
Untersuchungen über das Auslaugverhalten von Spritzbeton

INVESTIGATIONS REGARDING THE LEACHING BEHAVIOUR OF SHOTCRETE

DR. ANDREAS SAXER, UNIV.-DOZ. DIPL.-ING. DR. TECHN. WOLFGANG KUSTERLE, A. UNIV.-PROF. ING. DR. WALTER LUKAS, UNIVERSITÄT INNSBRUCK, INSTITUT FÜR BAUSTOFFLEHRE UND MATERIALPRÜFUNG, INNSBRUCK

Bei der Herstellung von Spritzbeton belasten gesundheitsgefährdende Stoffe in unterschiedlicher Form (Aerosole, Stäube) die Atemluft. In weiterer Folge können auf Grund der spezifischen Zusammensetzung des Spritzbetons durch Elution bestimmte Stoffgruppen (Ca-Na-K-Hydroxide, Sulfate, Aluminate) ausgelaugt werden, welche die Umwelt negativ beeinflussen können. Dabei sind kurzfristige, durch den frisch aufgetragenen jungen Spritzbeton, und langfristige Belastungen durch die Elution des erhärteten Spritzbetons zu unterscheiden. Für die Beurteilung beider Effekte ist die Auswahl eines Verfahrens von Wichtigkeit, mit dem solche Belastungen einfach und schnell erkannt werden können.

Technologisch läßt sich über die Wahl des Zementes bzw. des Bindemittels, den Einsatz eines alkalifreien EB-Mittels sowie die Verfahrenstechnik das Auslaugverhalten sowohl des jungen als auch des erhärteten Spritzbetons durch Maßnahmen beeinflussen bzw. reduzieren. Beste Ergebnisse werden bei speziell zusammengesetzten Spritzbetonen ohne EB-Mittel erzielt.

During shotcrete production, substances constituting a health hazard impair the inhaled air in different ways (aerosols, dust). Later on, due to the specific composition of the shotcrete, certain compounds (Ca-Na-K-hydroxides, sulfates, aluminates) may be leached, which is likely to have negative effects on the environment. A distinction can be made between short-term strains resulting from freshly applied shotcrete and long-term strains due to the leaching of hardened shotcrete. For an assessment of the two effects a leaching test for an easy and fast identification of such strains is needed.

From the technological viewpoint, the type of cement and binder, the use of an alkali-free accelerator and the process technology allow to influence or reduce the leaching behaviour of both young and hardened shotcrete. Best results are obtained with specially composed shotcrete without accelerator.

1. Einleitung

Spritzbeton wird im Tunnelvortrieb nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise als Stützmittel eingesetzt. Die Anforderungen an die Eigenschaften des Spritzbetons, wie sie z. B. in der Richtlinie Spritzbeton des Österreichischen

Betonvereines festgelegt sind, beinhalten unter anderem eine rasche Festigkeitsentwicklung. Zur Erzielung dieser Frühfestigkeiten kommen Erstarrungsbeschleuniger auf Basis von Natrium- oder Kalium-Aluminaten sowie teilweise von Alkali-Silikaten (Wasserglas) zum Einsatz. Es werden dadurch zusätzliche, leicht lösliche Al-

kali-Anteile in den Beton miteingebracht.

Das wachsende Umweltbewußtsein hat dazu geführt, daß auch Beton und Spritzbeton auf ihre ökologischen Eigenschaften untersucht werden. Im speziellen geht es darum, inwieweit eine Auslaugung dieser Materialien stattfinden kann und welche Einflüsse sich daraus auf die Umwelt ergeben.

Zur Untersuchung von eventuell auftretenden ökologischen Einflüssen sind entsprechende Verfahren notwendig. In der neueren Literatur wurden bereits einige solche Methoden vorgestellt und die Ergebnisse diskutiert /1, 2/. Man unterscheidet im wesentlichen zwischen statischen Methoden, bei denen eine Beton- bzw. Spritzbetonprobe für eine definierte Zeitdauer in ein Auslaugmedium gebracht wird, und dynamischen Methoden, bei denen ein ständiges Beanschlagen der Probe mit einem Auslaugmedium über eine bestimmte Zeitdauer erfolgt.

In der vorliegenden Untersuchung wurde eine Reihe von Spritzbetonproben unterschiedlicher Zusammensetzung mittels einer statischen Auslaugmethode eluiert. Dabei galt es einmal, die Einflüsse der bei der Herstellung des Spritzbetons verwendeten Ausgangsmaterialien auf die Auslaugbarkeit zu untersuchen; in weiterer Folge werden diese Ergebnisse mit einer mittels dynamischem Verfahren durchgeführten Auslaugung einer Spritzbetonprobe verglichen.

2. Auslaugprozeß bei Beton

Beton und auch Spritzbeton setzen sich im wesentlichen aus mineralischen Zuschlägen und Zementstein zusammen. Die Zuschläge können als praktisch inert, also ohne wasserlösliche Anteile, betrachtet werden (mit Ausnahme von Kalkstein bei sauren Wässern, z. B. mit hohem Gehalten an kalkaggressiver Kohlensäure). Der Zementstein hingegen enthält lösliche Anteile, vor allem das bei der Hydratation des Zementes entstehende Kalkhydrat ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie Kalium (K) und Natrium (Na), ebenfalls zumeist in Hydroxid-Form vorliegend. Eine untergeordnete Rolle bezüglich der Auslaugbarkeit spielen das Aluminium sowie das Sulfat (SO_3), die Auslaugung von Schwermetallen und Spurenelementen ist unter normalen Umständen vernachlässigbar /1/.

Beton im jungen Alter (1 bis 2 Tage), zum Zeitpunkt des Einbringens und der frühen Erhärtung, zeigt eine erhöhte Auslaugbarkeit der

oben genannten Elemente. Mit zunehmendem Alter und Ausbildung einer dichten Zementsteinmatrix nimmt die Eluierbarkeit ab. Die Auslaugung erfolgt dann nur noch an der Oberfläche und in den oberflächennahen Bereichen. Für eine mögliche Umweltbeeinflussung ist vor allem diese Elution und die dabei ausgelagerte Stoffmenge relevant. Die Auslaugung der Ca-, K- und Na-Hydroxide bewirkt neben der auftretenden Salzfracht auch einen relativ hohen pH-Wert des Auslaugwassers. Das ausgewaschene Kalkhydrat kann unter Einwirkung des Kohlendioxids (CO_2) der Luft bzw. des bereits im Wasser gelösten CO_2 als Calciumcarbonat ausfallen. Aber auch die Alkalien können, vor allem wenn es zur teilweisen Eintrocknung des Wassers und dadurch Überschreiten von Löslichkeitsgleichgewichten kommt, Ablagerungen bilden (Bild 1). Auf diese Prozesse sind die in Tunnel drainagen auftretenden Aussinterungen zurückzuführen, welche - in Abhängigkeit der ausgelagten Mengen - oft beträchtliche Ausmaße annehmen können.

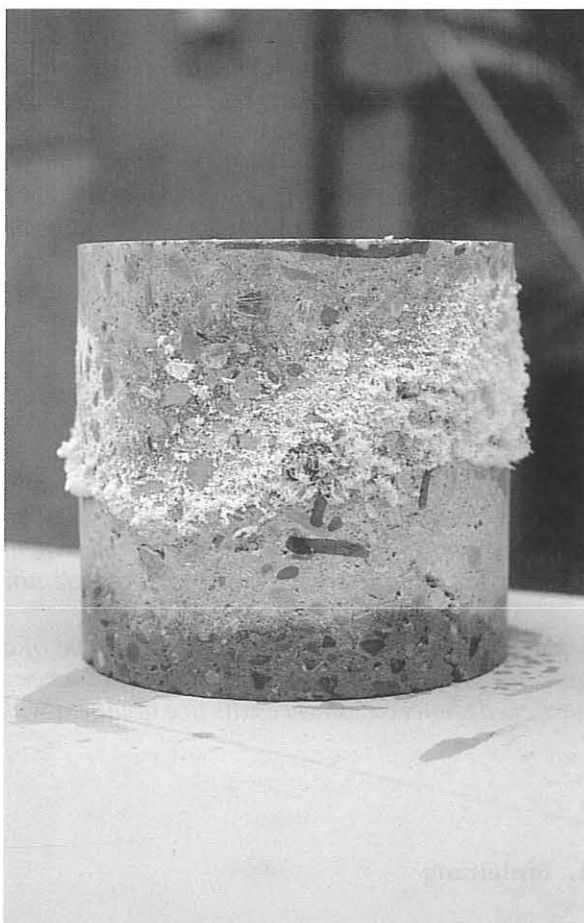


Bild 1: Ausblühungen an einem Spritzbetonbohrkern (NaSO_4)

Wie bereits erwähnt, ist für eine Beeinflussung

der Umwelt vor allem die Langzeitwirkung der Auslaugung relevant. Über längere Zeit auftretende Auswaschungen mit entsprechend hohen Salzfrachten können zur Anhebung des pH-Wertes und auch der elektrischen Leitfähigkeit im Grundwasser führen. Dies kann an und für sich nur bei ungenügender und schlechter Betonqualität - so viel sei den noch folgenden Ergebnissen vorweggenommen - aber auch bei Verwendung bzw. Überdosierung von Zusatzmitteln (vor allem alkalihaltigen Erstarungsbeschleunigern) auftreten.

3. Experimentelles

Die zur Untersuchung des Auslagverhaltens von Spritzbeton angewandten Elutionsmethoden werden im folgenden beschrieben. Als Auslagmittel wurde bei allen Methoden entionisiertes Wasser verwendet.

3.1 Probenvorbereitung

Im allgemeinen werden Bohrkernproben durch Naß-Bohren entnommen. Dabei kommt es bereits zu einer geringen Auswaschung von löslichen Bestandteilen. Für einen Vergleich der Elutionsergebnisse unterschiedlicher Spritzbetone ist es allgemein wichtig, daß die Probenentnahme und die Probenlagerung bis zur Prüfung nach einer einheitlichen Methode geschieht. Die vorliegenden Auslaugungen von Spritzbetonen erfolgte an naß gebohrten Bohrkernen, die bis zum Zeitpunkt der Elution bei Zimmertemperatur gelagert wurden.

3.2 Trogversuch nach ÖNORM S 2072

In der ÖNORM S 2072 /3/ ist eine Auslagmethode beschrieben, die bei der Beurteilung von verfestigten Abfällen Anwendung findet. Dieses Verfahren wurde auch für Spritzbetonproben angewandt.

Ein Bohrkern mit den Maßen Durchmesser = 5 cm und Höhe = 10 cm wird in ein Becherglas gestellt, welches mit einem Masseverhältnis Wasser : Probe = 10 : 1 gefüllt ist (siehe Bild 2). Mittels Magnetrührer wird das Wasser in Bewegung gehalten und eine leichte Umspülung des Probekörpers bewirkt. Die Elution erfolgt über 24 Stunden. Anschließend wird das Eluat filtriert und die Analysen durchgeführt.

Diese Elutionsmethode wurde für ganze, gespaltene und in 1 - 2 cm-Stücke aufgebrochene Spritzbetonproben angewandt.

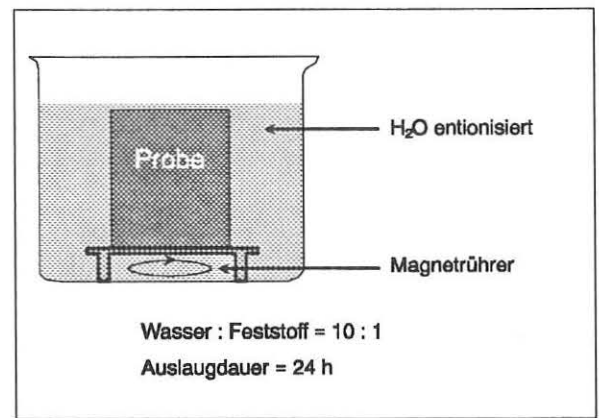


Bild 2: Trogverfahren nach ÖNORM S 2072

3.3 Auslaugung nach DEV-S4

Die Spritzbetonprobe wird auf Korngrößen kleiner 10 mm aufgebrochen. 100 g dieses Materials wird in einer mit einem Liter Wasser (Masseverhältnis Wasser : Probe = 10 : 1) gefüllten Weithalsflasche für 24 Stunden bei gleichmäßiger Drehung über Kopf eluiert. Anschließend wird das Eluat filtriert und die Inhaltsstoffe analysiert.

Diese Methode wird normalerweise zur Beurteilung der Auslagbarkeit von körnigen und pastösen Abfällen angewandt. Zur Beurteilung der Eluierbarkeit von Beton bzw. Spritzbeton scheint diese Methode an und für sich nicht als sinnvoll, da das Gefüge zerstört und somit ein ganz anderes Material erzeugt wird. Trotzdem erfolgte eine Elution - vor allem zu Vergleichszwecken - nach dieser Methode.

3.4 Auslaugung in einer Durchströmungszelle

Diese Auslagmethode wurde am Baustoffinstitut der TU München (Leiter: Prof. Springenschmid) entwickelt und eine Reihe von Elutionen durchgeführt /4/. Definierte Wassermengen umströmen dabei kaskadenförmig die Scheiben eines Bohrkerns (Bild 4). Zu Vergleichszwecken wurden die Ergebnisse von Auslaugungen an Spritzbetonproben, die auch mittels Trogversuch ausgelaugt wurden, freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

3.5 Vergleich der Ergebnisse von Elutionen an Spritzbetonproben

Da die angeführten Auslagmethoden, im speziellen der Trogversuch und die Durchströmungszelle, sich sowohl in der Durchführung als auch in der zur Auslagung verwendeten

Wassermenge grundsätzlich unterscheiden, können nicht einfach die erhaltenen Eluatkonzentrationen verglichen werden. Daher sind Umrechnungen notwendig. Einen möglichen Vergleich stellt dabei die Ermittlung des Frachtaustrages dar.

3.6 Frachtaustrag F

Der Frachtaustrag gibt die ausgelaugte Menge einer Komponente pro Kilogramm Probenmaterial an. Er errechnet sich nach der Formel:

$$F = C_i \cdot W/S \quad [mg/kg]$$

- C_i Anteil der Komponente i im Eluat (mg/l)
 W/S Masseverhältnis Wasser (l) zu Feststoff (kg)

Für die Auslaugung nach dem Trogverfahren und nach DEV-S4 beträgt $W/S = 10$. Für die Elution mittels Durchströmungszelle errechnet sich der Frachtaustrag wie folgt:

$$M_{i,n} = C_i \cdot W_n \quad [mg]$$

- $M_{i,n}$ in der Zeiteinheit n ausgelaugte Menge der Komponente i (mg)
 W_n in der Zeiteinheit n durchströmte Wassermenge (l)

$$F = \frac{\sum M_{i,n}}{G} \quad \text{bzw.} \quad F = \frac{\sum M_{i,n}}{\sum_n W_n} \cdot W/S \quad [mg/kg]$$

- G Gesamtgewicht der ausgelaugten Probe (kg)

Beim Vergleich der Ergebnisse ist auch das Verhältnis von Oberfläche der Probe zum Gesamtgewicht der Probe zu berücksichtigen, d. h. die zur Auslaugung zur Verfügung stehende Oberfläche pro kg Probenmaterial [m^2/kg].

3.7 Eluatkonzentrationen bezogen auf die Oberfläche der ausgelaugten Probe

Ein weiterer Vergleich der Meßergebnisse kann durch die Umrechnung der gemessenen Eluatkonzentrationen auf die zur Auslaugung zur Verfügung stehende Oberfläche der Probe erfolgen.

$$E_O = \frac{C_i}{O} \quad [mg/l \cdot m^2]$$

- E_O oberflächenbezogene Eluatkonzentration
 O Oberfläche der Probe (m^2)

In diesem Fall sollte auch das Verhältnis vom für die Auslaugung verwendeten Flüssigkeitsvolumen (V_{H_2O}) zur Oberfläche der Probe (O) berücksichtigt werden. Die Einheit beträgt $m^3/m^2 = m$. Ein Verhältnis von $V_{H_2O}/O = 1 m$ bedeutet, daß 1.000 Liter Wasser für die Auslaugung von $1 m^2$ Oberfläche zur Verfügung stehen.

4. Ergebnisse

4.1 Elution von Zement- und Spritzbetonproben

Ausgangspunkt der vorliegenden Untersuchung war die Elution von 28 Tage alten Zementproben, die mit einem W/Z -Faktor von 0,5 hergestellt und in Zylinderformen gegossen wurden. Die Auslaugung erfolgte wie der Großteil der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Elutionen nach dem Trogverfahren ÖNORM S 2072. Die Ergebnisse der Auslaugung an ganzen und gespaltenen Probezylindern sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Die höchste Auslaugung zeigt bei beiden untersuchten Zementtypen (ein normaler Portlandzement und ein spezieller Spritzzement mit sulfatarmem Klinker) das Kalium mit Werten zwischen 1.000 und 1.200 mg/kg, deutlich geringer sind die Konzentrationen von Calcium und Natrium. Das Aluminium weist erwartungsgemäß die geringste Konzentration auf. Werden gespaltene Probezylinder ausgelaugt, so erhöht sich der Frachtaustrag deutlich. Für das Calcium wurden rund doppelt so hohe Konzentrationen wie für die ganze Probe im Eluat gemessen, aber auch für Kalium und Natrium sind deutlich höhere Werte feststellbar. Beim Aluminium liegen die Verhältnisse nicht so klar, es scheint, daß die mittels Trogverfahren auslaugbare Menge mehr oder weniger unabhängig von der Geometrie der ausgelaugten Probe ist.

Eine deutliche Beeinflussung der Eluatkonzentration bzw. des Frachtaustrages ergibt sich durch Zugabe eines Beschleunigers zum Zement. Im vorliegenden Fall wurde eine Zementprobe mit 5 % Erstarrungsbeschleuniger (Natrium-Aluminat) angesetzt und sowohl ein ganzer als auch ein gespaltener Probezylinder ausgelaugt. Aus den Ergebnissen in Tabelle 1 ist ersichtlich, daß vor allem die Natrium-Konzentration des Eluates dadurch sehr stark angehoben wurde (Bild 3).

	Ca mg/kg	K mg/kg	Na mg/kg	Al mg/kg	Leitf. mS/cm	pH
PZ 275 (F) ganz	310	1050	290	18,6	1,17	11,90
PZ 275 (F) gespalten	790	1310	350	12,0	2,03	12,18
SZ 2 ganz	480	1220	180	16,8	1,41	11,98
SZ 2 gespalten	990	1890	330	12,8	2,57	12,25
PZ 275 (F) + 5 % EB ¹⁾ ganz	160	1100	1060	23,4	1,69	12,03
PZ 275 (F) + 5 % EB gespalten	660	1470	1500	34,2	2,57	12,25

¹⁾ Erstarrungsbeschleuniger auf Na-Al-Basis

Tab. 1: Elution von erhärteten Zementproben/Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 - Probenalter 28 Tage (PZ 275 (F)20 Tunnelzement, SZ2 ... Bindemittel auf Basis von sulfatarmem Klinker)

Deutlich geringer ist die Calcium-Fracht, was durchaus zu erwarten ist, da ja ein Teil des bei der Hydratation des Zementes gebildeten Kalkhydrats mit der Aluminium-Komponente des Beschleunigers reagiert. Für das Kalium sind im wesentlichen dieselben Werte wie für die Zementprobe ohne Beschleuniger gefunden worden. Für das Aluminium erhöhen sich die Konzentrationen, wenngleich der Unterschied wesentlich geringer ist als beim Natrium.

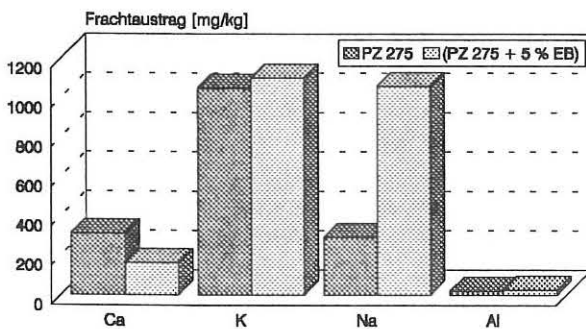


Bild 3: Vergleich von Zementen mit und ohne EB

Die Elution von direkt an der Baustelle entnommenen Spritzbetonproben, die wiederum nach dem Trogverfahren an ganzen und gespal-

tenen Bohrkernen durchgeführt wurde, zeigt im wesentlichen ähnliche Verhältnisse wie bei den hydratisierten Zementproben, wobei jedoch die Eluatkonzentrationen bzw. Frachtausträge für die untersuchten Elemente deutlich geringer sind. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse von Auslaugversuchen an 28 Tage alten Spritzbetonproben, die mit den oben geprüften Zementarten und einem anderen Spritzzement (SZ 1) hergestellt wurden, zusammengefaßt. Ähnlich wie bei den reinen Zementen zeigt das Kalium die höchsten Werte, etwas niedriger ist der Frachtaustrag für Calcium und deutlich geringer für Natrium. Die allgemein niedrigeren Konzentrationen in den Eluaten (Tabelle 2) führen zu deutlich niedrigeren Leitfähigkeiten und pH-Werten als bei den Eluaten der Zementproben.

Vergleichbar ist auch der Einfluß auf die Eluatzusammensetzung, wenn bei der Herstellung des Spritzbetons ein Erstarrungsbeschleuniger (wiederum Na-Aluminat) verwendet wird. Wie aus Tabelle 2 und Vergleich mit den normalen Spritzbetonproben ersichtlich, nimmt der Frachtaustrag für Natrium stark zu, während für Calcium und auch Kalium geringere Werte gemessen wurden.

	Eluatkonzentrationen/Frachtaustrag									
	Ca		K		Na		Al		Leitf.	pH
	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l	mg/kg	mS/cm	
SpB PZ 275 (F) ganz	14	140	20	200	5,5	55	0,57	5,7	0,357	11,20
SpB PZ 275 gespalten	48	480	37	370	11	110	1,20	12,0	0,759	11,71
SpB PZ SZ 1 ganz	17	170	20	200	1,0	10	0,28	28,0	0,200	10,90
SpB PZ SZ 2 ganz	11	110	37	370	5,2	52	1,73	17,3	0,268	11,18
SpB PZ SZ 2 gespalten	37	370	52	520	7,2	72	1,39	13,9	0,750	11,40
SpB PZ 275 (F) + EB ¹⁾	8	80	15	150	17	170	1,10	11,0	0,268	11,00
SpB PZ 275 (F) + EB 2 ¹⁾	9	90	13	130	12,5	125	0,75	7,5	0,240	10,90

¹⁾ Erstarrungsbeschleuniger auf Na-Al-Basis (unterschiedliche Produkte)

Tab. 2: Elution von Spritzbetonproben/Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 - Probenalter 28 Tage

Um zu prüfen, welchen Einfluß das Probenalter auf das Auslaugverhalten ausübt, erfolgte die Elution von 7, 28 und 56 Tage alten Spritzbetonproben (ganze Bohrkerne) mittels des Trogverfahrens nach ÖNORM S 2072. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefaßt. Für alle untersuchten Elemente zeigt sich mit zunehmendem Alter eine Abnahme der Konzentrationen.

		7 Tage	28 Tage	56 Tage
Ca	mg/kg	180	140	150
K	mg/kg	230	200	180
Na	mg/kg	57	55	42
Al	mg/kg	7,2	5,7	4,9

Tab 3: *Einfluß des Probenalters - Spritzbetonprobe SpB PZ 275 (F)20 Trogverfahren nach ÖNORM S 2072*

Für 56 Tage alte Proben beträgt die Abnahme 20 - 25 %, also eine Verminderung von rund einem Fünftel bis einen Viertel des Frachtaustrages von 7 Tage alten Proben.

In der Folge stand noch eine weitere Spritzbetonprobe für die Auslaugung zur Verfügung. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefaßt. Bei dem verwendeten Zement handelt es sich um einen Portlandzement, dem Kalksteinmehl zugegeben wurde. Auffallend für diese Probe ist der relativ hohe Frachtaustrag für Calcium, dagegen zeigt das Kalium deutlich niedrigere Werte als bei den anderen Proben vorgefunden. Die Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers (wiederum ein Na-Aluminat) bewirkt - ähnlich wie bereits weiter oben diskutiert - eine starke Zunahme der Na-Fracht.

		SpB SZ 3 + Kalksteinfüller	SpB SZ 3 + Kalksteinfüller + EB 3 ¹⁾
Ca	mg/kg	246	181
K	mg/kg	73	66
Na	mg/kg	11	77
Al	mg/kg	7,2	14,1
Leitf.	mS/cm	0,425	0,410
pH		11,2	11,3

¹⁾ Erstarrungsbeschleuniger auf Na-Al-Basis

Tab. 4: *Elution von Spritzbetonproben mit modifiziertem Spritzzement; Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 - Probenalter 28 Tage*

Wie die durchgeführten Auslaugversuche zeigen, ist das Auslaugverhalten von Spritzbetonproben einmal unmittelbar von der bei der Herstellung verwendeten Zementart bzw. dessen

Elutionscharakteristik abhängig; andererseits bewirkt auch die Zugabe von Zusatzmitteln, wie z. B. eines flüssigen Erstarrungsbeschleunigers auf Natrium-Aluminat-Basis, eine sehr starke Zunahme des Frachtaustrages derjenigen Komponente des Zusatzmittels, welche in leicht löslicher Form im Spritzbeton zurückbleibt, im vorliegenden Fall des Natriums.

Um eine Verminderung des Frachtaustrages bei Auslaugung von Spritzbeton zu erzielen, muß also getrachtet werden, einmal die Eluierbarkeit des Zementes zu verbessern bzw. zu reduzieren und auch geeignete Zusatzmittel (möglichst alkalifrei) für die Herstellung des Spritzbetones zu verwenden.

Dies zeigen die Ergebnisse von Auslaugversuchen an Spritzbetonproben, welche mit einem latent hydraulischen Zusatzstoff, Siliziumpulver als Zusatzmittel und einem umweltneutralen Beschleuniger (auf Basis von Aluminiumhydroxid) hergestellt wurden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefaßt. Im Vergleich zu den Ausgangsproben ohne Zusatzmittel ist deutlich eine Abnahme der Calcium-Fracht zu erkennen, was auf Sekundärreaktionen des bei der Zementhydratation gebildeten Kalkhydrates mit dem Zusatzmittel zurückzuführen ist /5/. Auch für das Kalium verringert sich der Frachtaustrag sehr deutlich und dürfte eine Folge der verbesserten Gefügestruktur (zusätzliche CSH-Phasen-Bildung durch Sekundärreaktion) sein. Durch die Verwendung eines umweltneutralen Beschleunigers reduzieren sich ebenfalls die Auslaugwerte.

	Ca	K	Na	Al	Leitf.	pH
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mS/cm	
SpB SZ 1	170	198	10	2,8	0,20	10,9
SpB SZ 1 + Puzzolan	116	95	22	6,3	0,220	10,7
SpB SZ 1 + Puzzolan + Siliziumpulver	97	87	27	5,8	0,210	10,6
SpB PZ 275 (F)	140	200	55	5,7	0,357	11,1
SpB PZ 275 (F) + umweltneutraler EB	100	113	40	7,5	0,220	10,6

Tab. 5: *Elution von Spritzbetonproben mit Puzzolan, Siliziumpulver und umweltneutralem Beschleuniger - Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 - Probenalter 28 Tage*

4.2 Vergleich von Probengeometrie und verschiedenen Auslaugverfahren

Um den Einfluß der Probengeometrie, d. h. im wesentlichen die bei der Auslaugung zur Verfügung stehende Probenoberfläche, auf die ausgelagte Menge der einzelnen Komponenten zu untersuchen, erfolgte nach Aufbereitung der Proben eine Elution nach dem Trogverfahren wie folgt (siehe Bild 4): Auslaugung eines ganzen, an den beiden Hälften eines gespaltenen und eines in 1 - 2 cm Stücke aufgebrochenen Bohrkernes. Weiters wurde eine Spritzbetonprobe nach DEV-S4 (Aufbruch des Bohrkernes auf Korngrößen kleiner 10 mm) ausgelaugt. Die Ergebnisse dieser Auslaugversuche sind in Tabelle 6 zusammengefaßt.

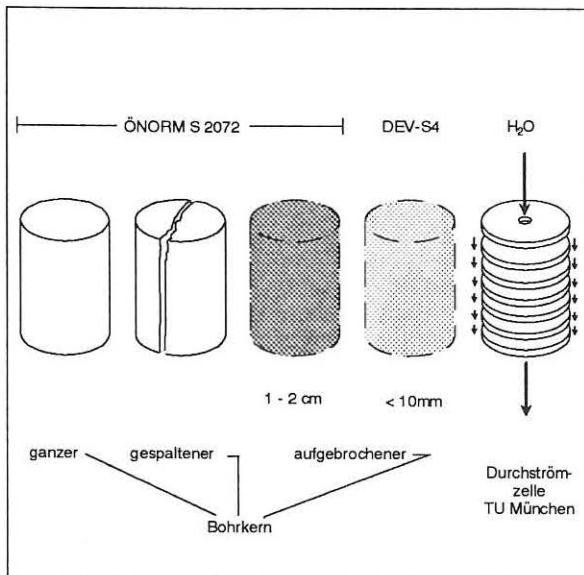


Bild 4: Elution nach dem Trogverfahren mit unterschiedlicher Aufbereitung

Die stärkste Erhöhung der ausgelagten Fracht zeigt sich für das Calcium, wobei diese Zunahme größer zu sein scheint als die Zunahme der Oberfläche. Der Unterschied zwischen den Oberflächen des ganzen und gespaltenen Bohrkernes beträgt rein rechnerisch den Faktor 1,5 und dürfte praktisch auf Grund des Spaltvorganges (keine exakten Bruchflächen etc.) bis zu 2-fach größer sein. Die Calcium-Konzentration hingegen steigt um das ca. 3-fache. Für die Auslaugung an 1 - 2 cm Stücken und nach DEV-S4 ist es schwierig, die tatsächlich zur Verfügung stehende Oberfläche abzuschätzen und wurde folglich auch nicht weiter in Betracht gezogen. In Analogie zu den ausgelagten Frachten erhöhen sich auch die Leitfähigkeit und der pH-Wert der Eluate.

	Trogverfahren			DEV-S4
	SpB PZ 275 (F) 20			
	ganz	gespalten	Stücke	
Ca mg/kg	140	480	1440	4100
K mg/kg	200	370	680	1230
Na mg/kg	55	110	250	350
LF mS/cm	0,357	0,759	2,20	5,09
pH	11,12	11,71	12,24	12,58

Tab. 6: Vergleich von Probengeometrie und Auslaugmethoden - Probenalter 28 Tage

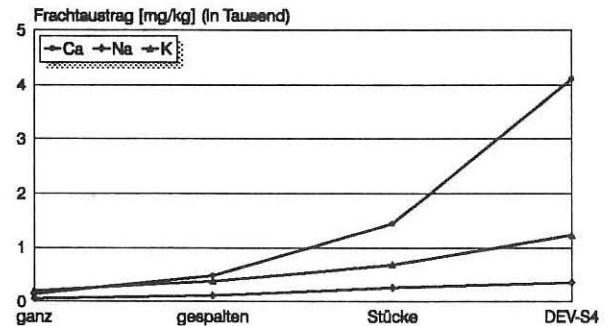


Bild 5: Einfluß der Probengeometrie auf die Elution

Es zeigt sich also, daß bei größerer Oberfläche, die pro Gewichtseinheit bei der Auslaugung zur Verfügung steht, auch ein höherer Frachtaustrag zu erwarten ist (Bild 5). Die Zunahme der ausgetragenen Frachten ist für Calcium, Kalium und Natrium unterschiedlich und zeigt keine unmittelbare Korrelation mit der Zunahme an Oberfläche.

Als weiterer Vergleich standen Ergebnisse der Auslaugung einer Spritzbetonprobe zur Verfügung, die nach der an der TU München entwickelten Methode /4, 6/ durchgeführt wurde. Dabei handelt es sich um eine sogenannte Durchströmungszelle, wo das Wasser mit geringer Strömungsgeschwindigkeit die Oberfläche von Betonscheiben umspült (siehe Bild 4). Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefaßt und den bei der Auslaugung nach dem Trogverfahren erhaltenen Werten gegenübergestellt.

Der Vollständigkeit halber muß darauf hingewiesen werden, daß die nach den unterschiedlichen Methoden ausgelagten Spritzbetonproben zwar mit demselben Zement und Zuschlag hergestellt wurden, die Mischungen jedoch nicht ganz ident sind. Unabhängig davon zeigt sich jedoch, daß bei der Auslaugung mittels Durchströmungszelle der Calcium-Anteil deutlich höher liegt als bei der Auslaugung nach dem Trog-

verfahren, während die Kalium- und Natrium-Frachten geringere Unterschiede aufweisen. Vor allem die Verhältnisse der einzelnen Konzentrationen, d. h. im wesentlichen das Verhältnis von Calcium zu Kalium und Natrium, ist sehr unterschiedlich zu den Ergebnissen des Trogverfahrens. Hier sei noch darauf hingewiesen, daß bei der Auslaugung in der Durchströmungszelle rund doppelt so viel Oberfläche pro Gewichtseinheit zur Verfügung steht wie beim Trogverfahren. Der Unterschied der Frachtauträge beträgt für das Calcium nach 24-stündiger Auslaugung einen Faktor von ca. 2 bzw. nach 3-tägiger Auslaugung einen Faktor von ca. 5. In Analogie errechnen sich die Faktoren für das Kalium zu ca. 1 (1 Tag) bzw. ca. 2 (3 Tage) und für das Natrium zu ca. 1,5 (1 Tag) bzw. 3 (3 Tage).

Die Verwendung eines PZ 275 und eines Beschleunigers auf Na-Al-Basis bei der Herstellung des Spritzbetons führt bei der Auslaugung in der Durchströmungszelle zu einer deutlichen Erhöhung der Na-Fracht (siehe Tabelle 7). Auch bei der Elution ähnlicher Spritzbetonproben mittels Trogverfahren konnte derselbe Effekt beobachtet werden.

Berücksichtigt man die Oberfläche der ausgeaugten Betonproben und rechnet die Eluatkonzentrationen in Milligramm pro Liter Eluens und m^2 Oberfläche ($mg/l \cdot m^2$) um, so weist die Auslaugung von ganzen Bohrkernen im Trogverfahren deutlich höhere Werte auf als in der Durchströmungszelle ermittelt (siehe Tabelle 7).

Untersuchungen von R. Breitenbücher /7/ an direkt in eine Schalung eingebrachten Spritzbeton und anschließender Auslaugung mittels Durchströmung entlang der Oberfläche zeigen prinzipiell einen ähnlichen Verlauf wie in der Durchströmungszelle, wobei jedoch die festge-

stellten Konzentrationen niedriger liegen. Eine Umrechnung der in /8/ dargestellten Auslaugergebnisse an erhärteten Spritzbetonproben (das genaue Probenalter ist nicht angegeben) ergab für das Calcium folgende Werte:

0 - 1 Tag: ca. 300 mg/l m^2 $V_{H_2O} : O = 0,021 \text{ m}$

1 - 7 Tage: ca. 220 mg/l m^2 $V_{H_2O} : O = 0,12 \text{ m}$

7 - 28 Tage: ca. 200 mg/l m^2 $V_{H_2O} : O = 0,43 \text{ m}$

Diese Auslaugung wurde mit derselben Durchströmungsgeschwindigkeit (300 ml/h) wie in der Durchströmungszelle durchgeführt. Bei Anwendung einer höheren Geschwindigkeit werden noch niedrigere Konzentrationen im Eluat gemessen, wie ebenfalls in /8/ dargestellt ist.

Der Vergleich der Ergebnisse dieser Auslaugverfahren sollte veranschaulichen, daß relativ große Unterschiede auftreten können. Beim Trogverfahren, einem statischen Auslaugtest, sind deutlich geringere Unterschiede zwischen den Frachten von Calcium, Kalium und Natrium feststellbar als in der Durchströmungszelle. Es liegt die Vermutung nahe, daß speziell für letztere Elemente Diffusionsprozesse beim Auslaugvorgang eine sehr große Rolle spielen, während für das Calcium der Diffusionsanteil geringer ist. Dies wurde auch in /1/ mittels eines sogenannten kontinuierlichen Standtests (Erneuerung des Eluenten in bestimmten Zeitabständen) beobachtet. Auslaugtests mittels Durchströmung liefern einerseits hohe Auträge speziell für das Calcium, wenn das Probengewicht Berücksichtigung findet (Bild 6). Bezieht man die Eluatkonzentrationen auf die Oberfläche der ausgeaugten Probe (Bild 7), so liegen die Werte niedriger als jene, die für das Trogverfahren ermittelt werden konnten.

		Frachtautrag bezogen auf Gesamtgewicht der Probe					
		SpB SZ 2		SpB SZ 2		SpB PZ 275 + EB ²⁾	
				0-1 Tag	0-3 Tage	0-1 Tag	0-3 Tage
		ganz	gespalten	Durchströmungszelle			
Ca	mg/kg	240	620	529	1148	501	1138
K	mg/kg	230	510	184	385	275	414
Na	mg/kg	28	64	41	84	298	552
		Eluatkonzentration bezogen auf Oberfläche der Probe					
				0-1 Tag	1-3 Tage	0-1 Tag	1-3 Tage
Ca	mg/l . m ²	1224	2094	798	473	756	479
K	mg/l . m ²	1173	1723	279	150	415	104
Na	mg/l . m ²	143	216	63	32	450	190
$V_{H_2O}/O^1)$	m	0,22	0,15	0,035	0,083	0,035	0,083

¹⁾ Verhältnis Flüssigkeitsvolumen : Oberfläche der Probe [m^3/m^2]

²⁾ Erstarrungsbeschleuniger auf Na-Al-Basis

Tab. 7: Vergleich Trogversuch und Durchströmungszelle, Probenalter: 28 Tage

Für in der Praxis auftretende Auslaugvorgänge von Betonkonstruktionen kann zwar durch keines dieser Elutionsverfahren eine unmittelbare Vorhersage von auftretenden Wasserkonzentrationen gemacht werden, es können jedoch Einflußfaktoren aufgezeigt werden. So zeigt sich, daß die Frachtausträge bzw. Wasserkonzentrationen ganz allgemein von der ausgelaugten Oberfläche, von der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und vom zur Auslaugung zur Verfügung stehenden Wasservolumen abhängen (Verdünnungseffekt).

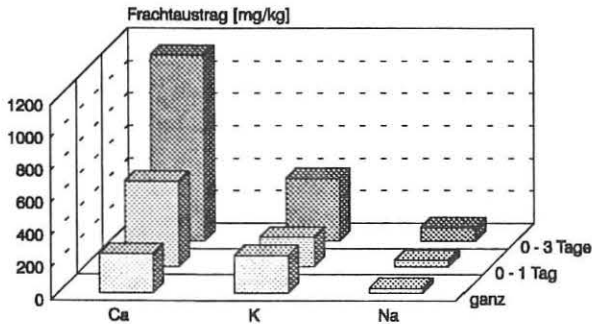


Bild 6: Vergleich Frachtaustrag Trogverfahren : Durchströmzelle (SpB SZ 2)

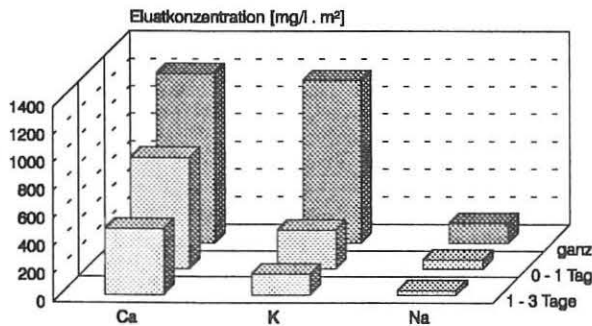


Bild 7: Vergleich Eluatkonzentration Trogverfahren : Durchströmzelle (SpB SZ 2)

5. Baupraktische Schlußfolgerung

Wie die Auslaugversuche an Spritzbetonproben gezeigt haben, stehen verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, um das Auslaugverhalten von Spritzbeton möglichst gering bzw. auf einem Niveau ähnlich dem von herkömmlichem Beton zu halten:

- Verwendung von neuentwickelten Bindemitteln bzw. Spritzzementen
- Verwendung von latent hydraulischen Zusatzstoffen
- Verwendung von Siliziumpulver
- Verwendung von umweltneutralen Beschleunigern

Ein Überblick dazu wird in Bild 8 gegeben. Durch die Verwendung von neuentwickelten Spritzzementen werden Auslaugwerte wie für normalen Beton erreicht. Die umweltneutralen Beschleuniger auf Basis von Aluminiumhydroxid bzw. in Kombination mit reaktiven Sulfaten sind keine hochalkalischen Stoffe wie die Beschleuniger auf Natrium- bzw. Kalium-Aluminat-Basis, können folglich auch nicht bei Hautkontakt zu Verätzungen führen, und bieten außerdem den Vorteil, daß neben einer sehr guten Frühfestigkeitsentwicklung kein Festigkeitsabfall mit zunehmendem Alter auftritt /9/. Außerdem sollte darauf geachtet werden, einen möglichst dichten und rissefreien Spritzbeton (z. B. durch Zugabe von latent hydraulischen Stoffen) herzustellen, da dadurch die für eine etwaige Auslaugung durch anstehende Wasser zur Verfügung stehende Oberfläche minimiert wird.

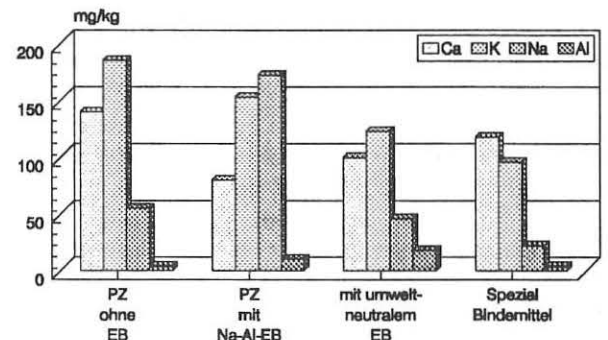


Bild 8: Auslaugverhalten von Spritzbeton ohne Beschleuniger, von Spritzbeton mit Beschleuniger auf Natrium-Aluminat-Basis, von Spritzbeton mit umweltneutralem Beschleuniger und von Spritzbeton, hergestellt mit Schnellzement

6. Zusammenfassung

Die mittels Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 durchgeführten Auslaugversuche an Spritzbetonproben haben gezeigt, daß die auslaugbaren Anteile sehr wesentlich von dem verwendeten Zement und auch den verwendeten Zusatzmitteln abhängen. Die Zugabe eines herkömmlichen Erstarrungsbeschleunigers auf Natrium-Aluminat-Basis hat zur Folge, daß der Natrium-Anteil im Eluat stark zunimmt, während für Calcium und Kalium etwas geringere Werte als für Proben ohne Beschleuniger gemessen werden. Auch das Alter der Spritzbetonproben hat einen Einfluß auf das Auslaugverhalten, wobei eine Abnahme des Frachtaustrages für 56 Tage alte Proben von ca. 20 - 25 % gegenüber 7 Tage alten Proben festgestellt wurde.

Für eine Verminderung des Frachtaustrages bei Auslaugung von Spritzbeton sollte einerseits getrachtet werden, Zemente mit niedriger Eluierbarkeit (wie z.B. neu entwickelte Schnellzemente) zu verwenden. Andererseits sollten auch nur gering eluierbare Zusatzmittel (wie z.B. umweltfreundliche Beschleuniger) für die Herstellung von Spritzbeton angewendet werden. Außerdem bieten sich latent hydraulische Zusatzstoffe und Siliziumpulver zur Verbesserung der Dichtigkeit und Einbindung von Kalkhydrat an. All diese Maßnahmen sollten letztendlich dazu führen, daß durch Auslaugung von Spritzbeton keine Beeinflussung des Grundwassers durch erhöhten Salzaustrag und erhöhte Alkalität auftreten kann.

Der Vergleich von Elutionen an Spritzbetonproben mit unterschiedlichem Aufbruchgrad mittels Trogverfahren hat gezeigt, daß mit zunehmender Oberfläche, die pro Gewichtseinheit zur Auslaugung zur Verfügung steht, auch die Frachtausträge stark steigen. Die Zunahme der ausgelaugten Frachten ist weder für das Calcium noch für Kalium und Natrium unmittelbar mit der Zunahme an Oberfläche korrelierbar.

Dies zeigte sich auch im Vergleich mit Ergebnissen von Elutionen, die mittels einer Durchströmungszelle an der TU München durchgeführt wurden.

Werden hingegen die Oberflächen der eluierten Spritzbetonproben berücksichtigt und die Eluatkonzentrationen darauf bezogen (Einheit $\text{mg}/\text{l}\cdot\text{m}^2$), so weist das Trogverfahren höhere Werte auf als das Verfahren mittels Durchströmungszelle. Es scheint, daß mittels Trogverfahren eher ein Potential an auslaugbaren bzw. durch ein "stehendes" Wasser auslaugbare Konzentrationen ermittelt wird. Wie und in welchen Zeitabständen diese Konzentrationen beim Auftreten einer Strömungsgeschwindigkeit (Auslaugung mittels Durchströmungszelle) ausgetragen werden, scheint von der Geschwindigkeit selbst, aber auch von der zur Auslaugung zur Verfügung stehenden Wassermenge abhängig zu sein.

Unabhängig von den bei den verschiedenen Auslaugverfahren festgestellten Unterschieden hinsichtlich der Eluatkonzentrationen wird mit keinem dieser Tests eine Vorhersage von tatsächlich in der Praxis auftretenden Wasserkonzentrationen möglich sein. Mit beiden Testverfahren läßt sich jedoch feststellen, ob und inwieweit eine erhöhte Auslaugung auftritt. Gerade dies ist eine wichtige Forderung an ein Aus-

laugverfahren. Das Trogverfahren ist sicherlich wesentlich einfacher durchzuführen als eine Auslaugung mittels Durchströmungszelle. Es kann jedoch nicht einen zeitlichen Verlauf der ausgelaugten Konzentrationen wiedergeben. Die Entscheidung, ob eine erhöhte Eluierbarkeit einer Komponente auftritt oder nicht, muß letztendlich über vorgegebene Grenzwerte, die sich aus Erfahrungswerten in Verbindung mit Vorschriften zur Wasserreinhalteung zusammensetzen werden, geschehen. Dabei würde sich, bei Betrachtung der Eluatwerte, ein Trogverfahren nach ÖNORM S 2072 als einfaches Instrumentarium anbieten.

7. Literatur

- /1/ **Schießl, P.:**
Umweltverträglichkeit von zementgebundenen Baustoffen, Forschungsbericht Nr. F 36/6 vom 20. 9. 1991 des Institutes für Bauforschung der TH Aachen.
- /2/ **Rechenberg, W.; Spanka, G.:**
Verfahren zur Prüfung des Auslaugverhaltens zementverfestigter Stoffe, RILEM-Workshop: Auslaugverhalten von Beton und zementgebundenem Material, Juni 1992, Wien. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie, Heft 42.
- /3/ **ÖNORM S 2072:**
Eluatklassen (Gefährdungspotential) von Abfällen, Ausgabe vom 1. Dezember 1990, Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- /4/ **Breitenbücher, R.; Springenschmid, R.; Dörner, H. W.:**
Verringerung der Auslaugbarkeit von Spritzbeton im Tunnelbau durch besondere Auswahl von Zementen und Betonzusätzen, Beton-Information 1-92, BRD.
- /5/ **Saxer, A.; Kusterle, W.; Lukas, W.:**
Der Einfluß von Silicafume auf das Reaktionsverhalten von Zement. In: Tagungsband Microsilica in der modernen Betontechnologie, Technische Akademie Konstanz und Elkem, 1991.
- /6/ **Private Mitteilung:**
Ergebnisse wurden nicht veröffentlicht.
- /7/ **Breitenbücher, R.:**
Shotcrete and Environment - New Developments. In: Tagungsband Sprayed Con-

crete, 18. - 21. 10. 93, Fagernes, Norwegian
Concrete Association, Oslo 1993.

/8/ **Mayer, L.:**
Beton - keine Gefahr für Boden und
Grundwasser, Veröffentlichung der Philipp

Holzmann AG nach einem Vortrag auf dem
Deutschen Betontag 1993, Berlin.

/9/ **Kusterle, W.:**
Regulating the Strength Development of
Shotcrete, wie /7/.

