
Versinterungsproblematik der Tunneldrainagen - Einfluss zementgebundener Tunnelbaustoffe

SCALE DEPOSITION PROBLEMS IN TUNNEL DRAINAGES - INFLUENCE OF CEMENTITIOUS TUNNELING MATERIALS

ANDREAS SAXER, CHRISTIAN DRASCHITZ

Die Versinterung von Tunneldrainagen stellt ein ernstzunehmendes Problem hinsichtlich Erhaltung der Funktionalität eines Tunnels dar. Austretendes Wasser aus Drainageleitungen kann Beeinträchtigungen von Fahrbahn und Einrichtungen, der Innenschale durch Druckwasserbildung und der Stützkonstruktionen durch Auslaugung bewirken. Am Beispiel eines Eisenbahntunnels wird die Versinterungsproblematik erläutert. In den Untersuchungen zeigt sich, dass sich die Beschaffenheit der Drainagewässer über die Tunnellänge deutlich ändern kann. An mehreren Stellen wurden Versinterungsraten (die pro Zeiteinheit stattfindende Kalkabscheidung in den Dränagerohren) von 30 - 40 mm beobachtet. Der Aufwand zur Freihaltung der Drainageleitungen ist mit beträchtlichen Kosten verbunden. Der Anteil für die Instandhaltung der Tunnelentwässerung beträgt 75 % der gesamten Erhaltungskosten eines Tunnels. Zur Untersuchung des Einflusses von zementgebundenen Baustoffen (Drainbeton, Injektionszemente, Spritzbetone) zur Versinterungsproblematik wurden Langzeit-Auslaugversuche an diesen Materialien durchgeführt und der Verlauf der Calcium-Freisetzung betrachtet. Mit zunehmender Wassermenge, die mit dem Baustoff in Kontakt steht, nimmt der Austrag von Calcium ab. Die ermittelten Auslaugmengen in Abhängigkeit der beaufschlagten Wassermenge werden in Bezug zu Calcium-Frachten aus einer calcitisch-dolomitischen Gesteinskörnung gestellt. In Abhängigkeit der Bindemittelzusammensetzung zeigen sich sehr deutliche Unterschiede in der Calcium-Freisetzung. Teilweise bedarf es großer Wassermengen (und folglich auch langer Zeiträume), bis eine vergleichbar niedrige Auslaugbarkeit wie bei der Gesteinskörnung vorliegt.

Scale deposits in drainage systems can be a serious problem for maintaining the functionality of a tunnel. Escaping water from drainage lines can affect carriageway and service installations, the tunnel lining due to infiltration water and the supporting structure due to leaching. Exemplary problems with scale deposits in a railway tunnel are illustrated. The investigations show that the quality of the drainage water can change significantly over the tunnel length. At several places deposition rates (i.e. the calcium precipitation in the drainage per time) of 30 to 40 mm were observed. The removal of the scale deposits in the drainage lines is associated with high costs. Evaluation of maintenance- and repair-costs shows that 75 % of the total costs arise from the maintenance of the drainage system. In order to investigate the influence of cementitious tunneling materials (filtering concrete, injection cements, shotcrete) to scale depositions, long-term leaching of these materials was carried out and the

release of calcium was measured. With increasing amount of water, being in contact with the building materials, the calcium leaching is reduced. The determined leached quantities in relation to the amount of applied water are compared with the calcium release of calcitic-dolomitic aggregates. Depending on the type of cementitious binder significant differences in the leaching of calcium are observed. Partially high amounts of water (equivalent to long periods) are necessary, until a similar low leaching rate as for the aggregates is reached.

1. Einleitung

Die Versinterung von Entwässerungssystemen kann die Funktionstüchtigkeit eines Tunnels stark einschränken. Die Folgen einer unkontrolliert verlaufenden Entwässerung können sich in Durchfeuchtung der Fahrbahn und Tunneleinrichtungen mit deren möglichem Funktionsverlust äußern. Einstau von Wasser und Druckwasserbildung mit Angriff auf die Tragfähigkeit der Innenschale bis hin zu Auslaugung der Spritzbetonschale und Daueranker-Verpressstrecken kann zur Beeinträchtigung der Stützkonstruktion führen. Aber nicht nur die Gefahren eingeschränkter Funktionstüchtigkeit, sondern auch die oft aufwendigen Instandsetzungsmaßnahmen und damit verbundenen Instandhaltungskosten sind zu nennen. Seit Ende der 90-iger Jahre finden sich in der Literatur vermehrt Berichte über diese Problematik [1]. Ein Schwerpunkt der Publikationen liegt in der Härtestabilisierung des einströmenden Bergwassers zur Verhinderung von Ablagerungen bzw. Kalkausfällungen und die Entwicklungen auf diesem Gebiet [2, 3, 4]. Aber auch auf Regelwerke zur Ausbildung von Tunnelentwässerungen sei verwiesen [5, 6].

Auch wenn es sehr unwahrscheinlich scheint, dass "worst case"-Annahmen zum Bauteilversagen schlagend werden, muss die Sicherheit für Bauwerkserichter und -nutzer gegeben sein um jede Gefährdung ausschließen zu können. Aber es sind auch Life-Cycle-Cost-Betrachtungen - möglichst schon ab der Projektierung der Tunnelbauwerke - ein Gebot, da die Neubaukosten eines Bauwerkes durchaus von den Kosten für die Erhaltung der Bauwerks- und Betriebssicherheit im Laufe der Nutzungsdauer überflügelt werden können.

Inwieweit die oben genannten Befürchtungen in der Praxis eintreten können und wie Beschädigungen der Bauwerke zu verhindern sind, soll ein derzeit laufendes interdisziplinäres Forschungs- und Entwicklungsprojekt beantworten. Ausgangspunkt sind Erfahrungen mit mehreren Tunneln, in denen für die

Versinterungen in den Tunnelentwässerungen das originäre Wasser kaum Bedeutung hat. Vergleiche von Bergwasseranalysen im Zuge der Erkundungsphase mit Analysen von Wässern aus den Leitungen in der Betriebsphase zeigen, dass durch das Bauwerk vor allem der Chemismus der andringenden Wässer entscheidend verändert wird. Häufig kann aus den ursprünglichen Analysen kaum auf ein bestimmtes späteres Versinterungsverhalten geschlossen werden.

Wie bereits erwähnt, tritt das einströmende Bergwasser zumeist mit zementgebundenen Baustoffen in Kontakt. Dabei kann Kalk ausgelaugt werden und steht als potentieller Versinterungsbildner zur Verfügung. In Anbetracht der auch bei unverdächtigen Bergwässern auftretenden Versinterungen kann nur der Schluss gezogen werden, dass in überwiegender Maße der Einfluss der bei der Errichtung des Bauwerkes zum Einsatz gekommenen Baustoffe auf das anfallende Wasser für Art und Ausmaß der Versinterung verantwortlich ist.

Im Rahmen des genannten Forschungsprojektes werden Zusammenhänge zwischen dem Auslaugverhalten von Tunnelbaustoffen und der Versinterungsanfälligkeit untersucht. Konstruktionsbeton und Bauteile innerhalb der Dichtung werden nicht betrachtet - unter der Annahme, dass die geplante Dichtigkeit vorhanden ist und auf Betriebsdauer erhalten bleibt, also wenigstens 100 Jahre ohne Schaden an der Tragkonstruktion [6]. Weiters wird auch ein Tunnel mit starker Versinterungsneigung eingehend auf Zusammensetzung des Drainagewassers, Bildung von Versinterungen und auch Aufwendungen zur Instandhaltung untersucht. Im Folgenden werden die bisher erzielten Ergebnisse der Tunnel- und Baustoffuntersuchungen vorgestellt.

2. Tunneluntersuchungen

Der Projektunnel ist seichtliegend (Überlagerung zwischen 5 m und 55 m) in schluffigen Deckschichten

und der Molasse von Oligozän und Miozän am Rand der böhmischen Masse. Er wurde 2001 in Betrieb genommen, ist 2-gleisig, rund 6,5 km lang, mit festen (nicht LKW-befahrbar)en Fahrbahnen ausgestattet (Bild 1) und weist zahlreiche Sonderbauwerke (Seitengänge, Rettungsausgänge, Trafonischen) auf. Die Herstellung erfolgte mit mehreren verschiedenen Bauweisen, darunter 4 bergmännische Bauweisen mit Spritzbetonsicherung und Kalottenvortrieb unter überwiegender Verwendung von Trockenspritzbeton.

Zufolge der umgebenden Geologie - weitgehend kalkfrei, abgesehen von karbonatischem Material in einem kurzen Abschnitt im Schlier - ist das ursprüngliche Bergwasser als weich einzustufen und wegen der großen Tagwasserabhängigkeit mit wenig metamorphem CO₂ zu erwarten. Dennoch sind Versinterungen mit Zuwachsraten von bis zu 30 mm in einem Jahr aufgetreten.

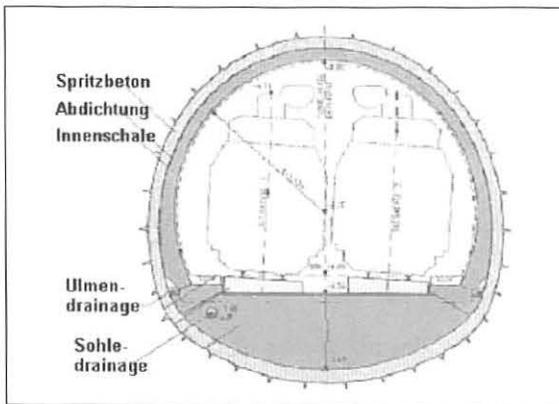


Bild 1: Regelquerschnitt Projektunnel

Die Entwässerung wird durch beidseitige Ulmdrainagen und eine seitlich liegende Sohlleitung, sowie 9 Querleitungen gebildet (Bild 2), die für einen Teil der Versinterungen mitverantwortlich sind.

In den Bildern 3 bis 6 sind einige Beispiele zu den auftretenden Versinterungen dargestellt und sollen die massive Ausbildung innerhalb relativ kurzer Betriebszeit verdeutlichen:

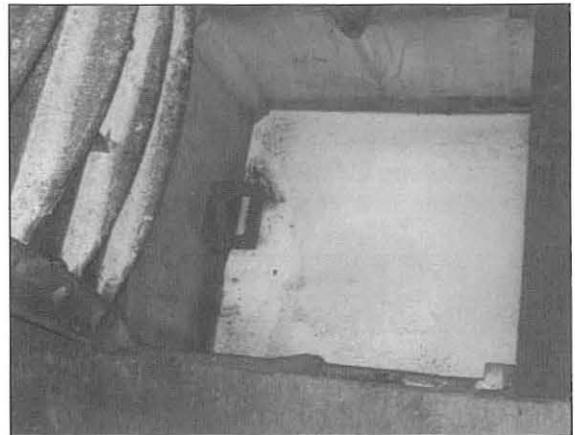


Bild 3: Versinterter Rückstau im Schacht der Sohlleitung

Mittels kontinuierlicher Messungen über ein ganzes Jahr werden in ausgewählten Haltungen der Ulm- und Sohlleitungen die zyklischen Veränderungen der Wasserparameter festgestellt. Ermittelt werden Wasserdurchfluss, pH-Wert, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Gesamthärte, Chemieverbrauch

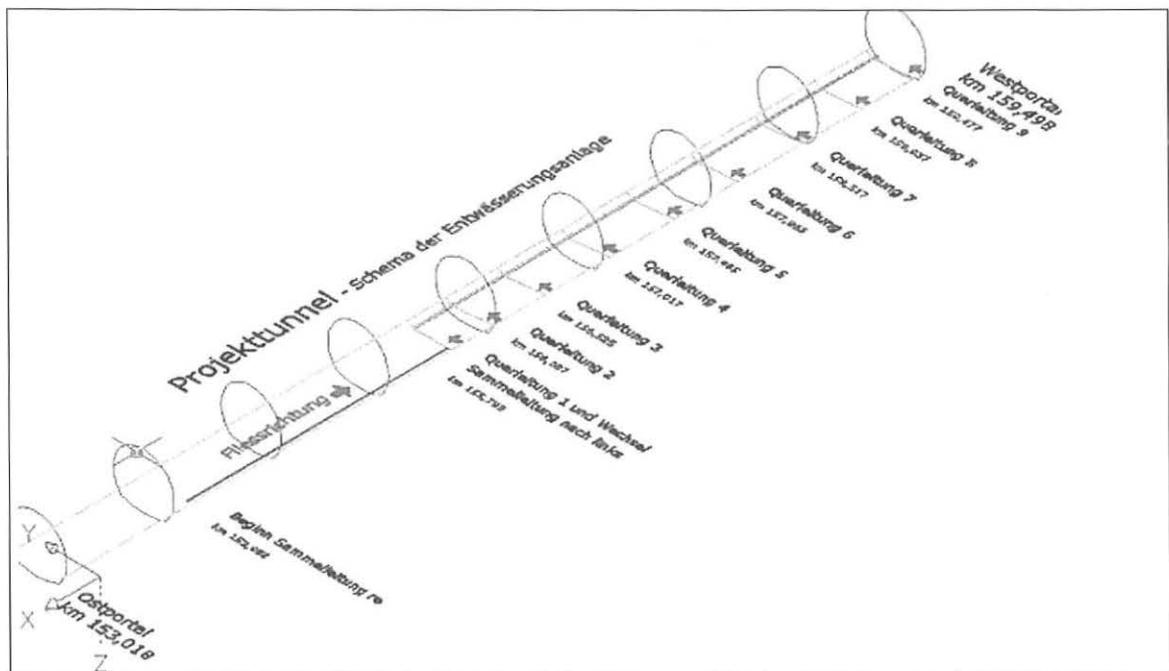


Bild 2: Schema der Entwässerungsanlage

und Versinterungszunahme. Diese Wasserparameter des Projekt隧unnels werden an jenen Orten ermit-



Bild 4: Leitung Ø 250 bei Ulmdrainage-Einleitung zu 80 % verschlossen

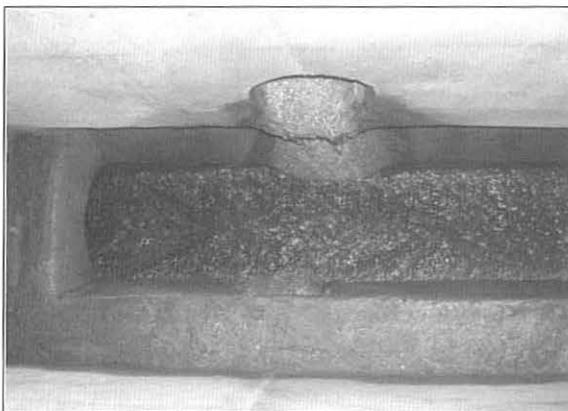


Bild 5: 30 mm harte Verkrustung nach 6 Monaten unter einer Beileitung



Bild 6: Vollständige Versinterung eines als Pumpensumpf ausgebildeten Putzschafts

telt, die ein Maximum der baustoffbedingten Versinterung erwarten lassen.

Eine entscheidende Bedeutung hat besonders der Wasserandrang über den Jahresverlauf. Während des Messjahres 2005 wurde die seit 2003 durchgeführte Bergwasserhärtestabilisierung mit Depotsteinen (Basis Polysuccinimid) ausgesetzt. Weiters werden von allen Referenzschächten bei jeder Messung digitale Bilder zur visuellen Dokumentation angefertigt.

2.1 Ergebnisse der Wasseruntersuchungen

Die Ergebnisse der Wasserdurchflussmengen und die aus der Härtemessung resultierende Calciumfracht sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Zu bemerken ist

- der hohe Durchfluss in der Sohlleitung mit einem durchschnittlichen Wasserdurchfluss von 33 l/sec,
- die Wassermengen aus den Ulmen werden fast zur Gänze in die Sohlleitung abgeleitet, sodass in der westlichen Tunnelhälfte nur mehr vergleichsweise wenig Wasser in den Umleitungen fließt.

Im Bild 7 ist der Verlauf des Wasserdurchflusses für die Ulmdrainage Gleis 4 dargestellt. Ab der Querleitung bei Ring 296 tritt eine starke Abnahme der Durchflussmenge auf.

Der Verlauf des pH-Wertes ist in Bild 8 dargestellt. Zum pH-Wert ist wie folgt anzumerken:

- Die Kurve am Beginn des Tunnels (zwischen Ring 40 und 70) zeigt einen Anstieg aus dem leicht sauren Bereich um 6,5, was auf Kalklösung in diesem Bereich hindeutet; hier ist auch ein Anstieg der Wasserhärte ablesbar.
- Die Werte zeigen eine Konstanz nahe der Neutralität bei etwa 8,0 mit überwiegend Abweichungen in den alkalischen Bereich.
- Die größten Werte wurden im Ring 502 (4 Ringe nach der 8. Querleitung) in der Ulmdrainage von Gleis 4 gemessen. Ebenfalls ist hier ein deutlicher Anstieg der Leitfähigkeit, ein starkes Absinken der Wasserhärte und eine sprunghafte Zunahme der Versinterung zu beobachten.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit (Bild 9) sind folgende Auffälligkeiten zu beobachten:

	Durchfluss l/sec	CaO-Gehalt mg CaO/l	Durchfluss l/a	Fracht to CaO/a	Fracht to Ca/a
Gleis 3 Sohlleitung	33,24	179	1048195859	188	134
Gleis 3 Ulmdrainage	0,13	131	4147926,5	0,54	0,39
Gleis 4	0,15	212	4673223,3	0,99	0,71
Summe				189,53	135,1

Tab. 1: Mittlerer Wasserdurchfluss und Calciummengen in den Drainagen

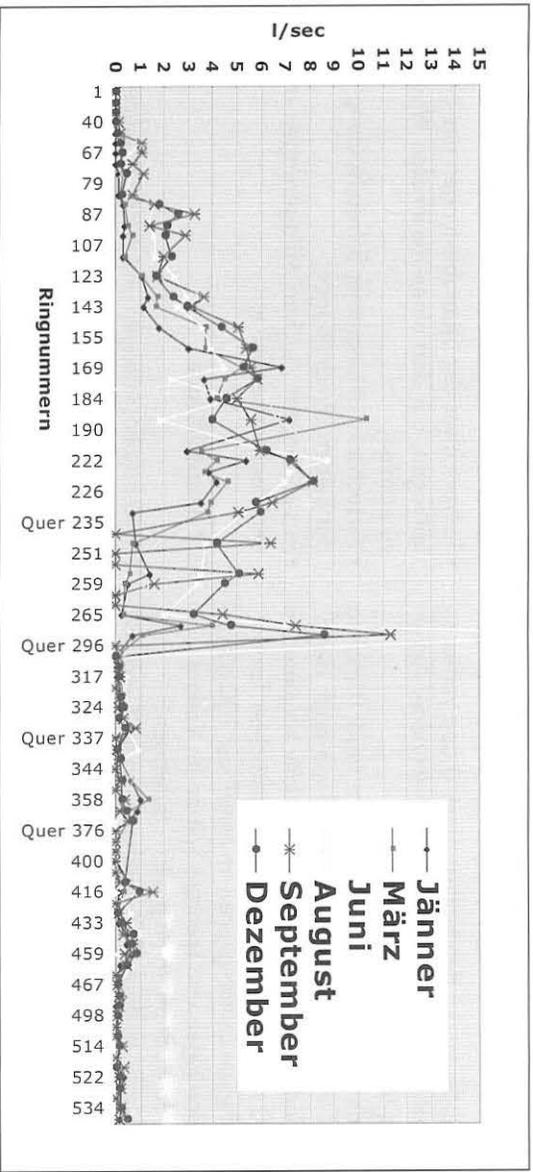


Bild 7: Wasserdurchfluss Uml Drainage Gleis 4

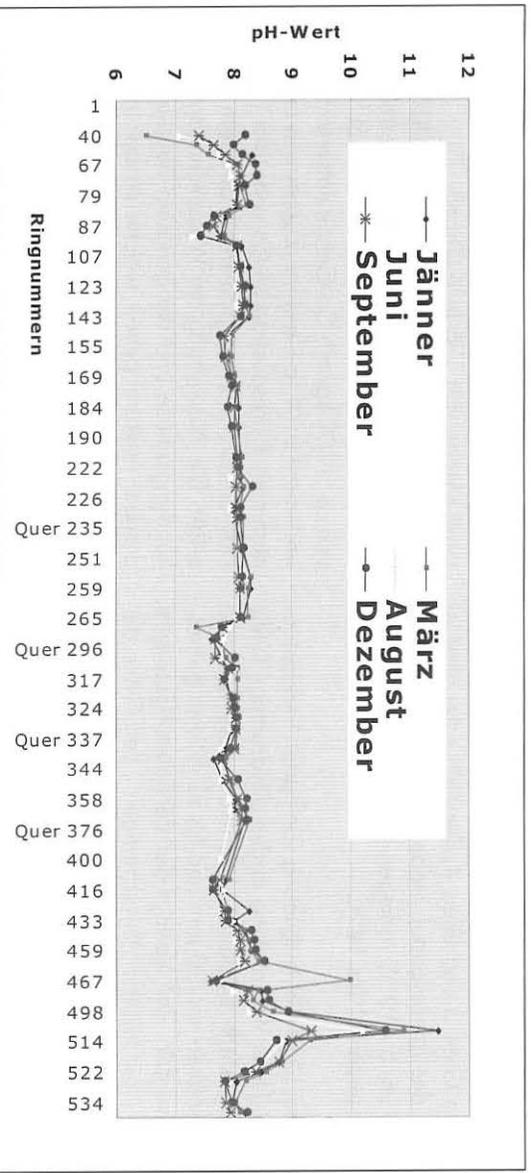


Bild 8: Verlauf des pH-Werts in der Uml Drainage Gleis 4

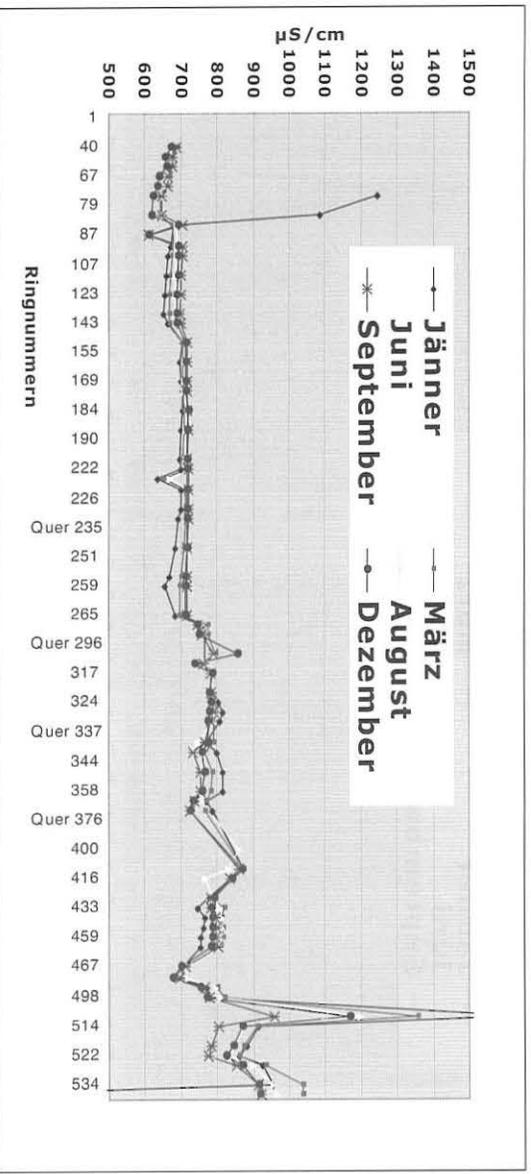


Bild 9: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit in den Drainagewässern

- Hohe Werte von 1235 bzw. 1260 $\mu\text{S}/\text{cm}$ treten im Ulmschacht 101 von Gleis 3 auf (März und Juni) und deutet auf den Einfluss eines knapp vorher situierten Rettungsausstieges hin (verstärkter Anker- und Injektionsverbrauch).
- In der östlichen Tunnelhälfte, wo rund 10mal so viel Wasser in den Ulmen fließt wie nach der 1. Querleitung, liegen die Werte relativ konstant um 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, während in der westlichen Tunnelhälfte die Leitfähigkeiten im Mittel fast 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ höher liegen und mehrere Spitzen im Verlauf - etwa 869 $\mu\text{S}/\text{cm}$ im Ring 412 - aufweisen.
- Die hohe Leitfähigkeit zwischen Ring 498 und 502 (Gleis 4, Werte bis über 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) und der hohe pH-Wert (bis 11,5) deuten auf massive Anwesenheit von Kalkhydrat im Wasser, was auch mit den dort deutlich stärker auftretenden harten Ablagerungen korreliert.

Der Temperaturverlauf der Drainagewässer zeigt einen Unterschied von ca. 1 °C bei den Ulmendraingen Gleis 3 und Gleis 4. Deutlich erkennbar ist auch der Jahresverlauf, wobei im Winter Temperaturen um 8 - 10 °C vorliegen (Minima bis 6 °C) und im Sommer 11 bis 14 °C.

Im Bild 10 ist die Ausbildung von harten Verkrustungen infolge Versinterung in der Ulmdrainage Gleis 4 dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass Versinterungshöhen von 30 mm und bis zu 40 mm gemessen wurden. Der Verlauf der Versinterungsspitzen kann - mit leichten Abweichungen - den Orten der Sonderbauwerke (Rettungsausstiege, Seitenangriffe, Wechsel der Bauweisen) zugeordnet werden. Auch im Sohlkanal wurden harte Ablagerungen mit einer Dicke bis zu 10 mm trotz der enormen Durchflusswerte ermittelt.

Nach Abschluss der Messungen sind folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Teilverschluss der Querableitungen aus den Ulmleitungen, um dort einen maximalen Wasserfluss zu erzielen,
- Versuchseinrichtung einer Schwallspülung in einer der beiden Ulmdrainagen,
- Ausspülen der weichen Ablagerungen mit Hilfe der Löschwasserleitung.

2.2 Baustoffbilanz

Aus den Abflussmengen und der gemessenen Härte lässt sich folgende überschlägige Baustoffbilanz erstellen:

Der mittlere Abfluss pro Jahr aus den Entwässerungsleitungen des Projekt隧nells beträgt (ohne Fahrbahnenentwässerung und alles gemessen am letzten Schacht) mehr als eine Milliarde Liter. Bei einer mittleren Härte von 12 bis 13 °dH (Gleis 3) bzw. 21 °dH (Gleis 4) ergibt sich daraus eine Calcium-Menge von 135 to/a (Tabelle 1).

Bei der Drainage-Spülung im Jahre 2003 wurden rund 1,2 m³ feste Spülrückstände festgestellt (bestehend aus 95 % Ca-Karbonat mit einer Schüttdichte von ca. 1700 kg/m³; Ca-Gehalt entspricht 38,2 %) und somit 0,74 to Calcium. Zusammen ergibt sich damit ein Jahresausttrag an Ca von rund 136 to.

Das Calcium stammt größtenteils aus dem Bauwerk selbst. Die Auswertung der Wasseranalysen der Erkundungsphase und der genauen Baumassen soll darüber Auskunft geben, welche Wässer im jeweiligen Bauabschnitt vorlagen und auf welche Zementangebote aus den Baustoffen diese dort gestoßen sind, was durch die ebenfalls noch im Gange befindliche Auswertung der Ausbaufestlegungen bzw. der Abschlagsprotokolle rekonstruierbar wird.

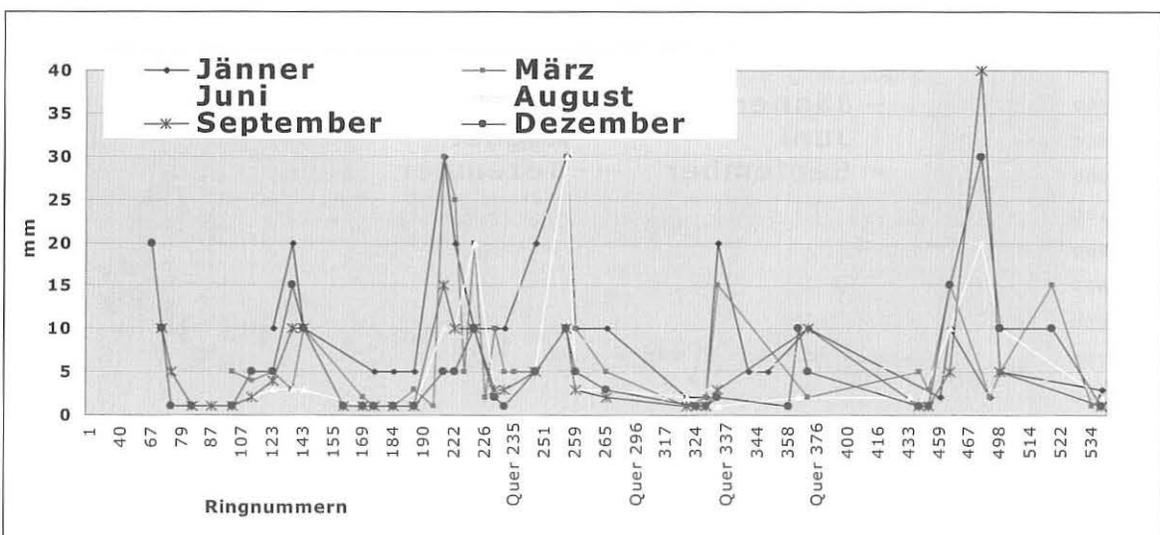


Bild 10: Ausbildungshöhen harter Verkrustungen in der Ulmleitung von Gleis 4

Bauweise	Regel- quer- schnitt	Länge	Filter- beton 1)	SpB 22,5 2)	SpB 30 3)	Bohr- pfähle 4)	Stütz- mittel- zahl i.M. 5)	Anker+ Spieße kg Zement 6)	Injektionen kg Zement je lfm 7)	Zement gesamt
Deckel Ost	204B	1140	60	1820	-	565	-	-	-	2787
bergmännisch Ost	200C	4228	60	3325	-	-	3,69	220	350	16737
bergmännisch West	202C	668	60	-	6942	-	8,56	897	550	5650
Deckel West	205F	232	76	441	-	1227	-	-	-	405
									Summe	25579
1) 120 kg Zement pro m ³ Beton 2) 350 kg Zement pro m ³ Beton 3) 380 kg Zement pro m ³ Beton 4) Bohrpfähle aus B 22,5 bis Höhe Drainage mit 300 kg/m ³ Zement					5) gemittelt aus der geotechnischen Dokumentation 6) geschätzt aus ÖN B 2203-1 mit 6 kg (Spieße) bzw. 7 kg (SN) Mörtel je lfm mit 50 % Zement und 50 % Aufschlag 7) angenommen					

Tab. 2: Zementöse Baustoffmengen außerhalb der Tunnel dichtung in m³ pro lfm Tunnel

Eine überschlägige Rechnung (Tab. 2) zeigt, dass die Materialausträge aus den zementösen Baustoffen durch Bergwasser eine beachtliche Größenordnung erreichen können.

Aus obiger Bilanz (Zementmenge von 25579 to) ergibt sich für die Auslaugung ein verfügbares Calcium von 2814 to (Annahme: CEM I mit rund 20 % Ca-Hydratanteil bzw. 11 % Ca). (Bemerkung: Ca aus Lösung der C-S-H-Phasen, der Zuschläge oder Steinmehlanteile werden nicht weiter berücksichtigt!). Unter Annahme einer kontinuierlichen Austragsrate wäre das Ca nach etwa 20 Jahren ausgelugt - allerdings nimmt die Auslaugeschwindigkeit nach Auslaugung der oberflächennahen Zonen mit der Zeit ab, da diese dann nur mehr diffusionsgetrieben stattfindet.

Wieweit die Ca-Auslaugung die Festigkeit des Baustoffkörpers reduzieren kann, wird noch untersucht. Außerdem muss hinsichtlich der Bauwerkssicherheit noch zwischen Bauteilen für die temporäre (Injektionen, SN-Anker) und die permanente Tragwirkung (Daueranker, Außenschale) unterschieden werden. Für die Instandhaltung und Wartung macht es allerdings keinen Unterschied, ob die Versinterungen aus dem Mörtel einer Anker-Haftstrecke oder aus dem Filterbeton stammen.

2.3 Wartungskosten

In den seit 1989 in Österreich errichteten Eisenbahntunneln liegen schon fast die Hälfte der gesamten bestehenden Tunnel-Gleislängen (Tab. 3). Waren die Entwässerungen der "alten" bergmännischen Tunnel, meist mit Bruchsteinmauerwerk auskleidung und gemauertem

Sohlkanal ausgestattet, noch weitgehend wartungsarm (vom Eiszapfen abschlagen abgesehen), sind die "neuen", überwiegend mit Spritzbetonausbau, Injektionskörpern und mit Ankerstrecken hergestellten und mit unterschiedlichsten Entwässerungssystemen ausgestatteten Tunnel selten erhaltungsfreundlich konzipiert. Zudem wurden etwa zwischen 1980 und 1990 zahlreiche alte Tunnel mit Spritzbetonschalen und Abschlauchungen versehen und im Zuge der maschinellen Gleiserhaltung viele der mittigen Sohlkanäle umgebaut oder zerstört. Die damals gebräuchlichen Spritzbetone mit alkalihaltigen Erstarungsbeschleunigern haben die meist unterdimensionierten Entwässerungen in kurzer Zeit verschlossen. Dazu kommt, dass zu geringe Spritzbetondicken und großflächig ungenügende Untergrundbindung durch alte Rußschichten sowie Thaumassbildung in den nächsten Jahren den weitgehenden Abtrag dieser Schalen bedingen wird.

Die nahe Zukunft lässt nach Fertigstellung der geplanten und in Bau befindlichen Tunnel möglicherweise gegenüber heute eine Verdreifachung der Gleismeter in Eisenbahntunnel erwarten. Die laufenden Kosten für die "neuen" Tunnel machen bereits den Löwenanteil an der Tunnelwartung insgesamt aus. Nach Fertigstellung der derzeit in Bau befindlichen Tunnel ist mit einer Zunahme um die Hälfte der Tunnelinstandhaltung zu rechnen, nach Inbetriebnahme der geplanten Tunnel und Basistunnel werden sich die Kosten verdreifachen.

Als "Wartung" werden jene Instandhaltungsmaßnahmen bezeichnet, die periodisch durchzuführen sind und keine oder nur geringfügige Baumaßnahmen darstellen. Die Wartungs- und Instandhal-

	Inbetriebnahme zwischen	Länge 1-gleisig m	Länge 2-gleisig m	Länge 3-gleisig m	Tunnellänge gesamt m	Gleislänge gesamt m	Verhältnis d. Gleislängen	Kosten Wartung EUR/Jahr	Aufwand gegenüber heute
"alte" Tunnel	1841 - 1984	52.983	38.035	1.389	92.407	133.222	0,54	4.453.304	50,02
"neue" Tunnel	1989 - 2005	1.773	54.798	180	56.751	111.909	0,46	4.448.990	49,98
Bestandstunnel	1841 - 2005	54.756	92.833	1.569	149.158	245.131	1,00	8.902.294	heute = 100
Tunnel in Bau	2005 - 2009	25.205	42.094	2.276	69.575	116.221	0,47	13.522.709	151,9
Tunnel in Planung	2010 - 2020	247.600	36.564	0	284.164	320.728	1,31	26.273.386	295,1
zusammen	1841 - 2020	327.561	171.491	3.845	502.897	682.080	2,78		

Tab. 3: ÖBB Tunnel-Altersstruktur und Wartungskosten

	Tage pro Jahr	€						Anmerkung
		Eigenleistung	Fremdkosten	betriebliche Kosten *)	zusammen	pro lfm Tunnel (2gl)	pro lfm Gl	
Reinigung Fahrbahn, Nischen	2	2160		9529	21218	1,80	0,90	
Reinigung Hinweistafeln	2	2880		9529	12126	1,91	0,95	
Gleise	5	9000		23823	56645	5,05	2,52	
Mithilfe Signale	5	3471		23823	3471	4,20	2,10	
Mithilfe Telekom	2	1388		9529	1388	1,68	0,84	
Instandhaltung allg. e-mein	5	3369		23823	24684	4,18	2,09	Anbringen Nischenbezeichnung, nur La
Entwässerung:								
Reinigen Drainagen	19	27500	5000	90526	213551	18,93	9,46	
Spülen und Fräsen	12	20333	107000	57174	241681	28,39	14,19	1/3 des Aufwandes - Grundreinigung alle 3 Jahre
Kamerabefahrung	5	5348	18700	23823	71693	7,36	3,68	1 selektive Befahrung p.a.
Bestückung Härtestabilisierung	2	3704	16333	9529	39095	4,55	2,27	
Messen Wasserparameter	2	7529	2000	9529	19058	1,47	0,73	1/6 des Projektaufwandes, da nur 1 Messung p.a.
Gesamtkosten						79,51	39,76	
davon Entwässerung						60,69	30,35	das sind 76 % des Aufwandes

*) Projektunnel im Bereich der höchstbelasteten ÖBB -Strecke, deshalb nur zur Hälfte angesetzt

Tab. 4: Wartungskosten für einen "neuen" 2-gleisigen Tunnel

	Tage pro Jahr	Eigenleistung €	Fremdkosten €	betriebliche Kosten €	Gesamtkosten €	€/lfm Tunnel (1gl)
Spülen	20	13815	2500	40000	56315	16,35
Reinigen Fahrbahn	5	3453,8		17500	20959	6,08
Bemalung	5	1440		17500	18945	5,50
Beschilderung	5	1440		17500	18945	5,50
Region Linz					Summe	33,43

Tab. 5: Wartungskosten für einen "alten" Tunnel

tungskosten werden anhand von Daten aus der Region Linz dargestellt, in der sich auch der Projektunnel befindet.

Rund 75 % der Wartungskosten für die baulichen

Anlagen der Tunnel sind allein für die Wartung der Tunnelentwässerungen aufzuwenden (Tabelle 4), weshalb zur Kostenreduzierung eben bei der Entwässerung angesetzt werden muss.

Der Kostenzuwachs beim Wartungsaufwand für die bis 2010 fertigzustellenden Tunnel allein beträgt fast 5 Mio. €/Jahr, wenn die ermittelten Laufmeterpreise auf das ÖBB-Netz hochgerechnet werden.

3. Untersuchungen an Tunnelbaustoffen

Bei den Untersuchungen des Beitrags der zementgebundenen Tunnelbaustoffe Filterbeton, Injektionszement und Spritzbeton zu Versinterungen wird die Abgabe von Calcium in Kontakt mit Wasser eruiert. Die Versinterungen bestehen ja hauptsächlich aus Calciumcarbonat (CaCO_3), zu dessen Bildung folglich Calcium und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zur Verfügung stehen muss. Die Verfügbarkeit von Calcium aus den genannten Baustoffen wird mittels Auslaugversuchen untersucht.

3.1 Auslaugversuche

Die Auslaugung (Elution) der Baustoffe geschieht durch Beaufschlagung mit definierter Wassermenge, woraus das Verhältnis Auslaugmittel (= Eluens) zu Feststoff (abgekürzt E/F) ermittelt wird. In den Versuchen variierte das E/F-Verhältnis in einem Elutionsdurchgang zwischen 3 und 5.

Um den zeitlichen Verlauf der eluierten Calciummenge festzustellen, wurden die Baustoffproben in mehreren Elutionsschritten gelaugt. Dabei nimmt das E/F-Verhältnis zu, was einer zeitlichen Beaufschlagung mit Wasser gleichzusetzen ist.

Um auch lange Zeiträume hinsichtlich Calcium-Auslaugung zu erfassen, wurden die Baustoffproben in Wasser gelagert, wobei ein stetiger Austausch des mit dem Baustoff in Kontakt befindlichen Wassers durch tropfenweise Zufuhr von Frischwasser gewährleistet wurde. Im Anschluss an die Wasserlagerung wurden wiederum Elutionen durchgeführt.

Die Elutionen wurden mit entionisiertem Wasser ausgeführt, wobei als Parameter der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und die Calciumkonzentration im Eluat ermittelt wurden. Aus diesen Messergebnissen kann der Verlauf dieser Parameter als Funktion der einwirkenden Wassermenge bzw. dem E/F-Verhältnis dargestellt werden.

Die detaillierten Auslaugprozeduren werden bei den einzelnen Baustoffuntersuchungen erläutert.

3.2 Filterbeton

Zur Herstellung der Filterbetonproben wurde ein konstantes Mischungsverhältnis gewählt:

- 7,0 Masse-% Bindemittel
- 2,1 Masse-% Feinsand 0,3 mm
- 90,9 Masse-% Gesteinskörnung 8/16 mm

Es wurden insgesamt 4 Bindemittelvarianten untersucht:

1. 100 % CEM I 42,5 R (CEMI)
2. 65 % CEM I 42,5 R + 35 % Flugasche (CEMI+FA)
3. 100 % CEM III/A (CEMIII)
4. 100 % Sulfathüttenzement (SHZ)

Mit den genannten Bindemitteln wurden einmal mit einem W/B-Wert von 0,7 und einmal mit W/B von 0,4 plus Zugabe von Fließmittel (Dosierung 0,5 % bezogen auf das Bindemittel) nach obiger Rezeptur Filterbetonserien hergestellt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte bei Raumtemperatur im Feuchtraum. Insgesamt ergeben sich 8 Serien, deren Bezeichnung wie folgt gewählt wird (siehe auch Bindemittelvarianten):

- CEMI0,7 und CEMI0,4 (der Zusatz 0,7 und 0,4 steht für die entsprechenden W/B Werte)
- CEMI+FA0,7 und CEMI+FA0,4
- CEMIII0,7 und CEMIII0,4
- SHZ0,7 und SHZ0,4

Zusätzlich wurde auch die Gesteinskörnung 8/16 mm ohne Bindemittel untersucht (Bezeichnung dieser Serie: 8/16), um einen Bezugspunkt für die Auswertung bzw. Freisetzung der Calciummenge zu erhalten. Bei der Gesteinskörnung handelt es sich um ein calcitisch-dolomitisches Gestein mit rund 50 % Calcit und 30 % Dolomit.

Die an den Prüfkörpern dieser Filterbetonserien und der Gesteinskörnung durchgeführten Elutionsprozeduren sind in *Tabelle 6* zusammengefasst. Wie ersichtlich, wurde nach den einzelnen Elutionsschritten eine Trocknungsphase miteinbezogen, um den Wechsel nass - trocken zu simulieren und eine etwaige Karbonatisierung des Kalkhydrats mitzuberechnen. Das insgesamt für die einzelnen Prüfkörper erreichte E/F-Verhältnis liegt zwischen 125 und 147 (die Unterschiede resultieren aus der bei der Wasserlagerung zugeführten Wassermenge),

	Dauer	E/F
1. Elution	24 h Auslaugung 24 h Trocknung	3
2. Elution	24 h Auslaugung 72 h Trocknung	3
3. Elution	24 h Auslaugung 48 h Trocknung	3
4. Elution	48 h Auslaugung 72 h Trocknung	3
Wasserlagerung	131 d	ca. 120
5. Elution	7 d Auslaugung	3

Tab. 6: Elutionsprozeduren Filterbetone, Verhältnis E/F

E/F	CEM10,4	CEM10,7	CEMI+FA0,4	CEMI+FA0,7	CEMIII0,4	CEMIII0,7	SHZ0,4	SHZ0,7	8/16
3	12,51	12,23	11,35	11,80	11,75	11,67	11,25	11,14	8,94
6	11,93	12,02	11,35	11,58	11,60	11,57	11,15	11,07	8,92
9	11,67	11,73	11,25	11,30	11,43	11,31	10,92	10,53	9,15
12	11,71	11,62	11,22	11,30	11,36	11,24	10,87	10,47	9,41
135	10,51	10,50	9,83	9,58	9,77	9,37	9,12	8,97	9,02

Tab. 7: Verlauf des pH-Wertes der Filterbetone

E/F	CEM10,4	CEM10,7	CEMI+FA0,4	CEMI+FA0,7	CEMIII0,4	CEMIII0,7	SHZ0,4	SHZ0,7	8/16
3	2,51	3,37	0,480	1,086	0,986	0,898	0,496	0,449	0,056
6	1,364	1,939	0,459	0,774	0,83	0,763	0,494	0,494	0,040
9	0,849	1,005	0,387	0,473	0,591	0,464	0,435	0,405	0,037
12	0,868	0,859	0,421	0,419	0,588	0,391	0,429	0,361	0,037
123	0,101	0,11	0,071	0,066	0,068	0,07	0,08	0,071	0,043

Tab. 8: Verlauf der elektrischen Leitfähigkeit (mS/cm) der Filterbetone

E/F	CEM10,4	CEM10,7	CEMI+FA0,4	CEMI+FA0,7	CEMIII0,4	CEMIII0,7	SHZ0,4	SHZ0,7	8/16
3	182,5	235	21,5	47,0	65,5	56,5	28,0	22,4	6,5
6	101,5	163	32,5	38,5	58,5	50,0	24,9	23,6	9,1
9	64,5	81,0	28,5	24,0	41,0	30,0	13,2	9,4	8,1
12	67,0	80,5	30,5	23,5	41,5	26,5	11,3	5,5	6,6
123	11,3	11,4	8,8	7,9	9,2	9,7	10,8	9,1	7,1

Tab. 9: Ca-Konzentrationen in den Eluaten (mg/l) der Filterbetone

wobei bei der Präsentation der Ergebnisse ein mittlerer Wert von 135 angeführt wird.

In Tabelle 7 ist der pH-Wert der Eluate der untersuchten Filterbetonserien in Abhängigkeit des E/F-Verhältnisses zusammengefasst. Die Proben mit CEM I 42,5 R als Bindemittel weisen anfangs die höchsten pH-Werte (um 12,5) auf. Im Zuge der weiteren Auslaugungen nimmt der pH-Wert um bis zu 2 Einheiten ab. Dieselbe Tendenz lässt sich auch bei den weiteren Probenserien beobachten. Der reine Zuschlag liefert pH-Werte um 9, ein Wert, der auch von den Filterbetonserien mit Ausnahme CEMI nach einem E/F Verhältnis von rund 135 nahezu erreicht wird.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit (Tab. 8) weisen auch die Proben der Serien CEMI mit Abstand die anfänglich höchsten Werte auf. Im Verlauf der Elutionen tritt eine starke Abnahme der Leitfähigkeit und damit verbunden der löslichen Bestandteile auf. Auch hier werden nach einem E/F Verhältnis von rund 135 bei allen Filterbetonserien annähernd Werte wie für die Gesteinskörnung erreicht.

Hinsichtlich Versinterungen sind natürlich vor allem die Konzentrationen an freigesetztem Calcium (Ca) von Interesse. Die ermittelten Ca-Konzentrationen (in mg/l) in den Eluaten sind in Tabelle 9 für die untersuchten Filterbetone zusammengefasst.

Aus der Konzentration in Verbindung mit dem E/F Verhältnis lässt sich die ausgelaugte Calcium-Menge (in mg/kg Filterbeton) in Bezug zur Masse des Filterbetons ermitteln. Die Ergebnisse sind in Bild 11 für E/F Werte von 12 und 135 dargestellt. Bei der Serie CEM10,7 beträgt die ausgelaugte Ca-Menge bei einem E/F von 12 1679 mg/kg, bei E/F = 135 3195 mg/kg. Dies entspricht einer Calcium Menge von 3,2 kg/Tonne Filterbeton. Im Gegensatz dazu wurde für den Zuschlag 8/16 Ca-Mengen von 91 mg/kg bzw. 1049 mg/kg gemessen. Auffallend niedrige Werte liefern die Serien CEMI+FA, wo 35 % des Zementanteiles durch Flugasche ersetzt wurde. Bei der Flugasche han-

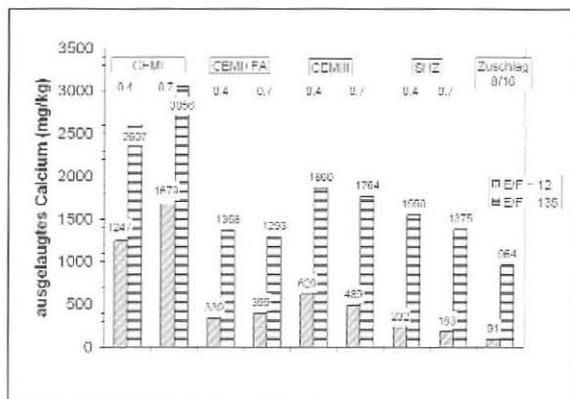


Bild 11: Ausgelaugte Menge Calcium der Filterbetone bei E/F von 12 und 135

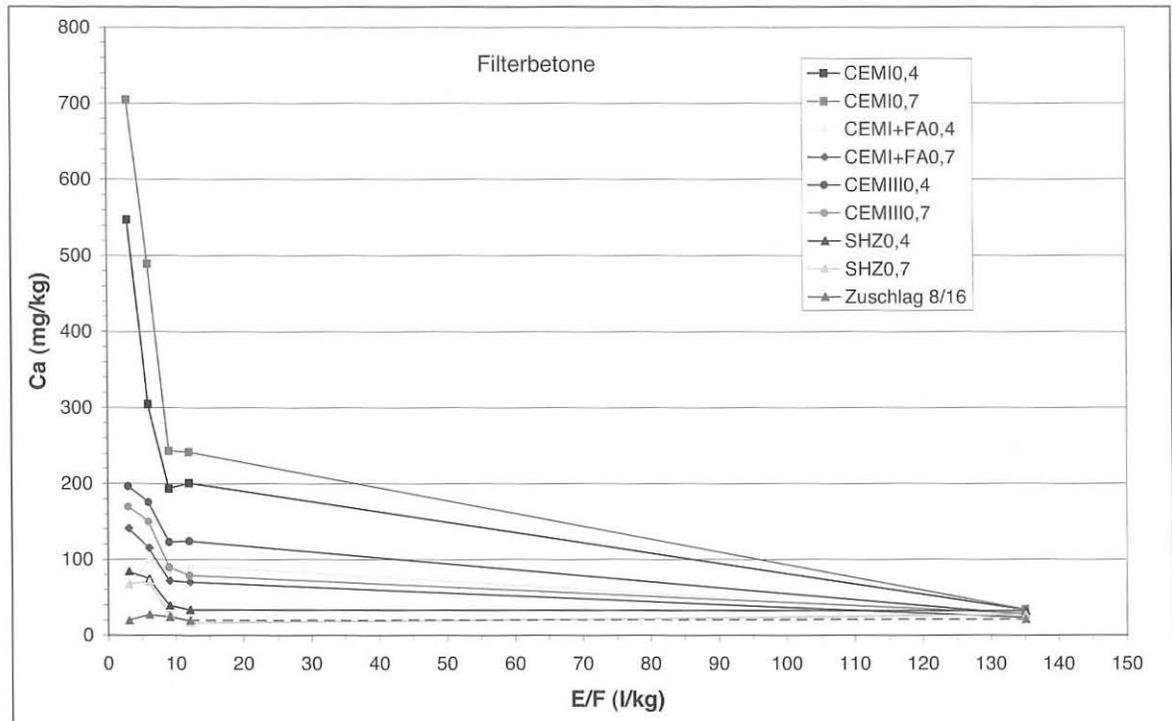


Bild 12: Calcium Austrag (mg/kg) in Abhängigkeit von E/F

delt es sich um einen Zusatzstoff gemäß ÖNorm B 3309 (aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff, kurz AHWZ), dessen Potential hinsichtlich Bindung von Kalkhydrat sehr gut ist. Bei den Serien SHZ liegen die ausgelaugten Ca-Mengen bei $E/F=12$ niedriger als für die vorgenannte Serie, bei einem $E/F=135$ für $W/B=0,4$ höher und für $W/B=0,7$ hingegen praktisch gleich wie bei den Serien CEMI+FA.

Informativer ist die Darstellung der Calcium Auslaugung in mg/kg als Funktion des E/F Verhältnisses, was in Bild 12 für die Filterbetonserien dargestellt ist. Diese Darstellung zeigt einen zeitlichen Verlauf, da ja auch in Praxisverhältnissen die Beaufschlagung mit Wasser eine Funktion der Zeit ist. In der Anfangsphase der Elutionen weist die Serie CEMIO,7 den höchsten Calcium Austrag auf, gefolgt von CEMIO,4. Deutlich geringer sind die Verhältnisse bei den Serien CEMIII, CEMI+FA und SHZ.

Eine Bewertung des gemessenen Calcium-Austrags der einzelnen Filterbetonserien erfolgt durch Vergleich mit dem Ca-Austrag aus der Gesteinskörnung. In Tabelle 10 sind diese Bezüge zusammengefasst, wobei die Calcium-Frachten des Zuschlags zu 1 gesetzt sind. Wie ersichtlich weist die Serie CEMIO,7 anfangs einen um den Faktor 36 höheren Austrag auf wie der Zuschlag. Bei einem E/F von 12 beträgt der Unterschied immer noch einen Faktor von 12, während bei E/F von 135 nur

mehr ein Faktor von 1,6 vorliegt, also fast das Niveau des Zuschlags erreicht ist. Der niedrigere W/B Wert der Serie CEMIO,4 führt zu einem Anfangsfaktor von 28, bei E/F von 12 zu 10 und bei E/F von 135 zu 1,6.

Deutlich günstigeres Auslaugverhalten für Calcium ist bei den übrigen Filterbetonserien festzustellen. So weist die Serie CEMIII anfangs einen 10- bzw. 9-fach höheren Calciumaustrag im Vergleich zum reinen Zuschlag auf. Bei $E/F=12$ beträgt der Faktor 6 bzw. 4 und bei $E/F=135$ nur noch 1,3 bzw. 1,4. Auffallend ist, dass die Serie mit höherem W/B Wert bei E/F von 3 und 12 geringeren Ca-Austrag aufweist.

Für die Serie CEMI+FA betragen die Faktoren anfangs 3 bzw. 7 (hier ist ein deutlicher Einfluss des höheren W/B Wertes ersichtlich), bei $E/F=12$ 5 bzw. 4 und bei $E/F=135$ 1,2 und 1,1.

Die Serie SHZ zeigt den hinsichtlich Calcium-Austrag günstigsten Verlauf. Anfangs liegt noch eine 4- bzw. 3-fach höhere Auslaugrate vor, bei $E/F=12$ jedoch nur mehr 1,7 bzw. 0,8. Bei diesem Bindemittel ist also das Auslaugpotential der reinen Gesteinskörnung bereits nach einem E/F-Verhältnis von 12 annähernd erreicht.

Aus den Ergebnissen der Auslaugungen der Filterbetone ist ersichtlich, dass hier die Art des Bindemittels den größten Einfluss auf das auslaugbare Potential an Calcium ausübt. Der Einfluss des W/B Werts ist dagegen nur untergeordnet einzustufen.

E/F	CEMIO,4	CEMIO,7	CEMI+FAO,4	CEMI+FAO,7	CEMIII,4	CEMIII,7	SHZO,4	SHZO,7	8/16
3	28	36	3,3	7,2	10,1	8,7	4,3	3,4	1,0
12	10	12	4,6	3,6	6,3	4,0	1,7	0,8	1,0
135	1,6	1,6	1,2	1,1	1,3	1,4	1,5	1,3	1,0

Tab. 10: Calcium Austrag der Filterbetone bezogen auf Austrag aus dem Zuschlag

Mit zunehmendem E/F Verhältnis nimmt die Auslaugbarkeit von Calcium ab und erreicht nach einem E/F von rund 135 annähernd das Freisetzungspotential des calcitisch-dolomitischen Zuschlags. Lediglich beim Sulfathüttenzement (SHZ) liegt ein solch niedriges Potential bereits bei einem E/F von 12 vor.

3.3 Injektionszemente

Bei den Untersuchungen der Injektionszemente wurden wiederum unterschiedliche Bindemittel verwendet. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte unter Einstellung einer Konsistenz, die gemessen mit dem Marsh Trichter Auslaufzeiten um 35 s ergaben. In der folgenden Tabelle 11 sind die Mischungsserien zusammengestellt.

Bezeichnung	Bindemittel	W/B	Marsh-Zeit
CEMI	CEM I 52,5 R	0,75	35 s
CEMI+HM	40 % CEM I 52,5 R + 60 % AHWZ	0,75	35 s
SC45	schnell erhärtender Portlandzement mit hohen Frühfestigkeiten	0,75	31 s
SHZ	Sulfathüttenzement	0,75	34 s

Tab. 11: Mischungsserien Injektionszemente

Bei der Serie CEMI+HM wurde als Zementersatz ein Zusatzstoff gemäß ÖNORM B 3309 (AHWZ) verwendet, der sich aus einer Mischung aus Hütten sand und Steinkohleflugasche zusammensetzt.

Die Auslaugprozeduren für die Injektionszement-Prüfkörper sind in der Tabelle 12 zusammengestellt. Dabei ist anzumerken, dass die Probekörper bereits 24 Stunden nach Herstellung für weitere 7 Tage in Wasser gelagert wurden, um einen möglichst frühen Wasserkontakt zu simulieren. Mit den weiteren Elutionen wurde im Probenalter von 8 Tagen begonnen. Während der Lagerung in sich erneuerndem Wasser wurden aufgrund unterschiedlicher Gewichte der Proben Eluens-Feststoff Verhältnisse im Bereich von 236 bis 310 erzielt. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird ein mittleres E/F von 269 herangezogen (zu bemerken ist, dass die Aus-

wertung der Daten mit dem für die einzelnen Serien tatsächlich erzielten E/F Verhältnissen durchgeführt wurde).

	Dauer	E/F
Wasserlagerung für 7 d (24 h nach Herstellung)		1,6
1. Elution	15 h Laugung	5
2. Elution	1 d Laugung	5
3. Elution	2 d Laugung	5
4. Elution	3 d Laugung	5
5. Elution	5 d Laugung	5
Wasserlagerung	77 d	ca. 269
6. Elution	7 d Laugung	5

Tab. 12: Elutionsprozeduren Injektionszemente

In Tabelle 13 sind die pH-Werte der Eluate aus den einzelnen Elutionen für die Injektionszementproben zusammengefasst. In der Anfangsphase liegen die pH-Werte im Bereich von 11 bis 12, wobei die Serie SHZ den niedrigsten pH-Wert aufweist. Bis zu einem E/F von 27 ist kein starker Abfall des pH-Wertes zu beobachten. Bei einem E/F von 300 ist eine Abnahme um bis zu 1,6 pH Einheiten festzustellen, die Werte liegen jedoch immer noch über 10 mit Ausnahme der Serie CE MI+HM.

Bei der elektrischen Leitfähigkeit (Tab. 14) weisen die Eluate anfänglich hohe Werte auf, wobei die Serie SHZ eine Ausnahme darstellt. Auch hier ist bis zu einem E/F von 27 eine relativ geringe Abnahme an löslichen Anteilen festzustellen. Nach einem E/F von 300 ist die Leitfähigkeit um bis zu eine Zehnerpotenz niedriger, d.h. dass nur mehr geringe lösliche Anteile vorliegen.

Sehr wesentlich für die Versinterung sind natürlich die freigesetzten Mengen an Calcium. Wie bereits

E/F	CEMI	CEMI+HM	SC45	SHZ
1,6	12,22	11,98	11,56	10,46
6,6	11,78	11,54	11,72	11,06
11,6	11,72	11,57	11,72	11,03
16,6	11,79	11,58	11,75	11,08
21,6	11,76	11,58	11,77	11,00
26,6	11,86	11,57	11,82	11,11
300	10,19	9,57	10,15	10,42

Tab. 13: Verlauf des pH-Wertes der Injektionszemente

E/F	CEMI	CEMI+HM	SC45	SHZ
1,6	4,75	2,91	1,149	0,519
6,6	1,665	1,031	1,452	0,441
11,6	1,229	0,902	1,202	0,393
16,6	1,457	1,022	1,492	0,378
21,6	1,467	0,929	1,375	0,301
26,6	1,544	0,834	1,329	0,464
300	0,129	0,100	0,135	0,111

Tab. 14: Verlauf der Leitfähigkeit (mS/cm) der Injektionszemente

bei den Filterbetonen ausgeführt, wird der Verlauf des Calcium-Austrags als Funktion des E/F Verhältnisses dargestellt. In Tabelle 15 sind die Calcium Konzentrationen (in mg/l) der Eluate der Injektionszementserien zusammengestellt. Dabei ist einmal für die Serie SC45 ein markanter Anstieg der Ca-Konzentrationen bis zur 3. Elution ersichtlich. Bei den übrigen Serien ist im Zuge der ersten 3 Elutionen eine Schwankung des Ca-Gehaltes zu beobachten, was den Einfluss der Kontaktzeit der Prüfkörper mit Wasser verdeutlicht (der Auslaugprozess verläuft diffusionsgetrieben und deshalb ergibt sich bei zu kurzer Kontaktzeit ein geringerer Nachtransport an Calcium aus dem Probekörper). Nach einem E/F von 300 liegen nur mehr sehr geringe Ca-Konzentrationen vor, die mit jenen eines calcitisch-dolomitischen Zuschlags (siehe Filterbetone) vergleichbar sind.

Der Verlauf des Calcium-Austrags in Abhängigkeit des E/F ist in Bild 13 für die Injektionszemente dar-

E/F	CEMI	CEMI+HM	SC45	SHZ
1,6	142	122	13	41
6,6	81	47	21	30
11,6	74	59	73	24
16,6	90	70	85	29
21,6	63	68	89	28
26,6	90	62	78	35
300	4,1	10,3	4,2	10,3

Tab. 15: Ca-Konzentrationen (mg/l) in den Eluaten der Injektionszemente

gestellt. Als Bezug wird wiederum der Ca-Austrag des calcitisch-dolomitischen Zuschlags herangezogen und die entsprechenden Faktoren für die einzelnen Serien in Abhängigkeit des E/F Verhältnisses berechnet (Tabelle 16). Dabei wird die Calcium Freisetzung aus dem Zuschlag für E/F Verhältnisse größer 123 als konstant angenommen (was auf Grund der Löslichkeit von Calciumkarbonat zulässig ist). Wie ersichtlich, liegen anfangs die Calcium Frachten der Serien CEMI und CEMI+HM um einen Faktor 10 bis 11 über jenem des Zuschlags. Bei der Serie SC45 beträgt der Faktor nur 1 (also gleiches Verhalten wie der Zuschlag) und beim SHZ rund 4. In weiterer Folge steigt der Frachtaustrag an mit Maximalwerten von 23 für CEMI, 18 für CEMI+HM und 21 für SC45. Die Serie SHZ weist als Maximum einen Faktor von 8 auf. Diese deutlich höheren Calcium Freisetzungen im Vergleich zum Zuschlag sind bis zu einem E/F Verhältnis von 27 gegeben. Erst nach einem E/F von 300 liegen an-

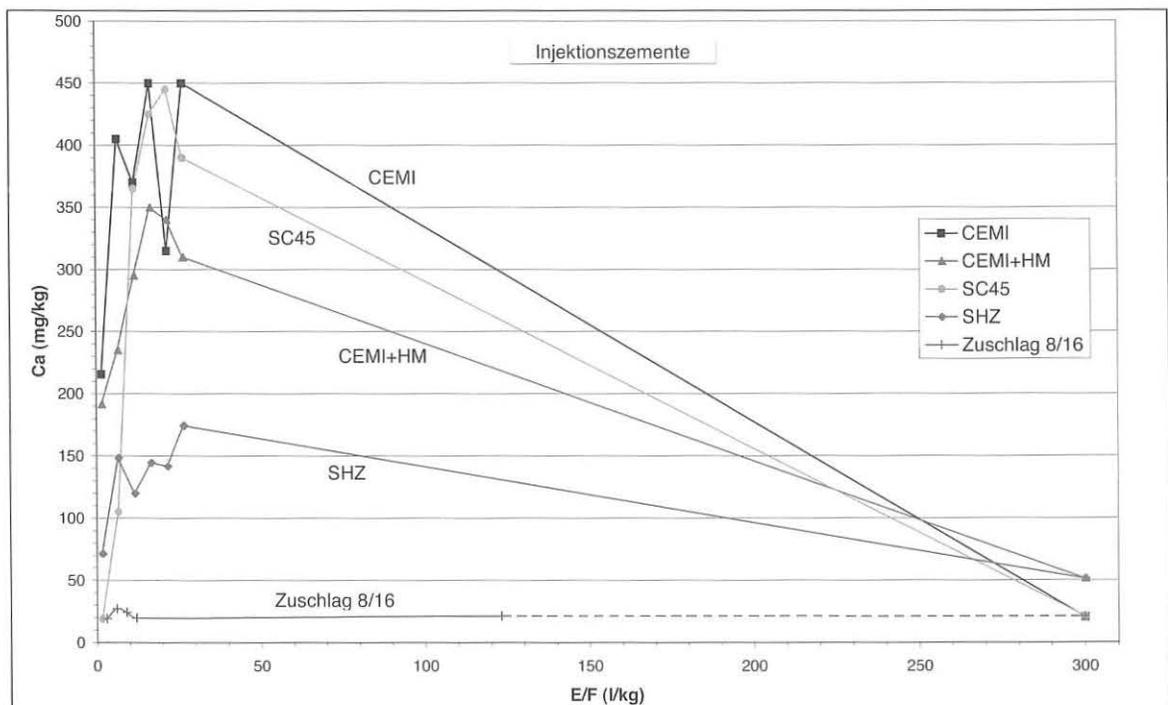


Bild 13: Calcium Austrag (mg/kg) in Abhängigkeit von E/F

nähernd Calcium Austräge wie für den reinen Zuschlag vor.

Im Vergleich zu den Filterbetonen, wo bereits bei einem E/F von 12 in Abhängigkeit des eingesetzten Bindemittels Faktoren von 1 bis 12 vorliegen, ist also bei den Injektionszementen mit einer wesentlich längeren erhöhten Freisetzung von Calcium zu rechnen.

Im Relativvergleich der Injektionszemente ist die Serie SHZ als mit dem günstigsten Calcium Austrag zu bewerten. Auch der Ersatz von Zement durch ein AHWZ (Serie CEMI+HM) führt zu einer Reduktion der Calcium Freisetzung.

E/F	CEMI	CEMI+HM	SC45	SHZ
1,6	11	10	1,0	3,7
6,6	15	8,6	3,8	5,4
11,6	15	12	15	4,9
16,6	23	18	21	7,3
21,6	15	16	21	6,7
26,6	21	15	19	8,3
300	1,0	2,5	1,0	2,5

Tab. 16: Calcium Austrag der Injektionszemente bezogen auf Austrag aus dem Zuschlag

3.4 Spritzbetone

Die Untersuchung der Calcium Freisetzung aus Spritzbetonen erfolgte an 3 aus aktuellen Baustellen entnommenen Bohrkernserien. Dabei handelt es sich um folgende Spritzbetone:

SpB_N1: Nassspritzbeton (400 kg/m³ CEMII A-S 42,5 R, W/B = 0,45, GK 8, alkalifreie EB)

SpB_N2: Nassspritzbeton (510 kg/m³ Bindemittel aus CEMIII/A, Flugasche, Mikrosilika, alkalifreie EB)

SpB_T1: Trockenspritzbeton (380 kg/m³ SBM)

Die Auslaugungen wurden an ganzen und gespaltenen Bohrkernen (Höhe = 10 cm, Durchmesser = 5 cm) durchgeführt. Die gespaltenen Bohrkernkerne weisen aufgrund der Bruchflächen eine zusätzliche "innere" Oberfläche auf, welche rund 50 % der Oberfläche der ganzen Bohrkernkerne beträgt. Die Untersuchung von gespaltenen Bohrkernen dient einer Simulation von Rissen im Spritzbeton.

Die Bezeichnung der Spritzbetonserien ist wie folgt:

SpB_N1 und SpB_N1g (Zusatz g für gespaltenen Bohrkernprobe)

SpB_N2 und SpB_N2g

SpB_T1 und SpB_T1g

In Tabelle 17 sind die Auslaugprozeduren für die Spritzbetonproben zusammengestellt. Zu erwähnen

ist, dass die Bohrkernkerne im Alter von rund 7 Tagen entnommen und bis zum Alter von 28 Tagen in verschlossenen Plastiksäcken gelagert wurden. Im Anschluss erfolgten dann die Elutionen. Während der Lagerung in sich erneuerndem Wasser wurden aufgrund unterschiedlicher Gewichte der Proben Eluens-Feststoff Verhältnisse im Bereich von 148 bis 167 erzielt. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird ein mittleres E/F von 156 herangezogen (die Auswertung der Daten wurde jedoch mit dem für die einzelnen Serien tatsächlich erzielten E/F Verhältnissen durchgeführt).

	Dauer	E/F
1. Elution	1 d Laugung	4
2. Elution	2 d Laugung	4
3. Elution	5 d Laugung	4
Wasserlagerung	140 d	ca. 156
4. Elution	14 d Laugung	4

Tab. 17: Elutionsprozeduren Spritzbetone

Der Verlauf der pH-Werte in den Eluatproben der Spritzbetonproben ist in Tabelle 18 ersichtlich. Auffallend bei den Spritzbetonen SpB_N1 und SpB_N2 ist der relativ konstante pH-Wert Verlauf bis zu einem E/F von 172, wobei die Werte bei ersterer Serie um 11,2 und bei letzterer Serie um 10,6 liegen. Bei den gespaltenen Prüfkörpern dieser beiden Spritzbetonserien liegen die pH-Werte um rund 0,5 Einheiten höher, zeigen jedoch bei einem E/F von 172 eine Abnahme um gut 1 pH Einheit. Der Trockenspritzbeton weist sowohl für den ganzen als auch gespaltenen Bohrkern die höchsten pH-Werte mit 11,6 bis 11,9 auf. Bei einem E/F von 172 ist bei beiden Serien ein Abfall um rund 1,5 pH Einheiten feststellbar.

Bei den elektrischen Leitfähigkeiten (Tabelle 19) ergeben sich für die beiden Nassspritzbetone für die ganzen Bohrkernkerne bereits bei der ersten Elution sehr niedrige Werte. Für die gespaltenen Proben liegen diese um einen Faktor 2 bis 3 höher. Bei einem E/F von 172 nehmen sowohl für die ganzen als auch gespaltenen Proben die Leitfähigkeiten stark ab und erreichen Werte wie für den reinen Zuschlag (siehe Filterbetone). Der Trockenspritzbeton weist bis zu einem E/F von 12 die höchsten Leitfähigkeiten im Eluat auf. Dabei ist jedoch zwischen ganzer und gespaltenen Probe nur ein relativ geringer Unterschied feststellbar (rund 1,5- bis 1,6-fach höher). Nach einem E/F von 172 liegen auch beim Trockenspritzbeton sehr niedrige Leitfähigkeiten vor.

Sehr wesentlich für die Versinterungen ist der Calciumaustrag aus den Spritzbetonproben. In Tabelle 20 sind zunächst die Ca-Konzentrationen (in mg/l) in den Eluatproben der untersuchten Spritzbetone zu-

E/F	SpB_N1	SpB_N1g	SpB_N2	SpB_N2g	SpB_T1	SpB_T1g
4	11,15	11,61	10,49	11,21	11,65	11,82
8	11,16	11,55	10,58	11,07	11,57	11,68
12	11,36	11,52	10,63	11,08	11,69	11,90
172	11,15	10,22	10,84	10,12	10,32	10,47

Tab. 18: Verlauf des pH-Wertes der Spritzbetone

E/F	SpB_N1	SpB_N1g	SpB_N2	SpB_N2g	SpB_T1	SpB_T1g
4	0,518	1,405	0,239	0,558	1,359	2,01
8	0,378	1,033	0,184	0,395	1,079	1,424
12	0,569	0,90	0,181	0,395	1,11	1,795
172	0,315	0,096	0,193	0,10	0,094	0,118

Tab. 19: Verlauf der Leitfähigkeit (mS/cm) der Spritzbetone

E/F	SpB_N1	SpB_N1g	SpB_N2	SpB_N2g	SpB_T1	SpB_T1g
4	10	89	5	39	97,5	153
8	23,6	82,5	7,9	29,5	80	119
12	35	70,5	7	26	80	151
172	16,2	14,5	7,6	7,6	6,1	8,4

Tab. 20: Ca-Konzentrationen (mg/l) in den Eluaten der Spritzbetone

sammengestellt. Wie ersichtlich, treten auch hier starke Unterschiede zwischen Nass- und Trockenspritzbeton auf. Aber auch innerhalb der Nassspritzbetone ergeben sich große Unterschiede. So weist die Serie SpB_N2 mit Abstand die niedrigsten Ca-Konzentrationen auf, wobei die vorgefundenen Ca-Gehalte praktisch gleich mit jenen des reinen Zuschlags sind. Das Spalten der Proben und damit Erhöhung der mit Wasser in Kontakt stehenden Oberfläche führt bis zu einem E/F von 12 zu höheren Ca-Konzentrationen (Erhöhung um einen Faktor 9 bis 2), während bei einem E/F von 172 keine wesentlichen Unterschiede in den Ca-Gehalten mehr erkennbar sind. Beim Trockenspritzbeton sind die Calcium-Konzentrationen des ganzen Bohrkerns bis zu einem E/F von 12 wesentlich höher als bei den Nassspritzbetonen. Die gespaltene Probe weist nochmals höhere Ca-Werte auf, wobei der Unterschied einen Faktor von 1,5 bis 2 ausmacht. Bei E/F von 172 liegen auch hier wiederum niedrige und vergleichbare Ca-Konzentrationen in beiden Eluaten vor.

In Bild 14 ist der Verlauf der Calcium Freisetzung in Abhängigkeit des E/F Verhältnisses für die Spritzbetone dargestellt. Ebenfalls ist auch der Verlauf der Ca-Freisetzung für den reinen Zuschlag eingezeichnet. Deutlich zu erkennen ist der praktisch ident mit dem Zuschlag verlaufende Calcium Austrag der Serie SpB_N2. Die zusätzliche innere Oberfläche beim gespaltenen Bohrkern führt zu

einer Erhöhung des Calciumaustrags um anfänglich das 8-fache und in weiterer Folge um das 4-fache. Bei E/F von 172 liegen identische Ca-Freisetzungen vor. Bezogen auf den reinen calcitisch-dolomitischen Zuschlag liegen die Faktoren (Tabelle 21) für SpB_N2 im Bereich von 1 bis 1,4, also praktisch gleiches Verhalten wie der Zuschlag. Für die gespaltene Probe ergeben sich Faktoren von 8 bis 5 für E/F gleich 4 bis 12 und 1,4 bei E/F=172.

Bei der Serie SpB_N1 ist eine Zunahme der Ca-Frachten bis E/F von 12 zu beobachten. Im Vergleich zum Zuschlag liegt anfänglich 2- und Zunahme auf 7-fach höheren Austrag vor. Der gespaltene Prüfkörper liegt deutlich höher mit Faktoren von anfänglich 18 und abnehmend auf 14. bei E/F von 172 weist die ganze Probe einen Faktor von 3 und die gespaltene eine Faktor von 2,7 auf.

Die größten Ca-Freisetzungen zeigt der Trockenspritzbeton. Bei der ersten Elution ist diese um einen Faktor 20 für die ganze und um einen Faktor 31 für die gespaltene Probe höher als beim Zuschlag. Bei einem E/F von 12 liegt immer noch ein 16- bzw. 31-mal höherer Calcium Austrag vor. Erst bei einem E/F von 172 ist das Ca-Freisetzungs-niveau des Zuschlags erreicht.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen deutlich, dass hinsichtlich Calcium Freisetzung starke Unterschiede zwischen Nass- und Trockenspritzbeton auftreten können. Zu beachten ist auch eine zusätzliche inne-

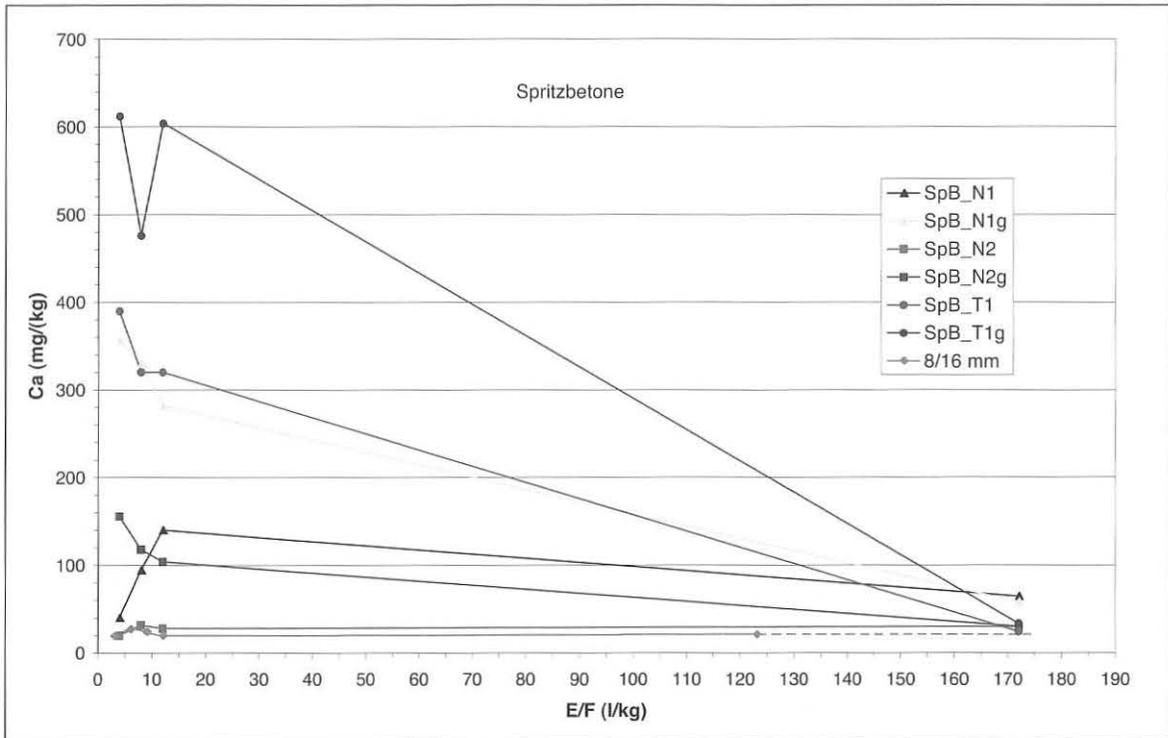


Bild 14: Calcium Austrag (mg/kg) in Abhängigkeit von E/F

E/F	SpB_N1	SpB_N1g	SpB_N2	SpB_N2g	SpB_T1	SpB_T1g
4	2,1	18	1,0	8,0	20	31
8	3,9	14	1,3	4,9	13	20
12	7,1	14	1,4	5,3	16	31
172	3,0	2,7	1,4	1,4	1,1	1,6

Tab. 21: Calcium Austrag der Spritzbetone bezogen auf Austrag aus dem Zuschlag

re Oberfläche (wie dies im Fall von Rissen auftreten kann), die ebenfalls eine Erhöhung des Calcium Austrags bewirkt.

4. Zusammenfassung

Aus den Auslagerversuchen der zementgebundenen Tunnelbaustoffe ist ersichtlich, dass die Calcium Freisetzung durch entsprechende Maßnahmen beeinflussbar ist. Eine deutliche Reduktion der Calcium Auslaugung ist speziell bei Filterbeton durch Verwendung von Bindemitteln mit Zusatz von hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen (AHWZ) oder Sulfathüttenzement möglich. Im Vergleich zu einem CEM I liegt für die Anfangsphase (bezogen auf das Verhältnis Auslaugmittel zu Feststoff, E/F) ein um einen Faktor 8 geringerer Calcium Austrag vor. Auch ein CEM III/A zeigt geringere Calcium Freisetzung, wengleich diese anfänglich noch höher liegt als bei den beiden vorgenannten Bindemitteln. Auffallend ist der Umstand, dass sowohl beim Sulfathüttenzement als auch beim CEM III/A die Serien mit

höherem W/B Wert niedrigere Calcium Auslaugung aufweisen.

Das höchste Freisetzungspotential an Calcium in Abhängigkeit der beaufschlagten Wassermenge weisen die Injektionszemente auf. Hier sind keine so signifikanten Unterschiede im Calcium Austrag in Abhängigkeit der Bindemittelzusammensetzung erkennbar wie bei den Filterbetonen. Der hohe Freisetzungsgrad an Calcium bleibt bis zu großen E/F Verhältnissen, d.h. über lange Zeiträume, erhalten. Auffallend ist das Verhalten des untersuchten schnell erhärtenden Portlandzements mit hohen Frühfestigkeiten, dessen Calcium Austrag mit zunehmender Wasserbeaufschlagung anfänglich gering ist und in der Folge mit einem CEM I vergleichbare Werte erreicht. Der Sulfathüttenzement ist hier hinsichtlich Calcium Freisetzung als am günstigsten zu nennen.

Bei den untersuchten Spritzbetonen zeigen sich sehr große Unterschiede in der Calcium Freisetzung. Die

deutlich höchsten Werte weist der Trockenspritzbeton auf. Interessant auch das unterschiedliche Verhalten der beiden Nassspritzbetone, welches auf die Bindemittelzusammensetzung zurückzuführen sein dürfte. Die Verwendung eines CEM III/A mit Flugasche und Mikrosilika scheint eine sehr geringe Calcium Auslaugung zu bewirken mit praktisch gleichem Auslaugverhalten wie der calcitisch-dolomitische Zuschlag. Die Auslaugversuche an den gespaltenen Spritzbetonproben und dadurch Erhöhung der mit dem Auslaugmittel in Kontakt befindlichen Oberfläche führt bei allen 3 Spritzbetonen zu einer deutlichen Erhöhung des Calcium Austrags. Daraus ist erkennbar, dass in Folge von Rissen ein erhöhtes Potential an Calcium Freisetzung vorliegt.

Im Zusammenhang mit Calcium Freisetzung aus den zementgebundenen Baustoffen ist speziell die dadurch mögliche Sinterbildung angesprochen, d.h. dass das freigesetzte Calcium in Form von Calciumcarbonat gefällt werden kann. Wie bei den Untersuchungen an einem Tunnel gezeigt wurde, können die Versinterungen ohne entsprechenden Instandhaltungsaufwand zu massiver Beeinträchtigung der Funktionstüchtigkeit des Tunnelbauwerks führen. Die Instandhaltung ist mit hohen Kosten verbunden, welche in Zukunft ohne Gegenmaßnahmen noch wesentlich zunehmen dürften. Für die Planung und den Betrieb von Tunnelbauwerken erscheint es wichtig, dass diese Zusammenhänge eingehend untersucht werden, um nachhaltige Maßnahmen wie Einsatz entsprechender Baustoffe und

Optimierung der Entwässerungssysteme zur Senkung der Instandhaltungskosten und Erhöhung der Dauerhaftigkeit von Tunnelbauwerken gewährleisten zu können.

5. Literatur

- [1] **Brux, G.:**
Einfluss des Bergwassers auf die Dauerhaftigkeit von Bauwerken. Tiefbau 1/1998.
- [2] **Wegmüller, M.C.:**
Einflüsse des Bergwassers auf Tiefbau/Tunnelbau. Stäubli AG, Zürich, 2001.
- [3] **Girmscheid, G.; Gamisch, T.:**
Härtstabilisation reduziert Instandhaltungskosten von Tunneln (I). Tunnel 5/05, Bauverlag, 2005.
- [4] **Girmscheid, G.; Gamisch, T.:**
Härtstabilisation reduziert Instandhaltungskosten von Tunneln (II). Tunnel 6/05, Bauverlag, 2005.
- [5] **ÖVBB:**
Ausbildung von Tunnelentwässerungen. Richtlinie der Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB), Wien, Juni 2003.
- [6] **SIA 198:**
Untertagebau Ausführung. Schweizer Norm SN 531 198, SIA, Zürich, 2004.