
Bindemittel- und Verfahrenstechnologie von modernem Spritzbeton

SPRAY CEMENT AND PROCESS TECHNOLOGY WITH REGARD TO STATE-OF-THE-ART SHOTCRETE

KLAUS EICHLER

Im vorliegenden Beitrag wird die aktuelle Bindemittel- und Verfahrenstechnologie von modernem Spritzbeton als Sicherungselement im Fels- und Tunnelbau sowie deren Auswirkungen auf Mensch und Umwelt beschrieben.

Insbesondere werden die auftretenden Reaktionsmechanismen der Erstarrungs- und Erhärtungskinetik der verschiedenen Stoffsysteme erläutert sowie auf die wesentlichen Merkmale dergleichen eingegangen.

Daneben wird eine Definition des umweltgerechten Spritzbetons vorgestellt und eine Umweltbilanz Spritzbeton beispielhaft vorgenommen; auch wird auf das Wirtschaftskreislaufgesetz und dessen Bedeutung für den Baustoffeinsatz bei untertägigen Versorgungs- und Verkehrswegen hingewiesen.

Abschließend werden einige kritische Anmerkungen zu den im Moment gängigen Anforderungsprofilen in den Leistungsbeschreibungen für Spritzbeton vorgenommen und andere Möglichkeiten aufgezeigt.

The present paper describes the state-of-the-art spray cement and process technology with regard to sprayed concrete as a support measure in tunnelling, as well as the implications for human beings and the environment.

In particular, the reaction mechanisms in terms of initial setting and hardening kinetics of the different material systems will be described and the essential characteristics be pointed out.

In addition, the definition of an ecologically desirable shotcrete will be presented and the current environmental situation will be summed up based on a few prominent examples. Moreover, the economic recycling law and its significance for the use of construction materials in underground supply and traffic routes will be discussed.

Finally, the currently common tender specifications for shotcrete will be reviewed critically, and alternative approaches be pointed out.

1. Einleitung

Moderne und leistungsfähige Verkehrsweg (Strassen- und Schienenverkehr) sind ohne Tunnelbauwerke nicht realisierbar; sie stellen jedoch einen Eingriff in die Natur und Umwelt dar. Beim Bau dieser Projekte standen bislang nur bautechnische Anforderungen und Eigenschaften im Zuge der Vortriebsicherung im Vordergrund. Als Sicherungselement nach dem Ausbruch ist Spritzbeton vielfach zu einem unverzichtbaren Baustoff geworden. Das Anforderungsprofil umfaßt schnelle und hohe Frühfestigkeiten, sowie zielsicher erreichbare Endfestigkeiten; weitere Anforderungen wie dichtes Gefüge, hohe Widerstandsfähigkeit, sowie Dauerhaftigkeit u.a. sind oft nur von untergeordneter Bedeutung.

Auslaugungserscheinungen (Calciumcarbonatausfällungen, erhöhte Alkali-Ionenkonzentration (Na, Ka)) von Spritzbetonschalen, verursacht durch anstehendes Bergwasser, haben im Zuge der allgemeinen Sensibilität gegenüber Baustoffen und Bauverfahren u.a. auch beim Spritzbeton zur Forderung nach Umweltverträglichkeit geführt.

Künftig müssen auch Umweltbelange (Ökologie, Arbeitshygiene) bei der Planung, beim Bau und beim Betrieb von Tunnelbauwerken bzgl. Boden, Luft, Wasser und Mensch verstärkt berücksichtigt werden; dies bedeutet u.a. Vermeidung bzw. Re-

duzierung von Staub und Materialverlusten (Rückprall, Restmengen), von hoch alkalischen Aerosolen und von Auslaugungen. Daneben müssen bei Baumaßnahmen respective bei Tunnelbauprojekten, die Forderungen des Wirtschaftskreislaufgesetzes erfüllt werden, d.h. z.B. Tunnelausbruch, sofern geeignet, muß aufbereitet und unmittelbar dem Baustoffeinsatz bei selbigem Objekt zugeführt werden.

Aus dem künftigen Anforderungsprofil ergibt sich für den umweltgerechten/umweltneutralen Spritzbeton folgende Definition:

Umweltgerechter Spritzbeton beinhaltet die verbesserten, umweltneutralen Eigenschaften von Spritzbeton bezüglich den Arbeitsbedingungen und des Umweltbelastungspotentials beim Bau und Betrieb von Spritzbetonbauteilen, insbesondere von Spritzbetonschalen im Tunnelbau. Parameter sind die Alkalität der Werkstoffe, die Staub- und Aerosolentwicklung, das Rückprall- und Auslaugungsverhalten und die Verwertung von Ausbruchgestein zum Erhalt natürlicher Ressourcen und zur Schonung von kostbarem Deponieraum; dabei müssen Eigenschaften und Werte in der Größenordnung von Normalbeton erreicht werden, dessen Umweltneutralität allgemein anerkannt ist (z.B. Trinkwasserbehälter aus Beton).

Diesbezüglich leisten die neuen Bindemitteltechnologien sowie die neuen Verfahrenstechniken einen merklichen Beitrag.

Verfahren	Trockenspritzverfahren			Naßspritzverfahren
	Trocken		(Natur-) Feucht	Naß
Zuschlag				
Bindemittel	Typ HSC	Typ LSC/Typ MSC	Typ LSC/Typ MSC	Typ HSC
Beschleuniger	keinen BEAF pulverförmig BEAH pulverförmig	nicht erforderlich	nicht erforderlich	keinen
Mischungsort	Trockenbetonwerk		Vorort: Typ PFT Typ Mobilcrete Typ Stabilator Typ Rohrdorf	Frischbetonwerk
Mischungsart	Zwangsmischer		Durchlaufmischer Schlauchmischung	Zwangsmischer
Bereitstellungsgemisch	Trockenbeton		Erdfeuchter Beton	Frischbeton
Förderart	Dünnstrom		Dünnstrom	Dichtstrom
Fördermaschine	Rotormaschine Spritzautomat Druckbehälter	Meyco, Aliva SBS Rombold	Rotormaschine Spritzautomat	Kolbenpumpe–Top Shot (Schwing) Kolbenpumpe–PushOverSystem (Meyco) Schneckenpumpe–Betojet (PM)
Benetzungstechnik Beschleunigungstechnik	Normaldüse Ringraumdüse Hochdruckdüse Vorbenetzungsdüse	Meyco, Aliva DMT SBS Rombold, Kusterle	Normaldüse Ringraumdüse Hochdruckdüse Vorbenetzungsdüse	Turboinjektordüse Meyco Robotdüse Betojetdüse
Zugabe in der Düse	Wasser Wasser + BE flüssig (AF, AA, AH)	Wasser	Wasser	Luft + BE flüssig (AF, AA, AH)

Tab. 1: Spritzbetontechnologie im Überblick

2. Spritzbetontechnologie

Moderne Spritzbetontechnologie, d.h. Bindemittel- und Verfahrenstechnologie läßt sich z.Z. wie folgt darstellen (vgl. Tab. 1).

2.1 Bindemitteltechnologie

Unter der Bindemitteltechnologie wird hier das Zusammenwirken von Erstarrungsbeschleuniger, Spezialverzögerer und Portlandzement sowie die daraus resultierende Erstarrungs- und Erhärtungskinetik nebst deren Steuerung/Beeinflussung verstanden; gleiches gilt für die Spritzbetonzemente, bei denen gezielt in die Kinetik eingegriffen wird [1] und deren Vorteil im gänzlichen Verzicht von Erstarrungsbeschleunigern liegt. Spritzbetonzemente sind i.d.R. hydraulische Bindemittel auf der Basis Portlandzementklinker; nach [2] werden 2 Typen von Spritzbetonzementen unterschieden: Typ LSC (Low Sulfat Content) mit einem Sulfatgehalt kleiner 1,0 M-% und Typ MSC (Medium Sulfat Content) mit einem Sulfatgehalt zwischen 1,0 M-% und 2,5 M-%. Im Vergleich hierzu gehört ein Normzement zur Kategorie Typ HSC (High Sulfat Content) mit einem Sulfatgehalt von i.d.R. 3,0 - 4,0 M-%.

2.2.1 Hydratation von Portlandzement

Portlandzement besteht primär aus den vier Klinkerphasen Tricalciumsilikat, Dicalciumsilikat, Tricalciumaluminat, Tetracalciumaluminatferrit sowie Calciumsulfat (Gips) als Erstarrungsregler. Durch die Optimierung des Sulfatträgers (Hydratstufen, Mengenverhältnisse) kann erreicht werden, daß ein Zement - in Abhängigkeit seiner Klinkerkinetik - gutmütig und zuverlässig mit allen Beschleunigertypen reagiert, unabhängig vom Spritzverfahren.

Die Hydratationsabfolge der Klinkerphasen ergibt sich qualitativ zu



wobei das C_3A bzgl. des Erstarrens und C_3S bzgl. des Erhärtens jeweils eine Schlüsselfunktion einnehmen.

Die Hydratation von Portlandzement beruht auf einem komplexen System von chemischen Reaktionen zwischen den einzelnen Klinkerphasen und dem Anmachwasser. Die dabei sofort mit dem Wasser reagierende Oberflächenschicht der einzelnen Zementkörner verwandelt dieses in eine gesättigte bis übersättigte Kalkhydratlösung mit einem pH-Wert über 12, aus der dann Hydratationsprodukte auskristallisieren.

Zunächst entstehen feine dünne und kurze Ettringit-Kristalle (noppenförmig), die sich auf der Zementkornoberfläche befinden und noch praktisch keine Festigkeit besitzen (Bild 1) - im Gegensatz zu den ohne Sulfatzusatz sofort entstehenden Aluminathydraten (Bild 2) - und gewährleisten somit die Verarbeitbarkeit. Das normgemäße Erstarren des Zementleims beginnt 1 - 3 Stunden nach dem Anmachen durch eine Rekristallisation dieser Ettringitkristalle, wobei die anfänglich gebildeten größeren Kristalle weiterwachsen und die kleinen sich auflösen. Diese größeren Ettringit-Kristalle können dann den Zwischenraum zwischen den Zementpartikeln überbrücken und rufen auf diese Weise die erste Verfestigung hervor. Schließlich reagiert der gebildete Ettringit in Gegenwart von Wasser, Calciumhydroxid und Aluminat und wandelt sich in Monosulfat um.

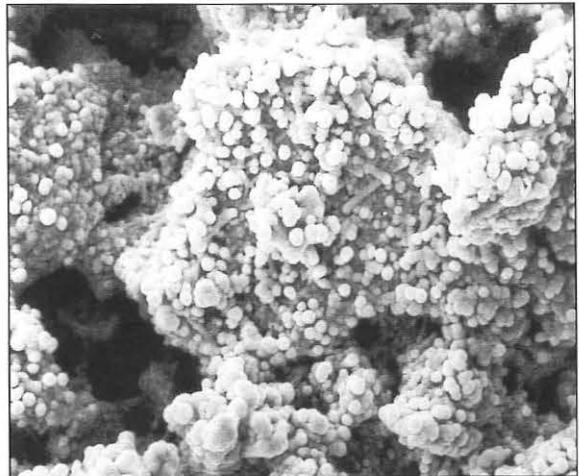


Bild 1: Optimaler Sulfatträger und -gehalt, abgestimmt auf die Klinkerkinetik

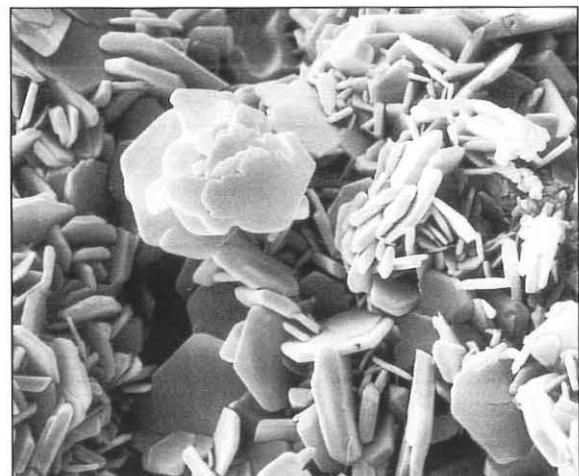


Bild 2: Calciumaluminathydrat (Spritzbetonzemente)

Parallel zur Rekristallisation des Ettringits beginnt das Aufbrechen der Calciumsilikathydratschicht;

dadurch ist die Kristalloberfläche an solchen Stellen dem Wasser unmittelbar zugänglich und bildet sofort neues Calciumsilikathydrat, das schließlich zu faserigen CSH-Partikeln wächst und zusammen mit Ettringit ein Grundgefüge mit weitreichenden Verstrebungen bildet. Dieser Vorgang kann bis zu 24 Stunden dauern und danach beginnt der eigentliche Erhärtungsprozeß.

Wenn auch Erstarrungs- und Erhärtungsprozesse ineinander übergehen und theoretisch nicht scharf trennbar sind, so bedeutet trotzdem rasche Erstarrung nicht automatisch rasche Erhärtung und umgekehrt.

Wie bereits erwähnt, ist Calciumsulfat bei der Hydratation von Portlandzement beteiligt; es wird in Form von Anhydrit, Gips und/oder Halbhydrat zugesetzt. Die Zugabemenge richtet sich u.a. nach dem C_3A -Gehalt und der Feinheit des Portlandzementklinkermehls und gewährleistet i.d.R. daß der Beginn des Erstarrens frühestens nach 1 Stunde beginnt. Somit sind die Erstarrungszeiten durch den Sulfatgehalt beeinflussbar, jedoch nicht gezielt zeitlich steuerbar [Bild 3] [3], d.h. oberhalb eines kritischen Sulfatgehaltes liegt ein Normzement vor, unterhalb ein "Schnellbinder", dessen Erstarrungsverhalten nicht exakt steuerbar ist.

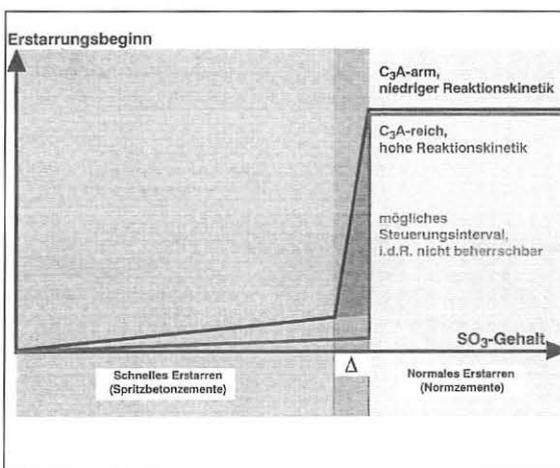


Bild 3: Erstarrungsverhalten von Portlandzement in Abhängigkeit vom Sulfatgehalt

Ein schnelles Erstarren und Erhärten hängt nicht nur vom Tricalciumaluminat- und Sulfatgehalt ab, sondern auch von der Klinkerkinetik, die maßgeblich durch Alkalien bestimmt wird. Der Einfluß der Alkalien auf das Erstarrungsverhalten wird allerdings vom Sulfat (-gehalt und -träger) beeinflusst; u.a. wirkt sich der Sulfatisierungsgrad auf das Erstarren erst bei einem K_2O -Anteil von größer 1,0 aus.

In der praktischen Anwendung von Zement üben auch die Verarbeitungstemperatur nebst Materialtemperatur, der Wassergehalt und die Feinheit u.a. einen Einfluß auf das Erstarren und Erhärten von Portlandzement aus.

2.2.2 Portlandzement und Beschleuniger

Beschleuniger sollen ein rasches Erstarren des Zementleims bzw. des Spritzbetons bewirken und zu einer beschleunigten Fertigkeitsentwicklung in den ersten Stunden führen, ohne daß dabei die Endfestigkeiten abfallen.

Um die Hydrationskinetik deutlich zu beschleunigen, muß die Löslichkeit der Verbindungen, die an der Ettringit-, der CAH- und CSH-Bildung beteiligt sind, beeinflusst werden, d.h. es muß Einfluß genommen werden auf die Löslichkeit von Calciumhydroxid, von Calciumsulfat und von Calciumaluminat, sowie ggf. von einzeln vorhandenen Alkaliverbindungen und/oder das Angebot von reaktiven Ionen erhöht werden.

In diesem Beitrag werden jedoch im folgenden nur die neuen Beschleunigertypen kurz beschrieben; eine umfassende Darstellung erfolgte in [3].

Ein in seinen technischen Eigenschaften verbessertes Wasserglas sind die polymervergüteten Silikate, bei denen durch Zugabe von u.a. Dispergiermittel (Polymer) die Viskosität deutlich herabgesetzt wird. In der praktischen Anwendung bedeutet dies, daß das polymermodifizierte Silikat in seiner physikalischen/chemischen Wirkung dem von konventionellen Wasserglas nahezu entspricht, die gewünschten Eigenschaften allerdings bei deutlich geringeren Dosiermengen aufgrund der geringeren Viskosität und der damit besseren Benetzungswirkung erzielt werden. Polymervergütete Silikate gehören zu den alkaliarmen Beschleunigern, wenn ihr Alkaligehalt kleiner 8,5 M-% beträgt.

Zu den alkalifreien Beschleunigern gehören die Produktvarianten Aluminiumhydroxid und Aluminiumsulfat. Beim Aluminiumhydroxid wird angenommen, daß dieses mit dem Calciumhydroxid und den Alkalien (KOH bzw. NaOH) aus dem Zement reagiert und dann in Wechselwirkung mit dem Sulfat tritt. Da insbesondere die Alkalien eine wesentliche Rolle spielen wird verständlich, weshalb dieser Beschleunigertyp in seinem Wirkungsgrad zementabhängig ist; letzteres wird zusätzlich durch die Art der Sulfatträger/Sulfatträgerkombination des Zementes verstärkt, d.h. der Wirkungsgrad ist u.a. auch von der Löslichkeit des Sulfats stark abhängig.

Die Wirkung des Aluminiumsulfates ist erfahrungsgemäß weniger zementabhängig; allerdings ist für eine befriedigende Beschleunigung auch eine wesentlich höhere Dosierung notwendig. Der beschleunigende Effekt beim Aluminiumsulfat dürfte auf der Bildung von großen Ettringitmengen (Bild 4) beruhen, die auch die Zwischenräume zwischen den Zementkörnern ausfüllen und überbrücken.

Inwieweit die relativ großen Mengen an eingebrachtem Sulfat sich auf die Dauerhaftigkeit auswirken, ist im Moment noch nicht ausreichend untersucht, weshalb bei kritischen Einsätzen entsprechende Sorgfalt und Sachverstand geboten sind. Die beiden letztgenannten alkalischen Beschleuniger setzen die Endfestigkeit des Spritzbetons im Vergleich zum unbeschleunigten Beton nicht herab.

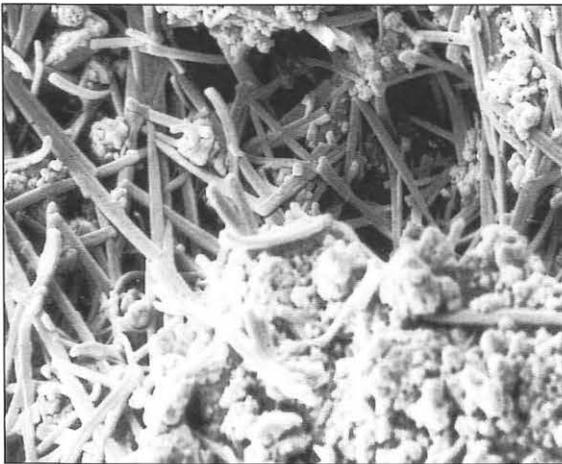


Bild 4: Längsprismatischer Ettringit (BEAF)

2.2.3 Portlandzement und Verzögerer

Im Zuge der Optimierung des Naßspritzbetons wurde eine Produktreihe entwickelt, durch deren Einsatz Restbetonmengen und Verlustmengen durch Reinigung der Pumpleitungen bei Vortriebsstillständen der Vergangenheit angehören. Das neue Verzögerungssystem auf Basis Carboxyl/Phosphorsäure wirkt nicht nur auf das Zementkorn (vgl. konventionelle Verzögerer), sondern tixotropiert u.a. das Wasser, d.h. das Gemisch aus Wasser und Fließmittel wird derart tixotrop, daß es so "unbeweglich" wird und dadurch nur noch geringfügig das Zementkorn benetzen kann. Der andere Teil des Wirkstoffes haftet am Zementkorn. Wird anschließend in dieses System kinetische Energie (Mischen/Pumpen) eingebracht, wird der Frischbeton - neben dem Wasser - wieder beweglich und der beim Spritzvorgang zugeführte Beschleuniger kann ohne nennenswerten Mehrverbrauch die Schutzschicht um die Zementkörner aufbrechen und das System beschleunigen.

2.2.4 Spritzbetonzemente

Spritzbetonzemente sind i.d.R. Portlandzemente mit einem für den Anwendungsfall Spritzbeton im Trockenspritzverfahren optimierten Sulfatgehalt. Da, wie bereits erwähnt, die Steuerung der Erstarrungs- und Erhärtungskinetik alleine über den Sulfatgehalt nicht möglich ist, werden zusätzlich Optimierungskomponenten benötigt. Diese können Alkalien, Aluminiumoxid/-hydroxid, Feinstklinkermehl, hochreaktive Kieselsäure u.a. sein; als Korrekturstoffe stehen z.B. Flugaschen, HS-Klinkermehl, Feinsthüttensand/-hochofenmehl (England), sowie weitere chemische Grundsubstanzen zur Verfügung.

Die Verwendung von Additiven für gleichbleibende Spritzbetonzementeigenschaften sind notwendig, weil die mineralogischen Schwankungen im Rohmehl respective im Klinkermehl nicht korrigiert werden (z.B. durch selectives Abbauen des Ausgangsmaterials) und diese Schwankungen sich besonders auf das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten in der Frühphase auswirken; das bedeutet Schwankungen im Zehntel vom Alkalien- und Tricalciumaluminatgehalt verändern das Frühfestigkeitsverhalten im Stundenbereich nachhaltig, wobei bei diesen komplexen Vorgängen auch noch die Löslichkeit des Sulfatträgers nebst seiner Dosierhöhe eine Rolle spielen.

Um den Gehalt an Additiven beim Spritzbetonzement gering zu halten, ergeben sich für das Klinkermehl Mindestgehalte beim Tricalciumaluminat von 10,5 M-% (besser 11,0 M-%), beim K_2O von 1,0 M-%, beim Al_2O_3 von 6,0 M-%, sowie für die Sulfatträgerkombination ein Gehalt zwischen 1,0 und 2,0 M-%.

2.2.5 Spritzbetonzemente und Rückprallminderer

Beim Trockenspritzverfahren konnte in Sachen Rückprallminimierung nachgewiesen werden, daß durch geeignete Rückprallminderer, Rezepturen mit 400 kg/m^3 Zement (analog dem Naßspritzbeton) und W/Z-Werten entsprechend dem Naßspritzbeton bei Verwendung von naturfeuchten Zuschlägen (bis ca. 4 M-% Eigenfeuchte) und Spritzbetonzement Rückprallwerte erreicht werden, die dem Naßspritzverfahren nahezu gleichwertig sind. Dabei korrelieren Rückprall und Frühfestigkeitskinetik, d.h. je geringer die Frühfestigkeit, desto geringer der Rückprall [4].

2.3 Verfahrenstechnologie

Die Spritzbetonbauweise bietet mehr Möglichkeiten zur Mechanisierung als viele andere Bauverfahren.

Die Maschinenpalette der Baumaschinenindustrie reicht von der Spritzmaschine mit manueller Beschickung und Düsenführung bis zum Spritzautomaten und Spritzroboter; durch variable Leistungspakete können Förder- und Spritzleistung den jeweiligen Baustellenverhältnissen wirtschaftlich angepaßt werden.

2.3.1 Trockenspritzverfahren

Die klassischen und bekannten Trockenspritzmaschinen werden hier nicht behandelt und als bekannt vorausgesetzt. Im Zuge der Entwicklung von Spritzbetonzementen war eine neue Herstellungs- und Verarbeitungstechnik von Bereitstellungsgemischen notwendig, insbesondere bei Verwendung von feuchten Zuschlägen.

Zunächst wurde die Druckbehältertechnik aus dem Bergbau für Trockenbeton wiederentdeckt und auf die Bedürfnisse der Vortriebssicherung im Tunnelbau entsprechend umgearbeitet. Der Vorteil liegt in einem kontinuierlichen Materialtransport zur Düse. Diese Technik erfordert in Kombination mit Spritzbetonzementen Materialfeuchten von kleiner 0,1 M-%. Zur Verarbeitung von naturfeuchten Zuschlägen (Eigenfeuchte kleiner 4 M-%) mußte eine neue Verfahrenstechnologie entwickelt werden [5]; Ausgangsstoffe (Spezialbindemittel, feuchter Zuschlag) werden getrennt bevorratet und durch volumetrische/gravimetrische Dosiervorrichtungen bei Bedarf einer durchlaufenden Mischzone zugeführt und sofort anschließend mittels klassischer Maschinenteknik gefördert und appliziert (z.B. Trixer, Mobilcrete). Eine andere Entwicklung stellt der Maschinentyp Trimaster dar; oberhalb der Rotortaschenöffnung, aber innerhalb des Zuschlagvorratrichters wird über eine stufenlos regelbare Dosierschnecke, die ihrerseits nach oben geschlossen ist, Bindemittel in den laufenden Befüllvorgang der Rotortaschen gefördert. Eine Materialhomogenisierung findet im Schlauch statt. Untersuchungen am BMI haben gezeigt, daß bei volumetrischer Dosierung von Zuschlag und Bindemittel Spritzbetone hoher Güte hergestellt werden können; die Schwankungsbreite der Zusammensetzung des Bereitstellungsgemisches wird der durch Rückprall veränderten Betonzusammensetzung gleichgesetzt [6].

Im Zuge der Verbesserung des Rückprall- und Staubverhaltens von Spritzbeton beim Trockenspritzverfahren wurde die Ringraumdüse entwickelt [7]; das Besondere dieser Düse liegt im Inneren, wo ein Anströmkörper eingebaut ist und dadurch den Massenstrom von einem Kreisquerschnitt in einen Ringquerschnitt (Querschnittsfläche bleibt erhalten) über-

führt. Damit wird ein günstiges Oberflächen-Querschnitt-Verhältnis erreicht, d.h. Verkürzung der Benetzungsstrecke.

2.3.2 Naßspritzverfahren

Beim Naßspritzverfahren ist als innovative Neuentwicklung der Maschinentyp Suprema zu nennen. Von der Bauart ist sie eine Doppelkolbenpumpe mit elektronischer Steuerung; d.h. das elektronisch gesteuerte Push-Over-System gewährleistet ein konstantes Mischungsverhältnis zwischen Beschleuniger und Spritzbetongemisch trotz diskontinuierlicher Materialförderung und konstanter Beschleunigerzugabe. Im Bereich der Düsenteknik gibt es keine wesentlichen Weiterentwicklungen.

3. Anforderungen und Eigenschaften von Spritzbeton

Da die bautechnischen Anforderungen von Spritzbeton hinreichend bekannt sind, wird hier nur auf die umweltrelevanten Anforderungen eingegangen, insbesondere auf das Auslagverhalten von Spritzbeton. Für die qualitative (im Vergleich der Verfahren) und quantitative (im Vergleich innerhalb der Verfahren) Beurteilung stehen folgende Verfahren zur Auswahl [1,8]

Durchflußzelle	Verfahren TU München
Umströmungsplatte	System Holzmann
Trogverfahren	ÖNORM S 2072
Umströmungsanlage	Ruhr-Universität Bochum

Untersuchungen haben gezeigt, daß unabhängig vom gewählten Verfahren annähernd gleiche Ergebnisse im rel. Vergleich erzielt werden, d.h. Vergleich von Versuchsserien der verschiedenen Verfahren. Quantitative Vergleiche (Auslagungsrate pro Zeiteinheit) sind nur innerhalb der einzelnen Verfahren möglich.

Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß insbesondere die Probekörpergröße (Verhältnis Oberfläche/Volumen) einen nennenswerten Einfluß auf das Auslagverhalten eines Körpers hat [9] und somit die Interpretation der Ergebnisse obiger Prüfverfahren im Hinblick einer Beurteilung auf die realen Verhältnisse äußerst schwierig ist.

Abschließend kann festgestellt werden, daß Schadstoffe und eluierbare Elemente, wie z.B. Alkalien der alkalhaltigen Beschleuniger, nachweisbar ausgelaugt werden.

Aktuelle Anforderung	
Spritzbetonzement / Zement	< 1.5 M% Na ₂ O-Äquivalent
Beschleuniger	< 1.0 M% Na ₂ O-Äquivalent
Mengenbilanz	
Spritzbetonzement (400 kg/m³): reizend	0.5 M% Na ₂ O-Äquiv. → 2.000 gr ≅ Na-Zement 1.0 M% Na ₂ O-Äquiv. → 4.000 gr ca. 90% der Zemente 1.5 M% Na ₂ O-Äquiv. → 6.000 gr Grenzwert s. o.
Beschleuniger AF (8 – 12 M%): keine Kennzeichnung	< 1.0 M% Na ₂ O-Äquiv. → Δ 400 gr <small>10 M%</small>
Beschleuniger AA (4 – 6 M%): reizend	< 8.5* M% Na ₂ O-Äquiv. → Δ 1.700 gr <small>5 M%</small> * Grenzwert nach Zusatzmittelrichtlinie bei alkaliempfindlichem Zuschlag
Beschleuniger AH (4 – 6 M%): ätzend	⊗ 17.5 M% Na ₂ O-Äquiv. → Δ 3.500 gr <small>5 M%</small>
AF = Alkalifrei AA = Alkaliarm AH = Alkalihaltig	

Tab. 2: Umweltbilanz Spritzbeton

Um nun künftig umweltgerechten Spritzbeton verarbeiten zu können, ist es nach Meinung des Autors nicht damit getan, lediglich die Bindemittel und Additive am Gehalt an Alkalien zu begrenzen, sondern richtigerweise eine Höchstgrenze (Gesamtbelastungspotential) von Alkalien festzuschreiben (Tab. 2; Interpretation erübrigt sich). Dies bedeutet allerdings, daß die Alkaliengehalte von Bindemittel und Beschleuniger offengelegt werden müssen (diese Werte können sowieso problemlos in jedem Analysenlabor ermittelt werden). Eine derartige Regelung hätte auch zur Folge, daß Baustoffingenieure und Betontechnologen innovative und wirtschaftli-

che Spritzbetonrezepturen - in Abhängigkeit der Baustellenanforderungen - erarbeiten könnten, was bei der momentanen Situation nicht möglich ist. Wenn man schon versucht, die Gesamtalkalien nicht zu begrenzen - was bei Spritzbeton sinnvoll wäre - dann sollte das Anforderungsprofil an den umweltgerechten Spritzbeton entsprechend den vorhandenen bzw. zu erwartenden Umweltbedingungen angepaßt sein, damit den Ausführenden etwas Spielraum für ingenieurmäßiges Arbeiten in Bezug auf moderne Spritzbetontechnologie respective Verfahrenstechnologie bleibt. Hierzu folgender Vorschlag (Tab. 3).

Umweltbedingung	Sinnvolle Forderung Na ₂ O-Äquivalent [M%]	Arbeitsschutz	Kennzeichnung	Bezeichnung
Berg wasserführend Grundwasser	Zement < 1.5 BE < 1.0	gering	reizend keine	Alkalifreier Spritzbeton
Berg geringfügig wasserführend, ansonsten trocken	Zement < 1.5 BE < 8.5	gering	reizend reizend	Alkaliarmer Spritzbeton
Berg trocken	Zement < 1.5 BE < 8.5	gering	reizend reizend	Alkaliarmer Spritzbeton
	Zement < 1.5 BE > 8.5	hoch	reizend ätzend	Alkalihaltiger Spritzbeton *
aus umweltrelevanten Eigenschaften möglich, aus arbeitshygienischen Eigenschaften abzulehnen *				

Tab. 3: Umweltgerechter Spritzbeton

4. Schlußbemerkung

Wie die Ausführungen belegen, können Spritzbetonarbeiten durchaus umweltgerecht ausgeführt werden. Im Interesse der Volkswirtschaft und der angespannten Finanzlage sollten Bauaufgaben so ausgeschrieben werden, daß sie der Sache (Bautechnik, Umwelt) gerecht und nicht Grenzwerte manifestiert werden, die im Einzelfall richtig sind, aber obigem Gesamtanspruch im allgemeinen nicht genügen.

5. Literatur

- [1] Eichler, K.; Sutej, B.:
Spritzzement - Eigenschaften, Qualitätssicherung, Anwendung. Spritzbeton Technologie, BMI 1993.
- [2] Lukas, W.:
Rückprall- und Staubmodifizierung bei modifizierten Trockenspritzverfahren. Spritzbeton Technologie, BMI 1996.
- [3] Eichler, K.:
Moderne Spritzbetontechnologie - Stand der Technik im Tunnelbau. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels", TAE 1997.
- [4] Eichler, K.:
Rückprallrecycling und Rückprallreduzierung von Spritzbeton beim Trockenspritzverfahren. Dissertation, Universität Innsbruck 1996.
- [5] Lukas, W.:
Verfahren zur Herstellung von Spritzbeton. Patentanmeldung vom 12.11.1991, Österreich.
- [6] Kusterle, W.; Lukas, W.; Pichler, W.:
Volumetrische Dosierung beim Trockenspritzverfahren. Beton 11/95.
- [7] Pier, J.; Micke, H.:
Spritzbeton im Steinkohlebergbau - Neuentwicklungen. Spritzbeton Technologie, BMI 1996.
- [8] Maidl, B.; Tallerek, F.; Rohrbeck, M.:
Prüfverfahren zum Nachweis der Umweltverträglichkeit von Spritzbeton. Bauingenieur 71, 1996.
- [9] Nischer, P.:
Auslaugverhalten von Beton und zementgebundenen Materialien. BFT 12/92.