendente Wässer relevant)
- Aktinomyzeten (so genannte Strahlenpilze; gehören jedoch zu den Bakterien) können zu Myzelien (Fadengeflechten) anwachsen
- Pilze

Unmittelbare Veränderungen der Wasserchemie werden hauptsächlich durch folgende biologische Vorgänge verursacht.

- Bakterieller Abbau organischer Verbindungen und Bildung von organischen Säuren sowie von Kohlendioxid
 - Sulfat-Reduktion unter anaeroben Bedingungen, mit Bildung von Schwefelwasserstoff bzw. sogar von elementarem Schwefel
 - Nitrat-Reduktion (Denitrifikation) durch Bakterien und Pilze (Streptomyceten) unter anaeroben Bedingungen ($O_2 < 5 \text{ mg/l}$); zuerst Abbau von Nitrat zu Nitrit, welches anschließend mikrobiell zu elementarem Stickstoff-Gas abgebaut werden kann; andere Bakterien bilden aus Nitrit durch Reduktion Ammonium-Ionen
 - Nitrifikation im aeroben Grundwasser durch Stickstoffbakterien (Nitrosomonas, Nitrococcus, Nitrobacter); Oxidation von Ammonium- und Nitrit-Ionen zu Nitrat-Ionen
 - Schwefelsäurebildung durch aerobe Bakterien; Umwandlung von Sulfid- zu Sulfat-Ionen
 - Lösungs- und Fällungsvorgänge von Eisen- und Manganverbindungen in Abhängigkeit des Redox-Potenzials und dem *pH*-Wert des Grundwassers, weitgehend unter Beteiligung von Mikroorganismen als Katalysatoren
- Grundsätzlich liefert jedoch die Aufnahme von Kohlendioxid und Calcium-Ionen die Begründung für die in den Tunnelentwässerungssystemen auftretenden Versinterungen und wird deshalb nachfolgend genauer betrachtet. In den Drainagesystemen der Tunnel im Einflussbereich deszendenter Wässer treten am häufigsten Calcitablagerungen auf. Dabei wirken Temperaturerhöhung, Eindickung und ein Zusam-

Tabelle 1. Wichtigste mineralische Ablagerungen in wasserführenden Systemen sowie deren Ursache
Table 1. Most important mineral deposits in aquatic systems as well as their cause

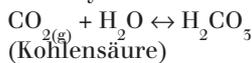
Ablagerungen	Summenformel	Ursachen des Entstehens
Kesselstein, Wasserstein, Calcit, Kalk, Calciumcarbonat	CaCO ₃	Entweichen von Kohlensäure, pH-Wert-Erhöhung, Eindickung
Gips, Calciumsulfat	CaSO ₄ *aq	Eindickung, SO ₂ -Aufnahme
Bariumsulfat	BaSO ₄	Eindickung, SO ₂ -Aufnahme
Calciumphosphat, Phosphatstein, Hydroxylapatit (bei pH > 8)	Ca ₃ (PO ₄) ₂ , Ca ₅ (PO ₄) ₃ OH, Ca ₅ (OH)(PO ₄) ₃	Phosphatierung, pH-Wert-Erhöhung, Eindickung
Magnesiumsilikat	MgSiO ₃	Starke Eindickung, pH-Wert-Erhöhung (Kesselbetrieb)
Ocker, Rost, Eisenoxid	Fe ₂ O ₃ *aq	Fe(II)- / Fe(III)-Oxidation, Werkstoffkorrosion
Braunstein, Manganoxid	MnO ₂	Mn(II)- / Mn(IV)-Oxidation
Sand, Kieselsäure	SiO ₂	Verschmutzung durch äussere Einflüsse, Dampflichkeit

294

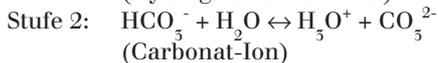
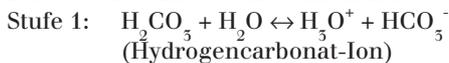
Beispiel chemischer Reaktionen fördernd auf die Bildung der Versinterungen. Letztere werden durch Störungen des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichtes hervorgerufen.

Mehr als 80% der gelösten Substanzen von Wasser in kalkhaltiger Umgebung lassen sich durch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, d.h. durch die Aufnahme, Hydratation und Dissoziation von Kohlendioxid und die Auflösung von Kalk (CaCO₃) erklären. Für dieses Gleichgewicht sind folgende Säure-Basen-Reaktionen bedeutend.

1. Lösung von Kohlendioxid in Wasser und Bildung von Kohlensäure durch Hydratation:



2. Diese dissoziiert sehr schnell in zwei Stufen:



Alle Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen, die in beide Richtungen ablaufen können. Die im Wasser gelösten Kohlendioxid- und Kohlensäure-Moleküle sowie die Hydrogencarbonat- und Carbonat-Ionen stehen allesamt in einem Gleichgewicht (Bild 2).

Die Hydratation des gelösten Kohlendioxids ist eine langsame Reaktion. Deshalb liegen ca. 99 % des gelösten Kohlendioxids in der Lösung molekular, d.h. in Form von CO₂-Hydrat vor und lediglich ca. 1 % ist zu Kohlensäure hydratisiert. Die Dissoziation der Kohlensäure in Hydronium-Ionen (H₃O⁺ = H⁺ + H₂O) sowie Hydrogencarbonat- (HCO₃⁻) bzw. Carbonat-Ionen (CO₃²⁻) ist hingegen eine schnelle Reaktion. Wie bei allen Gasen ist auch die Löslichkeit von Kohlendioxid abhängig von seinem Partialdruck, respektive der Zusammensetzung der Gasphase und ihrem Gesamtdruck. Bei Gesamtdruckerhöhung steigt der Partialdruck und es kommt zu weiterer Lösung von Kohlendioxid im Wasser. Bei Abwesenheit der Gasphase, wie z.B. in artesisch gespanntem Grundwasser und auch in Tiefengrundwässern, ändert sich das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht erst ab einem Druck > ca. 25 bar deutlich, weil die Gültigkeit des Henry'schen Gesetzes verlassen wird und die Gaslöslichkeit nicht mehr in linearem Zusammenhang mit dem Partialdruck steht.

2.2 Grundlegende Vorgänge der Calcium-Ionen-Aufnahme

Während der Versickerung des Bodenwassers zum Grundwasser oder im Grundwasserleiter (Aquifer) löst das kohlen-säurehaltige Wasser kalkhaltige Gesteine oder Kalksteine auf. Kalkstein ist in reinem Wasser nur gering löslich. Seine Löslichkeit nimmt jedoch mit steigendem Kohlendioxid-Gehalt des Wassers zu (Bild 3).

Die Kalklöslichkeit wird durch den pH-Wert des Wassers bestimmt. Nicht nur durch Änderungen des Kohlen-säuregehalts im Wasser, sondern auch durch Zugabe von Basen kann der pH-Wert ansteigen. Eine Erhöhung des pH-Wertes führt zu einer Verschiebung des Kohlen-säure-Dissoziations-Gleichgewichts (Bild 2). Die Konzentration von Carbonat-Ionen in der Lösung steigt an. Da das Löslichkeitsprodukt konstant ist, wird die aufnehmbare Calcium-Ionenkonzentration in der Lösung geringer. Bei gesättigter Kalk-Kohlendioxid-Lösung wird durch Erhöhung der Konzentration an Carbonat-Ionen das Löslichkeitsprodukt von Calciumcarbonat (CaCO₃) überschritten und es kommt zur Ausfällung von makroskopischen Salzkristallen. Ab einem pH-Wert von etwa 12 tritt jedoch keine signifikante Zunahme der Carbonat-konzentrationen mehr auf, weshalb bei weiterem Anstieg des pH-Wertes über 12 keine weitergehenden signifikanten Calciumcarbonat-Ausfällungen zu erwarten sind.

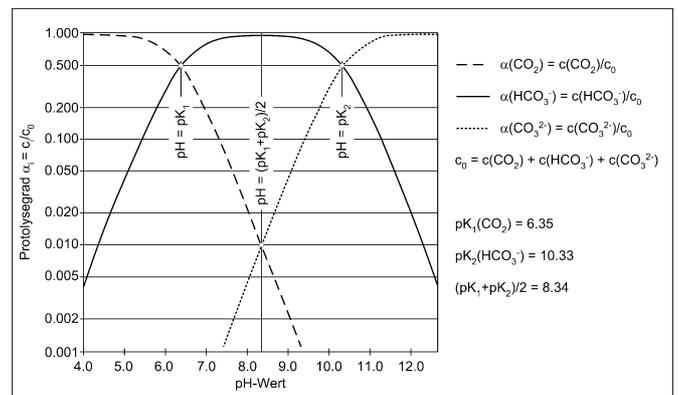


Bild 2. Protolysediagramm der Kohlensäure und ihrer zugehörigen Anionen (Ionenstärke I = 0 mol/l und Temperatur T = 25 °C)

Fig. 2. Protolysis diagram of carbonic acid and their associated anions (ionic strength I = 0 mol/l and temperature T = 25 °C)

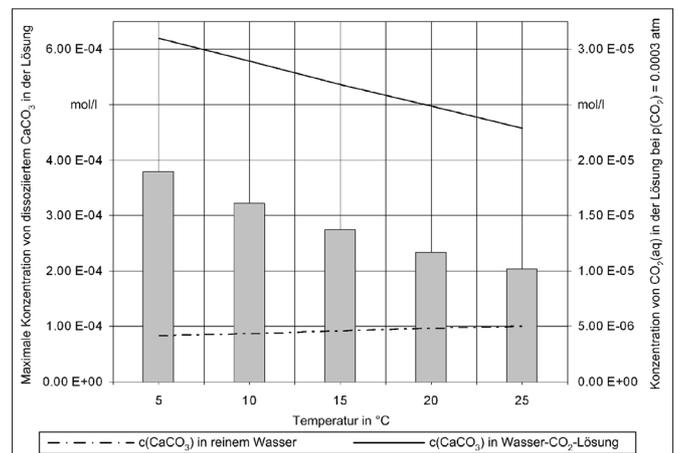


Bild 3. Löslichkeit von Calciumcarbonat in Abhängigkeit der Temperatur von 5 bis 25 °C, in reinem Wasser und in kohlendioxidgesättigtem Wasser bei einem Partialdruck p(CO₂) = 0,0003 atm (Atmosphäre)

Fig. 3. Solubility of calcium carbonate in dependency on temperature in the range of 5 to 25 °C, in pure water and in water saturated with carbon dioxide at a partial pressure p(CO₂) = 0,0003 atm (atmosphere)

Weiterhin nimmt, bei konstantem Kohlendioxid-Partialdruck, mit zunehmender Temperatur der Lösung die Löslichkeit der Erdalkalcarbonate ab, da die gelöste Kohlendioxid-Menge sinkt. Die Löslichkeit von Calciumcarbonat in reinem Wasser ist sehr gering, nimmt jedoch mit der Temperatur zu. Durch die Zuführung von Wärme wird die freie Energie des Systems erhöht. Dadurch werden die erforderliche Lösungsenthalpie zur Zerstörung des Kristallgitters und dem Aufbau von Hydrathüllen aufgebracht und somit weitere Lösungsprozesse von Calciumcarbonat ermöglicht (Bild 3, Strich-Punkt-Linie).

Liegt hingegen eine Lösung von Calciumcarbonat in kohlendioxidhaltigem Wasser vor, wird die Löslichkeit maßgeblich von der Kohlendioxid-Konzentration gesteuert (Bild 3, durchgezogene Linie). Die Löslichkeit des Calciumcarbonats ist im Vergleich zu reinem Wasser deutlich höher und verläuft gleichsinnig mit der Gleichgewichts- CO_2 -Konzentration. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Konzentration des gelösten Kohlendioxids (in Bild 3 als Balken skaliert auf der rechten Ordinate; überhöht dargestellt). Deshalb verringert sich die Löslichkeit von Calciumcarbonat und es kommt zur Bildung von stabilen Salzkristallen bei der Erwärmung einer gesättigten Kalk-Kohlendioxid-Lösung. Umgekehrt wird bei jedem Absinken der Temperatur in einem im Gleichgewicht stehenden Wasser wiederum zusätzliches Kohlendioxid für die Kalklösung verfügbar. Dieser Zusammenhang beschreibt die so genannte Abkühlungskorrosion, bei der, trotz abnehmender Temperatur und damit einhergehender Abnahme des Löslichkeitsproduktes, weiteres Salz gelöst werden kann.

Schlussendlich beeinflusst der Gehalt an Fremdionen die Löslichkeit von Calciumcarbonat. Durch Vorhandensein eines leicht löslichen Salzes ohne gemeinsames Ion in der Lösung, z.B. Natriumchlorid (NaCl), Kaliumchlorid (KCl) oder Ammoniumnitrat (NH_4NO_3), wird die Löslichkeit des schwer löslichen Calciumcarbonats erhöht.

Höhere Konzentrationen an Fremdionen verringern die Aktivitäten der am Löslichkeitsprodukt des Calciumcarbonats beteiligten Ionen durch interionische Wechselwirkungen. Da im Löslichkeitsprodukt grundsätzlich Aktivitäten einzusetzen sind, muss die Konzentration steigen, um die dem Löslichkeitsprodukt entsprechenden Aktivitäten zu erreichen.

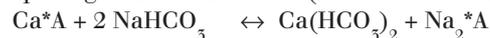
Zwischen der Boden- bzw. Grundluft, dem Boden- bzw. Grundwasser und den im Boden bzw. im Grundwasserleiter enthaltenen Stoffen, insbesondere dem Calciumcarbonat, herrscht oft annähernd ein Gleichgewicht, da die Reaktionen relativ zur Verweildauer des Wassers schnell ablaufen. Infolge des erhöhten Kohlendioxid-Gehalts des Sickerwassers werden die Auflösungsprozesse von Calcit und anderen Gesteinen erhöht und beschleunigt. Je größer der Kohlendioxid-Gehalt, desto aggressiver wirkt das Sickerwasser auf das Gestein.

Die Tendenz der Lösung zur Auflösung von Gestein bzw. zur Bildung von Ablagerungen wird durch den Sättigungsindex SI bestimmt. Dieser beschreibt das Verhältnis von im Gleichgewicht gebundener Kohlensäure zur Gesamt-Kohlensäure-Konzentration. Bei $SI < 0$ ist die Lösung untersättigt und enthält noch freie Kohlensäure. Sie wird daher als kalkaggressiv bezeichnet. Eine gesättigte wässrige Lösung hat einen Sättigungsindex $SI = 0$ und befindet sich im thermodynamischen Gleichgewicht (Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht).

Es wird die gleiche Menge an Calcit gelöst, wie gleichzeitig ausfällt. Das Wasser ist weder kalkaggressiv, noch wird Kalk abgeschieden. Kalkabscheidendes Wasser ($SI > 0$) ist übersättigt und neigt zur Bildung von Ablagerungen.

Neben der direkten Lösung von Calciumcarbonat aus den Gesteinen, ist ein weiteres, nicht zu verachtendes Potenzial der Anreicherung des Sicker- und Grundwassers mit versinterungsfähigen Stoffen, die Fähigkeit bestimmter gesteinsbildender Minerale, Ionen auszutauschen. Glimmer, Zeolithe, Tonminerale (insbesondere Montmorillonit), Eisen-, Mangan- und Aluminiumhydroxide sowie bestimmte Humusstoffe sind in der Lage, Ionen aus der Lösung zu substituieren. Sie lagern diese an oder bauen sie in ihr Kristallgitter ein. Da dies im Austausch erfolgt, wird eine äquivalente Menge gleich geladener Ionen an die Lösung abgegeben. Die Austauschvorgänge sind grundsätzlich umkehrbar. Die Reaktionsrichtung ist abhängig von den Ionenkonzentrationen in der Lösung. Der Umfang und die Geschwindigkeit, mit der diese Austauschvorgänge ablaufen, werden durch Art und Beschaffenheit der Ionentauscher bestimmt.

Eine wesentliche Rolle im Zusammenhang mit der Versinterungsentstehung in den Tunnelentwässerungssystemen spielt der Kationenaustausch, für den nachfolgend zwei Beispiele genannt sein sollen (A – Ionentauscher).



Um den Transport von Kalk mit dem Grundwasser in die Tunneldrainagesysteme und die dortige Ablagerungsbildung besser verstehen zu können, werden nachfolgend anhand von einfachen Gleichgewichtsrechnungen die Konzentrationsänderungen im Boden, beim Übergang in den Tunnel und im Drainagesystem dargestellt. Dabei wird ein Tag simuliert, der charakteristisch für den Frühling bzw. Spätherbst ist. Die Temperatur der Atmosphäre beträgt ca. 15°C , die des Bodens ca. 10°C .

2.3 Kohlendioxid-Aufnahme in der Atmosphäre

In der Luft kommt Kohlendioxid lediglich als Spurenbestandteil vor ($V(\text{CO}_2)/V = 0,030\%$). Die Konzentration von Kohlensäure im Gleichgewicht mit dem Regenwasser lässt sich durch Gleichgewichtsrechnungen ermitteln. Für pristines Regenwasser (destilliertes Wasser in einer reinen Atmosphäre) ist die Zusammensetzung in Bild 4 angegeben.

Pristines Regenwasser ist als Wasser in einer reinen Atmosphäre zu verstehen. Die chemische Zusammensetzung wird nur durch das Gleichgewicht mit Kohlendioxid bestimmt. Gewöhnlich enthält Regenwasser jedoch zusätzliche Säuren, die die Gleichgewichte beeinflussen und zu geringfügig anderen Konzentrationen führen. Da diese Ermittlung jedoch im Zusammenhang mit den Versinterungen der Tunnelentwässerungen zu weit führen würde und die Konzentrationen im Regenwasser nicht allzu relevant sind, wird auf weitere Betrachtungen hierzu verzichtet.

2.4 Kohlendioxid-Aufnahme im Boden

Das aus der Atmosphäre stammende Kohlendioxid stellt nur einen geringen Anteil dar. Anders verhält sich die Menge des im Boden aufgenommenen Kohlendioxids. Im Erdboden verändert sich die Zusammensetzung der Gasphase. Die obersten Bodenschichten, auch Rhizosphäre (Wurzelraum) genannt, sind mit Wurzeln der Pflanzen durchzogen. Durch die aerobe Atmung der Wurzeln und Mikroorganismen wird

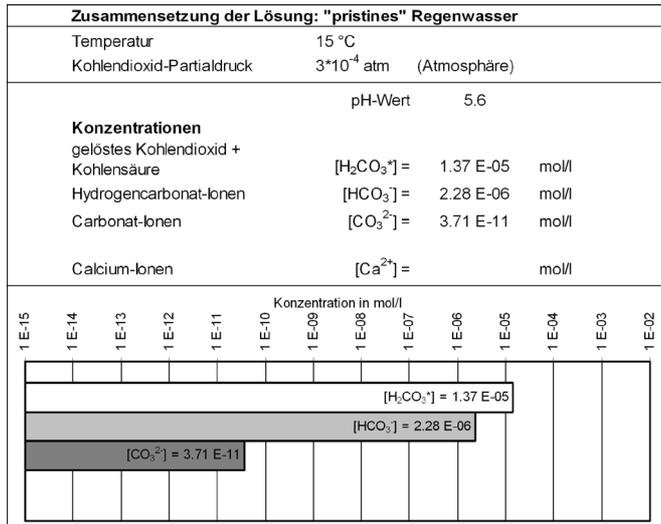


Bild 4. Kohlensäure-Gleichgewicht von pristinem Regenwasser
Fig. 4. Carbon dioxide equilibrium in pristine rainwater

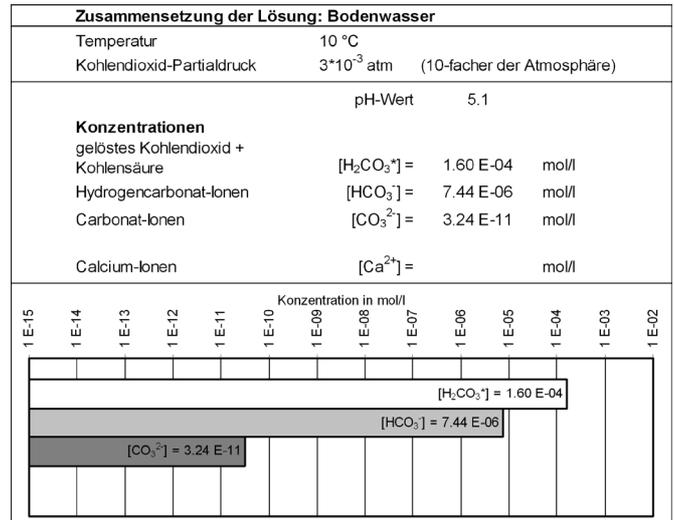


Bild 5. Kohlensäure-Gleichgewicht von Sickerwasser bei zehnfachem atmosphärischem Kohlendioxid-Gehalt in der Bodenluft
Fig. 5. Carbon dioxide equilibrium of seepage water at ten times atmospheric carbon dioxide content in subsurface air

der Bodenluft Sauerstoff entnommen und Kohlendioxid freigesetzt. Die Wurzeln gehören zu den atmungsaktivsten Geweben der Pflanzen. Die Bodenluft weist daher in der Regel einen mehrfach höheren Kohlendioxid-Gehalt und erniedrigte Sauerstoff-Konzentrationen als die Atmosphäre auf [2]. Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie kann gezeigt werden, dass bei bekanntem respiratorischem Quotient im Boden ($RQ = \text{produziertes CO}_2 / \text{verbrauchtes O}_2$) zwischen den Gaskonzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Stickstoff lineare Beziehungen bestehen. Demnach wird bei *äquimolarer Atmung* ($RQ = 1$) Kohlendioxid stärker angereichert, als Sauerstoff verbraucht wird. Außerdem nimmt die Konzentration an Stickstoff mit steigender Kohlendioxid-Konzentration leicht ab. Dieser Effekt beruht auf der etwas geringeren diffusiven Mobilität von Kohlendioxid gegenüber der von Sauerstoff [3]. Vereinfacht bedeutet dies, dass die verzögerte Abfuhr des produzierten Kohlendioxids zu geringfügiger Erhöhung des Absolutdrucks führt. Die Gaskonzentrationen werden also offensichtlich von unterschiedlichen Prozessen gesteuert.

Bei *aerober Atmung* beträgt der respiratorische Quotient $RQ = 1$, d.h. je mol verbrauchter Sauerstoff wird ein mol Kohlendioxid freigesetzt. Der Absolutdruck der Bodenluft muss daher konstant bleiben. Die Partialdrücke ändern sich jedoch. Durch die Partialdruckunterschiede werden Diffusionsvorgänge angetrieben, die den Boden mit Sauerstoff versorgen und Kohlendioxid an die Atmosphäre abgeben. Die jeweiligen Konzentrationen in der Gasphase des Bodens werden sowohl durch die Intensität der Bodenatmung als auch durch die Gasdurchlässigkeit insbesondere des Oberbodens bestimmt.

Messungen von Schack-Kirchner et al. [4] ergaben, dass der Bereich des äquimolaren Gaswechsels relativ scharf bei 1 % Kohlendioxid in der Bodenluft verlassen wird, d.h. dass darüber mehr Sauerstoff aus der Bodenluft verbraucht wird, als Kohlendioxid in der Gasphase des Bodens angereichert wird. Die Ursachen dafür können einerseits anorganische Oxidationen von Nebengruppenelementen sein, die in verschiedenen Oxidationsstufen auftreten können (z.B. Eisen oder Mangan). Wahrscheinlicher ist aber, dass ein Großteil des Kohlendioxids mit dem Sickerwasser abgeführt wird,

denn Kohlendioxid ist in Wasser sehr viel stärker löslich als Sauerstoff. In tieferen Bodenhorizonten mit geringerer biologischer Aktivität wurden relativ hohe Konzentrationen an Kohlendioxid beobachtet [4]. Dort kann die Abfuhr mit dem Sickerwasserfluss bestimmender Prozess der Sauerstoff-Kohlendioxid-Verteilung werden. Durch die Abfuhr des Kohlendioxids kommt es zu einer Verminderung des Absolutdrucks, der eine konvektive Luftströmung von der Atmosphäre in den Boden bewirkt. Dies lässt sich unter Umständen anhand der beobachteten, deutlichen Anreicherung von Stickstoff im Bereich des *nicht-äquimolaren Gaswechsels* ($RQ < 1$) gegenüber der Atmosphäre nachweisen, weil Stickstoff weder von den Pflanzen bzw. Organismen verbraucht, noch vom Wasser in größeren Mengen gelöst und abtransportiert werden kann [5]. Andererseits kann Stickstoff durch Denitrifikation von sauerstoffhaltigen Stickstoffverbindungen entstehen.

Der Kohlendioxid-Gehalt der Bodenluft kann durch die langsame diffusive Entsorgung des Atmungs-Kohlendioxids bis zu einem zehnfachen oder hundertfachen der Atmosphärenkonzentration anwachsen. In schlecht belüfteten Böden sind Kohlendioxid-Konzentrationen von 0,3 bis 5 % möglich [6]. Man erkennt deutlich (Bild 5 verglichen mit Bild 4), dass die Kohlendioxid-Anreicherung im Boden infolge der Atmung von Wurzeln und Mikroorganismen versauernd auf die Bodenlösung wirkt. Weiterhin nehmen die Wurzeln der Bäume und Pflanzen mehr Kationen als Anionen auf. Dadurch kommt es zusätzlich zu einer Erhöhung der Acidität des Bodenwassers, d.h. einer Freisetzung von Hydronium-Ionen. Auch durch Humifizierung (Bildung von Humussäuren) und Oxidation von Schwefel- und Stickstoffverbindungen findet eine aktive H⁺-Ionen-Produktion statt.

Theoretische Gleichgewichtsbetrachtungen zeigen jedoch, dass der *pH*-Wert in carbonatfreien Böden allein aufgrund des Atmungs-Kohlendioxids kaum unter 5 fällt. Bei höheren *pH*-Werten in carbonathaltigen Böden ($pH > 6,5$) kann jedoch die biogene Kohlendioxid-Bildung treibende Kraft der Bodenversauerung sein. Um eine Versauerung der Waldböden durch freigesetzte H⁺-Ionen infolge der Kationen-Aufnahme der Pflanzen, vor allem aber durch saure Niederschläge zu verhindern, werden diese in der Regel periodisch

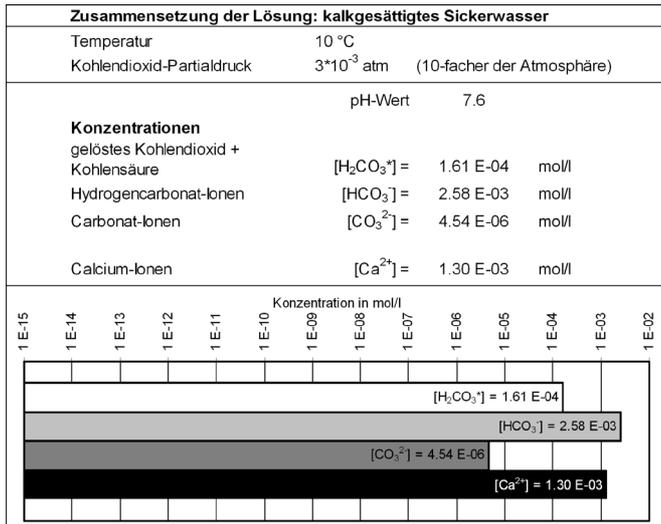


Bild 6. Sickerwasser im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht
Fig. 6. Seepage water in calcium carbonate equilibrium

gekalkt. Beispielsweise sind bei einer Säurebelastung von 1,5 kmol H⁺ durch Deposition (sauere Niederschläge) und 0,5 kmol H⁺ pro Hektar und Jahr durch die Nutzung, 100 kg Kalk pro Jahr und Hektar nötig, um diese mittlere jährliche Säurebelastung zu kompensieren [7].

2.5 Calcium-Ionen-Aufnahme des Sicker- und Grundwassers

In den vorangegangenen Beispielrechnungen wurde aufgezeigt, an welcher Stelle der Versickerung und durch welche biochemischen Vorgänge sich die Kohlensäure-Konzentration im Sickerwasser erhöht. Auch wurde bereits ein Calciumlieferant, nämlich die Kalkausbringung über Waldgebieten, identifiziert. Da die Kohlensäure-Konzentration des Niederschlagswassers an der Bodenoberfläche jedoch noch sehr gering ist (Bild 4), kann das Regenwasser in situ keine großen Mengen dieser Kalkquelle auflösen. Erst im Bereich der Rhizosphäre erfährt es eine deutliche Zunahme der Kohlensäure-Konzentration. Da das Wasser dann kalkaggressiv (SI < 0) ist, löst es Calciumcarbonat aus den Gesteinen und bildet wasserlösliches Calciumhydrogencarbonat.
 $Ca^{2+} + CO_3^{2-} + H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow Ca^{2+} + 2 HCO_3^-$

Kalk ist Bindemittel zwischen den Körnern der meisten Sedimentgesteine. Deshalb enthalten nicht nur Sickerwässer, die durch Kalk- und Mergelgestein gesickert sind, hohe Konzentrationen gelösten Calciumcarbonats, sondern auch Sickerwässer z.B. aus Molassegestein in unterschiedlichen Mengen. Bedeutende Lieferanten für Calcium-Ionen sind weiterhin Anhydrit- und Gipsschichten, die das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht deutlich beeinflussen. Deshalb wird auch bei scheinbar nicht kalkhaltigen Gesteinen das Sicker- und Grundwasser mit Calcium-Ionen angereichert. Spätestens jedoch, wenn das Wasser durch die Spritzbetonschale des Tunnels oder durch Injektions- bzw. Ankermörtel sickert, wird es Kalkkomponenten aus dem Zementstein oder kalkhaltigen Zuschlägen lösen. Besonders stark ist die Lösung von Kalkkomponenten, je größer der spülende Angriff des Wassers und die Kontaktfläche zwischen Beton und Wasser sind. Deshalb stellen die zementgebundenen Sickerpackungen um die Drainagerohre eine besonders gut auszulagende Kalkquelle dar. Die Auflösung von Calcit läuft ab, bis das kalkaggressive Wasser nicht mehr mit Beton bzw.

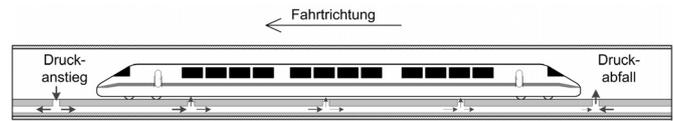


Bild 7. Luftströmung in den Entwässerungsleitungen aufgrund von Verkehr
Fig. 7. Air stream in the drainage pipes as a result of traffic

Mörtel in Kontakt steht oder bis sich die Lösung im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht befindet. Aufgrund der langen Fließstrecken, der geringen Fließgeschwindigkeit und des ausgeprägten Wasser-Beton-Kontakts infolge enger Sickeröffnungen ist es in versinterungsgefährdeten Drainagehalten deshalb höchstwahrscheinlich, dass das Wasser in den Tunnelentwässerungsleitungen kalkgesättigt (SI = 0) ist (Bild 6).

2.6 Versinterungsentstehung in den Tunnelentwässerungssystemen

Aufgrund der hohen Kohlendioxid-Gehalte im Boden und den daraus resultierenden hohen Kohlensäure-Konzentrationen des Sicker- bzw. Grundwassers kann das Wasser bis zum Eintritt in die Tunneldrainage relativ große Mengen an Erdalkalicarbonaten (vor allem Calciumcarbonat) aufnehmen. Diese hohen Konzentrationen können jedoch innerhalb des Tunnelentwässerungssystems nicht mehr gehalten werden, da sich hier wiederum atmosphärische Zustände befinden. Zwar ist die Temperatur im Tunnel im Sommerhalbjahr geringer als auf der Erdoberfläche, jedoch oftmals höher als im Gebirge selbst. Insbesondere in langen, schlecht belüfteten und Straßentunneln sind teilweise deutlich höhere Temperaturen festzustellen. Die Kohlendioxid-Konzentration liegt jedoch aufgrund der ständigen Luftbewegung im Bereich der freien Atmosphäre.

Da Kohlendioxid schwerer als Luft ist, könnte dies zur Annahme führen, dass es in den Entwässerungsleitungen zu einer Anreicherung kommt, die letztendlich das hohe Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht aufrechterhält. Diese Annahme kann jedoch nicht bestätigt werden, da es sowohl durch die Verkehrsvorgänge als auch durch natürliche Luftströmungen von einem Portal zum anderen zu einem ständigen Luftaustausch der Drainageluft mit der atmosphärischen kommt.

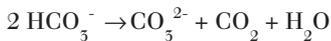
Aufgrund der Trägheit der Luftmassen im Tunnel entstehen vor einem fahrenden Fahrzeug ein erhöhter Luftdruck und dahinter ein geringerer Luftdruck als der Atmosphärendruck (Bild 7). Der hohe Druck vor dem Fahrzeug drückt die Luft nicht nur in Fahrtrichtung aus dem Tunnel, sondern auch durch die undichten Abdeckungen der Kontroll- und Reinigungsschächte in die Entwässerungsleitungen. Infolge der Druckverringerung hinter dem Fahrzeug wird nicht nur Luft durch den Tunnelquerschnitt nachgedrückt, sondern auch wiederum aus den Schächten des Entwässerungssystems. Insbesondere zwischen den Schächten, zwischen denen sich das Fahrzeug gerade befindet, herrscht ein Luftdruckausgleich und somit eine starke Luftströmung (Striping-Effekt). In verschiedenen Tunneln der Schnellfahrstrecke wurde beobachtet, dass die ca. 75 bis 80 Kilogramm schweren Betonabdeckungen der Schächte (Betonelemente 105 x 30 x 10 cm) durch den Luftstrom aus der Entwässerung geringfügig angehoben werden, bis der Strömungsquerschnitt durch die Fugen so groß ist, dass sich ein Kräftegleichgewicht zwischen Auftrieb und Eigengewicht eingestellt hat.

Die Größe der sich bildenden Luftdruckschwankungen ist abhängig von der Ruhezustands-Luftströmung (ohne Verkehr) im Tunnel, der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und seiner Aerodynamik (Luftwiderstand). Der Luftwiderstand hängt nicht nur von der Gestalt des Fahrzeugs ab, sondern auch von dem Verhältnis Querschnittsfläche Fahrzeug zu Querschnittsfläche Tunnel. Besonders hoch werden die Luftdruckunterschiede bei Gegenverkehr im Tunnel. Begegnen sich beispielsweise zwei schnelle Züge, dann werden die Druckänderungen 2,5 bis 2,7-mal so stark wie bei Einzelfahrt [8].

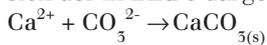
Zum besseren Verständnis sei hier ein leicht nachzuvollziehender Vergleich dargestellt. Bei Tunnelfahrt mit dem PKW in einer einbahnigen zweispurigen Autobahntunnelröhre (100 km/h) bemerkt man in Auto keinen wesentlichen Luftdruckanstieg, während man bei Tunnelfahrt in einem ICE mit höherer Geschwindigkeit deutliche Luftdruckunterschiede spürt, obwohl diese Züge im Gegensatz zum PKW besonders auf Luftdruckschwankungen abgedichtet worden sind.

Grundsätzlich ist es unerheblich, ob man das Drainagesystem eines Straßentunnels oder eines Bahntunnels betrachtet, da regelmäßige LKW-Fahrten das gleiche Szenario auslösen wie Zugverkehr in einem Bahntunnel.

Im Entwässerungssystem herrscht somit immer ein atmosphärisches Milieu. Da das eintretende Sickerwasser in einem Gleichgewicht steht, welches einem höheren Kohlendioxid-Partialdruck entspricht, muss es Kohlensäure an die Drainageluft abgeben. Durch die Abnahme der Menge an gelöstem Kohlendioxid verringert sich die Konzentrationssumme c_0 (Bild 2). Um das Kohlendioxid-Dissoziationsgleichgewicht wiederherzustellen, dissoziiert das Hydrogencarbonat zu Kohlendioxid sowie zu Carbonat-Ionen und Wasser.



Dadurch reduziert sich einerseits die Menge der Anionen, an die die Calcium-Ionen gebunden sind, um leichter löslich zu sein, und die Konzentration an Carbonat-Ionen (CO_3^{2-}) steigt, so dass das Löslichkeitsprodukt von Calciumcarbonat überschritten wird und Calcitkristalle ausfallen. Es stellt sich der in Bild 8 dargestellte Gleichgewichtszustand ein.



2.7 Einflussfaktoren auf die Entstehung der Versinterungen

Die Geschwindigkeit, mit der sich das atmosphärische Gleichgewicht einstellt, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dies ist zum einen die Größe der Kontaktfläche zwischen Gasphase und Lösungsmittel. Je größer die Kontaktfläche ist, desto schneller kann das überschüssige Kohlendioxid aus dem Wasser entweichen. Aus diesem Grund sind auch die Entwässerungsleitungen mit Hufeisenprofil ebenso wie überdimensionierte Rohrleitungen ungeeignet für die Bergwasserfassung in Tunneln, da bereits bei kleinen Wassermengen der Gasphase eine große Kontaktfläche zum Gasaustausch geboten wird.

Weiterhin bedeutet eine große Wasseroberfläche große Mengen von verdunstendem Lösungsmittel, wodurch die Lösung eindickt und das Löslichkeitsprodukt gelöster Salze überschritten wird.

Besonders im Sommer und verstärkt in den Portalbereichen kommt es durch den ständigen Luftwechsel zur Erwärmung der Luft in den Drainageleitungen. Dadurch steigt auch die

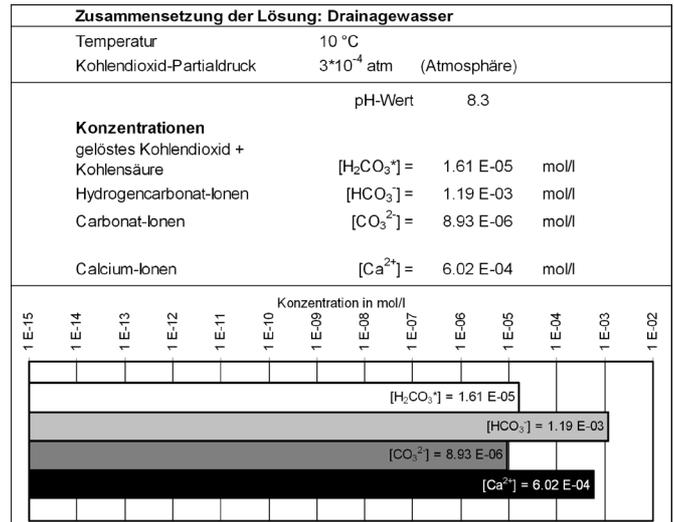


Bild 8. Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Drainagewassers nach Einstellung des Gleichgewichts mit dem Kohlendioxid-Partialdruck der Atmosphäre

Fig. 8. Calcium carbonate equilibrium of drainage water after balancing with carbon dioxide partial pressure of the atmosphere

Temperatur des Drainagewassers, was zu weiterem Abfall des gelösten Kohlendioxids und somit zu weiterer Ausfällung von gelösten Erdalkalicarbonaten führt.

Langsame Fließgeschwindigkeiten in den Drainage- und Sammelleitungen und lange Fließstrecken unterstützen die Versinterungsprozesse, da dadurch die Kontaktzeit und die Zeitdauer, in der sich die Gleichgewichte einstellen können, vergrößert werden. Trotzdem ist darauf zu achten, dass das Wasser laminar fließend und nicht turbulent strömend in den Leitungen abgeleitet wird. Durch turbulenten Abfluss wird die Wasseroberfläche aufgewirbelt und Luft unter die Lösung gemischt, was zu einer schnelleren Kohlendioxid-Abreicherung führt. Aus diesem Grund ist weiterhin auf eine sorgfältige Verlegung der Entwässerungsleitungen zu achten. An Abstürzen oder Imperfektionen kommt es zu Verwirbelungen, bei denen der gleiche Effekt eintritt und dem Wasser somit künstlich beschleunigt Kohlendioxid entzogen wird. In der Praxis sind an solchen Stellen starke Versinterungsschwerpunkte festzustellen.

Jedoch haben nicht alle Versinterungsschwerpunkte ihre Ursache in baulichen Mängeln. Durch die Anwesenheit von Biofilmen in den Entwässerungssystemen kann es örtlich zu starken Reduktionen der Kohlensäure-Konzentration des Wassers kommen. Diese Biofilme verarbeiten den im Wasser gelösten Kohlenstoff und entziehen deshalb dem Drainagewasser gewisse Mengen des gelösten Kohlendioxids.

Besonders schwierig ist die Behandlung von Zuflüssen unterschiedlicher Wässer. Kommt es durch den Zutritt eines stark alkalischen Wassers zu einem Gleichgewichtswasser zu einer Anhebung des pH-Wertes, verschieben sich die Dissoziations-Gleichgewichte der Kohlensäure (Bild 2) und es kommt zum plötzlichen Ausfallen von Calcitkristallen, ohne dass eine Abnahme des gelösten Kohlendioxids die ursprüngliche Ursache darstellt. Lediglich die gestiegene Anzahl der Carbonat-Ionen in der Lösung bringt das Löslichkeitsprodukt von Calciumcarbonat zum Überschreiten.

Durch ungünstige Materialien oder Verunreinigungen im Drainagesystem kann es bereits bei geringster Übersättigung zu primär heterogener Keimbildung an Feststoffoberflächen kommen.

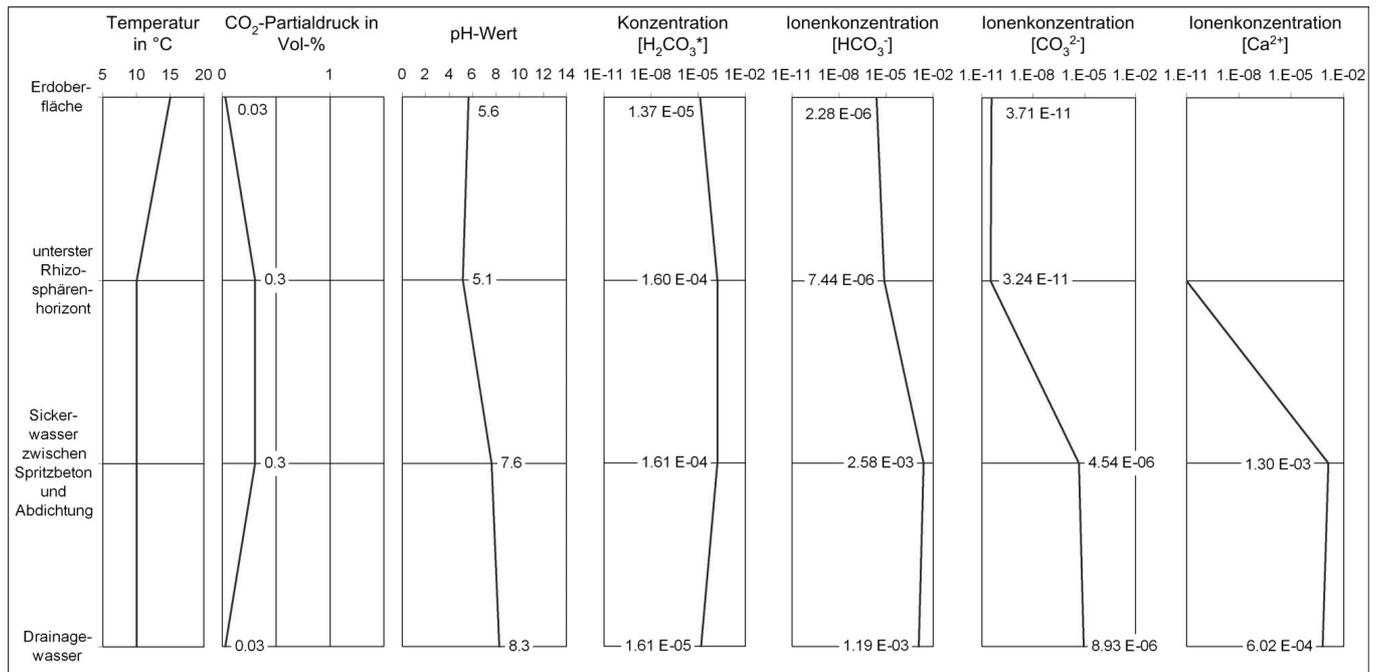


Bild 9. Konzentrationsverläufe und Eingangsparameter des Rechenbeispiels bei der Versickerung von pristinem Regenwasser bis hin zur Ableitung in der Tunnel-drainage

Fig. 9. Run of the concentrations and input parameters of the calculated example for seepage of pristine rainwater to the drainage in the tunnel

2.8 Auswertung der Beispielrechnungen

In dem dargestellten Beispiel wurden keine Auswirkungen von Wasserdruck- oder Temperaturänderungen im Drainagesystem einbezogen, um eine leichtere Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Es wurde durchweg mit einer Bodentemperatur von 10 °C gerechnet und nur die Partialdruckänderungen von Kohlendioxid im Boden berücksichtigt (Bild 9, linke Seite).

Wertet man die Reduktion der Calcium-Ionenkonzentration im Drainagesystem aus (Bild 9, rechtes Diagramm, unterer Bereich), ergibt sich eine scheinbar sehr kleine Stoffmenge von $n = 6,94 \cdot 10^{-4}$ mol/l, die sich in den Entwässerungsleitungen in Form von festem Calciumcarbonat niederschlägt. Stellt man diese Stoffmenge in Verbindung mit einer durchschnittlichen Abflussspende von $Q = 15$ l/s und bezieht den Versinterungszeitraum auf ein Jahr, ergibt sich allerdings eine jährliche Stoffmenge von $n = 3,28 \cdot 10^5$ mol/a.

Um die Masse der sich absetzenden Stoffe zu berechnen, muss die Stoffmenge mit der molaren Masse multipliziert werden. Da sich je Calcium-Ion ein Carbonat-Ion bindet, kann direkt mit der molaren Masse von Calciumcarbonat $M = 100,1$ g/mol gerechnet werden.

Pro Jahr ergibt sich deshalb rechnerisch eine Masse von $m = 32,9$ t Calciumcarbonat, die sich, lediglich aufgrund der geringen Partialdruckzunahme des Kohlendioxids im Boden und der anschließenden Anreicherung des Sickerwassers mit Calcium-Ionen durch das Gestein, die Injektions- und Anker Mörtel, den Spritzbeton und die zementgebundenen Sickerschichten, bei vollständiger Einstellung der Gleichgewichte in der Tunnelentwässerung absetzen würde. Diese Masse scheint sehr groß zu sein, wird jedoch vorstellbarer, wenn man die Dichte von Calcit ($\rho = 2,71$ g/cm³) hinzuzieht. Das sich das ablagernde Calcit-Volumen ergibt sich zu lediglich 12,1 m³/a. Verteilt man dieses Volumen gleichmäßig über die flache Sohle von hufeisenförmigen Ulmendrainageleitungen in Tunneln, die starke Versinterungserscheinungen zeigen und in denen etwa eine Wassermenge von $Q \sim 15$ l/s anfällt, erhält man eine durchschnittliche Ablagerungsstärke von etwa ein bis zwei Zentimeter. Bei diesem gleichmäßigen „Verschmieren“ wurden wohlgerne keine Ablagerungen im Rohrscheitel der Drainageröhre, in den Schächten, Querableitungen, Mittendrainagen oder Sammelleitungen berücksichtigt. Die simulierte Versinterungsmenge wurde lediglich gleichmäßig über die Sohle der beidseitigen Ulmendrainageleitungen verteilt. Werden massive lokale Ablagerungen oder Versinterungen über alle Leitungen angenommen, reduziert sich entsprechend die gleichmäßig verteilte angenommene Menge.

Es bleibt daher festzustellen, dass allein mit dem Transportmechanismus aufgrund des Partialdruckanstiegs von Kohlendioxid im Boden und späterem Rückgang auf atmosphärische Verhältnisse in der Entwässerung nur ein Teil der Versinterungen in extrem betroffenen Tunneln erklärbar ist. In der Realität bestimmt eine Vielzahl weiterer Einflüsse die Versinterungsentstehung. Die Löslichkeit von Kohlendioxid und damit der Erdalkalicarbonate wird maßgeblich durch die Temperatur, den Druck, den pH-Wert, die Konzentrationen anderer Salze mit oder ohne gemeinsame Ionen und die Möglichkeit zur Bildung von Komplexen bestimmt. Aufgrund der Komplexität aller Einflüsse ist eine allumfassende rechnerische Simulation nicht möglich. Anhand des dargestellten Beispiels konnte jedoch gezeigt werden, dass geringste Änderungen in den bestimmenden Parametern langfristig große Auswirkungen auf die Versinterungsentstehung haben.

Im Bergwasser sind neben Calciumcarbonat weitere Salze und auch organische Stoffe gelöst, die die Löslichkeit der Carbonate heraufsetzen. Jedoch liegt im Beton in ursprünglicher Struktur kein Calciumcarbonat vor. Dieses wird erst durch die so genannte Karbonatisierung aus Calciumhydroxid gebildet (Calciumhydroxid entsteht durch Abspaltung

bei der Hydratation und ist verantwortlich für die alkalische Wirkung des Betons).

Bei dieser Reaktion wird dem Sickerwasser Kohlendioxid entzogen und an die Calcium-Ionen angelagert. Durch die Abnahme der im Wasser gelösten Kohlendioxid-Menge wird die Löslichkeit von Calciumcarbonat herabgesetzt. Da die beiden Prozesse Karbonatisierung und Auflösung nebeneinander ablaufen, wird sich in Abhängigkeit der vorhandenen Konzentrationen, der Temperatur und dem Druck zwischen diesen Reaktionen ebenfalls ein Gleichgewicht einstellen.

Bereits bei der Darstellung der Zusammenhänge des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts wurde beschrieben, dass mit zunehmendem *pH*-Wert des Wassers die aufnehmbare Carbonat-Ionenkonzentration sinkt. Deshalb verringert die Lösung von Hydroxid-Ionen aus dem Beton zusätzlich die Menge der löslichen Calcium-Ionen. Da diese Lösungs- und Umwandlungs-Gleichgewichte sehr komplex sind und bei Schwankungen der Einflussparameter sehr leicht variieren, wie an den sehr unterschiedlichen Versinterungsneigungen aufeinander folgender bzw. nebeneinander liegender Drainageleitungen eines Tunnel zu beobachten sind, ist eine rechnerische Erfassung nicht genauer möglich.

3 Zusammenfassung/Ausblick

In dem hier vorliegenden Aufsatz wurden die wichtigsten Mechanismen erläutert, die zur Bildung von Versinterungen in Tunnelentwässerungssystemen beitragen. An einfachen Gleichgewichtsrechnungen wurde aufgezeigt, welche Mengen an Kalk sich, lediglich aufgrund der Änderung des Kohlendioxid-Partialdrucks auf dem Fließweg des Wassers durch den Boden, in den Entwässerungssystemen ablagern können. Dieser Aufsatz stellt daher die Grundlage für das Verständnis nachfolgender Veröffentlichungen dar.

In einem Folgeaufsatz werden, basierend auf den hier beschriebenen grundlegenden Mechanismen der Ablagerungsentstehung, Empfehlungen für die Planung und Bauausführung abgeleitet. Es werden Vorschläge unterbreitet, wie durch geeignete Baustoffe und Konstruktionen die Versinterungsneigung des Tunnelentwässerungssystems minimiert werden kann, um somit die Unterhaltskosten zu sen-

ken, die Betriebsbereitschaft zu erhöhen und die Nutzungsdauer der Drainage zu verlängern. Dabei wird sowohl speziell auf die Entwässerung, aber auch auf die Ausführung der temporären Sicherung und der Abdichtung eingegangen.

In einem späteren Folgeaufsatz werden verschiedene Instandhaltungsstrategien und -methoden diskutiert. Eine besondere Stellung nimmt hierbei ergänzend zu den post-sedimentum Reinigungsverfahren die präventive Versinterungsreduzierung durch das Verfahren der Härtestabilisation mittels Polysuccinimid-Depotsteinen ein.

Literatur

- [1] Richtlinie 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten. Modul 853.8002 – Wartung, Instandsetzung und sonstige Baumaßnahmen an bestehenden Tunneln. DB Netz AG, Frankfurt a. M. Gültig ab 01.06.2002.
- [2] Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E. E.; von Wilpert, K.: Bodensauerstoffhaushalt unter Fahrspuren. Allgemeine Forstzeitschrift 48 (1993), Nr. 3, S. 118 – 121.
- [3] Wood, J. T.; Greenwood, D. J.: Distribution of carbon dioxide and oxygen in the gas phase of aerobic soils. Journal of Soil Science, Vol. 22 (1971), No. 3, pp. 281 – 288.
- [4] Schack-Kirchner, H.; Hildebrand, E.; Hochstein, E.; von Wilpert, K.: Messung von Gaskonzentrationsprofilen in der Rhizosphäre von Waldstandorten. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 163 (1992), Jg. 11/12, S. 213 – 221.
- [5] Stolzy, L. H.; Focht, D. D.; Flüher, H.: Indicators of soil aeration status. Flora 171 (1981), pp. 236 – 265.
- [6] Hildebrandt, E.E.: Allgemeine und anorganische Chemie für Forstleute – mit Querverbindungen zu (boden)ökologischen Fragestellungen. Dritte, korrigierte und veränderte Fassung. Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 2001. Vorlesungsskript Sommersemester.
- [7] Hildebrand, E.E.: Chemische Grundlagen. Berechnung des Kalkbedarfs in Nadelholz-Baumbeständen von BW. Website: www.forst.uni-freiburg.de/bodenkunde, Downloads, Material der Kurzpräsentationen, Chemische Grundlagen 2003–01–20.
- [8] ICE dicht gemacht. Bahntech (2002), Nr. 4, S. 23.

Buchbesprechung

König; Holschemacher; Dehn: Faserbeton. 1. Auflage Bauwerk Verlag Berlin 2002. 320 S. ISBN 3-899932-019-0 44,00 EURO

Der äußerst vielseitige Baustoff Faserbeton gehört heute zu den Hightech Produkten des Bauwesens. Intensive Forschung und Entwicklung haben dazu geführt, dass Faserbetone bei der Herstellung von Industriefußböden, im Tunnelbau, im Spundwandbau und im klassischen Hochbau immer mehr zum Einsatz kommen.

Im vorliegenden Buch stellen die Herausgeber König, Holschemacher und Dehn dem interessierten Ingenieur und Wissenschaftler anhand von 22 Beiträgen zum Thema Faserbeton den Stand der Forschung und Entwicklung vor. Da-

bei werden Anwendungsbeispiele aus dem In- und Ausland sowie Anwendungsmöglichkeiten des Faserbetons bei Hochfesten und Selbstverdichteten Betonen erläutert. Außerdem werden die mechanischen und betontechnologischen Besonderheiten von Faserbeton in Hinblick auf Bemessung und Herstellung vorgestellt. Dabei wird auch auf Brandverhalten und die Festigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Temperaturen eingegangen.

In der Vielzahl von Beiträgen rund um das Thema Faserbeton findet der Leser aus der Praxis sowie der Wissenschaftler aus Forschung und Entwicklung alles wesentlich zum heutigen Stand Technik.

F. Spitza, München