
KANN DIE SPRITZBETONZUSAMMENSETZUNG DIE VERSINTERUNGSNEIGUNG IN DER SEKUNDÄREN TUNNELDRAINAGE BEEINFLUSSEN?

CAN THE SHOTCRETE MIX-DESIGN INFLUENCE THE AMOUNT OF PRECIPITATIONS IN THE TUNNEL DRAINAGE SYSTEM?

Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter **Pichler**, Materialconsult, Hart im Zillertal, Österreich
Dr. Andreas **Saxer**, Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Materialtechnologie, Österreich
Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang **Kusterle**, Hochschule Regensburg, Deutschland

Zementgebundene Stoffe bilden bei der Hydratation neben den festigkeitsrelevanten C-S-H Phasen auch eine nicht unbeträchtliche Menge an Calciumhydroxid. Die Bildung des Calciumhydroxids ist essentiell für den Korrosionsschutz des Stahls im Beton und daher eine Grundvoraussetzung für dauerhaften Stahlbeton. Calciumhydroxid kann aber auch ausgelaugt werden und damit an anderer Stelle z.B. für Aussinterungen mit verantwortlich sein.

Hauptursache für Versinterungen im Drainagesystem ist die chemische Zusammensetzung des Bergwassers. Bei bestimmten Bedingungen kann aber der zementgebundene Baustoff diese Versinterungsneigung erhöhen. Deshalb kann nach ÖVBB-Richtlinie „Spritzbeton“ als besondere Eigenschaft ein reduziertes Versinterungspotential (RV + Zahlenwert) festgelegt werden. Im Beitrag werden die Grundlagen der Versinterung, die Einflussparameter und der Einfluss des Spritzbetons behandelt. Das in der Richtlinie angeführte Prüfverfahren und eine Weiterentwicklung werden erläutert und die Ergebnisse kritisch hinterfragt. Schlussendlich wird auf die Steuermöglichkeiten in der Spritzbetonrezeptur und Ergebnisse von Baustellen eingegangen.

Ordinary Portland Cement reacts in the hydration process to C-S-H phases and a considerable quantity of calcium hydroxide. On the one hand the presence of calcium hydroxide is essential for corrosion protection of steel reinforcement embedded in concrete and therefore one of the basics for durable reinforced concrete. On the other hand calcium hydroxide is soluble and may contribute to precipitations and blockage of the drainage system.

Main reason for precipitations in the drainage system of a tunnel is the chemical composition of the mountain water. Under certain conditions cementitious materials may increase the tendency for precipitations. For this reason the Guideline “Sprayed Concrete” of the Austrian concrete association provides a concrete specification RV (reduced potential for precipitations with threshold values). This paper presents the basic principles of the precipitation process and the influencing parameters, especially regarding shotcrete. The testing procedure given in the Austrian Guideline “Shotcrete” as well as an updated modification will be commented on. Finally the possibilities for the improvement of the shotcrete mix design regarding reduced precipitations as well as first results from site tests will be addressed.

1. Einleitung

Tunnels können mit Vollabdichtung oder mit Teilabdichtung und Bergwasserentwässerung ausgeführt werden. In zweitem Fall sind primäre und sekundäre Entwässerungselemente vorzusehen und auf die vorgesehene Nutzungsdauer auszulegen. Schäden in bestehenden Tunnels zeigen die Wichtigkeit eines funktionierenden Entwässerungssystems auf (Bild 1). Bereits erhöhte Reinigungsintervalle stören den Betrieb unserer hoch ausgelasteten Verkehrstunnels. In [2] wird ein Beispiel für die Kosten von Wartungsmaßnahmen bei einem zweispurigen Eisenbahntunnel gebracht, 75 % der normalen Wartungskosten für die bauliche Anlage entfallen dabei auf die Wartung der Tunneldrainage, das sind in dem Beispiel 60 €/lfm und Jahr.

Die Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik veröffentlichte 2003 erstmals die Richtlinie „Ausbildung von Tunnelentwässerungen“. 2010 wurde diese als Richtlinie „Tunnelentwässerung“ [1] aktualisiert. Fast gleichzeitig erschien eine Neuauflage der Richtlinie „Spritzbeton“ [3]. In beiden Richtlinien ist die Möglichkeit einer Verringerung des Versinterungspotentials des Sicherungsspritzbetons vorgesehen. Es wird eine besondere Eigenschaft mit der Kurzbezeichnung RV eingeführt. Ähnliche Forderungen gibt es auch in der ZTV-ING und RI-BWD-TU [4 und 5]. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Größe dieses Einflusses und den Wechselwirkungen mit den weiteren Einflussparametern auf die Versinterungsneigung.



Bild 1: „Beinahe“-Vollverschluss mit harter Verkrustung [1]

1.1 Der Weg des Bergwassers und die dabei auftretenden Reaktionen

Bergwasser hat eine definierte Temperatur, weist eine spezielle chemische Zusammensetzung auf, die vor allem aus der Geologie bedingt ist und steht unter Druck. Auf dem Weg in die Tunneldrainage kommt es mit Baustoffen der Tunnelsicherung in Kontakt und kann daraus Bestandteile lösen, beim Eintreten in das sekundäre Entwässerungssystem ändert sich die Temperatur, der Druck entspannt sich und es kommt mit Luft in Berührung (Bild 2).

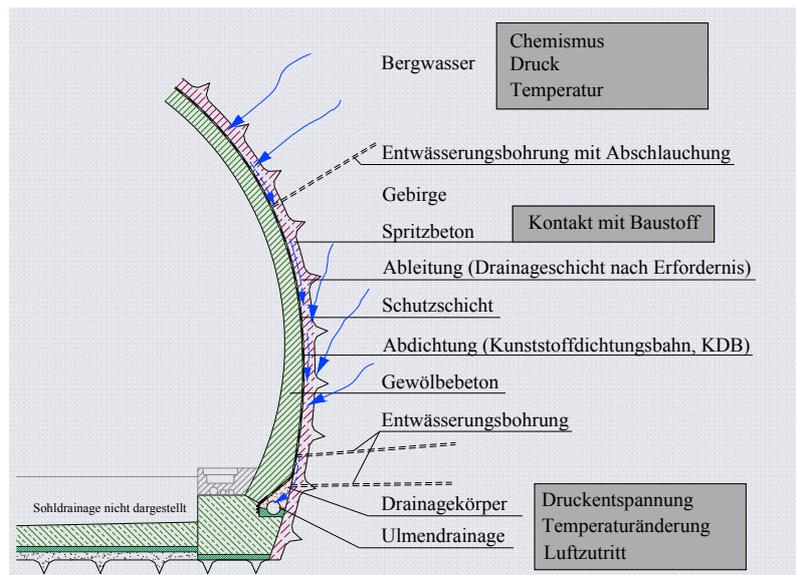


Bild 2: Der Weg des Bergwassers in die Ulmendrainage [1]

Dabei laufen, je nach örtlichen Gegebenheiten, verschiedene chemische Prozesse ab, die unter Umständen zu Versinterungen in den Drainagerohren führen können. In der ÖVBB-Richtlinie „Tunnelentwässerung“ sind die möglichen Versinterungsvorgänge in einem Schaubild dargestellt (Bild 3)

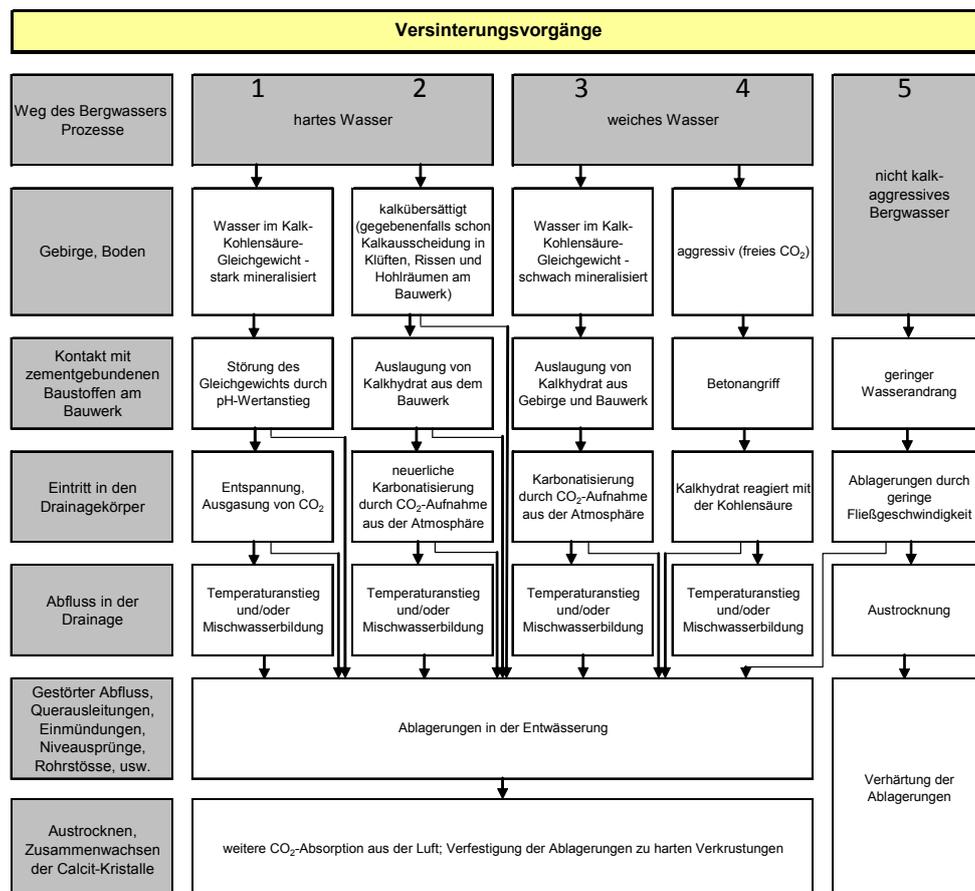


Bild 3: Schematische Darstellung möglicher Versinterungsvorgänge [1]

Die in Bild 3 dargestellten Prozesse gehen vom Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht des Bergwassers aus. Das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht beschreibt vereinfacht den Anteil an gelöstem Calciumhydrogenkarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) und den Anteil an Kohlensäure (H_2CO_3). Man spricht zwar von "Gleichgewicht", findet allerdings häufig einen Zustand, bei dem eine der beiden Komponenten überwiegt (kalkabscheidend oder kalklösend). Abhängig vom CO_2 -Gehalt in der Atmosphäre über dem Wasser wird dieses teilweise als Kohlensäure gelöst. Dieses kohlensaure Wasser kann Calciumcarbonat aus dem Gestein lösen und bildet das im Wasser gelöste Calciumhydrogenkarbonat. Sehr wesentlich ist also zunächst, mit welchem CO_2 -Gehalten das Wasser in Berührung kommt. Sichert z.B. ein Niederschlagswasser durch Bodenhorizonte mit hoher mikrobieller Aktivität, wird dort im Vergleich zur normalen Atmosphäre ein deutlich höherer CO_2 -Gehalt vorliegen. Das Wasser wird dadurch mit Kohlensäure angereichert. Trifft es nun auf Kalk, so wird dieser gelöst, bis sich das für die entsprechenden Kohlensäure-Konzentrationen mögliche Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht einstellt.

Grundsätzlich wird zwischen Wässern im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, Wässern mit erhöhten Anteilen an Calciumhydrogenkarbonat (kalkabscheidende Wässer) und Wässern mit erhöhten Anteilen an Kohlensäure (kalkaggressive Wässer) unterschieden. Welchen Zustand das Wasser einnimmt, hängt von der Temperatur, dem Druck und pH-Wert ab. Durch die Änderung einer dieser Umgebungsbedingungen kann es zur Bildung von Versinterungen durch Abscheiden von Calciumcarbonat kommen.

Für den Kontakt eines Bergwassers mit zementgebundenen Baustoffen ergeben sich nun mehrere Möglichkeiten, um Versinterungen zu bilden. Ausgehend von einem Wasser im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht kommt es bei Kontakt mit dem Baustoff zu einer Änderung des pH-Werts. Es resultiert eine Änderung im Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht mit Abscheidung von Kalk. Dieser Mechanismus kann auch bei kalkübersättigtem Wasser auftreten. Beide letztgenannten Prozesse sind in Bild 3 unter „hartes Wasser“ dargestellt. Unter „weiches Wasser“ ist einmal angeführt, dass kalkaggressives Wasser Kalkhydrat aus dem Zementstein löst und dabei wird die Kohlensäure durch Abscheidung von Kalk neutralisiert. Weiters ist der häufig auftretende Mechanismus zur Versinterungsbildung bei "weichem Wasser" durch Lösung von Kalkhydrat aus dem Zementstein in Bild 3 angeführt. Das gelöste Kalkhydrat wird dabei durch Aufnahme von CO_2 aus der Luft als Kalk abgeschieden. Insgesamt kann also der Kontakt mit den zementgebundenen Baustoffen einen wesentlichen Beitrag zur Ausbildung von Versinterungen im sekundären Entwässerungssystem ausüben.

Aus den bisherigen Erfahrungen in Tunnel drainagen kann folgende Einteilung hinsichtlich des Ausmaßes der Versinterungen bezogen auf die Karbonathärte (diese entspricht vereinfacht der Konzentration an Calciumhydrogenkarbonat) getroffen werden:

- A. Bergwässer mit geringer Versinterungsneigung (Karbonathärte bis ca. 10°d):
es dominiert die Lösung von Kalkhydrat aus den zementgebundenen Baustoffen und Abscheidung von Kalk durch CO_2 -Aufnahme (Fall 3 und 5 in Bild 3)
- B. Bergwässer mit hoher Versinterungsneigung (Karbonathärte $>10^\circ\text{d}$):
es dominiert die Änderung des Kalk-Kohlensäure-Gleichgewichts durch Lösung von Kalkhydrat und damit verbunden eine pH-Wert Anhebung (Fall 1 und 2 in Bild 3)

Im Fall von A ist es sinnvoll, das Versinterungspotential des zementgebundenen Baustoffs möglichst gering zu halten. Darüber hinaus wird im Laufe der Zeit auch eine Abnahme der Kalkhydrat-Freisetzung eintreten und damit die Versinterungsneigung abnehmen.

Im Fall von B ist es nicht ausreichend, das Versinterungspotential des Baustoffs zu minimieren. Es sind einerseits konstruktive Maßnahmen zu treffen, um den Kontakt des Bergwassers möglichst gering zu halten (Bohrungen, Abschlachtung, usw.) oder andererseits Härtestabilisierungsmaßnahmen zu setzen.

1.2 Die Vorgehensweise zur Reduzierung des Versinterungspotentials

Die Ursachen für Schäden oder schlecht funktionierende Entwässerungssysteme liegen in

- nicht erkennbaren Versinterungsszenarien bei der Projektierung
- in unzureichender Kenntnis der Wasserparameter
- in Planungsfehlern des Entwässerungssystems und
- in nicht ausreichender, vorbeugender Wartung.

Daher kommt einer genauen Voruntersuchung und folgerichtiger Planung eine große Bedeutung zu.

Am Beginn der Beurteilung steht die Wasseranalyse vor und während des Baus (Bild 4 oben) Leider gibt es noch nicht für alle in der Planungsphase vorkommenden Fälle von Bergwasserzusammensetzung, Baustoff, Umgebungsbedingungen und konstruktiver Durchbildung der Drainage schlüssige Kriterien.

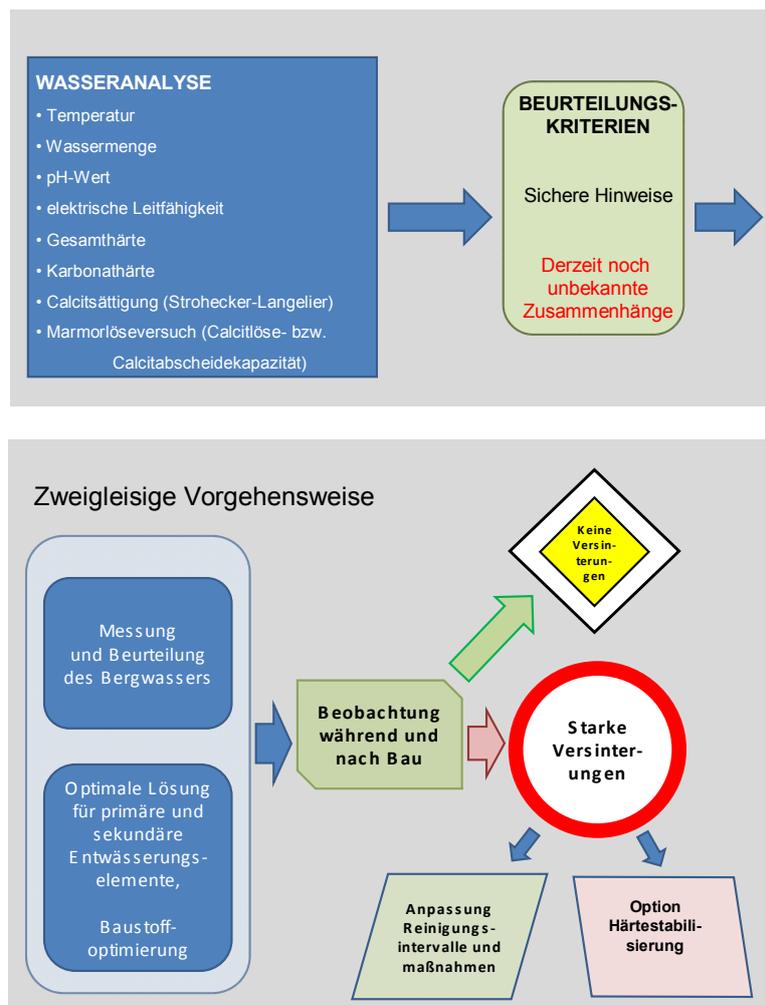


Bild 4: Schematische Vorgehensweise zur Planung der Entwässerungsmaßnahmen [Bild aus 6]

Daher muss zweigleisig gefahren werden: die Beurteilung der Wässer nach derzeit vorliegenden Kriterien und der gleichzeitige Versuch, optimale Bedingungen im Bauwerk zu gestalten. Erst nach dem Bau stellt sich die endgültige Situation heraus und eine Anpassung der Reinigungsintervalle bzw. der Einsatz zusätzlicher Maßnahmen (z.B. Härtestabilisation) kann erfolgen.

In der ÖVBB Richtlinie werden Maßnahmen zur Optimierung des Entwässerungssystems gegeben. Dazu gehören:

- Verringerung des Kontakts zu zementösen Stoffen
- bauliche Ausbildung der primären und sekundären Entwässerungselemente
- Optimierung der zementgebundenen Stoffe
- richtige Wahl der Entwässerungselemente und Rohre.

1.3 Der Einfluss zementgebundener Stoffe

Der Haupteinfluss zementgebundener Materialien auf die Versinterung des sekundären Entwässerungssystems resultiert aus der Hydratation des Zements. Die Klinkerminerale Tricalciumsilikat und Dicalciumsilikat reagieren mit Wasser unter Bildung von Calcium-Silikat-Hydrat (C-S-H), welches maßgeblich für die Festigkeitsausbildung verantwortlich ist, und Kalkhydrat, welches keinen aktiven Beitrag zur Festigkeitsentwicklung liefert, allerdings für den Korrosionsschutz der Bewehrung essentiell ist.

Durch Zugabe von reaktiven Zusatzstoffen (z.B. puzzolanische Stoffe) zum Zement kann einerseits der Klinkeranteil reduziert und andererseits ein Teil des Kalkhydrats über puzzolanische Reaktion zu C-S-H umgewandelt werden. Dadurch kann eine Reduktion des Versinterungspotentials von zementgebundenen Baustoffen erzielt werden.

Für Spritzbeton ist die Reduktion des Klinkeranteils im Bindemittel im Wesentlichen durch die Frühfestigkeitsentwicklung begrenzt. Zur Reduktion des Versinterungspotentials bedarf es also einer Optimierung der Bindemittelzusammensetzung, um auch die für den Spritzbeton erforderlichen Festigkeitseigenschaften einhalten zu können.

2. Prüfverfahren

Im Zuge der Einführung der alkalifreien Spritzbetontechnologie und im Zuge der Einführung von Härtestabilisatoren wurden bereits einige Prüfmethode entwickelt, um das Versinterungspotential abschätzen zu können [7, 8, 9]. Diese Verfahren haben für den entsprechenden Zweck durchaus ihre Berechtigung. Das in den Richtlinien „Spritzbeton“ und „Tunnelentwässerung“ angegebene Verfahren kann nicht die Antwort auf alle Fragen der Versinterung bieten. Es ist jedoch einfach durchzuführen und gibt recht rasch aussagekräftige Ergebnisse (Vergleiche, keine Absolutwerte zur Beurteilung). Das Verfahren wurde in seinem Ablaufschritten etwas verfeinert und ist unter [10] nochmals publiziert worden. Dabei wird besonders auf den Kontakt der Probekörper mit der Umgebungsluft geachtet und die Lagerungsbedingungen werden genauer festgelegt. Trotzdem bleibt es nur ein Vergleichsverfahren. Die tatsächliche Auslaugung ist ja sehr zeit- und geometrieabhängig und vom vorhandenen Wasser (im Versuch immer entionisiert) abhängig. Die Reproduzierbarkeit ist allerdings recht gut (siehe Pkt. 4.1).

3. Die Festlegung von Grenzwerten für die Anforderung RV

Zur Festlegung eines Grenzwertes für die Anforderung RV ist die Kenntnis der Größenordnung der folgenden Einflussfaktoren erforderlich.

- Schwankungsbreite des Prüfverfahrens:
 - Laborinterne Schwankungsbreite
 - Laborübergreifende Schwankungsbreite
- Verfahrensbedingte Schwankungsbreite
- Schwankungen aufgrund der Spritzbetonausgangsstoffe

Derzeit liegt nur für eine bestimmte Spritzbetonzusammensetzung (siehe Pkt. 4.2) eine ausreichende Anzahl von Prüfergebnissen vor, die eine Bestimmung des gesamten Variationskoeffizienten (18 %) ermöglicht.

Eine Aufteilung der verfahrensbedingten Schwankungsbreite bedingt durch die Spritzbetonausgangsstoffe ist derzeit noch nicht möglich.

Die verfahrensbedingte Schwankungsbreite dürfte aufgrund der Vorgaben zur Einhaltung der Toleranzen bei der Mischungszusammensetzung, bei gleichem Spritzbetonverfahren (Nassspritzverfahren) und Anforderungen an die Festbetoneigenschaften baustellenübergreifend eine ähnliche Größenordnung aufweisen. Eine Berechnung dieses Wertes ist erst nach Vorliegen von Ergebnissen unterschiedlicher Baustellen möglich. Allerdings ist dafür auch die Bestimmung des jeweiligen Einflusses der Ausgangsstoffe erforderlich.

Die Schwankungsbreite aufgrund der Ausgangsstoffe bezieht sich auf folgende Parameter:

- Schwankungen in der Bindemittelzusammensetzung
- Schwankungen im Zugabewassergehalt
- Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Bildung, die zeitabhängig ist
- Dichtigkeit der Matrix
- Anteil an Bindemittel
- Grobporigkeit durch Spritzvorgang
- Alter und Lagerungsbedingungen
- Karbonatisierung
- Zusatzmittel und deren Dosierung

Eine Auswertung der derzeit vorliegenden Prüfergebnisse von einer definierten Spritzbetonzusammensetzung, über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr, ergibt ein Vorhaltemaß von mindestens 30 % in der Erstprüfung. Aufgrund des derzeit nicht ausreichend bekannten Einflusses der Betonausgangsstoffe kann dieser Wert nicht als allgemein verwendbar angesehen werden.

Aufgrund des Fehlens von Erfahrungswerten kann derzeit ein Grenzwert nur zusammen mit einer Spritzbetonzusammensetzung, für die Erfahrungswerte vorliegen, angegeben werden.

4. Erfahrungen mit dem Verfahren

Das Prüfverfahren basiert auf dem Trogverfahren gemäß ÖNORM S 2072 (Norm zurückgezogen) und wurde für den Verwendungszweck entsprechend modifiziert. Bei dem Verfahren wird die Calcium-Freisetzung des Spritzbetons in kg Ca/t Spritzbeton (Versinterungspotential) als Mittelwert von 2 Proben ermittelt. Das Prüfverfahren wird auf der Baustelle Koralmtunnel, einem 33 km langen 2-röhrigen Eisenbahntunnel, seit Anfang 2009 angewendet. Nach anfänglichen Problemen mit dem Einfluss der Probenlagerung konnte durch eine Optimierung des Verfahrensablaufes eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erzielt werden.

4.1 Streuung des Verfahrens

Für das Prüfverfahren wurde einerseits der laborinterne als auch der laborübergreifende Variationskoeffizient ermittelt.

Anhand des Prüfergebnisses von 30 Proben aus drei Probekisten, die in unmittelbarer Folge aus Nassmischgut einer Charge hergestellt wurden, konnte ein laborinterner Variationskoeffizient der Calcium-Freisetzung von 6,1 % ermittelt werden.

Für die Bestimmung der laborübergreifenden Streubreite wurden aus einer Charge Nassmischgut Spritzbeton hergestellt, wobei 14 Probekisten in unmittelbarer Reihenfolge gespritzt wurden. Die Probekisten wurden an 14 Prüflabors zur Bestimmung des Versinterungspotentials, entsprechend dem optimierten Prüfablauf [10], übermittelt. Aus den 14 Prüfergebnissen konnte ein Variationskoeffizient von 8,5 % ermittelt werden.

4.2 Baustellenerfahrungen

Für das Prüfverfahren liegen derzeit ca. 35 Prüfergebnisse für eine Spritzbetonzusammensetzung vor, die im Rahmen der Konformitäts- und Identitätsprüfung einer Baustelle durchgeführt wurden. Mit Ausnahme eines einzelnen „Ausreißers“ liegen die Prüfergebnisse innerhalb einer Bandbreite von +/- 30 % zum Mittelwert. Die Proben wurden aus Probekisten entnommen. Zu Vergleichszwecken wurden auch Proben aus der Spritzbetonschale gebohrt. Die Prüfergebnisse für diese Proben liegen geringfügig höher gegenüber den Ergebnissen von Proben aus den Probekisten.

In Bild 5 sind die Ergebnisse der Prüfungen des Spritzbetons auf das Versinterungspotential über einen Zeitraum von 13 Monaten dargestellt.

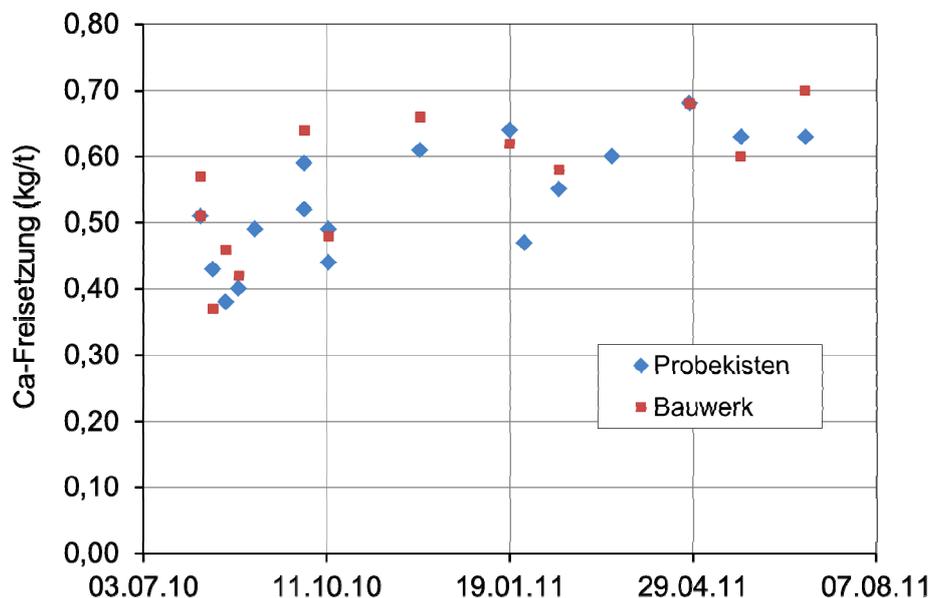


Bild 5: Prüfergebnisse für das Versinterungspotential über die Zeitdauer von 13 Monaten

Obwohl der Zementgehalt nur 280 kg/m^3 beträgt, wurde eine Frühfestigkeitsentwicklung der Klasse J2 erzielt. In Bild 6 ist die Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons der Baustelle Koralmtunnel, Baulos KAT 1, als Mittelwert über eine Zeitdauer von 13 Monaten enthalten.

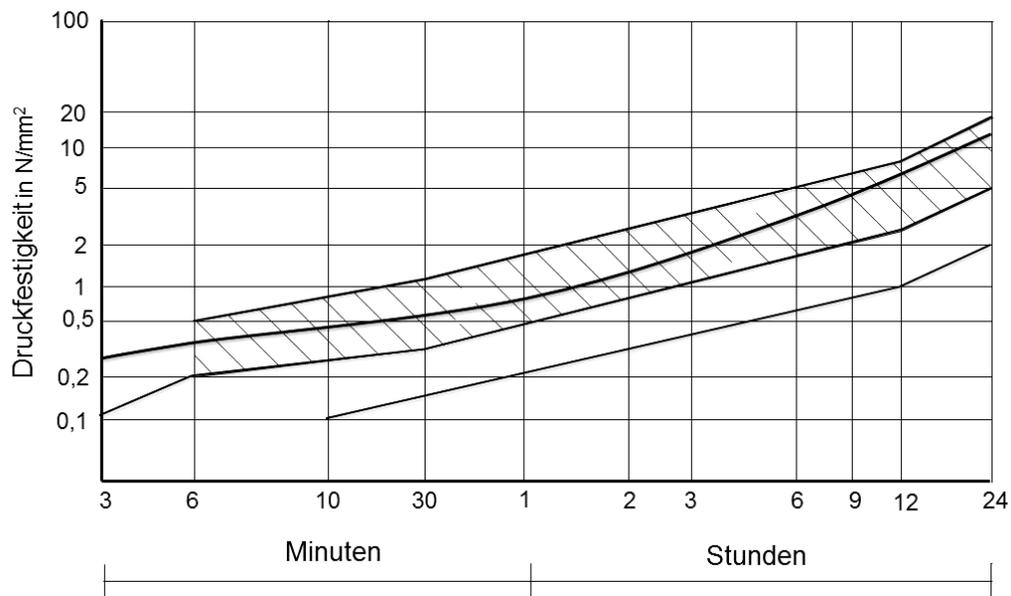


Bild 6: Frühfestigkeitsentwicklung (Mittelwert über 13 Monate)

Die Auswertung der Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bestätigt das Erreichen der Festigkeitsklasse J2 und der Festigkeitsanforderungen zu späteren Zeitpunkten (Tab.1).

Tab. 1: Auswertung der erreichten Festigkeitsergebnisse

Druckfestigkeit	7 Tage	56 Tage	Anforderung
Mittelwert (N/mm ²)	30	47	36
Standardabweichung %	4,4	7,2	-
95 % Fraktile (N/mm ²)	23	35	
Minimum (N/mm ²)	21	35	21
Maximum (N/mm ²)	40	60	
Anzahl	32	28	

Die Auswertung der Ergebnisse der Prüfung der Wassereindringtiefe bestätigt das Erreichen der Anforderungsklasse XC4 (Tab. 2).

Tab. 2: Wassereindringtiefe (Prüfung gemäß Richtlinie Spritzbeton)

Wassereindringtiefe	56 Tage
Mittelwert (mm)	11
Standardabweichung %	4,4
Minimum (mm)	4
Maximum (mm)	11
Anzahl	10

4.3 Steuerungsmöglichkeiten

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist die Höhe des Versinterungspotentials des Spritzbetons in erster Linie vom Zementgehalt und dem Klinkeranteil im Zement abhängig. Durch den Ersatz von Klinker durch hydraulisch wirksame Zusatzstoffe können die technologischen Eigenschaften des Spritzbetons wie Endfestigkeit und Gefügedichtigkeit beibehalten werden.

Das Erreichen der geforderten Werte für die Frühfestigkeit ist von der Reaktivität des verwendeten Zementes abhängig. Ein Zement der Type CEM I 52,5 R mit einer möglichst hohen 1 Tage Druckfestigkeit (ca. 30 N/mm²) ist dazu bei Kombination mit oben angeführten Zusatzstoffen günstig.

Versuche an Bindemittelleimproben zeigten, dass durch die Verwendung von unterschiedlich zusammengesetztem Bindemittel eine deutliche Beeinflussung der Calcium-Freisetzung möglich ist.

In Bild 7 sind die Ergebnisse von Untersuchungen an Bindemittelproben dargestellt. Die strichlierte Linie zeigt die theoretisch mögliche Abnahme des Versinterungspotentials durch Reduktion des Klinkeranteils im Bindemittel. Durch verschiedene Zusatzstoffe kann eine deutlich höhere Reduktion erzielt werden. Ergebnisse mit Silikastaub und Kieselsäuren sind noch nicht enthalten.

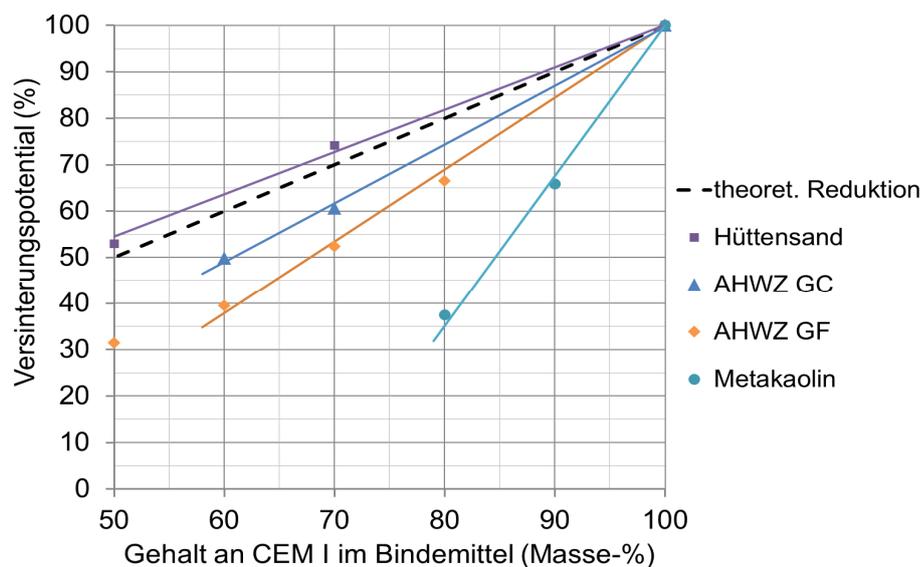


Bild 7: Einfluss unterschiedlicher Zusatzstoffe auf die Calcium-Freisetzung von Bindemittelleimproben

5. Empfehlungen

Unter oben genannten Randbedingungen ist es sicher empfehlenswert, Anforderungen bezüglich des reduzierten Versinterungspotentials zu stellen. Derzeit sollte aber mit den Anforderungen nicht übertrieben werden. Forderungen an Dauerhaftigkeit und Frühfestigkeitsentwicklung müssen voll erfüllt bleiben, "das Kind soll nicht mit dem Bade ausgeschüttet werden".

5.1 Ausschreibung

Wenn es die Chemie des Bergwassers verlangt, ist eine Anforderung in die Ausschreibung aufzunehmen. Vorversuche mit lokalen Produkten werden aber empfohlen. Aus Mittelwert und Standardabweichung kann man dann unter Bedacht die RV-Klasse festlegen. Eventuell ist auch die Ausschreibung eines Anreizsystems zu überlegen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist zur Festlegung eines RV-Werts mit einer Streuung von +/- 30 % vom Mittelwert auszugehen. Diese Streubreite ist also für den RV-Wert zu berücksichtigen. Liegen Ergebnisse der Erstprüfung vor, so könnte unter Berücksichtigung der vorgenannten Streubreite daraus ein RV-Wert festgelegt werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Berechnung des RV-Werts aus dem Klinkeranteil des Bindemittels. Aus den beschriebenen Untersuchungen ergibt sich eine Calcium-Freisetzung von 0,0026 bezogen auf den Klinkeranteil. Ist der Klinkergehalt des Bindemittels bekannt, so könnte durch Multiplikation mit diesem Faktor ein RV-Wert berechnet werden (z.B. bei einem Klinkergehalt von 300 kg/m³ ergäbe sich ein RV-Wert von 0,78). Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass der angewendete Faktor aus den Ergebnissen einer Baustelle resultiert und somit noch nicht als verifiziert eingestuft werden kann.

5.2 Baufirma

Wenn ein Grenzwert RV ausgeschrieben ist, muss die Baufirma rechtzeitig mit Optimierungsversuchen beginnen. Feingemahlene Zemente müssen gut auf den Erstarrungsbeschleuniger abgestimmt werden. Dazu sind passende Puzzolane auszuwählen. Mischungen mit niedrigem W/B- Wert (hat auch Vorteile für Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit. International bis 0,36 gefordert!) sind zu bevorzugen. Natürlich sind ein gut funktionierendes Spritzverfahren, richtige Einstellungen, niedrige EB-Dosierung und vor allem eine hohe Gleichmäßigkeit in Ausgangsstoffen und Verarbeitung anzustreben. Als zusätzliche Qualitätskontrolle ist eine Kontrolle des Bindemittels in Versuchen an Zementleim bzw. Bindemittelleim (Versuchsdurchführung am Bindemittelleim statt an gespritzten Proben) einzuführen.

5.3 Bauherr

Die Bauherren sind aufgefordert, Daten zu sammeln und zu publizieren. Nur damit können später genauere Festlegungen getroffen werden und vernünftige Vertragsbedingungen geschaffen werden.

5.4 Forschung

Eine Eingrenzung der Einflussparameter und ein besseres Verständnis der Versinterungsprozesse sowie die Auswertung von Baustellenerfahrungen muss zu einem für Bauingenieure einfacheren Entscheidungssystem führen. Daraus werden sich vielleicht auch verbesserte Prüfverfahren ergeben. Zusammen mit der Industrie müssen angepasste Bindemittel, Zusatzstoffe und Zusatzmittel entwickelt werden.

5.5 Industrie

Für eine Verringerung des Auslaugverhaltens von Calcium ist Entwicklungspotential vorhanden. Für das Nassspritzverfahren erscheint eine weitere Reduktion des Zementgehaltes auf unter 280 kg/m³ aus derzeitiger Sicht nicht möglich, da die Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung eingehalten werden müssen. Eine Verbesserung könnte allerdings durch die Optimierung der Zusammensetzung der Zusatzstoffe bzw. Bindemittel erfolgen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Eine funktionierende Tunnelentwässerung mit geringem Wartungsaufwand bei hoher Lebensdauer muss das Ziel jedes Bauherrn sein. Wo es notwendig ist, sind dazu auch Optimierungen des Versinterungspotentials des Spritzbetons unbedingt empfehlenswert, da dies eine Komponente zur Erreichung des Ziels ist. Derzeit trifft dies vor allem bei Bergwässern mit geringer Versinterungsneigung zu. Das Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotentials in den ÖVBB Richtlinien ist in leichter Modifikation [10] einfach und

aussagekräftig. Zur Erreichung verringerter Versinterungspotentiale im Spritzbeton sind Optimierungen bei Bindemittel und Zusatzmittel notwendig. Zur Festlegung verlässlicher Grenzwerte müssen Daten aus Tunnelneubauten gezielt gesammelt werden. Die Ermittlung der systemimmanenten und ausgangsstoffspezifischen Schwankungsbreiten ist noch nicht abgeschlossen.

7. Literatur

- [1] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:
ÖVBB-Richtlinie "Tunnelentwässerung". Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, Wien, 4/2010.
- [2] Saxer, A.; Draschitz, C.:
Versinterungsproblematik der Tunnel drainagen. Kusterle, W. (Hrsg.): Tagungsband "Spritzbeton - Technologie 2006", Institut für Betonbau, Baustoffe und Bauphysik, Universität Innsbruck, 2006.
- [3] Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik:
ÖVBB-Richtlinie: Spritzbeton. Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, Wien, 12/2009.
- [4] ZTV-ING, Teil 5, Abschnitt 1, Pkt. 5. Ausgabe 12/07.
- [5] Bundesanstalt für Straßenwesen:
RI-BWD-TU Richtlinie für Bergwasserdrainagesysteme von Straßentunneln. Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Brücken- und Ingenieurbau, 12/2007.
- [6] Kusterle, W.; Insam, R.:
Aktueller Stand der Richtlinie „Ausbildung von Tunnelentwässerungen“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB). BHM, 153 (2008), Heft 10.
- [7] Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dorner, H.W.:
Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch besondere Auswahl von Zementen und Betonzusätzen. Beton-Informationen 1 (1992), S. 10-15.
- [8] Saxer, A.; Kusterle, W.; Lukas, W.:
Untersuchungen über das Auslaugverhalten von Spritzbeton. Lukas, W.; Kusterle, W. (Hrsg.): Tagungsband „Spritzbeton – Technologie 1993“, Institut für Baustofflehre und Materialprüfung, Universität Innsbruck, 1993.
- [9] Breitenbücher, R.:
Auslaugbarkeit von Beton – Prüfverfahren und Wertung von Versuchsergebnissen. Beton- und Stahlbetonbau 89 (1994), Heft 9, S. 237-243.
- [10] Kusterle, W.; Pichler, W.; Saxer, A.:
Prüfverfahren zur Bestimmung des Versinterungspotentials von Spritzbeton - Einflussfaktoren. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), Heft 12, S. 847 - 852.

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter Pichler
Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Innsbruck, Ingenieurkonsulent für Bauingenieurwesen, Experte für Betontechnologie.
office@matcon.at

Dr. Andreas Saxer
Gelernter Physiker mit Nebenfach physikalische Chemie, seit 1990 an der Bau fakultät der Universität Innsbruck mit Tätigkeit in den Bereichen Baustoffe und Bauchemie, Ass.-Prof. am Arbeitsbereich Materialtechnologie.
andreas.saxer@uibk.ac.at

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle
Studium an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie, seit 2001 Prof. an der HS- Regensburg.
wolfgang.kusterle@hs-regensburg.de