

ZUR UMWELTVERTRÄGLICHKEIT VON SPRITZBETON IM TUNNELBAU ERFAHRUNGEN MIT MASSNAHMEN ZUR VERMINDERUNG DER SPRITZBETONELUATION

Gerhard Poscher

Mit 8 Abbildungen, 6 Tabellen und 1 Fototafel

Zusammenfassung:

Nach der derzeitigen Gesetzeslage wird in Österreich Tunnelausbruch nach dem Abfallwirtschaftsgesetz (1990) und Tunnelabwasser nach der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (1991) verhandelt. Spritzbetonarbeiten sind dabei hinsichtlich der Zusatzstoffe, der Spritzbetoneluation und der Rückprallanteile ein zunehmend kritischer Verhandlungspunkt.

Über Erfahrungen mit spritzbetontechnologischen Maßnahmen zur Verbesserung der Umweltverträglichkeit, insbesondere zur Reduktion der Eluationsneigung, wird berichtet. Methodik und Umfang der hydrogeologischen Dokumentation werden dabei erörtert.

Abstract:

Current Austrian law sets down definitely that tunnel excavation material is treated according to the 'Abfallwirtschaftsgesetz (1990)' and sewage from tunnels according to the 'Allgemeine Abwasseremissionsverordnung (1991)'.

Critical matter of negotiations are shotcrete works because of dust emissions, additional basic chemicals for acceleration, shotcrete eluation and shotcrete rebound.

Experiences with measures designed to reduce shotcrete eluations in order to improve environmental acceptance will be explained in detail. The experiences were gathered during construction of four twin track tunnel tubes of the Verbindungskurve Nantenbach / BRD totalling approx. 6.3 km in length.

Several different dry shotcrete mixtures were used. In the case of two tunnels dry shotcrete mixed with microsilica were applied under different constructional framework conditions.

Documentation of pH-values and conductivity as well as analyses of the water seeping through the primary lining revealed that no major changes in the chemistry of the groundwater occur due to shotcrete eluations until the secondary lining is installed. Independent of whether microsilica slurry is added or not, only slight differences are observed between the individual mixtures when using Hochofen cement and liquid accelerators. Eluation tests performed on samples taken from the tunnel provided qualitatively similar results.

As the installation of the secondary lining progressed, pH-values and alkali content increased as compared to the excavation phase and a clear dependence on groundwater flow into the tunnel was found. By the time the construction works were completed, the hydrochemical conditions encountered at the side wall drainages of the secondary lining had already largely stabilized.

The readings collected so far indicate that a remarkable reduction in the pH-value and the eluate content of the tunnel water has been achieved as compared to the Mühlberg tunnel which is situated in the same mountain massif and which is constructed by shotcrete of minor quality.

1. Einleitung

1.1 Umweltkonflikte bei Tunnelbauarbeiten

Bei Tunnelbauarbeiten sind in der Genehmigungs- und Errichtungsphase zunehmend Einschränkungen und Auflagen im Zusammenhang mit der sich entwickelnden Umwelt- und Abfallgesetzgebung bzw. dem damit befaßten Fachnormenwerk gegeben.

Neben den traditionellen Konfliktthemen, wie Baulärmemissionen und Auswirkungen von Sprengerschütterungen, werden die bau- und betriebsbedingte Abwasserbelastung und die Deponierung der Ausbruchsmassen zunehmend zu kritischen Verhandlungspunkten. Aus wasserwirtschaftlicher, abfallwirtschaftlicher und arbeitsmedizinischer Sicht sind dabei auch die Auswirkungen von Spritzbetonarbeiten zu beachten.

Deponierung von Tunnelausbruchmaterial

Im österreichischen Abfallwirtschaftsgesetz (AWG) 1990 § 2. (1) wird der Begriff Abfall als eine bewegliche Sache, deren sich der Eigentümer oder Inhaber entledigen will, definiert.

In jüngster Zeit wird seitens österreichischer Behörden teilweise die Rechtsauffassung vertreten, Schuttermaterial gemäß AWG als Abfall zu verhandeln. Dies, obwohl das AWG auf Tunnelausbruchmaterial explizit nicht Bezug nimmt und darauf hinweist, daß „Taubes Gestein“ dem Berggesetz 1975 i.d.g.F. unterliegt.

Andererseits liegt dieser Rechtsauffassung die berechtigte Annahme zugrunde, daß Schuttermaterial durch NO_x-Verbindungen aus Sprengstoffresten, Sprengstoffgasen, dem Dieselbetrieb und durch Spritzbetonrückprall bzw. Zusatzstoffe kontaminiert werden kann.

Soweit überblickbar, stehen gesicherte wissenschaftliche Ergebnisse zu dieser umfassenden Problematik aus, weshalb die Einflußgrößen allfälliger Kontaminanten derzeit in gutachterlichen Studien ermittelt werden (WEHR, 1993).

Abwasserbelastung in der Bauphase, Drainagewasserabfuhr in der Betriebsphase

Abzuführendes Bergwasser (Tiefenwasser oder Grundwasser) ist, wenn seine Eigenschaften verändert werden, in Österreich nach der Allgemeinen Abwasseremissionsverordnung (1991) zu beurteilen. Dies trifft im weitesten Sinn für Tunnelwässer zu. Eine Belastung des abfließenden Bergwassers im Tunnel ist in der Bauphase durch die Suspensionsfracht und die Lösungsfracht gegeben. Letztere setzt sich hpts. aus gelösten Staubemissionen und aus Eluat der Spritzbetonschale (Betonkorrosion) zusammen (SCHRAFT, 1988).

Zement- und Spritzbetoneluat verursachen Probleme in der Einhaltung der pH-Grenzwerte, was durch Neutralisationsanlagen kompensiert werden kann. In Zusammenhang damit treten abhängig von den verwendeten Zusätzen erhöhte Alkali- und Aluminiumwerte auf, Emissionen aus dem Sprengvortrieb schlagen sich in erhöhten NO_x-Werten nieder.

Die Eluation des Spritzbetons durch eindringendes Bergwasser beschränkt sich nicht nur auf die Bauphase, sondern verursacht Folgeprobleme wie bspw. chemische Ausfällungen in den Tunneldrainagen und eventuell langfristige Umweltprobleme bei der Einleitung in die Vorflut.

1.2 Möglichkeiten zur Emissionsreduktion beim Vortrieb

Umweltprobleme beim konventionellen Vortrieb ergeben sich hpts. durch den Schadstoffaustrag, der auf Dieselbetrieb, Sprengvortrieb und auf Spritzbetonarbeiten zurückzuführen ist. Mit den Umweltproblemen laufen vielfach auch erhöhte Gesundheitsrisiken bei den Vortriebsarbeiten einher.

Eine Verringerung von Schadstoffemissionen im Vortrieb und der Umweltbelastung im allgemeinen ist bzw. wäre nach dem heutigen Stand der Technik in allen angesprochenen Bereichen erzielbar.

Sprengarbeiten

- * Eine Verbesserung ist durch den weitestgehenden Ersatz gelatinöser Sprengstoffe durch Emulsionssprengstoffe, die kein Sprengöl (Nitroglykol) enthalten, möglich (BANDMANN & SCHREYER, 1992). Dadurch wird die Nitritkomponente im Schuttergut und Tunnelabwasser minimiert.
- * Eine Erhöhung des Wirkungsgrades des eingesetzten Sprengstoffes bei gleichzeitiger Emissionsreduktion ist durch eine bessere Verdämmung, einen optimalen Bohrlochfüllungsgrad und die Optimierung bzw. Abstimmung von Sprengschema, Abschlaglänge etc. möglich.

Spritzbetonarbeiten

- * Die Bevorzugung des Naßspritzverfahrens statt dem Trockenspritzverfahren ist aus emissionstechnischer Sicht anzustreben. Z.Z. wird aufgrund der größeren Flexibilität vielfach das Trockenspritzverfahren bevorzugt.
- * Für Aussinterungen in den Drainagen und den pH-Wert des Drainagewassers sind die Alkalien und Hydroxide aus dem Spritzbeton von wesentlicher Bedeutung. Zur Verbesserung dieses Problems ist neben der Optimierung von Zement und Erstarrungsbeschleuniger (EB) vor allem die Zugabe von alkalihaltigen Erstarrungsbeschleunigern (EB) zu reduzieren.
- * Die Reduzierung des Rückprallanteils beim Spritzbetonauftrag wurde bislang primär aus wirtschaftlichen Gründen angestrebt, ist heute aber hinsichtlich der unerwünschten Vermischung mit dem Ausbruchmaterial auch vor dem Hintergrund der Deponieproblematik zu sehen.
- * Der Einsatz von automatisierten Spritzmanipulatoren gegenüber dem händischen Auftrag im ungesicherten Vortriebsbereich ist aus arbeitsmedizinischen und qualitativen Erwägungen (BRUX, 1992), aber auch hinsichtlich

der Rückprallminimierung (STRAPPLER, 1991) anzustreben.

Baubetrieb, Bauverkehr, Bewetterung

- * Reduktion der Staubbelastung — insbesondere beim Spritzbetonauftrag — durch den Einsatz von Staubbindemitteln und
- * Reduktion der Dieseemissionen durch technische Maßnahmen wie Abgaswäsche, Katalysator, Treibstoffwahl bzw.
- * weitergehende Umstellung auf E-Antriebe und
- * konsequente Lüftungstechnische Maßnahmen.

Diese Übersicht zeigt, daß Standard und Technik der Spritzbetonarbeiten auf die Beurteilung des zu deponierenden Schuttergutes, der Tunnelabwässer, Drainagewässer und der Atemluftverhältnisse entscheidenden Einfluß nehmen.

Ergebnisse und Erfahrungen mit der Anwendung elutionsmindernder Spritzbetone werden nachfolgend dargelegt. Die Dokumentation und Auswertung des Einflusses spritzbetontechnologischer Maßnahmen auf die Abwasserqualität wurde im Rahmen der ingenieurgeologischen Betreuung von Tunnelbauvorhaben durchgeführt (POSCHER & JOHN, 1993).

2. Maßnahmen zur Verminderung der Spritzbetoneluation

2.1 Problemstellung und chemische Grundlagen

Im Zuge des Baus der Verbindungskurve Nantenbach (1990–92) der DB-Neubaustrecke Hannover-Würzburg wurden vier zweigleisige Tunnelröhren mit einem Ausbruchquerschnitt von ca. 110 m² bis 150 m² mit einer Gesamtlänge von ca. 6,3 km nach der NÖT aufgeföhren (Abb. 1).

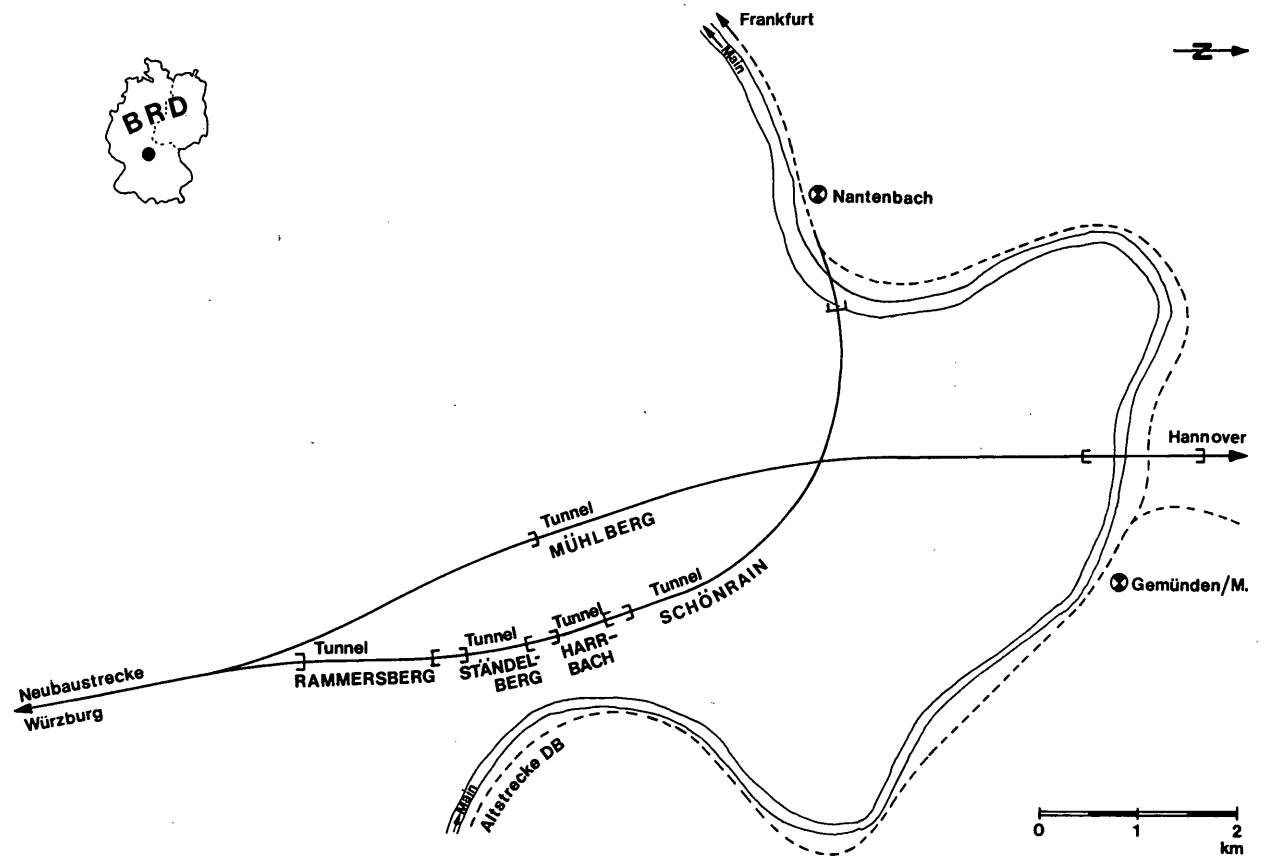


Abb. 1: Verbindungskurve Nantenbach (Würzburg-Frankfurt) der DB-Neubaustrecke

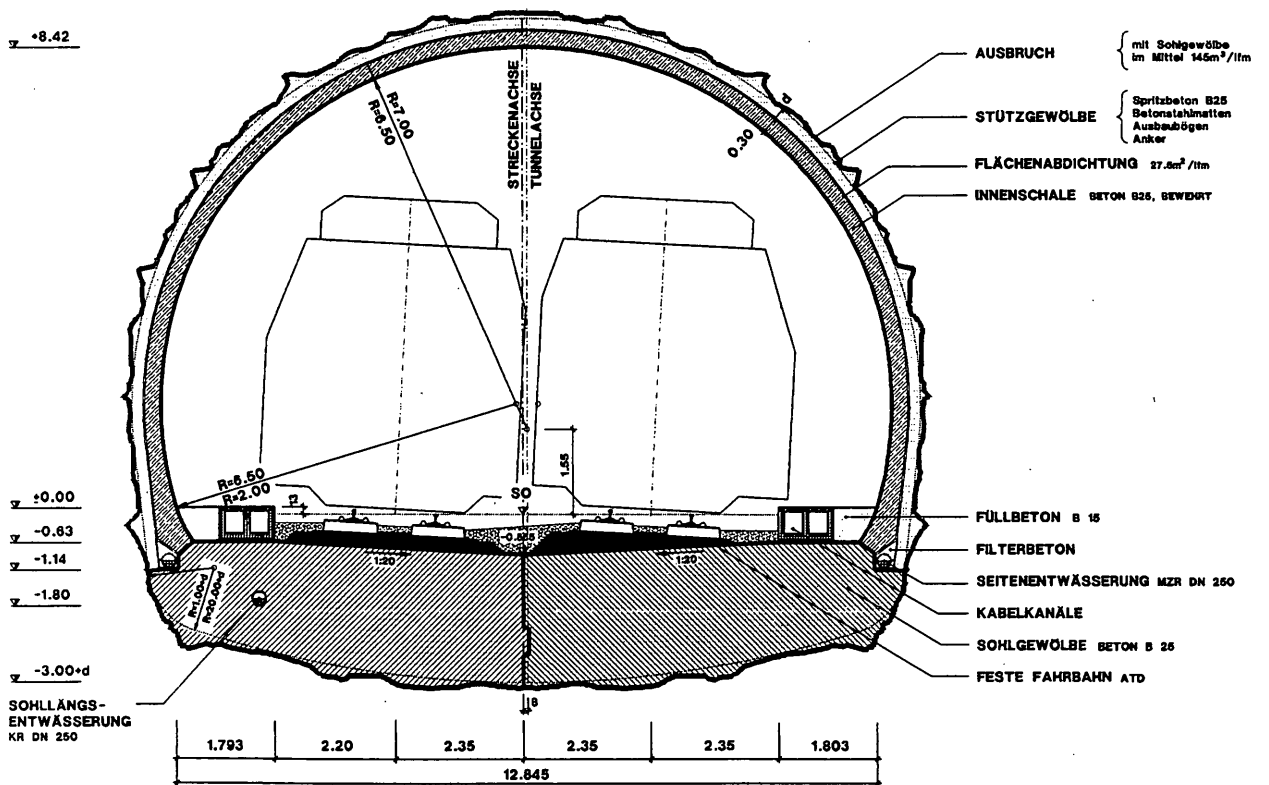


Abb. 2: Regelquerschnitt des Tunnels Schönrain

Zu Baubeginn des Tunnels Schönrain der Verbindungskurve Nantenbach (1990) wurden erste Ergebnisse einer im Auftrag der Deutschen Bundesbahn durchgeführten Studie zur Minimierung von chemischen Ausfällungen in Tunnel-drainagen und der Korrosion von Spritzbeton vorgestellt (SPRINGENSCHMID, MAIDL & BREITENBÜCHER, 1991).

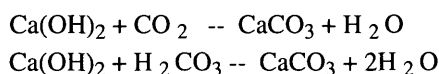
Die Studie wurde durchgeführt, da bei bisher ausgeführten Tunneln der DB-Neubaustrecken die Versinterung der Tunnel-drainagen eine kostenintensive Reinigung mittels Hochdruckspülung etwa einmal jährlich erforderlich macht.

Das Versinterungsproblem entsteht hpts. durch den flächigen Kontakt der Spritzbetonaussenschale mit dem Bergwasser. Bei Tunneln mit Regenschirmabdichtung wird das anfallende Bergwasser über Tunnel-drainagen (Seitenentwässerungen) abgeleitet (Abb. 2). Die Spritzbeton-elution durch das Bergwasser beeinflusst den Wasserchemismus und somit

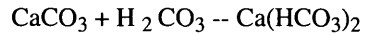
- * die Wassergüte des abzuführenden Bergwassers und
- * die Versinterung der Tunnel-drainagen durch Ausfall der Eluate in den Drainagen.

Stark vereinfacht laufen dabei folgende chemische Prozesse ab (vgl. auch BREITENBÜCHER, 1991), wobei im Detail auch die Druck- und Temperaturabhängigkeiten im Kalk-Kohlensäure-System zu berücksichtigen sind:

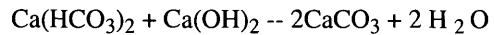
- * Bildung von Calciumhydroxid bei der Hydratation des Zementklinkers.
- * Lösung von Calciumhydroxid aus dem Zementstein, das in der Drainage bei CO₂-Überschuß ausfällt oder bei Zutritt von Bergwasser mit kalklösender Kohlensäure bereits im Beton ausfällt.



- * Lösung von Calciumkarbonat aus dem Beton, Bildung von Calciumhydrogenkarbonat.



- * Kommt Calciumhydrogenkarbonat mit dem Calciumhydroxid in Verbindung, fällt Calciumkarbonat (in den Drainagen) aus.



Nach diesem Prinzip fällt auch Ca(HCO₃)₂ des natürlichen Bergwassers bei Präsenz von Ca(OH)₂ aus dem Spritzbeton im Drainagesystem aus.

- * Die gute Löslichkeit der Alkalihydroxide, die vorwiegend über die Erstarrungsbeschleuniger (EB) in den Zement eingetragen werden, forciert indirekt den Ausfällungsprozess, da dadurch weniger Ca(OH)₂ in Lösung gehalten werden kann.

In den Untersuchungen von SPRINGENSCHMID, MAIDL & BREITENBÜCHER (1991) wurden folgende wirksame spritzbeton-rezeptspezifische Maßnahmen zur Reduktion der Spritzbeton-elution und der durch die Hydroxide verursachten hohen pH-Werte erkannt:

- * die Verwendung von Hochofenzement (HOZ) mit hohem Hüttensandanteil anstatt Portlandzement (PZ),
- * die Verwendung von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern (EB-Mittel),
- * die Reduktion der EB-Dosierung auf ≤ 3% Wirkstoffgehalt, bezogen auf das Zementgewicht,
- * die Verwendung nicht-kalkhaltiger Zuschlagstoffe und der
- * Einsatz von Silicastauben bzw. Silicasuspensionen (bspw. Microsilica) bei gleichzeitiger Reduktion des Zementgehalts.

Im Zuge der baupraktischen Umsetzung dieser Maßnahmen konnten wertvolle Erfahrungen mit elutions- und emissionsmindernden Maßnahmen beim Trockenspritzverfahren gewonnen werden. Von besonderer Bedeutung war dabei der Einsatz von Silicazusätzen zum Spritzbe-

ton, der in diesem Umfang ein Novum im Tunnelbau darstellte.

Die Vernetzung der Einflußfaktoren auf die Spritzbetonqualität, die Wirtschaftlichkeit und die Umweltverträglichkeit des Verfahrens sind insgesamt um vieles komplexer, als es hier dargestellt werden kann — eine gute Übersicht dazu bietet BRACHER (1992).

2.2 Silicazusätze im Spritzbeton

Anstöße zu Qualitätsverbesserungen des Spritzbetons durch die Anwendung von Microsilicazusätzen wurden Ende der 80er Jahre gegeben. Ursächlich waren technisch-wirtschaftliche Aspekte u.a. im Zusammenhang mit der „Einschaligen Bauweise“ für den Microsilicaeinsatz auf einzelnen Versuchsstrecken entscheidend (GEBAUER, 1990; KUSTERLE & LUKAS, 1992).

Microsilica ist ein amorpher Silicastaub, besteht hpts. aus Siliciumdioxid und fällt bei der Erzeugung von Ferrosilizium an. Es verfügt über eine hohe spezifische Oberfläche von ca. 18–25 m²/g (BET-Verfahren), wird den künstlichen Puzzolanen zugerechnet und reagiert mit Calciumhydroxid Ca(OH)₂ zu Calciumsilikathydrat (MANN, 1990).

Microsilicazusätzen im Spritzbeton werden folgende qualitätsverbessernde Eigenschaften zuerkannt:

- * Erhöhte Klebrigkeit (Kohäsion) des Spritzbetons aufgrund der hohen spezifischen Oberfläche, wodurch eine Rückprallminderung und eine
- * Reduktion des notwendigen Erstarrungsbeschleunigergehalts (EB) erreicht werden kann.
- * Erhöhung der Dichtigkeit des Gefüges des Spritzbetons, woraus unter Einbeziehung des reduzierten EB-Anteils eine Verringerung der Abwasser- bzw. Drainagewasserbelastung erwartet werden kann.

- * Erhöhung der Druckfestigkeiten ab einem Betonalter von etwa 12 h, allerdings bei relativ geringeren Frühfestigkeiten zufolge des reduzierten EB-Anteils (im Vergleich mit microsilicafreien Referenzbetonen) und
- * Reduktion des Anteils an mobilisierbarem Calciumhydroxid Ca(OH)₂ im Beton.
- * Ferner ist eine Reduktion der Staubbelastung in der Atemluft im Tunnel zu erwarten.

3. Ergebnisse mit eluationsmindernden Maßnahmen bei den Tunnels der Verbindungskurve Nantenbach

3.1 Eingesetzte Spritzbetonrezepturen

Unterschiedliche Voraussetzungen in den einzelnen Tunnels hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit, Bergwasserstand und Drainagemassnahmen waren einerseits Grundlage für bauwerks-spezifische unterschiedliche Anforderungen an den Spritzbeton in der Ausschreibung. Andererseits wurden die Objekte an verschiedene Unternehmen vergeben, sodaß auch aus diesem Grund unterschiedliche Spritzbetonrezepturen zum Einsatz gelangten.

Der im Tunnel Mühlberg der Neubaustrecke Würzburg-Hannover eingesetzte Spritzbeton wird nachfolgend als Referenzspritzbeton herangezogen. Der Tunnel Mühlberg liegt im gleichen Gebirgsstock wie der Tunnel Schönrain (Abb. 1), der Spritzbeton ist identen Bergwasser-Verhältnissen ausgesetzt. Der Tunnel Mühlberg wurde 1982–86 errichtet, wobei an den Spritzbeton seinerzeit keine besonderen Anforderungen gestellt wurden.

Für die Vortriebe an der Verbindungskurve Nantenbach (1990–1992) wurden 6 verschiedene Trockenspritzbetone, 2 davon mit Microsilicazugabe, entwickelt (Tab. 1).

Positive Ergebnisse von Tests mit Microsilicazusätzen in der ersten Vortriebsphase des Tunnel Schönrain (1990) führten zur standardmäßigen Anwendung eines Microsilicaspritzbetons

mit Hochofenzement und Hartgesteinssplitt (Rez. Nr. 26 in Tab. 1) auf rd. 2.500 m Vortriebslänge im Tunnel Schönrain (STRAPPLER, 1991, 1993; POSCHER & JOHN, 1993). In weiterer Folge wurde aufgrund der hydrogeologischen Situation Microsilicaspritzbeton (Rez. Nr. 191 in Tab. 1) auch im Nachbarbaulos, dem Tunnel Ständelberg, eingesetzt.

Die Zuschlagstoffe setzten sich bei allen Rezepten an der Verbindungskurve Nantenbach aus aufbereiteten Natursanden 0/2 nach einer vom Betonsachverständigen (Univ.-Prof. Springenschmid, TU München) vorgegebenen Sieblinie und aus Splitten 2/8 und 8/11 zusammen.

Als Zement wurde auf knapp 90 % der gesamten Vortriebsstrecken der Verbindungskurve Nantenbach Hochofenzement HOZ 35 L mit 50% Hüttensandanteil eingesetzt.

Aus der eingangs zitierten Studie waren weiters rezeptspezifische Ergebnisse über den Einfluß von verschiedenen flüssigen EBs auf die Eluationsneigung verfügbar. Silica wurde ausschließlich in Form von Microsilica-Slurry eingesetzt.

Rezeptnummer	Zementherst./Werk	Zementart	Zementgehalt	Zuschlagstoff	EB - Mittel	BE-Anteil Wirkstoff ¹⁾	Microsilica ²⁾
Nr.20	Heidelberger Lengfurt	HOZ 35 L	360 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	Tricosal T1 UMA-Gunite	3 % 3 %	—
Nr.21	Heidelberger Lengfurt	PZ 35 F	360 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	UMA-Gunite	2 %	—
Nr.22	Heidelberger Lengfurt	PZ 35 F	360 kg/m ³	Basaltsplitt/ Quarzsand	Tricosal T1	4 %	—
Nr.26*	Heidelberger Lengfurt	HOZ 35 L	340 kg/m ³ (360 kg/m ³)	Basaltsplitt Quarzsand	Tricosal T1	2,75 %	8 %
Nr.190	Schwenk Karlstadt	HOZ 35 L	340 kg/m ³	Kalksplitt / Quarzsand	UMA-Gunite	2,1 %	—
Nr.191*	Schwenk Karlstadt	HOZ 35 L	340 kg/m ³	Kalksplitt / Quarzsand	UMA-Gunite	1,0 %	7 %

¹⁾ Wirkstoffanteil des BE-Mittels, bezogen auf das Zementgewicht

²⁾ Trockensubstanz bezogen auf das Zementgewicht

Tab. 1: Trockenspritzbetone an der Verbindungskurve Nantenbach, Rezepturen laut Eignungsprüfung (Microsilicaspritzbetone mit *)

Tunnel	Rezept	W U (mm) 28 d + 4 d			Rohdichte 28 d in (kg/m ³)			Spritzverfahren
		Ø	s	n	Ø	s	n	
Schönrain	Rez. 20	21,6	6,8	12	2276	55,9	13	Robojet
	Rez. 22	22,2	4,2	9	2390	78,0	3	Handführ.
	Rez. 26*	17,9	5,5	22	2352	60,8	23	Robojet
Rammersberg	Rez. 20	17,6	4,4	7	2287	29,3	17	Handführ.
	Rez. 21	23,8	10,2	3	2236	47,4	5	Handführ.
Harrbach Ständelb.	Rez. 190	21,5	6,8	7	2270	30,7	15	Handführ.
	Rez. 191*	18,7	3,9	8	2286	43,0	15	Handführ.

Tab. 2: Gemittelte Ergebnisse Ø der Güteprüfungen mit Standardabweichung s und Anzahl der durchgeführten Prüfserien n (Microsilicaspritzbetone mit *)

3.2 Ergebnisse aus Eignungs- und Güteprüfungen

Die Ergebnisse der Eignungs- und Güteprüfungen der einzelnen Spritzbetonrezepte sind in POSCHER & JOHN (1993) dargestellt. Nachfolgend wird lediglich auf die Ergebnisse der Prüfungen auf Wasserundurchlässigkeit (WU) und auf die erzielten Betonrohddichten hingewiesen, die als mögliche indirekte Kriterien für die Eluationsneigung eines Spritzbetons anzusehen sind (Tab. 2).

Bei den Eignungsprüfungen wurde festgestellt, daß die Wassereindringtiefe (nach 28d) bei microsilicamodifizierten Spritzbetonen aufgrund des relativ dichteren Gefüges um ca. 25 % unter der der microsilicafreien Vergleichsrezepte liegt.

Im Rahmen der Güteprüfungen am Bauwerkskern lag mit Ausnahme eines Bauloses die Wassereindringtiefe nach 28 d bei den Microsilicaspritzbetonen eindrucksvoll günstiger als bei den Vergleichsrezepten — i.M. knapp 19 mm bei Rez. Nr. 191 (im Vergleich mit Rez. Nr. 190) und knapp 18 mm bei Rez.Nr. 26 (im Vergleich mit Rez. Nr. 20, 22).

Bei den Rohddichten der Spritzbetone ist im Rezeptvergleich 190/191 ein statistisch sauberer Vorteil für Microsilicaspritzbetone nachweisbar. Für Microsilicaspritzbeton nach Rez. Nr. 26 ist aufgrund der Verwendung von Hartsteinsplittzuschlag nur ein Vergleich mit Rez. Nr. 22 zulässig (vgl. Tab. 1), der aufgrund der geringen Probenzahl von n = 3 als wenig repräsentativ anzusehen ist.

Der Ergebnisvergleich zur Wassereindringtiefe beim Standardrezept ohne Microsilica (Rez. Nr. 20) ist von besonderem Interesse. Beim Baulos Tunnel Rammersberg wurde mit WU = i. M. 17,6 mm (bei höherer Rohdichte) im Vergleich zum Tunnel Schönrain mit WU = i. M. 21,6 mm die geringste Wassereindringtiefe — geringer als bei Microsilicabetonen (!) und paradoxerweise bei händischer Düsenführung — erreicht.

An beiden Baustellen wurde Beton identer Zusammensetzung aus derselben Mischanlage verarbeitet. Das Beispiel gibt somit einen Hinweis auf die schwer gewichtbaren baustellenspezifischen Einflüsse auf die Spritzbetonqualität abseits rezeptspezifischer Optimierungsversuche.

3.3 Eluationsverhalten von Microsilicaspritzbetonen

3.3.1 Dosierung des Erstarrungsbeschleunigers

Grundsätzlich wurde durch den Microsilicaeinsatz im Hinblick auf die Eluationsneigung des Spritzbetons eine Reduzierung der Flüssig-EB-Dosierung auf $\leq 3\%$ angestrebt. Aufgrund der positiven Erfahrungen beim Tunnel Schönrain schien beim Tunnel Ständelberg eine Reduktion auf 2% Wirkstoffgehalt bezogen auf den Zementanteil machbar, was auch in den Rezepten der Eignungsprüfungen zum Ausdruck kommt (Tab. 1).

Für den Einsatz von microsilicamodifiziertem Spritzbeton nach Rezept Nr. 26 am Tunnel Schönrain zeigt die Auswertung der laufend vor Ort dokumentierten EB-Dosierungen, daß unter Voraussetzung eines störungsfreien Vortriebsablaufs ein EB-Wirkstoffgehalt von ca. 3% , bezogen auf 340 kg/m^3 Zementgehalt, erreicht werden konnte (Abb. 3).

Auf die Gesamtbaustelle Schönrain und auf die gesamte Bauzeit bezogen, lag der EB-Wirkstoffgehalt nach Rückrechnung des Verbrauchs knapp unter 4% .

Beim Einsatz des microsilicamodifizierten Spritzbetons nach Rezept Nr. 191 am Tunnel Ständelberg wurde eine permanente und objektive Aufzeichnung der Dosierung — vergleichbar dem Tunnel Schönrain — nicht durchgeführt bzw. war ausrüstungstechnisch nicht möglich. Die Rückrechnung der mittleren Dosierung aufgrund des EB-Verbrauchs zeigt im Vergleich mit dem microsilicafreien Referenzrezept Nr. 190 folgendes Ergebnis.

Während trotz wesentlich ungünstigerer Vortriebsbedingungen beim Tunnel Schönrain bei Rez. Nr. 26 über weite Strecken Dosierungen von 3% realisiert werden konnten, wurde die angestrebte Reduzierung des EB-Wirkstoffanteils bei Rez. Nr. 191 nicht erreicht.

Dieses unbefriedigende Ergebnis zeigt sich sowohl im teilweise überdurchschnittlich hohen EB-Wirkstoffanteil bei Rez. Nr. 190 mit großteils $> 5\%$, als auch in der relativ geringen Reduktion, die im Vergleich dazu durch die Microsilicazugabe bei Rez. Nr. 191 erzielt werden konnte. Ferner wirkt sich auch der Strossenvortrieb — mit im Normalfall reduziertem EB-Anspruch — beim Tunnel Ständelberg nicht EB-mindernd aus (Vergleich Zeitpunkt 1 und 3).

BE-Anteil

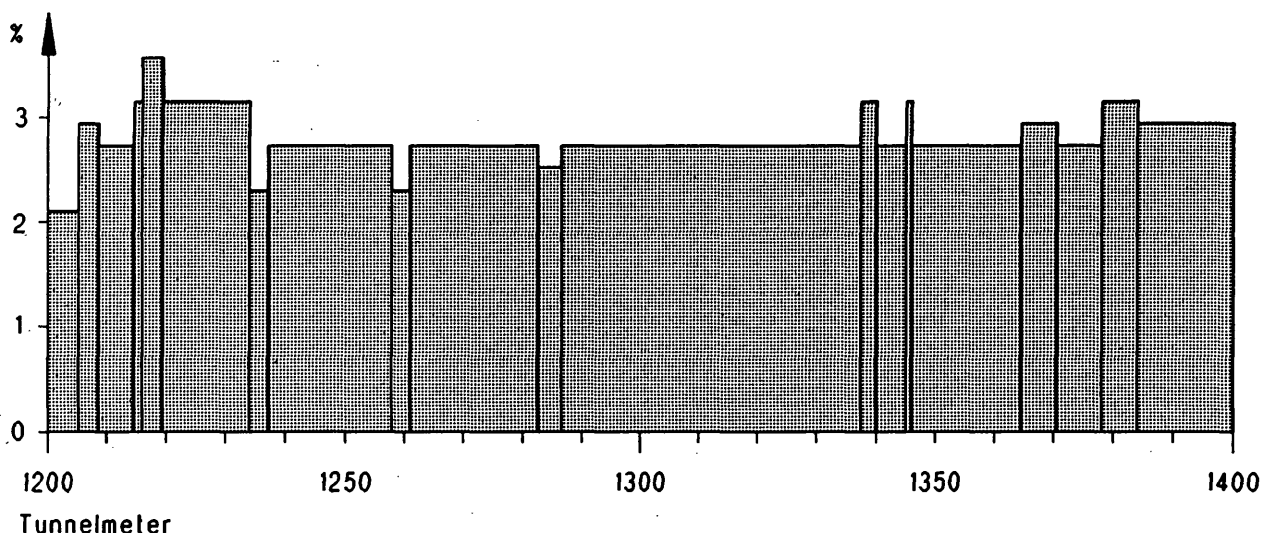


Abb. 3: Microsilicaspritzbeton Tunnel Schönrain — Dosierung des flüssig EB-Mittels im Kalottenvortrieb als Wirkstoffgehalt in % der Zementmenge von 340 kg/m^3 (Ausschnitt Südvortrieb Station Tunnelmeter 1200–1400)

	Zeitpunkt	Vortriebsstand		EB-Wirk.- Anteil
		Kalotte	Strosse	
Rez. Nr. 191 TU Ständelberg	1	22,5 %	0,0 %	3,72 %
	2	72,0 %	19,5 %	3,47 %
	3	100,0 %	100,0 %	3,73 %
Rez. Nr. 190 TU Harrbach	1	5,1 %	0,0 %	5,89 %
	2	63,0 %	0,0 %	5,31 %
	3	100,0 %	100,0 %	3,96 % ¹⁾

1) inkl. Spritzbeton für das Kalottensohlgewölbe mit geringem EB-Anspruch

Tab. 3: Rückgerechneter mittlerer EB-Wirkstoffanteil (%) in Relation zum Stand der Vortriebsarbeiten in % der bergmännischen aufzufahrenden Tunnellänge

Die Hauptursachen für die ungenügende Umsetzung des Microsilicaeinsatzes zur Verringerung der EB-Zugabe am Tunnel Ständelberg sind weniger im hohen EB-Anspruch, sondern vor allem

- * in der mangelhafter Kontrollierbarkeit der Dosierung vor Ort und gegebenenfalls auf die
- * händische Düsenführung — im Gegensatz zum Einsatz von Spritzmanipulatoren bei Rez. Nr. 26 im Tunnel Schönrain — und eventuell auch auf die
- * Verwendung einer baustelleneigenen Kleinmischanlage — im Gegensatz zu einer modernen Mischanlage beim Tunnel Schönrain — zurückzuführen.

Die Erfahrungen zeigen somit, daß die Optimierung der EB-Zugabe — als einen der wesentlichen Parameter zur Verbesserung des Eluationsverhaltens — eine permanente Überprüfbarkeit der tatsächlichen Dosierung vor Ort seitens des Polier- und Aufsichtspersonals erfordert. Beispielsweise durch eine laufende EB-Durchflußmengenmessung und Dokumentation bzw. durch die Verwendung von „Spritzcomputern“, wie dies im Tunnel Schönrain praktiziert wurde.

3.3.2 Ergebnisse der Eluationsversuche an Spritzbetonkernen (Abb. 4)

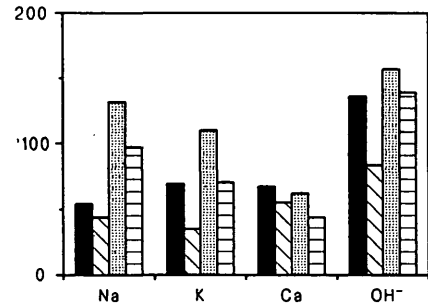
Kerne von microsilicamodifizierten Spritzbetonen und Kerne von microsilicafreien Vergleichsproben wurden aus den Bauwerken entnommen und an der TU München Eluationsversuchen unterzogen. Die Untersuchungsmethodik entsprach derjenigen der eingangs erwähnten Studie (SPRINGENSCHMID, MAIDL & BREITENBÜCHER, 1991) und ist u.a. in (BREITENBÜCHER, 1991) beschrieben.

Die nachfolgend in Tab. 4 und 5 zitierten Analyseergebnisse entstammen den im Auftrag der DB Projektgruppe Nürnberg erstellten Untersuchungsberichten des „Prüfamt für bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München“.

Interpretation Rezept Nr. 26, Tunnel Schönrain (HOZ, Hartgesteinssplitt und Microsilica):

Sowohl im dynamischen Versuch als auch im Stagnationsversuch liegt die Eluation am Bauwerkskern elementspezifisch zwischen 150 % bis 200 % des vorab unter Laborbedingungen ermittelten Eluatgehalts desselben Rezepts.

mg/l Dynamischer Eluationsversuch

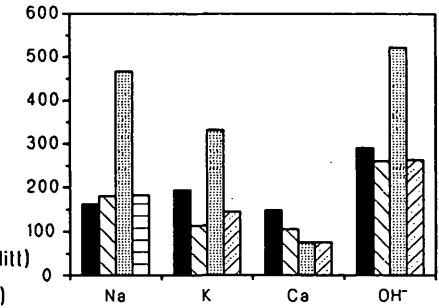


Vergleich verschiedener Microsilicaspritzbetone

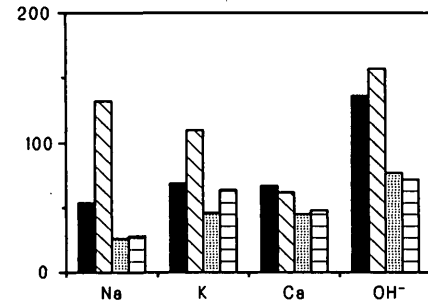
- Tunnel Schönrain Kalotte
- ▨ Tunnel Schönrain Strosse
- ▩ Tunnel Ständelberg Kalotte
- ▧ Tunnel Ständelberg Strosse

Tunnel Schönrain (HOZ+MS+Hartsteinsplitt)
Tunnel Ständelberg (HOZ+MS+Kalksplitt)

mg/l Stagnationsversuch



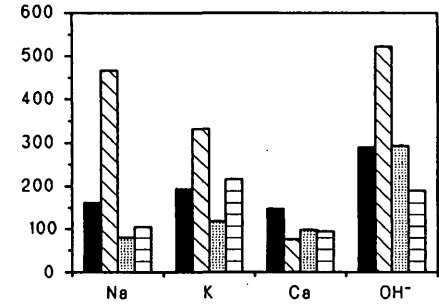
mg/l Dynamischer Eluationsversuch



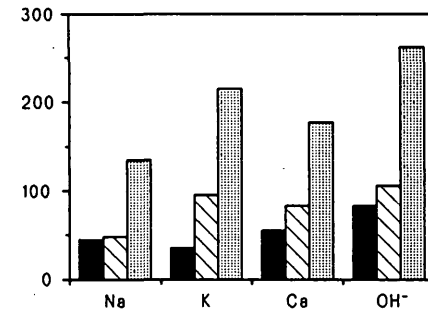
Vergleich Microsilica-spritzbeton Kalotte und Laborspritzbeton

- Tunnel Schönrain Spritzbeton Kalotte
- ▨ Tunnel Ständelberg Spritzbeton Kalotte
- ▩ Tunnel Schönrain Laborspritzbeton
- ▧ Tunnel Ständelberg Laborspritzbeton

mg/l Stagnationsversuch



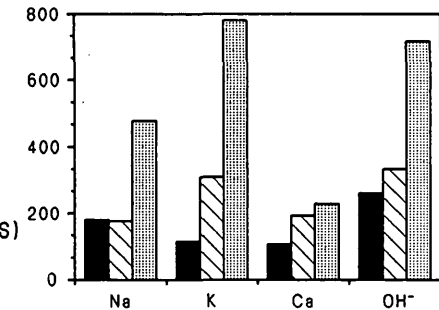
mg/l Dynamischer Eluationsversuch



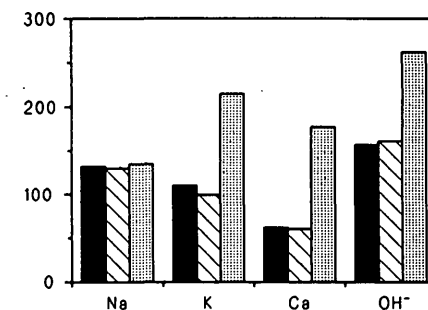
Microsilicaspritzbeton und Referenzrezepte

- Tunnel Schönrain Spritzbeton Strosse (HOZ+MS+Hartsteinsplitt)
- ▨ Tunnel Schönrain Referenzspritzbeton (PZ+Hartsteinsplitt ohne MS)
- ▩ Tunnel Mühlberg Laborspritzbeton

mg/l Stagnationsversuch



mg/l Dynamischer Eluationsversuch



Microsilicaspritzbeton und Referenzrezepte

- Tunnel Ständelberg Spritzbeton Kalotte (HOZ+MS)
- ▨ Tunnel Ständelberg Referenzspritzbeton (HOZ ohne MS)
- ▩ Tunnel Mühlberg Laborspritzbeton

mg/l Stagnationsversuch

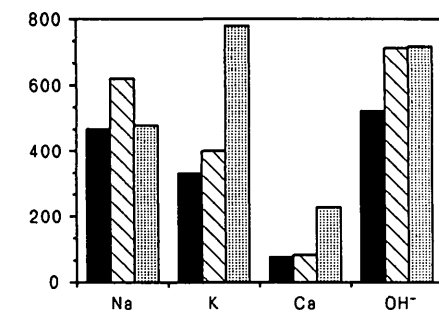


Abb. 4: Ergebnisse der Eluationsversuche

Tunnel Schönrain		Na	K	Ca	OH ⁻
Rez. Nr. 26*	Kalotte (4 Kerne)	54(62)	69(72)	67(81)	136(164)
	Strosse (4 Kerne)	44(48)	35(70)	55(78)	83(101)
Rez. Nr. 22	Strosse (2 Kerne)	48(49)	95(96)	83(91)	106(107)
Laborspritzbeton Rez. Nr. 26		26	46	45	77

Tunnel Ständelberg		Na	K	Ca	OH ⁻
Rez. Nr. 191*	Kalotte (2 Kerne)	132(139)	110(119)	62(75)	157(170)
	Strosse (2 Kerne)	97(104)	70(79)	44(54)	139(157)
Rez. Nr. 190	Kalotte (2 Kerne)	130(141)	99(107)	60(63)	161(174)
Vorversuch Rez. Nr. 191		38	74	67	130
Laborspritzbeton Rez. Nr. 191		28	65	48	72

Tunnel Mühlberg		Na	K	Ca	OH ⁻
Laborspritzbeton TU Mühlberg		135	215	177	262

Tab. 4: Dynamischer Eluationsversuch mit bidestilliertem Wasser, Analysenwerte der Eluate in mg/l, Microsilicaspritzbetone mit *, Maximalwerte in ()

Tunnel Schönrain		Na	K	Ca	OH ⁻
Rez. Nr. 26	Kalotte (4 Kerne)	162(182)	194(203)	148(179)	290(303)
	Strosse (4 Kerne)	180(202)	114(205)	106(117)	260(331)
Rez. Nr. 22	Strosse (2 Kerne)	176(180)	309(315)	192(214)	333(338)
Laborspritzbeton Rez. Nr. 26		80	118	99	194

Tunnel Ständelberg		Na	K	Ca	OH ⁻
Rez. Nr. 191*	Kalotte (2 Kerne)	467(508)	332(356)	76(87)	522(574)
	Strosse (2 Kerne)	182(187)	145(151)	76(84)	263(276)
Rez. Nr. 190	Kalotte (2 Kerne)	620(644)	400(415)	83(85)	712(732)
Vorversuch Rez. Nr. 191		120	228	112	296
Laborspritzbeton Rez. Nr. 191		105	217	95	190

Tunnel Mühlberg		Na	K	Ca	OH ⁻
Laborspritzbeton TU Mühlberg		478	780	228	717

Tab. 5: Stagnationsversuch mit bidestilliertem Wasser, Analysenwerte der Eluate in mg/l, Microsilicaspritzbetone mit *, Maximalwerte in ()

Die Eluation aus Strossenspritzbeton ist EB-dosierungsbedingt geringer (kein Über-Kopf-Spritzen), und beträgt elementspezifisch ca. zwischen 50 % bis 90 % des Kalottenspritzbetons.

Die Ergebnisse des Referenzspritzbetons nach Rezept Nr. 22 (PZ, Hartgesteinssplitt ohne Microsilica) zeigen — typisch für die Verwendung von Portlandzement — im Vergleichsfall „Strosse“ vor allem eine deutliche Erhöhung bis Verdoppelung der Kali- und Calciumeluationen bei Rez. Nr. 22, was mit dem relativ hohen Kaligehalt des eingesetzten Zements und den im Gegensatz zum HOZ erhöhten Anteil an löslichem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ im PZ zu erklären ist.

Interpretation Rez. Nr. 191, Tunnel Ständelberg (HOZ, Kalksplitt und Microsilica):

Mit Ausnahme des Natriumgehalts liegt die Relation zwischen der Eluation aus Kalottenspritzbetonen zu den Ergebnissen von Vorversuchen mit 130 % bis ca. 200 % in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Rez. Nr. 26 Tunnel Schönrain. Die Reduktion des Eluatgehalts im Strossenspritzbeton im Vergleich zum Kalottenspritzbeton liegt ebenfalls in einer ähnlichen Relation.

Grundsätzlich fällt auf, daß im Gegensatz zu den Vorversuchen und ersten Eluationsversuchen am Tunnel Ständelberg in weiterer Folge eine Umkehrung des Kalium:Natrium-Verhältnisses in den Eluatanalysen eintritt, was direkte Rückschlüsse auf die „Produkt Konstanz“, d.h. auf eine mögliche Änderung im Chemismus des verwendeten EB-Mittels, zuläßt.

Ferner fällt auf, daß der absolute Eluationsgehalt von Natrium und Kalium bei Rezept Nr. 191 Tunnel Ständelberg wesentlich über dem des Rezepts Nr. 26 beim Tunnel Schönrain liegt, was ursächlich auf die in Kap. 3.3.1 dargelegte ungünstigere EB-Dosierung und/oder auf eine mögliche Änderung in der Zusammensetzung des verwendeten Flüssig-EB-Mittels zurückzuführen ist.

Dafür spricht auch eine vergleichsweise geringe Differenz zum Eluationspotential des microsilicafreien Referenzrezepts Nr.190 (HOZ, Kalksplitt ohne Microsilica) und die unvergleichlich hohe OH^- -Konzentration im Stagnationsversuch. Diese wird auf die leicht löslichen Alkalihydroxide des EB zurückgeführt und ist auch für die vor Ort festgestellten hohen pH-Werte der Drainagewässer im Einsatzbereich der Rezepte 190 und 191 verantwortlich.

Vergleichende Bewertung

Im Vergleich mit der nachgefahrenen Rezeptur des Spritzbetons aus dem Tunnel Mühlberg (erbaut 1982 bis 1986), in dem nach wie vor ein hoher Unterhaltungsaufwand für die Tunnel-drainagen aufgrund von Ausfällungen besteht, ist die erzielte Optimierung des Eluationsverhaltens vor allem an dem im Tunnel Schönrain eingesetzten Spritzbeton evident.

Durch die optimierte Spritzbetonrezeptur wurde im Spritzbeton der Kalotte des Tunnel Schönrain im Vergleich zum Laborspritzbeton (!) des Tunnel Mühlberg eine Reduktion des Alkalieluats um 40 % bis 60 % im dynamischen Versuch und um 65 % bis 75 % im Stagnationsversuch erzielt. Die Reduktion an Calciumeluat beträgt ca. 60 % im dynamischen Versuch und ca. 35 % im Stagnationsversuch.

Der Vergleich des Eluationsverhaltens zwischen Tunnel Schönrain und Tunnel Ständelberg zeigt aufgrund der relativ schlechteren Ergebnisse am Tunnel Ständelberg, daß Verbesserungen nicht nur auf die Verwendung von Silicazusätzen, Hochofenzement und aufbereiteten bzw. klassierten Sandzuschläge zurückzuführen sind. In hohem Maß wird der Erfolg dieser Maßnahmen durch den technischen Standard in der Spritzbetonherstellung und -verarbeitung, vor allem aber auch durch die Kontrolle der EB-Dosierung und eine konstante Qualität der Spritzbetonkomponenten bestimmt.

4. Hydrochemische Untersuchungen am Tunnel Schönrain

4.1 Hydrogeologische Dokumentation

Neben der konventionellen Dokumentation der Bergwasserverhältnisse im Vortriebsbereich wurde auch die mittel- und langfristige Bergwassersituation an der Außenschale dokumentiert. Dabei zeigte sich, daß sich die tatsächlichen hydrogeologischen Verhältnisse bis zum Einbau der Innenschale mitunter gravierend von denen der Vortriebsphase unterscheiden.

In diesem Zusammenhang wurden an ausgewählten Bergwasserzutritten nach der Primärmessung fortlaufend an der Spritzbetonaußenschale bis zum Einbau der Innenschale Leitfähigkeit und pH-Wert dokumentiert. Bei dieser Vorgehensweise war es möglich, Zusammenhänge zwischen Bergwassersituation, Spritzbetontechnologie, Sinterbildung und Drainagewasserbelastung zu erkennen. Neben den routinemäßigen Primärwasseranalysen im Zuge des Vortriebs wurden zudem Kontrollanalysen an fortbestehenden Zutritten an der Außenschale

sowie von Tunnelabwässern durchgeführt (Nachfolgend angeführte Wasseranalysen wurden von IGI Niedermeyer/Westheim im Auftrag der DB Projektgruppe Nürnberg erstellt).

Bei den Bergwässern handelte es sich hpts. um diskontinuierliche Kluftwassersysteme des Buntsandsteins. Im Grenzbereich Mittlerer/Oberer Buntsandstein, im Oberen Buntsandstein und an der Basis des Muschelkalks traten schwebende Grundwasserhorizonte auf.

Bei den Wässern des Mittleren Buntsandsteins ist bereits beim vorhandenen Datensatz eine Typisierung in „Quellwässer“ (Kluftsysteme mit oberflächennaher Beaufschlagung) und „Tiefbrunnenwässer“ (Bergwasser i.e.S.) im Sinne von QUADFLIEG (1990) möglich.

Quellwässer zeichnen sich bei schwach sauren pH-Werten durch geringe Leitfähigkeitswerte und entsprechend geringe Konzentrationen an Calcium, Magnesium und Hydrogenkarbonationen aus. Es wurde daher festgestellt, daß abschnittsweise eine gute Korrelation zwischen der Überlagerungsmächtigkeit des Tunnels und

Mittlerer Buntsandstein (Tu Schönrain)

	LF μS/cm	pH	Ges.H. dH	Karb.H. dH	HCO ₃	CO ₂	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	NO ₃
max.	470	7,65	6,1	5,2	259	12,1	53,3	23,6	4,8	5,8	36,0	11,0	6,4
min.	155	6,12	3,2	0,7	15	6,8	13,8	3,8	3,2	1,5	5,0	7,0	<1

Oberer Buntsandstein (Tu Schönrain)

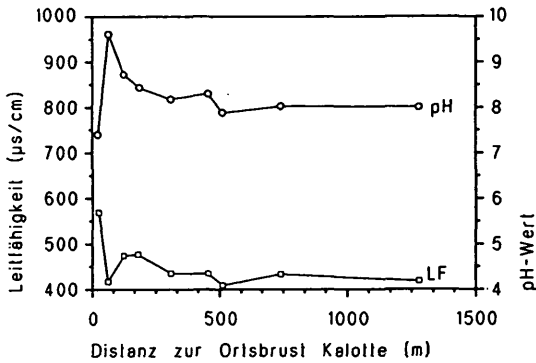
	LF μS/cm	pH	Ges.H. dH	Karb.H. dH	HCO ₃	CO ₂	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	NO ₃
max.	547	7,99	16,7	16,1	357	<1	71,2	29,2	5,9	2,9	15,0	9,0	6,6
min.	385	7,25	11,4	10,7	234		47,6	18,7	3,6	1,4	<2	7,0	1,9

Unterer Muschelkalk – Grenzgelbkalk (Tu Ständelberg)

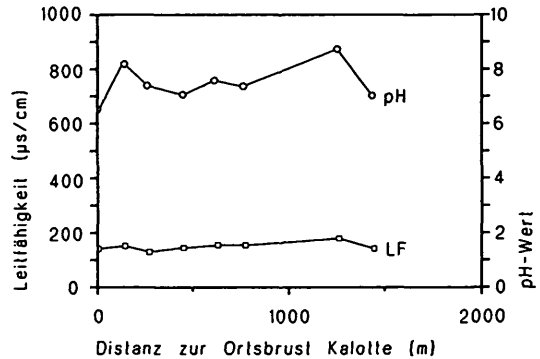
	LF μS/cm	pH	Ges.H. dH	Karb.H. dH	HCO ₃	CO ₂	Ca	Mg	Na	K	SO ₄	Cl	NO ₃
max.	620	7,48	181	167	364	<1	121	19,2	2,2	1,5	31,0	8,0	<1
min.	610	7,37	176	158	345	94	5,3	1,8		0,7	24,0	7,0	

Tab. 6: Bandbreite der Ergebnisse von Bergwasseranalysen bezogen auf die stratigraphische Position des Zutritts (Primärwasseranalysen im Zuge des Vortriebs in mg/l)

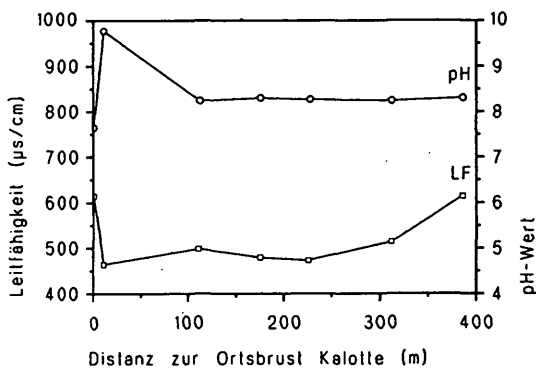
Tunnel Schönrain Südvortrieb Stat.Tm 610
 Rez. Nr. 26 (HOZ+Hartsplitt+Microsilica)



Tunnel Schönrain Westvortrieb Stat.Tm 452
 Rez. Nr. 22 (PZ+Hartsplitt ohne Microsilica)



Tunnel Ständelberg Stat.Tm 163
 Rez. Nr. 191 (HOZ+Kalksplitt+Microsilica)



Tunnel Harrbach Stat.Tm 216
 Rez. Nr. 190 (HOZ+Kalksplitt ohne Microsilica)

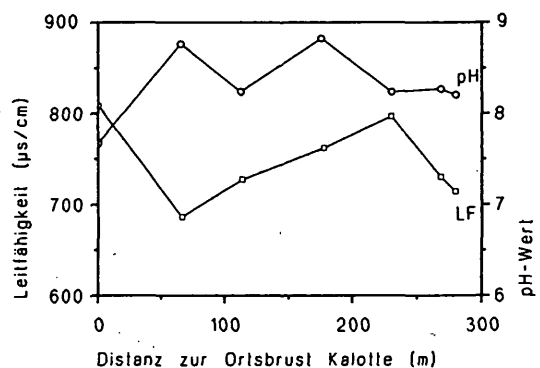


Abb. 5: Bergwässer an der Spritzbetonschale: pH-Wert- und Leitfähigkeitsentwicklung bei fortschreitendem Vortrieb, microsilicamodifizierte und microsilicafreie Trockenspritzbetone im Vergleich

den Härteparametern vorliegt. Kalklösendes CO_2 ist in relativ geringen Konzentrationen in den Wässern des Mittleren Buntsandsteins vorhanden, schwache Betonaggressivität ist nach DIN 4030 bei pH-Werten $< 6,5$ gegeben.

Die Wässer aus dem Oberen Buntsandstein und an der Basis des Muschelkalks weisen eine vergleichsweise hohe Karbonatsättigung auf. Eluate (Calciumhydroxide) aus dem Zementstein bedeuten daher ein hohes Potential für Ausfällungen in den Drainagesystemen.

4.2 Spritzbetoneluation durch Bergwässer an der Spritzbetonaußenschale

Nach dem Auftrag des Spritzbetons kam es zu einem kurzfristigen Anstieg des pH-Werts der durchsickernden Wässer, verbunden mit einer Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 5). Das ist auf die Eluation von leicht mobilisierbaren Hydroxiden und auf die dadurch bedingten höheren OH^- -Konzentrationen zurückzuführen. Gleichzeitig erfolgten erste primäre Ausfällungen von Calciumkarbonat (Bil-

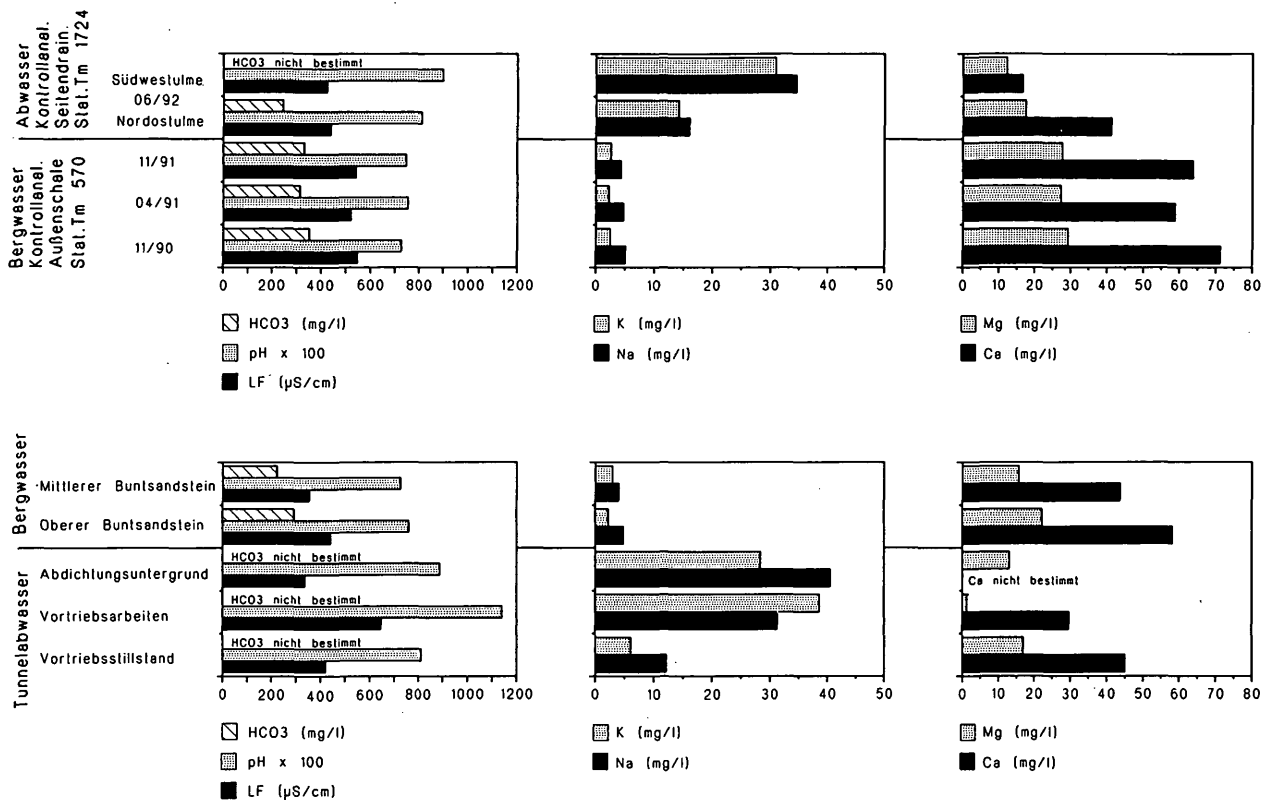


Abb. 6: Analysenwerte von Bergwässern vor und nach deren Kontakt mit Spritzbeton innerhalb eines Jahres und Analysenwerte von Drainagewässern während des nachfolgenden Innenausbaus (oben), Analysenwerte von Tunnelabwässern aus der Vortriebsphase im Vergleich mit gemittelten Werten unbeeinflusster Bergwässer (unten)

derung erster Sinterfahnen am und im Spritzbeton), was die zeitgleich auftretende Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit verursachen dürfte.

Während der weiteren Vortriebsphase traten an Bergwässern, im Kontakt mit der Spritzbetonaußenschale, keine nennenswerten Änderungen der elektrischen Leitfähigkeit, des pH-Werts und des Chemismus auf. Die OH⁻-Mobilisierung nahm offensichtlich ab, es stellten sich bis zum Einbau der Innenschale bei einer Reduktion der pH-Werte auf ca. 7,5 bis ≤8,5 vielfach stationäre Verhältnisse ein.

Bemerkenswert war, daß dabei kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Spritzbetonrezepturen — unabhängig von der Zugabe von Microsilicaslurry — auftraten (Abb. 5).

Daß an der nicht isolierten Außenschale im Beobachtungszeitraum bis zu einem Jahr nach Spritzbetonauftrag generell stationäre hydrochemische Verhältnisse vorlagen, wird durch zahlreiche Kontrollanalysen bestätigt, die im Vergleich mit der Primärwasseranalyse durchwegs einen stationären Erdalkalien- und Alkaliengehalt und stabile pH- und Leitfähigkeitswerte und kaum Differenzen zu natürlichen Bergwässern aufzeigten. (bspw. Tunnel Schönrain Stat. Tm 570, Rez. Nr. 26, in Abb. 6/oben).

Abschließend ist festzustellen, daß durch die Messungen vor Ort und durch die Kontrollanalysen der Bergwässer dokumentiert wird, daß bis zu einem Alter von rund einem Jahr bzw. bis zum Einbau der Innenschale keine nennenswerte Elution der Spritzbetonaußenschale nachgewiesen werden konnte. Als positiver Effekt ist dabei jedoch zu beachten, daß in den anfallenden Berg-

wässern kaum aggressive Kohlensäure aufgetreten ist.

Als entscheidend für dieses Verhalten wird in erster Linie der Einsatz von HOZ angesehen. Einzig bei der abschnittswisen Verwendung von PZ im Tunnel Schönrain wurden mehrfach höhere pH-Werte in großem Abstand zum Spritzbetonauftrag gemessen. Der positive Einfluß des Microsilicazusatzes ist in dieser Phase nicht gewichtbar.

4.3 Hydrochemie von Tunnelabwässern während der Vortriebsarbeiten

Obwohl der Einfluß der Umströmung bzw. Durchsickerung der Spritzbetonaußenschale während der Vortriebsphase auf den Bergwasserchemismus einen nachweislich geringen Einfluß nahm, wiesen die Tunnelabwässer durchwegs sehr hohe pH-Werte bei entsprechenden hydrochemischen Veränderungen auf.

In Abb. 6/unten sind auszugsweise Analyseergebnisse von Tunnelabwässern dargestellt. Die Proben wurden in den Phasen Vortriebsstillstand (nach ca. achtstündiger Unterbrechung), Vortriebsarbeiten (laufender Kalotten- und Strossenvortrieb) und während des Aufbringens des Isolierträgers (Spritzbeton mit definierter Oberflächenqualität) bei abgeschlossenen Vortriebsarbeiten gezogen.

Es zeigen sich deutliche Abhängigkeiten zum Arbeitsablauf an der Baustelle. Bei den Analysen wurde im Einzelfall eine Verzehnfachung des Alkaligehalts bei etwa gleich hohem Gehalt an Erdalkalien und eine Erhöhung des Aluminiumgehalts um > 500 % auf bis zu 3,8 mg/l festgestellt. Überlagert wird die Abwassersituation vom jeweiligen vortriebspezifischen und witterungsbedingten Gesamtwasseranfall im Tunnel, der die entsprechende Verdünnung der Lösungsfracht besorgt.

Der Nachweis von Alkalialuminaten im Abwasser war hpts. auf die im Drainagewasser lösliche Staubemission beim Spritzbetonauftrag

zurückzuführen. Schwach erhöhte Nitratgehalte und Nitritgehalte als Folge des Sprengvortriebes waren nachweisbar. Die hohen pH-Werte des Abwassers wurden außerdem durch Zement- und Mörtelreste in den Drainagegräben, durch das Reinigen von Mörtelpumpen und Gerät im Vortriebsbereich etc. mit verursacht.

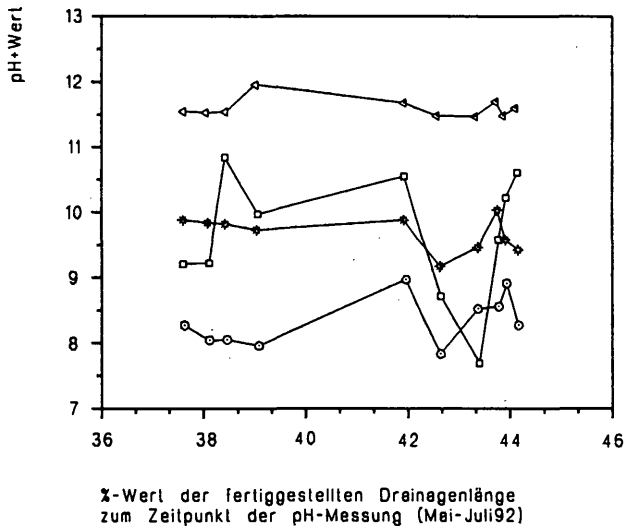
Im Vergleich mit Daten zum Chemismus von Tunnelabwässern aus der Zeit der Tunnelbauarbeiten an der NBS Würzburg-Fulda-Kassel (SCHRAFT, 1988) wurden an der Verbindungskurve Nantenbach in der Vortriebsphase keine Verbesserungen in der Abwassersituation erzielt. Das hat folgende Gründe:

Ein Einfluß der Spritzbetonrezepturen auf die Abwasserproblematik ist in der Vortriebsphase ganz offensichtlich untergeordnet und nicht feststellbar. Entscheidend für eine Verbesserung der Abwasseremissionen in der Vortriebsphase sind letztlich die Qualität der Wasserhaltung, die Minimierung der offenen Verweilzeit des abzuführenden Bergwassers in den Ulmengräben und Pumpensümpfen und die Reduktion der Staubbelastung im Tunnel.

4.4 pH-Werte und Hydrochemie von Tunnelabwässern während der Ortbetonarbeiten (Innenausbau)

Abb. 7 gibt einen Ausschnitt von pH-Messungen am jeweiligen Bauende der Tunneldrainagen unmittelbar vor dem Betonieren der Innenschale im Tunnel Schönrain mit synchronen Vergleichsmessungen des Abwassers des Tunnels Mühlberg.

Im Vergleich mit Bergwässern an der Spritzbetonaußenschale (Abb. 5, 6) fällt auf, daß mit dem Einbau von Abdichtung und Innenschale und einer dadurch verursachten erhöhten Kontaktzeit des Bergwassers mit dem Spritzbeton und einer großflächigeren Benetzung ungünstigere hydrochemische Parameter gegeben sind.



Tunnel Schönrain

- ⊛— Seitendrainage Südwest
- Sohl drainage
- Seitendrainage Nordost
- ◁— Tunnel Mühlberg (zum Vergleich)

Abb. 7: pH-Werte von Drainagewässern aus dem Tunnel Schönrain während des Einbaus der Innenschale — isochrone Referenzwerte des Drainagewassers aus dem Tunnel Mühlberg

Zudem liegt beim Tunnel Schönrain eine ausgeprägte Asymmetrie in der pH-Belastung von $\Delta \text{pH} > 1$ der Seitendrainagen vor. Dieser Unterschied ist in dieser Größenordnung über die gesamte Tunnelstrecke gegeben und ist auf den Einstau des Bauwerkes von Südwest auf knapp 40 % der Tunnellänge zufolge der Hanglage zurückzuführen.

Der pH-Wert der schwächer belasteten Drainage liegt mit i.M. 8,5 etwas über den an der Spritzbetonaußenschale ermittelten Werten, der Alkalienghalt ist ca. vervierfacht (Abb. 6/oben). Die asymmetrische Eluation an der Aussenschale kommt in den Wasseranalysen mit einer weiteren Erhöhung des Alkalienghalts an

der eingestauten Südwestulme (Abb. 6) und in der Erhöhung des pH-Werts auf i.M. 9 bis 10 (Abb. 7) klar zum Ausdruck.

Der Reduktion des Hydrogenkarbonatgehalts entspricht der relativ geringere Gehalt an Calcium und Magnesium im Drainagewasser, vor allem im Wasser der Südwestdrainage (Abb. 6), da bereits Karbonat in der Drainage ausgefallen ist.

Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, daß diese Ergebnisse bei laufendem Innenausbau ermittelt wurden und — vor allem bei der teilweise durch hohe pH - Werte ausgewiesenen Sohl drainage — durch Verschmutzungen aus dem täglichen Baubetrieb verzerrt sind.

4.5 Situation nach Bauende — langfristige Abwasserbelastung

Nach Bauende stellen sich weitestgehend konstante Verhältnisse an den Ulmendrainagen ein. Messungen in Vierteljahresintervallen bestätigen die in der Phase des Innenaubaus erkannten Trends (Abb. 8).

- * Die pH-Werte der Ulmendrainagen sinken auf 8 bis 9 und erreichen damit eine günstige Größenordnung mit einem ΔpH von ca. 1 über dem pH-Wert der natürlichen Wässer liegend.
- * Die elektrische Leitfähigkeit als Gradmesser der Mineralisierung liegt in der Größenordnung von natürlichen Bergwässern.
- * Die Asymmetrie in der Drainagebelastung in Abhängigkeit von den Einstaubedingungen — insbesondere des pH-Werts — bleibt bestehen.
- * Relativ stärkere Versinterungen treten trotz der getroffenen Maßnahmen in der hangseitigen Ulmendrainage auf.
- * Eine Abhängigkeit zwischen Strecken mit relativ stärkerer Versinterung und dem Einsatzbereich von Portlandzement zeichnet sich ab. Die Zunahme der pH-Werte in Richtung Westportal kann u.U. auch damit in Zusammenhang gebracht werden (Abb. 8).

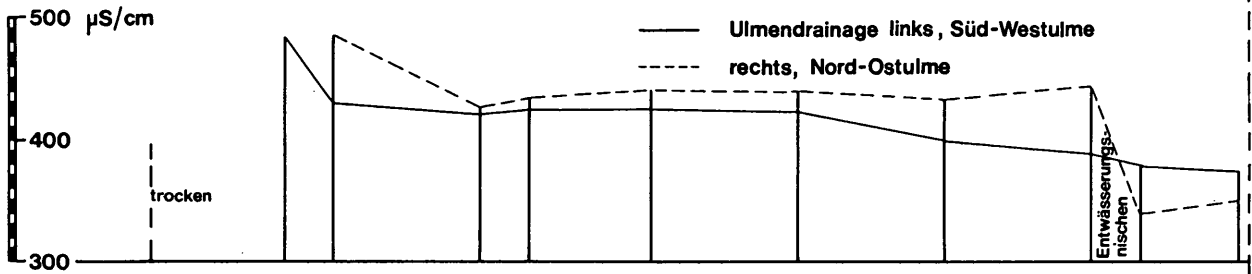
MESSPUNKTE - PUTZSCHÄCHTE

fällt 1,25 % →

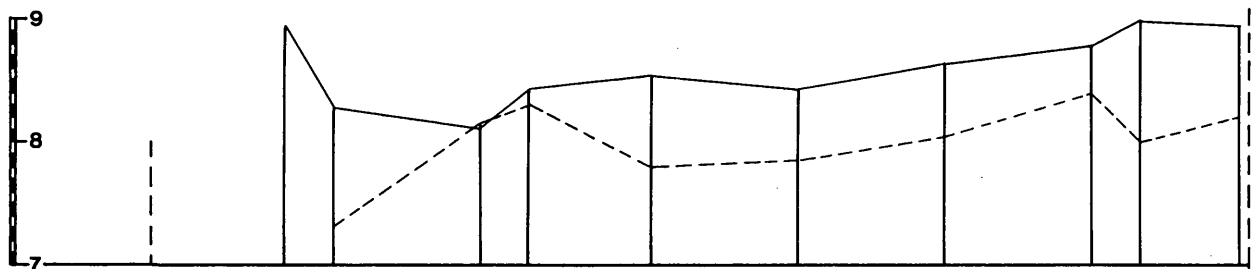
Westportal



LEITFÄHIGKEIT



pH-WERT



SPRITZBETONREZEPTUR

Strosse li.	20	22	26	26z	26	26	22	20
Kalotte	20	26	26	26z	26	26	22	20
Strosse re.	20	26	26	26z	26	26	22	20

mit Microsilica

WASSERERSCHWERNISSE

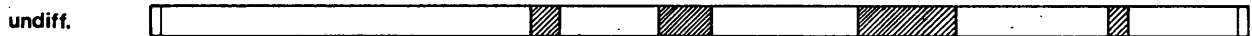


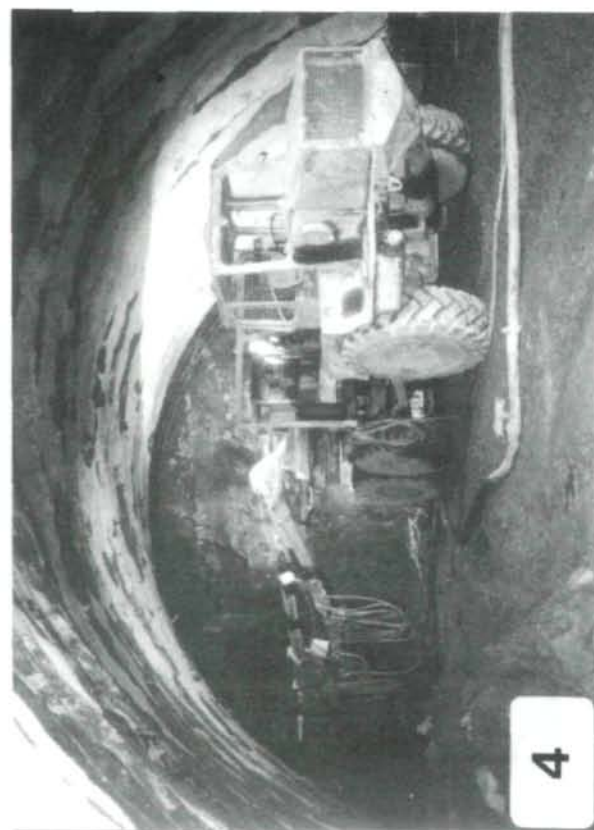
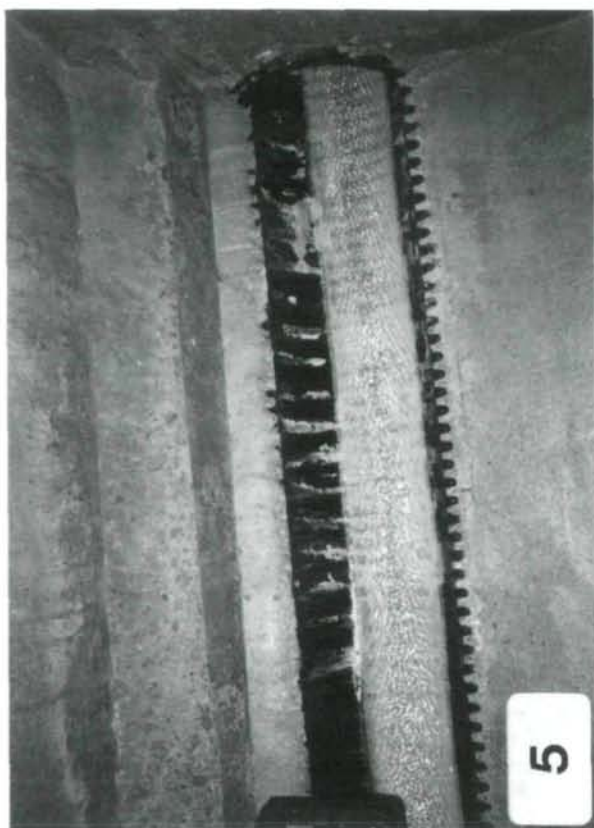
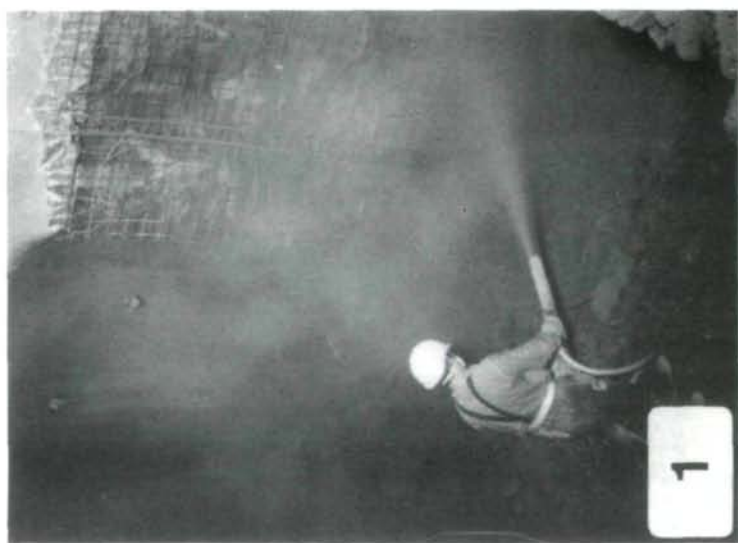
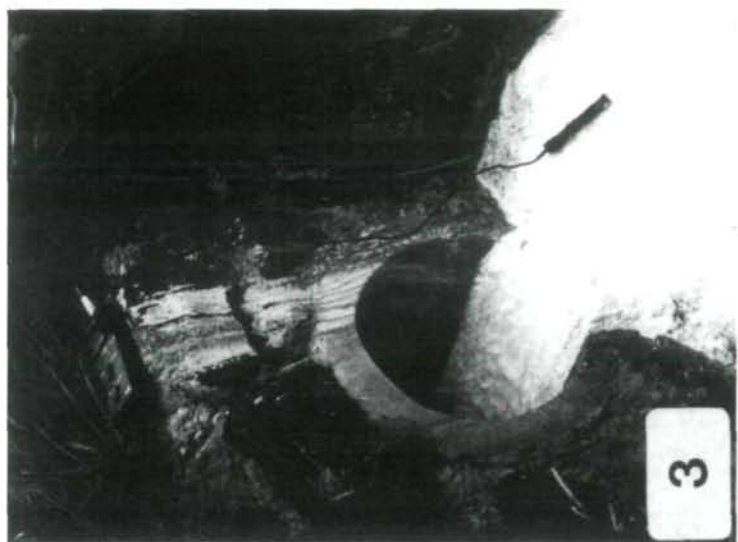
Abb. 8: Tunnellängsprofil von pH-Wert und Leitfähigkeit der Seitendrainagewässer des Tunnels Schönrain nach Abschluß der Bau-
maßnahme (Mai 93)

- Rez. Nr. 20 Hochofenzement + Kalksplitt
- Rez. Nr. 22 Portlandzement + Basaltsplitt
- Rez. Nr. 26 Hochofenzement + Basaltsplitt + Microsilica
- Rez. Nr. 26z Rez.Nr.26 mit erhöhtem Zementgehalt

Die an den Ulmendrainagen nach Fertigstellung ermittelten pH-Werte von < 9 und von < 8,5 am Gesamtdrainagesystem des Bauwerkes Tunnel Schönrain sind ein positives Faktum, das auf die Optimierung des Spritzbetons zurückgeführt werden muß.

Deutlich wird dies beim Vergleich mit den Messungen am Tunnel Mühlberg, wo ca. 7 Jahre nach Fertigstellung noch pH-Werte von 11 bis 12,5 auftreten.

Ob durch die getroffenen Maßnahmen neben der als wesentlich einzustufenden Verbesserung der Abwasserqualität auch eine nennenswerte Reduktion des Reinigungsaufwands für die Tunnel-drainagen eintritt, ist noch abzuwarten. Eine abschließende Bewertung der einzelnen Spritzbetonrezepturen hinsichtlich ihrer Eluations- und Sinterneigung wird im Zuge des weiterlaufenden hydrochemischen Untersuchungsprogrammes vorgenommen.



5. Schlußfolgerungen

Die bisher vorliegenden Ergebnisse zeigen im Vergleich eine deutliche Verbesserung des Eluationsverhaltens durch die an der Verbindungs-kurve Nantenbach entwickelten Spritzbetone.

Dies zeigt sich in den Ergebnissen der Eluationsversuche, den laufenden Wasseranalysen und vor allem in der Reduktion des pH-Werts im Drainagewasser, der mit einer Größenordnung von $< 8,5$ an der Gesamtausleitung zum Main den Kriterien für die Einleitungen in die Vorflut genügt.

Die erheblichen Verbesserungen in der Abwasseremission beim Tunnel Schönrain sind auf folgende Maßnahmen zurückzuführen:

- * Verwendung von Hochofenzement,
- * Verwendung von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern und
- * Sandzuschläge mit definierter Sieblinie und hohem Feinkornanteil und dem
- * Einsatz von Microsilica.

Wesentlich sind nach dem jetzigen Erfahrungsstand der Einsatz von Hochofenzement und flüssigen Erstarrungsbeschleunigern. Der positive Effekt des Microsilicazusatzes ist unstrittig, jedoch an optimale baubetriebliche Randbedingungen geknüpft und daher beim derzeitigen Erfahrungsstand noch schwer zu gewichten. Die Erfahrungen vor Ort und die Ergebnisauswertung haben gezeigt, daß durch Auflagen in der Bauabwicklung kurzfristig weitere Verbesserungen erzielbar sind:

- * strikte Kontrolle der EB-Mittel-Dosierung,
- * Konstanz der Spritzbetonkomponenten, wie bspw. des EB-Mittels,
- * mechanische Düsenführung bspw. mittels Robojets,
- * Reduktion der Staubemissionen, insbesondere beim Spritzbetonauftrag und
- * konsequente Wasserhaltung durch rasches Fassen und Abpumpen des Bergwassers.

Erläuterungen zur Fototafel:

Fig. 1: Tunnel Schönrain - Trockenspritzverfahren in der Stosse, konventioneller Auftrag mit händischer Düsenführung

Fig. 2: Tunnel Schönrain - Sohlausbau, Einkiesen der Sohlängsdrainage mit Hartsteinsplitt

Fig. 3: Tunnel Mühlberg, Sinterbildungen am Austritt der Sammeldrainage, ca. 7 Jahre nach Fertigstellung des Bauwerks

Fig. 4: Tunnel Schönrain - Trockenspritzverfahren in der Kalotte, Einsatz von Spritzmanipulatoren, zweiarmig montiert auf einem Trägerfahrzeug, die Bedienung erfolgt je Lafettenarm von jeweils einem Mann etwa auf halber Höhe seitlich am Trägerfahrzeug mittels Steuerpult

Fig. 5: Tunnel Schönrain — Putzschaft der südwestseitigen Ulmendrainage, Sinterbildungen ca. 1 Jahr nach Einbau der Drainagerohre

Literatur

- BRACHER, G. (1992): Zusatzmittel für die moderne Spritzbetontechnologie. – Tunnel, **6/92**, 302–311, Gütersloh.
- BANDMANN, M. & SCHREYER, J. (1992): Schadstoffe in der Atemluft beim Tunnelbau. – Tiefbau Berufsgenossenschaft, **2/92**, 62–67.
- BREITENBÜCHER, R. (1991): Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Betonzusätze. – Symposiumsband „Microsilica in der modernen Betontechnologie 1991“, 35–51, Allensbach.
- BRUX, G. (1992): Automation und Roboter im Tunnelbau. – Tiefbau Berufsgenossenschaft, **2/92**, 80–86.
- GEBAUER, B. (1990): Die einschalige Spritzbetonbauweise im Stollen- und Verkehrstunnelbau, ein Ergebnis aus praxisorientierter Forschung und Ausführung. – Tagungsband zur 3. Internationalen Fachtagung „Spritzbeton-Technologie“, 41–58, Innsbruck.
- KUSTERLE, W. & LUKAS, W. (1992): Einschalige Spritzbetonbauweise — Einsatz beim U-Bahn-Bau München. – Beton, **3/92**, 135–140.
- MANNS, W. (1990): Microsilica, ein neuer Betonzusatzstoff nach DIN 1045. – Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau, **2/90**, 67–70, Gütersloh.
- POSCHER, G. & JOHN, M. (1993): Betontechnologische und hydrochemische Aspekte des Einsatzes von microsilicamodifizierten Trockenspritzbetonen in den Tunneln der Verbindungskurve Nantenbach. – Tagungsband zur 4. Internationalen Fachtagung „Spritzbeton-Technologie“, 1–15, Innsbruck.
- QUADFLIEG, A. (1990): Zur Geohydrochemie der Kluftgrundwasserleiter des nord- und osthessischen Buntsandsteingebietes und deren Beeinflussung durch saure Depositionen. – Geol. Abh. Hessen, **90**, 1–110, Wiesbaden.
- SCHRAFT, A. (1988): Beeinflussung der Wassergüte durch den Tunnelbau bei der Spritzbetonbauweise. – Geol. Jb. Hessen, **116**, 261–272, Wiesbaden.
- STRAPPLER, G. (1991): Microsilica im Trockenspritzbeton im Großversuch. – Symposiumsband „Microsilica in der modernen Betontechnologie 1991“, 365–376, Allensbach.
- STRAPPLER, G. (1993): Baustellenerfahrung mit Microsilica im Trockenspritzbeton. – Vortrag, gehalten bei der 4. Internationalen Fachtagung „Spritzbeton-Technologie“, Innsbruck-Igls, Jänner 1993.
- SPRINGENSCHMID, R., MAIDL, R. & BREITENBÜCHER, R. (1991): Bericht über das Untersuchungsprogramm zur Minimierung von chemischen Ausfällungen in Tunnelentwässerungen und der Korrosion von Spritzbeton bei Tunneln der Deutschen Bundesbahn (unveröffent. Studie im Auftrag der DB Projektgruppe Nürnberg am Baustoffinstitut der TU München), 54 S., 10 Tab., 23 Abb., München.
- WEHR, H. (1993): Umweltprobleme beim Tunnelvortrieb aus der Sicht der Österreichischen Bundesbahnen. – Vortrag gehalten bei der 4. Internationalen Fachtagung „Spritzbeton-Technologie“, Innsbruck-Igls, Jänner 1993.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Geol. Dr. Ing. Gerhard Poscher, ILF – Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr, Framsweg 16, A-6020 Innsbruck, Austria

eingereicht: 17. Mai 1993

angenommen: 5. August 1993