
Betontechnologische und hydrochemische Aspekte des Einsatzes von microsilicamodifizierten Trockenspritzbetonen in den Tunnels der Verbindungskurve Nantenbach

HYDROCHEMICAL ASPECTS AND CONCRETE TECHNOLOGY IN THE APPLICATION OF DRY SHOTCRETES WITH MICROSILICA IN THE TUNNELS OF THE VERBINDUNGSKURVE NANTENBACH

DIPL.-GEOLOGE DR. GERHARD POSCHER, DIPL.-ING.DR. TECHN. MAX JOHN, ILF, INNSBRUCK

Im Zuge des Baus der Verbindungskurve Nantenbach wurden vier zweigleisige Tunnelröhren mit einem Ausbruchquerschnitt von 110 m² bis 150 m² auf einer Gesamtlänge von ca. 6,3 km nach der NÖT aufgeföhren. Bei der Entwicklung der Spritzbetonrezepturen wurden die aktuellen Erkenntnisse zur Verringerung von Spritzbetonelutionen berücksichtigt. Es wurden verschiedene Trockenspritzbetone mit und ohne Zugabe von Microsilica unter unterschiedlichen Randbedingungen eingesetzt.

Durch die Güte-, Eignungs- und Erhärungsprüfungen wurden die bekannten Trends zu höheren Druckfestigkeiten, zu höheren Elastizitätsmoduli und zu höheren Spaltzugfestigkeiten sowie zu geringeren Wassereindringtiefen bei Zugabe von Microsilicaslurry bestätigt. Es wurde festgestellt, daß bei microsilicamodifiziertem Spritzbeton der E-Modul bereits innerhalb von 3 Tagen > 90 % des 28-Tagen-Wertes erreicht.

Laufende pH- und Leitfähigkeits- sowie Wasseranalysen von Wasserzutritten an der Außenschale erbrachten den Nachweis, daß bis zum Einbau der Innenschale keine signifikante Änderung im Chemismus des Bergwassers aufgrund von Elutionen, mit Ausnahme des Anstiegs der Aluminiumgehalte, eintritt. Dabei ist - unabhängig ob ein Zusatz von Microsilicaslurry erfolgt - bei Verwendung von HOZ und Flüssig-BE kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Rezepten feststellbar. Die pH-Werte des Tunnelabwassers hängen hauptsächlich von der Qualität der Wasserhaltung und der Staubbildung beim Auftrag des Spritzbetons ab.

Nach Abschluß der Vortriebsarbeiten stellen sich an den Ulmendrainagen stationäre hydrochemische Verhältnisse ein. Die festzustellende Erhöhung von Alkaligehalt und pH-Wert der Drainagewässer nach Einbau der Innenschale werden durch den längeren Kontakt der Bergwässer mit dem Spritzbeton hervorgerufen. pH-Wert und Ionenkonzentration lassen eine deutliche Abhängigkeit von den Anströmungsbedingungen des Tunnelbauwerkes erkennen.

Die Meßergebnisse zeigen, daß durch die gesetzten spritzbetontechnologischen Maßnahmen im Vergleich zu dem im gleichen Gebirgsstock liegenden Tunnel Mühlberg der bereits bestehenden NBS Hannover-Würzburg eine deutliche Reduktion des pH-Wertes des Drainagewässers erzielt wurde und eine wesentlich geringere Sinterbildung in den Drainagen erwartet werden kann.

In the course of the Verbindungskurve Nantenbach, four twin track tunnels with a cross-section of 110 m² to 150 m² were excavated over a total length of approx. 6.3 km applying the principles of the NATM. During the development of shotcrete mixtures the state-of-the art know-how reducing shotcrete elutions was taken into account. Different dry shotcrete mixtures with and without microsilica came

into application under various boundary conditions.

By quality and hardening tests, already known tendencies towards greater compressive strengths as well as tendencies towards higher moduli of elasticity and towards increased tensile splitting strengths as well as towards lower penetration depths were confirmed adding microsilica slurry. The tests revealed that within 3 days the modulus of elasticity of shotcrete with microsilica reached approx. > 90 % of the value obtained after 28 days.

Repeated pH- and conductivity- as well as water analyses of water seeping through the primary lining proved that up to the installation of the secondary lining no major change in the chemistry of the groundwater occurs due to eluitions, except for an increase in the aluminum content. It is furthermore to be noted that - independent of the addition of microsilica slurry - with the use of blast-furnace cement and liquid accelerators, no significant difference between the individual mixtures is to be detected. High pH-values found in the drained water during the construction period depend on the efficiency of the water containment and removal as well on the extent of dust development during shotcreting.

After completion of the excavation works steady hydrochemical conditions become apparent in the side wall drainage water. The rise in alkali content and pH-value of the drainage water after installation of the inner lining is caused by the longer contact times of the groundwater at the shotcrete lining. Furthermore, pH-value and ion concentration indicate a clear dependence on water flow conditions around the tunnel structure.

The readings indicate that thanks to the measures of shotcrete technology applied, a remarkable reduction in the pH-value of the tunnel water and an extensive decrease in sinter formation can be expected as compared to the Mühlberg tunnel forming part of the already existing new railway line Hanover - Würzburg which lies in the same mountain massif.

1. Einführung

Bei den bisher ausgeführten NBS-Tunnel erfordert die Versinterung der Tunneldrainageleitungen eine Reinigung mittels Hochdruckspülung durchschnittlich einmal jährlich. Aus diesem Grund wurde bei den Tunneln der Nantenbacher Kurve versucht, durch eine entsprechende Technologie das Eluitionsverhalten des Spritzbetons zu begrenzen. Aufgrund unterschiedlicher Voraussetzungen in den einzelnen Objekten hinsichtlich Gebirgsdurchlässigkeit, Bergwasserstand und Drainagemaßnahmen wurden unterschiedliche Anforderungen an den Spritzbeton gestellt. Zusätzlich wurden die Objekte an verschiedene Unternehmer vergeben, sodaß unterschiedliche Spritzbetonrezepturen zum Einsatz kamen, welche einen Vergleich untereinander sowie mit dem Tunnel Mühlberg der bestehenden NBS-Strecke Hannover - Würzburg erlauben.

2. Spritzbetonrezeptur

Im Vertrag waren folgende Anforderungen an den Spritzbeton festgelegt:

Tunnel Objekt	Zuschläge			BE Mittel
	Größtkorn	Sandfrakt.	Material	
Mühlberg	16 mm	keine Bed.	keine Bed.	keine Bed.
Rammersberg	11 mm	klassierter Sand	keine Bed.	flüssig
Ständelberg	11 mm	klassierter Sand	keine Bed.	flüssig
Harrbach	11 mm	klassierter Sand	keine Bed.	flüssig
Schönrain	11 mm	klassierter Sand	kalkfrei auf Anordnung	flüssig

Anmerkung: Tunnel Ständelberg: mit Microsilica und HOZ

Tab. 1: Anforderungen an den Spritzbeton laut Vertrag

Zusätzlich wurden im Zuge der Bearbeitung der Tunnel der Nantenbacher Kurve Untersuchungen initiiert, um die Ursachen der chemischen Ausfällungen in den Tunnelentwässerungen zu erfassen. Erste Ergebnisse dieser Untersuchungen durch Prof. Springenschmid und der Ingenieurgesellschaft Maidl - Maidl /1/ zeigten, daß mit folgenden Maßnahmen die Ausfällungen minimiert werden können:

Reduktion der BE-Mittel-Dosierung, Verwendung von Hochofenzement, Verwendung von

nicht-kalkhaltigen Zuschlägen und Einsatz von Silicastauben oder Silicasuspensionen bei gleichzeitiger Reduktion des Zementgehaltes.

Aufgrund des positiven Effektes des Microsilicas /1/, wurde entschieden, dessen Wirksamkeit in einem Großversuch beim Vortrieb der Kalotte des Tunnels Schönrain zu ermitteln. Das Engagement des Auftragnehmers /2/, /3/ erlaubt, den Einsatz des Microsilicas über diesen Versuch hinaus fortzuführen und diese auch im Tunnel Ständelberg anzuwenden.

Für die Vortriebe an der Verbindungskurve Nantenbach wurden im wesentlichen 6 verschiedene Spritzbetonrezepturen, 2 davon mit Microsilicazugabe, entwickelt (Tab. 2). Generell wurde das Trockenspritzverfahren eingesetzt. Es liegen zwei Gruppen von Rezepten mit Zementen und Zuschlagstoffen unterschiedlicher Lieferfirmen vor.

Die Zuschlagstoffe setzten sich generell aus aufbereiteten Natursanden 0/2 nach einer 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 bereits zitierten Untersuchung /1/ standen rezeptspezifische Ergebnisse über den Einfluß von verschiedenen Flüssig-BEs auf die Eluationsneigung zur Verfügung. Bei der Rezepterstellung wurde in den Vorversuchen zu den jeweiligen Eignungsprüfungen diesem Umstand Rechnung getragen. Silica wurde aus-

schließlich in Form von Microsilica-Slurry eingesetzt.

3. Mechanische Eigenschaften der unterschiedlichen Rezepturen (siehe Bild. 1)

3.1 Druckfestigkeit (siehe Tab. 3)

Die Frühfestigkeit nach 12 h wird in ihrem absoluten Wert bei einer Reduktion des BE-Wirkstoffanteiles auf rd. 2 % und reduziertem Zementgehalt durch die Zugabe einer Silicasuspension (vgl. Rez. Nr. 190 und 191) wettgemacht. Der relative Wert ist aufgrund der höheren Endfestigkeit bei Zugabe von Silicasuspension erheblich niedriger.

Ein Vergleich der Rezepte Nr. 20 und Nr. 26 hinsichtlich Einfluß des Microsilicas ist nur bedingt möglich, da bei Rez.Nr. 20 Kalksplitt, bei Rez.Nr. 26 Basaltsplitt eingesetzt wurde.

Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen der Eignungs- und Erhärtungsprüfung sind aufgrund der zeitlichen Differenz der beiden Prüfungen auf eine ganze Reihe unterschiedlicher Faktoren zurückzuführen, wie Spritzbetonherstellung in Strosse oder Kalotte, schwankende BE-Dosierungen (bei Beachtung der 28 d-Druckfestigkeit) und jahreszeitlich bedingte Temperaturunterschiede (Rez. Nr. 26). Diese Faktoren schlagen sich auch in der Rohdichte nieder und erlauben daher nur Rückschlüsse auf Tendenzen.

Rezept-Nr.	Zementherst./Werk	Zementart	Zementgehalt	Zuschlagstoff	BE-Mittel	BE-Anteil Wirkstoff	Microsilica	Einsatzbereich
Nr. 20	Heidelberger Lengfurt	HOZ 35 L	360 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	Tricosal T1 UMA-Gunite	3 % 3 %	-	1865 m
Nr. 21	Heidelberger Lengfurt	PZ 35 F	360 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	UMA-Gunite	2 %	-	235 m
Nr. 22	Heidelberger Lengfurt	PZ 35 F	360 kg/m ³	Basaltsplitt Quarzsand	Tricosal T1	4 %	-	570 m
Nr. 26	Heidelberger Lengfurt	HOZ 35 L	340 kg/m ³	Basaltsplitt Quarzsand	Tricosal T1	2,75 %	8 %	2560 m
Nr. 190	Schwenk Karlstadt	HOZ 35 L	340 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	UMA-Gunite	2.1 %	-	487 m
Nr. 191	Schwenk Karlstadt	HOZ 35 L	340 kg/m ³	Kalksplitt Quarzsand	UMA-Gunite	1 %	7 %	578 m

Tab. 2: Spritzbetonrezepturen für die Tunnel der Nantenbacher Kurve

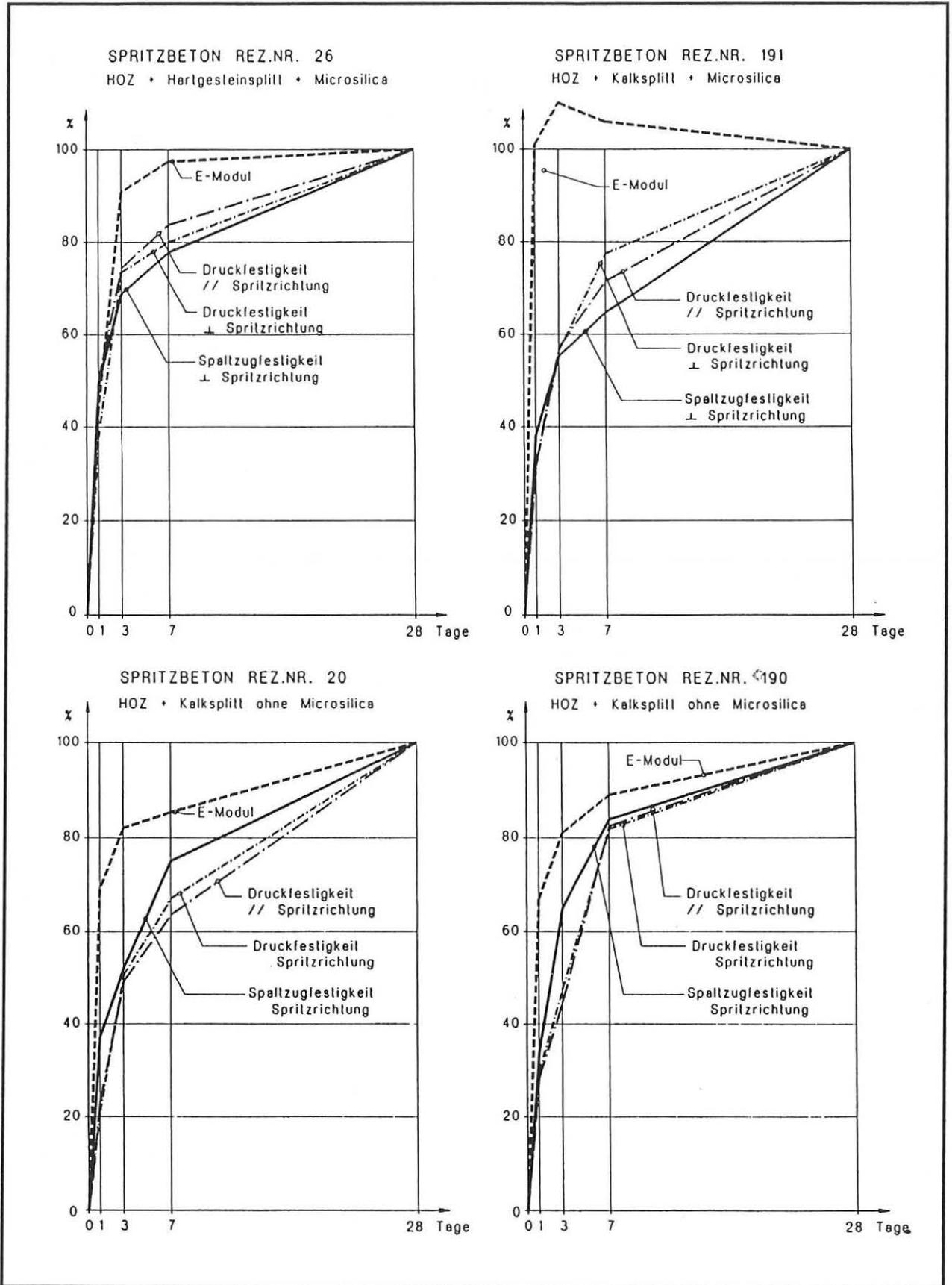


Bild 1: Relativer Vergleich der Festigkeits- und Verformungsentwicklung unterschiedlicher Trockenspritzbetone

Rezept	parallel zur Spritzrichtung					Rohdichte kg/m ³ 28 d	normal zur Spritzrichtung				Rohdichte kg/m ³ 28 d
	MN/m ²						MN/m ²				
	12 h	1 d	3 d	7 d	28 d		1 d	3 d	7 d	28 d	
Nr.20 (1)	5,7	10,8	20,4	26,8	46,6	2316	10,3	24,6	32,5	48,7	2330
(2a)	9,6	11,5	-	26,6	34,7	2267	12,9	-	27,2	35,1	2273
(2b)	10,5	15,0	-	25,4	31,8	2287	15,4	-	24,2	31,0	2300
Nr.21 (2)	7,4	18,2	-	25,0	29,0	2247	21,5	-	25,4	29,2	2256
Nr.22 (2)	12,2	18,3	-	29,4	36,7	n.b.	18,0	-	28,9	36,1	2487
Nr.26 ⁺ (1)	5,2 (?)	21,3	31,9	35,9	42,9	2320	16,9	33,1	36,0	45,0	2324
(2)	11,2	15,4	-	27,6	50,0	2377	16,1	-	29,4	46,4	2370
Nr.190 (1)	5,4	8,2	13,0	24,0	29,1	2244	8,5	13,6	23,4	28,6	2250
(2)	6,2	11,9	-	-	34,9	2297	12,7	-	-	33,2	2307
Nr.191 ⁺ (1)	7,7	14,0	24,9	31,2	43,6	2240	14,9	26,5	36,4	47,0	2240
(2)	5,6	17,5	-	26,2	32,9	2290	18,9	-	27,6	34,2	2287

Anmerkungen:

- o (1) Ergebnisse der Erhärtungsprüfungen Zylinder \varnothing 100/100 mm
- o (2) Ergebnisse der Eignungsprüfungen Zylinder \varnothing 100/100 mm
- o Rezept Nr. 20: (1) und (2a) mit UMA-Gunite Tunnel Rammersberg
(2b) mit Tricosal T1 Tunnel Schönrain
- + Rezept mit Microsilica

Tab. 3: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung

Die 1 d-Druckfestigkeit der Microsilicaspritzbetone liegt sowohl in absoluten Werten wie auch relativ mit 30 % bis 50 % der 28 d-Druckfestigkeit über den Werten der Vergleichsrezepte. Im Zeitraum zwischen 12 h und 3 d tritt ein deutlich steilerer Festigkeitsanstieg der Microsilicaspritzbetone im Vergleich zu den Referenzrezepten ein. Auch bei Verwendung von Hochofenzement und einer Verminderung des BE-Wirkstoffanteils wird die lt. Vertrag geforderte 1 d-Druckfestigkeit von 8 MN/m² erreicht.

Der bekannte Trend zu höheren Druckfestigkeiten der microsilicamodifizierten Spritzbetone wird durch die vorliegenden 28 d-Werte bestätigt, wobei die relativ hohen Werte beim Rezept Nr. 26 in der Kombination von Hartgesteinssplitt und Microsilica begründet sind.

Hervorstechend ist die hohe 28 d-Druckfestig-

keit des Rezeptes Nr. 20 (1) im Tunnel Rammersberg bei Verwendung von UMA-Gunite, die überraschenderweise jene des Rezeptes Nr. 26 mit Basaltsplitt und Microsilica übersteigt.

3.2 Elastizitätsmodul und Spaltzugfestigkeit (siehe Tab. 4)

Entgegen den Erwartungen wurden auch die höchsten 28 d-E-Moduli (28 d) bei Rez.Nr. 20 mit HOZ und Kalksplitt mit > 34.000 MN/m² ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, daß mit diesen Prüfkörpern durchwegs sehr hohe Rohdichten von 2300 kg/m³ erzielt wurden. Beim Einsatz dieses Rezeptes an der Baustelle Tunnel Rammersberg, an der die Erhärtungsprüfung gefahren wurde, wurde auch festgestellt, daß die Güteprüfungen geringere Wassereindringtiefen

Rezept	Elastizitätsmodul MN/m ²				Rohdichte kg/m ³				Spaltzugfestigkeit MN/m ²			
	1 d	3 d	7 d	28 d	1 d	3 d	7 d	28 d	1 d	3 d	7 d	28 d
Nr. 20	23880	28440	29590	34660	2300	2330	2320	2300	1,9	2,7	3,9	5,2
Nr. 26 ⁺	24000	29000	31070	31870	nicht bestimmt				2,2	3,1	3,5	4,5
Nr. 190	12735	15470	16990	19100	2260	2260	2210	2250	1,0	1,7	2,6	3,1
Nr. 191 ⁺	24335	26370	25480	24070	2280	2280	2280	2240	2,0	2,9	3,4	5,2

Anmerkung: + Rezept mit Microsilica

Tab. 4: Ergebnisse des Elastizitätsmoduls und der Spaltzugfestigkeit

als bei den Microsilicaspritzbetonen ergaben (Tab. 5). Da Vergleichsdaten über den Einsatz dieses Rezeptes am Tunnel Schönrain vorliegen und Unterschiede in der Rezeptur zwischen beiden Baustellen nur den verwendeten Flüssig-BE betreffen, sind die Gründe für dieses dichte Gefüge vermutlich in der Auftragstechnik oder im BE-Mittel zu suchen.

Bei den Microsilicaspritzbetonen wurden übereinstimmend 1d-E-Moduli von ca. 24.000 MN/m² ermittelt. Bei Kombination von HOZ, Hartgesteinssplitt und Microsilica (Rez.Nr. 26) erreicht der E-Modul nach 7 Tagen rd. 31.000 MN/m², nimmt danach aber kaum noch zu. Es fällt auf, daß die E-Moduli der Microsilicaspritzbetone in den ersten 3 Tagen auf > 90 % des 28 d - Wertes ansteigen. Beim Rezept 191 wurde sogar eine Abnahme des E-Moduls nach 3 Tagen festgestellt.

Der E-Modul der Spritzbetone ohne Microsilica steigt deutlich langsamer an, d.h. daß diese nachgiebiger sind. Interessant wäre daher eine Untersuchung des Kriechverhaltens von Spritzbetonen mit und ohne Microsilica.

Die vergleichsweise geringe Nachgiebigkeit des Microsilicaspritzbetons führte beim Tunnel Schönrain, in dem bereichsweise hohe Verformungen aufgetreten sind, zu einer hohen Rißdichte im Spritzbeton.

Bei Ausklammern der Ergebnisse des Rez. Nr. 20, aus den bereits angeführten Gründen, führt die Zugabe von Microsilica zu höheren Spaltzugfestigkeiten. Mit Microsilica steigt die Zugfestigkeit weniger rasch an als die Druckfestigkeit, d.h. daß die Sprödigkeit zwischen 3 d und 28 d

relativ niedriger ist als ohne Microsilica.

3.3 Ergebnisse der Güteprüfungen (Tab. 5)

Die 1 d - Druckfestigkeitswerte von microsilicamodifizierten Spritzbetonen liegen im Schnitt mit 10,2 MN/m² bei Rez.Nr. 191 und 13,8 MN/m² bei Rez.Nr. 26 knapp über den Werten der vergleichbaren Rezepturen ohne Microsilica.

Höhere 1 d - Druckfestigkeiten des Microsilicabetons, wie sie im Vergleich von Rez.Nr. 191 und 190 und Rez.Nr. 26 und 20 in der Eignungs- und Erhärtungsprüfung festgestellt wurden, werden vermutlich aufgrund der schwankenden BE-Dosierungen im Vortrieb nahezu ausgeglichen.

Die 28 d - Druckfestigkeitswerte der Güteprüfungen geben die bei den Eignungsprüfungen festgestellten Trends wieder.

Das Mittel von Rez.Nr. 191 zeigt für silicamodifizierten Spritzbeton mit Kalksplittzuschlag bei einer um 16 kg/m³ erhöhten Rohdichte gegenüber dem Vergleichsrezept Nr. 190 eine um 2,4 MN/m² erhöhte 28 d - Druckfestigkeit.

Die Wasserundurchlässigkeit nach 28 d ist bei den Microsilicaspritzbetonen mit 17,9 mm (Rez. 26) und 18,7 (Rez. 191) im allgemeinen gegenüber den Rezepten ohne Microsilica verbessert.

Eine Ausnahme bildet wieder Rez. Nr. 20 beim Tunnel Rammersberg, bei dem mit 17,6 mm die geringste Wassereindringtiefe festgestellt wurde.

Rezept	Druckfestigkeit (MN/m ²)					WU (mm)			Rohdichte (kg/m ³)			Spritzverf.
	1 d		28 d			28 d ± 4 d			28 d			
	ø	s	ø	s	n	ø	s	n	ø	s	n	
Nr. 20 (1)	10,6	1,2	29,5	1,6	18	17,6	4,4	7	2287	29,3	17	Handführung
(2)	12,3	1,3	28,1	2,8	13	21,6	6,8	12	2276	55,9	13	Robojet
Nr. 21	12,0	1,9	26,3	1,2	5	23,8	10,2	3	2236	47,4	5	Handführung
Nr. 22	18,5	2,2	29,7	2,6	9	22,2	4,2	9	2390	78,0	3	Robojet
Nr. 26 ⁺	13,8	3,6	37,3	6,4	22	17,9	5,5	22	2352	60,8	23	Robojet
Nr. 190	10,1	1,2	29,3	2,6	15	21,5	6,8	7	2270	30,7	15	Handführung
Nr. 191 ⁺	10,2	0,9	31,7	2,1	15	18,7	3,9	8	2286	43,0	15	Handführung

Bezeichnungen: (1) mit UMA-Gunite Tunnel Rammersberg
 (2) mit Tricosal T1 Tunnel Schönrain
 ø Mittelwert
 s Standardabweichung
 n Anzahl der Prüfserien
 + Rezept mit Microsilica

Tab. 5: Ergebnisse der Güteprüfung

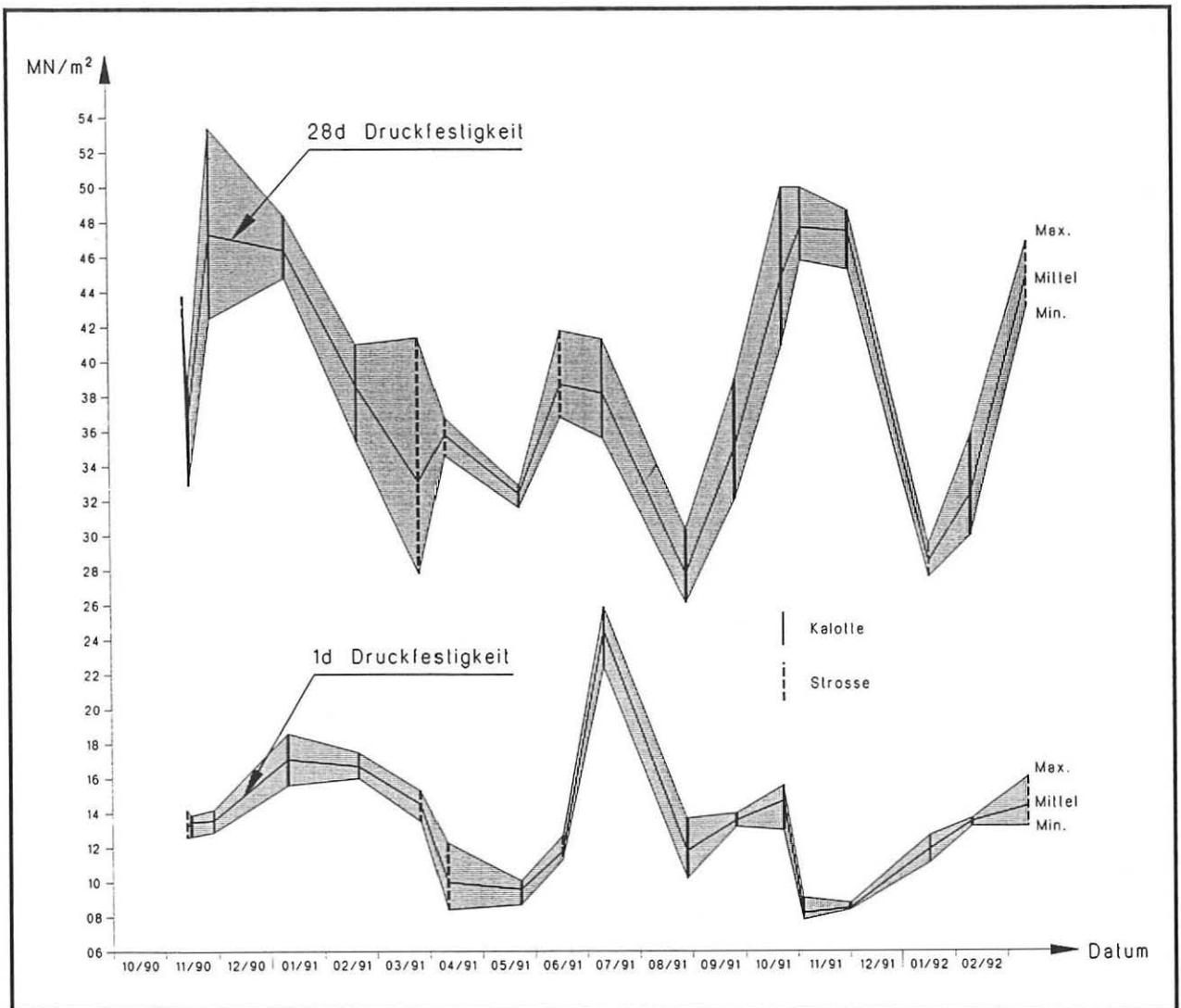


Bild 2: Druckfestigkeiten bei der Güteprüfung des Spritzbetonrezeptes Nr. 26 Tunnel Schönrain

Ein Ergebnisvergleich zwischen Rez.Nr. 190 und 191 zeigt bei nahezu synchronem Einsatz der Rezepte und gleicher Prüfserienhäufigkeit eine geringere Standardabweichung bei Einsatz von Microsilica. Die relativ hohe Standardabweichung der Druckfestigkeitswerte bei Microsilicaspritzbeton nach Rez.Nr. 26 ist aus Bild 2 ersichtlich. Die Streuung ist auf Schwankungen des Wirkstoffanteiles im BE-Mittel, auf Wassererschwernisse im Vortrieb und den damit verbundenen Problemen in der Dosierung und vor allem auf die lange Einsatzdauer des Rezepts und die dadurch bedingten jahreszeitlichen Schwankungen zurückzuführen.

4. Eluationsverhalten von Microsilicaspritzbetonen

4.1 BE - Dosierung (siehe Tab. 6)

Im Tunnel Schönrain wurde beim Microsilica-

einsatz im Hinblick auf die Elutionsneigung des Spritzbetons eine Reduktion des BE-Mittels (Wirkstoffgehalt) auf $\leq 3\%$ angestrebt. Aufgrund der positiven Erfahrungen schien beim Tunnel Ständelberg ein BE-Mittel-Anteil von $\leq 2\%$ erreichbar (siehe Tab. 2).

Für den Einsatz von microsilicamodifiziertem Spritzbeton nach Rezept Nr. 26 am Tunnel Schönrain zeigt die Auswertung der laufend dokumentierten BE-Dosierungen, daß unter Voraussetzung eines störungsfreien Vortriebsablaufes ein BE-Wirkstoffgehalt bezogen auf 340 kg/m^3 Zementgehalt von $\leq 3\%$ tatsächlich erreicht werden kann (Bild 3).

Beim Einsatz des microsilicamodifizierten Spritzbetons nach Rezept Nr. 191 am Tunnel Ständelberg konnte eine permanente und objektive Aufzeichnung der Dosierung aus Gründen der Ausrüstungstechnik nicht durchgeführt wer-

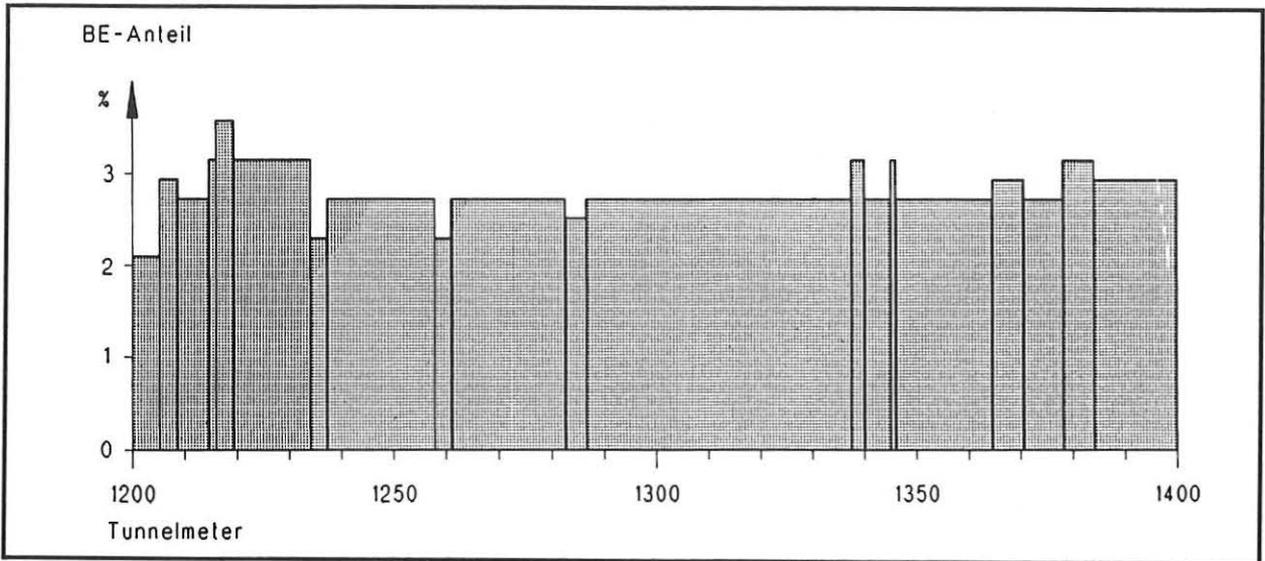


Bild 3: Dosierung des BE-Mittels beim Kalottenbetrieb, Tunnel Schönrain

den. Die Rückrechnung der mittleren Dosierung aufgrund des BE-Verbrauches zeigt im Vergleich mit dem microsilicafreien Rezept Nr. 190 das in Tab. 6 dargestellte Ergebnis.

	Zeitpunkt	Vortriebsstand		BE-Wirkanteil
		Kalotte	Strosse	
Rez.Nr. 191 ⁺	1	22,5 %	0,0 %	3,72 %
TU Ständelberg	2	72,0 %	19,5 %	3,47 %
(mit Microsilica)	3	100,0 %	100,0 %	3,73 %
Rez.Nr. 190	1	5,1 %	0,0 %	5,89 %
TU Harrbach	2	63,0 %	0,0 %	5,31 %
(ohne Microsilica)	3	100,0 %	100,0 %	3,96 %

Tab. 6: Rückrechnung des BE-Mittel-Anteiles in Prozent

Die Reduzierung des BE-Wirkstoffanteiles auf 2 % des Zementgehaltes wurde mit Rez.Nr. 191 nicht erreicht. Die nicht optimalen Ergebnisse spiegeln sich auch im überdurchschnittlich hohen BE-Wirkstoffanteil bei Rez.Nr. 190 wieder.

Die Hauptursachen für die ungenügende Umsetzung des Microsilicaeinsatzes zur Verringerung der BE-Zugabe sind weniger im hohen BE-Anspruch, sondern vor allem in der mangelhaften Kontrollierbarkeit der BE-Dosierung am Tunnel Ständelberg und möglicherweise auch auf die händische Düsenführung - im Gegensatz zum Einsatz von Spritzmanipulatoren bei Rez. Nr. 26 im Tunnel Schönrain - zu suchen.

Die baubetrieblichen Erfahrungen zeigen, daß die Optimierung der BE-Zugabe eine permanente Überprüfung der tatsächlichen Dosierung vor Ort erfordert, beispielsweise mit einer laufenden

BE-Durchflußmengenmessung oder durch die Verwendung von "Spritzcomputern", wie dies im Tunnel Schönrain gegeben war.

4.2 Ergebnisse der Eluationsversuche (Bild 4)

Kerne von microsilicamodifizierten Spritzbetonen und Kerne von microsilicafreien Vergleichsproben wurden aus den Bauwerken entnommen und an der TU München Elutionsversuchen unterzogen. Die Untersuchungsmethodik entsprach derjenigen der erwähnten Untersuchung /1/ und ist in /4/ beschrieben. Die nachfolgend in Tabelle 7 und 8 zitierten Analyseergebnisse entstammen den im Auftrag der DB Projektgruppe Nürnberg erstellten Untersuchungsberichten des "Prüfamt für bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der TU München".

Tunnel Schönrain	Na	K	Ca	OH ⁻
Rez.Nr. 26 ⁺ Kalotte (4 Kerne)	54	69	67	136
Strosse (4 Kerne)	44	35	55	83
Rez.Nr. 22 Strosse (2 Kerne)	48	95	83	106
Laborspritzbeton Rez.Nr. 26 ⁺	26	46	45	77
Tunnel Ständelberg				
Rez.Nr. 191 ⁺ Kalotte (2 Kerne)	132	110	62	157
Strosse (2 Kerne)	97	70	44	139
Rez.Nr. 190 Strosse (2 Kerne)	130	99	60	161
Vorversuch Rez.Nr. 191 ⁺	38	74	67	130
Laborspritzbeton Rez.Nr. 191 ⁺	28	65	48	72
Tunnel Mühlberg				
Laborspritzbeton TU Mühlberg	135	215	177	262

Tab. 7: Ergebnisse der dynamischen Elutionsversuche mit bidesilliertem Wasser in mg/l

Tunnel Schönrain		Na	K	Ca	OH ⁻
Rez.Nr. 26 ⁺	Kalotte (4 Kerne)	162	194	148	290
	Strosse (4 Kerne)	180	114	106	260
Rez.Nr. 22	Strosse (2 Kerne)	176	309	192	333
Laborspritzbeton Rez.Nr. 26 ⁺		80	118	99	194
Tunnel Ständelberg					
Rez.Nr. 191 ⁺	Kalotte (2 Kerne)	467	332	76	522
	Strosse (2 Kerne)	182	145	76	263
Rez.Nr. 190	Strosse (2 Kerne)	620	400	83	712
Vorversuch Rez.Nr. 191 ⁺		120	228	112	296
Laborspritzbeton Rez.Nr. 191 ⁺		105	217	95	190
Tunnel Mühlberg					
Laborspritzbeton TU Mühlberg		478	780	228	717

Tab. 8: Stagnationsversuch mit bidestilliertem Wasser

Interpretation Rez.Nr. 26 (HOZ, Hartgesteinsplitt und MS):

Sowohl im dynamischen Versuch als auch im Stagnationsversuch liegt die Elution am Bauwerkskern elementspezifisch zwischen 150 % bis 200 % des an der Labormischung ermittelten Eluatgehalts.

Die Elution aus Strossenspritzbeton ist BE-dosierungsbedingt geringer und beträgt elementspezifisch ca. zwischen 50 % bis 90 % des Kalottenspritzbetons. Die Ergebnisse des Referenzspritzbetons nach Rezept Nr. 22 mit Portlandzement und ohne Microsilica zeigen beim Vergleich "Strosse" vor allem eine deutliche Erhöhung bis Verdoppelung der Kali- und Calciumelutionen, was mit dem relativ hohen Kaligehalt des Portlandzements und mit dem erhöhten Anteil an löslichem Ca(OH)₂ im Vergleich zum HOZ zu erklären ist.

Interpretation Rez.Nr. 191 (HOZ, Kalksplitt und MS):

Mit Ausnahme des Natriumgehalts liegt die Relation zwischen Elution 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 Eluatgehaltes im Strossenspritzbeton im Vergleich zum Kalottenspritzbeton liegt ebenfalls in einer ähnlichen Relation.

Grundsätzlich fällt auf, daß im Gegensatz zu den Vorversuchen und ersten Elutionsversuchen in weiterer Folge am Tunnel Ständelberg eine Umkehrung des Kalium:Natrium-Verhältnisses in den Elutionsanalysen eintritt, was direkte Rückschlüsse auf mögliche Änderungen im Chemismus des BE zuläßt. Ferner fällt auf, daß der absolute Eluatgehalt 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. 4.1 dargelegte ungünstige BE-Dosierung oder auf eine mögliche Änderung in der Zusammensetzung des verwendeten Flüssig-BE-Mittels zurückzuführen ist. Dafür spricht auch eine vergleichsweise geringe Differenz zum Elutionspotential des microsilicafreien Referenzrezepts Nr. 190 (HOZ, Kalksplitt ohne MS) und die unvergleichlich hohe OH⁻-Konzentration im Stagnationsversuch. Diese ist auf die leicht löslichen Alkalihydroxide des BE zurückzuführen und ist auch für die hohen pH-Werte im Einsatzbereich der Rezepte 190 und 191 verantwortlich.

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 eine eindeutige Verbesserung des Elutionsverhaltens durch den im Tunnel Schönrain eingesetzten Microsilicaspritzbeton erzielt worden.

Durch die optimierte Spritzbetonrezeptur wird im Spritzbeton der Kalotte des Tunnel Schönrain im Vergleich zum Laborspritzbeton Tunnel Mühlberg eine Reduktion um 40 % bis 60 % des Alkalieluats lt. den Ergebnissen des dynamischen Versuchs und um 65 % bis 75 % lt. den Ergebnissen des Stagnationsversuchs erzielt. Die Reduktion an Calciumeluat beträgt ca. 60 % im dynamischen Versuch und ca. 35 % im Stagnationsversuch.

Der Vergleich des Elutionsverhaltens von Tunnel Schönrain und Tunnel Ständelberg zeigt, daß Verbesserungen nicht nur auf die Verwendung von Silicazusätzen, Hochofenzement, klassierte Sandzuschläge zurückzuführen sind. In hohem Maß wird der Erfolg dieser Maßnahmen durch den technischen Standard in der Spritzbetonherstellung und -verarbeitung, insbesondere die Kontrolle der BE-Dosierung sowie eine konstante Qualität der Spritzbetonkomponenten, bestimmt.

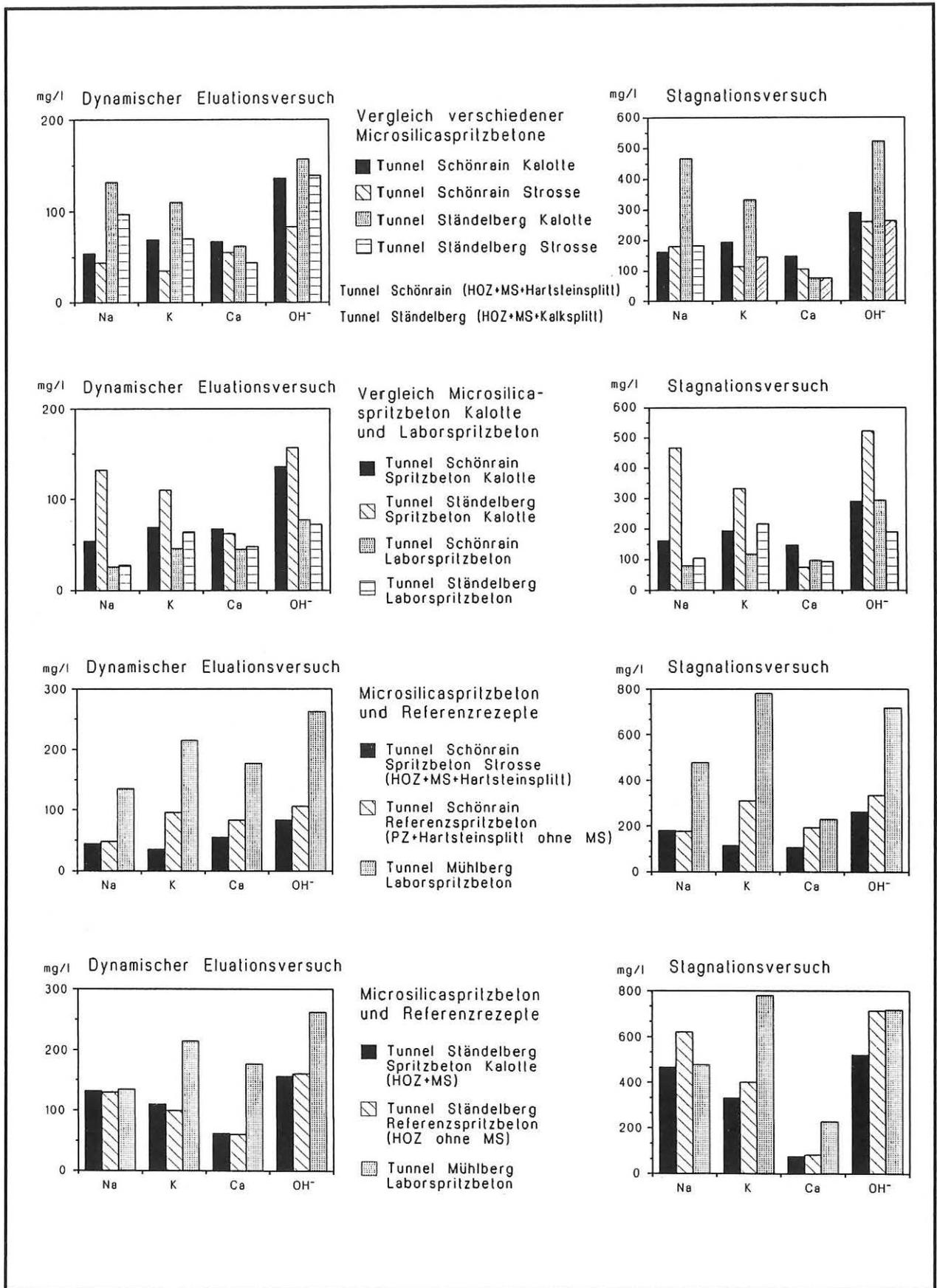
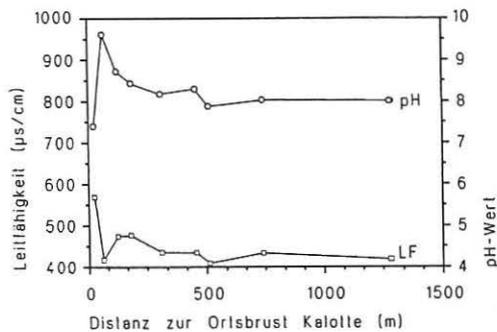
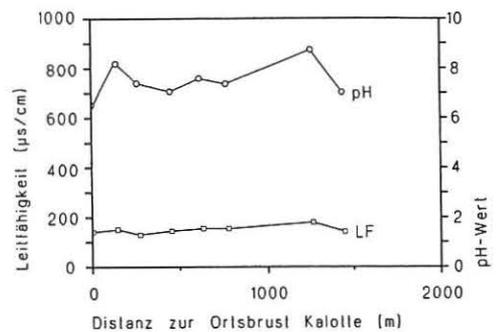


Bild 4: Vergleich der Eluatiionsversuche unterschiedlicher Trockenspritzbetone

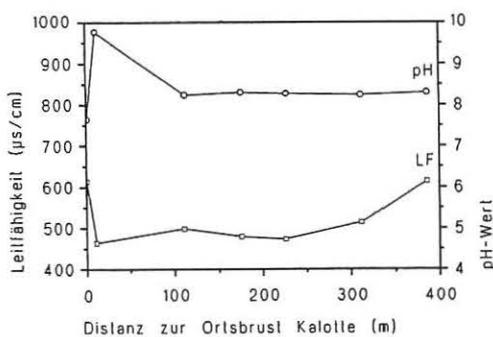
Tunnel Schönrain Südvortrieb Stat.Tm 610
Rez. Nr. 26 (HOZ+Hartsplitt+Microsilica)



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)

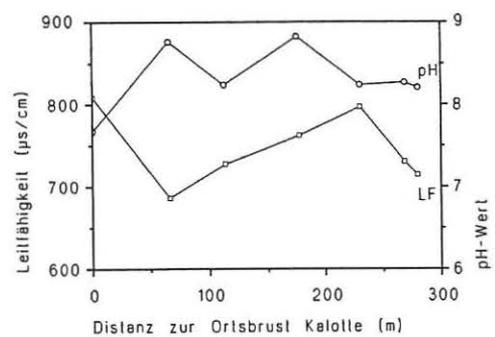


Bild 5: Vergleich der Bergwasserzutritte aus Trockenspritzbetonen mit und ohne Microsilica in der Vortriebsphase

5. Hydrochemische Untersuchungen

Von den Bergwässern in den Tunneln der Nantenbacher Kurve wurden nach der Primärmessung fortlaufend vor Ort an der Spritzbetonaußenschale bis zum Einbau der Innenschale deren Leitfähigkeit und pH-Wert dokumentiert. Neben den routinemäßigen Primärwasseranalysen im Zuge des Vortriebs wurden ferner Kontrollanalysen an fortbestehenden Zutritten an der Außenschale sowie von Tunnelabwässern durchgeführt. Nachfolgend angeführte Wasseranalysen wurden von IGI Niedermeyer im Auftrag der DB erstellt.

5.1 Spritzbetonelution durch Bergwässer an der Spritzbetonaußenschale

Während der Vortriebsphase treten an Berg-

wässern, die in Kontakt mit der Spritzbetonaußenschale stehen, mit Ausnahme der Phase unmittelbar nach Spritzbetonauftrag, keine nennenswerten Änderungen auf. Bemerkenswert ist, daß dabei kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Spritzbetonrezepturen - unabhängig von der Zugabe von Microsilica - auftreten (Bild 5).

Nach dem Auftrag des Spritzbetons kommt es vielfach zu einem Anstieg des pH-Werts, verbunden mit einer Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit der Wässer. Dies wird auf die Elution von leicht mobilisierbaren Alkalihydroxiden der Beschleuniger und die dadurch bedingte hohe OH⁻-Konzentration zurückgeführt. Gleichzeitig verschiebt sich dadurch das Kalk-Kohlensäure-Gleichgewicht, welches als Ursache der primären Ausfällungen von Calciumcarbonat

anzusehen ist (Bildung erster Sinterfahnen am Spritzbeton) und welches eine Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit bedingt.

In weiterer Folge nimmt die OH⁻-Mobilisierung ab und es stellen sich an der Spritzbetonschale bei einer Reduktion der pH-Werte auf rd. 7,5 bis 8,5 annähernd stationäre Verhältnisse ein. Daß im Beobachtungszeitraum bis zu einem Jahr nach Spritzbetonauftrag stationäre hydrochemische Verhältnisse vorliegen, wird auch durch zahlreiche Kontrollanalysen bestätigt, die im Vergleich mit der Primäranalyse durchwegs einen stationären Erdalkali- und Alkaligehalt, stabile pH- und Leitfähigkeitswerte und kaum Differenzen zu natürlichen Bergwässern aufzeigen (vgl. **Bild 6**: Tunnel Schönrain Stat. Tm 570, Rez.Nr. 26). Nur bei der Verwendung von Portlandzement sind mehrfach höhere pH-Werte nach längerer Zeit nach dem Spritzbetonauftrag gemessen worden.

Messungen vor Ort und die Kontrollanalysen der Bergwässer zeigten, daß bis zu einem Alter von rund einem Jahr keine nennenswerte Elution des Spritzbetons festgestellt werden konnte.

5.2 Chemismus von Tunnelabwässern während der Vortriebsarbeiten

Obwohl der Einfluß der Durchsickerung der Spritzbetonaußenschale während der Vortriebsphase auf den Bergwasserchemismus einen nachweislich geringen Einfluß nimmt, weisen die Tunnelabwässer durchwegs sehr hohe pH-Werte mit entsprechenden hydrochemischen Veränderungen auf.

In **Bild 6** sind auszugsweise Analyseergebnisse von Tunnelabwässern dargestellt. Die Proben wurden in den Phasen Vortriebsstillstand (nach rd. 8-stündiger Unterbrechung), Vortriebsarbeiten (laufender Kalotten- und Strossenvortrieb) und nach dem Aufbringen des Isolierträgers bei abgeschlossenen Vortriebsarbeiten gezogen.

Es zeigen sich deutliche Abhängigkeiten zum Arbeitsablauf an der Baustelle, wobei die Qualität der Wasserhaltung und die Staubbelastung im Tunnel entscheidend für das Ausmaß der gelösten Fracht im Tunnelabwasser sind. Bei den Analysen wurde im Einzelfall eine Verzehnfachung des Alkaligehaltes bei etwa gleich hohem Gehalt an Erdalkalien und eine Erhöhung des Aluminiumgehalts um ein Vielfaches auf max. 3,8 mg/l festgestellt. Überlagert wird die Abwassersituation vom jeweiligen vortriebspezifischen und witterungsbedingten Gesamtwasseranfall im Tunnel, der eine Verdünnung der

Lösungsfracht besorgt.

Im Vergleich mit Daten zum Chemismus von Tunnelabwässern aus den Tunnelbauarbeiten vor 1986 /5/ wurden bei der Verbindungskurve Nantenbach in der Vortriebsphase keine Verbesserungen in der Abwassersituation erzielt. Ein Einfluß der Spritzbetonrezepturen auf dieses Problem ist aufgrund der pH-Messungen nicht feststellbar.

5.3 Chemismus des Tunnelabwassers nach Abschluß der Vortriebsarbeiten

Bild 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.

Beim Vergleich mit Bergwässern an der Spritzbetonaußenschale (**Bild 6**) fällt auf, daß mit dem Einbau der Abdichtung und Innenschale und einer dadurch verursachten erhöhten Kontaktzeit des Bergwassers mit dem Spritzbeton ungünstigere hydrochemische Bedingungen geschaffen werden.

Zudem liegt beim Tunnel Schönrain eine ausgeprägte Asymmetrie in der pH-Belastung von 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 rd. 8,5 etwas über den an der Spritzbetonaußenschale ermittelten Werten, der Alkaligehalt ist ca. vierfach so hoch (**Bild 6**). Die asymmetrische Elution an der Außenschale führt zu der in den Wasseranalysen festgestellten Erhöhung des Alkaligehaltes in der Südwestdrainage (**Bild 6**) und zur Erhöhung des pH-Wertes auf 9 bis 10 (**Bild 7**).

Der Reduktion des Hydrogencarbonatgehalts entspricht der relativ geringere Gehalt an Calcium und Magnesium im Drainagewasser, vor allem im Wasser der Südwestdrainage (**Bild 6**), in der bereits Karbonat in der Drainage ausgefallen sein muß. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, daß diese Ergebnisse bei laufendem Baubetrieb ermittelt wurden und im Endzustand nach Reinigung der Drainageleitungen eine Reduktion der Belastung erwartet werden kann.

Der Vergleich der in den Drainagen ermittelten pH-Werte von 9 bis 10 in der Betonierphase mit den Messungen am Tunnel Mühlberg (pH = 11 bis 12,5 rd. 6 Jahre nach Fertigstellung) ist ein

positives Faktum, das auf die Optimierung des Spritzbetons zurückgeführt werden kann. Eine Bewertung der einzelnen Spritzbetonrezepturen hinsichtlich ihrer Eluationsneigung nach dem

Einbau der Innenschale ist nach Bauende im Zuge von abschnittsbezogenen hydrochemischen Messungen mit entsprechenden Vergleichsanalysen vorgesehen.

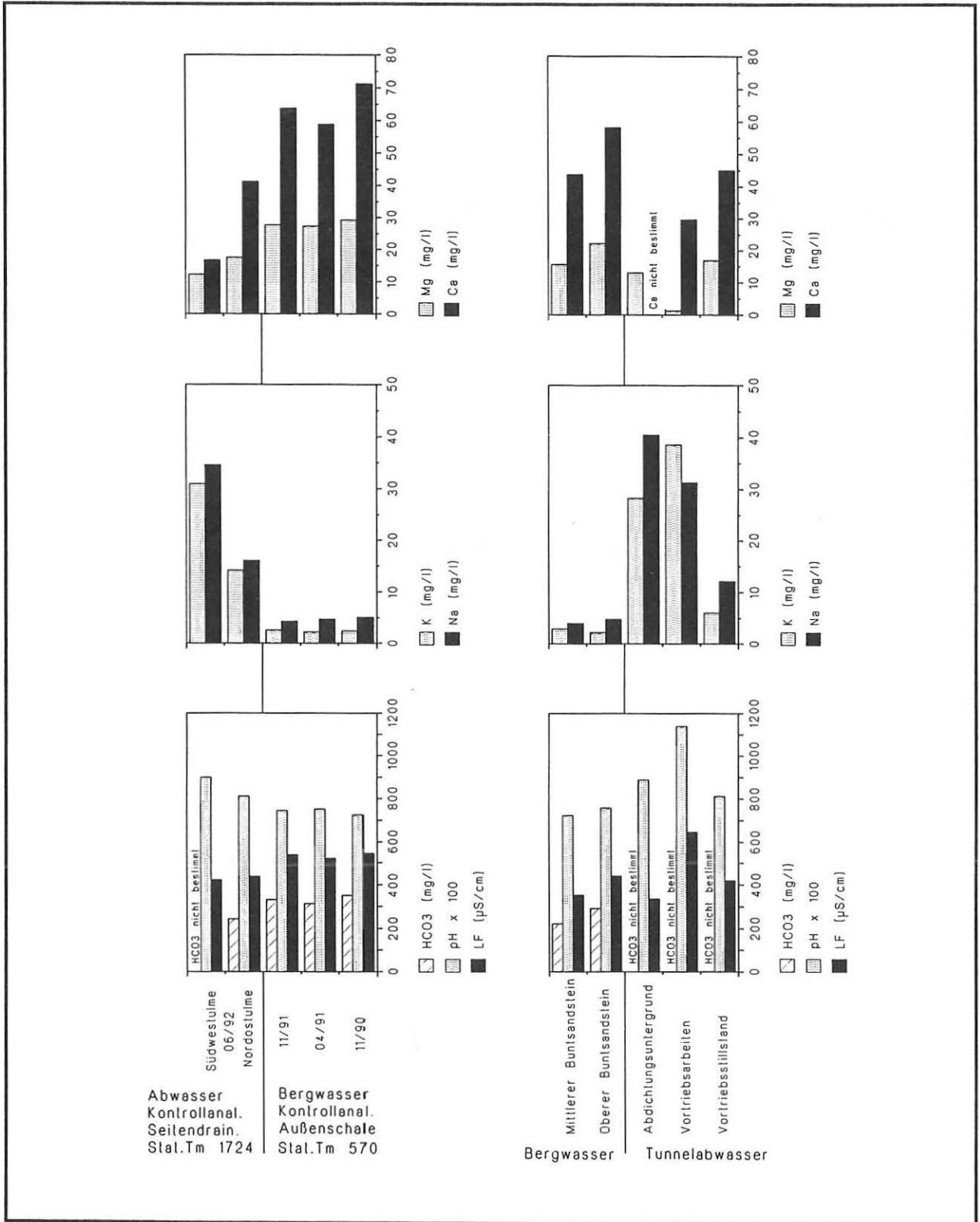
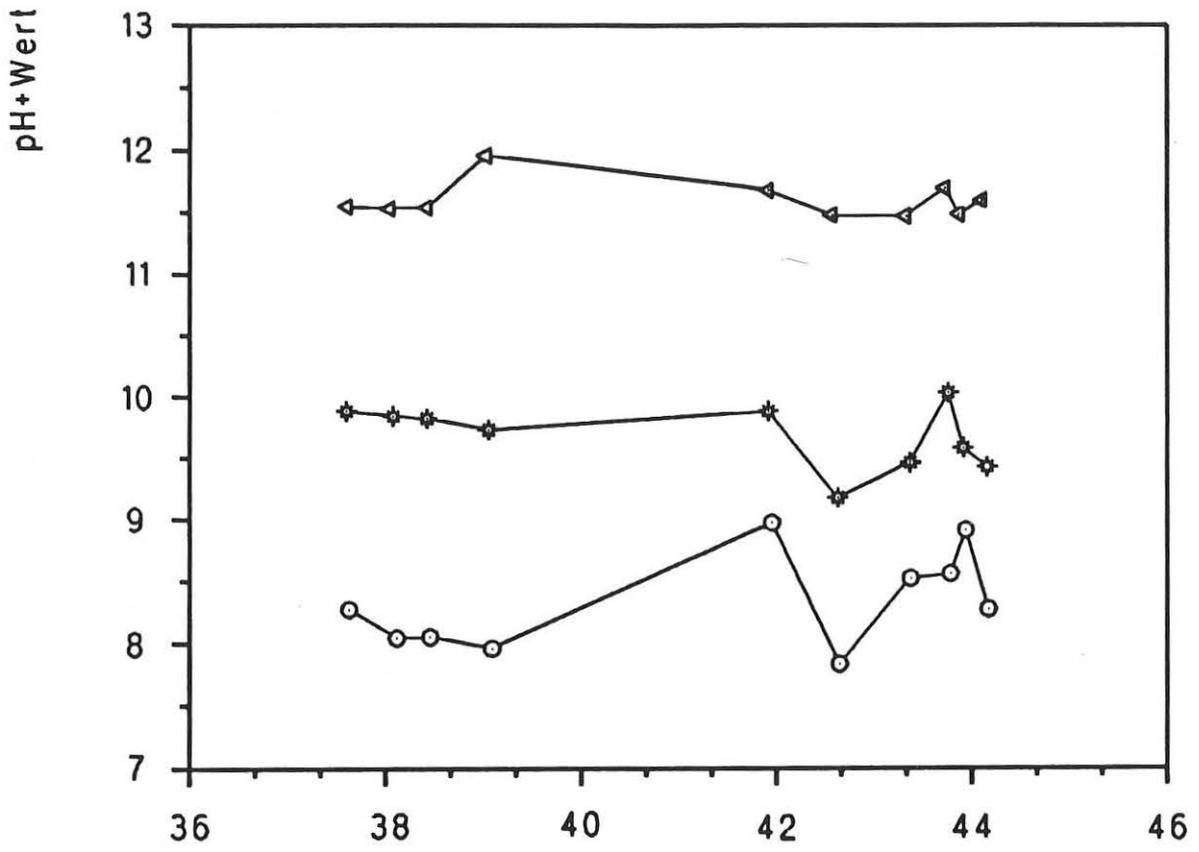


Bild 6: Vergleich des Chemismus des Bergwassers während des Vortriebes und nach Einbau der Innenschale



%-Wert der fertiggestellten Drainagenlänge zum Zeitpunkt der pH-Messung (Mai-Juli 92)

Tunnel Schönrain

- *— Seitendrainage Südwest
- Seitendrainage Nordost
- ◁— Tunnel Mühlberg (zum Vergleich)

Bild 7: Vergleich der pH-Werte der Seitendrainagewässer Tunnel Schönrain und der Drainagewässer Tunnel Mühlberg

6. Auswertung der Ergebnisse

Die bisher vorliegenden Ergebnisse aus den Elutionsversuchen und den laufenden pH- und Wasseranalysen zeigen im Vergleich zu dem im gleichen Gebirgsstock liegenden Tunnel Mühlberg der bereits bestehenden NBS Hannover - Würzburg eine deutliche Verbesserung des Elutionsverhaltens der an der Verbindungskurve Nantenbach entwickelten Spritzbetone. Der positive Einfluß des Microsilicas ist zwar gegeben, er kann jedoch durch eine unkontrollierte BE-Mittel-Beigabe aufgehoben werden. Die erhebliche Verminderung der Elution beim Tunnel Schönrain auf rd. 1/3 ist auf den Einsatz folgender Maßnahmen zurückzuführen:

- . Einsatz von Hochofenzement
- . Verwendung von flüssigem BE-Mittel
- . Verwendung klassierter Sande
- . Einsatz von Microsilica

Die Auswertungen der Untersuchungen haben gezeigt, daß mit folgenden zusätzlichen Auflagen für die Bauabwicklung weitere Verbesserungen möglich sind:

- . strikte Kontrolle der BE-Mittel-Zugabe
- . Konstanthalten der optimierten Spritzbetonkomponenten
- . mechanisches Aufbringen des Spritzbetons mit Robojets
- . Einschränkung der Staubbelastung beim Spritzbetonauftrag
- . konsequentes Fassen und rasches Abpumpen des zutretenden Bergwassers

7. Literaturverzeichnis

- /1/ **Springenschmid, R., Maidl, B. & Maidl, R. (1991):**
Bericht über das Untersuchungsprogramm zur Minimierung von chemischen Ausfällungen in Tunnelentwässerungen und der Korrosion von Spritzbeton bei Tunneln der Deutschen Bundesbahn (Studie im Auftrag der DB Projektgruppe Nürnberg), 54 S, 10 Tab., 23 Abb.
- /2/ **Strappler, G. (1991):**
Microsilica im Trockenspritzbeton im Großversuch. - Symposiumsband "Microsilica in der modernen Betontechnologie 1991": 365 - 376, Allensbach.
- /3/ **Strappler, G. (1993):**
Baustellenerfahrungen mit Microsilica im Trockenspritzbeton. - 4. Internationale Fachtagung, Igls, dieser Band.
- /4/ **Breitenbücher, R. (1991):**
Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch Betonzusätze. - Symposiumsband "Microsilica in der modernen Betontechnologie 1991": 35 - 51, Allensbach.
- /5/ **Schraft, A. (1988):**
Beeinflussung der Wassergüte durch den Tunnelbau bei der Spritzbetonbauweise. - Geol. Jb. Hessen, 116: 261 - 272

