
30 Jahre Spritzbetontechnologie in Österreich

30 YEARS OF SHOTCRETE TECHNOLOGY IN AUSTRIA

HELMUT HUBER, HARALD LAUFFER, WALTER PICHLER

Das Spritzbetonverfahren wurde bereits 1907 erfunden und in Österreich erstmalig ab 1950 beim Bau des Möllstollens der Kraftwerksgruppe Kaprun als Teil der Stollenauskleidung eingesetzt. Beim 1953 begonnenen Vortrieb für den Druckstollen des Innkraftwerks Prutz-Imst wurde Spritzbeton bewußt als Vortriebssicherung verwendet. Der Weg zum hochwertigen Qualitätsspritzbeton mit der zielsicheren Einhaltung bestimmter Spritzbetoneigenschaften begann erst mit dem Bau der großen Verkehrstunnel in Österreich nach der "Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode" (NÖT) vor etwa 30 Jahren. Der Einsatz von Spritzbeton als wichtiges Sicherungs- und Stützelement fordert eine gezielte Festigkeitsentwicklung schon von den ersten Minuten nach dem Auftrag an sowie eine entsprechende Endfestigkeit und Dauerhaftigkeit. Die Entwicklung von geeigneten, in der Lieferqualität sehr gleichmäßigen Zementen ("Tunnelzemente"), auf den Zement abgestimmte Erstarrungsbeschleuniger, zuerst pulverförmig, später wegen der genaueren Dosierbarkeit und besseren Wirkungsweise flüssig, bis zu den alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern und Spritz-Bindemitteln, die heute einen hohen Grad an Qualität und Dauerhaftigkeit des Spritzbetons gewährleisten, aber auch die Ausarbeitung praxisnaher Regelwerke (ÖBV-Richtlinie "Spritzbeton") erfolgte hauptsächlich in Österreich und ist das Produkt der innovativen Zusammenarbeit der Tunnelbauunternehmungen, der Zement- und Zusatzmittelhersteller sowie der Universitäten, Versuchsanstalten und last but not least der verständigen Bauherrn. Parallel dazu wurde die Geräte- und Verfahrenstechnik weiterentwickelt, so daß wir heute zwischen drei verschiedenen Trockenspritzverfahren und dem Naßspritzverfahren frei wählen können.

The sprayed concrete method was invented as early as in 1907 and first used in Austria from 1950 onwards during the construction of the Möll Gallery (Kaprun Hydroelectric Power Plant) as part of the tunnel lining. During the excavation of the pressure tunnel of the Prutz-Imst Power Plant located on the River Inn, sprayed concrete was first employed as primary support. The development of high-quality shotcrete subjected to strict and clearly defined rules only started with the construction of the large Austrian traffic tunnels according to the New Austrian Tunnelling Method about 30 years ago. The application of sprayed concrete as an essential support measure calls for controlled strength development of the shotcrete starting from the first few minutes after placement, as well as for adequate final strength and durability. The development of suitable cements of uniform supply quality, so-called "tunnel cements", of accelerators adapted to the cement used, initially in powder form, later on because of better dosability and greater effectiveness in liquid form, and finally of alkali-free accelerators and spray cements, which nowadays assure a high degree of quality and durability of the sprayed concrete, and in particular the elaboration of practice-oriented rules and guidelines (e.g., Guideline on sprayed

concrete of the Austrian Concrete Society) focussed mainly on Austria and are the result of the innovative co-operation between tunnelling contractors, suppliers of cement and admixtures, universities, testing institutes and, last but not least, open-minded and competent owners. In parallel, equipment and process engineering were developed further so that nowadays we may choose between three different dry-mix shotcrete methods and the wet-mix sprayed concrete method.

1. Die Bedeutung des Spritzbetons

Die Entwicklung der Spritzbetontechnologie nach dem 2. Weltkrieg ist in Österreich untrennbar mit dem Untertagebau und mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) verbunden. Obwohl das Spritzverfahren schon im vorigen Jahrhundert im Grundsatz erfunden worden war und sich ab 1920 in Europa durchgesetzt hatte, wurde im österreichischen Stollenbau Spritzbeton erstmalig ab 1950 beim Bau des Möllstollens der Kraftwerksgruppe Glockner-Kaprun als Teil der Stollenauskleidung eingesetzt. Als Vortriebssicherung kam Spritzbeton erstmalig beim 1953 begonnenen Druckstollen des Innkraftwerkes Prutzlmst zum Einsatz [1, 2, 3, 4]. Die damals auf Seiten des Bauherrn und der Baufirmen tätigen Ingenieure haben die überraschend günstige Wirkung einer vergleichsweise dünnen Spritzbetonsicherung sofort erkannt und auch eine entsprechende Modellvorstellung über den Wirkungsmechanismus entwickelt. Beim Druckstollen des Salzachkraftwerkes Schwarzach-St. Veit erfolgte erstmalig die Durchörterung einer bündigen Hangschuttstrecke mit Hilfe einer Spritzbetonsicherung.

Die weitere Entwicklung des Gedankengebäudes der NÖT u.a. durch Rabcewicz, Müller und Pacher ebneten den Weg für die Anwendung der Spritzbetonsicherung im Großquerschnitt [5, 6, 7, 8, 9]. In Österreich erfolgte dies erstmalig beim Straßentunnel Massenberg, Leoben (1963 bis 1965).

Entscheidende Weiterentwicklungen erfolgten beim Bau des 6,4 km langen Tauertunnels (1971 bis 1974). Die Durchörterung der Hangschuttstrecke am Nordportal und die Bewältigung des stark druckhaften Gebirges erforderten einen Spritzbeton mit höherer Frühfestigkeit und mit einer guten Endfestigkeit. Um die Zerstörung der relativ dünnen Spritzbetonschale durch die großen Verformungen hintanzuhalten wurde diese durch Längsschlitz (Deformationsschlitz) in Schalenelemente unterteilt und so eine entscheidend erhöhte Verformungsfähigkeit der Spritzbetonsicherung erzielt. Die Spritzbetonsicherung konnte trotzdem im Zusammenwirken mit der Ankerung ihre Aufgabe als Verstärkung des Hohlraumrandes erfüllen.

Die Anwendung der NÖT zur Herstellung von U-Bahn-Stollen im innerstädtischen Bereich mit geringen Überlagen in Frankfurt, Bochum und München (ab 1969) und später in Wien (ab 1983) erforderte die gezielte Herstellung eines Qualitätsspritzbetons mit hohen Früh- und Endfestigkeiten. Die gesicherte Tragfähigkeit der Spritzbetonschale ist bei geringer Überlagerung deshalb von überragender Bedeutung, da mit einer Gebirgsmitwirkung nicht gerechnet werden kann und die Schale die gesamten nachdrängenden Gewichtslasten aus der Überlagerung und einer eventuellen Überbauung mit entsprechenden Sicherheiten aufzunehmen hat.

Der Vortrieb von sehr großen Tunnelquerschnitten für den Bahnausbau, der Neubaustrecke Hannover - Würzburg (ab 1981) und der Westbahn Wien - Salzburg (ab 1990), zum Teil mit geringer Überlagerung, brachte weitere Anstöße zur Weiterentwicklung der Spritzbetontechnologie und der Gerätetechnik.

Ein Verbesserung der arbeitshygienischen Situation in Hinblick auf die Reduktion des Staubanfalles am Arbeitsplatz und die Minimierung des Alkaligehaltes des Spritzbetons (pH-Wert des Bergwassers, Verätzungsgefahr der Mineure) waren in der jüngsten Zeit die wichtigsten Antriebe für Neuerungen.

In Sonderfällen insbesondere für endgültige Stollen und Tunnelauskleidung (Innenschalen) wird Stahlfaserspritzbeton verwendet, wobei die Stahlfaser die Aufgabe der Bewehrungsmatte übernimmt.

2. Die Entwicklung der Spritzbetontechnologie

Die Weiterentwicklung der Spritzbetontechnologie ist in Österreich untrennbar mit dem Großtunnelbau nach der NÖT verbunden und erfolgte wegen der höheren Anpassungsfähigkeit an die meist stark wechselnden Gebirgsverhältnisse bis vor kurzer Zeit fast ausschließlich in Richtung Trockenspritzverfahren.

Im Zuge des Ausbaus der Tauernautobahn wurden 1971 erstmals in der Ausschreibung für den Tauertunnel hohe Anforderungen an die Endfestigkeit des Spritzbeton gestellt (28-Tagefestigkeit $\geq 28 \text{ N/mm}^2$) die in Verbindung mit der für den Bauablauf erfor-

derlichen Frühfestigkeitsentwicklung erstmalig eine zielsichere Spritzbetonherstellung erforderten.

Bis dahin wurde Spritzbeton hauptsächlich zur Erstsicherung in Kraftwerksstollen eingesetzt, wo vor allem ein rasches und problemloses Auftragen auch über Kopf gefordert war. Die Beurteilung der entsprechenden Frühfestigkeitsentwicklung erfolgte mit der "Bergeisenmethode".

Die ersten Untersuchungen an Spritzbetonkernen aus dem Tauerntunnel zeigten erstmals das Problem der Festigkeitsminderung infolge der Zugabe von alkalihaltigen Erstarrungsbeschleunigern. Mit nicht abgestimmten pulverförmigen Zusatzmitteln und handelsüblichen Normzementen mit stark schwankenden Eigenschaften wurden bei einem Festigkeitsabfall von 55 - 70 % gegenüber dem zusatzmittelfreien Nullbeton 28 Tagefestigkeiten von nur 10 - 13 N/mm² erreicht. Eine bedeutende Qualitätssteigerung wurde durch die Entwicklung eines "Tunnelzementes" erzielt, bei dem vor allem eine höhere Gleichmäßigkeit, günstige Mahlfineinheit (Blainwert 3300 - 3800 cm²/g) und entsprechende Frühfestigkeit (1 Tagefestigkeit > 9 N/mm²) gefordert wurde. Die Abstimmung des Erstarrungsbeschleunigers auf diesen Tunnelzement in Verbindung mit Dosieranlagen (Zellenräder) bewirkte eine Reduktion des Festigkeitsabfalls auf 35 % und damit eine Verbesserung der Spritzbetonfestigkeiten auf 24 N/mm² [10]. Die ursprünglich geforderte Festigkeit von 28 N/mm² konnte erst nach 90 Tagen erreicht werden. Zur Berücksichtigung der deutlichen Nacherhärtung des Spritzbetons erfolgt seither die Beurteilung der Spritzbetonfestigkeitsklasse meist erst nach 56 Tagen, im Kraftwerksbau erst nach 90 Tagen.

Die für den Tauerntunnel aufgestellten Anforderungen an den "Tunnelzement" haben sich bei weiteren Tunnelbauvorhaben bestätigt und wurden in dieser Form 1989 in die ÖBV-Richtlinie "Spritzbeton" erstmalig in einem Regelwerk als zusätzliche Anforderungen zur Norm aufgenommen. Besonders bewährt hat sich die Sorte PZ 375 (F) 20 mit 16 - 20 % Flugaschegehalt. Dieser Tunnelzement hat nicht nur ein günstiges Erstarrungsverhalten und günstige Festigkeitsentwicklung, sondern bewirkt wegen seiner hohen Mahlfineinheit infolge der Flugaschenbeimahlung auch eine gute Klebewirkung beim Spritzbetonauftrag mit Verringerung des Rückpralls, ein sehr dichtes Gefüge und geringes Eluierverhalten. Aufbereitete Flugasche als Spritzbetonzusatzstoff wurde erstmalig 1974 beim Bau des Arlbergtunnels [11, 12] eingesetzt. Ein Flugascheanteil von 15 - 18 % im Gesamtbindemittel (410 kg/m³)

brachte eine Erhöhung der zur Beurteilung herangezogenen 56 Tagefestigkeit von 12 % - 15 %. Diese Festigkeitssteigerung wird darauf zurückgeführt, daß die Flugaschereaktion nicht von den erstarrungsbeschleunigenden Zusatzmitteln ungünstig beeinflusst wird und damit auch eine bessere Gefügedichte (Dauerhaftigkeit, Eluierbarkeit) erreicht wird.

Ein nicht nur beim Arlbergtunnel, sondern bei allen Tunnelbaustellen im Alpenhauptkamm auftretendes Problem ist die Festigkeitsleistung der Zuschläge. Bei Verwendung von Alkali-Erstarrungsbeschleunigern muß mit den Zuschlägen im Sieblinienbereich B mit Größtkorn 8 mm oder 16 mm ein Beton mit mindestens 40 N/mm² Druckfestigkeit hergestellt werden, um unter Berücksichtigung des Festigkeitsabfalls die meist geforderte Spritzbetonfestigkeit von 25 N/mm² zielsicher zu erreichen.

Mit der Verwendung eines aluminatarmen, flüssigen Erstarrungsbeschleunigers für einen sulfatbeständigen Spritzbeton wurde bei der Baustelle Bosrucktunnel neben dem Effekt der chemischen Widerstandsfähigkeit auch eine sehr deutliche Ermäßigung des Festigkeitsabfalls auf rund 20 % erreicht [13]. Damit konnte in Verbindung mit den besonders günstigen Zuschlägen ein Spritzbeton B 400 hergestellt werden. Der Einsatz von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern ermöglicht aufgrund der besseren Dosiergenauigkeit und Durchmischung im Spritzbeton eine geringere Zugabe an wirksamen Stoffen (Aluminaten) und damit eine wesentliche Verbesserung der Spritzbetonqualität, aber auch Vorteile beim Arbeitsablauf, die sich vor allem bei dem gleichmäßigen Betrieb des maschinellen Vortriebes beim 20 km langen Wallgaustollen gezeigt haben. Der Nachteil der flüssigen Spritzhilfe, die schlechte Erstarrungsbeschleunigung bei Wasserandrang, kann bei den Sicherungsarbeiten an der Stollenbrust durch eine zusätzliche Beigabe eines pulverförmigen Beschleunigers ausgeglichen werden, ohne daß die Rezeptur verändert und damit der nachfolgende konstruktive Spritzbeton in seiner Endfestigkeit beeinträchtigt wird.

Praktisch alle technologischen Möglichkeiten zur Herstellung eines optimalen Spritzbetons im Trockenspritzverfahren mit Alkali-Erstarrungsbeschleunigung wurden 1984 beim ersten nach der NÖT hergestellten Baulos U6/1 beim Wiener U-Bahn genützt [14, 15, 16, 17]. Mit einem C₃A-freien Zement PZ 375 HS (Contragress), aufbereiteter Flugasche (Flual) und einem aluminatarmen, flüssigen Erstarrungsbeschleuniger wurden bei entsprechender Frühfestigkeitsentwicklung mittlere 28 Tagefestigkeiten

von 39 N/mm^2 bei $3,8 \text{ N/mm}^2$ Standardabweichung erreicht. Die Bindemitteldosierung konnte mit $335/35 \text{ kg/m}^3$ für einen sulfatbeständigen Spritzbeton niedrig gehalten werden. Der C_3A -freie Zement Contragress konnte nach umfangreichen Voruntersuchungen allen Anforderungen des Spritzbetons so gut angepaßt werden, daß er auch noch heute trotz der ungünstigen Voraussetzung des fehlenden C_3A -Anteils einen idealen "Tunnelzement" darstellt. Wegen des geringen wasserlöslichen Aluminatgehaltes unter 10 % und der niedrigen Dosierung von 5 - 5,5 M% (vom Zement) konnte mit dem verwendeten Erstarrungsbeschleuniger der Festigkeitsabfall auf 17 % reduziert werden. Die anfänglichen Probleme mit einer genauen und dem Baustellenbetrieb entsprechenden Dosierung konnten vom Zusatzmittellieferanten mit der Entwicklung einer elektrisch betriebenen Dosierpumpe zufriedenstellend gelöst werden. Für die im Wiener Raum erhältlichen Zuschläge kann der günstige Sieblinienbereich B nach ÖNORM B 3304 gleichmäßig eingehalten werden, wobei sich wegen der Entmischungseigenschaft beim Transport und wegen des Rückpralls beim Auftragen des Spritzbetons zwischen Baustahlgitter wie schon bei anderen Tunnelbaustellen ein Größtkorn von 11 mm als günstig herausgestellt hat.

Beim Vortrieb im innerstädtischen Tunnelbau ist zur Minimierung der Firstsetzung eine exakt eingehaltene Frühfestigkeitsentwicklung erforderlich. Am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck wurden dazu die Prüfverfahren und Festigkeitsanforderungen entwickelt [18, 19]. Die Kriterien des "jungen Spritzbetons" wurden 1989 in die ÖBV-Richtlinie "Spritzbeton" aufgenommen und werden seither weltweit zur Beurteilung der Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons herangezogen.

Die Messung der Festigkeit bis 24 Stunden ermöglicht nebenbei auch eine gute Abschätzung der zu erwartenden Endfestigkeiten, wobei sehr hohe Anfangsfestigkeitsabfall und damit geringe Endfestigkeiten bewirken, während eine gesteuerte Anfangsfestigkeit auch höhere Endfestigkeiten erwarten läßt.

Auf dem Gerätesektor wurden beim U-Bahnbau für das Trockenspritzverfahren neben der verbesserten Dosiereinrichtung für flüssige Erstarrungsbeschleuniger Spritzdüsen entwickelt, die durch Vorbefeuchtung oder durch Aufgabe des Mischwassers mit hohen Drücken eine bessere Durchmischung des Trockenmischgutes mit dem Zusatzmittel - Wassergemisch ermöglichen.

Mit der Spritzbetontechnologie beim Wiener U-Bahnbau wurden technologisch sehr günstige Voraussetzungen zur Herstellung eines qualitätsgesicherten Spritzbetons geschaffen. Aus der Sicht der Arbeitshygiene und Umweltbeeinflussung entsprach aber die Verwendung von alkalischen Erstarrungsbeschleunigern nicht mehr dem Zeitgedanken. Die arbeitshygienischen Voraussetzungen verschlechterten sich sogar Anfang der 90iger Jahre ganz stark, da der Preisdruck auf die Zusatzmittelhersteller zur Verwendung von extrem hochalkalischen Zusatzmitteln und damit zu einer besonderen Belastung des Stollenpersonals führte. Bereits 1993 wurden vom Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck die Möglichkeiten eines umweltverträglichen Spritzbetons aufgezeigt und bereits 1994 bei ersten Baustelleneinsätzen verwirklicht [20, 21, 22, 23]. Für die Herstellung eines umweltverträglichen Spritzbetons stehen 2 Verfahrenstechniken zur Verfügung, die sich in den letzten Jahren unter dem Begriff "Alkalifreie Erstarrungsbeschleunigung" auf praktisch allen österreichischen Tunnelbaustellen durchgesetzt haben und in der Neuauflage der ÖBV-Richtlinie Spritzbeton 1998 als verbindlich für die Herstellung von Spritzbeton mit konstruktiven Aufgaben festgelegt wurde:

den herkömmlichen Trocken- oder Naßspritzbeton unter Verwendung eines alkalifreien Erstarrungsbeschleunigers oder den Trockenspritzbeton unter Verwendung von trockenen oder feuchten Zuschlägen mit einem Spritz-Bindemittel, das die erforderliche Frühfestigkeitsentwicklung in der Regel ohne Zugabe eines Erstarrungsbeschleunigers gewährleistet.

Erste Ansätze der Entwicklung der alkalifreien Erstarrungsbeschleunigung gehen auf Spritzversuche im Jahre 1974 in Amerika zurück. Es wurde dabei ein Zement auf der Basis von Portlandzement, der Calciumflour-Aluminate beinhaltet, verwendet. Die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons im jungen Alter wurde durch das Erhitzen des Anmachwassers gesteuert.

Die Verwendung eines Spritz-Bindemittels mit einer Frühfestigkeitsentwicklung bereits in den ersten Minuten, wie es für die Herstellung eines Spritzbetons zur Gebirgssicherung in Verbindung mit der NÖT erforderlich ist, erfolgte erstmals im Jahre 1985 beim Bau des Kraftwerks "Strassen-Amlach". Als Spritzbindemittel wurde ein Zement der Perlmooser Zementwerke (PSZ 400) verwendet. Es handelte sich hierbei um einen modifizierten Portlandzement bei dem statt der C_3A und C_4AF -Phasen die wesentlich Ca-ärmere Mineralphase C_{12}A_7 vorkommt. Als Zuschlag wurden erdfeuchte Zuschläge verwendet.

Ein Auftragen dieses Spritzbetons in größeren Schichtstärken überkopf, der den Anforderungen an die Frühfestigkeitsentwicklung im Bereich J2 (ÖBV Richtlinie Spritzbeton) entspricht, ist allerdings nur mit Zugabe von alkalischen Erstarrungsbeschleunigern möglich. Aufgrund der geringen Dosierhöhe des verwendeten alkalischen Beschleunigers von 1,5% konnte bereits ein sehr hochwertiger Spritzbeton erzeugt werden.

Schwierigkeiten gab es auch mit der Verfahrenstechnik. Da der PSZ 400 einen Erstarrungsbeginn von wenigen Minuten aufwies, war ein Mischen des erdfeuchten Zuschlags und des Zementes nur vor Ort möglich. Zu Beginn der Spritzbetonarbeiten in "Strassen-Amlach" wurde zur Durchmischung des PSZ 400 mit dem erdfeuchten Zuschlag ein Chargenmischer verwendet, der direkt in den Trichter der Trockenspritzmaschine entleerte. Durch die Vorhydratation während des Mischvorgangs und die Zwischenlagerung im Trichter der Spritzmaschine wurde der Erhärtungsvorgang negativ beeinflusst. Dieses Problem konnte durch die Verwendung eines Durchlaufmischers (Minitrixxer) behoben werden.

Durch die hohen Kosten, die für das Bindemittel (40% teurer als herkömmlicher Zement) aufzuwenden waren und den teilweisen dennoch erforderlichen Einsatz von Spritzhilfen, wurde der PSZ 400 zwar noch für die Innenschale des Druckstollens des Kraftwerkes Heinfels [24] verwendet, weitere Anwendungen im Zusammenhang mit Spritzbeton für den Tunnelbau sind in der Literatur jedoch nicht erwähnt. Ein "echtes" Spritz-Bindemittel, welches ein Erstarrungsverhalten bzw. eine Festigkeitsentwicklung wie konventionell beschleunigter Spritzbeton hat, stand zu diesem Zeitpunkt somit noch nicht zur Verfügung.

In Österreich wurde im Tunnelbau erstmals im Jahre 1993 beim Bau des Straßentunnels Umfahrung Nassereith die alkalifreie Erstarrungsbeschleunigung im Sinne der neuer Richtlinie Spritzbeton des ÖBV angewendet. Zur Herstellung des Spritzbetons wurde ein alkalifreier Erstarrungsbeschleuniger in Verbindung mit einem erdfeuchten Mischgut verwendet. Die Anwendung erfolgte wegen einer Quelle die sich im Bereich des Nordportals befindet. Zur damaligen Zeit stand der alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger nur in pulveriger Form zur Verfügung. Parallel dazu wurden Versuche in großtechnischem Maßstab mit einem Spritz-Bindemittel in Verbindung mit ofentrockenen Zuschlägen zur Herstellung des Spritzbetons auf dieser Baustelle durchgeführt die sehr erfolgreich verliefen. Diese Versuche mit dem ofentrockenen Mischgut zeigten jedoch auch die Problematik der Staubentwicklung zu der dieses

Verfahren bei der Verwendung von üblichen Rotor-spritzmaschinen neigt.

Kurz nach der Fertigstellung des Tunnels Nassereith wurde im Jahre 1994 beim Bau des Zammer Tunnels der ÖBB beim Westvortrieb ein Spritzbindemittel in Zusammenhang mit erdfeuchten Zuschlägen verwendet. Für das Mischen und Dosieren von Zuschlag und Spritz-Bindemittel wurde eine spezielle Anlage entwickelt die diese Vorgänge vor Ort im Tunnel ermöglichte um die kurze mögliche Verarbeitungszeit von ca. 2 Minuten einhalten zu können.

Im Ostvortrieb wurde das Naßspritzverfahren unter Beigabe eines pulverförmigen alkalifreien Erstarrungsbeschleunigers verwendet. Die Zudosierung des pulverförmigen Erstarrungsbeschleunigers erfolgte mittels einer kleinen Spritzmaschine über ein Hosenrohr in den Materialstrom des Naßmischgutes. Diese Lösung der Zugabe des pulverigen alkalifreien Erstarrungsbeschleunigers funktionierte zwar, war aber keine befriedigende Lösung und wurde daher nicht mehr weiterverfolgt.

Mit beiden Verfahren konnten sehr erfolgreich ein qualitativ hochwertiger Spritzbeton hergestellt werden. Minderfestigkeiten konnten praktisch ausgeschlossen werden. Die erzielten Endfestigkeit betrug etwa das 2-fache des geforderten Wertes.

Bei Bau des Lainbergtunnels im Jahre 1996 wurde erstmals in großem Umfang der Spritzbeton aus Trockenmischgut (Spritz-Bindemittel mit ofentrockenen Zuschlägen) hergestellt (Feuchtegehalt max. 0,2 %). Das Trockenmischgut wurde mit einer Mischanlage mit einer Trocknungsanlage für die Zuschläge vor dem Tunnelportal auf der Baustelle hergestellt. Die Baufirma entwickelte die sogenannten "Spritzbomber" in Anlehnung einer Entwicklung in Deutschland. Mit diesen fahrbaren "Spritzmaschinen" ist eine Verarbeitung des ofentrockenen Mischgutes in einem abgekapselten System möglich und somit das Problem der Staubentwicklung bei Umschlagvorgängen bzw. an der Spritzmaschine gelöst. Versuche mit einer Vorberetzungsdüse zur Staubreduktion beim Spritzvorgang an der Düse wurden bereits durchgeführt, scheiterten aber am zu schnell reagierenden Spritzbindemittel.

Für den Bau des Pilotstollens Semmering entwickelte die Firma Porr Tunnelbau eine gleisgebundene Spritzbetonanlage für die Herstellung von Spritzbeton mit Spritz-Bindemitteln und erdfeuchten Zuschlägen. Aus dieser Anlage heraus wurden die weiteren Spritzbetonanlagen für die Tunnel Wachberg, Melk, Umfahrung Landeck Nord usw. entwickelt,

die in weiterer Folge eine gravimetrische Dosierung und automatische Aufzeichnung des gesamten Spritzvorgangs ermöglichte (Mengenverbrauch, Spritzzeiten).

Beim Bau des Tunnels Umfahrung Landeck wählte die ARGE des Südvortriebes das Spritzbetonverfahren mit ofentrockenen Zuschlägen und Spritz-Bindemittel. Nach anfänglichen Schwierigkeiten mit der Staubeentwicklung und hohem Rückprall des Spritzbetons konnte in Zusammenarbeit mit dem Spritzbindemittelhersteller ein neues Spritz-Bindemittel entwickelt werden, das eine Vorbenetzung des Mischgutes ermöglichte. In Verbindung mit einer spezielle Düse (Testor-Düse) die am Institut für Baustofflehre und Materialprüfung der Universität Innsbruck entwickelt wurde, konnte die Staubeentwicklung beim Spritzvorgang entscheidend reduziert werden. Eine weitere Entwicklung auf dieser Baustelle war die Zugabe von Bentonit zum Anmachwasser als Rückprallminderer. Dies führte zu einer Reduktion des Rückpralls um fast 50 %. Die in unregelmäßigen Abständen auftretenden Entmischungsprobleme konnten jedoch nicht gänzlich beseitigt werden.

Die Spritz-Bindemittelverfahren, in Verbindung mit ofentrockenen oder erdfeuchten Zuschlägen, verdrängten in den Jahren 1994 bis 1999 das konventionelle Trockenspritzverfahren in Verbindung mit Erstarrungsbeschleunigern.

Beim den Spritz-Bindemittelverfahren führte eine laufende Weiterentwicklung der Technik zu einer wesentlichen Verbesserung der Schwachstellen der beiden Verfahren. Beim Verfahren mit Trockenmischgut (ofentrockene Zuschläge) konnte der Rückprall und die Staubeentwicklung wesentlich reduziert werden. Bei der Problematik der Entmischungstendenz des Mischgutes konnte jedoch noch kein entscheidender Durchbruch erzielt werden. Bei der Anwendung des Verfahrens mit feuchtem Mischgut (erdfeuchten Zuschlägen) konnte die erforderliche maschinelle Einrichtung weiterentwickelt werden. Die Hersteller der Spritz-Bindemittel konnten aufgrund der zahlreichen Anwendungen in den letzten Jahren ausreichend Erfahrung sammeln, um die zielsichere Herstellung der Spritz-Bindemittel zu garantieren.

Die Entwicklung von flüssigen alkalifreien Erstarrungsbeschleunigern führte 1998 beim Bau des Siebertunnels zu einer Wiederbelebung des Naßspritzverfahrens in Österreich das bis zu diesem Zeitpunkt nur vereinzelt angewendet wurde (Zammer Tunnel - Ostvortrieb). Weitere Anwendungen dieses Verfahren wie zum Beispiel am Blisadonatunnel sind zu erwarten.

3. Die Entwicklung der Gerätetechnik

Die letzten 30 Jahre wurden dominiert vom klassischen Trockenspritzverfahren auf Basis einer Ausgangsmischung aus naturfeuchten Zuschlägen, Zement und der Verwendung eines Beschleunigers. In jüngster Zeit haben aber die zwei Trockenspritzverfahren in Verbindung mit Spritz-Bindemitteln und das Naßspritzverfahren den Markt erobert.

Das klassische Trockenspritzverfahren hat sich seit der Einführung der Rotorspritzmaschine im Jahr 1957 im Kern nicht verändert. Die Rotorspritzmaschinen wurden nur im Detail (z.B. Reibplattenschmierung, automatische Vorspannung) verbessert. Eine Neuentwicklung auf der Basis einer Zellradschleuse konnte sich bisher nicht auf breiter Front durchsetzen.

Entscheidende Entwicklungen gab es bei der Düsentechnik und bei der Beschleunigerzugabe, beginnend beim Einsatz von Pulverdüse, bis zur exakt geregelten Zugabe von flüssigen Erstarrungsbeschleunigern.

Seit 1994 gibt es ein tunneltaugliches Trockenspritzverfahren auf Grundlage eines werksgemischten Fertigproduktes, das auch die Beschleunigerwirkung beinhaltet. Basis dieses Verfahrens sind ofentrocknete Zuschläge und eine geschlossene Transportkette in Silofahrzeugen bis zur Ortsbrust. Der Transport auf der Baustelle erfolgt mit Druckkesseln, die zusammen mit Blasschnecken die Spritzbetonförderung zur Spritzdüse ermöglichen (Spritzbomber). Die großen Entmischungs-, Staub- und Rückprallprobleme können mit Zusatzmaßnahmen beherrscht werden.

Die Forderung nach einer alkalifreien Spritzbetonbeschleunigung führte 1994 zur Entwicklung von speziellen Spritz-Bindemitteln mit eingebauter Beschleunigung. Diese Bindemittel haben eine Reaktionszeit von um die 2 Minuten. Bei Einsatz von naturfeuchten Zuschlägen (Feuchtigkeit max. 5 %) darf zwischen dem Zusammenführen von Bindemittel und Zuschlägen und dem Auftreffen des Spritzbetons auf die Wand nur ein Zeitraum von maximal einer Minute liegen. Dies erforderte die Entwicklung von tunneltauglichen kontinuierlich arbeitenden und bewegbaren Mischanlagen.

Es gibt heute ein- bis dreibahnige Anlagen auf Schlitzen oder auf Raupen. Auf Wunsch sind die Anlagen ferngesteuert von einem Steuerpult an der Ortsbrust zu bedienen. Für die unterschiedlichen Einsatzbereiche Kalotte, Strosse und Sohle können angepaßte Spritzbetonrezepturen abgerufen werden. Das Trockenspritzverfahren mit Spritz-Bindemittel und natur-

feuchten Zuschlägen wird hauptsächlich in Österreich und auch in Deutschland eingesetzt. Es hat aber auch schon in traditionellen Naßspritzländern, wie in der Schweiz, großes Interesse hervorgerufen.

Ab 1984 wurde beim Vortrieb der großen Querschnitte für die Neubaustrecken der Deutschen Bahn zunehmend Naßspritzbeton mit Wasserglas als Spritzhilfe eingesetzt. Zuerst kamen Schneckenpumpen und in der Folge Kolbenpumpen zum Einsatz, mit denen in der letzten Entwicklungsstufe Leistungen bis 20 m³ je Stunde und Düse beim Spritzen über Kopf erzielt wurden. Die hohe Alkalität des Wasserglasspritzbetons und der durch die Wasserglasbeigabe verursachte große Festigkeitsabfall bewirkten schließlich den Verzicht auf dieses Verfahren, welches in Österreich wegen genau dieser Nachteile nie zum Einsatz kam.

Seit kurzem stehen alkalifreie flüssige Erstarrungsbeschleuniger für Naßspritzbeton zur Verfügung. Es werden damit Leistungen von über 12 m³ pro Stunde im Kalottenbereich erzielt. Die großen Spritzleistungen, die geringe Staubentwicklung und der geringe Rückprall haben auch in Österreich einen Durchbruch des Naßspritzens bewirkt.

Wegen der hohen Spritzleistung und wegen des hohen Gewichtes der gefüllten Förderleitung muß beim Naßspritzen ein mechanischer Spritzarm verwendet werden. Dies ist ein sehr positiver Beitrag zur Arbeitsplatzqualität und zur Sicherheit der Spritzmannschaft.

Bei den Trockenspritzverfahren kommen solche Spritzarme nur selten zum Einsatz, da die wesentliche geringere Spritzleistung von 5 - 6 m³ pro Stunde und Düse keinen wirtschaftlichen Einsatz erlaubt. Bei der angestrebten Erhöhung der Spritzleistung auf ca. 8 m³ pro Stunde und Düse wäre der Einsatz von Spritzarmen notwendig und auch wirtschaftlich zu rechtfertigen.

4. Ausblick

Die weitere Entwicklung der Spritzbetonverfahrenstechnik wird im Hinblick auf das Trockenspritzverfahren von der Technik der Verwendung von Spritz-Bindemitteln geprägt sein. Beim Verfahren mit den ofentrockenen Zuschlägen wird vor allem die Reduzierung der Entmischungen und die weitere Reduzierung der Staubsituation, sowie eine weitere Verminderung des Rückpralls im Vordergrund stehen. Beim Verfahren mit den erdfuchten Zuschlägen zeichnet sich eine Entwicklung in Richtung einer Kombination des Trocken- mit dem Naßspritzverfahren ab.

Der Entwicklungsschub in der Spritzbetontechnologie seit Beginn der 90er Jahre befindet sich beim Trockenspritzverfahren derzeit in einer Konsolidierungsphase, die erst mit dem Durchbruch in Richtung kombiniertes Trocken-, Naßspritzverfahren durchbrochen werden wird.

Das Naßspritzverfahren erlebt derzeit durch die Entwicklung der flüssigen alkalifreien Erstarrungsbeschleuniger einen starken Aufschwung. Die Weiterentwicklung dieser Technologie ist jedoch stark von der Verbesserung der Erstarrungsbeschleuniger in Hinblick auf Empfindlichkeit bei Wassergehaltsschwankungen im Naßmischgut abhängig.

5. Literatur

- [1] **Detzhofer, H.:**
Die Stollenarbeiten für das Innkraftwerk Prutzlmst der Tiroler Wasserkraftwerke. Montan-Rundschau (1960), Sonderheft Tunnel- und Stollenbau. Seite 137-138.
- [2] **Lauffer, H.:**
Die neue Entwicklung der Stollenbautechnik. Österreichische Ingenieurzeitschrift 3 (1960). Seite 19.
- [3] **Seeber, G.:**
Entwicklung und derzeitiger Stand der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NATM). In: Österreichische Wasserwirtschaft. 31 (1979), Heft 516, Seite 116.
- [4] **Detzhofer, H.:**
Erfahrungen bei der Sicherung von Stollenausbrüchen in gebrochen und druckhaften Gebirgsstrecken. Felsmechanik (1969), Seite 166.
- [5] **Rabcewicz, L. v.:**
Aus der Praxis des Tunnelbaues; Einige Erfahrungen über echten Gebirgsdruck. Geologie und Bauwesen, 27 (1962), Nr. 314, Seite 163-164.
- [6] **Rabcewicz, L. v.:**
Gebirgsdruck und Tunnelbau. Springer-Verlag 1944.
- [7] **Rabcewicz, L. v.:**
Die neue Österreichische Tunnelbauweise. Der Bauingenieur 40 (1965) Nr. 8, Seite 295.
- [8] **Rabcewicz, L. v.:**
Stability of tunnels under rockload. Water Power (1969).

- [9] Rabcewicz, L. v.; Pacher, F.:
Die Elemente der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise und ihre geschichtliche Entwicklung. In: ÖIZ 18 (1975), Nr. 9, Seite 319.
- [10] Huber, H.:
Die Entwicklung des Spritzbetons für den Tauern-Tunnel Österr. Bauzeitung, Heft 3, 1973.
- [11] Huber, H.:
Die Verwendung von Flugasche bei der Betonherstellung im Kraftwerks- und Tunnelbau. Zement und Beton, Heft 4, 1978.
- [12] Huber, H.:
Die Betontechnologie des Arlbergtunnel West. Mayreder Zeitschrift, 1978.
- [13] Huber, H.:
Neue Entwicklungen bei Spritzhilfen. Zement und Beton, Heft 3, 1981.
- [14] Lukas, W., Huber, H.:
Sulfatbeständiger Spritzbeton von Straßentunnelauskleidungen. Straßenforschung, Heft 192, 1982.
- [15] Huber, H.:
Gegenüberstellung des Trocken- und Naßspritzverfahrens aus der Sicht des Praktikers. Fachtagung Spritzbetontechnologie, BMI, Innsbruck Igls, 1985.
- [16] Huber, H.:
Der Stand der Spritzbetontechnologie. Zement und Beton, Heft 1, 1986.
- [17] Deix, F.:
U6/1 Pottendorfer Straße. "Der Aufbau". Heft 5, 1984.
- [18] Jodl, H.G.:
U6/1 - Baustelleinrichtungen Spritzbeton. "Der Aufbau", Heft 5, 1984.
- [19] Kusterle, W.:
Ein kombiniertes Verfahren zur Ermittlung der Frühfestigkeit von Spritzbeton. Beton und Stahlbetonbau, Heft 79, 1984.
- [20] Institut für Baustofflehre und Materialprüfung:
Spritzbeton-Technologie, Internationale Fachtagung Innsbruck/Igls, Jänner 1985.
- [21] Huber, H.:
Entwicklungen und Perspektiven der Betontechnik beim Bau großer Tunnels in Österreich. Zement und Beton, Heft 2, 1992.
- [22] Huber, H., Gantner, J., Kusterle, W.:
Spritzbeton mit alkalifreier Erstarrungsbeschleunigung. Zement und Beton, Heft 1, 1994.
- [23] Pichler, W., Huber, H.:
Die Technologie des umweltneutralen Spritzbetons. Schriftreihe des ÖBV, Heft 30. 1997.
- [24] Werthmann, E.:
Auskleidung des Druckstollens Heinfels mit hochfestem Spritzbeton. Zement & Beton 4/90, Seite 8-9.